



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Betões com incorporação de agregados cerâmicos reciclados

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Civil

Celso Rafael Frias Pinto

Leiria, Julho de 2015



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Betões com incorporação de agregados cerâmicos reciclados

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Civil

Celso Rafael Frias Pinto

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Paulo Fernandes, Professor
Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Julho de 2015

Dedico esta dissertação

aos meus pais, com muito amor.

Agradecimentos

Uma dissertação é a realização de um trabalho que marca o terminar de uma etapa intermédia na vida do mestrando. É, em especial, o culminar de um período de aprendizagem dependente dos ensinamentos dos Professores com quem tive o prazer e o benefício de aprender nas aulas e nos momentos de interação individual. Mas, é também o terminar de uma fase de aprendizagem direcionada para a resolução de uma dúvida, uma questão de pesquisa em que, sob a orientação de um Professor orientador, procuramos resposta para o problema. Assim, o término do mestrado não pode deixar de ser um momento especial enquanto é, igualmente, de transição para novos projetos.

Há um número de pessoas que me foram essenciais neste percurso a quem quero manifestar o meu apreço e agradecimento pessoal. Certamente uma primeira palavra ao Professor Doutor Paulo Fernandes que me guiou sabiamente nesta etapa e me proporcionou a aprendizagem “hands on”. Um agradecimento também aos professores do Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas, no seu conjunto, uma palavra final de apreço pelos ensinamentos: Prof. Doutor Luís Carlos Prola, Prof^a Doutora Helena Bártolo, Prof. Doutor João Pedro Silva, Prof. Doutor Ricardo Gomes, Prof. Doutor Fernando Cruz, Prof. Doutor João Ramos, Prof. Doutor Florindo Gaspar, Prof^a Doutora Sandra Mourato, Prof. Doutor Pedro Santos, Prof^a Doutora Luísa Gonçalves, Prof. Doutor Miguel Santos e Prof. Doutor João Veludo.

À Engenheira Vânia Gomes, pela disponibilidade e interesse que demonstrou durante todo o meu percurso de trabalho nos laboratórios, o meu mais sincero obrigado.

Existiu o apoio de uma empresa em particular, a Eco Demo – Demolições Ecologia e Construção SA, na pessoa do Nelson Santos pelo fornecimento gratuito dos materiais reciclados cerâmicos originários de demolição, sem o qual não seria possível a elaboração deste trabalho e pelo seu apoio incondicional, o meu muito obrigado.

A experiência com os colegas que como eu estudaram nesta edição do Mestrado foi ótima porque as discussões geradas e o companheirismo foi uma constante, e merecem um agradecimento, em particular atenção à Sandra Rito e João Batista pela troca de conhecimento em toda a elaboração deste estudo.

Aos meus pais, Manuel Pinto e Otilia Pinto, e à minha irmã Cláudia Pinto, por serem uma presença constante na minha vida, dando-me amor, carinho e apoio incondicionais. São um pilar fundamental na minha vida.

Ao meu cunhado Manuel Portugal Ferreira pelo seu apoio e motivação para uma constante evolução pessoal e académica.

À Fátima Silva, com quem partilho as alegrias e tristezas. Obrigada por me incentivares sempre a ser melhor e a dar o melhor de mim.

A todos, um muito obrigado!

Resumo

Observa-se atualmente uma preocupação crescente com a preservação dos recursos naturais, a gestão e controlo da sua extração do meio ambiente. A crescente produção de resíduos de construção e demolição (RCD) e os constrangimentos ambientais que isso acarreta, é cada vez mais um problema com proporções a nível mundial. A vontade de contribuir com uma solução para este problema originou a realização deste estudo, focado na avaliação da viabilidade da reutilização dos RCD cerâmicos como agregados no fabrico do betão.

A literatura já existente sobre o fabrico de betão com RCD cerâmicos, revelou que os agregados reciclados cerâmicos (ARC) quando substituídos em grande quantidade no betão, originam uma diminuição na resistência do betão, quando comparado com um betão constituído apenas com agregados naturais (AN). Contudo existe uma lacuna na literatura no que respeita a betões realizados com substituição abaixo dos 25% de AN por ARC. Nesta dissertação realizou-se um estudo experimental destinado a apresentar a trabalhabilidade e a resistência à compressão de betões, quando estes são realizados com uma substituição de ARC de 10, 15% e 20% nos AN da sua composição.

Os resultados deste estudo mostraram que betões com incorporação de ARC com taxa de substituição de 20% e associados a uma relação água/cimento calculada com base em três critérios, apresentam bons valores, tanto quanto à trabalhabilidade como à resistência à compressão. Estes resultados permitiram concluir a viabilidade da utilização em obra de betões com ARC como substitutos do betão convencional. Este estudo tem uma contribuição teórica e prática para a área de Engenharia Civil.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição, betão, resistência à compressão, trabalhabilidade, agregados reciclados cerâmicos.

Abstract

Presently there is a growing concern for the preservation of the natural resources, management and control of their extraction of the environment. The increasing production of waste from construction and demolition and the environmental problems, it is becoming a problem with worldwide proportions. The desire to contribute to a solution gave this study, the viability of apply recycled ceramic aggregates (ARC) such as aggregate in concrete manufacture.

In the existing literature on the subject, revealed that the ceramic recycled aggregates, when replaced in the concrete in large quantities, lead to a decrease in concrete resistance when compared with concrete containing only natural aggregates (AN) in their constitution. However there is a gap in the literature regarding the concretes made with substitution below 25% by AN for ARC. This dissertation realized an experimental study to present the consistence and compressive strength of concrete, when they are made with a ARC replacement 10, 15% and 20% in the AN of his composition.

The results of this study demonstrated that concrete made with incorporation of ARC with 20% substitution rate associated with water / cement ratio based on three concepts have acceptable values, in consistence both in compressive strength. These results allowed also conclude that it is viable using concrete with ARC. This study has a theoretical and practical contribution to the area of civil engineering.

Keywords: construction and demolition waste, concrete, compressive strength, consistence, ceramic recycled aggregates.

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Densidade de pedreiras em Portugal Continental. adaptado de: Pereira A.R. [14]	2
Figura 1.2 – SORGILA – Sociedade de argilas, S.A.	2
Figura 1.3 – IMOSA – Industrias Mineiras do Mondego S.A.	3
Figura 1.4 – IGEROBRIITA, S.A. – Produtora de agregados	3
Figura 1.5 – SICOBRIITA – Extração e Britagem de Pedra, S.A.	3
Figura 1.6 – RCD de uma obra da Eco Demo – Demolições Ecologia e Construção S.A.	5
Figura 3.1 – Agregados naturais utilizados no betão realizado no estudo: a) Areia; b) Brita média; c) Brita grossa	18
Figura 3.2 – Britadeira utilizada para a britagem da telha	18
Figura 3.3 – Telha utilizada.....	19
Figura 3.4 – Telhas a serem trituradas pelas maxilas da britadeira	19
Figura 3.5 – Material cerâmico reciclado britado a sair da britadeira	19
Figura 3.6 – Crivos: a) Malha 12,5mm; b) Malha 6,3mm; c) Malha 4mm	20
Figura 3.7 – Agregados reciclados cerâmicos utilizados no betão realizado no estudo: a) Agregado (C); b) Agregado (B); c) Agregado (A)	21
Figura 3.8 – Peneiros utilizados na análise granulométrica	21
Figura 3.9 – Peneirador mecanico do Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação.....	22
Figura 3.10 – Picnómetro com agregado submerso em água desmineralizada.....	26
Figura 3.11 – Picnómetros no tanque em “banho-maria”	26
Figura 3.12 – Estufa utilizada para a secagem do agregado	27
Figura 3.13 – Realização da amassadura na misturadora: a) Brita grossa; b) Brita média; c) Areia; d) Agregado cerâmico; e) Cimento portland; f) Água + adjuvante	31
Figura 3.14 – Provetes.....	32
Figura 3.15 – Provetes submersos no tanque	33
Figura 3.16 – Cone de Abrams	34
Figura 3.17 – Prensa de betão	35
Figura 3.18 – Provetes depois do teste de compressão	35

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Resultados dos testes da absorção de água dos agregados. Adaptado de: Alves et al [1]	8
Quadro 2.2 – Resultados dos testes da absorção de água dos agregados. Adaptado de: Gomes [10]	8
Quadro 2.3 – Relações A/C utilizadas em cada mistura de betão com diferentes percentagens de ARC. Adaptado de: Alves et al [1]	12
Quadro 2.4 – Massa volúmica aparente dos AN e dos ARCF. Adaptado de: Vieira [21].....	14
Quadro 3.1 – Análise granulométrica	22
Quadro 3.2 – Análise granulométrica do agregado (B), agregado (C) e de MARC.....	23
Quadro 3.3 – Análise granulométrica de MARC e da areia	23
Quadro 3.4 – Absorção de água dos ARC.....	26
Quadro 3.5 – Água existente nos AN	27
Quadro 3.6 – Composição dos sete betões realizados	30
Quadro 4.1 – Resultados do ensaio de abaixamento	38
Quadro 4.2 – Resultados do teste de resistência à compressão	39

Índice de Gráficos

Gráfico 2.1 – Resistência à compressão em função dos teores de substituição do AN por ARCF ou ARCG, para relações A/C iguais a 0,46, 0,60 e 0,74. Adaptado de: Cabral et al [4].....	12
Gráfico 2.2 – Resistência à compressão de todos os betões com diferentes percentagens de ARC em função da idade. Adaptado de: Alves et al [1].....	13
Gráfico 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados.....	24
Gráfico 3.2 – Comparação entre as curvas granulométricas das misturas usadas com as dos AN.....	25
Gráfico 3.3 – Curva de referência e curva granulométrica real do betão com AN	30
Gráfico 4.1 – Resultados do ensaio de abaixamento	37
Gráfico 4.2 – Relação da resistência do betão com a idade.....	40
Gráfico 7.1 – Curva granulométrica da areia	49
Gráfico 7.2 – Curva granulométrica da brita média	50
Gráfico 7.3 – Curva granulométrica da brita grossa.....	51
Gráfico 7.4 – Curva granulométrica do agregado (C).....	52
Gráfico 7.5 – Curva granulométrica do agregado (B).....	53
Gráfico 7.6 – Curva granulométrica do agregado (A).....	54
Gráfico 7.7 – Curva granulométrica do agregado MARC	55
Gráfico 7.8 – Relação da resistência do betão de referência com a idade	65
Gráfico 7.9 – Relação da resistência do betão com areia + 10% de MARC com a idade	65
Gráfico 7.10 – Relação da resistência do betão com areia + 15% de MARC com a idade	66
Gráfico 7.11 – Relação da resistência do betão com areia + 20% de MARC com a idade	66
Gráfico 7.12 – Relação da resistência do betão com brita média + 10% de (A) com a idade	67
Gráfico 7.13 – Relação da resistência do betão com brita média + 15% de (A) com a idade	67
Gráfico 7.14 – Relação da resistência do betão com brita média + 20% de (A) com a idade	68

Índice de Equações

Equação A – Valor da resistência à compressão de várias misturas de agregados reciclados.....	11
Equação B – Fórmula fundamental da composição do betão.....	28
Equação C – Somatório dos volumes dos agregados	28
Equação D – Volume dos constituintes sólidos do betão	28
Equação E – Volume absoluto dos constituintes fluidos do betão	28
Equação F – Volume absoluto da pasta ligante.....	29
Equação G – Volume absoluto da argamassa	29

Lista de Siglas

A/C – Relação água/cimento;
AG – Agregados grossos;
APA – Agência Portuguesa do Ambiente;
AN – Agregados naturais;
ANF – Agregados naturais finos;
ANG – Agregados naturais grossos;
AR – Agregados reciclados;
ARBG – Agregados reciclados betão grossos;
ARC – Agregados reciclados cerâmicos;
ARCF – Agregados reciclados cerâmicos finos;
ARCG – Agregados reciclados cerâmicos grossos;
ARF – Agregados reciclados finos;
ARG – Agregados reciclados grossos;
ARM – Agregados reciclados médios;
ARSF – Agregados reciclados de louça sanitária finos;
ASTM – American Society for Testing and Materials;
DEC – Departamento de Engenharia Civil;
ESTG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão;
IPL – Instituto Politécnico de Leiria;
LEBA – Laboratório de Estruturas e Betão Armado;
LGVC – Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação;
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
MARC – Mistura de agregados reciclados cerâmicos;
NP – Normas Portuguesas;
RCD – Resíduos de construção e demolição;
RS – Resíduos sólidos;

UNEP – United Nations Environment Programme.

Índice

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XV
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE	XXI
I. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Estrutura e organização do trabalho	6
II. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 Propriedades dos agregados reciclados cerâmicos	7
2.1.1 Resistência à compressão	7
2.1.2 Absorção de água	7
2.2 Propriedades do betão em estado fresco	8
2.2.1 Teor de água.....	9
2.2.2 Massa volúmica	9
2.2.3 Trabalhabilidade.....	9
2.3 Propriedades do betão com agregados reciclados cerâmicos em estado endurecido	10
2.3.1 Absorção de água por capilaridade.....	10
2.3.2 Absorção de água por imersão.....	11
2.3.3 Resistência à compressão	11
2.3.4 Resistência à tração.....	13
2.3.5 Massa volúmica	14
2.3.6 Retração	15
2.3.7 Módulo de elasticidade	15
2.4 Conclusões	15
III. ESTUDO EXPERIMENTAL	17
3.1 Caracterização dos agregados.....	17

3.1.1 Recolha dos agregados cerâmicos	18
3.1.2 Divisão e análise granulométrica	20
3.1.3 Curva granulométrica	24
3.1.4 Absorção de água.....	25
3.1.4.1 Método do picnómetro.....	25
3.1.5 Teor de água	27
3.2 Composição do betão.....	28
3.2.1 Cálculo do betão de referência.....	28
3.2.1.1 Dados	29
3.2.2 Amassadura	30
3.2.3 Designação dos provetes	32
3.2.4 Condição de cura dos provetes.....	32
3.3 Testes.....	33
3.3.1 Ensaio de abaixamento	33
3.3.2 Resistência à compressão	34
IV. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	37
4.1 Ensaio de abaixamento.....	37
4.2 Resistência à compressão.....	38
V. CONCLUSÕES	41
5.1 Conclusões finais	41
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	42
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
VII. ANEXOS	47
7.1 Curvas granulométricas dos agregados.....	49
7.2 Composição dos vários betões	57
7.3 Gráficos da evolução da resistência na idade do betão	65

I. *Introdução*

1.1 Enquadramento

A natureza fornece elementos, que através da evolução humana vieram mostrar-se de grande utilidade e valor, esses recursos naturais ajudaram na evolução e desenvolvimento da sociedade. Durante essa evolução percebeu-se que existem os recursos renováveis e os não-renováveis, sendo os não-renováveis impossíveis de recuperar a curto prazo, independentemente da interferência humana.

As Nações Unidas (UNEP 2002), através do seu Programa Ambiente consideraram essencial priorizar, o melhoramento da gestão dos recursos naturais de forma sustentável e tomar medidas, de forma a conservar os ainda existentes no mundo (Pereira et al [17]). Tome-se como exemplo os recursos naturais em Portugal. Pode-se constatar, através de uma análise à Figura 1.1, que os recursos geológicos em Portugal encontram-se desigualmente repartidos em todo o seu território, estando mais concentrados no litoral do país. De fato a exploração desses recursos, só em 2000 rendeu mais de 800 milhões de euros (Pereira et al [17]).

Os recursos não renováveis e a sua extração devem ser pensados com muita moderação, para que os recursos ainda existentes perdurem por gerações. A extração excessiva dos recursos não renováveis provoca vários problemas ambientais. Por exemplo, a extração excessiva de areia provoca alterações na paisagem como se verifica nas Figuras 1.2 e 1.3. Veja-se que, onde antes era pinhal, atualmente é um espaço sem vegetação, com veios de água subterrânea que através da extração da areia adjacente, sofreram rutura, tornando a sua água não potável.

Outros exemplos de problemas ambientais são a destruição da fauna, a destruição do habitat natural das espécies existentes na zona de exploração, a alteração e destruição da paisagem, a poluição do ar e sonora, sendo tudo devido à extração dos agregados naturais (AN). As Figuras 1.4 e 1.5 ilustram alguns dos problemas decorrentes da extração de brita. Estas extrações de brita ainda continuam a decorrer na região centro do país.

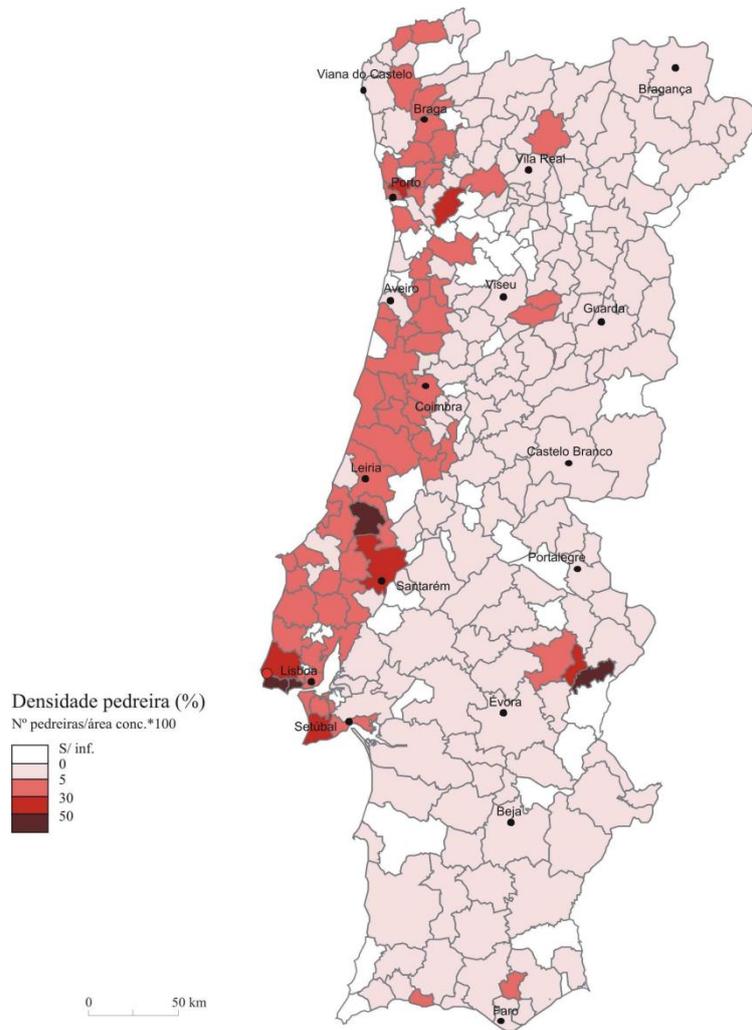


Figura 1.1 – Densidade de pedreiras em Portugal Continental. Adaptado de: Pereira A.R. [14]



Figura 1.2 – SORGILA – Sociedade de argilas, S.A.



Figura 1.3 – IMOSA – Industrias Mineiras do Mondego S.A.



Figura 1.4 – IBEROBRIITA, S.A.- Produtora de Agregados



Figura 1.5 - SICÓBRITA – Extração e Britagem de Pedra, S.A.

Uma forma de reduzir o impacto ambiental que as extrações provocam, é a substituição parcial ou total, dos AN que atualmente são utilizados no fabrico do betão, por agregados previamente tratados, provenientes de reciclagem dos materiais resultantes de resíduos em obra, de intervenções de remodelação, manutenção, de demolição de edifícios em fim de vida, de obras de reabilitação ou restauro. Desta forma não só se reduz a extração dos recursos naturais ainda existentes na natureza,

como também se dá atenção a um outro problema, o armazenamento e reutilização dos resíduos de construção e demolição (RCD).

Os RCD têm, na sua constituição, variadíssimos materiais com origens distintas, desde embalagens, a materiais utilizados e/ou aplicados na construção de infraestruturas, obras de arte e em edifícios, como refere a portaria nº 209/2004 da legislação nacional portuguesa emitida a 3 de Março de 2004. No entanto, foi apenas em 25 de Novembro de 1985, que se redigiu o primeiro Decreto-Lei e se criou a obrigatoriedade de registo das quantidades de resíduos produzidas, criando assim um incentivo à sua redução.

A preocupação com as questões ambientais começou a surgir apenas nos finais de século XX. Na conferência internacional que se realizou no Rio de Janeiro em 1992, e que ficou conhecida como ECO 92, vários passos importantes foram dados, como a elaboração do documento Agenda 21. Neste documento, concluiu-se que era necessário efetuar a reciclagem de materiais para ser possível a existência de um sistema de gestão ambiental de resíduos sólidos (RS). Por exemplo, 20% a 50% de todos os recursos naturais são consumidos no sector da construção civil, que por sua vez, originam mais de 50% dos RS (Menezes et al [16]). Atualmente, a produção de RCD no mundo ronda os 0,7 a 1,0 tonelada por cada habitante por ano. De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), atualmente a produção de RCD dos membros da União Europeia, é, em valores estimados, aproximadamente 100 milhões de toneladas por ano. Só Portugal é responsável pela criação de 7,5% desse valor, o que corresponde a 20% dos resíduos totais produzidos no país.

O crescente aparecimento de quantidades de RCD depositados sem controlo, originou constrangimentos ambientais, e tornou necessário o aparecimento de legislação que invertesse este fenómeno. O Decreto-Lei n.º 46/2008 criou a obrigatoriedade de efetuar uma melhor gestão de todos os resíduos que pudessem resultar de obras, demolições, ou até de derrocadas. Anos mais tarde, entrou em vigor o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, que reforça a preocupação em criar legislação e normas que levem a uma divisão por importância dos resíduos e a uma melhor gestão na recolha, transporte, armazenamento, tratamento e eliminação de resíduos. A figura 1.6 mostra os RCD que podem ser criados numa demolição de pequena envergadura.

Devido à quantidade significativa de RCD produzidos, tanto na Europa como em Portugal, é cada vez mais importante tentar encontrar novas formas de reaproveitar todos estes resíduos, ou pelo menos uma percentagem significativa deles. A União Europeia implementou um conjunto de medidas, presentes na Diretiva 2008/98 CE, que visam, até 2020, garantir que cerca de 70% deste tipo de resíduos sejam reutilizados ou reciclados.



Figura 1.6 – RCD de uma obra da Eco Demo – Demolições Ecologia e Construção SA

Neste trabalho focou-se na reutilização em obra de RCD cerâmicos, como agregados no fabrico do betão. Tijolos e telhas são materiais muito utilizados na construção portuguesa e o resíduo nacional produzido em maior quantidade nos RCD, por essa razão torna-se imperativo a criação de novas formas de os reciclar. Neste estudo realizaram-se vários ensaios, de forma a tentar achar a percentagem ideal de substituição, de agregados naturais (AN) por agregados de resíduos da construção (ARC) na formulação de um betão, salvaguardando a sua resistência nominal.

1.2 Objetivos

O trabalho de investigação aqui apresentado, tem como principal objetivo identificar algumas características mecânicas do betão, como a resistência à compressão e a trabalhabilidade, quando este é realizado com a agregação de ARC, tornando-o numa opção viável de reutilização de percentagem dos RCD produzidos em Portugal.

Como já referido, o sector da construção tende a consumir uma quantidade significativa dos recursos naturais ainda existentes mas cada vez mais escassos, uma forma de combater esse consumo é a reutilização de outro dos problemas da construção, a criação de resíduos devido a demolição, que segundo Brito et al [3] foram produzidos só em Portugal 154 808 toneladas de resíduos cerâmicos. Sendo um resíduo muito encontrado, oriundo de vários materiais de construção, desde tijolos, telhas, a materiais decorativos. Encontrar uma solução viável para a redução do resíduo cerâmico da construção e saber através dos autores Torgal et al [22] que se for efetuada a reciclagem dos 80% dos 7,5 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição anuais, poderá criar milhares de postos de trabalho em Portugal, foi o que originou e motivou a existência deste estudo.

Já existe estudos realizados na área como o estudo bibliográfico demonstra, o mais usual é encontrar uma utilização de agregados reciclados cerâmicos em uma grande percentagem, o que já se comprovou, que acaba por não trazer benefícios à sua utilização. Neste estudo argumenta-se a

colocação desses mesmos agregados reciclados cerâmicos, mas numa percentagem mais reduzida, de forma a se tentar compreender, o limite entre o benéfico e o prejudicial na sua utilização, no fabrico de betão corrente.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos: no primeiro efetuou-se uma introdução ao assunto debatido nesta dissertação. No segundo, realizou-se uma revisão bibliográfica, apresentado os principais conceitos e trabalhos publicados sobre a utilização de ARC no fabrico de betão. Em seguida, apresenta-se o estudo experimental, onde se detalhou os procedimentos relativos à recolha, tratamento e compreensão das propriedades dos ARC utilizados, ao calculo e realização do betão testado, e os cuidados a ter na realização dos ensaios realizados. No quarto fez-se a análise e discussão dos resultados. Por último, foram apresentas as conclusões.

Nesta dissertação foi realizado um estudo experimental, desenvolvido sob a orientação e supervisão do Professor Doutor Paulo Fernandes, no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas lecionado na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

O estudo, foi desenvolvido e realizado no Laboratório de Estruturas e Betão Armado (LEBA) e no Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação (LGVC) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) do Instituto Politécnico de Leiria (IPL).

II. Revisão da literatura

Nesta secção apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, com ênfase nos betões novos com ARC, sua influência nas propriedades mecânicas do betão e seu desempenho. Mais especificamente, abordam-se os seguintes assuntos: 1) as propriedades dos agregados reciclados cerâmicos; resistência à compressão; Absorção de água; 2) as propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados cerâmicos em estado fresco; teor de água; massa volúmica; trabalhabilidade; 3) propriedades mecânicas do betão com agregados reciclados cerâmicos em estado endurecido; absorção de água por capilaridade; Absorção de água por imersão; resistência à compressão; resistência à tração; massa volúmica; retração; módulo de elasticidade; e 4) Conclusões. O propósito desta dissertação não é fazer um estudo exaustivo da literatura existente, pelo que os autores referenciados nesta secção, são os considerados mais relevantes e que melhor analisam o fenómeno que foi estudado.

2.1 Propriedades dos agregados reciclados cerâmicos

2.1.1 Resistência à compressão

Para se compreender a resistência da matéria-prima de onde provêm os agregados é usual a condução de ensaios que identifiquem a resistência dos agregados ao esmagamento. Ao analisar os AN e os agregados reciclados de betão (ARB) que utilizou nas suas experiências, Figueiredo [9] constatou que os valores de resistência dos AN eram superiores aos dos ARB, e que, ambos se encontravam abaixo dos 45% de agregado, que passa pelo peneiro de malha com 2,38 mm de abertura, pedidos na especificação do LNEC E373 para agregados grossos. Evangelista [6] realizou apenas ensaio a AN e concluiu que, devido aos valores de resistência muito abaixo dos 45% do ensaio, os agregados têm características mecânicas que possibilitam a sua utilização em betão.

2.1.2 Absorção de água

Alguns estudos, como o de Brito et al. [3] e Alves et al. [1], mostraram que a utilização de agregados reciclados cerâmicos grossos (ARCG) na realização de betão, pode acarretar alguns inconvenientes, nomeadamente a alta absorção de água, que pode rondar os 12,0%.

Quadro 2.1 – Resultados dos testes da absorção de água dos agregados. Adaptado de: Alves et al [1]

Propriedades	Brita 2	Brita 1	"Grão de arroz"	Areia grossa	Areia fina	Agregado cerâmico de tijolo
Densidade (kg/m ³)	2512	2546	2569	2554	2529	1948
Absorção de água (%)	1,7	1,7	1,6	0,6	0,3	12,2
Densidade de carga aparente (Kg/m ³)	1450	1438	1416	1579	1556	1032
Teste de Los Angeles (%)	28,4	25,8	22,7	-	-	-
Índice de formato (%)	14,8	17	17,8	-	-	-

Num estudo sobre a incorporação de ARC no betão, Khatib [12] verificou que os agregados reciclados cerâmicos finos (ARCF) absorveram 14,8% de água. Se compararmos com os 0,8% de absorção de água dos AN, existe uma discrepância considerável de valores. Mansur et al. [15] elaborou um estudo onde comparou a absorção de água dos ARCG e dos agregados naturais grossos (ANG), o autor verificou que, a absorção de água é de 6,1% e 0,7%, respetivamente. Debieb e Kenai [5] mostraram que os ARCF absorvem 14% de água e que os AN absorvem apenas 1,0% de água. Os autores, concluíram que este aumento de absorção de água é devido à elevada porosidade dos agregados reciclados (AR) de tijolo moído. Gomes e Brito [11] analisaram os níveis de absorção de água dos ARC e AN, todos eles grossos, e concluíram que há uma absorção de água de 16,3% e 2,3% respetivamente. O autor Gomes [10] chegou aos mesmo resultados, alguns anos antes, como se pode verificar no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Resultados dos testes da absorção de água dos agregados. Adaptado de: Gomes [10]

	Brita 1	Brita 2	ARBG	ARCG
Absorção de água (%)	2,21	2,29	8,49	16,34

Finalmente, Ferreira et al. [7] testou uma forma de compensar a absorção adicional do ARCG, saturando previamente os ARC antes da sua utilização no fabrico do betão, mas concluiu que esta opção tinha uma influência negativa na durabilidade do betão.

2.2 Propriedades do betão com agregados reciclados cerâmicos em estado fresco

2.2.1 Teor de ar

Analisar a quantidade de ar existente na amassadura ajuda a saber, atempadamente, o comportamento do betão na fase moldável, visto que o ar nessa fase funciona como lubrificante.

Com a introdução de AR, Evangelista [6] considerou que o teor de ar poderá aumentar, apesar de não ter dados concretos em relação a esta propriedade, por falta de resultados fiáveis.

2.2.2 Massa volúmica

O maior valor na determinação da massa volúmica do betão quando fresco, tende a ser o valor dos agregados, já que são os agregados que apresentam o maior volume (Brito [2]).

A autora Rosa [20] demonstra nos resultados que obteve, que a massa volúmica do betão diminui com o aumento de substituição de AR por AN, devido à inferior massa volúmica que o AR apresenta, quando comparado com o AN. Evangelista [6] relatou que ARCF não alteram de modo significativo a massa volúmica do betão em estado fresco, mas existe uma diminuição de massa à medida que a percentagem de ARCF aumenta na constituição do betão estudado. Também Figueiredo [9] verificou essa mesma diminuição de massa volúmica com o aumento de substituição de AN por reciclados. Este autor verificou ainda que os betões com ARCG têm uma massa volúmica de valor inferior ao de betões com agregados reciclados de betão grossos (ARBG).

Por fim, Gomes [10] constatou que, devido à massa volúmica inferior dos ARCG, quanto maior for a substituição AN por reciclados, menor é a massa volúmica do betão fresco.

Assim, da literatura existente sobre a massa volúmica do betão em estado fresco, pode-se concluir que, quanto maior a substituição de AN por ARC, menor será o valor da massa volúmica do betão.

2.2.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do betão depende de vários fatores, como a sua consistência, coesão, relação água/cimento (A/C), viscosidade. Qualquer alteração nas propriedades origina a betões com diferentes

desempenhos, Brito [2] considera que não é admissível comparar betões com trabalhabilidades diferentes, tornando importante conhecer o comportamento de betões com ARC.

Leite [13] refere que a realização do ensaio de onde se retira o valor da trabalhabilidade pode ser efetuado com alguma facilidade quer no local da amassadura do betão, quer no local da sua colocação, ao utilizar o cone de Abrams, sendo a trabalhabilidade do betão proporcional ao abaixamento da amostra de betão colocada no cone.

Brito [2] comparou betões com agregados de granulometria semelhante, um com a totalidade de AN e outro com percentagem de AR na sua composição, ainda que mantendo a mesma relação A/C em ambos, verificou que a absorção de água foi superior no betão com AR, o que originou a uma trabalhabilidade de valor inferior e conseqüentemente uma maior dificuldade no transporte e colocação em obra.

Sendo o tamanho dos agregados importantes nesta questão, Leite [13] verificou que a quantidade de agregados reciclados finos (ARF) adicionados não é relevante quando se utiliza (A/C) com valores superiores a 0,60, não se verificando o mesmo quando os AR são grossos.

Para que a trabalhabilidade nos vários betões produzidos fosse semelhante e se mantivessem entre 80 mm e 100 mm, Gomes [10] nas suas experiências, pré-saturou os ARCG que utilizou nas misturas. O que se mostrou insuficiente para a trabalhabilidade definida, tendo sido necessário aumentar a quantidade de água na amassadura para conseguir os resultados desejados.

2.3 Propriedades do betão com agregados reciclados cerâmicos em estado endurecido

2.3.1 Absorção de água por capilaridade

Gomes [10], estabeleceu uma relação entre a substituição de AN por AR e a sua absorção de água, verificou que a absorção de água aumenta com o aumento da percentagem de agregados substituídos. A absorção de água tende a ser ainda mais elevada quando se substitui os ANG por ARCG. Este incremento de absorção de água existe devido à porosidade interna existente nos ARC. Figueiredo [9] substituiu os agregados naturais (AN) por agregados reciclados (AR) e obteve um aumento de absorção de 146% para betões com ARC, quando comparado com betões com AN.

Rosa [20] comparou a absorção de água por capilaridade com a percentagem adicionada de ARC, e obteve uma relação linear nos resultados. A autora demonstrou preocupação para a possibilidade de redução de durabilidade dos betões com ARC, devido a esse incremento elevado de absorção de água.

2.3.2 Absorção de água por imersão

Os resultados de Gomes [10], tal como os de Figueiredo [9] acerca da absorção por capilaridade, repetem-se para a absorção de água por imersão. Da mesma forma que os da Rosa [20]. O crescimento dos valores de absorção de água por imersão dependem do aumento da percentagem existente de ARCF no betão. Evangelista [6] fez uma substituição de 100% de AN por ARC, e abteve um valor de 45% de absorção, muito superior à percentagem de absorção de betão com AN.

2.3.3 Resistência à compressão

Relativamente à resistência à compressão, Evangelista [6] obteve resultados nos betões com incorporação de AR muito semelhantes aos dos betões com AN. Esta semelhança deve-se ao fato dos AR utilizados serem de betão. Os resultados mostraram que quanto maior a percentagem de substituição de agregados, maior a quantidade de betão na mistura, o que equilibra a porosidade da argamassa. Gomes [10] incorporou apenas ARGB e uma mistura de agregados reciclados de betão e cerâmicos grossos, num máximo de 75% de cerâmicos, e concluiu que não existie variação significativa no valor da resistência. Contrariamente, quando testou betões apenas com ARC, a redução da resistência foi expressiva com o aumento da percentagem de ARC adicionados à mistura. Figueiredo [9] e Rosa [20] obtiveram resultados semelhantes concluindo que os ARC originam uma diminuição de resistência quando comparados com AN. A porosidade dos materiais que compõem o betão, segundo Rocha e Resende [19] influencia a sua resistência à compressão.

Utilizando as diversas relações A/C, com uma variação entre os valores 0,4 e 0,8, e percentagens de substituição de AN por ARC, ARCF e ARCG, com variações 0% de substituição, 50% e 100%, Cabral et al [4] estimou o valor da resistencia à compressão das várias misturas, através da utilização da equação A.

$$f_c = \left(\frac{102,43}{5,38^{a/c}}\right) * [1 - (0,371 * ARCG - 0,138 * ARCF)] \quad (A)$$

Os resultados mostraram uma redução de resistência, quando o valor de substituição de ANG por ARCG aumenta, e um aumento de resistência, na substituição de ANF por ARCF.

No Grafico 2.1, Cabral et al [4] apresentou a influência que a relação A/C pode provocar na resistência do betão, quando sujeito à compressão.

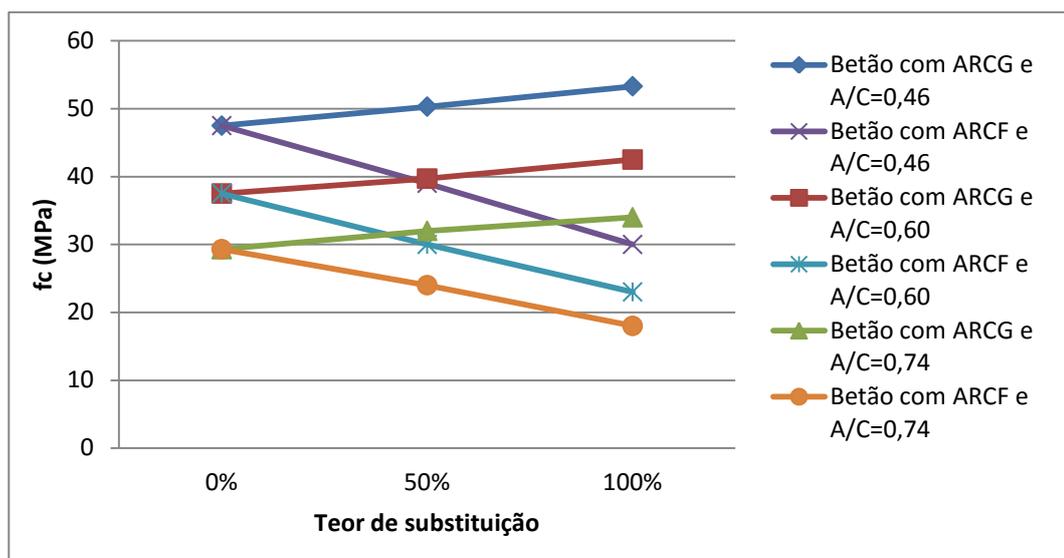


Gráfico 2.1 – Resistência à compressão em função dos teores de substituição do AN por ARCF ou ARCG, para relações A/C iguais a 0,46, 0,60 e 0,74. Adaptado de: Cabral et al [4]

Outro autor que também reajusta a relação A/C consoante a percentagem de substituição de AN por ARC é o Alves et al [1], como se pode verificar no quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Relações A/C utilizadas em cada mistura de betão com diferentes percentagens de ARC. Adaptado de: Alves et al [1]

Mistura	A/C aparente	A/C efetivo
Betão de referência	0,53	0,53
Betão com 20% de ARC	0,56	0,53
Betão com 50% de ARC	0,61	0,53
Betão com 100% de ARC	0,64	0,53

Os testes de compressão, realizados pelos autores Alves et al [1] para as misturas do quadro 2.2, apresentam valores, que demonstram que com o aumento de substituição de AN por ARC de percentagens que variaram de 20%, 50% e 100%, a resistência lida apresenta um decréscimo significativo, como realça o gráfico 2.2.

Vários autores analisaram a resistência à compressão dos ARC. Brito et al. [3] demonstraram que ao substituir os ANG por ARCG, a resistência do betão à compressão decresce de uma forma linear. Segundo os autores isto acontece devido à menor resistência e peso inferior dos ARCG. Num ensaio realizado com betões constituídos por uma determinada percentagem de ARC e betões com percentagem idêntica mas de agregados reciclados de betão (ARB), com idades compreendidas entre 28 a 90 dias, Khatib [12] mostrou que, os betões com ARC apresentam valores superiores de

resistência à compressão, ainda que tenha existido um decréscimo de resistência com a introdução de mais percentagem de ARC.

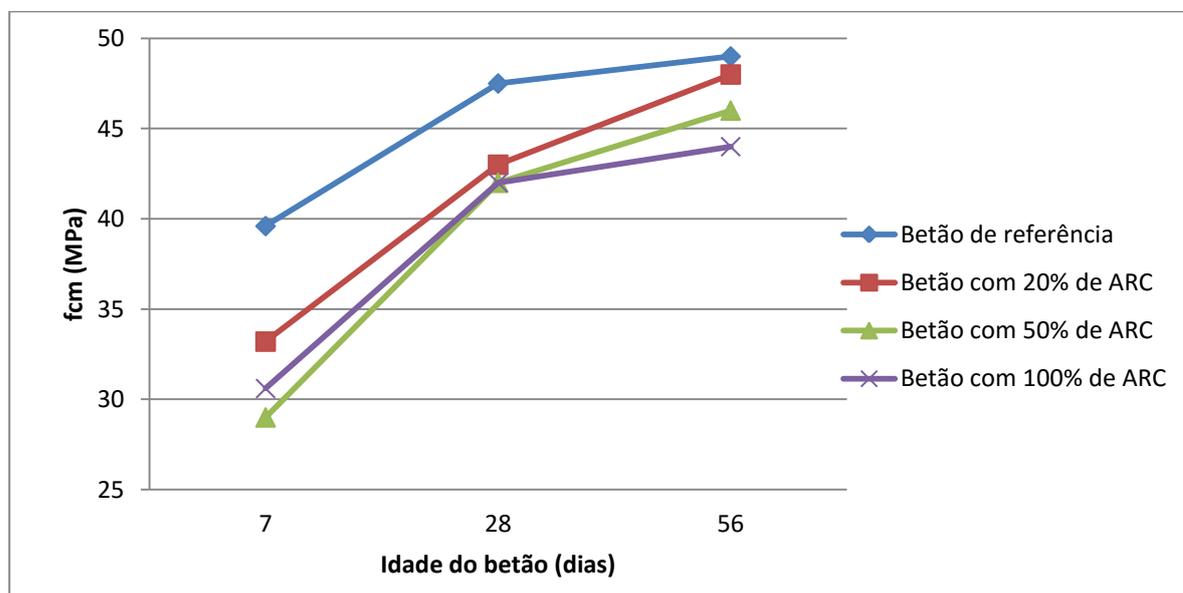


Gráfico 2.2 – Resistência à compressão de todos os betões com diferentes percentagens de ARC em função da sua idade. Adaptado de: Alves et al [1]

Mansur et al. [15] concluíram que o betão convencional tem uma resistência inferior aos betões testados com ARCG. A justificação dos autores incide na superfície mais áspera e angular do ARCG o que provoca melhor aderência do betão numa maior área do agregado.

Tendo como principal foco a maior percentagem de substituição possível de AN por ARCF, Debieb e Kenai [5] relataram que, quanto maior a substituição menor é a resistência à compressão. Por fim Gomes e Brito [11] chegaram à mesma conclusão, da relação de percentagem de agregados com a resistência à compressão.

2.3.4 Resistência à tração

Os resultados de Brito et al. [3] e Gomes e Brito [11] são idênticos no que diz respeito à resistência à tração dos betões com ARC, que por sua vez se repetem quando compararam a resistência à compressão. Os autores verificaram que a resistência tem uma relação direta com a percentagem de ARC inseridos no betão, e que quanto maior a percentagem menor a resistência à tração.

Com uma abordagem focada no betão com ARCG, Mansur et al. [15] constataram que o betão com AN tem uma resistência à tração inferior ao betão testado pelos autores. A justificação dos resultados é igual à dada anteriormente para a resistência à compressão. Finalmente, Debieb e Kenai

[5] obtiveram uma redução de resistência à tração ao aumentarem a percentagem de ARC no betão. Estes resultados foram semelhantes aos obtidos na resistência à compressão, embora os autores estejam cientes que a forma angular e a superfície rugosa do ARC seja um benefício para a sua ligação com a pasta de cimento e que, teoricamente, deveria aumentar a resistência à tração, o que não se constatou.

2.3.5 Massa volúmica

O autor Vieira [21] refere a importancia do conhecimento da massa volumica no cálculo de betões, simplifica e torna mais correcta a adição dos materiais à mistura. Salientou ainda que o valor que se deve ter em conta é o volume das particulas, quando secas no exterior mas saturadas interiormente. É o estado ideal dos agregados no momento da sua adição na amassadura.

Os ensaios realizados por Vieira [21] para compreender a diferenciação entre a massa volúmica aparente AN e dos agregados reciclados cerâmicos finos, apresentaram como resultados uma massa volúmica superior nos AN quando comparados com os valores de agregados reciclados de louça sanitária finos e dos agregados reciclados cerâmicos finos de tijolo. O quadro 2.3 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 2.3 – Massa volúmica aparente dos AN e dos ARCF. Adaptado de: Vieira [21]

	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	ARSF	ARCF
Massa volúmica aparente (kg/dm^3)	1,56	1,58	1,42	1,44	1,45	1,32	1,03

Rocha e Resende [19] evidenciaram que quanto maior a percentagem de substituição de AN por agregados reciclados grossos, menor é a massa volúmica do betão, concluindo que este acontecimento se deve à massa volúmica apresentada pelos AR.

O autor Ribeiro [18] realizou ensaios onde observou que para granulometrias inferiores a 4 mm dos ARC, a absorção de água era elevada e o valor da massa volúmica era baixo, de forma inversa, para granulometrias entre 4 a 31,5 mm a absorção de água foi menor e a massa volúmica mais elevada. O que concluiu, que quanto maior for a massa volúmica das particulas, menor será a absorção de água.

2.3.6 Retração

Evangelista [6] relatou um aumento de retração com o aumento de percentagem de substituição de AN por ARF. O autor, verificou que para 30% de substituição o valor da retração não foi muito

acentuado, o valor só varia significativamente quando a substituição toma valores entre os 50 a 100%. Ainda assim, o autor não conseguiu correlacionar linearmente a substituição de AN por reciclados com a retração. Gomes [10] constatou que a natureza do AR e a percentagem de incorporação têm influência direta no valor de retração no betão.

Um autor que apresentou valores contrários foi o Figueiredo [9], que ao aumentar a percentagem de substituição de agregados obteve um valor de retração inferior.

2.3.7 Módulo de elasticidade

Para uma determinada percentagem de substituição de AN por ARC o valor do módulo de elasticidade desse betão é superior ao do betão com a mesma percentagem de substituição de AN por ARB (Khatib [12]). Se a percentagem de substituição de ARC aumentar o módulo de elasticidade do betão diminui.

Mansur et al. [15] argumentaram que existe uma diminuição do módulo de elasticidade quando existe uma substituição de ANG por ARCG. Estes autores também obtiveram resultados que apontam que o aumento na resistência à compressão é compensada pelo aumento no módulo de elasticidade. Gomes e Brito [11] relataram a existência de uma relação entre a redução do módulo de elasticidade e o aumento de substituição de ARC.

2.4 Conclusões

Quando se compara o betão designado de normal com o betão constituído em parte por AR, conclui-se que na maioria das vezes o comportamento do betão com AR tem um desempenho inferior, se a substituição for a 100%. Se a substituição dos agregados não for total, a resistência à compressão e tração do betão com ARC poderá superar os requisitos mínimos para uma utilização segura. Os resultados apresentados por Gomes [10], mostraram que as substituições de AN por ARC abaixo dos 75%, a redução da resistência não é significativa, o que poderá tornar viável a sua utilização, não só como betão de reboco ou de enchimento mas também como betão estrutural.

Esta secção teve como principal objetivo efetuar uma pesquisa da bibliografia já existente sobre campanhas experimentais na área de betões que incorporam ARC. Os resultados obtidos nesta pesquisa, serviram para conhecer as propriedades mecânicas dos agregados nas várias fases da confeção do betão. Compreender os estudos já existentes, permite descobrir as lacunas e encontrar oportunidades para futuras investigações.

III. Estudo Experimental

Neste capítulo serão descritos os métodos e materiais utilizados em toda a parte experimental da dissertação, incluindo a caracterização dos agregados, recolha e tratamento do material reciclado cerâmico; a sua divisão e análise granulométrica; a elaboração das curvas granulométricas; a absorção de água através do método do picnómetro; o teor em água dos AN; a composição do betão que inclui o cálculo do betão de referência; os dados com os requisitos necessários para o cálculo do betão; a designação dos provetes; o armazenamento dos provetes; o ensaio de abaixamento e o teste de compressão.

3.1 Caracterização dos agregados

Uma mistura que inclua ligante hidráulico, água, adjuvantes, adições e agregados com granulometria adequada, quer seja areia, ou brita é designada de betão. Uma variação das quantidades e características dos materiais utilizados na mistura, poderá originar betões de qualidades e propriedades distintas (Lourenço et al [14]). Um dos principais aspetos a ter em conta para que o betão tenha uma boa trabalhabilidade é a seleção e qualidade dos agregados que o compõem. Por exemplo, é importante que a pasta do cimento, consiga envolver na totalidade todos os agregados inseridos na amassadura, para que tenha a consistência pré definida no cálculo do betão e a resistência esperada. Os agregados equivalem até 80% da mistura, o que torna imperativo um estudo continuado das características dos agregados, sendo os agregados reciclados merecedores da mesma atenção (Leite [13]).

Os agregados são classificados de duas formas, com base na sua origem e no seu tamanho. Os agregados britados, são aqueles que provêm de britagem de rocha calcária e os agregados rolados são os encontrados diretamente na natureza. Podem ser naturais, artificiais, ou derivados do reaproveitamento dos materiais encontrados em obra (Fernandes [8]), desde excedentes, a material danificado ou até reciclagem de material já previamente utilizado. Há também os agregados finos, que apresentam uma dimensão das partículas inferior a 4mm's, tendo a designação de areia, a figura 3.1 a) exemplifica uma amostra da areia utilizada neste estudo. Os ANG encontram-se no intervalo de dimensão entre os 4 e 32 mm e são conhecidos como brita, onde a figura 3.1 b) e c) apresentam uma amostra das duas britas de diferentes granulometrias utilizadas neste estudo.

Neste estudo utilizaram-se como agregados: areia rolada, brita média, brita grossa e ARC originários de telha proveniente de demolição.



a) areia

b) brita média

c) brita grossa

Figura 3.1 – agregados naturais utilizados no betão realizado no estudo

3.1.1 Recolha dos agregados cerâmicos

Os ARC utilizados neste estudo foram cedidos pela empresa Eco Demo – Demolições Ecologia e Construção S.A., que faz a sua própria britagem dos RCD provenientes de demolições efetuadas pela empresa.

A britagem da matéria-prima que deu origem aos ARC utilizados foi efetuada num britador de maxilas (Figura 3.2), na obra que se encontrava em processo de demolição pela empresa.



Figura 3.2 – Britadeira utilizada para a britagem da telha

Iniciou-se o processo adquirindo uma amostra de material cerâmico dessa obra, que neste caso foi telha lusa proveniente da cobertura. Em seguida, esta amostra foi devidamente separada do restante material (Figura 3.3) de demolição, para se realizar uma limpeza inicial da sujidade e da vegetação que pudesse existir.

Depois a amostra foi colocada na britadeira, para que, através da passagem pelas maxilas (Figura 3.4), se criasse uma amostra de material reciclado (Figura 3.5), com um diâmetro possível de ser utilizado como agregado no fabrico de betão corrente.



Figura 3.3 – Telha utilizada



Figura 3.4 – Telhas a serem trituradas pelas maxilas da britadeira



Figura 3.5 – Material cerâmico reciclado britado a sair da britadeira

3.1.2 Divisão e análise granulométrica

Com a amostra britada e já no laboratório procedeu-se a uma divisão por dimensão granulométrica. O objetivo foi ter dimensões semelhantes de ARC com a areia e das duas britas que

foram utilizadas no fabrico do betão. Passou-se toda a amostra britada por três crivos (Figura 3.6).



a) Malha 12,5 mm

b) Malha 6,3 mm

c) Malha 4 mm

Figura 3.6 – Crivos

O primeiro crivo (Figura 3.6 a)), com uma malha de maior diâmetro, com cerca de 12,5 mm serviu para separar os pedaços com as dimensões apropriadas para o betão em causa e o material cerâmico com dimensões demasiado elevadas para este exercício, que poderão servir para voltar a britar ou para utilizar em outro fim.

Com o segundo crivo (Figura 3.6 b)), com rede quadrada de 6,3 mm, foi possível separar o material cerâmico, que foi designado por agregado (A) com dimensões semelhantes ao da brita média utilizada (Figura 3.7 c)), tendo sido possível separar 47,13 kg que não passaram pela malha e efetuar uma análise granulométrica de uma amostra desse mesmo conjunto de material.

O crivo com a malha com menor dimensão (Figura 3.6 c)), 4 mm, possibilitou a separação da amostra em dois conjuntos de dimensões distintas, o agregado (B) do material com dimensão entre os 6,3 mm e os 4 mm (Figura 3.7 b)), e o agregado (C) com dimensão menor que 4 mm (Figura 3.7 c)). Com estes dois conjuntos de agregados de dimensões distintas, foi possível criar uma mistura com granulometria semelhante à areia utilizada.

Num segundo passo, pegaram-se nos quatro conjuntos de material com diferentes dimensões de agregado, sendo um não utilizado, retirou-se uma amostra de cada um dos conjuntos e faz-se a sua análise granulométrica, de acordo com as normas Portuguesas (NP) e as especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Para esta análise seguiu-se a Norma NP EN 933-1: Análise granulométrica - Método de peneiração.

A análise granulométrica consistiu na passagem da amostra, no estado seco, por vários peneiros normalizados (Figura 3.8). As medidas utilizadas foram as medidas padrão da American Society for Testing and Materials (ASTM), e foram usadas em ordem decrescente, da maior dimensão da abertura,

para a mais pequena, sendo as dimensões da abertura dos peneiros utilizados, as indicadas na especificação do LNEC E355 – Inertes para argamassas e betões. Para melhores resultados na análise, foi utilizado um peneirador mecânico (figura 3.9), para efetuar a peneiração.



a) agregado (C)

b) agregado (B)

c) agregado (A)

Figura 3.7 - agregados reciclados cerâmicos utilizados no betão realizado no estudo



Figura 3.8 – Peneiros utilizados na análise granulométrica

Nesta análise separou-se a amostra em frações de partículas, com diferentes dimensões dos agregados a utilizar, o que possibilitou a realização das curvas granulométricas, de forma a obter um betão com uma compactidade próxima do ideal.

Passaram-se as amostras, cada uma com 1 kg de ARC, e em seguida elaborou-se um quadro (Quadro 3.1) com as granulometrias obtidas, para ter uma melhor perceção do material proporcionado pela britagem das telhas cerâmicas. Na mesma altura, realizaram-se, as análises granulométricas dos AN utilizados, de forma a obter as curvas granulométricas, das três porções de material reciclado existente e dos AN. O objetivo foi conseguir uma boa conjugação, em termos dimensionais, entre os AN e os AR.

Depois de se realizarem todas as análises granulométricas, constatou-se que não existiam ARC com granulometria semelhante à da brita grossa, nem da areia. Para encontrar semelhança para a areia, foi correlacionada uma mistura entre o agregado (B) e o agregado (C), mais concretamente 2/3

de (C) com 1/3 de (B), que vai ser referida neste estudo como mistura de agregados reciclados cerâmicos (MARC), no quadro 3.2 pode-se observar a granulometria do agregado (B), (C) e da mistura criada a partir dos dois. Esta mistura demonstrou ter uma semelhança aproximada (Quadro 3.3) para ser possível a sua utilização nesta investigação.



Figura 3.9 – Peneirador mecânico do Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação do I.P.Leiria

Quadro 3.1 – Análise granulométrica

% Retida no peneiro (mm)				Agregados		
	(A)	(B)	(C)	Brita Grossa	Brita Média	Areia
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	9,86	0	0
12,5	0	0	0	63,11	0	0
9,5	25,9	0	0	16,44	5,45	0
6,3	52,38	0	0	8,96	69,05	0,27
4,75	15,72	28,69	0	1,48	19,61	1,33
2,36	1,54	70,03	12,06	0,13	5,66	13,46
1,18	4,46	1,28	25,78	0	0,22	22,20
0,6	0	0	14,02	0	0	24,13
0,3	0	0	8,42	0	0	23,96
0,15	0	0	15,26	0	0	11,26
0,075	0	0	10,20	0	0	2,93
<0,075	0	0	14,27	0	0	0,46
Módulo de finura	6,15	5,27	2,38	6,99	5,99	2,97

Quadro 3.2 – Análise Granulométrica do agregado (B), do agregado (C) e da MARC

% Retida no peneiro (mm)	Agregados		
	(B)	(C)	MARC
25	0	0	0
19	0	0	0
12,5	0	0	0
9,5	0	0	0
6,3	0	0	0,14
4,75	28,69	0	12,14
2,36	70,03	12,06	29,72
1,18	1,28	25,78	15,3
0,6	0	14,02	9,36
0,3	0	8,42	5,47
0,15	0	15,26	7,47
0,075	0	10,20	8,07
< 0,075	0	14,27	12,34
Módulo de finura	5,27	2,38	3,30

Quadro 3.3 – Análise granulométrica da mistura MARC e da areia

% Retida no peneiro (mm)	Agregados	
	MARC	Areia
25	0	0
19	0	0
12,5	0	0
9,5	0	0
6,3	0,14	0,27
4,75	12,14	1,33
2,36	29,72	13,46
1,18	15,3	22,20
0,6	9,36	24,13
0,3	5,47	23,96
0,15	7,47	11,26
0,075	8,07	2,93
< 0,075	12,34	0,46
Módulo de finura	3,30	2,97

3.1.3 Curva granulométrica

Depois de se realizar um estudo à análise granulométrica dos agregados, foi possível elaborar a curva granulométrica de cada um e em seguida, realizar uma conjugação de todos de modo a obter a curva real, o mais semelhante possível com a curva teórica da mistura dos agregados na composição do betão de referência.

No Gráfico 3.1 apresentam-se as curvas granulométricas de todos os agregados utilizados neste estudo. Foi possível identificar as semelhanças existentes entre os AN e os ARC, que foram introduzidos na mistura, como possíveis substitutos de percentagem do AN.

Na fase seguinte do estudo, fez-se a agregação e homogeneização do ARC no AN. Optou-se por integrar uma quantidade abaixo dos 50% de substituição, visto que em estudos previamente efetuados e relatados no ponto §2.4.1, uma menor substituição, origina uma melhor resistência à compressão. Depois de alguma ponderação, 10%, 15% e 20% foram os valores a utilizar na substituição, na areia e na brita média. O gráfico 3.2 apresenta a semelhança entre o AN sem substituição e com as substituições estabelecidas para o estudo.

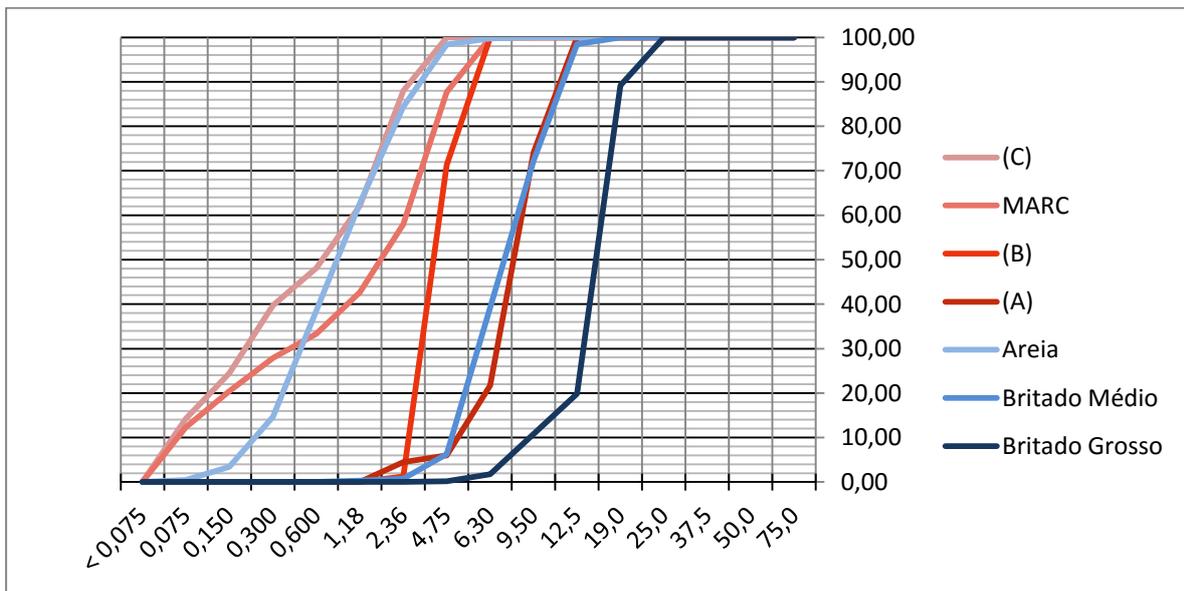


Gráfico 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados

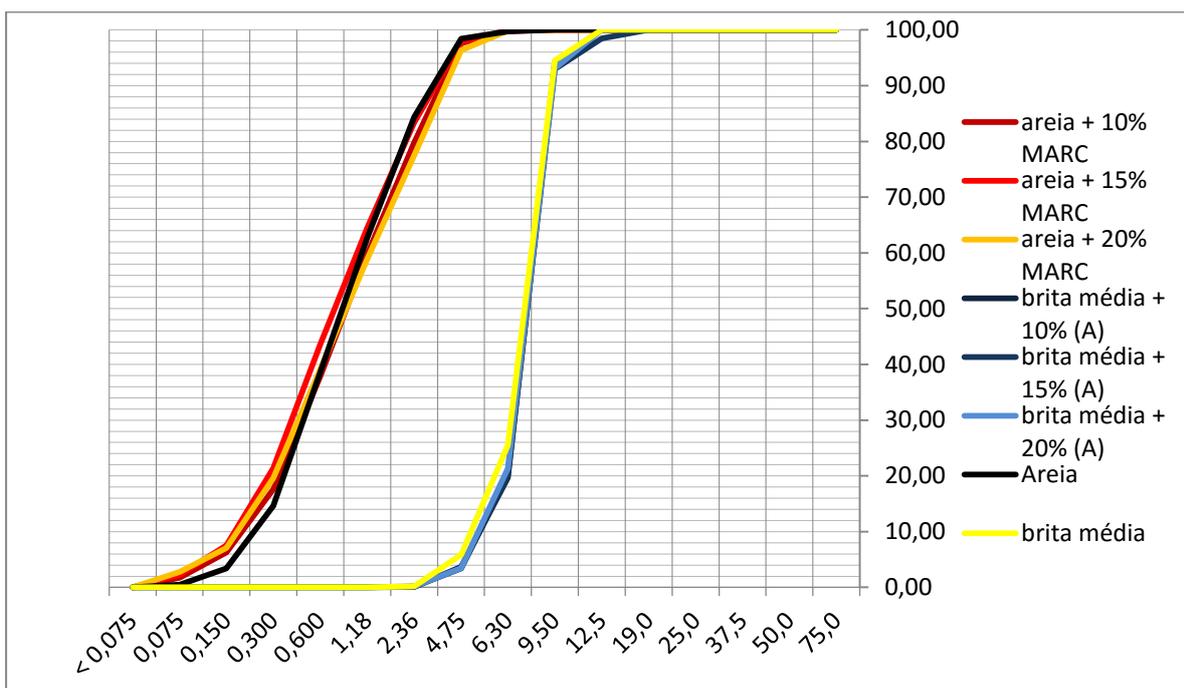


Gráfico 3.2 – Comparação entre as curvas granulométricas das misturas usadas com as dos AN

3.1.4 Absorção de água

Durante os trabalhos em laboratório e de pesquisa verificou-se que era necessário saber a absorção de água dos ARC utilizados, devido ao fato da sua capacidade de absorção de água (como foi referido no §2.1.2), ser superior aos restantes AN. Este conhecimento serviu para calcular a quantidade extra de água a ser adicionada na altura da amassadura, de forma a compensar essa absorção.

Para o seu cálculo foi utilizada uma amostra da mistura de agregados MARC e outra do agregado (A). Recorreu-se à Norma NP EN 1097-6, atualmente em vigor em Portugal, que descreve todo o processo a desenvolver e dessa forma, foi possível obter os seus valores.

A quantidade de água absorvida pelo agregado é determinada pelo quociente, em percentagem, entre a diminuição de massa de uma amostra constituída por agregados saturados de água, e a superfície seca e a massa da amostra seca. Para se obter os valores necessários utilizou-se o método do picnómetro.

3.1.4.1 Método do picnómetro

O método do picnómetro consiste no cálculo da absorção de água do agregado experienciado, em determinadas condições de temperatura e pressão. Para efetuar este cálculo colocou-se uma amostra do agregado submersa em água desmineralizada num picnómetro (Figura 3.8), para depois pesar e colocar o picnómetro num tanque (Figura 3.9), contendo água com uma temperatura estável de 22 graus Celcius, durante 24 horas.



Figura 3.10 – Picnómetro com agregado submerso em água desmineralizada

Depois das 24 horas, retirou-se a amostra do picnómetro e colocou-se no forno, de forma a numa primeira fase, secar toda a água existente no exterior do agregado, e numa segunda fase, toda a água no interior do agregado. Efetuaram-se as devidas pesagens nas várias fases de secagem e calculou-se a sua absorção de água (Quadro 3.4).



Figura 3.11 – Picnómetros no tanque em “banho-maria”

Quadro 3.4 – Absorção de água dos ARC

ARC	Absorção de água (%)
MARC	11,89
(A)	10,50

3.1.5 Teor de água

O cálculo do teor em água foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação, seguindo a NP 84:1965 – Determinação do teor em água. Este cálculo consistiu em aferir a diferença entre o peso de uma amostra de agregado no seu estado natural, e o peso depois da sua colocação em estufa (Figura 3.11), a uma temperatura a rondar os 110 graus Celsius, até o seu peso se apresentar estável, indicando a inexistência de água na amostra.

O conhecimento do teor de água existente nos agregados permitiu saber, com maior precisão, qual a quantidade de água a ser utilizada na altura de amassadura. Quanto maior for a quantidade de água existente no agregado, menor é a porção de água necessária para se atingir a consistência e trabalhabilidade que se pretende. Os valores do teor de água dos AN encontram-se enumerados no Quadro 3.5.



Figura 3.12 – Estufa utilizada para a secagem do agregado

Quadro 3.5 – Água existente no AN

	Amostra (g)	Amostra seca (g)	Água (g)	Água em 1000g de agregado (g)
Areia menos húmida	2692,06	2657,57	34,49	12,81
Areia mais húmida	2992,64	2720,64	272,00	90,89
Brita grossa menos húmida	1213,39	1195,05	18,34	15,11
Brita grossa mais húmida	1388,26	1332,31	55,95	40,30
Brita média	1536,00	1531,71	4,29	2,79

3.2 Composição do betão

3.2.1 Cálculo do betão de referência

A elaboração de um betão corrente com uma boa resistência à compressão, foi um dos objetivos do estudo, por essa razão os cálculos foram direcionados para se efetuar um betão com uma classe de resistência C25/30, uma resistência média à compressão de 33 MPa e uma classe consistência S3, o que garante uma boa trabalhabilidade e facilita a betonagem.

Para que fosse possível a correta formulação do betão realizado, existiu a necessidade de utilizar a fórmula fundamental da composição do betão, também reconhecida como expressão dos volumes absolutos, aqui apresentada como a equação B.

$$c + s + ad + \sum_{i=1}^r m_i + a + vv = 1 \quad (B)$$

A soma dos constituintes do betão é igualada ao volume aparente unitário do betão, onde c – é o volume absoluto do cimento, s – volume absoluto de qualquer adição utilizada, ad – volume de

adjuvante, $\sum_{i=1}^r m_i$ - soma dos volumes absolutos dos agregados, a – volume da água da amassadura e vv – o volume de vazios.

Através da equação B foi possível dar origem a alguns subconjuntos que tornaram possível o cálculo de valores fundamentais para o valor final do volume necessário de betão para a experiência realizada, tais como (Lourenço et al [14] e Fernandes [8]):

- Soma dos volumes absolutos dos agregados, por unidade de volume aparente de betão,

$$\sum_{i=1}^r m_i = \sum_{i=1}^r m_{f_i} + \sum_{i=1}^r m_{g_i} \quad (C)$$

Em que: $\sum_{i=1}^r m_{f_i}$ é o somatório dos volumes absolutos das classes granulométricas finas – areias ($d \leq 4,76 \text{ mm}$)

$\sum_{i=1}^r m_{g_i}$ é o somatório dos volumes absolutos das classes granulométricas grossas – britas ou godos ($d > 4,76 \text{ mm}$)

- Volume dos constituintes sólidos do betão,

$$vps = c + s + \sum_{i=1}^r m_i \quad (D)$$

Que quando dividido pelo volume aparente do betão origina ao valor da sua compactidade.

- Volume absoluto dos constituintes fluidos do betão,

$$vpf = a + ad + vv \quad (E)$$

Se for dividido pelo volume aparente do betão, dá o seu índice de vazios.

- Volume absoluto da pasta ligante, por unidade de volume aparente de betão,

$$vpl = c + s + a + ad + vv \quad (F)$$

- Volume absoluto da argamassa, por unidade de volume aparente de betão,

$$va = c + s + ad + \sum_{i=1}^r m_{f_i} + vv \quad (G)$$

3.2.1.1 Dados

O betão foi calculado seguindo a NP EN 206-1 e de forma a cumprir os seguintes requisitos:

- Classe de resistência: C25/30;
- Classe de consistência: S3 (abaixamento 100 mm – 150 mm);
- Classe de exposição ambiental: XC1;

O cimento selecionado foi Portland de calcário tipo II classe 32,5N, um ligante hidráulico que quando em contacto com água, provoca certas reações e processos de hidratação, origina uma pasta, que depois de se encontrar em estado sólido, confere resistência e uma elevada coesão. Foi utilizada numa quantidade de 350 kg. Os AN utilizados foram, areia rolada, brita média e grossa calcária. Houve particular atenção na escolha dos AN, devido à dimensão máxima do agregado, que foi de 19,1 mm, o que poderia condicionar a forma como o betão se iria comportar na peneiração e no efeito de parede. Como adjuvante selecionou-se Sika ViscoCrete 20 HE, que proporciona uma redução da quantidade de água utilizada na amassadura, e uma melhoria na resistência do betão. Adicionaram-se 0,6% da quantidade de cimento. A água da amassadura teve muita importância em duas fases, na fase líquida da amassadura, que originou uma boa trabalhabilidade, e na fase de endurecimento, em que reagiu com o cimento, o que originou a existência da resistência do betão. A água foi provida pela rede de abastecimento pública. Não foram utilizadas adições na formulação do betão do estudo.

As quantidades utilizadas no betão foram dimensionadas através do método de Faury, que consistiu no reajuste de uma curva granulométrica real da mistura dos agregados utilizados, a uma curva da mistura de referência. A curva adotada encontra-se representada do gráfico 3.3.

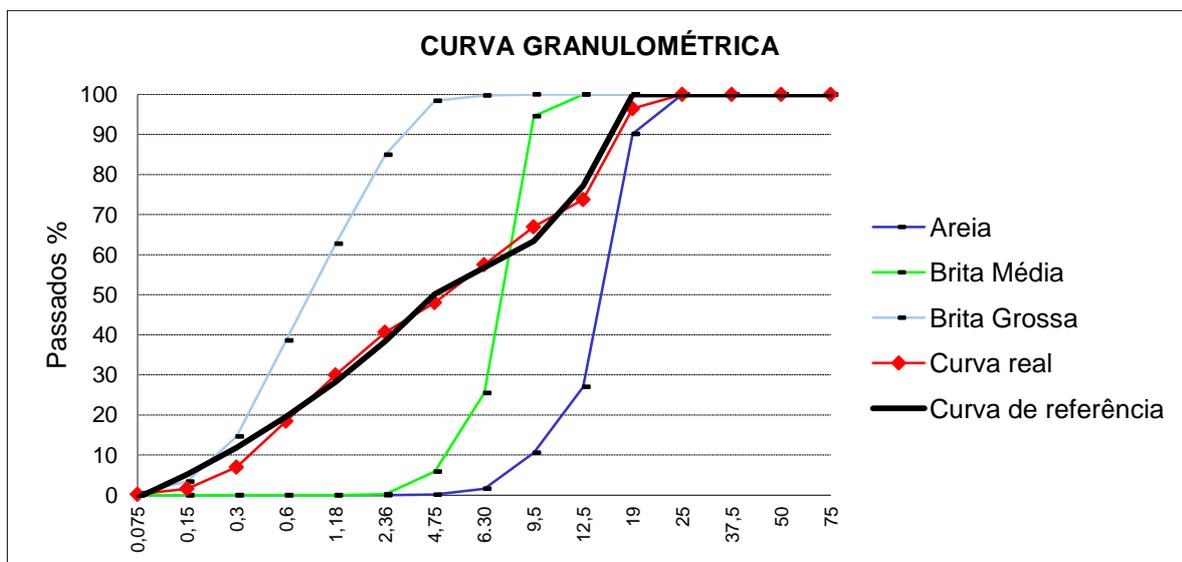


Gráfico 3.3 – Curva de referência e curva granulométrica real do betão com AN

Foram realizadas sete misturas distintas de betão, cada uma com 48,6 litros. Cada mistura teve uma quantidade específica de cada um dos materiais utilizados, pois ao efetuar a substituição de percentagem de AN por ARC, a dosagem dos restantes componentes teve que ser reajustada. No quadro 3.6 são apresentadas as quantidades que foram utilizadas neste estudo.

Quadro 3.6 – Composição dos sete betões realizados

	Composição do betão								
	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita média (kg)	Brita grossa (kg)	Água (litros)	Água extra (litros)	Adjuvante (kg)	MARC (Kg)	(A) (kg)
Betão de referência	17,01	41,08	14,69	32,90	8,16	0	0,11	0	0
Betão com 10% de MARC	17,01	36,97	14,78	32,81	8,16	0,49	0,11	4,11	0
Betão com 15% de MARC	17,01	37,62	11,16	33,08	8,16	0,79	0,11	6,64	0
Betão com 20% de MARC	17,01	36,58	9,52	33,17	8,16	1,09	0,11	9,14	0
Betão com 10% de (A)	17,01	41,25	13,10	32,84	8,16	0,15	0,11	0	1,46
Betão com 15% de (A)	17,01	41,27	12,56	32,60	8,16	0,23	0,11	0	2,22
Betão com 20% de (A)	17,01	41,25	11,75	32,71	8,16	0,31	0,11	0	2,94

3.2.2 Amassadura

O betão foi amassado no LEBA com o auxílio de uma misturadora de eixo vertical com uma capacidade de 100 litros. Na altura de colocar os componentes da amassadura na misturadora, existiu o cuidado de começar pelo agregado mais grosso, demonstrado pela figura 3.13 a), depois pelo intermédio, que foi designado por brita média (Figura 3.13 b)), por fim foi adicionado o agregado mais fino, que nesta mistura foi a areia, apresentado na figura 3.13 c). O agregado reciclado cerâmico (ARC) foi sempre adicionado depois do agregado natural (AN) de qual existiu substituição (Figura 3.13 d)). Deixou-se que os agregados se misturassem durante alguns minutos, por cada agregado adicionado. Com a mistura dos agregados realizada, adicionou-se a porção de cimento Portland (Figura 3.13 e)), deixou-se a misturadora realizar a mistura e por fim juntou-se a água com o adjuvante (Figura 3.13 f)).

Realizou-se o teste de SLUMP no fim da mistura concluída e posteriormente, procedeu-se à sua colocação nos moldes (Figura 3.14) com o auxílio de um vibrador. Cada molde tem as dimensões de 15x15x15 cm³. Para efetuar os testes à compressão de todas as misturas de betões realizadas em diferentes idades, para posterior análise dos resultados obtidos, foram realizados 12 provetes de cada mistura, num total de 84. Realizaram-se 4 ensaios em cada mistura aos 7, 28 e 84 dias de idade do betão.



a) brita grossa

b) brita média

c) areia



d) agregado cerâmico



e) cimento Portland



f) água + adjuvante

Figura 3.13 – Realização da amassadura na misturadora



Figura 3.14 - Provetes

3.2.3 Designação dos provetes

Para se identificar o tipo de mistura realizada em cada conjunto de provetes, tentou-se encontrar uma forma clara de os identificar. Os números envolvidos com um círculo apresentam a

quantidade de provetes realizados com cada mistura, os outros números situados na parte inferior da face do provete, identificam o dia em que foram realizados, “dia/mês”.

A utilização de siglas na identificação dos provetes, veio demonstrar-se muito útil. Em seguida apresentarei os seus significados, “N” – agregado natural; “F” – agregado cerâmico fino; “M” – agregado cerâmico medio; “10%”, “15%” e “20%” – percentagem de agregado cerâmico substituído.

3.2.4 Condição de cura dos provetes

Depois de se fazer a desmoldagem de todos os provetes, estes foram colocados num tanque específico para a cura (figura 3.14) e foram submersos a uma temperatura de 20 graus Celsius, como indica a NP EN 12390-2 – Ensaio do betão endurecido, parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. Ao realizar a cura num ambiente saturado com 100% de humidade, garantiu-se que os provetes pudessem endurecer de forma uniforme, e assim evitou-se a evaporação da água unida na altura da amassadura, importante para a hidratação do cimento, diminuição de fissuração prematura e a retração do betão. Com este procedimento foi possível manter os provetes numa condição ambiental estável até aos dias que foram realizados os ensaios à resistência à compressão.



Figura 3.15 – Provetes submersos em tanque

3.3 Ensaio de caracterização do betão

Foram adotados dois ensaios de caracterização do betão em duas fases distintas da vida do betão. O primeiro ensaio de caracterização foi efetuado enquanto o betão ainda se encontrava fresco, e teve como objetivo a caracterização da sua consistência, propriedade de particular importância no seu desempenho aquando da colocação em obra. O segundo ensaio destinou-se a caracterizar a

resistência à compressão, tendo sido definida uma avaliação em três idades do betão, para melhor compreender a evolução da resistência do betão com o aumento da sua idade.

3.3.1 Ensaio de abaixamento

O ensaio de abaixamento, também conhecido por teste de SLUMP ou ensaio de cone de Abrams, é um teste empírico que, de uma forma prática e rápida, proporciona a verificação da classe de consistência do betão e sua fluidez. Com o conhecimento destes dois parâmetros, foi possível perceber a sua trabalhabilidade, a fluidez do betão e a relação água/cimento (A/C) na mistura testada.

O teste resumiu-se em retirar a medida do abaixamento no betão depois de se levantar o cone de Abrams, seguindo as diretrizes da norma NP EN 12350-2:2009 – Ensaio de betão fresco, parte 2: Ensaio de abaixamento

Para a realização do ensaio foi necessário ter um molde com as dimensões normalizadas mas conhecido por cone de Abrams (figura 3.15), um varão de compactação, um funil, uma placa metálica e uma fita métrica.



Figura 3.16 – Cone de Abrams

O ensaio foi realizado, seguindo a norma, em cinco passos. Primeiro, efetuou-se a recolha de uma amostra do betão logo após a sua amassadura, para uma posterior colocação no cone. Segundo passo, humedeceu-se o molde cónico para facilitar a sua desmoldagem e a sua colocação sob a placa metálica devidamente nivelada, utilizando os pés sobre as abas para fixar o molde. Terceiro, procedeu-se ao enchimento do cone por 3 fases, 1/3 do cone em cada fase com 25 pancadas com o varão de compactação entre cada fase para as compactar. Na última fase de enchimento, houve o cuidado de alisar o betão no topo do molde. O quarto passo consistiu em elevar verticalmente o molde de forma

cuidadosa, num intervalo de tempo nunca superior a 10 segundos e colocá-lo ao lado da massa de betão. Por último, e utilizando o varão de compactação, o molde e uma fita métrica, foi possível avaliar a deformação do betão e medir o abaixamento. Todo o procedimento do ensaio não demorou mais de 150 segundos.

3.3.2 Resistência à compressão

O valor da resistência à compressão do betão é conhecida através da tensão de rotura de provetes de betão à compressão uniaxial, sobe determinadas condições normalizadas. O valor dessa propriedade mecânica é influenciado por vários aspetos, desde a idade do provete no instante do teste, à temperatura, saturação, condições de cura, etc. (Fernandes [8]).

Os testes de compressão foram realizados no Laboratório de Estruturas e Betão Armado Estruturas, numa prensa de betão (Figura 3.16) seguindo as orientações da norma NP EN 12390-3:2003 – Ensaio do betão endurecido, parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.

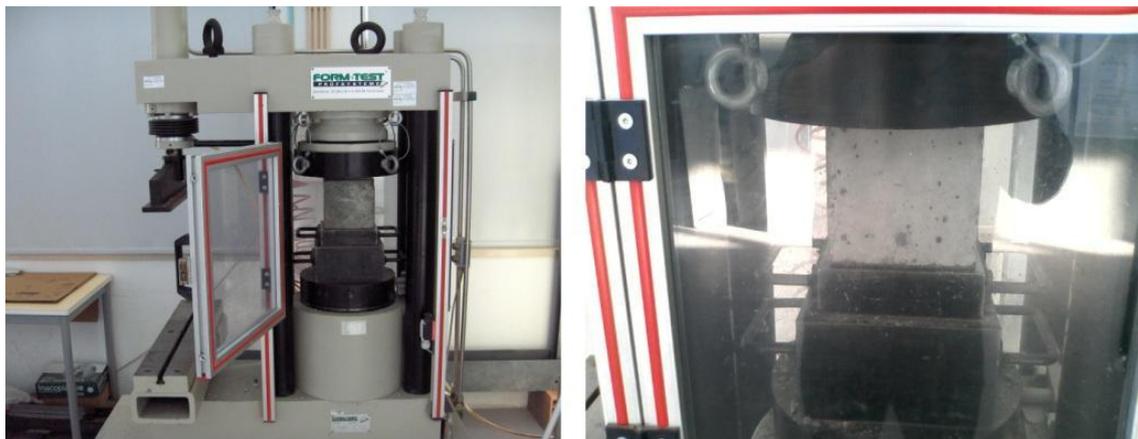


Figura 3.17 – Prensa de betão

O teste consistiu em levar à rotura o provete testado, determinando a resistência à compressão, em relação à força que suportou.

Este teste foi realizado aos 7, 28 e 84 dias dos provetes, sendo seguido o seguinte procedimento de trabalho: (1) todos os provetes estiveram submersos no tanque de cura até à altura do seu ensaio, só então se retiraram os provetes a ensaiar para limpar a água em excesso no seu exterior e pesar; (2) foram colocados os provetes individualmente na prensa, fechou-se a porta de segurança da máquina e aplicou-se a carga; (3) depois de testar o provete, este foi retirado da prensa e foi realizada uma análise visual do tipo de rotura existente no provete, a figura 3.17 apresenta alguns dos provetes testados.



Figura 3.18 – Provetes depois do teste de compressão

IV. Discussão de Resultados

Este capítulo é destinado para a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados de abaixamento e resistência. Foram elaborados vários gráficos com os resultados de forma a comparar os vários valores retirados dos ensaios, tanto em relação ao abaixamento do betão, como da resistência do betão de referência, comparativamente às misturas com percentagem de ARC introduzidos.

4.1 Ensaio de abaixamento

Os resultados obtidos neste teste demonstram a consistência do betão testado e a sua trabalhabilidade, o que se encontra intimamente relacionado com a relação A/C de todas as misturas realizadas neste estudo.

Apresento o gráfico 4.1 e o quadro 4.1 com os resultados do ensaio de abaixamento, onde se pode reter que apenas uma mistura se encontra com a consistência e a trabalhabilidade inicialmente desejada.

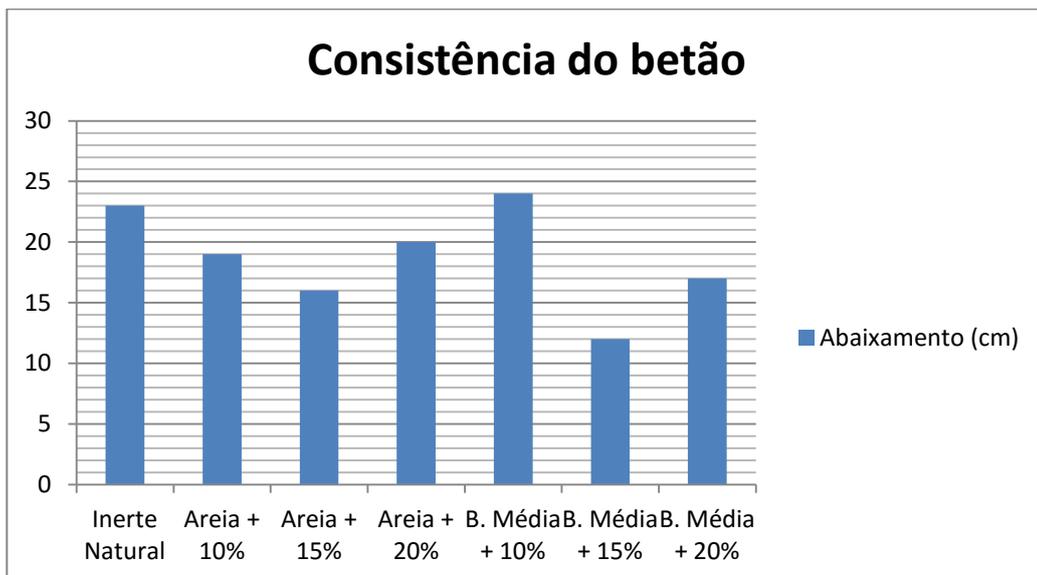


Gráfico 4.1 – Resultados do Ensaio de abaixamento

Quadro 4.1 – Resultados do ensaio de abaixamento

	Abaixamento (cm)
Betão com Inerte Natural	23
Betão com Areia + 10% de MARC	19
Betão com Areia + 15% de MARC	16
Betão com Areia + 20% de MARC	20
Betão com B. Média + 10% de (A)	24
Betão com B. Média + 15% de (A)	12
Betão com B. Média + 20% de (A)	17

Com uma análise mais detalhada no gráfico é possível ver que quando se compara o abaixamento do betão apenas com AN com os dos betões com 10 e 15% de substituição de mistura de agregados cerâmicos, nota-se que vai existindo de forma regular uma diminuição no abaixamento, o que indica um aumento de absorção de parte da água existente na amassadura, proporcional ao aumento de agregados cerâmicos na constituição do betão. O mesmo também acontece quando se aumenta a percentagem de agregados (A) no betão.

Tanto o abaixamento do betão com 20% de substituição de agregados cerâmicos na areia, como o do betão com 20% de agregados cerâmicos na brita média não seguem a coerência da análise efetuada em relação aos restantes abaixamentos observados. A resposta a isso encontra-se no §3.15 onde se realizou a análise da quantidade de água existente nos AN. Quando o mesmo AN apresenta diferentes quantidades de água retida no mesmo volume de agregado acondicionado, a extração de agregado em diferentes camadas pode originar a uma alteração na relação A/C das amassaduras realizadas, que por consequência irá alterar a consistência e fluidez do betão realizado.

4.2 Resistência à compressão

Com a determinação da resistência dos provetes à compressão, pretendeu-se compreender as alterações que a substituição dos AN por percentagem de ARC originou na resistência do betão. O teste foi realizado de forma a se tentar relacionar a idade do betão com o aumento da sua resistência e perceber se a adição de cerâmica altera de alguma forma essa evolução.

Todos os valores da carga máxima suportada pelos provetes no momento de rotura estão apresentados no quadro 3.7, para uma melhor análise e compreensão dos resultados.

Quadro 4.2 – Resultado do teste de resistência à compressão

	Inertes Naturais	Areia + 10%	Areia + 15%	Areia + 20%	B. Média + 10%	B. Média + 15%	B. Média + 20%
7 dias	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)
1	43,17	43,40	45,50	42,12	41,94	49,83	50,44
2	41,78	40,38	46,13	41,95	41,72	51,44	49,97
3	42,20	42,63	46,65	42,14	43,42	49,06	51,35
4	42,32	42,42	45,52	42,22	41,90	47,83	50,11
Média	42,37	42,21	45,95	42,11	42,25	49,54	50,47
28 dias	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)
5	50,59	53,51	57,02	53,81	49,63	59,79	59,98
6	49,45	54,07	58,11	51,74	50,69	56,81	60,39
7	46,96	54,36	52,83	45,00	49,74	59,90	60,95
8	51,28	50,3	55,62	53,03	50,69	58,87	60,28
Média	49,57	53,06	55,90	50,90	50,19	58,84	60,40
84 dias	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)	Teste (MPa)
9	53,45	57,98	62,29	61,24	55,66	62,80	62,60
10	55,59	55,98	61,79	60,41	56,10	65,02	69,58
11	54,12	58,47	60,42	57,41	55,06	63,34	65,68
12	52,38	56,47	64,19	57,87	55,78	64,99	64,19
Média	53,89	57,23	62,17	59,23	55,65	64,04	65,51

Analisando cuidadosamente o quadro observa-se que a amassadura que obteve uma maior resistência foi a última, com 20% de substituição na brita média de agregado (A). Sendo o betão de referência o que obteve piores resultados, contrariando tudo o que se encontra escrito de outros ensaios realizados e descritos no capítulo 2 deste estudo.

Como previsto todas as amassaduras aumentaram a sua resistência com o aumento de idade e para uma melhor perceção dessa evolução, foi elaborado um gráfico onde se compreende com mais facilidade esse aumento de resistência ao longo da idade do betão (gráfico 4.2).

O valor característico da resistência à compressão para provetes cúbicos utilizado no cálculo de todas as amassaduras do estudo, situava-se nos 33 MPa, o que foi superado em todos os testes realizados sendo o valor mais baixo 50% mais elevado que o valor de cálculo, o mais elevado ficou 80% acima do característico.

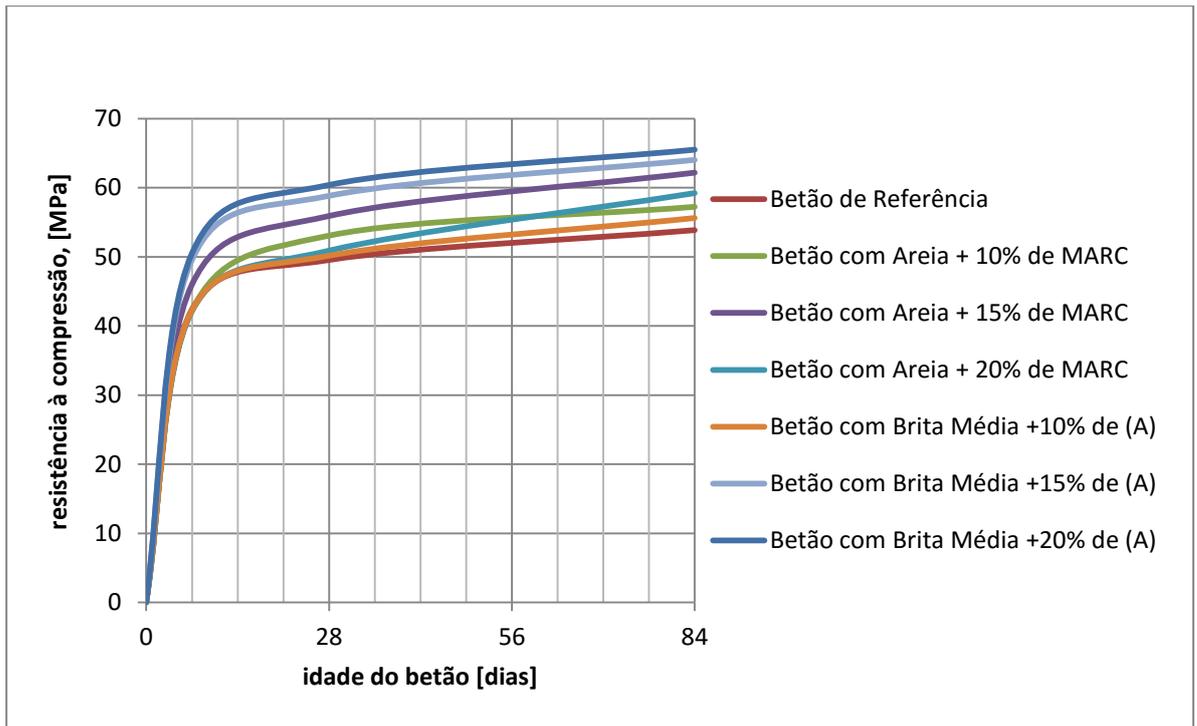


Gráfico 4.2 – Relação da resistência de todos os betões amassados com a idade

V. Conclusões

5.1 Conclusões finais

Este estudo teve como objetivos consciencializar para a atual devastação ambiental realizada pela extração dos AN e cimentar a ideia de reutilização dos RCD, com uma maior incidência no resíduo cerâmico vermelho. Especificamente demonstrar a viabilidade do betão quando se substitui o componente AN por uma determinada percentagem de ARC. No trabalho de campo constatou-se que o AR estudado para servir de substituto dos AN é de fácil manuseamento e muito abundante nas obras de demolição.

Os resultados obtidos requerem algumas notas adicionais. O ensaio de absorção de água aos ARC mostrou que, tal como referido no §2.1.2 a cerâmica tem uma alta absorção de água, muito próximo dos 12%. Este resultado provou que a elevada absorção de água é útil e contribui para um aumento da resistência do betão.

O teor de água nos AN foi outro elemento importante neste estudo, para compreender a relevância de ter valores distintos de teor de água no mesmo AN. Foi a realização deste ensaio que permitiu alcançar algumas das conclusões do ensaio de abaixamento e do teste de resistência à compressão. Os valores no quadro 3.5 no §3.1.5 são desfasados e muito elevados para ser apenas da absorção da água que o agregado poderá conservar no seu interior. Pode-se concluir que os valores apresentados são decorrentes do somatório da humidade, que se encontrava do interior e do exterior do AN.

Ao realizar o cruzamento dos dados entre os dois ensaios é possível retirar algumas ilações sobre os resultados obtidos. Conclui-se que, apesar das composições com incorporação de ARC terem exigido maior quantidade de água para assegurar a trabalhabilidade especificada, a maior absorção de água dos agregados reciclados cerâmicos revelou ter um efeito benéfico para a resistência do betão, muito pelo facto da redução dos poros originados pela água em excesso para assegurar a trabalhabilidade ter sido parcialmente absorvida pelos ARC.

Conclui-se ainda ser necessária uma criteriosa quantificação de três parcelas a considerar no cálculo da relação A/C na formulação do betão com uma boa trabalhabilidade e resistência à compressão, a saber: a dosagem que assegure a água necessária para a fluidez desejada e que permita a homogeneidade da mistura; a dosagem que assegure a água necessária à hidratação do cimento; e a dosagem que assegure a absorção extra de água pelos ARC incorporados na formulação do betão. Se

tivermos em consideração estes fatores, é possível criar betões com incorporação de ARC que garantam uma resistência idêntica ou superior à de betões formulados apenas com AN.

A título de conclusão final, a composição com substituição de 20% dos agregados naturais grossos (ANG) por agregados reciclados cerâmicos grossos (ARCG) exibiu os melhores resultados globais, conjugando boa consistência com resistência à compressão, demonstrando a sua viabilidade como substituto do betão convencional. Estes resultados reforçam os resultados obtidos por Mansur et al. [15], que obteve valores de resistência à compressão superiores com betões formulados com incorporação de ARCG comparativamente aos betões formulados apenas com ANG.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se a realização de um estudo que investigue qual a relação A/C correta, quando a substituição de ARC no betão se situa nas percentagens propostas neste trabalho, uma vez que a relação A/C utilizada sofreu um aumento não previsto no cálculo inicial dos betões testados.

Estudos futuros poderão desenvolver tabelas, com as quantidades necessárias de água extra a colocar na amassadura. A quantidade exata de água que se deve adicionar na amassadura irá compensar a absorção adicional na mistura e presa do betão, originada pelas diferentes classes granulométricas e percentagens de ARC possíveis de adicionar. Desenvolvimento destas tabelas simplificará o trabalho em obra.

Por último, sugere-se uma investigação mais aprofundada sobre a resistência do ARC nas várias classes granulométricas possíveis de utilização como agregado no betão.

VI. Referências Bibliográficas

- [1] Alves A.V., Vieira T.F., Brito j., Correia J.R. – Mechanical properties of structural concret with fine recycled ceramic aggregates, *Construction and Building Materials*, Volume 64, pág.103-113, 2014
- [2] Brito, J. – Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões, *Lição de síntese para provas de Agregação*, Instituto Superior Técnico, 2005
- [3] Brito J., Pereira A. S., Correia J. R. – Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, pág.429-433, 2005, 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005
- [4] Cabral, A. E., Schalch, V., Dal Molin, D. C., Ribeiro, J. L., Ravindralalah, R. S. – Performance of red ceramic recycled aggregate, *Cerâmica [online]*, Volume 55, pág.448-460, 2009
- [5] Debied F., Kenai S. – The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 22, pág.886-893, 2008, 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013
- [6] Evangelista L., Brito J. – Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, pág.397-401, 2007, 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004
- [7] Ferreira L., Brito J., Barra M. – Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, 63(8), pág.617-627, 2011
- [8] Fernandes, P. A. – Vigas de Grande Vão Prefabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.
- [9] Figueiredo, F. – Gestão integrada dos resíduos de construção e demolição, FEUP, Porto, 2005.
- [10] Gomes, M. – Betões estruturais com incorporação de agregados reciclados de betão e cerâmicos com reboco. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- [11] Gomes M., Brito j. – structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance, *Materials and Structures*, Volume 42, pág.663-675, 2009, 10.1617/s11527-008-9411-9
- [12] Khatib, J.M. – Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, *Cement and Concrete Research*, Volume 35, pág.763-769, 2005, 10.1016/j.cemconres.2004.06.017.
- [13] Leite, M. B. – Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001, 270p.
- [14] Lourenço, J., Júlio, E. e Maranha, P., *Betões de Agregados Leves de Argila Expandida. Guia para a sua utilização*. 2004: APEB.

- [15] Mansur M. A., Wee T. H., Lee S. C. – Crushed Bricks as coarse aggregate for concrete, *Concrete for Environment Enhancement and Protection*, R K Dhir and T D Dyer, Londres, 1996, 0 419 21450 X, pág505-514.
- [16] Menezes, M. S.; Pontes F. V. M.; Afonso J. C. – Panorama dos Resíduos de Construção e Demolição.
- [17] Pereira, A.R.; Zêzere, J. L.; Morgado, P. – Os Recursos Naturais em Portugal: Inventariação e Proposta de um Modelo Geográfico de Avaliação, Atas do X Colóquio Ibérico de Geografia “A Geografia Ibérica no contexto europeu”, Évora, 2005, 15p.
- [18] Ribeiro J. L. – Resíduos cerâmicos gestão e valorização como agregados. Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009
- [19] Rocha B., Resende C. – Propriedades de Betões fabricados com agregados reciclados. Trabalho Final de curso Universidade de Aveiro, Aveiro, 2004.
- [20] Rosa, A. P. – Utilização de agregados grossos cerâmicos na produção de Betão. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.
- [21] Vieira T. F. – Betões com incorporação de agregados finos reciclados cerâmicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.
- [22] Torgal F., Jalali S. – Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 24, pág.832-838, 2010, 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023.

Normas / Especificações de ensaios

LNEC E 355 – Inertes para argamassas e betões, classes granulométricas, Lisboa, 1990.

LNEC E 373 – Inertes para argamassas e betões, características e verificação da conformidade, Lisboa, 1993.

NP 84:1965 – Determinação do teor em água, Lisboa, 1965.

NP EN 206-1 Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade, IPQ, Lisboa, 2005.

NP EN 933-1 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica - Método de peneiração, IPQ, Lisboa, 2000

NP EN 1097-6 Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, IPQ, Lisboa, 2003.

NP EN 12350-2 Ensaio de betão fresco, parte 2: Ensaio de abaixamento, IPQ, Lisboa, 2009.

NP EN 12390-2 Ensaio do betão endurecido, parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, IPQ, Lisboa, 2003.

VII. Anexos

7.1 Curvas granulométricas dos agregados

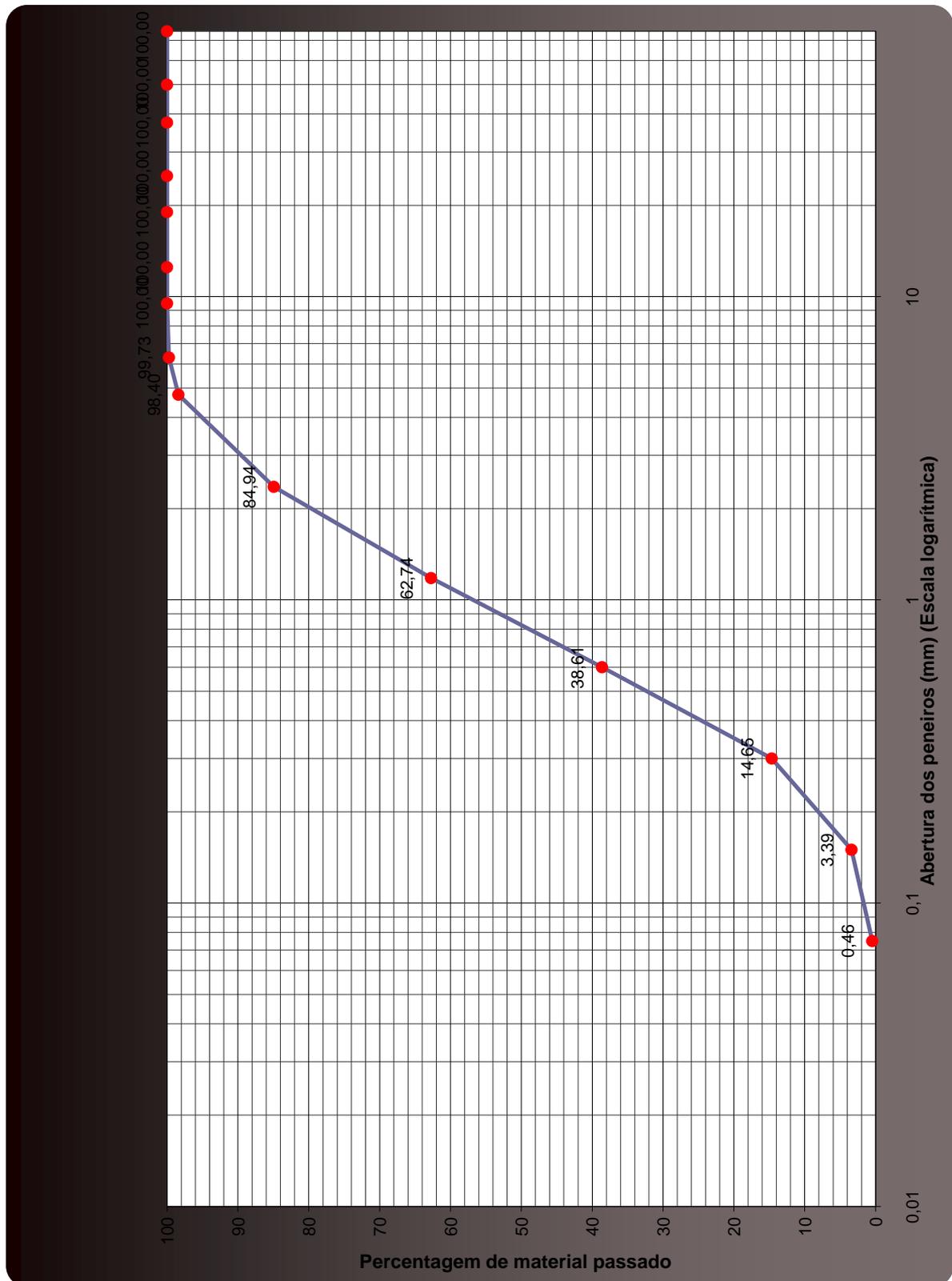


Gráfico 7.1 – Curva granulométrica da areia

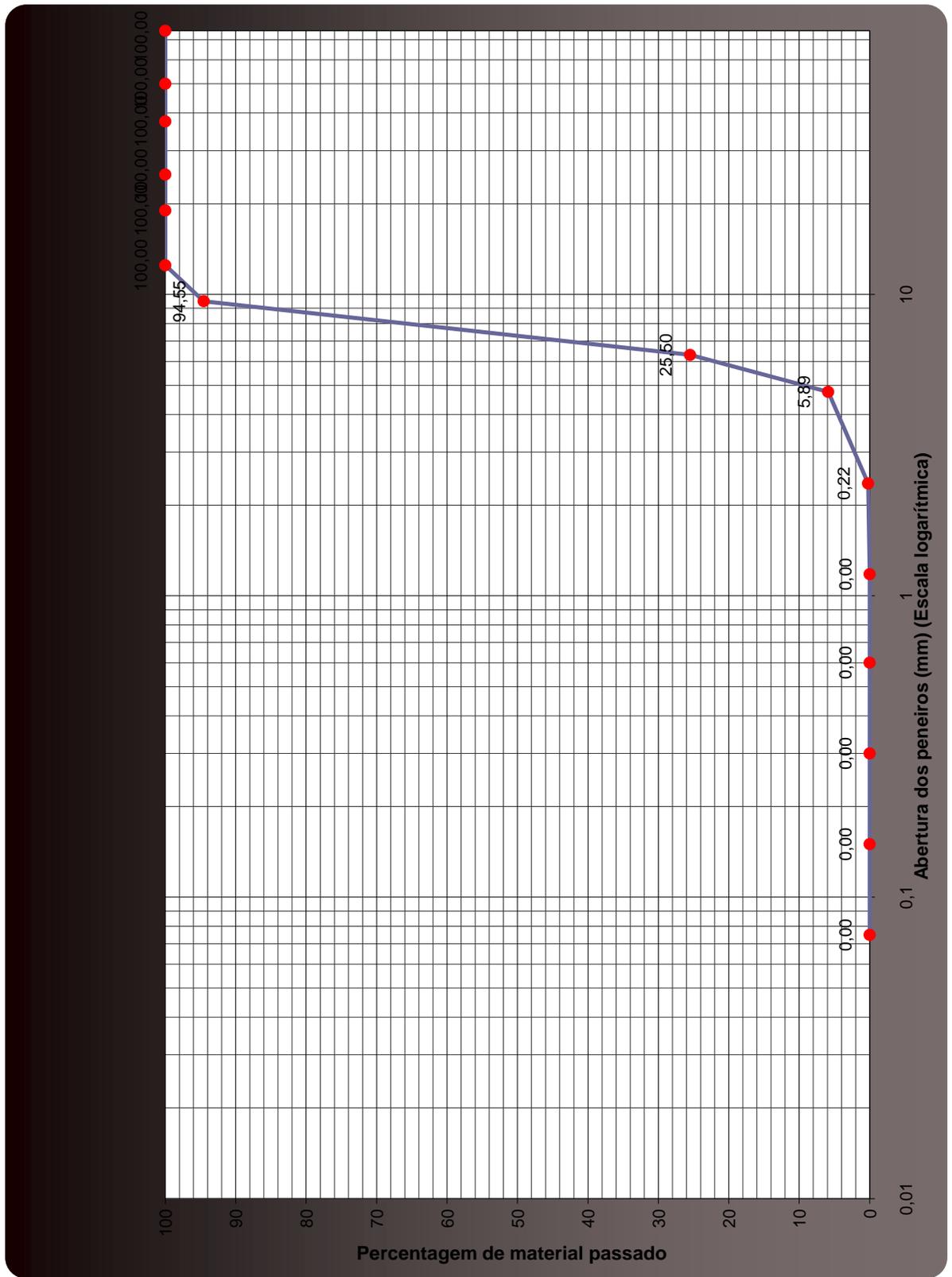


Gráfico 7.2 – Curva granulométrica da brita média

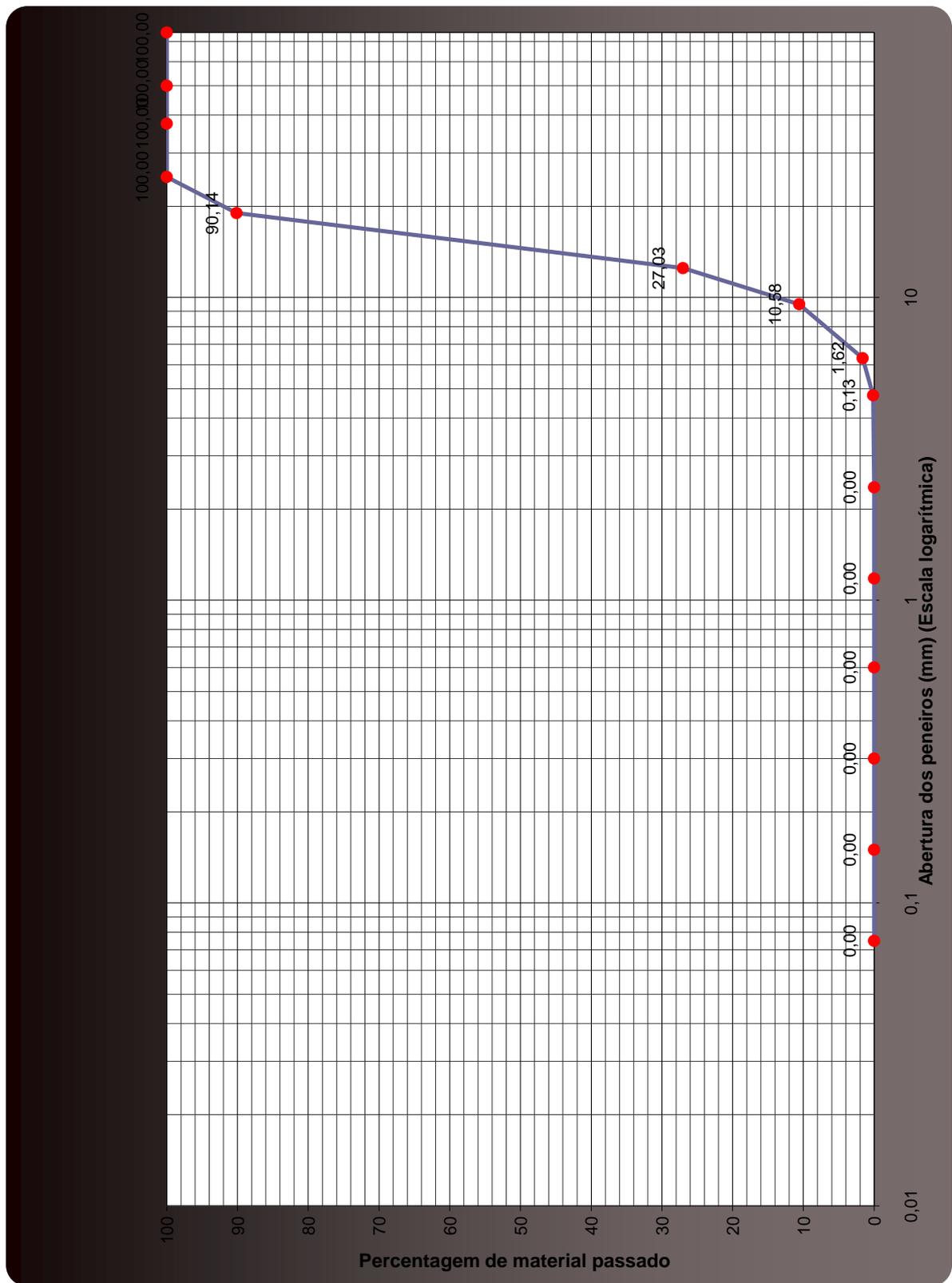


Gráfico 7.3 – Curva granulométrica da brita grossa

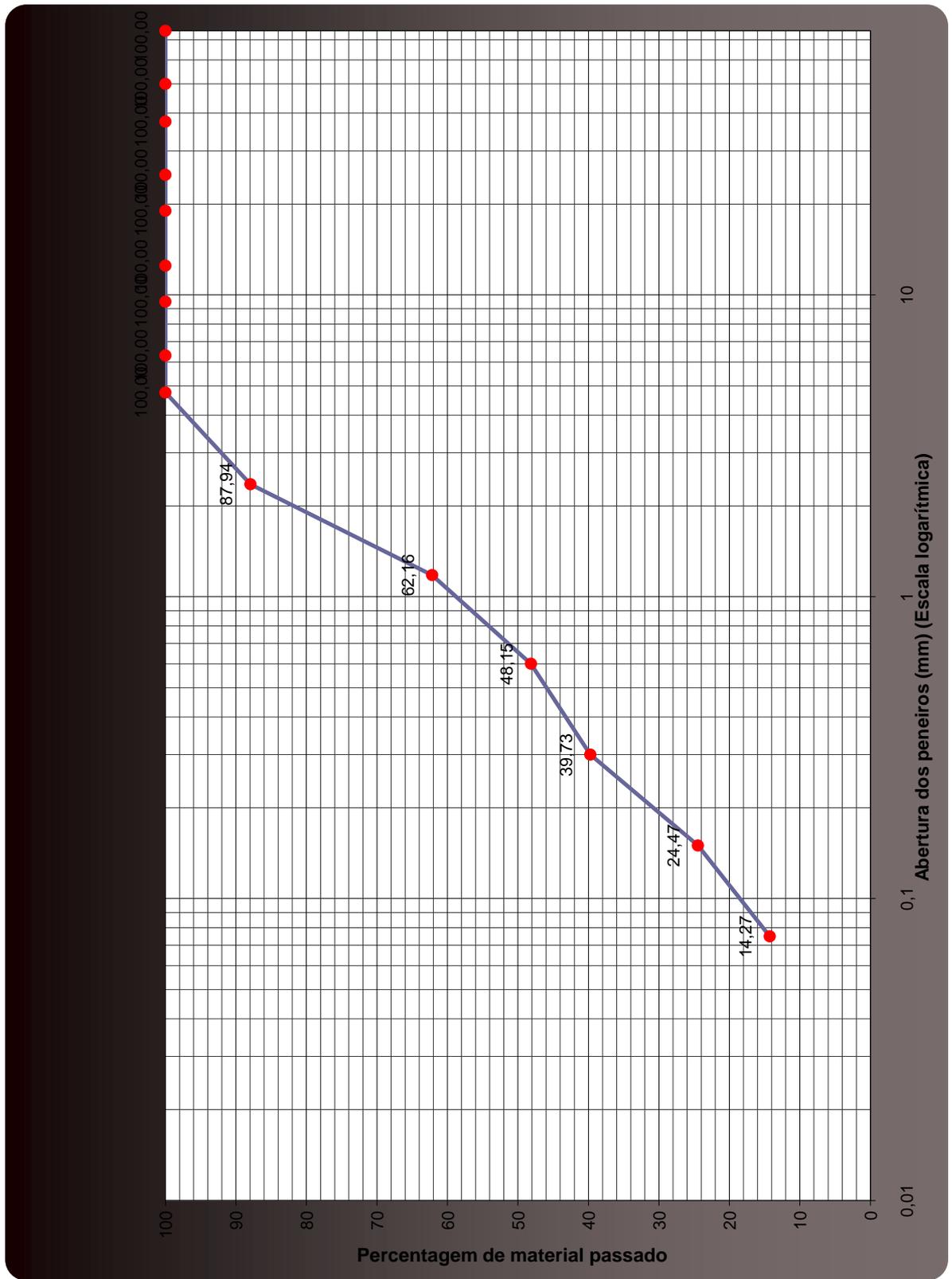


Gráfico 7.4 – Curva granulométrica do agregado (C)

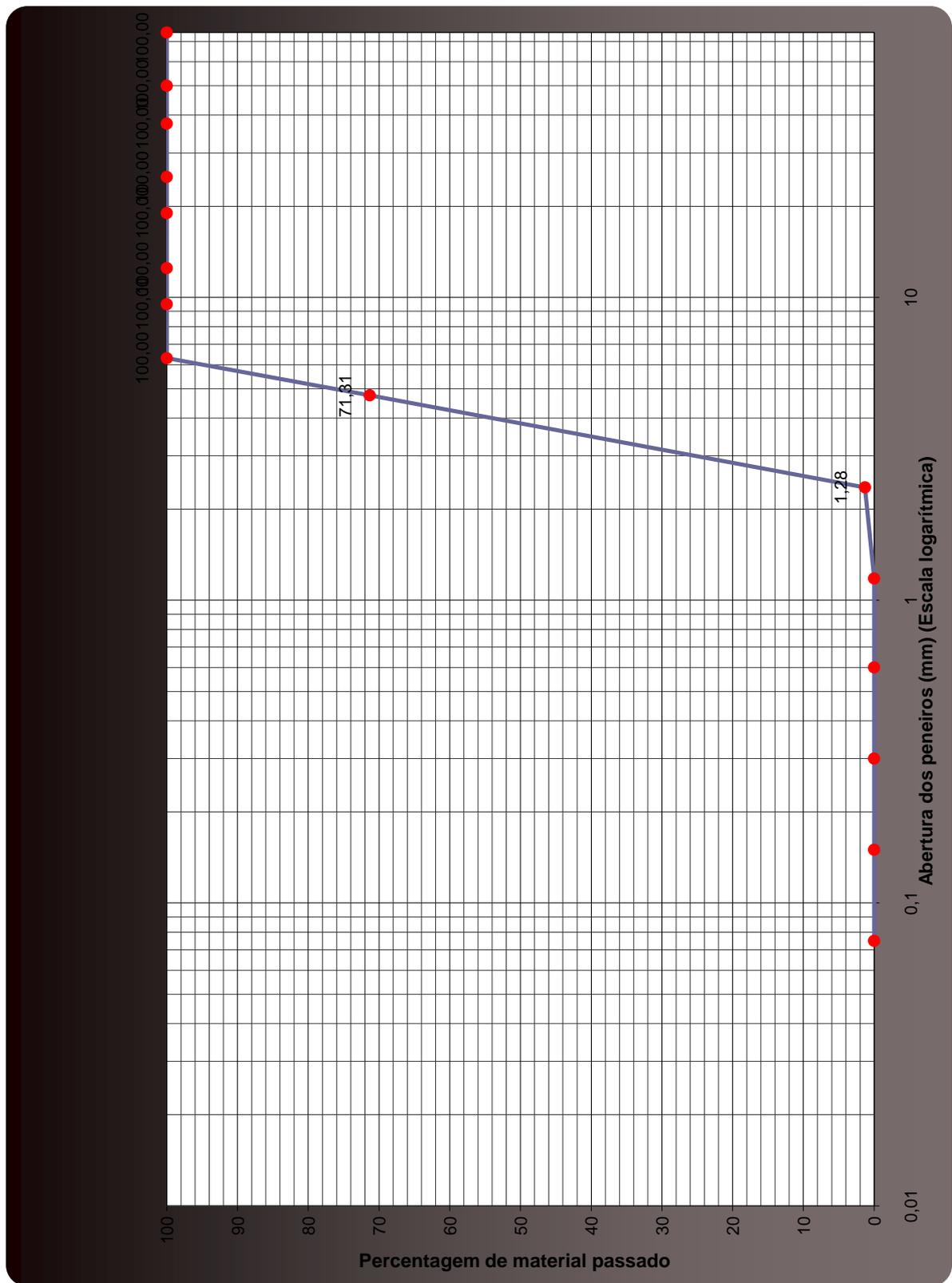


Gráfico 7.5 – Curva granulométrica do agregado (B)

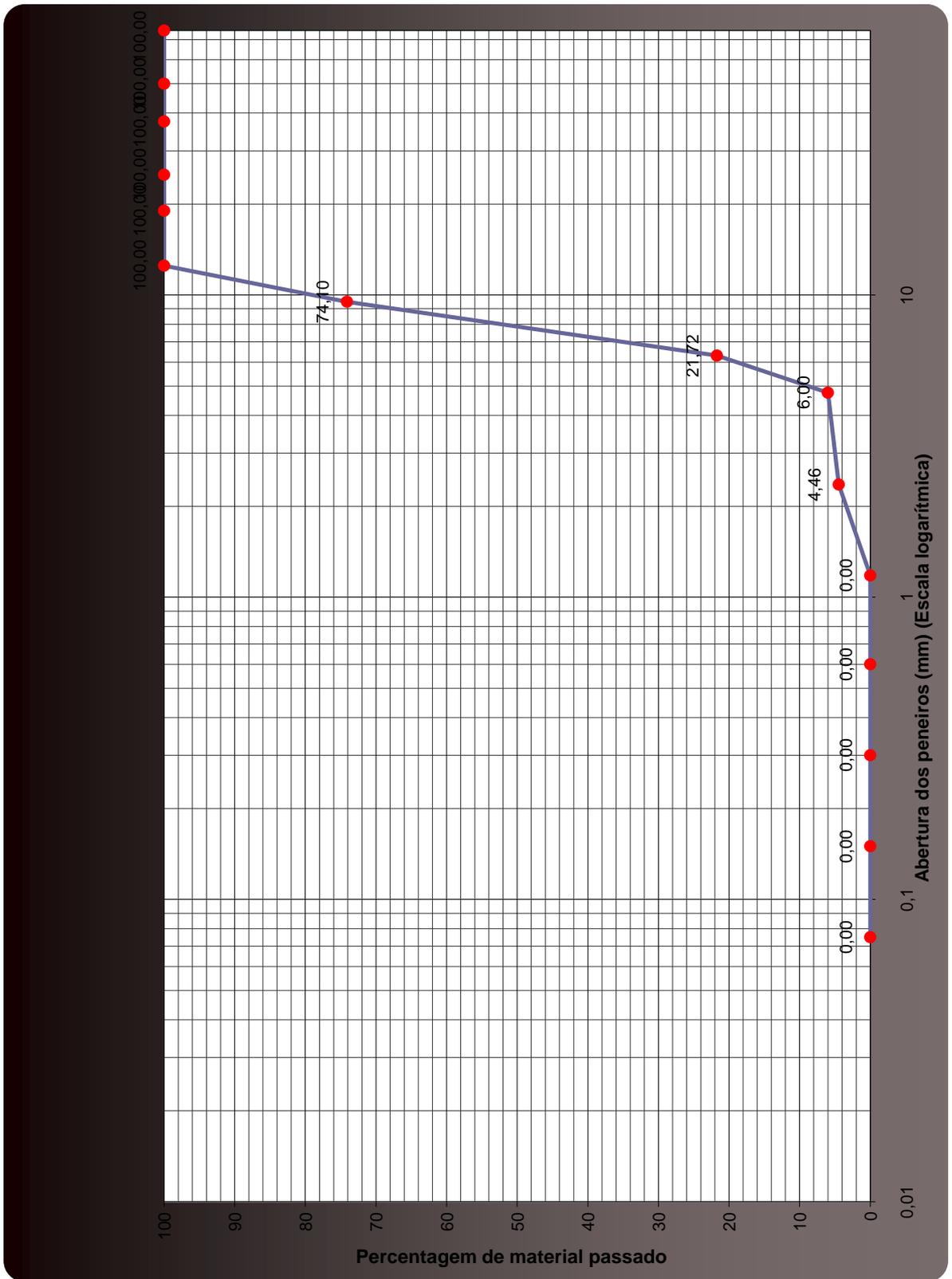


Gráfico 7.6 – Curva granulométrica do agregado (A)

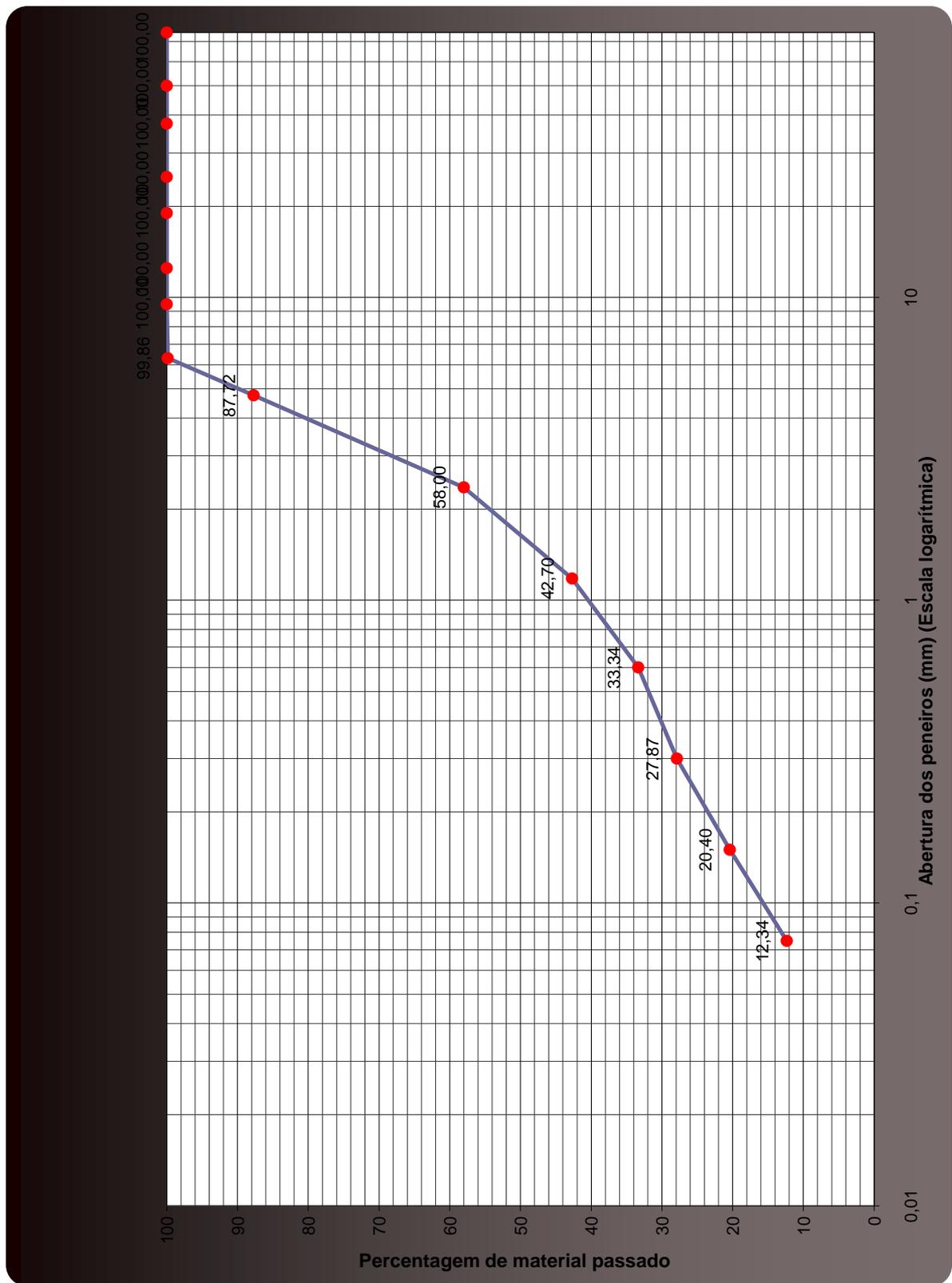


Gráfico 7.7 – Curva granulométrica do agregado MARC

7.2 Composição dos vários betões

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE AGREGADOS

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
Dmax (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Ind. de vazios:	0,190

Tipo e classe de cimento: Portland Normal	
Quantidade de cimento (kg):	350
Massa volum. absol.do cimento (kg/m3):	3150
Tipo de adição:	
Quantidade de adição (kg):	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m3):	2200
Volume absoluto (m3):	0,111
Porcentagem de cimento (%):	13,7
Nome do adjuvante ViscoCrete 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08
Quantidade (litros):	2,10

Volume de vazios (litros/m3):	20
Água de amassadura (litros/m3):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,369
--	-------

Volume absoluto da totalidade dos inertes (m3):	0,699
---	-------

Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,360	2,69 kg/l	676 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,162	2,67 kg/l	303 kg
Agr.3 Areia	0,478	2,53 kg/l	846 kg

1824

Betão com Inertes Naturais

Massa volúm. apar. betão (kg/m3):	2344
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	7,91
Volume absol. inertes grossos (m3):	0,363
Volume absoluto da argamassa (m3):	0,637

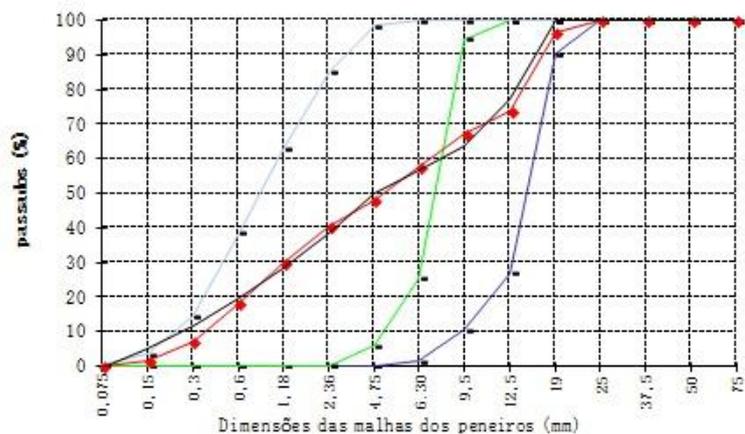
Relações:	A/C	A/(S+C)
	0,49	0,49
Adições (%)	S/C*100= 0,0	
	S/(S+C)*100= 0,0	
Permilagem do adjuvante :	6,5	
Rel. volumétrica inertes/cimento :	6,3	
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç):	6,3	
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,1	

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	180	270
Resist. (MPa):	25	37

Curvas de referência de Faury

Parâmetros da curva						
A= 32		B= 1,5		Y= 68,7		
Nº de série	malha (mm)	BG	BP	Ar	Misturas Refª	Misturas Real
14	0,075	0	0	0,46	-0,7	0,2
13	0,15	0	0	3,39	5,2	1,6
12	0,3	0	0	14,7	11,9	7,0
11	0,6	0	0	38,6	19,6	18,5
10	1,18	0	0	62,7	28,2	30,0
9	2,36	0	0,22	84,3	38,4	40,7
8	4,75	0,13	5,89	98,4	50,2	48,1
7	9,5	1,6	25,5	99,7	56,8	57,5
6	19	10,6	94,6	100	63,4	67,0
5	37,5	27	100	100	77,2	73,8
4	75	100	100	100	100,0	96,5
3	150	100	100	100	100,0	100,0
2	300	100	100	100	100,0	100,0
1	600	100	100	100	100,0	100,0
mod.fir		6,99	5,99	2,97	4,83	4,91

CURVA GRANULOMÉTRICA



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
D _{max} (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Índ. de vazios:	0,190

Areia +10% MARC

Tipo e classe de cimento: Portland Normal	
Quantidade de cimento (kg):	350
Massa volum. absol.do cimento (kg/m ³):	3150
Tipo de adição:	
Quantidade de adição (kg):	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m ³):	2200
Volume absoluto (m ³):	0,111
Percentagem de cimento (%):	13,7
Nome do adjuvante ViscoCrete 20 HE	
Massa volum. (kg/l): 1,08	Quantidade (litros): 2,10

Volume de vazios (litros/m ³):	20
Água de amassadura (litros/m ³):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,363
--	-------

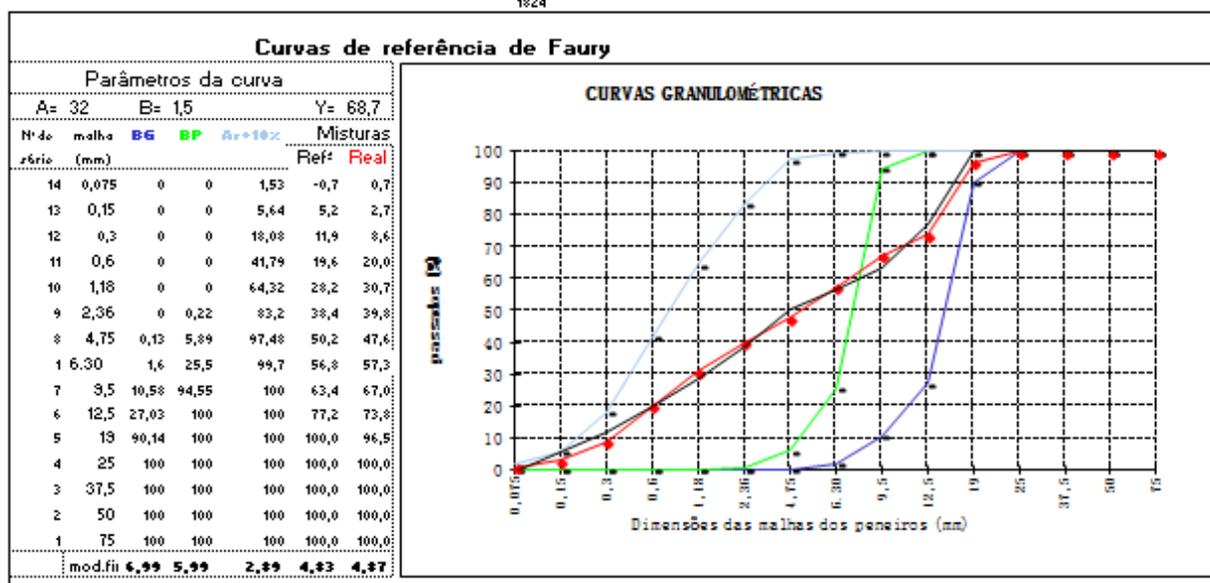
Volume absoluto da totalidade dos inertes (m ³):	0,639
--	-------

Designação dos inertes:	Prop. Mas. Volum.	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,359	2,69 kg/l 675 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,163	2,67 kg/l 304 kg
Agr.3 Areia	0,478	2,53 kg/l 845 kg

1824

Massa volúm. apar. betão (kg/m ³):	2344
Massa de um cubo <i>a</i> = 15cm (kg):	7,91
Volume absol. inertes grossos (m ³):	0,366
Volume absoluto da argamassa (m ³):	0,634
Relações:	A/C A/(S+C)
	0,49 0,49
Adições (%)	S/C*100= 0,0
	S/(S+C)*100= 0,0
Permilagem do adjuvante:	6,5
Rel. volumétrica inertes/cimento:	6,3
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç):	6,3
Rel. volum. in. grossos / in. finos:	1,1

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	180	270
Resist. (MPa):	25	37



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
D _{max} (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Índ. de vazios:	0,190

Tipo e classe de cimento: Portland Normal	
Quantidade de cimento (kg):	350
Massa volum. absol.do cimento (kg/m ³):	3150
Tipo de adição:	
Quantidade de adição (kg):	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m ³):	2200
Volume absoluto (m ³):	0,111
Porcentagem de cimento (%):	13,7
Nome do adjuvant: ViscoCrete 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08
Quantidade (litros):	2,10

Volume de vazios (litros/m ³):	20
Água de amassadura (litros/m ³):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,363
--	-------

Volume absoluto da totalidade dos inertes (m ³):	0,633
--	-------

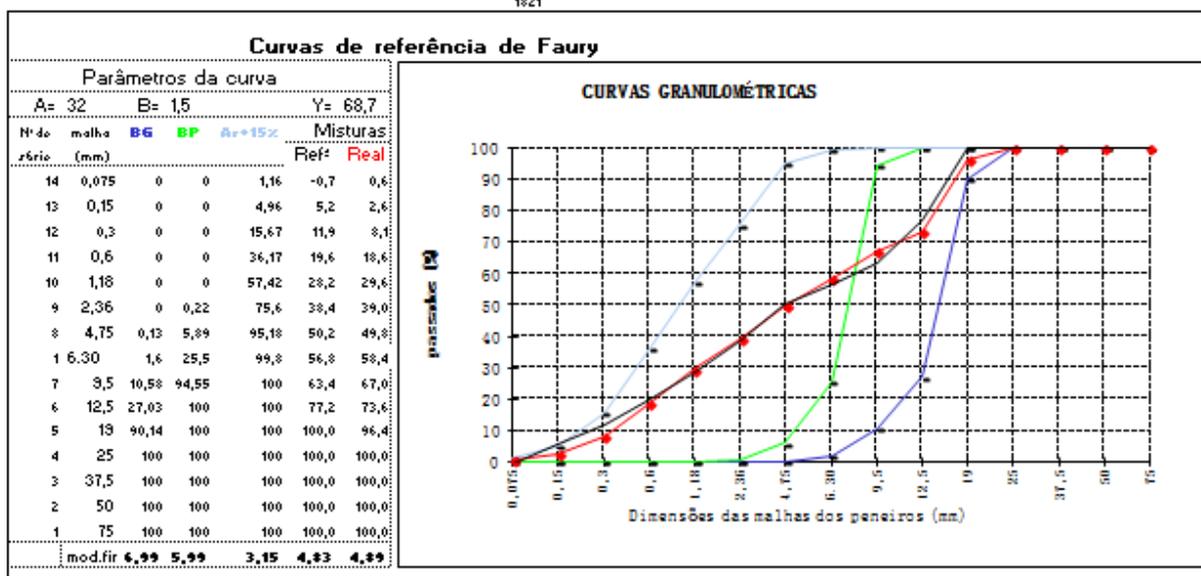
Designação dos inertes :	Prop	Mas.Volumi	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,362	2,63 kg/l	680 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,123	2,67 kg/l	230 kg
Agr.3 Areia	0,515	2,53 kg/l	911 kg

1821

Areia +15% de MARC

Massa volum. apar. betão (kg/m ³):	2341	
Massa de um cubo cf a=15cm (kg):	7,90	
Volume absol. inertes grossos (m ³):	0,351	
Volume absoluto da argamassa (m ³):	0,649	
Relações:	A/C	A/(S+C)
	0,43	0,49
Adições (%)	S/(S+C)*100= 0,0	
	S/(S+C)*100= 0,0	
Permilagem do adjuvante :	6,5	
Rel. volumétrica inertes/cimento :	6,3	
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç) :	6,3	
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,0	

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	180	270
Resist. (MPa):	25	37



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
D _{max} (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Índ. de vazios:	0,190

Areia + 20% de MARC

Tipo e classe de cimento:	Portland Normal	
Quantidade de cimento (kg):	.....	350
Massa volum. absol.do cimento (kg/m ³):	.....	3150
Tipo de adição:		
Quantidade de adição (kg):	.....	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m ³):	.....	2200
Volume absoluto (m ³):	.....	0,111
Porcentagem de cimento (%):	.....	13,7
Nome do adjuvante:	ViscoCrete 20 HE	
Massa volum. (kg/l):	1,08	Quantidade (litros): 2,10

Volume de vazios (litros/m ³):	20
Água de amassadura (litros/m ³):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,363
--	-------

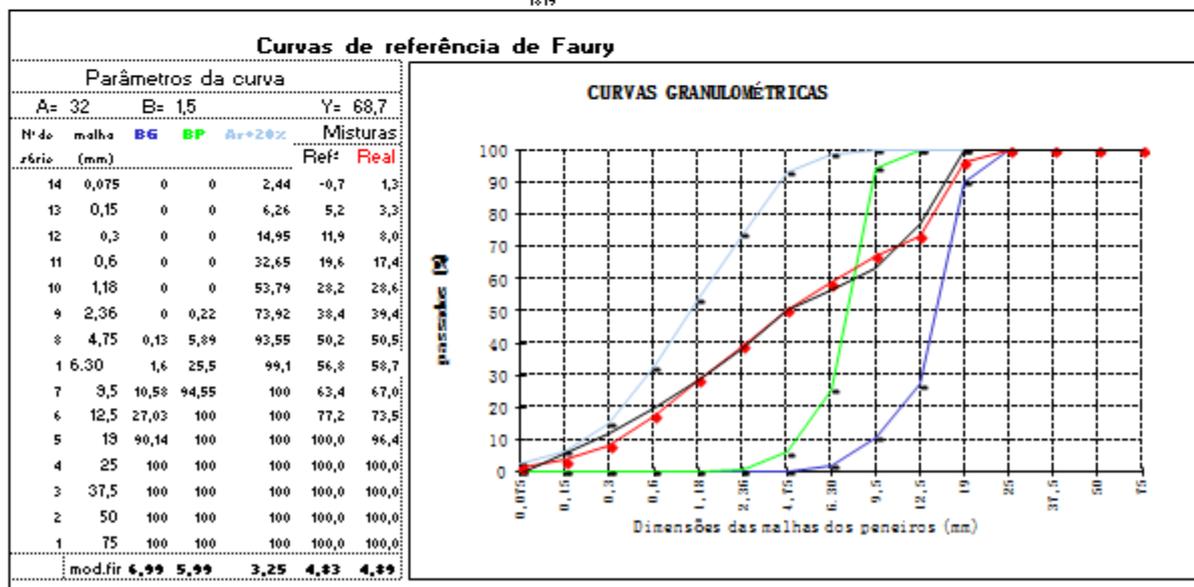
Volume absoluto da totalidade dos inertes (m ³):	0,633
--	-------

Designação dos inertes:	Prop.	Mas.Volum	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,363	2,63 kg/l	682 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,105	2,67 kg/l	196 kg
Agr.3 Areia	0,532	2,53 kg/l	941 kg

Massa volúm. apar. betão (kg/m ³):	2339	
Massa de um cubo cf a=15cm (kg):	7,89	
Volume absol. inertes grossos (m ³):	0,346	
Volume absoluto da argamassa (m ³):	0,654	
Relações:	A/C	A/(S+C)
	0,49	0,49
Adições (%)	S/(S+C)*100= 0,0	
Permilagem do adjuvante:	6,5	
Rel. volumétrica inertes/cimento:	6,3	
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç):	6,3	
Rel. volum. in. grossos / in. finos:	1,0	

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	180	270
Resist. (MPa):	25	37

1819



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
Dmax (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Ind. de vazios:	0,190

B. Média +10% (A)

Tipo e classe de cimento: Portland Normal	
Quantidade de cimento (kg):	350
Massa volum. absol. do cimento (kg/m3):	3150
Tipo de adição:	
Quantidade de adição (kg):	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m3):	2200
Volume absoluto (m3):	0,111
Percentagem de cimento (%):	13,7
Nome do adjuvante ViscoCrete 20 HE	
Massa volum. (kg/l): 1,08	Quantidade (litros): 2,10

Volume de vazios (litros/m3):	20
Água de amassadura (litros/m3):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,369
--	-------

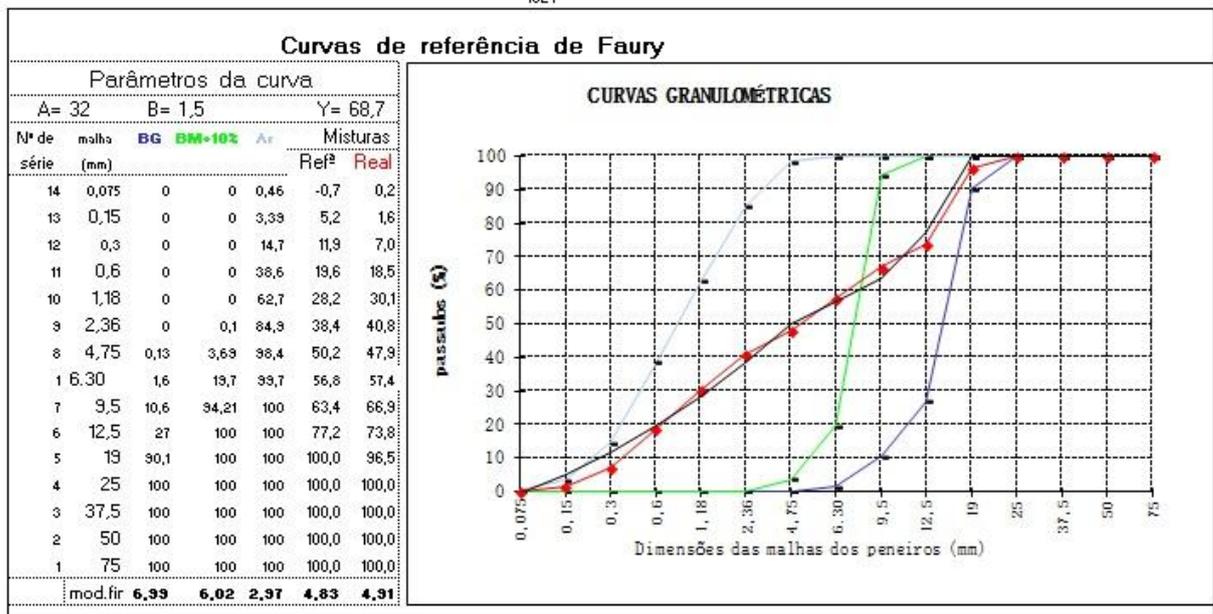
Volume absoluto da totalidade dos inertes (m3):	0,699
---	-------

Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,359	2,69 kg/l	676 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,161	2,67 kg/l	300 kg
Agr.3 Areia	0,480	2,53 kg/l	849 kg

1824

Massa volum. apar. betão (kg/m3):	2344	
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	7,91	
Volume absol. inertes grossos (m3):	0,364	
Volume absoluto da argamassa (m3):	0,636	
Relações:	A/C	A/(S+C)
	0,49	0,49
Adições (%)	S/C*100= 0,0	
	S/(S+C)*100= 0,0	
Permilagem do adjuvante :	6,5	
Rel. volumétrica inertes/cimento :	6,3	
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç) :	6,3	
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,1	

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	180	270
Resist. (MPa):	25	37



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
D _{max} (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Ind. de vazios:	0,190

B. Média + 15% (A)

Tipo e classe de cimento: Portland Normal	
Quantidade de cimento (kg):	350
Massa volum. absol. do cimento (kg/m ³):	3150
Tipo de adição:	
Quantidade de adição (kg):	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m ³):	2200
Volume absoluto (m ³):	0,111
Porcentagem de cimento (%):	13,7
Nome do adjuvante ViscoCrete 20 HE	
Massa volum. (kg/l): 1,08	Quantidade (litros): 2,10

Volume de vazios (litros/m ³):	20
Água de amassadura (litros/m ³):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,369
--	-------

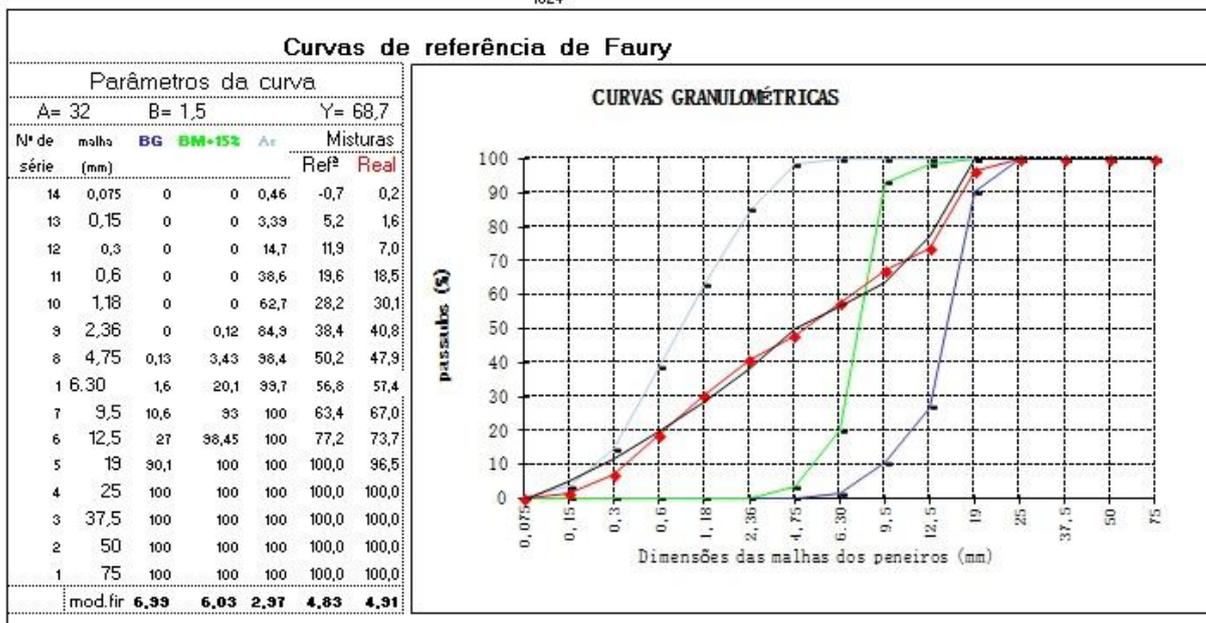
Volume absoluto da totalidade dos inertes (m ³):	0,699
--	-------

Designação dos inertes :	Prop.	Mas. Volum.	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,357	2,69 kg/l	671 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,163	2,67 kg/l	304 kg
Agr.3 Areia	0,480	2,53 kg/l	849 kg

1824

Massa volum. apar. betão (kg/m ³):	2344
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	7,91
Volume absol. inertes grossos (m ³):	0,364
Volume absoluto da argamassa (m ³):	0,636
Relações:	A/C A/(S+C)
	0,49 0,49
Adições	S/C*100= 0,0
(%)	S/(S+C)*100= 0,0
Permilagem do adjuvante :	6,5
Rel. volumétrica inertes/cimento :	6,3
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç):	6,3
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,1

Previsão das resistências:		7 dias	28 dias
Const. Feret	180		270
Resist. (MPa):	25		37



ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE UM BETÃO COM 3 CLASSES DE INERTES

Mistura ajustada à curva de referência de Faury pelo método dos mínimos quadrados

Classe do betão:	C25/30
D _{max} (mm) =	19
Consistência:	S3

Compacidade:	0,810
Índ. de vazios:	0,190

B. Média + 20% (A)

Tipo e classe de cimento:		Portland Normal
Quantidade de cimento (kg):	.....	350
Massa volum. absol. do cimento (kg/m ³):	.....	3150
Tipo de adição:		
Quantidade de adição (kg):	.....	0,0
Massa volum. absol. da adição (kg/m ³):	.....	2200
Volume absoluto (m ³):	.....	0,111
Porcentagem de cimento (%):	.....	13,7
Nome do adjuvante		ViscoCrete 20 HE
Massa volum. (kg/l):	1,08	Quantidade (litros): 2,10

Volume de vazios (litros/m ³):	20
Água de amassadura (litros/m ³):	167,9

Compacidade da pasta ligante, enquanto fresca:	0,369
--	-------

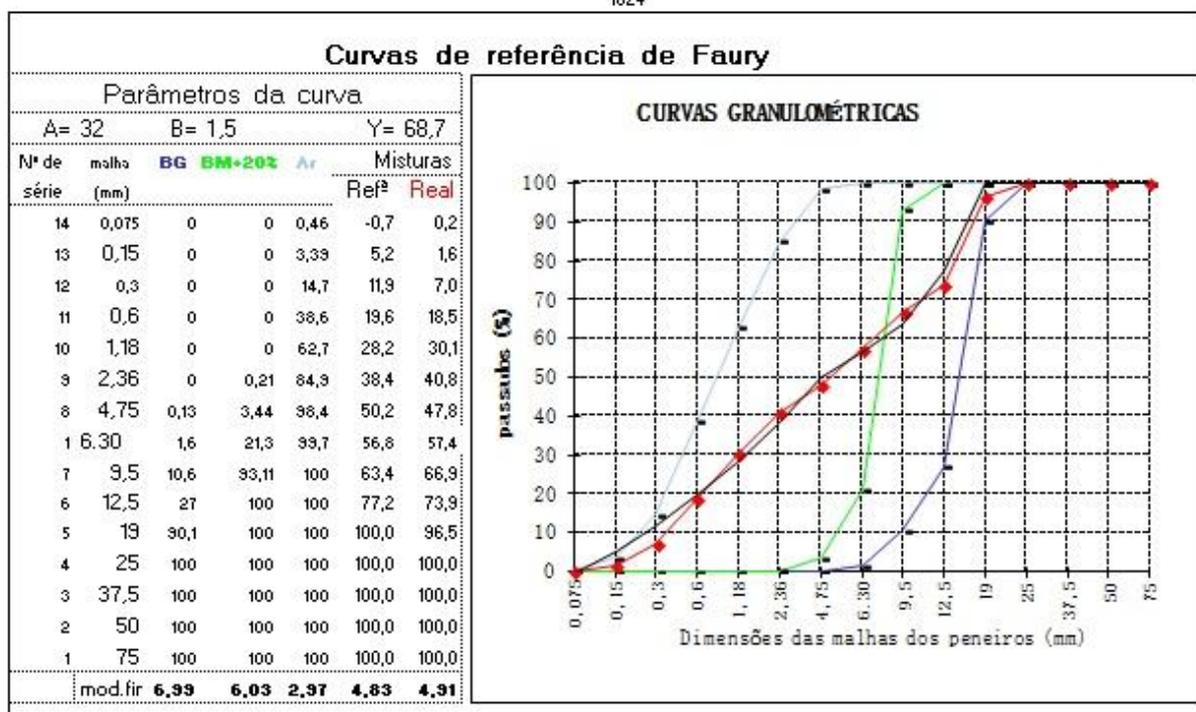
Volume absoluto da totalidade dos inertes (m ³):	0,699
--	-------

Designação dos inertes :	Prop.	Mas.Volum.	Massas
Agr.1 Brita 12/25	0,358	2,69 kg/l	673 kg
Agr.2 Brita 8/12	0,162	2,67 kg/l	302 kg
Agr.3 Areia	0,480	2,53 kg/l	849 kg

Massa volum. apar. betão (kg/m ³):	2344
Massa de um cubo c/ a=15cm (kg):	7,91
Volume absol. inertes grossos (m ³):	0,365
Volume absoluto da argamassa (m ³):	0,635
Relações:	A/C A/(S+C)
	0,49 0,49
Adições (%)	S/C*100= 0,0
	S/(S+C)*100= 0,0
Permilagem do adjuvante :	6,5
Rel. volumétrica inertes/cimento :	6,3
Rel. volum. inertes/(cim.+adiç) :	6,3
Rel. volum. in. grossos / in. finos :	1,1

Previsão das resistências:		
	7 dias	28 dias
Const. Feret	180	270
Resist. (MPa):	25	37

1824



7.3 Gráficos da evolução da resistência na idade do betão

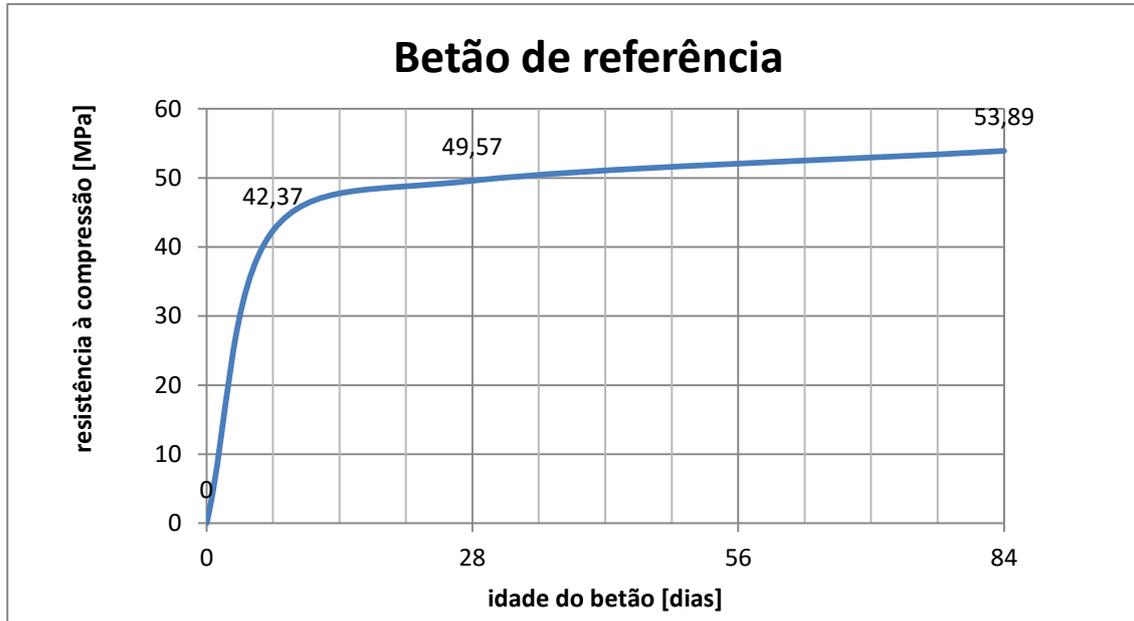


Gráfico 7.8 – Relação da resistência do betão de referência com a idade

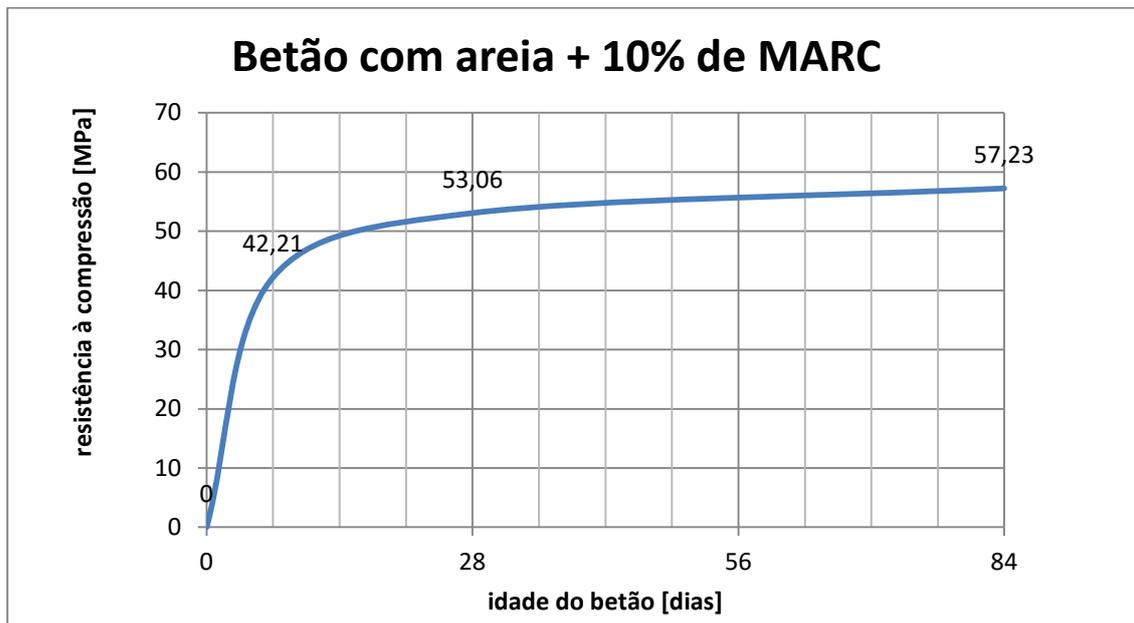


Gráfico 7.9 – Relação da resistência do betão com areia + 10% de MARC com a idade

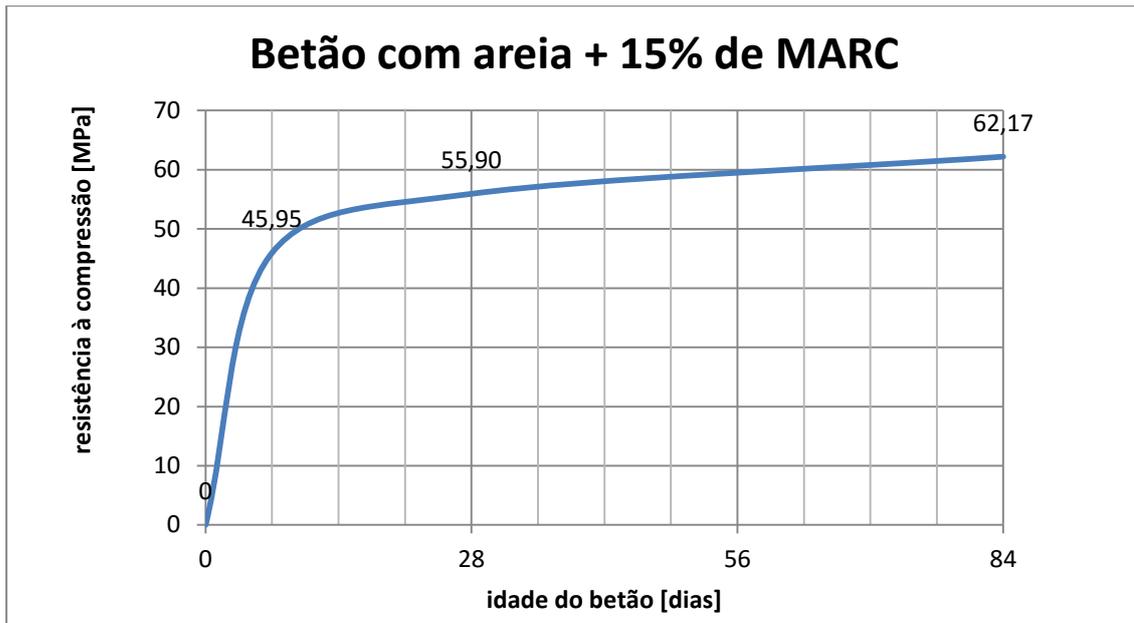


Gráfico 7.10 – Relação da resistência do betão com areia + 15% de MARC com a idade

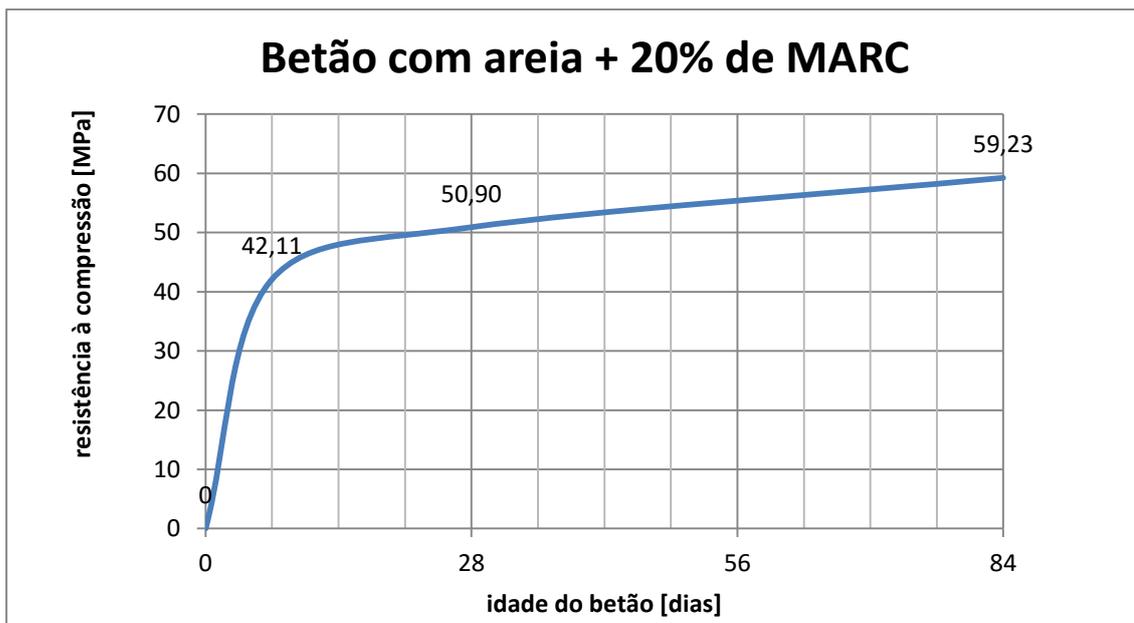


Gráfico 7.11 – Relação da resistência do betão com areia + 20% de MARC com a idade

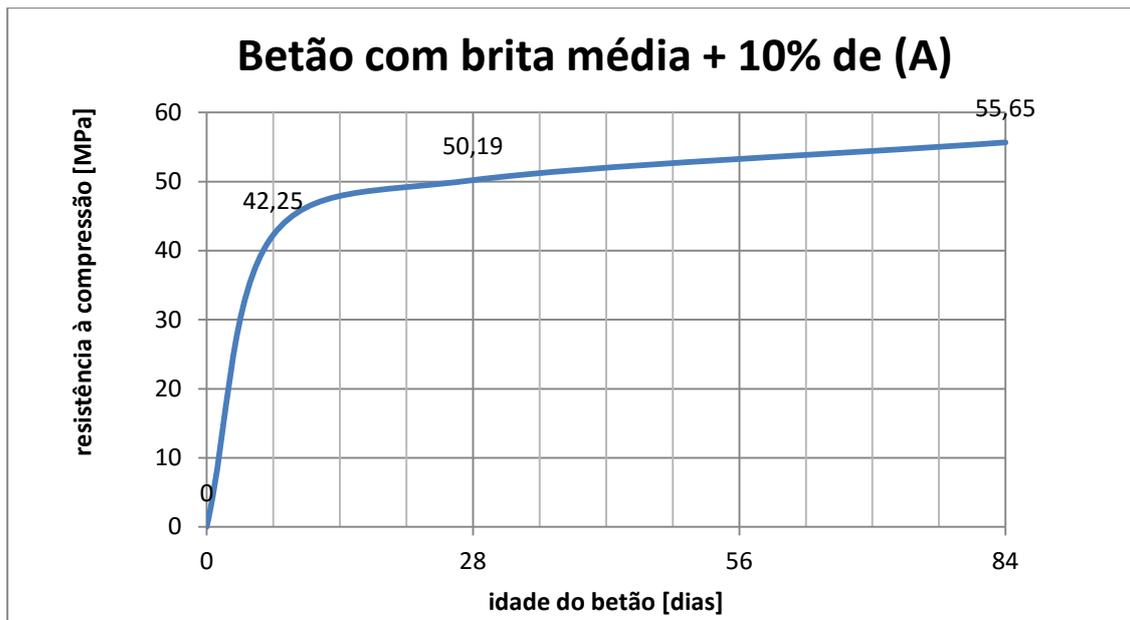


Gráfico 7.12 – Relação da resistência do betão com brita média + 10% de (A) com a idade

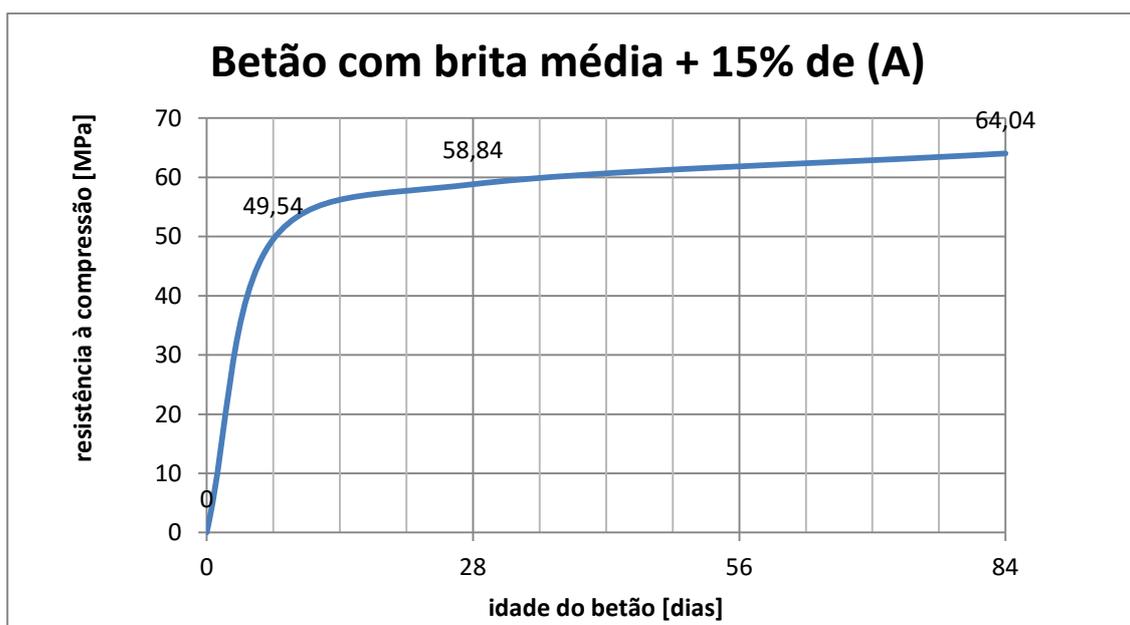


Gráfico 7.13 – Relação da resistência do betão com brita média + 15% de (A) com a idade

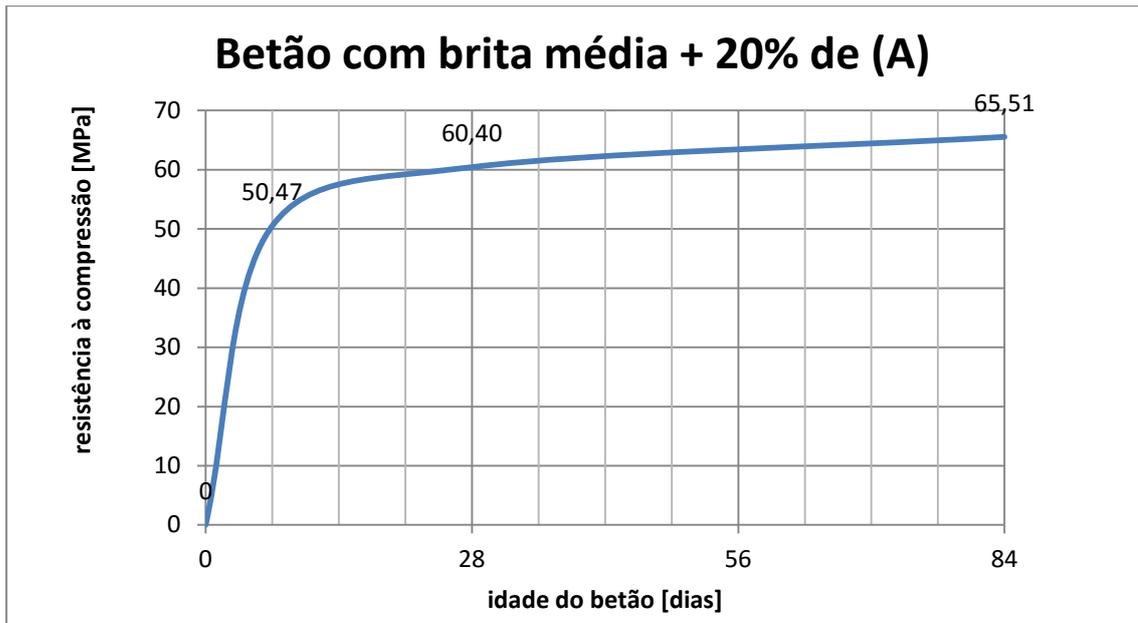


Gráfico 7.14 – Relação da resistência do betão com brita média + 20% de (A) com a idade

Errata

Errata referente à dissertação de Mestrado “Betões com incorporação de agregados cerâmicos reciclados” realizada por Celso Rafael Frias Pinto.

Página	Linha	Onde se lê	Deve ler-se
1	6 e 7	através do seu Programa Ambiente consideram essencial priorizar, o melhoramento da gestão	através do seu Programa Ambiente, consideram essencial priorizar o melhoramento da gestão
4	7	produzidas	produzidos
6	10	dos ensaios realizados	dos ensaios realizados
8	10	aos mesmo resultados	aos mesmos resultados
33	11	normalizadas mas conhecido	normalizadas mais conhecido
38	1	uma análise mais detalhada no gráfico	uma análise mais detalhada do gráfico
42	14	na amassadura irá	na amassadura que irá

Nota: Não se devem contar as linhas em branco, legendas e nem imagens e quadros. Devem-se contar os títulos.