

Desempenho de argamassas produzidas com cimento reciclado

José Augusto Freire Rocha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em construção e Reabilitação

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Orientadores:

Prof. José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Prof. Manuel Francisco Costa Pereira

Júri

Presidente: Prof. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Orientador: Prof. José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Prof. Augusto Martins Gomes

Setembro de 2016

Agradecimentos

A elaboração da presente dissertação apenas foi possível graças a um grupo de pessoas e de algumas oficinas na qual deve-se fazer referência pelo contributo fundamental que deram para a realização desta tese, nomeadamente:

- Aos Professores José Alexandre Bogas e Manuel Francisco Costa Pereira pela orientação, paciência, tempo e interesse demonstrados ao longo de todo o trabalho;
- Ao Sr. Leonel De Jesus Silva, técnico do laboratório de materiais de Construção, do Departamento de Engenharia Civil (IST) pelo apoio no manuseamento e instruções de alguns equipamentos;
- Ao Sr. Fernando Feminho, da oficina de vidros no pavilhão interdisciplinar (IST) pela disponibilidade e apoio no manuseamento do forno;
- A Professora Ana Paula Soares pelo apoio na realização da análise termogravimétrica;
- Ao Sr. Francisco Amorim, técnico de Laboratório de Mineralogia e Petrologia (IST) Seção de Minas, pela execução dos tabuleiros inox para a calcinação dos materiais.

Resumo

O betão é atualmente o material de construção mais utilizado no mundo, sendo motivo de preocupação a parcela relevante de emissões de CO₂ resultantes da sua produção, bem como a necessidade de se encontrarem soluções para a sua reutilização quando este atinge o seu final de vida útil.

Na produção do betão, o cimento é o principal responsável pelo elevado consumo de energia e emissão de CO₂. Neste âmbito, o presente trabalho visa a produção de cimentos reciclados de baixa emissão de CO₂, a partir de elementos de betão existentes, e posterior caracterização de argamassas com incorporação deste ligante. Numa primeira fase foram produzidos provetes de betão e de pasta de cimento, que após um período suficiente de maturação, foram sujeitos a moagem para analisar a sua possível reutilização na produção de cimento reciclado. Após análise termogravimétrica e de difração de raio X, as misturas granulares foram posteriormente submetidas a diferentes patamares de temperatura de modo a promover a sua capacidade de reidratação. Finalmente, procedeu-se à produção e caracterização física e mecânica de argamassas produzidas com incorporação total ou parcial destes ligantes.

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que é viável proceder à reciclagem de elementos de betão existentes para a produção de ligantes com propriedades hidráulicas. Tendo em conta a moagem efetiva do ligante e o seu pré-tratamento a 650°C foi possível produzir argamassas com resistências superiores às evidenciadas por argamassas correntes de cal hidráulica, iniciando um elevado potencial destas soluções para a indústria da construção.

Palavras-chave:

Cimento reciclado, Betão reciclado, Reidratação do cimento, Argamassas com cimento reciclado, Caracterização mecânica.

Abstract

Nowadays, concrete is the world's most widely used construction material, being a major concern the relevant CO₂ emissions generated during its production, as well as the need to seek solutions for its reuse after reaching its lifetime.

In the concrete production, cement is the primarily responsible for the high-energy consumption and CO₂ emissions. In this scope, this work aims at producing low CO₂ recycled cement from existing concrete elements and the subsequent characterization of mortars produced with this binder.

In a first stage, concrete and cement paste specimens were produced and then grinded after they reached enough maturation. By means of thermogravimetric and X-ray diffraction analysis, the granular mixtures were then subjected to different temperature levels in order to promote their hydration capacity. Finally, mortars with partial or total incorporation of the recycled binders were produced and their physical and mechanical characterization was carried out.

The results obtained in this study show that it is viable the production of binders with hydraulic properties from existing concrete elements.

Taking into account the effective grinding and thermal treatment of the recycled binder at 650 °C it was possible to produce mortars with higher mechanical strength than that of common hydraulic lime mortars, which suggests a high potential of these solutions for the construction industry.

Keywords:

Recycled Cement, Recycled Concrete, Cement rehydration, Mortars with recycled cement, Mechanical characterization.

Índice geral

RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABELAS.....	VIII
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. ORIGEM DO CIMENTO.....	4
2.2. COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	4
2.3. FABRICO DO CIMENTO PORTLAND.....	5
2.4. PRINCIPAIS CONSTITUINTES DO CLÍNQUER.....	8
2.5. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	9
2.5.1. REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS.....	9
2.6. PRESA E ENDURECIMENTO.....	10
2.7. FINURA DO CIMENTO DO CIMENTO E FASES SÓLIDAS DA PASTA.....	12
2.8. POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE CIMENTOS RECICLADOS SUJEITO A TRATAMENTO TÉRMICO.....	13
2.8.1. COMPORTAMENTO DO BETÃO SUJEITO A ELEVADAS TEMPERATURAS.....	14
2.8.2. ALTERAÇÃO QUÍMICA DOS PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO QUANDO SUJEITOS A ELEVADAS TEMPERATURAS.....	16
2.9. REIDRATAÇÃO DOS COMPONENTES DESIDRATADOS DO CIMENTO.....	18
2.10. PRODUÇÃO DE CIMENTO RECICLADO TERMICAMENTE REATIVADO.....	21
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	24
3.1. DESCRIÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	24
3.2. PRODUÇÃO DO BETÃO E PASTA DE ORIGEM.....	25
3.2.1. CIMENTO.....	25
3.2.2. AGREGADOS.....	26

3.2.3.	CARACTERIZAÇÃO DO BO NO ESTADO FRESCO.....	26
3.2.4.	PRODUÇÃO DE PROVETES E CARACTERIZAÇÃO DO BO NO ESTADO ENDURECIDO.....	27
3.2.5.	PRODUÇÃO DE PROVETES E CARACTERIZAÇÃO DO PO NO ESTADO ENDURECIDO.....	27
3.3.	BRITAGEM E MOAGEM DOS PROVETES DE BETÃO E DE PASTA.....	28
3.3.1.	MOAGEM DOS PROVETES.....	29
3.3.1.1.	PRIMEIRA FASE DE BRITAGEM.....	29
3.3.1.2.	SEGUNDA FASE DE BRITAGEM.....	30
3.3.1.3.	TERCEIRA FASE DE MOAGEM.....	30
3.3.1.4.	MOAGEM COMPLEMENTAR DE MISTURA SELECIONADA.....	32
3.4.	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E DIFRAÇÃO DE RAIOS X DO MATERIAL MOÍDO.....	33
3.4.1.	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	33
3.4.2.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	33
3.5.	AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS.....	34
3.6.	PASTAS PRODUZIDAS COM E SEM CIMENTO RECICLADO.....	35
3.6.1.	TRABALHABILIDADE DE PASTAS COM E SEM CIMENTO RECICLADO.....	35
3.6.2.	TEMPO DE PRESA DOS LIGANTES.....	36
3.6.2.1.	PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL.....	36
3.6.2.2.	DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE PRESA.....	37
3.7.	PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS.....	38
3.7.1.	MATERIAIS.....	38
3.7.2.	CIMENTO RECICLADO.....	39
3.7.3.	AGREGADOS FINOS.....	40
3.7.4.	FORMULAÇÃO E COMPOSIÇÕES DAS ARGAMASSAS.....	41
3.7.5.	PRODUÇÃO E COMPACTAÇÃO DE PROVETES DE ARGAMASSA.....	44
3.8.	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	44
3.8.1.	ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....	45
3.8.2.	MASSA VOLÚMICA APARENTE.....	45
3.8.3.	VOLUME DE VAZIOS.....	46
3.9.	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	46
3.9.1.	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO E À FLEXÃO.....	47
3.9.2.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	48
3.9.3.	ULTRA-SONS.....	48
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	50
4.1.	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	50
4.2.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	51

4.2.1. DRX DO CIMENTO PORTLAND NORMAL E DO CIMENTO RECICLADO ANTES DE SER CALCINADO.....	51
4.2.2. ANÁLISE DRX AO CRB, APÓS SER AQUECIDO A 350°C E 650°C.....	52
4.2.3. ANÁLISE DRX AO CRP, APÓS SER AQUECIDO A 350°C E 650°C.....	53
4.3. CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO DE PASTAS PRODUZIDAS COM CRP E CRB.....	54
4.3.1. TRABALHABILIDADE DE PASTAS PRODUZIDAS COM CRB E CRP.....	54
4.3.2. TEMPOS DE PRESA DOS LIGANTES.....	55
4.3.2.1. CONSISTÊNCIA NORMAL.....	55
4.3.2.2. INÍCIO E FIM DE PRESA.....	56
4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	57
4.4.1. MASSA VOLÚMICA FRESCA.....	58
4.4.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....	59
4.5. TEOR DE VAZIOS DA ARGAMASSA.....	60
4.6. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	61
4.6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E FLEXÃO DE ARGAMASSAS.....	61
4.6.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO E PERCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO DE CPN POR CRB.....	62
4.6.3. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO E PERCENTAGEM DE SUBSTITUIÇÃO DE CPN POR CRP.....	65
4.6.4. MISTURAS COM CRP E CRB DE MENOR GRANULOMETRIA.....	68
4.6.5. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRA-SONS NAS ARGAMASSAS COM E SEM CIMENTO RECICLADO.....	70
4.6.6. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE MISTURAS COM CRB E CRP.....	72
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	75
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
5.2. CONCLUSÕES GERAIS.....	75
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	80
6. BIBLIOGRAFIA.....	81
ANEXOS.....	85
A1. ENSAIOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	86
A2. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.....	88
A3. RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS ARGAMASSAS DE CRB E CRBF.....	90

A4. RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS ARGAMASSAS DE CRP E CRPF	94
A5. ENSAIO DOS ULTRA-SONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	98
A6. DRX AOS DIFERENTES LIGANTES RECICLADOS	100

Índice de figuras

FIGURA 2.1 – A) ARREFECEDORES DO FORNO; B) CLÍNQUER . [FONTE:WWW.VESURIOS.COM;WWW.PEGASE-INTERNATIONAL.COM] 2015.....	7
FIGURA 2.2 - MOINHO DE BOLAS [FONTE:WWW.CHINAMININGEQUIPMENT.COM.PT] E ESFERAS DE AÇO	8
FIGURA 2.3 – DIFRAÇÃO RAIOS X DO BETÃO DESDE A TEMPERATURA AMBIENTE ATÉ OS 800°C (NOTA: ETTRINGITE(Δ), C-S-H(\bullet), C2S(\square), CALCITE(\blacktriangledown), CAO(\surd)) (SHUI ET AL. 2008).....	17
FIGURA 2.4 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA À UMA AMOSTRA DE BETÃO (XINWEI ET AL. 2010).	18
FIGURA 2.5 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ROTURA COM O AUMENTO DA TEMPERATURA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO DOS PROVETES. ADAPTADO DE (MARKÉTA ET AL. 2011).....	20
FIGURA 2.7 – (A) CIMENTO PORTLAND NORMAL ANTES DE SER AQUECIDO (B) CIMENTO APÓS SER AQUECIDO EVIDENCIANDO MAIOR POROSIDADE (XINWEI ET AL. 2010).....	22
FIGURA 2.8 – RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DE PASTA DE CIMENTO PORTLAND E CIMENTO RECICLADO. ADAPTADO DE XINWEI ET AL (2010).	23
FIGURA 3.1 – ALTURA H DO ENSAIO DE ABAIXAMENTO (COUTINHO 2003).....	27
FIGURA 3.2 –ABAIXAMENTO APÓS ADIÇÃO DE SUPERPLASTIFICANTE	27
FIGURA 3.3 – MOLDES CÚBICOS BETONADOS	27
FIGURA 3.5 – A) BO BRITADO; B) PO BRITADA NA PRIMEIRA FASE DE BRITAGEM	29
FIGURA 3.6 – BRITADEIRA DE ROLOS LISOS USADA NA SEGUNDA FASE DE MOAGEM	30
FIGURA 3.7 – A) PASTA DE CIMENTO; B) BETÃO MOÍDO NA SEGUNDA FASE DE BRITAGEM.....	30
FIGURA 3.8 – MOINHO DE BOLAS E ESFERAS DE AÇO.	31
FIGURA 3.9 – RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMETRIA APÓS TERCEIRA FASE DE MOAGEM.....	31
FIGURA 3.10 – A) MOINHO DE ESFERAS USADO PARA A MOAGEM EXTRA; B) ESFERAS DE AÇO USADAS PARA A MOAGEM EXTRA.....	32
FIGURA 3.11 – EQUIPAMENTO NETZSCH STA 409 PC PARA A ANÁLISE TG [FONTE:WWW.ECN.NL]	33
FIGURA 3.12 – EQUIPAMENTO PANALYTICAL X'PERT PRO [FONTE: HTTP://WWW.DIRECTINDUSTRY.COM]	34
FIGURA 3.13 – FORNO ELÉTRICO TERMOCONTROL 3PR.	35
FIGURA 3.14 – A) MISTURADORA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DAS PASTAS; B) CONE E RECIPIENTE COM CAPACIDADES SUPERIORES A 1,2 LITROS; C) ENSAIO DE ESPALHAMENTO.	36
FIGURA 3.15 – APARELHO DE VICAT MUNIDO DE AGULHA	38
FIGURA 3.16 – BARIDADE DA MISTURA DE AREIA FINA COM AREIA GROSSA	41

FIGURA 3.17 – A) ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO B)) ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO.....	47
FIGURA 3.18 – A) EQUIPAMENTO DA MARCA GRINDOSONIC B) ENSAIO PARA A OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	48
FIGURA 3.19 – INTERFACE DO SOFTWARE FORNECIDO PELA GRINDOSONIC	48
FIGURA 4.1 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA AOS MATERIAIS APÓS TERCEIRA FASE DE MOAGEM.....	50
FIGURA 4.2 – TEMPOS DE PRESA DOS DIFERENTES LIGANTES.....	56
FIGURA 4.4 – VARIAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA APARENTE EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE CRP ADICIONADA À MISTURA.....	58
FIGURA 4.5 – A) ESPALHAMENTO COM FALTA DE CONSISTÊNCIA B) ESPALHAMENTO CORRETO	60
FIGURA 4.6 – A) ARGAMASSA A100CRP; B) ARGAMASSA A100CRPF	61
FIGURA 4.8 – RESISTÊNCIA RELATIVA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS ENTRE AS ARGAMASSAS COM CRB E A ARGAMASSA DE REFERÊNCIA	62
FIGURA 4.18 – VUS RELATIVA ENTRE AS ARGAMASSAS DE CRB E CRP COM A ARGAMASSA DE REFERÊNCIA.	70
FIGURA 4.19 – VUS RELATIVO ENTRE AS ARGAMASSAS DE CRBF E CRPF COM A ARGAMASSA DE REFERÊNCIA	72
FIGURA 4.20 – M. ELASTICIDADE DINÂMICO RELATIVO ENTRE AS ARGAMASSAS DE CRB E CRP COM A ARGAMASSA DE REFERÊNCIA.....	72

Índice de tabelas

TABELA 2.2 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO CIMENTO PORTLAND, ABREVIATURAS E QUANTIDADES PERCENTUAIS. ADAPTADO DE (COUTINHO 1998).....	7
TABELA 2.3 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES DO CLÍNQUER. ADAPTADO DE (PINTO ET AL. 2013).	8
TABELA 2.4 – ABREVIATURAS DOS CONSTITUINTES DO CIMENTO PORTLAND. ADAPTADO DE (BARON 1999).....	9
TABELA 3.1 – COMPOSIÇÃO DO BETÃO DE ORIGEM (BO) E PASTA DE ORIGEM (PO)	25
TABELA 3.2 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO	26
TABELA 3.3 – PROPRIEDADES DOS AGREGADOS.....	26
TABELA 3.4 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA AO BO APÓS TERCEIRA FASE DE MOAGEM.....	31
TABELA 3.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA À PO APÓS TERCEIRA FASE DE MOAGEM.	31
TABELA 3.6 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS LIGANTES RECICLADOS APÓS A MOAGEM COMPLEMENTAR.....	32
TABELA 3.7 – RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMETRIA DO CRP APÓS AQUECIMENTO AOS 650°C	35
TABELA 3.8 – RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMETRIA DO CRB APÓS AQUECIMENTO AOS 650°C	35
TABELA 3.9 – BARIDADE E MASSA VOLÚMICA DOS LIGANTES UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	40
TABELA 3.10 – PERCENTAGEM DE MATERIAL PASSADO NOS PENEIROS DE 250 AOS 63 MM.....	40
TABELA 3.11 – PROPRIEDADES DA AREIA FINA.....	40
TABELA 3.12 – BARIDADE E MASSA VOLÚMICA DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	42

TABELA 3.13 – MISTURAS USADAS PARA A FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS E AS RESPECTIVAS PERCENTAGENS DE LIGANTE RECICLADO.....	43
TABELA 3.14 – PERCENTAGEM DE CIMENTO RECICLADO EFETIVO EM CADA MISTURA DE CRB	44
TABELA 4.2 – CARACTERÍSTICAS DAS PASTAS DE CONSISTÊNCIA NORMAL E TEMPOS DE PRESA DOS LIGANTES	55
TABELA 4.4 – ESPALHAMENTO DAS MISTURAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CIMENTO RECICLADO	59
TABELA 4.5 – VOLUME DE VAZIOS DAS MISTURAS DE ARGAMASSAS.....	61

Símbolos e abreviaturas

AFRB – Agregados Finos de Reciclados de Betão Reciclado

BO – Betão de Origem

CPN – Cimento Portland Normal

CRB – Cimento Reciclado proveniente de Betão

CRBF – Cimento Reciclado proveniente de Betão Fino

CRP – Cimento Reciclado proveniente de Pasta

CRPF – Cimento Reciclado proveniente de Pasta Fina

DRX – Difração de Raios X

E_{AR} – Módulo de elasticidade dinâmico de provetes de argamassa de referência

$E_{CRB/CRBF}$ – Módulo de elasticidade dinâmico de provetes de argamassa de CRB e CRBF

$E_{CRP/CRPF}$ – Módulo de elasticidade dinâmico de provetes de argamassa de CRP e CRPF

$f_{cm,AR}$ – valor médio da tensão de rotura à compressão de provetes de argamassa de referência

$f_{cm,CRB/CRBF}$ – valor médio da tensão de rotura à compressão de provetes de argamassa de CRB e CRBF

$f_{cm,CRP/CRPF}$ – valor médio da tensão de rotura à compressão de provetes de argamassa de CRP e CRPF

$f_{ctm,AR}$ – valor médio da tensão de rotura à flexão de provetes de argamassa de referência

$f_{ctm,CRB/CRBF}$ – valor médio da tensão de rotura à flexão de provetes de argamassa de CRB e CRBF

$f_{ctm,CRP/CRPF}$ – valor médio da tensão de rotura à flexão de provetes de argamassa de CRP e CRPF

HR – Humidade Relativa

MEV – Microscópio de Varrimento Eletrónico

PO – Pasta de Origem

TG – Análise Termogravimétrica

Vus – Velocidade de Propagação de Ultra-Sons

Vus_{AR} – Velocidade de Propagação de Ultra-Sons em provetes de argamassa de referência

$Vus_{CRB/CRBF}$ – Velocidade de Propagação de Ultra-Sons em provetes de argamassa de CRB e CRBF

$Vus_{CRP/CRPF}$ – Velocidade de Propagação de Ultra-Sons em provetes de argamassa de CRP e CRPF

1.Introdução

1.1. Considerações gerais

O aquecimento global é um problema cada vez mais sério que tem reunido várias organizações internacionais com o objectivo de se definirem medidas efetivas para a redução de emissões de gases de efeito de estufa. Cerca de 89% dos gases de efeito de estufa são constituídos por CO₂. No relatório anual da organização meteorológica mundial (OMM) refere-se que em 2014 registou-se um novo recorde de concentração de gases de efeito de estufa, registando-se um aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera para 397,7 partes por milhão (ppm), que todos os anos vence novos recordes.

O betão é atualmente o material de construção mais utilizado no mundo, envolvendo a produção de 5 a 8% das emissões de CO₂ geradas pelo homem (Scrivener, 2008). A indústria do cimento é conhecida como um dos sectores económicos responsável pelo maior consumo de energia e emissão de gases poluentes para a atmosfera. Estima-se que para a produção de 1 tonelada de cimento Portland, liberta-se cerca de 1 tonelada de dióxido de carbono (Scrivener, 2008). Deste valor, cerca de 83% deve-se ao processo de queima e apenas cerca de 6% à extração e ao transporte das matérias-primas (Kwon *et al.* 2015).

Com o objetivo de se evoluir no sentido de uma construção sustentável, a comunidade científica tem exercido um esforço importante na procura de soluções mais económicas e, sobretudo, que visem a redução do impacte ambiental resultante da produção de betão.

Atualmente, já é possível reaproveitar betões provenientes de demolições, onde este passa por um processo de britagem até se obter a granulometria desejada para a sua utilização como agregado para a formulação de novos betões, sendo estes designados por betões de agregado reciclado.

No entanto, é reconhecido que a maior fonte de emissão de CO₂ na produção do betão está relacionada com a produção do cimento. Os outros constituintes, como a areia e o agregado grosso, assumem uma pequena contribuição no total de emissões de CO₂, mesmo tendo em consideração as atividades de extração e transporte destes materiais. Assim, vários trabalhos que têm sido desenvolvidos no sentido de atuar ao nível da reciclagem dos agregados, apesar de permitirem uma melhor gestão dos resíduos naturais, nunca serão uma solução efectiva para se atingir um betão mais “amigo do ambiente”.

Nesse sentido, procuram-se entusiasticamente novas soluções alternativas que permitam reduzir diretamente o consumo de cimento Portland sem prejudicar, de forma significativa, o comportamento mecânico e a durabilidade dos materiais cimentícios. Abordagens industriais para a produção de cimentos de baixa emissão de CO₂ são discutidas por Gartner (2004). Na indústria cimenteira, o plano de redução de CO₂ passa essencialmente por 3 estratégias principais (Kwon *et al.* 2015): A

utilização de combustíveis alternativos; introdução de novas tecnologias que otimizem a eficiência energética; utilização de cimentos compostos. Entre estes, o plano mais efetivo resulta da utilização de adições minerais em substituição parcial do cimento, visto que a emissão de CO₂ provinda de outras fontes que não a descarbonatação, pode ser apenas reduzida, no máximo, em cerca de 10%, recorrendo às outras estratégias alternativas (Kwon *et al* 2015). De facto, inúmeras investigações têm sido conduzidas no sentido de se promover a substituição parcial de cimento Portland por adições minerais (p.e. Yildiz 2005, Rafat 2004, Canan *et al.* 1996), essencialmente resultantes de subprodutos industriais.

Porém, um objectivo mais ambicioso visa a reutilização da matriz cimentícia incorporada em argamassas e betões existentes, permitindo não apenas dar resposta ao reaproveitamento do excesso de resíduos de construção, como também reduzir a produção de cimento Portland com consequências diretas no volume de emissões de CO₂. Foi exatamente com esta preocupação que se procurou desenvolver o presente trabalho, sabendo-se que apesar de já se terem desenvolvido alguns estudos, são ainda escassos os trabalhos de investigação publicados neste domínio.

1.2. Objetivos e Metodologia

O presente trabalho tem como principais objectivos estabelecer um procedimento para o fabrico de cimento reciclado e posterior análise do comportamento de argamassas produzidas com incorporação, total ou parcial, de diferentes percentagens deste ligante, tendo em conta algumas das suas principais propriedades no estado fresco e endurecido. Visando a obtenção de soluções construtivas mais sustentáveis, pretende-se produzir o cimento reciclado a partir de elementos de betão existente, procedendo-se à sua moagem e reactivação por acção térmica.

Numa primeira fase, após a moagem de elementos de betão existente, a mistura granular resultante é submetida a diferentes patamares de temperatura, de modo a introduzir diferentes transformações nos produtos de hidratação da pasta cimentícia. Em simultâneo, são produzidos cimentos reciclados a partir de provetes constituídos apenas por pasta, de forma a facilitar a análise da capacidade de reidratação destes ligantes. Após a optimização da temperatura de fabrico dos ligantes reciclados, procede-se à caracterização física e mecânica de argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição de cimento Portland por cimento reciclado.

No final deste trabalho pretende-se concluir sobre a efectividade dos cimentos reciclados produzidos, nomeadamente tendo em conta a sua influência no comportamento de argamassas utilizáveis na indústria da construção. Desse modo, julga-se que o presente trabalho contribui para o melhor entendimento da potencialidade de se reutilizarem elementos de betão existente com vista à produção de ligantes hidráulicos associados a menores emissões de CO₂ e menores consumos energéticos e de recursos naturais.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho foi estruturado em vários capítulos além da introdução, tal como se descreve a seguir.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão do estado da arte, onde se começa por fazer referência às principais características do cimento Portland. Aborda-se o processo necessário para a produção e hidratação do cimento Portland, desde as matérias primas, reações ao nível do forno, principais constituintes do cimento, temperaturas necessárias para o processo de transformação e as principais reações de hidratação do cimento. Em seguida, apresenta-se uma revisão relativa ao comportamento do betão a elevadas temperaturas e capacidade de reidratação do cimento, temas enquadrados no tópico do presente trabalho.

No capítulo 3 apresenta-se a campanha experimental idealizada ao longo do trabalho, com descrição do processo de fabrico e transformação dos cimentos reciclados, incluindo as etapas de moagem e as diferentes temperaturas a que foram sujeitos. Aborda-se também as caracterizações efetuadas aos ligantes reciclados tendo por base análises termogravimétrica e de difração dos raios x (DRX), bem como ensaios de baridade, massa volúmica, tempos de início e fim de presa e de fluidez de pastas. Finalmente, descrevem-se as etapas e ensaios considerados para a produção e caracterização de argamassas produzidas com os ligantes reciclados, nomeadamente ensaios no estado fresco (consistência, massa volúmica aparente) e no estado endurecido (resistência mecânicas à flexão e à compressão, ultra-sons, módulo de elasticidade dinâmico).

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes da campanha experimental, nomeadamente os resultados relativos à análise termogravimétrica, e de difração dos raios X dos ligantes reciclados, testes de fluidez das pastas, tempos de presa dos ligantes, caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido.

No último capítulo, apresentam-se as conclusões gerais obtidas ao longo do trabalho, e faz-se referência a algumas propostas de desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. Estado da arte

No presente capítulo faz-se a descrição de todo o processo de produção do cimento Portland, desde as matérias primas, processos de transformação no interior do forno, constituintes principais do clínquer, reações de hidratação, etc. De seguida apresentam-se estudos de alguns autores sobre o comportamento do betão quando sujeito às elevadas temperaturas, as alterações e transformações do cimento hidratado quando aquecido e ainda alguns estudos sobre a reidratação dos componentes hidratados do cimento Portland.

2.1. Origem do cimento

O nome cimento tem origem do latim caemento que na velha Roma era usada para designar uma espécie de pedra natural. Pode-se definir o cimento como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade debaixo de água (NP EM 197-1 2001).

O grande avanço no desenvolvimento do cimento começou pelo inglês John Smeaton que com o seu trabalho conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Porém, o francês Luis Joseph Vicat foi o primeiro que, em 1818, percebeu que para obter boas cal hidráulicas era necessário misturar rochas argilosas e calcárias em proporções adequadas, submetendo a mistura a elevada temperatura. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin patenteou o processo de fabrico de uma cal hidráulica artificial, na qual queimou em conjunto as pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino que após hidratar, tornava-se tão dura como as pedras usadas nas construções, registando uma patente de uma cal hidráulica artificial. Este processo manteve-se em segredo até 1844, quando o seu sócio Issac Johnson descobriu que a elevada resistência se devia a cozedura das matérias-primas a uma temperatura elevada, entre 1400°C e 1450°C, na qual forma-se o composto silicato tricálcico, responsável pela elevada resistência, (Pinto *et al.* 2013).

O nome cimento Portland tem origem na descrição realizada feita por Adspin, na qual refere que o produto obtido pela secagem do cimento tem cor, resistência e durabilidade semelhantes ao calcário da ilha britânica de Portland.

2.2. Composição da matéria-prima

O cimento Portland artificial tem como matérias-primas principais, o calcário ou carbonato de cálcio (CaCO_3) e minerais argilosos. Estes últimos são minerais hidratados e contêm grande quantidade de sílica, alumina, entre outros elementos, dependendo do seu tipo. Estas matérias-primas são moídas, homogeneizadas e submetidas à ação de temperaturas elevadas, na ordem dos 1450°C (Coutinho 1998). A relação em massa, entre a quantidade de argila e calcário é de aproximadamente 1 para 4.

É no forno rotativo a elevadas temperaturas que as matérias-primas do cimento Portland reagem entre si através de fenómenos químicos e físicos na qual forma-se uma substância denominada por clínquer, que se apresenta na forma de partículas com diâmetro da ordem de 10 a 30 milímetros. O clínquer moído é misturado com gesso e outras adições, obtendo-se assim o cimento Portland (Pinto *et al.* 2013).

Dentro do forno, o carbonato de cálcio (CaCO_3) decompõe-se dando origem a aproximadamente 56% de óxido de cálcio (CaO) e 44% de dióxido de carbono (CO_2), proporções em massa. A argila decompõe-se numa mistura de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) (Pinto *et al.* 2013). As matérias-primas são doseadas de modo a que a composição química das misturas após eliminação da água e do CO_2 esteja aproximadamente enquadrada nos limites da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Matéria prima do cimento Portland e os respetivos limites percentuais. Adaptado de (Pinto *et al.* 2013)

Designação	Constituição química	Abreviatura	Quantidade [%]
Cal (óxido de cálcio)	CaO	C	60 a 69
Sílica (dióxido de silício)	SiO_2	S	17 a 25
Alumina (óxido de alumínio)	Al_2O_3	A	2 a 9
Óxido de ferro	Fe_2O_3	F	0,5 a 6

Além destes constituintes principais existem ainda outros componentes minoritários como os metais alcalinos (K_2O e Na_2O – 0,5 a 1,5 %), magnésio (MgO – 0 a 2%), manganésio, titânio, fósforo e, eventualmente, sulfatos (Neville 2002).

2.3. Fabrico do cimento Portland

O processo de fabrico do cimento Portland é fundamentalmente constituído por três fases: Extração e preparação da matéria-prima, cozedura e moagem. O fabrico do cimento inicia-se com a exploração da pedra, geralmente de formação calcária ou calcário margoso, na qual é obtido a matéria-prima em forma de blocos de dimensões que variam de 1 a 2m. Os blocos de rochas são de seguida britados com recurso a um britador, normalmente de maxilas, obtendo-se como produto final um material de granulometria contínua, com agregados de dimensão máxima na ordem dos 0,05 a 0,10 m. De seguida, o produto obtido é finamente moído com recurso a moinhos de mós ou de bolas, dando origem a um material designado por farinha ou cru, sendo este produto uma mistura com proporções adequadas de calcário e margas (Pinto *et al.* 2013).

Basicamente, o cimento pode ser fabricado por duas vias, uma húmida, em que a matéria-prima é moída e homogeneizada dentro de água e uma via seca em que a moagem e homogeneização se realizam a seco (Coutinho 1998).

A primeira via de fabrico do cimento, por exigir maior consumo energético na eliminação da água de mistura, é menos frequente, não sendo adotada esta técnica em Portugal. No segundo método, por via seca, a matéria prima é moída e homogeneizada a seco, requerendo menor tempo no interior do forno e conseqüentemente, menores custos energéticos. Este método apenas se tornou possível graças à técnica de fluidificação gasosa (Coutinho 1998).

A clinquerização ocorre no interior de um forno rotativo constituído por um cilindro de aço com diâmetro que varia entre 4 a 8 m. No interior do forno, a matéria-prima desloca-se ao longo de um comprimento que pode atingir cerca de 250 m com auxílio de duas a três rotações por minuto e uma ligeira inclinação que varia dos 3 a 4%. Para o aquecimento dos fornos são usados combustíveis como o carvão mineral (coque), *fuel oil*, *pet-coque* (derivado do petróleo de grande viscosidade), gás natural, estilha de madeira (considerado como renovável) (Pinto *et al.* 2013) e ainda materiais resultantes de subprodutos industriais, de forma a reduzir a pegada ambiental. Todos os combustíveis usados libertam uma grande massa de gases poluentes para a atmosfera, exigindo medidas para monitorizar e controlar o seu impacto ambiental.

As reações que ocorrem entre os componentes da matéria prima por ação da temperatura, são reações no estado sólido, ajudadas pela fase líquida, resultantes da fusão de cerca de 20% da matéria-prima (Coutinho 1998). A velocidade de reação entre fases sólidas é função do grau de finura, da natureza química das matérias e da duração do aquecimento. No estado líquido as reações são mais rápidas e os produtos de reação apenas dependem da temperatura e da composição química das fases líquidas.

Importa perceber as principais reações que ocorrem durante o processamento térmico da matéria-prima. Assim, com a evolução da temperatura no interior do forno, distinguem-se as seguintes etapas principais:

- Aos 100°C ocorre a libertação da água livre;
- Aos 450°C, ocorre a saída da água adsorvida;
- Até aos 800°C ocorre a desidratação dos minerais argilosos, com eliminação da água de constituição;
- Entre os 700°C e os 900°C, dá-se a decomposição dos carbonatos, formando-se óxidos de cálcio (CaO) e óxidos de magnésio (MgO);
- Entre os 900°C e os 1200°C, ainda em fase sólida, o óxido de cálcio (CaO) reage progressivamente com a sílica (SiO₂) formando o silicato bicálcico (C₂S) e também com a alumina para formar aluminato tricálcico (C₃A) ou na presença de óxidos de ferro, para formar ferro-aluminato tetracálcico (C₄AF);
- Entre cerca de 1260°C e 1450°C inicia-se o aparecimento da fase líquida, que promove a reação de parte do C₂S com o CaO remanescente dando origem ao silicato tricálcico (C₃S). Nesta fase, consome-se grande quantidade de energia, pois as reações desenvolvidas são fortemente endotérmicas.
- Após a formação do clínquer, inicia-se o arrefecimento acelerado, evitando-se a cristalização da fase líquida em aluminato tricálcico (C₃A) e em ferro-aluminato tetracálcico (C₄AF) e garantindo-se a estabilização do C₃S e C₂S formados a elevada temperatura;

Como referido, apenas 20% da matéria-prima funde no interior do forno, sendo que as reações químicas nos restantes 80% da massa ocorrem no estado sólido (Pinto *et al.* 2013).

Após o processamento térmico, a mistura é arrefecida de forma rápida com auxílio de tubos arrefecedores que envolvem o, Figura 2.1a) (planetário). Este processo de arrefecimento tem de ser executado de forma célere, de modo a não permitir que as reações químicas que ocorreram durante o aquecimento possam reverter, ou seja, o silicato tricálcico decompor-se novamente em silicato bicálcico e em óxido de cálcio, e o silicato bicálcico dar origem a uma forma alotrópica, que tem propriedades fracamente reativas com a água.

Em resumo, as matérias primas do cimento reagem entre si por ação da temperatura, dando origem aos principais constituintes do cimento Portland, que são apresentados na Tabela 2.2. As percentagens indicadas na Tabela 2.2 referem-se à proporção usual que estes constituintes assumem nos cimentos Portland.

Tabela 2.2 - Principais componentes do cimento Portland, abreviaturas e quantidades percentuais. Adaptado de (Coutinho 1998)

Designação	Constituição química	Abreviatura	Quantidade [%]
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	20 a 65
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	10 a 55
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	0 a 15
Aluminoferrato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 a 15

Após a saída do forno e respetivo arrefecimento para uma temperatura na ordem dos 120 aos 180°C, obtém-se o clínquer, a que corresponde um material sólido, duro e granulado, constituído por partículas aproximadamente esféricas, com diâmetro entre 10 a 30mm, Figura 2.1b).

Nesta fase, o clínquer ainda não apresenta as características necessárias para ser considerado cimento Portland, nomeadamente a capacidade de reagir eficazmente com a água. Para tal, é ainda necessário proceder à sua moagem em moinhos de bolas constituídos por cilindros de aço, nos quais se fazem movimentar bolas de aço no seu interior de modo a micronizar o clínquer, Figura 2.2. Como foi referido, a finura do grão é determinante para as propriedades do cimento, considerando-se satisfatório a presença de cerca de 10^{12} partículas por kg de cimento (Neville 2002). De referir ainda que é durante esta fase que se adiciona um sulfato ao cimento, normalmente gesso, de modo a controlar a sua reatividade na presença da água.

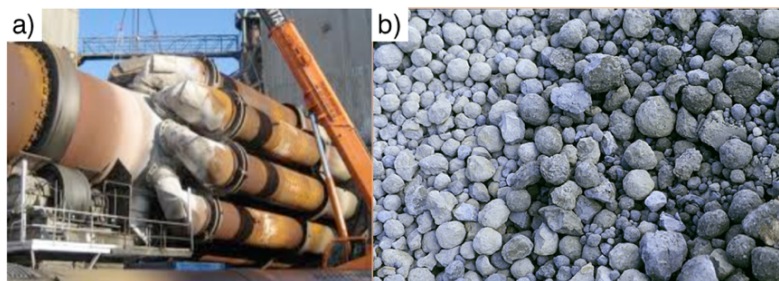


Figura 2.1 – a) Arrefecedores do forno; b) Clínquer . [Fonte:www.vesurios.com;www.pegase-international.com] 2015



Figura 2.2 - Moinho de bolas [Fonte:www.chinaminequipment.com.pt] e esferas de aço

2.4. Principais constituintes do clínquer

No quadro 2.3 resumem-se algumas das principais características dos principais constituintes do clínquer.

Tabela 2.3 – Características dos principais constituintes do clínquer. Adaptado de (Pinto et al. 2013).

Componente do clínquer	Proporções (%)	Velocidade de hidratação	Desenvolvimento da resistência mecânica	Resistência ao ataque químico
C ₃ S	60	Elevada	Rápido e prolongado	Pequena
C ₂ S	20	Moderada	Lento e muito prolongado	Moderada
C ₃ A	8	Muito elevada	Muito rápido e de curta duração	Muito pequena
C ₄ AF	12	Elevada	Lento e pouco significativo	Grande

Dos constituintes do clínquer, os que mais contribuem para o desenvolvimento da resistência mecânica são os silicatos tricálcico C₃S e bicálcico C₂S, sendo que os primeiros contribuem de forma mais importante para a resistência inicial, dado serem mais reativos. Por esse motivo, este constituinte é o responsável pelas propriedades mecânicas da pasta de cimento nos primeiros dias de idade, ao passo que o C₂S contribui para o desenvolvimento da resistência a longo prazo. Durante a hidratação dos silicatos de cálcio, em especial o C₃S, produz-se grandes quantidades de hidróxido de cálcio Ca(OH)₂. Assim, dado que o Ca(OH)₂ é muito reativo e responsável por vários mecanismos de deterioração do betão, a resistência ao ataque químico do C₃S é considerada baixa. Contudo, a elevada quantidade de hidróxidos garante a alcalinidade necessária para passivar as armaduras no interior do betão e assim melhorar a resistência à corrosão.

O ferro-aluminato tetracálcico C₄AF não tem especial relevância para o desenvolvimento das propriedades mecânicas, mas apresenta grande estabilidade química. Por sua vez, o aluminato tricálcico C₃A é suscetível de ser atacado por sulfatos, formando-se sulfoaluminato de cálcio (etringite), que por ser acompanhado de aumento de volume, exerce forças expansivas na pasta de cimento endurecida que causam a sua rotura (Pinto et al. 2013). Assim, o aluminato tricálcico e ferro-aluminato tetracálcico têm pouca relevância no desenvolvimento das propriedades mecânicas do cimento, podendo ser inclusivamente indesejáveis por razões de durabilidade. No entanto, estes compostos são importantes durante o fabrico do clínquer. No interior do forno, estes constituintes funcionam como fundentes, permitindo a obtenção de fase líquida a temperaturas inferiores daquelas necessárias para a reação química da sílica com o óxido de cálcio, reduzindo deste modo as necessidades energéticas (Pinto et al. 2013).

2.5. Hidratação do cimento Portland

Em contacto com a água, os silicatos e os aluminatos que se encontram no cimento reagem dando origem a compostos estáveis que cristalizam com hábito acicular, que ao envolverem-se entre si vão dar resistência ao cimento. Este fenómeno que implica a reação química dos constituintes do cimento com a água, vai dar origem a um material sólido com resistência mecânica, a pasta de cimento hidratada (Pinto *et al.* 2013).

2.5.1. Reações de hidratação dos componentes principais

Como foi referido, para que se forme um sólido com determinada resistência, é necessário que os componentes principais do cimento reajam com a água e se formem novos compostos hidratados estáveis. De modo a permitir a leitura e interpretação das reações envolvidas no processo de endurecimento do cimento, é comum considerarem-se as abreviaturas indicadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Abreviações dos constituintes do cimento Portland. Adaptado de (Baron 1999)

Designação	Constituição química	Abreviatura
Cal (óxido de cálcio)	CaO	C
Sílica (dióxido de silício)	SiO ₂	S
Alumina (óxido de alumínio)	Al ₂ O ₃	A
Óxido de ferro (óxido de ferro)	Fe ₂ O ₃	F
Água	H ₂ O	H

Em seguida faz-se referência às principais reações de hidratação que envolvem os constituintes maioritários do cimento. Na realidade, as reações tendem a ser mais complexas, podendo assumir outras formas face às indicadas. Por outro lado, as reações apresentadas correspondem à hidratação total dos componentes, o que nem sempre ocorre, dado que estas se desenvolvem de forma lenta a partir da periferia das partículas de cimento.

Silicato Tricálcico

O silicato tricálcico ao reagir com a água forma silicatos de cálcio hidratados e liberta hidróxido de cálcio, sendo que uma parte cristaliza e outra fica em solução (Equação 2.1). Os silicatos hidratados são apenas estáveis em meios saturados de hidróxido de cálcio, para valores de PH superiores a 12.



Silicato Bicálcico

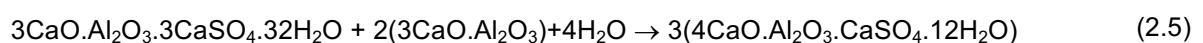
Ao reagir com a água, o silicato bicálcico também liberta hidróxido de cálcio, mas numa quantidade inferior em cerca de 30% face ao libertado pelo silicato tricálcico (Neville 2002) (Equação 2.2), isto apesar de os dois constituintes exigirem aproximadamente a mesma quantidade de água de hidratação. Os silicatos bicálcico hidratados tendem a possuir uma relação CaO/SiO₂ ligeiramente

superior face às resultantes do C_3S . Este composto hidratado apresenta também um domínio de estabilidade superior ao dos produtos de hidratação do C_3S , requerendo domínios de PH superiores a 11. Os silicatos que resultam da hidratação do C_3S e C_2S são geralmente designados apenas por C-S-H (Pinto *et al.* 2013), visto que a composição química rigorosa varia com a relação a/c, idade de hidratação e temperatura. Note-se que a composição dos C-S-H pode ser diferente das indicadas, com a relação CaO/SiO₂ a poder variar entre cerca de 1,4 e 2 (Coutinho 1998).



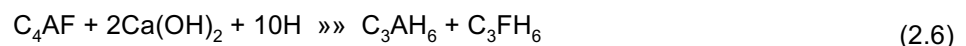
Aluminato Tricálcico

A reação do C_3A com a água é imediata, originando hidratos cristalinos como o C_3AH_6 e o C_4AH_{19} (Mehta 1996) (Equação 2.3). Estas reações associadas a elevados calores de hidratação, caracterizam-se por ser muito rápidas e exotérmicas, conferindo rigidez à pasta de cimento em apenas alguns minutos. Para evitar a reação demasiado rápida dos aluminatos com a água, é necessário adicionar um sulfato, usualmente o gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – sulfato de cálcio bi-hidratado). É comum a adição de gesso, numa proporção de 3 a 4% da massa de clínquer. Dependendo da concentração de iões sulfato e Aluminato, a reação do gesso com os aluminatos vai originar trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite - $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) (Equação 2.4). que, após o consumo total do gesso, vai se transformar mais tarde em monossulfatos hidratados $3(4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O)$ (Equação 2.5) (Odler 1998). Os sulfatos vão contribuir ainda para acelerar a hidratação dos silicatos, na medida em que a solubilidade deste composto aumenta na presença de iões sulfato.



Ferro-aluminato tetracálcico

A reação completa da hidratação do ferro-aluminato tetracálcico envolve o hidróxido de cálcio proveniente do silicato tricálcico e silicato bicálcico (Equação 2.6). Desta reação forma-se aluminato tricálcico e ferrato tricálcico hidratados.



2.6. Presa e endurecimento

A hidratação do cimento deverá envolver dois mecanismos que implicam a dissolução e posterior precipitação dos componentes do cimento e desenvolvimento das reações diretamente na superfície das partículas de cimento anidro (Mehta 1996).

Os componentes do cimento desenvolvem velocidades de hidratação diferentes. Os aluminatos são os que reagem mais rapidamente com a água, sendo os principais responsáveis pelo ganho inicial de resistência do ligante e consequente desenvolvimento da presa. Os silicatos de cálcio têm um papel mais preponderante no desenvolvimento subsequente das reações de endurecimento. No entanto, na presença de gesso, o C_3S das partículas finas de cimento, pode começar a hidratar em menos de uma hora, contribuindo também para a presa do cimento.

No início da hidratação, enquanto a relação sulfato/aluminato é ainda elevada, ocorre precipitação de etringite que contribui para a perda de consistência da pasta. Posteriormente, com a redução do teor de sulfato e o incremento do teor de novos aluminatos hidratados, a etringite torna-se instável e é gradualmente convertida em monossulfatos (Mehta 1996).

A presença de aluminatos no cimento faz com que no início deva ocorrer uma rápida reação dos aluminatos e sulfatos em solução, formando-se uma fina camada de produtos de hidratação (Mehta 1996), essencialmente agulhas curtas de etringite. Após alguns minutos, quando a solubilidade dos aluminatos diminui, segue-se um período de relativa inatividade, o período de dormência, que permite que o cimento mantenha características plásticas durante o tempo suficiente necessário à sua colocação em obra. A formação de etringite acalma a hidratação do C_3A , por criação de uma barreira similar à que se refere para os C-S-H. Quando a disponibilidade de sulfato não é suficiente, ocorre a conversão em monossulfato e o C_3A volta a reagir rapidamente (Mindess 2003).

Em relação ao C_3S , no instante em que se adiciona a água ao cimento, íons de cálcio e hidróxido da superfície do C_3S são rapidamente libertados para a solução, e o PH aumenta para valores superiores a 12 em poucos minutos. Em seguida esta taxa de dissolução é reduzida e progride lentamente durante o período de indução até que a concentração de hidróxido e de cálcio (CH) atinja um valor crítico, a partir do qual a reação dos C_3S volta a ser importante. Aparentemente, o CH cristaliza a partir da solução enquanto os C-S-H desenvolvem-se na superfície dos grãos, formando uma fina camada. Esta camada vai progredindo na sua espessura à medida que as reações de hidratação progredirem, tornando cada vez mais difícil o acesso de água à região interna dos grãos não hidratados. O C_2S hidrata de forma similar, mas sendo menos reativo do que o C_3S , envolve menores velocidades de reações (Mindess 2003).

Após cerca de 2 a 4 horas, o desenvolvimento de etringite e a reação do C_3S voltam a ser relevantes até se atingir um máximo de taxa de hidratação, que ocorre após cerca de 4 a 8 horas. Posteriormente, a pasta já se encontra suficientemente rígida e as velocidades de reação diminuem até atingirem valores estáveis compatíveis com o lento desenvolvimento do endurecimento e resistência da pasta a longo prazo.

A presa define-se como sendo a etapa inicial do endurecimento correspondente ao intervalo de tempo em que o desenvolvimento das reações de hidratação conduzem a um ganho progressivo da

rigidez do ligante até que este deixe de se tornar manuseável. O tempo de início de presa é caracterizado pelo final do período dormente ou de indução, na qual verifica-se uma perda de fluidez e de plasticidade em simultâneo com o ganho inicial de resistência. O fim de presa corresponde ao instante em que o cimento se torna um sólido rígido, perdendo a sua plasticidade (Pinto *et al.* 2013). Após a presa, o cimento continua a ganhar rigidez com o passar do tempo, resultado do progressivo desenvolvimento das reações químicas de hidratação.

2.7. Finura do cimento e fases sólidas da pasta

A quantidade de material diretamente disponível para a hidratação é determinada pela superfície específica do cimento. A superfície específica do cimento Portland corrente é de 350 a 380 m²/kg (Neville 2002) e a dimensão da maioria das partículas está compreendida entre 1 a 50 µm (Mehta 1996). Quanto maior a dimensão das partículas, menor será a superfície específica. A finura do cimento desempenha um papel fundamental na velocidade de hidratação, sendo esta mais elevada quanto mais fina for a dimensão das partículas (Cánovas 2007). Desse modo, a finura do cimento desempenha também um papel fundamental no desenvolvimento da resistência mecânica, sendo mais elevada quanto mais fino for o grão. Nos cimentos de maior resistência a superfície chega aos 450 m²/kg (Baron 1999), o que faz com que o desenvolvimento da resistência inicial seja mais elevado. Em contraste ocorre um menor crescimento da resistência a longo prazo, em relação ao cimento Portland corrente.

As reações de hidratação iniciam-se na superfície dos grãos do cimento, progredindo ao longo do tempo para o seu interior (Pinto *et al.* 2013). Quanto maior for a dimensão do grão, mais difícil se torna a sua hidratação total, sendo que muitas das vezes estas partículas não chegam a hidratar completamente. Segundo Pinto *et al.* (2013) a resistência inicial ganha pelo cimento é conferida pela hidratação das partículas de menores dimensões, sendo o ideal ter pelo menos 50% da massa total composta por partículas dos 3 aos 40 µm.

No cimento endurecido, pode-se considerar que as fases sólidas mais importantes são os silicatos de cálcio hidratados, hidróxidos de cálcio, sulfoaluminato de cálcio hidratados e partículas de cimento anidro. Em seguida, aborda-se resumidamente cada uma destas fases.

Hidróxido de cálcio

Esta fase ocupa cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, sendo constituída por cristais em forma de prismas hexagonais de grandes dimensões e bastante menor superfície específica do que os C-S-H. Os cristais de hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, cuja abreviatura é CH, são também designados por *Portlandite*. O contributo para as propriedades mecânicas do cimento é bastante inferior face aos C-S-H.

Sulfoaluminato de cálcio hidratado

Esta fase que ocupa apenas entre 15 a 20% do volume total de sólidos da pasta de cimento, quando convertida em monossulfatos é responsável pela vulnerabilidade dos materiais cimentícios ao ataque

de sulfatos. Tanto a etringite como os monossulfatos desempenham um papel pouco relevante na resistência mecânica do cimento.

Silicatos de cálcio hidratado

Como já foi referido, esta fase resulta da hidratação do C_3S e C_2S , na qual designa-se pela abreviatura C-S-H. Sendo esta a fase mais importante, ocupa cerca de 50 a 60% do volume de sólidos, desempenhando um papel fundamental para as propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratado. Devido à sua natureza coloidal, os C-S-H apresentam superfícies específicas muito elevadas, o que promove uma grande efetivação das forças de Van der Waals responsáveis pela sua resistência (Mindess 2003, Neville 2002).

Partículas de cimento não hidratado

Como já foi referido no capítulo 2.7, as partículas de cimento mais finas são as que hidratam com maior velocidade e facilidade, ficando algumas partículas de maior dimensão por hidratar e envolvidas pelos compostos resultantes da hidratação das partículas mais pequenas ou da sua superfície.

2.8. Potencial de produção de cimentos reciclados sujeito a tratamento térmico

Com o objetivo de se evoluir no sentido de uma construção sustentável, a comunidade científica tem exercido um esforço importante na procura de soluções mais económicas e, sobretudo, que visem a redução do impacto ambiental.

Como é reconhecido, o betão é o material mais utilizado no mundo, estimando-se, de forma grosseira, a produção anual de 1 m^3 per capita (Scrivener 2008). A facilidade de produção e colocação, as adequadas propriedades mecânicas, o baixo custo e elevada disponibilidade de matérias-primas, são algumas razões que justificam o seu sucesso (Chuah *et al.* 2014).

No entanto, o betão atualmente é responsável pela produção de 5 a 8% das emissões de CO_2 geradas pelo homem (Scrivener 2008).

De forma indicativa, uma tonelada de CO_2 é emitida para a atmosfera por cada tonelada de cimento Portland produzido. Estas emissões resultam essencialmente da descarbonatação do calcário (50-60%) e da queima dos combustíveis utilizados durante a produção do clínquer (Scrivener 2008).

Assim, vários trabalhos que têm sido desenvolvidos no sentido de atuar ao nível dos agregados, como é o caso da utilização de agregados reciclados, têm um papel importante na gestão dos resíduos naturais, mas nunca serão a solução para resolver o problema da sustentabilidade do betão, ou na procura de se alcançar um betão “amigo do ambiente”.

Abordagens industriais para a produção de cimentos de baixa emissão de CO₂ são discutidas por Gartner (2004). Na indústria cimenteira, o plano de redução de CO₂ passa essencialmente por 3 estratégias principais (Kwon *et al.* 2015): Utilização de combustíveis alternativos; introdução de novas tecnologias que otimizem a eficiência energética; utilização de cimentos compostos. De facto, inúmeras investigações têm sido conduzidas no sentido de se promover a substituição parcial de cimento Portland por adições minerais (Yildiz 2005, Rafat 2004, Canan *et al.* 1996), essencialmente resultantes de sub-produtos industriais.

Outros trabalhos mais ambiciosos, visam a reutilização da matriz cimentícia incorporada em argamassas e betões existentes, permitindo não apenas dar resposta ao reaproveitamento do excesso de resíduos de construção, como também reduzir a produção de cimento Portland com consequências diretas no volume de emissões de CO₂. Foi exatamente com esta preocupação que se procurou desenvolver o presente trabalho, sendo que nas restantes secções procura-se abordar os principais desenvolvimentos que se têm realizado neste domínio.

2.8.1. Comportamento do betão sujeito a elevadas temperaturas

A compreensão do comportamento do betão a elevadas temperaturas permite perceber e prever melhor o comportamento dos resíduos de betão durante a sua queima.

Sendo o betão um material compósito, os seus constituintes reagem de forma diferente quando sujeito a elevadas temperaturas (Morales *et al.* 2011). Assim, segundo Caraslindas (2004) os principais fatores que determinam o comportamento do betão sujeito a elevadas temperaturas são: temperatura máxima de exposição; tipo de agregado; relação água/ligante; tipo de cimento; humidade do betão; taxa de aquecimento e arrefecimento; dimensões do elemento em análise (espessura); tipo de cura; trabalhabilidade do betão; massa volúmica do betão; tempo de exposição.

Apesar de não ocorrer libertação de gases tóxicos, o aumento de temperatura em elementos de betão causa alterações micro e macroestruturais (Morales *et al.* 2011). Na Tabela 2.5 resumem-se, de forma sucinta, as principais alterações físicas e mecânicas ocorridas no betão, quando este é sujeito a elevadas temperaturas. São ainda indicadas as variações cromáticas observadas para diferentes temperaturas do betão. Entre os 200 e 350°C, sobretudo em betões húmidos e de maior compacidade, pode ocorrer o fenómeno conhecido como “*explosive spalling*” (Morales *et al.* 2011), associado ao destacamento violento de lâminas de betão.

Os elevados gradientes que resultam da baixa condutividade do betão, contribuem para este efeito, sendo menos importantes quando o aquecimento é feito de forma mais lenta.

Em relação à perda de resistência mecânica do betão com o aumento de temperatura, vários autores reportam o aparecimento e desenvolvimento progressivo de microfissuras que conduzem à depreciação acentuada da resistência (Morales *et al.* 2011, Neville 2002). O aumento de temperatura

afeta também a aderência entre o agregado e a matriz cimentícia, contribuindo para a desagregação do betão (Lima 2004).

Tabela 2.5 - Alterações físicas e químicas no betão quando sujeito a elevadas temperaturas. Adaptado de (Rosso 1975, Neville 1923)

Temperatura [°C]	Cor	Alteração física e química
<250	Cinza	Pouca perda de resistência
285-300	Cinza - róseo	Fissuração superficial e lascamento
300	Rosa	Início de mudança de cor e aumento da redução das propriedades mecânicas
50-400	De cinza à Rosa	Redução do módulo de deformabilidade
535-550	Roxo	Fissuração profunda e friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650	Cinza esbranquiçado	Perda das propriedades mecânicas
790-800	Cinza	Lascamento do recobrimento com exposição até 25% das armaduras
900	Amarelo alaranjado	Superfície pulverulenta
1000	Amarelo claro	

A calcinação dos agregados é uma reação endotérmica, ou seja, o calor é absorvido, o que provoca um aumento da temperatura. A calcinação provoca ainda a expansão do agregado e por consequência a sua fragmentação (Lin 1996).

Face a outros tipos de agregados, os de natureza siliciosa conduzem a maior perda de resistência do betão a elevadas temperaturas. Nos betões com agregados calcários é atribuída uma melhor qualidade da zona de interface agregado-pasta e uma menor diferença nos coeficientes de expansão térmica entre a matriz de argamassa e o agregado grosso.

Por outro lado, os agregados ricos em quartzo tais como o granito, arenito e alguns xistos, quando aquecidos até cerca de 573°C sofrem uma expansão repentina (Landi 1986), de cerca de 0.85%. Sousa e Moreno (2003), verificaram que em betões com agregado granítico sujeitos a 600°C, a resistência a compressão diminuiu cerca de 86% face ao valor observado no betão com o mesmo tipo de agregado que não foi pré-aquecido. Por sua vez, as rochas carbonatadas estão sujeitas a reações de descarbonatação acima de cerca de 700°C (Mehta 1996).

A partir de 100°C a água livre e capilar vai sendo eliminada por evaporação, retardando o aquecimento do betão. Entre 200 e 300°C a água capilar é completamente eliminada, sem alterações importantes na resistência (Revuelra 2008). De facto, até cerca de 300°C, as perdas de resistência são pouco significativas (Morales *et al.* 2011, Mindess 2003). Entre 300 e 400°C as resistências diminuem e podem aparecer fissuras superficiais. A partir dos 600°C, os agregados expandem-se diferencialmente gerando tensões internas que desagregam o betão (Revuelra 2008). Quando o

betão é sujeito a temperatura igual ou superior a 600°C, são visíveis danos superficiais e acima de 1200°C, a desintegração é total (Markéta *et al.* 2011).

De acordo com Mindess (2003), o decréscimo na resistência e no módulo de elasticidade é atribuída à combinação da decomposição dos produtos de hidratação, deterioração dos agregados e incompatibilidade térmica entre os agregados e a matriz circundante.

Não é fácil estabelecer um comportamento generalizado para o betão quando sujeito a elevadas temperaturas. De acordo com Neville (1995), diferentes constatações podem ser obtidas para betões expostos até cerca de 600°C, dependendo do estado de tensão, teor de humidade, tempo de exposição a elevada temperatura e ainda do tipo de agregado utilizado no betão.

A perda de resistência tende a ser superior nos betões de elevada resistência, mas o fenómeno de *spalling*, anteriormente referido, é o fator mais relevante neste tipo de betões. Isso resulta da reduzida permeabilidade destes betões que dificulta a eliminação de água. Este fenómeno, que ocorre entre cerca de 200 a 350°C, é tanto mais importante quanto maior a taxa de incremento de temperatura (Metha 1996, Pino 2013).

Tendo em consideração as diferentes condições de ensaio e de exposição, Neville, baseado no capítulo [8.44], sugere intervalos para a percentagem de perda de resistência em função da temperatura. De acordo com o autor, aos 400°C podem-se esperar resistências residuais entre 45 e 83%, aos 600°C entre 38 e 69% e aos 800°C apenas 20 a 36%.

Refira-se ainda que a cerca de 400°C ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio, o que significa que se após o arrefecimento ocorrer o reingresso de água, pode existir a reidratação do CaO com conseqüente criação de forças internas expansivas no betão.

Em relação ao módulo de elasticidade, a microfissuração na zona de interface agregado-pasta parece ter um efeito mais nocivo no módulo de elasticidade do que na resistência à compressão (Metha 1996). O efeito na resistência à flexão tende a ser mais marcante, dado que esta propriedade é mais sensível ao desenvolvimento de microfissuração (Mindess 2003).

Em face da sua importância para o presente estudo, as principais alterações químicas ocorridas no cimento com o incremento de temperatura, são abordadas em separado, no ponto 2.8.2.

2.8.2. Alteração química dos produtos de hidratação do cimento quando sujeitos a elevadas temperaturas

O efeito do incremento de temperatura depende do grau de hidratação e teor de humidade da pasta hidratada. Para temperaturas de cerca de 300°C, a água inter-camada nos C-S-H e parte da água combinada nos C-S-H e sulfoaluminatos de cálcio hidratados vai ser eliminada (Metha 1996). A desidratação adicional da pasta de cimento devido à decomposição do hidróxido de cálcio inicia-se a

cerca de 400-500°C (Metha 1996, Neville 2002). Mas são necessárias temperaturas de cerca de 900°C para que ocorra a decomposição completa dos C-S-H (Metha 1996).

Shui *et al.* (2009) analisou a composição mineralógica de betões pré-aquecidos a diferentes níveis de temperatura através de difração de raios X. Na Figura 2.3 apresentam-se os resultados desta análise, estando obviamente dependentes da composição e grau de hidratação da pasta ensaiada. Verifica-se que entre as temperaturas de 200°C e 450°C, o betão apresenta-se em fase sólida, contendo agregados, C-S-H modificados, C-S-H parcialmente desidratados, CH, CaCO₃, C₂S e fases não cristalinas desidratadas. Os autores reportam que a 500°C desaparecem alguns picos de difração relativos à etringite e a silicatos de cálcio hidratados. Entre 450°C e 580°C existe uma diminuição do teor de *portlandite* (CH) com início da formação da cal (CaO) por desidroxilação do CH. Entre 580°C e 800°C, a restante *portlandite* em conjunto com o carbonato de cálcio (CaCO₃) decompõem-se dando origem à formação de mais CaO. Acima de 800°C identificam-se agregados, C-S-H desidratados, cal, C₂S e fases amorfas desidratadas (Shui *et al.* 2008). Estes resultados sugerem que a queima conduz à desidratação e reestruturação dos constituintes do betão.

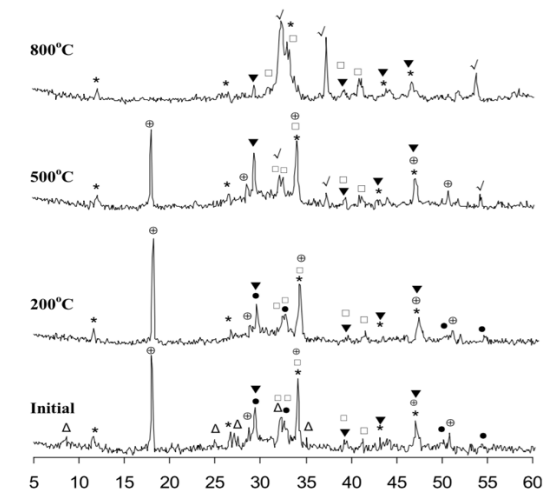


Figura 2.3 – Difração raios x do betão desde a temperatura ambiente até os 800°C (Nota: Etringite(Δ), C-S-H(●), C₂S(◻), Calcite(▼), CaO(✓)) (Shui *et al.* 2008)

Recorrendo à análise termogravimétrica (TG), é possível também perceber algumas transformações relevantes ocorridas no betão durante o seu aquecimento a elevadas temperaturas. Numa análise TG efetuada por Xinwei *et al.* (2010), verifica-se a presença de 4 picos relevantes de perda de massa, Figura 2.4. Os dois primeiros picos ocorridos abaixo de 200°C referem-se à perda da água livre ou capilar. O terceiro pico entre cerca de 472°C e 500°C corresponde à desidratação do hidróxido de cálcio Ca(OH)₂. Finalmente, o último pico de perda de massa deve-se à decomposição dos C-S-H, ocorrendo para valores entre cerca de 682°C e 775°C (Xinwei *et al.* 2010).

Para temperaturas superiores a 750°C a variação de massa na pasta de cimento não é óbvia, visto que o aumento da temperatura afeta também a estrutura do agregado grosso, consumindo-se mais energia (Figura 2.4). Porém, de acordo com Shui *et al.* (2008), a variação de massa em amostras de betão deve-se essencialmente ao cimento, pois após a completa desidratação e transformação dos

componentes hidratados do cimento, quando os agregados são aquecidos e desde que não ocorra descarbonatação, a massa mantém-se sensivelmente constante.

Shui *et al.* (2008) reportam apenas o desenvolvimento de 3 picos de perda de massa, visto que agregam os dois primeiros correspondentes à perda de água capilar. Porém, em relação aos restantes picos de perda de massa, confirmam o seu desenvolvimento para intervalos de temperaturas semelhantes aos indicados por Xinwei *et al.* (2010).

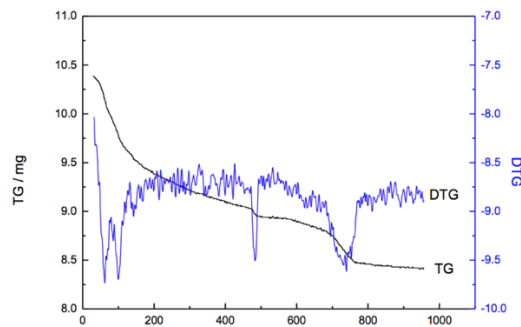


Figura 2.4 – Análise termogravimétrica à uma amostra de betão (Xinwei *et al.* 2010).

2.9. Reidratação dos componentes desidratados do cimento

A reidratação da pasta cimentícia após o arrefecimento do betão previamente sujeito a elevadas temperaturas é estudado por vários autores (Mindess 2003, Revuelra 2008, Xinwei *et al.* 2010, Markéta *et al.* 2011, Shui *et al.* 2008, Eunhee Kwon 2015, Sousa e Moreno 2003).

Estudos realizados por alguns autores associam a reidratação à ligeira recuperação da resistência mecânica que observaram em provetes de betão, algum tempo após o seu arrefecimento (Sousa e Moreno 2003, Shui *et al.* 2008).

É um facto que aquecendo o betão a temperaturas próximas dos 600°C, remove-se grande parte da água de constituição dos produtos de hidratação da pasta de cimento (Caraslindas 2004).

Segundo Cánovas (1988), se o betão não for sujeito a temperaturas superiores a 500°C, o processo de reidratação poderá recuperar até 90% das propriedades mecânicas iniciais após 1 ano, o que vai de encontro ao reportado por (Morales *et al.* 2011). A recuperação de grande parte da resistência em betões que reidratam após serem submetidos até 500°C é igualmente mencionado por Revuelra (2008). Para temperaturas superiores, os danos causados no betão são irreversíveis, sendo menos efetiva a recuperação da sua resistência (Neville 2002). Shui *et al.* (2008) confirma que ocorre a reidratação do cimento quando este entra novamente em contacto com a água. No entanto, a microestrutura obtida após a formação dos novos produtos de reidratação tende a ser mais fraca face à desenvolvida no cimento Portland normal (Shui *et al.* 2008).

Em provetes cilíndricos de $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$, aquecidos a temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, Sousa e Moreno (2010) verificaram que após o seu arrefecimento e submersão em água durante 112 dias, ocorreu uma recuperação na resistência à compressão de 93%, 85% e 45%, respetivamente.

Matesová (2007) comparou amostras pré-aquecidas, arrefecidas e testadas imediatamente após o arrefecimento com amostras arrefecidas e armazenadas em ambiente de laboratório durante vários meses e verificou que as amostras armazenadas em condições laboratoriais apresentam uma recuperação significativa da resistência e verificou ainda que a recuperação foi mais efetiva nas misturas de menor relação a/c.

O tipo de reidratação vai definir o quanto o betão recupera as suas características mecânicas iniciais (Sousa e Moreno 2010). De acordo com Markéta *et al.* (2011), caso o betão seja submerso em água durante dois meses após o aquecimento a temperaturas entre 600 e 1000°C, ocorre uma recuperação significativa da resistência mecânica à compressão e flexão.

Por outro lado, a forma como se processa o arrefecimento também afeta o nível de recuperação das propriedades mecânicas iniciais. O arrefecimento acelerado é responsável pelas maiores perdas de resistência, ao contrário do arrefecimento lento em que a recuperação pode significar até 90% da resistência inicial, dependendo da temperatura máxima atingida durante o aquecimento (Morales *et al.* 2011). Num estudo realizado por Morales *et al.* (2011), provetes cilíndricos de argamassa produzidos com cimento Portland CP-V, traço 1:3 e a/c de 0,44, foram aquecidos a 300°C. Os provetes arrefecidos de forma lenta apresentaram reduções na resistência à compressão de apenas 5,2%, enquanto os provetes arrefecidos de forma acelerada apresentaram redução de aproximadamente 30,5%.

Markéta *et al.* (2011) analisou o efeito de diferentes condições de exposição na resistência à compressão de provetes previamente aquecidos e posteriormente armazenados durante 2 meses de acordo com uma das seguintes condições:

- Condição de armazenamento 1 – Temperatura de 22 +/- 2°C e humidade de 55 +/- 5%
- Condição de armazenamento 2 – Submerso em água a temperatura de 22 +/- 2°C
- Condição de armazenamento 3 – Temperatura de 22 +/- 2°C e humidade de 55 +/- 5% com submersão três vezes por semana durante 3 minutos

Os autores verificaram que os provetes armazenados nas condições 2 e 3, tiveram uma recuperação significativa da resistência à compressão após exposição a 400°C e 800°C, Figura 2.5. Por sua vez, os provetes armazenados nas condições de armazenamento 1 apresentaram valores inferiores de resistência à compressão em comparação com os provetes testados imediatamente após o arrefecimento. Confirma-se assim que a presença de água, ao proporcionar a reidratação precoce da pasta, permite a recuperação das suas características mecânicas iniciais.

Markéta *et al.* (2011) verificaram também um aumento significativo na resistência à flexão de betões armazenados nas condições 2 e 3 para as temperaturas de 600°C, 800°C e 1000°C, confirmando-se a menor eficiência das condições de armazenamento 1, Figura 2.5.

Grande parte dos poros presentes na pasta hidratada são de dimensão inferior a 1 µm, sendo que os de menor dimensão causam um aumento da pressão de vapor devido à desidratação dos C-S-H. Por esse motivo ocorre fendilhação quando o betão é aquecido a elevadas temperaturas (Markéta *et al.* 2011). De acordo com Markéta *et al.* (2011) até cerca de 400°C, a variação de volume devido ao aumento de porosidade não é relevante. Porém, para maiores valores de temperatura, até cerca de 1200°C, ocorre um incremento gradual do volume de betão, atingindo-se microestruturas com poros de dimensão superior a 10 µm.

Este incremento de porosidade é responsável pela redução de resistência do betão. Quanto maior a temperatura, maior também será a porosidade do betão, sendo esta mais evidente quando os provetes são aquecidos acima dos 600°C. Esta porosidade pode ser diminuída após a reidratação dos provetes (Markéta *et al.* 2011).

Conforme apresentado em 2.8.2, referente ao estudo de Shui *et al.* (2009), os provetes de betão pré-aquecidos a 800°C, antes da reidratação eram constituídos por agregados, C-S-H desidratados, cal, C₂S e monocristais em fase desidratada. O C₂S presente nas amostras tem uma velocidade de hidratação moderada, associado a um desenvolvimento da resistência mecânica lento e muito prolongado, contribuindo também para reidratação do cimento.

Em provetes de betão aquecidos a temperaturas superiores a 800°C e posteriormente arrefecidos e conservados dentro de água durante 2 meses, Markéta *et al.* (2011) observa a presença de etringite (C₃A.3CS.H₃₂), carbonato de cálcio (CaCO₃) e Portlandite (CH), que durante o aquecimento havia desaparecido. Após a reidratação, deixa de se verificar a presença do óxido de cálcio que se transformou em Portlandite.

Os resultados obtidos nos vários estudos apresentados demonstram a capacidade de reidratação da pasta cimentícia, indiciando o potencial de se poder proceder à sua reutilização como material ligante.

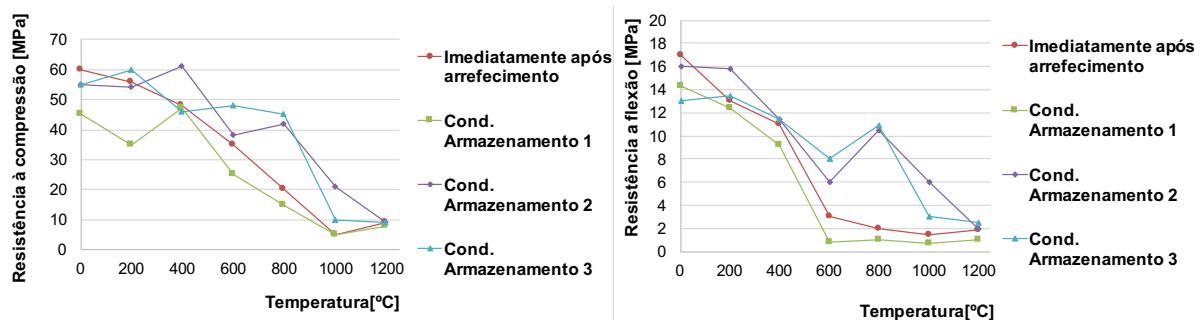


Figura 2.5 – Variação da resistência à compressão e módulo de rotura com o aumento da temperatura para diferentes condições de armazenamento dos provetes. Adaptado de (Markéta *et al.* 2011)

2.10. Produção de cimento reciclado termicamente reativado

São ainda escassos os estudos que se têm focado na reutilização de resíduos de argamassa, explorando a capacidade de poder voltar a reidratar a matriz cimentícia. A utilização de resíduos de betão na produção de cimento Portland já é prática utilizada na indústria cimentícia, mas apenas visando reduzir a necessidade de matéria-prima. Neste caso, a redução nas emissões de CO₂ são pouco significativas, mantendo-se os mesmos níveis de descarbonatação e temperaturas máximas de queima.

Shui *et al.* (2008) desenvolveram um estudo experimental onde se pretendeu avaliar a utilização de agregados finos reciclados de betão (AFRB), previamente submetidos a tratamento térmico, na produção de argamassas. No seu estudo, recorreram às técnicas de DRX e TG para identificarem a formação de fases transformadas e desidratadas nos AFRB. A capacidade de reidratação foi ainda avaliada tendo em consideração a realização de ensaios mecânicos.

Os AFRB com granulometria entre 0,3 e 4,76 mm foram pré-aquecidos a uma taxa de 10°C/minuto até cerca de 500°C, tendo permanecido nesse patamar durante 1 hora. Após o seu arrefecimento, a pasta de cimento endurecida foi separada do agregado através da moagem e crivagem das partículas de AFRB, ficando com dimensão inferior a 75 µm. A separação entre a pasta hidratada e o AFRB foi facilitada pela incompatibilidade térmica existente entre estas duas fases Shui *et al.* (2008).

As curvas obtidas por TG da pasta endurecida indicam que até 400°C a perda de massa foi essencialmente causada pela perda de água adsorvida nos espaços inter-lamelares dos C-S-H, que fica parcialmente desidratado. A 450°C inicia-se a desidratação do CH, que se prolonga até cerca de 800°C, acompanhado de descarbonatação do CaCO₃. Para além disso forma-se um novo C-S-H completamente desidratado. Estas transformações são confirmadas pela técnica de DRX, sendo o novo cimento pré-aquecido composto por constituintes transformados e desidratados Shui *et al.* (2009).

A partir de pastas produzidas apenas com o cimento reciclado e relação *a/c* de 0,4, Shui *et al.* (2008) verificam resistências à compressão aos 28 dias de 8,3 MPa (Figura 2.6). Desse modo, demonstram a capacidade ligante e de reidratação do cimento utilizado. De acordo com os autores, quando o cimento pré-aquecido é adicionado com a água reaparece um novo gel de C-S-H como resultado da reidratação dos C-S-H desidratados. Por sua vez, as fases desidratadas não cristalinas que resultaram da decomposição da etringite formam também nova etringite.

Finalmente, a partir de análises microestruturais, com recurso ao microscópio de varrimento eletrónico (MEV), verificou-se que a pasta reidratada apresentou maior porosidade do que a pasta inicial. A adição de cinzas volantes foi muito benéfica na redução da quantidade elevada de CH e na formação de extra C-S-H por reação pozolânica Shui *et al.* (2008).

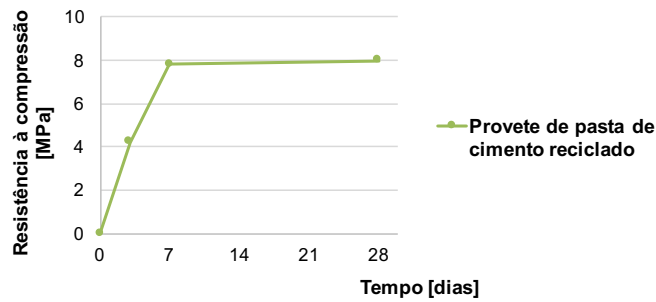


Figura 2.6 – Resistência mecânica à compressão de provetes de pasta de cimento reciclado. Adaptado de (Shui et al. 2008)

Xinwei et al. (2010) pré-aqueceram resíduos de betão a 750°C, reutilizando os agregados e a pasta de cimento desidratada que resultou da sua moagem e separação para produzirem argamassas e betões reciclados. Basicamente, o agregado original e a pasta de cimento foram separados e utilizados com diferentes fins, de acordo com os princípios relativos à produção de betões normais.

Baseado na experiência de outros autores (Sakai 2007; Mulder e Feenstra 2007), os autores optaram por pré-aquecer os resíduos de betão a pelo menos 700°C. A temperatura exata de calcinação foi fixada em 750°C com base na técnica de TG, concluindo-se que a decomposição do gel de C-S-H ocorreu para 682-775°C. Não foram considerados valores superiores de modo a não alterar a estrutura dos agregados.

Após o arrefecimento, os agregados foram separados manualmente em agregados e pasta desidratada, embora contaminações de cada uma das fases tenha ficado presentes. A área superficial do pó de cimento hidratado após moagem adicional atingiu os 390 m²/kg, conseguindo ser ligeiramente mais fino do que o cimento Portland normal. A massa volúmica do novo cimento foi de apenas 2670 kg/m³, sendo inferior à do cimento Portland (Xinwei et al. 2010).

O cimento pré-aquecido conduziu a uma exigência de água cerca de 60% superior à do cimento Portland, tendo este fenómeno sido atribuído ao facto das partículas de cimento reidratado serem porosas, conduzindo a maior absorção de água. Isso é possível observar na Figura 2.7, onde se observa a pasta antes e após ter sido sujeita a elevadas temperaturas.

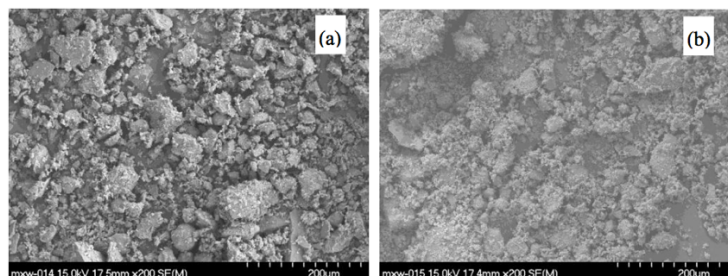


Figura 2.7 – (a) cimento Portland normal antes de ser aquecido (b) cimento após ser aquecido evidenciando maior porosidade (Xinwei et al. 2010)

O tempo de presa da pasta de cimento reciclado foi mais curto em relação à pasta com cimento normal, tendo-se registado o início de presa após apenas 23-25 minutos e o fim de presa após 60-65

minutos. Por esse motivo, considera-se necessário a utilização de um retardador de presa quando este tipo de cimento é utilizado para fins industriais (Xinwei *et al.* 2010).

Ensaio mecânicos foram efetuados em provetes de argamassa com relação a/c de 0,5 e diferentes percentagens de substituição de cimento Portland por cimento reciclado, nomeadamente 0, 40, 50, 60 e 100%. Os resultados obtidos nas argamassas com 0 e 100% de substituição são apresentados na Figura 2.8. As argamassas produzidas apenas com cimento reciclado foram capazes de atingir a resistência de 12,3 MPa aos 28 dias, confirmando a reatividade do ligante reciclado. Para substituições de 60%, a resistência à compressão atingiu 60% da resistência nas argamassas de cimento Portland, excedendo o valor de 25 MPa, compatível com a produção de betão estrutural (Xinwei *et al.* 2010).

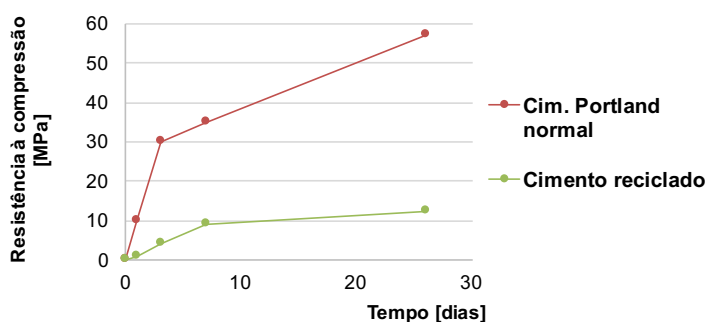


Figura 2.8 – Resistência mecânica à compressão de pasta de cimento Portland e cimento reciclado. Adaptado de Xinwei *et al.* (2010).

Kwon *et al.* (2015) desenvolveram um estudo que visou a redução das emissões de CO₂ por reutilização do cimento resultante de resíduos de betão, bem como a redução de utilização de calcário na produção de clínquer, através da dissolução da Portlandite em vez de se promover à decarbonatação do calcário para se obter CaO. Ao contrário do que sucede nos outros estudos apresentados, o cimento reciclado, proveniente de detritos de betão moídos abaixo de 75 µm, foi utilizado para produzir novo clínquer, tendo-se adotado os mesmos níveis de temperatura usualmente considerados na produção de cimento Portland. Como referido, a vantagem deste processo consistiu na redução da quantidade de calcário utilizado na produção do cimento que permitiu uma redução de até 46% nas emissões de CO₂. A realização de ensaios mecânicos permitiu verificar que apesar da resistência das misturas produzidas com cimento reciclado ser bastante inferior em idades iniciais, a longo prazo pode atingir cerca de 56% da obtida no cimento Portland normal. No entanto, o melhor desempenho deste cimento, associados a estes resultados é apenas conseguido quando o agregado fino é eficazmente separado da pasta, o que é um processo difícil de se garantir.

Em suma, parece concluir-se que para que o betão seja reutilizado, este tem que ser sujeito a elevadas temperaturas, por um lado para facilitar a separação dos agregados e outros materiais não necessários e por outro para que a temperatura garanta a desidratação e o eventual restabelecimento dos principais compostos do cimento anidro, de modo a que exista possibilidade de voltar a ser hidratável e a estabelecer propriedades ligantes.

3. Campanha experimental

No presente capítulo apresenta-se a campanha experimental realizada ao longo do trabalho. Inicialmente são resumidas as várias fases em que se desenvolveu o estudo experimental. Em seguida, descrevem-se as metodologias adotadas na caracterização dos materiais, na produção do cimento reciclado e na composição, mistura e execução dos provetes de argamassas com incorporação de diferentes percentagens desse cimento. Finalmente, apresenta-se uma breve descrição dos ensaios de caracterização física e mecânica realizados nos provetes de argamassa produzidos.

3.1. Descrição da campanha experimental

A campanha experimental teve como objetivo idealizar e caracterizar o fabrico de argamassas produzidas com cimento reciclado, obtido a partir de elementos de betão existentes previamente sujeitos a ação térmica. Desse modo, é explorada a capacidade de os compostos presentes na pasta hidratada de betões existentes poderem ser reidratados e reestruturados após submetidos a elevadas temperaturas. A campanha desenvolveu-se segundo 4 etapas principais, que se descrevem resumidamente nos próximos parágrafos.

Numa primeira fase foram produzidos provetes de betão corrente, designados de betão de origem (BO), que visavam ser representativos de elementos de betão existentes, compostos por matriz cimentícia suficientemente hidratada. De modo a separar a influência dos agregados e da pasta hidratada na produção de cimento reciclado, foram igualmente produzidos provetes com apenas pasta (PO), sujeitos a condições de cura semelhantes.

Numa segunda fase, procedeu-se à britagem e moagem dos provetes até se obter uma mistura com o material finamente moído. Esta mistura granular após caracterizada em termos das suas principais propriedades físicas e químicas foi, de seguida, submetida a diferentes patamares de temperatura de modo a induzir diferentes transformações nos produtos de hidratação da pasta. Após arrefecido, procedeu-se à caracterização composicional do cimento reciclado proveniente dos provetes de BO e PO.

Numa terceira etapa do trabalho, os dois tipos de cimento reciclado foram utilizados na produção de argamassas, tendo-se procedido à sua incorporação em substituição de diferentes percentagens em massa de cimento Portland normal. Neste caso, foram produzidas argamassas com 0, 20, 50, 75 e 100% de substituição de cimento Portland normal (CPN) por cimento reciclado proveniente de betão (CRB) ou pasta (CRP), correspondente às seguintes misturas: argamassa de referência - AR (100% CPN); A20CRB (80% CPN+20% CRB); A50CRB (50% CPN+50% CRB); A75CRB (25% CPN+75% CRB); A100CRB (100% CRB); A20CRP (80% CPN+20% CRP); A50CRP (50% CPN+50% CRP); A75CRP (25% CPN+75% CRP); A100CRP (100% CRP).

Finalmente, após cura dos provetes, realizaram-se ensaios de caracterização física e mecânica com o objetivo de avaliar a influência e efetividade dos novos tipos de cimento na produção de argamassas utilizáveis na indústria da construção. Assim, este trabalho tem como objetivo perceber a potencialidade de se reutilizarem elementos de betão existentes visando a produção de cimentos associados a menores custos energéticos, menores níveis de emissão de CO₂ e menor consumo de recursos naturais, contribuindo, como tal, para uma construção mais sustentável.

3.2. Produção do betão e pasta de origem

Como referido, inicialmente foi produzido um betão corrente de classe de resistência C40/50, com o objetivo de ser representativo de elementos existentes suscetíveis de se constituírem resíduos de construção. Para o betão de origem (BO) foi considerada a composição indicada na Tabela 3.1, tendo-se adotado na sua produção um cimento tipo I 42,5 R, para uma relação a/c efetiva de 0,45. O adjuvante utilizado foi um superplastificante de base policarboxílica de designação comercial *MasterGlenium SKY 548*. Os betões foram produzidos com areia siliciosa e brita calcária com 11,2 mm de dimensão máxima do agregado. A formulação do betão foi efetuada tendo por base o método de Faury, de modo a garantir o proporcionamento adequado da mistura granular, com vista à obtenção de misturas de compacidade otimizada.

Tabela 3.1 – Composição do betão de origem (BO) e pasta de origem (PO)

Constituintes	betão de origem (BO)	pasta de origem (BO)
relação a/c	0,45	0,45
Superplastificante (%)	0,14	-
Brita 1 (kg/m ³)	797	-
Bago de arroz (kg/m ³)	285	-
Areia grossa (kg/m ³)	685	-
Cimento (kg/m ³)	400	1230
Água (L/m ³)	178	553

Em simultâneo, e de modo a perceber a capacidade isolada da matriz cimentícia na produção de cimento reciclado, foram ainda produzidos provetes apenas com pasta de igual composição à adotada na produção dos BO. Na Tabela 3.1 indica-se igualmente a composição das pastas de origem (PO).

Nos próximos pontos apresenta-se a caracterização dos principais materiais utilizados na produção dos (BO) e (PO).

3.2.1. Cimento

Na produção dos provetes de betão e de pasta foi utilizado um cimento tipo I 42,5 proveniente da Secil em Outão, cujas principais propriedades físicas e mecânicas, determinadas de acordo com as normas EN 196, apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento

Parâmetros		Cimento I 42.5 R
Resíduo no peneiro 45 µm (%)		3.5
Superfície específica (cm ² /g)		4388
Resistência à compressão da argamassa de referência (MPa)	2 dias	28.6
	7 dias	40.8
	28 dias	52.1
Índice de actividade (%)		-
Expansão (mm)		0.75
Perda de ignição (%)		3.64
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		18.49+4.95+3.61
CaO+MgO (%)		63.11+1.62
CaO+MgO livre (%)		0.60+0.80
Massa volúmica (kg/m ³)		3060
Tempo de presa (min)	Início	130
	fim	210

3.2.2. Agregados

Na produção dos BO foi utilizado um tipo de areia siliciosa e dois tipos de britas calcárias (Bago de arroz e Brita 1). A areia foi fornecida pela empresa Soarvamil, sendo extraída de pinhal, neste caso da região do Seixal. As britas foram adquiridas na empresa José Marques Galo, SA.

Para a caracterização dos agregados foram realizados ensaios de baridade, massa volúmica, absorção às 24 horas e análise granulométrica, de acordo com o especificado nas normas europeias EN 1097-3, EN 1097-6 e EN 933-2, respetivamente. As principais características dos agregados utilizados na produção do betão resumem-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades dos agregados

Propriedade	Bago de Arroz	Brita 1	Areia grossa
Massa volúmica seca (kg/m ³)	2646	2650	2628
Baridade (kg/m ³)	1309	1346	1581
Absorção de água às 24h (%)	0.7	0.4	0.3
Fração granulométrica (di/Di)	0/8	4/11.2	0/4

3.2.3. Caracterização do BO no estado fresco

De modo a avaliar as características do BO no estado fresco foi realizado o ensaio de abaixamento de acordo com a EN 12350-2.

Basicamente, o ensaio de abaixamento consiste na compactação em 3 camadas do betão fresco no interior de um molde cónico, procedendo-se em seguida à sua remoção e finalmente ao registo da altura “h” correspondente ao abatimento da amostra de betão, Figura 3.1. O abaixamento “h” deve estar compreendido entre os 10 mm e 200mm. Para a execução do ensaio de abaixamento, a

operação de desmoldagem deve levar entre 5 a 10 segundos e deve ser feito num movimento firme de baixo para cima sem serem efetuados movimentos laterais ou torsionais. O processo todo de enchimento e remoção do molde não deve perdurar mais de 150s.

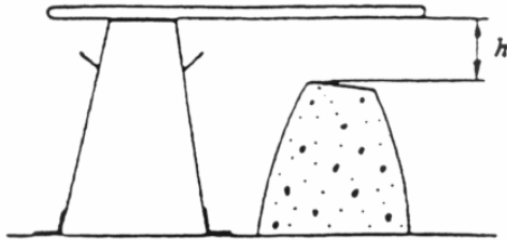


Figura 3.1 – Altura h do ensaio de abaixamento
(Coutinho 2003)



Figura 3.2 –Abaixamento após adição de superplastificante

O abaixamento registado para o betão produzido foi de 4 cm (Figura 3.2).

3.2.4. Produção de provetes e caracterização do BO no estado endurecido

Ao todo foram moldados 13 provetes cúbicos de 15 cm de aresta que visavam a futura produção de cimento reciclado, bem como a caracterização mecânica dos betões (Figura 3.3). Após a desmoldagem, que ocorreu às 24 horas, os provetes foram curados em câmara húmida até à idade de ensaio ou a moagem do betão.



Figura 3.3 – Moldes cúbicos betonados

O ensaio de compressão foi efetuado aos 28 dias de idade, tendo-se obtido, a partir de 3 provetes, uma resistência média de 54,4 MPa, a que corresponde um betão de classe de resistência C40/50. Os restantes provetes foram, à semelhança do efetuado para os provetes de pasta, sujeitos a moagem e tratamento térmico, conforme discutido no ponto 3.3.

3.2.5. Produção de provetes e caracterização do PO no estado endurecido

À semelhança do referido em 3.2.4, foram também moldados 13 provetes cúbicos de 15 cm de aresta, que se desmoldaram e curaram em condições semelhantes ao efetuado para os BO. Como referido, a produção destes provetes permite compreender melhor o comportamento do cimento

quando sujeito a elevadas temperaturas e comparar a reidratação deste material face ao proveniente da moagem dos BO, contendo igualmente agregados na sua constituição. Ensaio realizados em 3 provetes de PO revelam uma resistência média de 48 MPa aos 28 dias de idade.

3.3. Britagem e moagem dos provetes de betão e de pasta

De modo a garantir o máximo de hidratação dos provetes sem comprometer em demasia o plano de realização da campanha experimental, optou-se por proceder à britagem e subsequente moagem dos provetes de betão, pelo menos, 120 dias após a mistura. Porém, dado se ter optado pela produção também de provetes de pasta numa fase mais avançada do trabalho, não foi possível garantir idades semelhantes para a moagem e produção do cimento reciclado a partir do BO e do PO. Na realidade, o início da moagem do BO ocorreu 130 dias após a sua produção e a do PO após apenas 70 dias.

Um cimento Portland regular deve apresentar uma superfície específica de pelo menos 350 a 380 m²/kg (Neville 2011), onde a maioria das partículas apresenta dimensões entre 1 e 50 µm (Mehta 1996). Naturalmente, a presença do agregado no BO na mistura deverá prejudicar as propriedades ligantes do novo cimento reciclado, pois estes não deverão afetar a criação de novos produtos suscetíveis de reidratar e dificultar o processo de moagem. Assim, um dos grandes desafios a vencer consiste em ser possível implementar um procedimento ao nível industrial capaz de fazer a separação entre o agregado e a pasta.

Atualmente têm sido propostas técnicas que visam responder a esse objetivo, tentando-se a separação mais efetiva do agregado e do cimento. Heesup Choi *et al.* (2014) usaram técnicas com base no aquecimento com micro-ondas com o mesmo objetivo de separar os componentes do cimento. Esta técnica consiste em revestir o agregado com óxido de ferro (Fe₂O₃) que tem uma constante dielétrica elevada e de seguida sujeitar a amostra às radiações micro-ondas que vão criar microfissuras na interface do agregado-pasta, enfraquecendo deste modo a ligação e permitindo a separação mais facilitada destes materiais.

Outra preocupação existente na produção de cimento reciclado, está relacionada com o grau de moagem atingido no tratamento dos resíduos de betão. De facto, a reatividade do cimento só assume relevância quando este apresenta elevada superfície específica, dado que a hidratação se desenvolve a partir da superfície das partículas. Conforme referido por Pinto *et al.* (2013), apenas as partículas com dimensão suficientemente pequena, inferior a cerca de 50 µm, tem capacidade para se hidratar na sua totalidade.

No desenvolvimento do presente trabalho foram verificados problemas a estes dois níveis, nomeadamente na dificuldade de separação do agregado da pasta e na otimização da moagem dos resíduos, o que limita a potencialidade do cimento produzido. De modo a perceber a influência destes dois fatores, no primeiro caso foram produzidos adicionalmente provetes apenas de pasta e betão.

No segundo caso foram produzidos alguns provetes adicionais a partir de cimento reciclado sujeito a um maior grau de moagem.

Nos parágrafos em seguida descreve-se o procedimento adotado na britagem e moagem dos resíduos de BO e PO.

3.3.1. Moagem dos provetes

Neste trabalho a moagem dos provetes foi efetuada em três fases. Numa primeira foi utilizada uma britadeira de maxilas de modo a reduzir os provetes a material granular de dimensão aproximada de 40 a 50 mm. Numa segunda fase foi utilizada uma britadeira de rolos lisos, que permitiu reduzir a granulometria da mistura num máximo de 30 mm. Finalmente, de modo a garantir uma melhor moagem, a mistura foi ainda sujeita à ação de um moinho de bolas.

3.3.1.1. Primeira fase de britagem

Na primeira fase, tal como referido, recorreu-se a uma britadeira de maxilas (Figura 3.4). Nesta primeira fase de moagem, o betão apresentava já 130 dias de idade, enquanto que a pasta de cimento apresentava 70 dias de idade.



Figura 3.4 – Britadeira de maxilas usada na primeira fase de moagem

Na primeira fase de moagem obteve-se um material moído de granulometria variada, sendo que as partículas de maior dimensão variam entre os 40 a 50 mm. Salienta-se ainda que os produtos resultantes desde processo de moagem apresentavam características distintas. O BO apresentava-se em forma de partículas mais arredondadas, enquanto que a PO se apresentava em forma de lascas com as partículas mais achatadas (Figura 3.5).

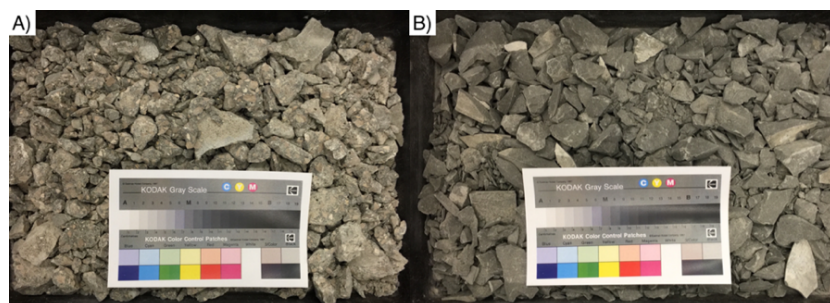


Figura 3.5 – A) BO britado; B) PO britada na primeira fase de britagem

3.3.1.2. Segunda fase de britagem

Para que o BO e a PO apresentem uma granulometria, o mais próximo possível do desejado, o material que se recolhe da primeira fase de moagem tem de ser sujeito a um segundo processo que permita obter grão mais fino. Para a realização da moagem, foi utilizada uma britadeira de rolos lisos (Figura 3.6). Esta fase de moagem foi realizada aos 153 dias de idade para a betão e aos 85 dias para a pasta de cimento.

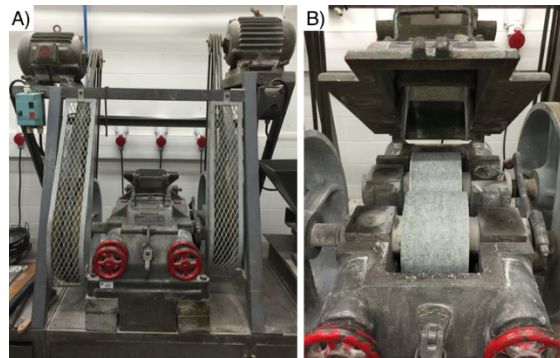


Figura 3.6 – Britadeira de rolos lisos usada na segunda fase de moagem

O grão de maior dimensão resultante desse processo apresenta uma dimensão máxima aproximada de 30 mm. Nesta fase verifica-se que a granulometria do BO é inferior ao da PO, como se pode observar pela Figura 3.7. A explicação para este acontecimento deve-se ao facto de as partículas da PO apresentarem-se em forma de lascas que passam com maior facilidade entre os rolos lisos da britadeira, permanecendo na mesma fora à saída dos rolos.

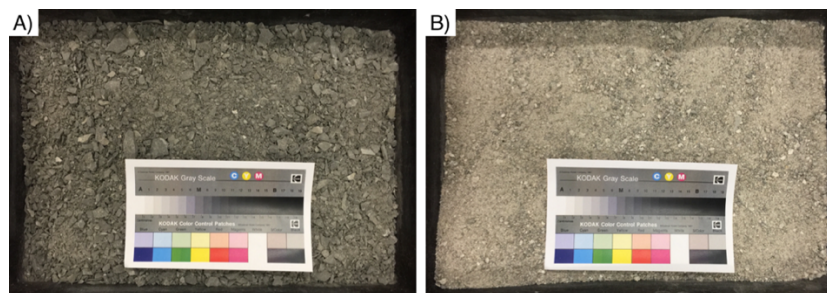


Figura 3.7 – A) Pasta de cimento; B) Betão moído na segunda fase de britagem

3.3.1.3. Terceira fase de moagem

A mistura granular foi ainda sujeita a uma última fase de moagem recorrendo a um moinho de bolas (Figura 3.8), à semelhança do efetuado no fabrico de cimento. Para uma moagem mais eficaz, optou-se por usar esferas de aço de diferentes tamanhos, tendo-se utilizado um total de 300 bolas. Para que este equipamento funcione adequadamente, e não seja afetado pelo peso das esferas de aço e do material a moer, aconselha-se que o conjunto (esferas + material) não ocupe mais de metade do volume do moinho.

No interior do moinho de bolas, o material proveniente da 2ª fase de moagem foi moído durante 2 horas com pausa aos 60 minutos para remover o material fino que ficava retido nas paredes interiores. O produto resultante deste processo apresenta-se já em forma de pó. Nesta última fase, a

pastas de cimento apresentavam 88 dias de idade, enquanto que a moagem do betão foi feita quando este apresentava 166 dias de idade.



Figura 3.8 – Moinho de bolas e esferas de aço.

Após a conclusão desta última fase de moagem, procedeu-se a análise granulométrica dos materiais, cujos resultados apresentam-se nas Tabelas 3.4 e 4.5 para o BO e PO respetivamente.

Tabela 3.4 – Análise granulométrica ao BO após terceira fase de moagem.

Peneiro	1mm	250 µm	125 µm	63 µm	base
Material retido [%]	7,3	46,5	37,3	8,4	0,5

Tabela 3.5 – Análise granulométrica à PO após terceira fase de moagem.

Peneiro	1mm	250 µm	125 µm	63 µm	base
Material retido [%]	2,2	42,8	42,8	9,3	2,9

Pela análise das Tabelas anteriores conclui-se que a PO apresenta uma granulometria inferior à BO, sendo que a maior percentagem de massa fica retido nos peneiros de 250 e 125 µm para ambos os materiais. Tal como já foi referido, Pinto *et al.* (2013). revela que para as partículas de cimento hidratarem completamente, estas têm que ter o diâmetro inferior a 50 µm e pela análise das Tabelas anteriores, verifica-se que a percentagem de material que passa pelo peneiro de 63 µm, dimensão ideal para a análise da reciclagem destes materiais não é representativo, sendo apenas de 2,9% para a PO e 0,5% BO.

A Figura 3.9 mostra o material retido nos diferentes peneiros.

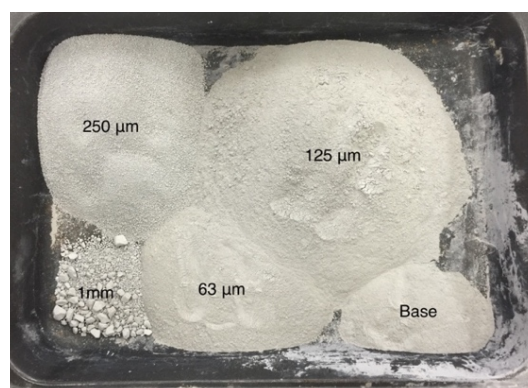


Figura 3.9 – Resultado da análise granulométrica após terceira fase de moagem.

3.3.1.4. Moagem complementar de mistura selecionada

Para algumas composições selecionadas foi ainda efetuada uma moagem extra, através de um moinho de esferas de menor dimensão (Figura 3.10 A). Neste processo utilizaram-se esferas de 2 a 20 mm de modo a permitir uma moagem mais eficiente (Figura 3.10 B). As amostras foram sujeitas a cerca de 1 hora de moagem. Esta etapa do trabalho teve por objetivo produzir algumas amostras de granulometria mais fina de modo a se analisar a influência da dimensão do grão na capacidade reativa do cimento reciclado.

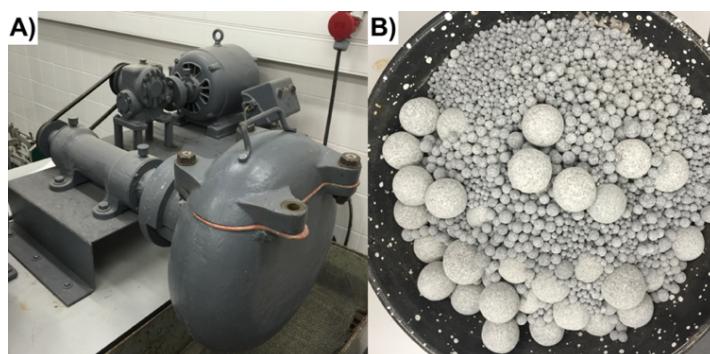


Figura 3.10 – A) Moinho de esferas usado para a moagem extra; B) Esferas de aço usadas para a moagem extra

Neste caso, foram produzidas argamassas com 20, 60 e 100% de substituição de cimento Portland normal (CPN) por cimento reciclado proveniente de betão fino (CRBF) ou pasta (CRPF), correspondente às seguintes misturas: A20CRBF(80% CPN+20% CRBF); A60CRBF(40% CPN+60% CRBF); A100CRBF(100% CRBF); A20CRPF(80% CPN+20% CRPF); A60CRPF(40% CPN+60% CRPF); A100CRPF(100% CRPF).

Após esta fase de moagem, procedeu-se a uma análise granulométrica com os mesmos peneiros usados na terceira fase de modo a fazer uma comparação. Os resultados apresentam-se na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Análise granulométrica dos ligantes reciclados após a moagem complementar

Peneiro	250 μm	125 μm	63 μm	Base
CRPF [%]	1,1	3,4	49,8	45,8
CRBF [%]	14,2	23,3	18,8	43,7

Como se observa pela Tabela anterior, existe uma melhoria significativa do material que passa pelo peneiro de 63 μm em relação aos resultados anteriores apresentados no capítulo 3.3.1.3 para ambos os ligantes reciclados. Apesar de no CRB não se conseguir o grão tão fino como no CRP ainda assim mais de 43% da amostra apresenta o grão inferior aos 63 μm . Salienta-se ainda que esta fase de moagem foi feita após a calcinação dos ligantes reciclados.

3.4. Análise termogravimétrica e difração de raios X do material moído

Com o objetivo de se definirem as temperaturas de calcinação e perceber os principais constituintes presentes tanto na pasta de cimento como na do betão moído, antes e após o aquecimento, recorreu-se às técnicas de difração de raios X (DRX) e análise termogravimétrica (TG). Ambos foram efetuados no laboratório de Mineralogia e Petrologia do IST (LAMPIST)

3.4.1. Análise termogravimétrica

Após a terceira fase de moagem, descrita no capítulo 3.3.1.3, foi efetuada a análise termogravimétrica das amostras, recorrendo ao equipamento *NETZSCH STA 409 PC/PG*, ilustrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Equipamento Netzsch STA 409 PC para a análise TG [fonte:www.ecn.nl]

Basicamente, a análise termogravimétrica permite verificar a variação de massa ao longo do tempo causada pela decomposição, evaporação ou reação química dos constituintes das amostras, quando estas são sujeitas a um incremento de temperatura. Neste trabalho, as amostras foram sujeitas a um incremento progressivo de temperatura desde a temperatura ambiente até cerca de 1100°C. Foi utilizada uma atmosfera de ar e uma rampa de aquecimento de 25°C/minuto. Esta análise teve como principal objetivo definir as temperaturas de calcinação dos materiais moídos para a produção de cimento reciclado e posterior utilização em argamassas.

3.4.2. Difração de Raios X (DRX)

A análise de (DRX) permite verificar as diferentes fases presentes nas amostras antes e após a calcinação. Deste modo, através da evolução composicional das amostras, torna-se possível identificar os novos produtos formados para diferentes patamares de temperatura, nomeadamente a capacidade destes poderem ser reidratados. Para a análise DRX foi utilizado o equipamento *PANalytical X'Pert Pro*, ilustrado na Figura 3.12. As amostras foram pulverizadas e submetidas a um varrimento de 5 a 60° de 2θ com condições experimentais de 40 kv e 35 mA e ampola de Cu.



Figura 3.12 – Equipamento PAnalytical X'Pert Pro [Fonte: <http://www.directindustry.com>]

3.5. Aquecimento das amostras

Conforme referido, de modo a recativar o pó de cimento resultante da moagem dos resíduos de betão e pasta de cimento, as amostras foram submetidas a elevadas temperaturas. Neste caso, tendo em consideração a literatura consultada e a realização de ensaios prévios, optou-se por submeter as amostras a dois patamares diferentes de temperatura, nomeadamente 350 e 650°C. A estes patamares deverão corresponder a decomposição dos hidróxidos de cálcio (350°C) e a desidratação dos C-S-H (650°C) (ver 2.8.2). Embora temperaturas superiores permitissem uma maior efetivação da desidratação e transformação dos vários compostos, permitindo que estes adquirissem maior capacidade reativa, isso conduziria a consumos energéticos mais elevados, bem como ao aumento significativo das emissões de CO₂ por eventual descarbonatação dos agregados calcários.

Assim, e dado que o grande objetivo deste trabalho passava pelo fabrico de um material ligante sustentável, optou-se por definir temperaturas inferiores a 650°C, que como se verá em 4.1, encontra-se próximo do limite associado à descarbonatação do calcário presente nas amostras.

Para o processamento térmico das amostras utilizou-se o forno elétrico Barracha - modelo TERMOCONTROL 3PR, ilustrado na Figura 3.13. Inicialmente o material moído foi devidamente espalhado num tabuleiro metálico, propositadamente concebido para o efeito, de modo a não se observarem espessuras superiores a 2 vezes a dimensão média do grão da amostra. Com este procedimento visava-se o aquecimento eficiente e homogêneo de toda amostra. Em seguida, a amostra foi colocada no forno, tendo-se programado 2 patamares de aquecimento correspondentes a 100°C durante 1 hora e em seguida à máxima temperatura pretendida (350°C e 650°C) durante 3 horas. Entre patamares a amostra sofreu uma taxa de aquecimento de cerca de 20°C/minuto. O arrefecimento foi realizado no interior do forno, de modo lento e natural até a temperatura ambiente. Após o aquecimento das amostras, foi necessário perceber qual a influência das elevadas temperaturas na granulometria. Em comparação com os resultados da Tabela 3.4 e 3.5, verifica-se uma ligeira diminuição da dimensão dos grãos, sendo esta variação irrelevante para o que se pretende, tal como se observa pelas Tabelas 3.7 e 3.8.



Figura 3.13 – Forno elétrico Termocontrol 3PR.

Tabela 3.7 – Resultado da análise granulometria do CRP após aquecimento aos 650°C

Peneiro	250 µm	125 µm	63 µm	base
Material retido 650°C [%]	39,6	40,8	16,3	3,3
Material retido antes da calcinação [%]	42,8	42,8	9,3	2,9

Tabela 3.8 – Resultado da análise granulometria do CRB após aquecimento aos 650°C

Peneiro	250 µm	125 µm	63 µm	base
Material retido 650°C [%]	25,3	56,8	15,4	2,6
Material retido antes da calcinação [%]	46,5	37,3	8,4	0,5

3.6. Pastas produzidas com e sem cimento reciclado

Antes de se proceder à produção e caracterização das argamassas com diferentes percentagens de incorporação de cimento reciclado, foi efetuado um primeiro trabalho de avaliação da influência deste ligante na fluidez e tempo de presa de pastas. Nos pontos em seguida descrevem-se os procedimentos adotados com vista a essa caracterização. Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados e discutidos no capítulo 4.

3.6.1. Trabalhabilidade de pastas com e sem cimento reciclado

De modo a se perceber a influência da incorporação de cimento reciclado na trabalhabilidade das misturas, foram produzidas pastas com relação *a/c* de 0,5, para as quais se realizaram ensaios de fluidez. As pastas foram produzidas na misturadora indicada na Figura 3.14 a), e a sua fluidez e espalhamento foram ensaiados de acordo com o especificado nas normas NP EN 445 (2008), pensadas para caldas a injetar em bainhas de pré-esforço. Em seguida descrevem-se os procedimentos utilizados em cada um destes ensaios:

Ensaio de fluidez:

Através do método do cone, especificado na norma NP EN 445 (2008), de acordo com o seguinte procedimento:

1. Produzir uma pasta com pelo menos 1,2 litros;
2. Obstruir o fundo do cone indicado na Figura 3.14 b), e verter a pasta lentamente até encher a secção cónica do cone, com capacidade superior a 1 litro;

3. Colocar um recipiente com capacidade superior a 1 litro para receber a pasta que flui do cone, Figura 3.14 b);
4. Abrir o orifício inferior e registrar com um cronómetro o tempo da passagem de 1 L de calda para o cilindro, com a aproximação de 0,5 s;

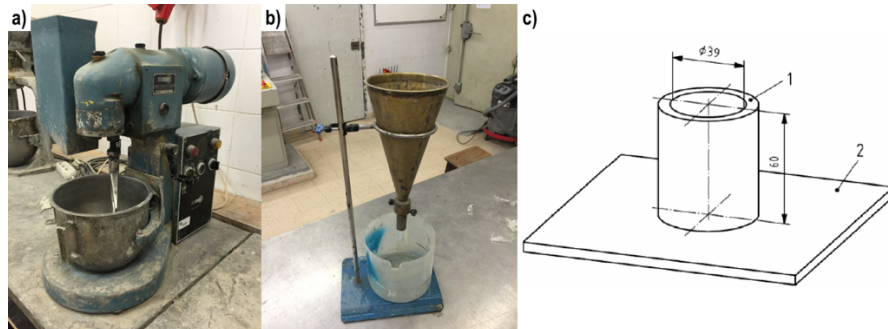


Figura 3.14 – a) misturadora utilizada na produção das pastas; b) cone e recipiente com capacidades superiores a 1,2 litros; c) ensaio de espalhamento.

Ensaio de espalhamento:

1. Colocar o molde cilíndrico, indicado na Figura 3.14 c), sobre o centro da placa;
2. Encher lentamente o molde com pasta até ao seu limite superior e tendo o cuidado de não o fazer deslizar durante a operação;
3. Levantar uniformemente e cuidadosamente o molde de forma a não influenciar no escoamento da pasta;
4. Após o escoamento da pasta, medir, em mm, o espalhamento em duas direções perpendiculares.

3.6.2. Tempo de presa dos ligantes

O tempo de presa dos ligantes foi determinado de acordo com a norma europeia NP EN 196-3. Segundo esta norma, o tempo de presa pode ser medido através da agulha de *Vicat*, sobre uma pasta de cimento, classificada como sendo de “consistência normal”. Em seguida descrevem-se os procedimentos relativos à produção de uma pasta de consistência normal e à determinação do seu tempo de presa.

3.6.2.1. Pasta de consistência normal

Basicamente, uma pasta diz-se de consistência normal, quando, estando associada a uma determinada quantidade de água, apresenta uma dada resistência à penetração através de uma sonda normalizada.

Procedimento para produção da pasta

1. Pesar 500g de ligante e uma dada quantidade de água, por exemplo 125g;
2. Colocar a água e o cimento no recipiente de modo a evitar quaisquer perdas. Esta operação não deve ultrapassar os 10s;
3. Colocar o misturador a funcionar em velocidade lenta e registrar o tempo como “tempo zero”;

4. Ao fim de 90s, parar a misturadora durante 30s e remover a pasta aderente às paredes e ao fundo do recipiente com um raspador;
5. Misturar em velocidade lenta por mais 90s. O tempo total da mistura deve ser de 3 minutos.

Determinação da consistência normal

1. Calibrar o aparelho de *Vicat* previamente munido de sonda de modo a ajustar a marca ao zero da escala;
2. Levantar a sonda até a posição de espera e colocar o molde cheio com a amostra de pasta;
3. Baixar a sonda até que esta entre em contacto com a pasta e fazer uma pausa de 1 a 2s nesta posição, de modo a evitar uma velocidade inicial ou acelerações forçadas;
4. Soltar rapidamente a sonda e registar o valor da escala pelo menos 5s depois do fim da penetração ou 30s após a libertação da sonda. (A libertação da sonda deve ocorrer 240 \pm 10s após o “tempo zero”);
5. Registar o valor distância entre a face inferior da sonda e a placa de vidro da base do molde, bem como o teor em água expresso em percentagem em massa do ligante;
6. Repetir o processo com pastas de teores em água diferentes até encontrar aquela que conduza a uma distância de \pm 6 mm entre a face inferior da sonda e a placa de vidro da base do molde;
7. Registar o teor em água com a aproximação de 0,5% como sendo o de obtenção da pasta de consistência normal.

3.6.2.2. Determinação dos tempos de presa

Tempo de início de presa

1. Encher o molde de *Vicat* com a pasta de consistência normal;
2. Colocar o molde com a amostra e a placa de base num recipiente com água, a uma temperatura controlada (20 \pm 1) °C, de modo a que a superfície da pasta fique submersa a uma profundidade de pelo menos 5 mm;
3. Passado algum tempo, colocar o molde, a placa e o recipiente por baixo da agulha de *Vicat*, Figura 3.15;
4. Baixar a agulha até que esta entre em contacto com a pasta, mantendo-a 1 a 2s nessa posição, de modo a evitar uma velocidade inicial ou acelerações forçadas;
5. Soltar rapidamente a agulha e registar, no fim da penetração ou 30s depois da libertação da agulha, o valor da escala, que indica a distância entre a extremidade da agulha e a placa de vidro da base do molde, bem como o tempo gasto desde o “tempo zero”;
6. Repetir o processo no mesmo provete em posições convenientemente espaçadas (pelo menos 10 mm da última penetração, 8 mm do bordo e 5 mm das restantes penetrações) e em intervalos de tempo adequados, no máximo de 10 minutos. Entre os ensaios de penetração, conservar o provete numa câmara ou armário húmido e limpar a agulha após cada penetração;

7. Registrar o tempo decorrido entre o “tempo zero” e o instante na qual a distância entre a extremidade da agulha e a placa de base é de (6 ± 3) mm, como sendo o tempo de início de presa.

Tempo de fim de presa

1. Após a determinação do tempo de início de presa, inverter o molde usado para a determinação do tempo de início de presa, de modo a que os ensaios sejam efetuados sobre a face do provete que estava em contacto com a placa de base;
2. Emergir o conjunto no recipiente com água de acordo com as mesmas regras referidas para a determinação do início de presa;
3. Decorrido algum tempo, efetuar medições de acordo com o referido para a determinação do início de presa até que o valor da penetração da agulha seja inferior ou igual a 0,5 mm e registar o respetivo intervalo de tempo (tempo de fim de presa), com uma aproximação de 15 minutos, desde o início da amassadura;
4. Confirmar o fim de presa em pelo menos em mais duas posições.



Figura 3.15 – Aparelho de Vicat munido de agulha

3.7. Produção de argamassas

Na presente secção apresentam-se as composições e descrevem-se os procedimentos adotados na produção e caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido. Inicialmente, procede-se à caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas, sendo que apenas o cimento reciclado diferiu dos materiais indicados em (3.2), aquando da produção dos BO e PO.

3.7.1. Materiais

Para a produção das argamassas caracterizadas no presente estudo foi utilizada a areia grossa, cujas características se apresentam em 3.2.2. As características do cimento Portland adotado nas misturas de referência e com substituição parcial de cimento Portland normal por cimento reciclado, apresentam-se em 3.2.1. Em seguida descrevem-se as principais características físicas dos cimentos reciclados, bem como as características da areia fina igualmente utilizada na produção das argamassas. As principais fases formadas no cimento reciclado são discutidas em 4.2.

3.7.2. Cimento reciclado

A massa volúmica do cimento reciclado foi determinada de acordo com o indicado na especificação LNEC E64 (1979). Basicamente, foi efetuado o procedimento descrito em seguida:

Procedimento

1. Secar em estufa cerca de 100g de cimento, na qual considera-se para efeitos de cálculo 65g;
2. Com um funil de tubo longo enche-se um densímetro de *Le Chatelier* até um nível compreendido entre as graduações 0 e 1 da escala, com líquido que não reaja com os ligantes (petróleo, gasolina, gasóleo, etc.), evitando molhar as paredes internas;
3. Tapa-se o densímetro e mergulha-se em água até estabilizar a temperatura, registando-se de seguida o valor da escala com aproximação à meia divisão;
4. Com um funil de tubo curto, introduzir o ligante lentamente de tal modo a que este não adira as paredes internas do densímetro acima do nível do líquido;
5. De seguida, inclina-se o densímetro e roda-se alternadamente de um e outro sentido de modo a favorecer a libertação de bolhas de ar aderentes as partículas do ligante;
6. Por último, retoma-se o densímetro em água, logo que a temperatura estabilizar, regista-se o valor obtido

Apresentação dos resultados

O valor da massa volúmica é dado pela seguinte expressão:

$$MV = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (3.1)$$

Onde;

MV – Massa volúmica do ligante [g/cm^3];

m – Massa do ligante seco [g];

V_1 – Valor inicial do nível do líquido [cm^3];

V_2 – Valor final do nível do líquido [cm^3].

A baridade do novo cimento reciclado foi determinada tendo por base a determinação da massa que uma amostra deste ligante ocupa num recipiente metálico de 1 litro de volume.

Dado a sua relevância, foi ainda avaliada a granulometria do novo ligante, tendo em consideração a série de peneiros definida na EN 933-1 (1997).

Nas Tabelas 3.9 e 3.10 resumem-se os resultados referentes à massa volúmica, baridade e percentagem de material passado no peneiro de 250 ao 63 μm , no que se refere às amostras de betão e de pasta, após a terceira fase de moagem.

Pela análise da Tabela 3.9 verifica-se uma relação direta entre a massa volúmica dos ligantes reciclados e a temperatura de clinquerização, ou seja, quanto maior for a temperatura que os ligantes

reciclados são sujeitos maior também será a massa volúmica dos mesmos. Verifica-se um aumento da massa volúmica de 4,1% quando o CRB é aquecido aos 350°C e de 7,5% aos 650°C. Em relação ao CRP a massa volúmica aumenta 11,5% quando aquecido aos 350°C e 14,4% aos 650°C, isto em relação aos ligantes reciclados sem tratamento térmico. Ambos os ligantes reciclados, independentemente da temperatura a que são sujeitos, as massas volúmicas continuam inferiores à do cimento Portland.

Tabela 3.9 – Baridade e massa volúmica dos ligantes utilizados para a produção das argamassas

Ligantes	Baridade [kg/m ³]	Massa volúmica [kg/m ³]
Cimento Portland	1134,6	3064,0
CRB 650°C	1081,8	2595,0
CRB 350°C	1343,8	2505,0
Betão moído 20°C	1217,5	2402,4
CRP 650°C	862,3	2307,3
CRP 350°C	958,4	2233,3
Pasta de Cimento moída 20°C	1004,9	1975,6

Tabela 3.10 – Percentagem de material passado nos peneiros de 250 aos 63 µm

Peneiros	250 µm	125 µm	63 µm	base
Material Passado - CRP [%]	60,4	19,6	3,3	0
Material Passado - CRB [%]	74,8	8,9	2,6	0

3.7.3. Agregados finos

Como referido, para além da areia grossa utilizada na produção do betão de origem, foi ainda adotada uma areia mais fina, de modo a melhorar a compacidade das misturas de argamassa produzidas. As principais características da areia fina, de natureza siliciosa e fração granulométrica 0/2, apresentam-se na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Propriedades da areia fina

Propriedade	Areia fina
Massa volúmica seca (kg/m ³)	2602,4
Baridade (kg/m ³)	1564
Absorção de água às 24h (%)	0.7
Fração granulométrica (di/Di)	0/2

De modo a obter o máximo de compacidade granular da mistura, a areia grossa e a areia fina foram misturadas em proporções que conduzissem à baridade máxima da mistura. Para tal, foi adotado o procedimento referido na norma EN 1097-3 (2002), e que implica o preenchimento lento e sem compactação de um recipiente de 3 dm³ com diferentes percentagens de areia fina e areia grossa, previamente secas em estufa a 105±5 °C.

Assim, a baridade da mistura de agregado seco, expressa em $[\text{kg}/\text{m}^3]$ é dada pela seguinte expressão;

$$\frac{m_2 - m_1}{V} \times 1000 \quad (3.2)$$

Em que;

- m_1 – Massa do recipiente [kg];
- m_2 – Massa do recipiente cheio com a mistura de agregado, [kg];
- V – Capacidade do recipiente $[\text{dm}^3]$.

Na figura 3.16 apresenta-se a curva de baridade da mistura em função da percentagem de substituição, em volume, de areia grossa por areia fina. Conforme se pode observar, o máximo de baridade é atingido para uma percentagem ótima de areia fina de 30-5%, o que está de acordo com o sugerido por *Feret*. No presente trabalho optou-se assim por considerar a produção de argamassas com uma mistura de areia composta por 65% de areia grossa e 35% de areia fina, representando assim a mistura uma baridade de $1651 \text{ kg}/\text{m}^3$.

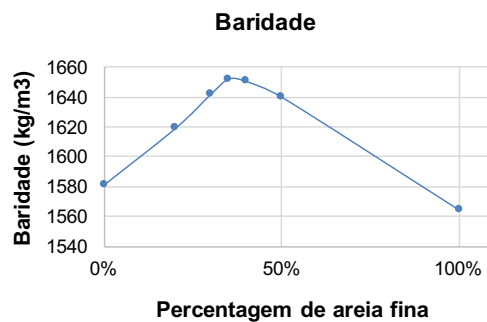


Figura 3.16 – Baridade da mistura de areia fina com areia grossa

3.7.4. Formulação e composições das argamassas

Conforme referido no início do capítulo, os dois tipos de cimento reciclado, nomeadamente o cimento reciclado proveniente de betão (CRB) ou proveniente da pasta (CRP), foram utilizados na produção de argamassas, tendo-se procedido à sua incorporação em substituição de diferentes percentagens de cimento Portland normal (CPN). Estas argamassas foram definidas tendo em consideração cimentos reciclados obtidos sem tratamento térmico ou após a sua queima a diferentes patamares de temperatura, nomeadamente 350 e 650°C. Algumas argamassas foram também produzidas com cimento reciclado mais fino (CRPF ou CRBF), de modo a avaliar a influência deste parâmetro na sua capacidade reativa. Foram ainda produzidas argamassas de referência constituídas apenas por cimento Portland Normal, de modo a facilitar a interpretação dos resultados e a comparação relativa entre os vários tipos de argamassa analisados.

Para a composição das argamassas de referência optou-se por considerar misturas com traço em volume de 1:3 e uma relação a/l de 0,6, que foi estabelecida tendo por base a realização prévia de amassaduras experimentais, de modo a obter misturas de consistência normal, i.e., espalhamentos

balizados entre 60 e 80%, medidos de acordo com 3.8.1. Conforme referido, a proporção de areia grossa e areia fina foram definidas de acordo com o procedimento referido em 3.7.3. De referir, que a areia foi previamente peneirada de modo a não conter partículas de dimensão superior a 4 mm.

A formulação das argamassas teve em consideração a proporção em volume dos vários constituintes (equação 3.3), procedendo-se à conversão do traço em volume de 1:3 no traço ponderal, com base no conhecimento da baridade dos vários materiais. Os valores adotados de baridade, bem como os de massa volúmica a adotar na determinação da equação 3.3, resumem-se na Tabela 3.12. Para a resolução da equação 3.3 arbitrou-se inicialmente um volume de vazios correspondente a 0,04 litros (4%).

$$1 = Vol_{ligante} + Vol_{areia} + Vol_{\acute{a}gua} + Vol_{vazios} \quad (3.3)$$

Tabela 3.12 – Baridade e massa volúmica dos constituintes das argamassas

Materiais	Baridade [kg/m³]	Massa volúmica [kg/m³]
Cimento Portland normal	1134,6	3064,0
Cimento reciclado de betão (650°C)	1081,8	2595,0
Cimento reciclado de betão (350°C)	1343,8	2505,0
Betão de origem (20°C)	1217,5	2402,4
Cimento reciclado de pasta (650°C)	862,3	2307,3
Cimento reciclado de pasta (350°C)	958,4	2233,3
Pasta de origem (20°C)	1004,9	1975,6
Areia grossa	1581,2	2635,5
Areia fina	1564	2602,4

Na formulação e produção das argamassas houve necessidade de compensar a água adicionada à mistura devido a absorção de água por parte dos agregados, dado que para melhor controlo das misturas, estes foram previamente secos em estufa, até massa constante. Para tal foi aplicada a seguinte expressão:

$$\acute{A}gua_{compensada} = \frac{abs_{areia\ fina}}{100} \times m_{areia\ fina} + \frac{abs_{areia\ grossa}}{100} \times m_{areia\ grossa} \quad (3.4)$$

Em que;

$abs_{areia\ grossa}$ – Percentagem de absorção após 24 horas da areia grossa;

$abs_{areia\ fina}$ – Percentagem de absorção após 24 horas da areia fina;

$m_{areia\ grossa/fina}$ – Massa de areia grossa ou de areia fina, respetivamente.

Conforme referido, a partir da argamassa de referência, foram produzidas misturas com diferentes percentagens de substituição de cimento Portland normal (CPN) por cimento reciclado proveniente de betão (CRB) ou pasta (CRP). No total foram definidas 5 misturas para cada tipo de cimento reciclado pré-aquecido a um determinado patamar de temperatura, correspondente à temperatura ambiente (\cong 20°C), 350°C ou 650°C. Os provetes com cimento reciclado a temperatura ambiente correspondem ao material que não foi submetido a qualquer tratamento térmico, ou seja, é apenas betão original

(BO) ou pasta original (PO) moído, que deverá funcionar essencialmente por efeito de filler. Na Tabela 3.13 resumem-se os vários tipos de misturas produzidas na presente campanha experimental, tendo em conta as diferentes condicionantes referidas. Na mesma Tabela apresentam-se também as misturas selecionadas onde se optou ainda por adotar os mesmos cimentos reciclados, mas sujeitos a um maior grau de moagem.

Tabela 3.13 – Misturas usadas para a formulação das argamassas e as respetivas percentagens de ligante reciclado

Misturas	% cim. Reciclado	Relação a/l	Cim. Reciclado [gr]	Cim. Portland [gr]	Água [gr]	Areia fina [gr]	Areia grossa [gr]
AR (100% CPN)	0	0,6	0,0	390,1	234,1	546,2	1014,0
A20CRB (80% CPN+20% CRB)	20	0,6	78,0	312,1	234,1	538,4	999,4
A50CRB (50% CPN+50% CRB)	50	0,6	195,1	195,1	253,6	508,8	944,7
A75CRB (25% CPN+75% CRB)	75	0,6	292,6	97,5	284,8	470,6	873,7
A100CRB (100% CRB)	100	0,60	390,1	0,0	316,0	432,4	802,8
A20CRP (80% CPN+20% CRP)	20	0,60	78,0	312,1	234,1	538,4	999,4
A50CRP (50% CPN+50% CRP)	50	0,65	195,1	195,1	253,6	508,8	944,7
A75CRP (25% CPN+75% CRP)	75	0,73	292,6	97,5	284,8	470,6	873,7
A100CRP (100% CRP)	100	0,81	390,1	0,0	316,0	432,4	802,8
A20CRBF (80% CPN+20% CRBF)	20	0,6	78,0	312,1	234,1	541,8	1005,8
A60CRBF (40% CPN+60% CRBF)	60	0,6	234,1	156,1	234,1	532,9	989,4
A100CRBF (100% CRBF)	100	0,6	390,2	0,0	234,1	524,1	973,0
A20CRPF (80% CPN+20% CRPF)	20	0,6	78,0	312,1	234,1	538,3	999,4
A60CRPF (40% CPN+60% CRPF)	60	0,6	234,1	156,1	234,1	522,7	970,3
A100CRPF (100% CRPF)	100	0,68	390,2	0,0	265,3	478,6	888,5

Note-se que a série correspondente à utilização de cimento reciclado mais fino foi apenas considerada para o material pré-aquecido a 650°C.

Na Tabela 3.13, as argamassas com cimento reciclado provenientes da pasta (CRP) tiveram de ser produzidas com relação a/c mais elevada, variando entre 0,6 e 0,81, de modo a que apresentassem trabalhabilidade semelhante às misturas de referência. Este aspecto é discutido em maior detalhe em 4.3.

De referir ainda que o cimento reciclado a partir do betão de origem (BO) inclui evidentemente uma grande percentagem de agregado. Esta percentagem de agregado é relativamente fácil de estimar tendo em consideração o conhecimento da massa volúmica dos resíduos provenientes do BO, bem como da massa volúmica dos seus constituintes (cimento e agregado natural). Assim, estima-se que o cimento reciclado a partir do betão de origem contenha aproximadamente, em termos de massa, 78% de agregado e apenas cerca de 22% de cimento Portland. Tendo em conta este valor, na Tabela 3.14 resume-se a quantidade total de cimento Portland presente em cada argamassa produzida com diferentes percentagens de substituição de cimento Portland por CRB. Como se pode observar, a quantidade real de cimento presente em cada uma das argamassas é bastante inferior à das argamassas de referência com 100% CPN, verificando-se um máximo de 22% nas misturas com

100% CRB ou CRBF. Esta diminuição terá implicações em termos mecânicos das argamassas, como se explica mais a frente no capítulo 4.6.

Tabela 3.14 – Percentagem de cimento reciclado efetivo em cada mistura de CRB

Misturas	CRB [%]	Cimento efetivo no CRB [%]	Cimento total efetivo
AR (100% CPN)	0	0	100
A20CRB (80% CPN+20% CRB)	20	4	84
A50CRB (50% CPN+50% CRB)	50	11	61
A75CRB (25% CPN+75% CRB)	75	17	42
A100CRB (100% CRB)	100	22	22
A20CRBF (80% CPN+20% CRBF)	20	4	84
A60CRBF (40% CPN+60% CRBF)	60	13	53
A100CRBF (100% CRBF)	100	22	22

3.7.5. Produção e compactação de provetes de argamassa

De acordo com a NP EN 196-1, para cada composição foram moldados e compactados provetes prismáticos com 40x40x160 mm. Os provetes foram compactados na mesa de compactação tendo-se realizado esta tarefa em duas camadas sujeitas a 60 pancadas.

Após a moldagem, os provetes foram protegidos por um filme plástico e deixados no ambiente de laboratório durante pelo menos 24 horas. Neste caso, nas misturas com percentagens de cimento Portland superiores a 50% foi possível desmoldar após 24 horas. As restantes misturas, exceto as produzidas com cimento reciclado não submetido a aquecimento prévio, foram desmoldadas após 3 dias. Nas misturas com mais de 50% de ligante reciclado sem ser submetido a tratamento térmico, a desmoldagem foi apenas possível após 2 semanas de cura no interior dos moldes.

Após a desmoldagem, os provetes foram curados em câmara condicionada com HR > 95%, até à idade de ensaio. Apenas as misturas produzidas com 100% de cimento reciclado não submetido a tratamento térmico, tiveram de ser curadas na câmara seca, devido à sua fraca capacidade ligante. Para cada composição, foram produzidos 9 provetes, de modo a se ensaiarem 3 prismas à flexão e posteriormente à compressão aos 7, 28 e 90 dias de idade.

3.8. Caracterização das argamassas no estado fresco

As argamassas produzidas foram caracterizadas no estado fresco em termos da sua trabalhabilidade (ensaio de espalhamento), massa volúmica fresca e teor de vazios. Nos pontos em seguida descrevem-se os procedimentos adotados em cada um destes ensaios.

3.8.1. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento tem como objetivo medir a consistência das argamassas no estado fresco, sendo esta uma medida da capacidade de escoamento da argamassa quando sujeita a forças exteriores. Esta grandeza é expressa em percentagem.

Inicialmente, as argamassas de referência foram ensaiadas tendo em consideração o ensaio da mesa de espalhamento segundo as normas EN 1015-3 (1999) e a norma antiga Portuguesa NP 414, de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Limpar a mesa, e o molde cónico, humedecendo-os antes de cada ensaio;
2. Colocar o molde cónico no centro da mesa, introduzindo a argamassa em duas camadas iguais. Compactar cada camada com 10 pancadas (EN 1015-3) – ou 25 pancadas (NP 414), com a barra de compactação, procurando que cada pancada atinja bem toda a espessura da camada de forma a garantir o enchimento uniforme do molde;
3. Extrair o excesso de argamassa com uma espátula, removendo e limpando com um pano de forma a deixar a mesa limpa. Passados aproximadamente 15 segundos, levanta-se o molde lentamente na vertical e de seguida aplica-se 15 pancadas (EN 1015-3) ou 25 pancadas (NP 414), com uma frequência de 0,5 pancadas por segundo, de forma a espalhar a argamassa;
4. Medir o diâmetro do espalhamento em três direções ortogonais (d1, d2, d3).

O resultado do espalhamento obtém-se pela seguinte expressão;

$$Espalhamento [\%] = \frac{\frac{d1 + d2 + d3}{3} - 100}{100} \times 100 \quad (3.5)$$

Em que;

d1, d2 e d3 – diâmetro do espalhamento em diferentes direções [mm]

3.8.2. Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente é determinada pelo quociente entre a massa e o volume ocupado pela amostra de argamassa num dado recipiente normalizado. Para este trabalho, a determinação da massa volúmica aparente foi efetuada de acordo a norma EN 1015-6 (1998). O procedimento seguido foi o descrito no ponto 7.2.2 da norma – enchimento e compactação pelo método do choque, o qual se resume em seguida:

- Registrar a massa do recipiente vazio;
- Encher com argamassa um recipiente de capacidade de 1dm³ até meia altura;
- Para a compactação, elevar o recipiente até cerca de 30 milímetros e deixar cair sobre um substrato rígido com uma massa sólida não inferior a 25kg;
- De seguida, adicionar mais argamassa até encher o recipiente e compactar da mesma maneira, adicionando mais argamassa caso necessário;

- Com uma espátula, tirar qualquer excesso de argamassa deixando o topo do recipiente nivelado;
- Registrar a massa do recipiente.

O resultado da massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco é obtido pela seguinte expressão;

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.6)$$

Na qual;

- ρ_m – Massa volúmica aparente [kg/m^3];
- m_2 – Massa do recipiente cheio com argamassa [g];
- m_1 – Massa do recipiente vazio [g];
- V – Volume do recipiente [dm^3].

3.8.3. Volume de vazios

O volume de vazios pode ser determinado sobre a argamassa no estado fresco, recorrendo à seguinte expressão:

$$V_v = 1 - \left(\frac{1 - LR/100}{MV_{cim}} + \frac{LR/100}{MV_{L.R}} + \frac{\mu_{A.F}}{MV_{A.F}} + \frac{\mu_{A.G}}{MV_{A.G}} + \frac{a/l}{MV_{H2O}} \right) \times \left(\frac{MVA_{arg.}}{1 + \mu_{A.F} + \mu_{A.G} + \frac{abs_{areias}}{100 \times (\mu_{A.F} + \mu_{A.G})}} \right) \quad (3.7)$$

Em que;

- V_v – Volume de vazios na amostra de argamassa;
- LR – Percentagem de ligante reciclado na amostra;
- MV_{cim} – Massa volúmica do cimento Portland;
- $MV_{L.R}$ – Massa volúmica do ligante reciclado;
- $\mu_{A.F}$ – Fração de areia fina na mistura de argamassa;
- $\mu_{A.G}$ – Fração de areia grossa na mistura de argamassa;
- $MV_{A.F}$ – Massa volúmica da areia fina;
- $MV_{A.G}$ – Massa volúmica da areia grossa;
- a/l – Relação a/l;
- MV_{H2O} – Massa volúmica da água;
- $MVA_{arg.}$ – Massa volúmica aparente da argamassa;
- abs_{areias} – Percentagem de absorção das areias (0,3%);

3.9. Caracterização das argamassas no estado endurecido

No presente estudo as argamassas produzidas foram caracterizadas em termos da sua resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade dinâmico e velocidade de ultra-sons. Nos pontos em seguida resumem-se os procedimentos adotados em cada um destes ensaios.

3.9.1. Resistência mecânica à compressão e à flexão

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados de acordo com a norma EN 1015-11. No ensaio de resistência à flexão a norma refere que os provetes prismáticos de argamassa devem ser assentes em dois apoios cilíndricos de aço com diâmetro de 10 +/- 0,5 mm e afastados um do outro a 100 +/- 0,5 mm, na qual um terceiro cilindro, com as mesmas características, é centrado no topo do provete, a meio vão, exercendo gradualmente a força necessária até à rotura (Figura 3.17 A). O resultado da tensão de rotura à flexão é obtido através da expressão (3.8). Ao todo foram ensaiados 3 prismas de argamassa por cada composição e idades de ensaio.

$$f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{d_1 \times d_2^2} \cong 0,00234 \times F_f \quad (3.8)$$

Na qual;

f – Tensão de rotura à flexão [MPa];

F_f – Carga aplicada a meio vão do provete de argamassa [N];

d_1 e d_2 – Dimensão das arestas dos provetes [40 mm];

L – Distância entre os apoios cilíndricos [100 mm].

As metades resultantes do ensaio de flexão são em seguida utilizados para avaliação da resistência à compressão das argamassas. Neste ensaio aplica-se uma carga até a rotura numa área correspondente a 4x4 cm² (Figura 3.17 B). A tensão de rotura à compressão é determinada de acordo com expressão (3.9). Ao todo foram ensaiados 3 metades dos prismas de argamassa por cada composição e idades de ensaio.

$$f_c = \frac{F_c}{A} = 0,000625 \times F_c \quad (3.9)$$

Na qual;

f_c – Tensão de rotura à compressão [MPa];

F_c – Força máxima na rotura [N];

A – Área da zona comprimida [1600 mm²].

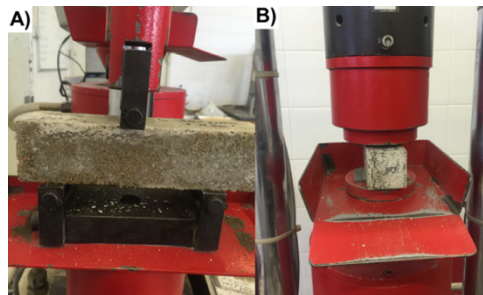


Figura 3.17 – A) Ensaio de resistência mecânica à flexão B) Ensaio de resistência mecânica à compressão.

3.9.2. Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foi efetuado com auxílio do equipamento *GrindoSonic* (Figura 3.18 A), tendo-se adotado o seguinte procedimento:

1. Pousar a argamassa sobre dois apoios afastados 8 cm entre si;
2. Encostar a extremidade metálica da sonda na argamassa junto a um dos apoios, de modo a que o orifício pintado esteja virado para cima, tal como indicado na Figura 3.18 B);
3. Com a ajuda de um auxiliar de contacto adequado, bater algumas vezes na argamassa a meio vão;
4. Registrar a frequência indicada no aparelho e introduzir os dados no software fornecido (Figura 3.19);
5. Registrar os dados fornecidos pelo software.

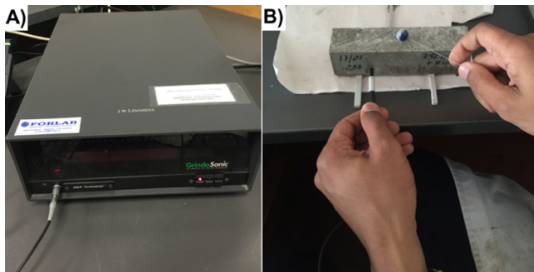


Figura 3.18 – A) Equipamento da marca GrindoSonic B) Ensaio para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico

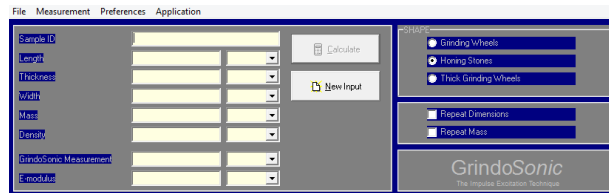


Figura 3.19 – Interface do software fornecido pela GrindoSonic

3.9.3. Ultra-sons

O ensaio de ultra-sons permite avaliar a integridade e qualidade das argamassas através da determinação da velocidade de propagação de ondas elásticas entre dois transdutores. A preparação e medição da velocidade de propagação dos ultra-sons foram realizadas segundo a norma EN 12504-4 (2004), tendo-se recorrido ao método de medição direta. Para a realização deste ensaio foi utilizado o equipamento *C.N.S Electronics PUNDIT 6*, que permite leituras com precisão até 0,1 μ s, Figura 3.20. A calibração do equipamento foi realizada de modo a que o tempo de propagação do impulso ultra-sónico através de uma barra INVAR, diferisse no máximo $\pm 0,1 \mu$ s do valor nela indicado.

No aparelho lê-se o tempo que as ondas elásticas demoram a percorrer o provete da argamassa, sendo a velocidade de propagação de ultra-sons diretamente determinada a partir da expressão (3.10).



Figura 3.20 – Equipamento da marca C.N.S Electronics PUNDIT 6.

$$V = \frac{d}{t} \quad (3.10)$$

Em que;

V – Velocidade da onda elástica no corpo da argamassa [m/s];

d – Distância percorrida pela onda elástica entre o transdutor emissor e o recetor [m];

t – Tempo que a onda demora a percorrer entre o transdutor emissor e o recetor [s].

4. Apresentação e discussão dos resultados

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos através dos ensaios descritos na campanha experimental. Começa-se por fazer a análise termogravimétrica do betão de origem (BO) e da pasta de origem (PO) e de seguida apresentam-se as fases de transformação nos diferentes patamares de temperatura através das análises de DRX. Apresentam-se ainda os resultados obtidos na caracterização dos ligantes reciclados, bem como os resultados dos ensaios das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

4.1. Análise termogravimétrica

Na Figura 4.1 apresentam-se as curvas termogravimétricas dos cimentos reciclados a partir do betão de origem (CRB) e da pasta de origem (CRP), antes de terem sido submetidos a tratamento térmico. Em geral, tal como seria de esperar, constata-se evoluções de perda de massa semelhantes ao reportado na literatura consultada (2.8.2). Tendo em consideração a curva referida à derivada da evolução da perda de massa em função da temperatura, destacam-se 3 picos de maior importância. O primeiro pico ocorre para temperaturas abaixo de 200°C (113°C para o CRB e 144°C para o CRP), devendo este estar relacionado com a perda de água livre ou capilar e alguma da água adsorvida nos produtos de hidratação. Resultados semelhantes foram reportados por Xinwei *et al.* (2010) e Choi (2014), tendo em conta a queima de ligantes reciclados constituídos essencialmente apenas por cimento.

Um segundo pico é identificado para temperaturas entre os 470 e 550°C (498°C para o CRB e 536°C para o CRP), que deverá estar relacionado com a desidratação do hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este fenómeno é também identificado por Xinwei *et al.* (2010) e Zhonghe *et al.* (2008) para intervalos de temperatura ligeiramente inferiores, entre 470 e 500°C.

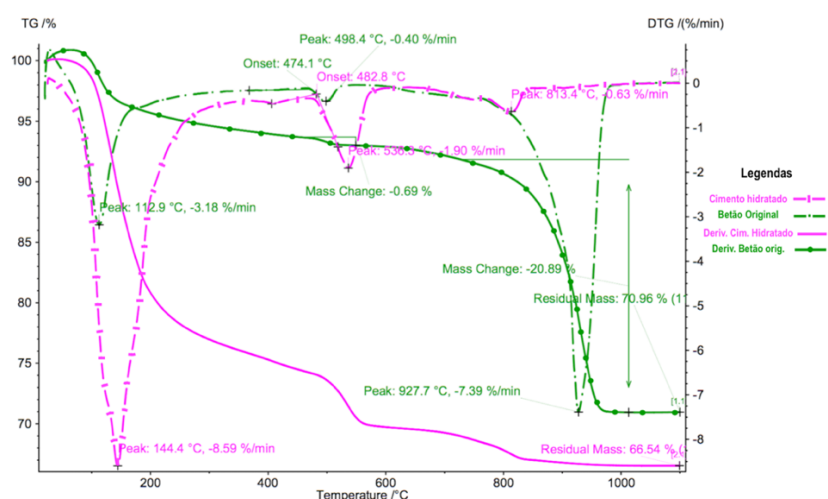


Figura 4.1 – Análise termogravimétrica aos materiais após terceira fase de moagem

As perdas de massa, em termos percentuais, são bastante superiores nos cimentos reciclados provenientes da pasta, pois os cimentos provenientes do betão têm um elevado teor de agregado na

sua constituição, cuja perda de massa só se reflete para temperaturas elevadas, compatíveis com a alteração estrutural dos agregados. Assim, como é natural, existindo maior volume de pasta na amostra de CRP, as perdas de água capilar e por desidratação dos CH, vão ser superiores.

No caso do cimento proveniente da pasta, identifica-se um terceiro pico a cerca de 813°C que corresponde ao culminar da desidratação progressiva dos C-S-H, iniciada para temperaturas de cerca de 450-500°C. Shui *et al.* (2008), Ma Xinwei *et al.* (2010) e Choi (2014) reportam a presença deste pico para valores entre cerca de 650 e 800°C.

Em relação ao cimento proveniente do betão, ocorre um pico bem evidente para 930°C que deverá aliar o culminar da desidratação dos C-S-H com o fenómeno progressivo de descarbonatação do CaCO₃ existente nos agregados calcários moídos. A perda de massa devido a este fenómeno inicia-se com maior relevância para temperaturas superiores a cerca de 800°C. Em geral, a descarbonatação é identificada para intervalos de temperatura entre cerca de 700 e 900°C (Markéta *et al.* 2011).

Em suma, apenas tendo por base a análise termogravimétrica, é possível concluir que, de modo a se obterem cimentos com teores significativos de C-S-H desidratado, sem ocorrer o risco de descarbonatação elevada da mistura e conseqüente emissão de CO₂, as temperaturas iniciais de queima deverão situar-se entre cerca de 650 e 750°C.

4.2. Difração de raios x (DRX)

Inicialmente, foram realizadas análises de DRX ao cimento Portland original, à pasta de cimento hidratada (CRP) e ao material moído proveniente do betão (CRB), ambos antes de serem sujeitos a tratamento térmico. Posteriormente os resultados obtidos foram comparados com os dos materiais aquecidos às temperaturas de 350°C e 650°C, para melhor perceber a influencia da temperatura na transformação dos compostos hidratados do cimento.

4.2.1. DRX do cimento Portland normal e do cimento reciclado antes de ser calcinado

No Anexo A6, resumem-se os padrões de difração obtidos para o cimento Portland normal (CPN), para o CRP e CRB, antes de serem submetidos a tratamento térmico.

Em relação ao CPN não hidratado, identifica-se a presença dos componentes principais do clínquer, nomeadamente os silicatos de cálcio e os aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio. Identifica-se ainda a presença do gesso usualmente adicionado ao cimento de modo a controlar a sua velocidade de presa. Por sua vez, no cimento hidratado já se identificam, como seria de esperar, os produtos de hidratação usuais do cimento, nomeadamente; *Portlandite* (CH), cristais de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite), silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) resultantes da hidratação dos C₃S e C₂S e, em menor quantidade, aluminatos de cálcio (CaAl₂O₄)

Em relação ao CRB, para além de se identificarem alguns dos produtos de hidratação comuns aos da pasta de cimento hidratada, constata-se também a presença natural de quartzo e calcite, associados à composição predominante dos agregados utilizados na produção do betão de origem (areia siliciosa e brita calcária). Evidentemente, os produtos de hidratação do cimento aparecem em menor quantidade, visto que os agregados ocupam uma fração significativa do CRB.

4.2.2. Análise DRX ao CRB, após ser aquecido a 350°C e 650°C

No Anexo A7, apresenta-se a análise de DRX efetuada ao CRB após ter sido sujeito às temperaturas de 350°C e 650°C. Para efeitos comparativos apresenta-se também o DRX referente à análise do material moído proveniente do betão original antes de ter sido submetido a elevada temperatura.

Naturalmente, a presença de quartzo e calcite, relativos à composição dos agregados é comum a todas as amostras analisadas. De facto, para os patamares de temperatura a que foram submetidas as amostras de betão, não é de esperar que ocorram grandes transformações ao nível dos agregados. Apenas para 650°C poderá ocorrer alguma descarbonatação e transformação parcial de calcite (menor pico de intensidade) em CaO.

Em relação ao CRB aquecido a 350°C, constata-se a eliminação dos picos relativos à etringite, que são usualmente instáveis para temperaturas inferiores (Mindess 2003, Metha 1996). A decomposição de compostos como a etringite e o gesso, para temperaturas inferiores a 200°C, são também referidas por Markéta *et al.* (2011) e Sui *et al.* (2009). A portlandite (CH) mantém-se presente para este nível de temperatura.

No que se refere ao CRB sujeito a 650°C, as principais diferenças residem no desaparecimento dos picos de portlandite e no aparecimento de picos que indicam a presença de CaO e C-S-H desidratados. A presença de cal seria de esperar, dado que para esta temperatura já terá ocorrido grande parte da desidratação da portlandite, com transformação de Ca(OH)_2 em CaO e alguma possível descarbonatação de parte da calcite presente nas misturas. Conforme reportado na literatura, e observado na análise TG em 4.1, a decomposição do hidróxido de cálcio inicia-se para temperaturas na ordem dos 400 a 500°C (Metha 1996, Neville 2002, Stepkowska 2004).

Constata-se ainda picos de difração correspondentes à presença de silicatos de cálcio, que deverão ser provenientes da desidratação e transformação dos silicatos de cálcio hidratados. Shui *et al.* (2009) reporta a desidratação progressiva dos CH e a decomposição do CaCO_3 , dando origem à formação de CaO, para temperaturas entre cerca de 580°C e 800°C. Estes autores identificam também a presença de silicatos de cálcio desidratados para estes níveis de temperatura.

4.2.3. Análise DRX ao CRP, após ser aquecido a 350°C e 650°C

No Anexo A8, apresenta-se a análise de DRX efetuado ao CRP após ter sido sujeito às temperaturas de 350 e 650°C. Para melhor interpretação dos resultados, apresentam-se também o DRX respeitante à análise do cimento Portland normal (CPN), bem como do CRP hidratado, antes de submetido a elevadas temperaturas. A não presença de agregado, facilita a identificação e melhor compreensão das transformações ocorridas ao nível das fases constituintes do cimento, quando submetido a elevadas temperaturas.

As diferenças entre o CRP hidratado e o CPN foram discutidas em 4.2.2, realçando a transformação dos compostos de cimento anidro nos produtos de hidratação usualmente observados nos cimentos comuns.

No CRP aquecido a 350°C torna-se mais evidente a presença de portlandite e a desidratação dos aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio hidratados, também identificados para o CRB em 4.2.2. Realça-se o facto de, face ao cimento hidratado, deixar de se identificar a presença de C-S-H. O início da transformação e desidratação parcial destes compostos para estas temperaturas, é também referido por Shui *et al.* (2009), embora a sua decomposição mais efetiva seja prevista para maiores temperaturas (Neville 2002, Metha 1996). As transformações referidas são demonstradas pelo aparecimento de picos relativos à presença de silicatos e aluminatos ou ferro-aluminatos de cálcio não hidratados. No entanto, para o patamar de 350°C, a quantidade destes compostos anidros é ainda pouco significativa. Naturalmente, para este nível de temperatura deixa de se observar a presença de gesso.

Em relação ao CRP aquecido a 650°C, ocorre um claro decréscimo da quantidade de portlandite, acompanhado pelo aumento do teor de cal livre, demonstrando a desidroxilação progressiva do Ca(OH)_2 em CaO . Face ao CRB aquecido a 650°C, é agora mais claro a presença de *larnite* (C_2S), que é um silicato de cálcio e os picos de difração relativos à formação dos restantes compostos desidratados do cimento, alguns já identificados nas amostras submetidas a 350°C, nomeadamente os silicatos e aluminatos ou ferro-aluminatos de cálcio.

Tendo por base as análises termográficas e de DRX realizadas às amostras de CRB e CRP, antes e após o seu aquecimento a diferentes patamares de temperatura, conclui-se que os cimentos reciclados sujeitos a 650°C evidenciam o maior potencial de reidratação sem implicar emissões elevadas de CO_2 durante o seu processamento térmico. As amostras aquecidas a 350°C, apesar de estarem associadas a consumos energéticos inferiores, evidenciam transformações pouco significativas ao nível dos principais produtos de hidratação. Como seria de esperar, os níveis de transformação verificados nas amostras de CRP apresentam maior relevância, indiciando um maior potencial reativo destes cimentos face aos resultantes da moagem e aquecimento dos betões de origem.

4.3. Caracterização no estado fresco de pastas produzidas com CRP e CRB

No presente ponto analisa-se a influência da incorporação de CRB e CRP na trabalhabilidade e tempo de presa de pastas produzidas com relação a/c de 0,5, conforme descrito em 3.6.

4.3.1. Trabalhabilidade de pastas produzidas com CRB e CRP

Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados referentes ao diâmetro de espalhamento e tempo de escoamento, obtidos nos ensaios de espalhamento e método do cone referidos em 3.6.1. Os resultados têm em conta misturas de referência produzidas com CPN e misturas produzidas com 100% de substituição de CPN por CRB ou CRP sujeito a diferentes patamares de temperatura (20°C, 350°C, 650°C). Saliencia-se o facto de todas as misturas terem sido produzidas com a mesma relação a/c de 0,5.

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de fluidez das pastas produzidas

ligante	tempo[s]	espalhamento[mm]
CPN	15	223
CRB 650°C	8	> 300
CRP 650°C	n.d	90
CRB 350°C	7	> 300
CRP 350°C	104	178
Betão original 20°C	8	> 300
Cimento original 20°C	9	> 300

Os resultados indicados na Tabela 4.1 indicam que o CRB, independentemente de ter sido submetido a diferentes patamares de temperatura, tem uma influência pouco significativa na trabalhabilidade das pastas produzidas. Inclusivamente, observa-se um ligeiro aumento na fluidez destas pastas face às produzidas com CPN. A maior fluidez das pastas com CRB face às produzidas com CPN pode estar relacionado com o facto do CRB apresentar uma granulometria mais grosseira e, como tal, menor superfície específica, que conduz a menores percentagens de exigência de água.

No entanto, o cimento proveniente da moagem e aquecimento de pasta afetou significativamente a fluidez das misturas, verificando-se que este fenómeno tende a aumentar com o incremento da temperatura de processamento do CRP. Saliencia-se o facto da pasta com CRP aquecida a 650°C não ter sido capaz de escoar através do cone. Xinwei, *et al.* (2010) refere também um incremento elevado na exigência de água de pastas produzidas com cimento reciclado, atribuindo esse facto à maior porosidade das partículas de cimento desidratado. Esta pode ser uma razão atribuída aos resultados obtidos neste estudo, podendo ocorrer absorção de água nas partículas de cimento reciclado com conseqüente redução da água livre para a trabalhabilidade das misturas.

Porém, conforme analisado em 3.7.4, a massa volúmica do CRP não diminui com o aumento de temperatura, o que não indicia o incremento da porosidade. Inclusivamente, verifica-se que o CRP

moído a 20°C, apesar de apresentar a menor massa volúmica, teve pouca influência na trabalhabilidade das misturas. Como referido em 4.1, importa notar que o aumento de massa volúmica está também relacionado com a desidratação dos compostos e não apenas com a variação da porosidade da mistura.

Outros fatores podem também assumir relevância. Tendo em consideração que as misturas produzidas com cimentos de menor massa volúmica estão associadas a menor quantidade de água e maior volume de ligante, para um dado a/c, então as composições com CRP, ao apresentarem menor teor de água, podem conduzir a pastas menos fluidas. Contudo, não se verifica uma alteração significativa na trabalhabilidade das pastas produzidas com CRP não tratado termicamente, apesar de este ser o que apresenta menor massa volúmica.

A maior velocidade de presa, conforme será abordado em 4.4, contribui também para a perda de plasticidade da mistura. Um outro factor que pode contribuir para a maior exigência de água está relacionado com a maior percentagem de cal livre presente no CRP aquecido a maiores temperaturas, o que irá exigir a sua extinção. Esse fenómeno também deverá ocorrer nas pastas com CRB, no entanto o teor de cimento nas misturas recicladas do betão de origem tem muito menos expressão, conforme visto em 3.7.4

4.3.2. Tempos de presa dos ligantes

Os resultados referentes à quantidade de água necessária para a realização de pastas de consistência normal, bem como os valores dos tempos de início e fim de presa, são apresentados na Tabela 4.2 e Figura 4.2. Na Tabela 4.2, *d* refere-se à distância entre a face inferior da sonda e a placa de base e *w* à percentagem de água a adicionar a mistura, de modo a obter pastas de consistência normal. Os valores apresentados têm em conta o CPN, o CRB e o CRP, antes e após a queima a 350°C ou 650°C.

4.3.2.1. Consistência normal

Na produção da pasta de consistência normal, a quantidade de água necessária de modo a que a agulha de *Vicat* penetre na mistura até uma dada distância regulamentar foi determinada de acordo com a norma NP EN 196-3 (2006), conforme 3.6.2.1.

Tabela 4.2 – Características das pastas de consistência normal e tempos de presa dos ligantes

ligante	temperatura [°C]	relação a/l	d [mm]	W [%]	Início de presa [min]	Fim de presa [min]
CRB	650	0,234	8	23,4	30	70
	350	0,171	6	17,1	105	300
CRP	650	0,483	7	48,3	20	35
	350	0,383	7	38,3	165	395
CPN	-	0,288	6	28,8	130	210

Verifica-se que as pastas produzidas com CRB exigem percentagens de água ligeiramente inferiores à pasta com CPN. Estes resultados corroboram o verificado nos ensaios de trabalhabilidade de pastas, discutidos em 4.3.1. Da mesma forma, as pastas com CRP voltam a demonstrar a maior exigência de água, em especial nas misturas pré-aquecidas a maior temperatura. Assim, como justificação para os resultados obtidos, podem ser atribuídas as mesmas hipóteses avançadas em 4.3.1. O aumento da exigência de água nos CRP com o incremento de temperatura demonstra que as transformações ocorridas ao nível da fração de pasta afetam a exigência de água.

A maior necessidade de água da mistura com CRP, nomeadamente a pré-aquecida a 650°C, leva a que seja necessário corrigir a relação a/c inicialmente definida para as misturas de referência (3.7.4). Assim, como se verá em 4.4, os provetes de argamassa produzidos com CRP estão associados a maior quantidade de água de amassadura, para a mesma dosagem, em peso, de ligante.

4.3.2.2. Início e fim de presa

Tendo em conta os resultados relativos ao início e fim de presa indicados na Tabela 4.2 e Figura 4.2, verifica-se que a velocidade de presa tende a aumentar significativamente nas misturas com cimento reciclado pré-aquecido a 650°C. Este aumento é ligeiramente menor nas misturas com CRB, visto que estão associadas a menor teor de cimento.

O tempo de início de presa nos CRB e CRP foi inferior a 30 minutos, o que se traduz num valor pouco adequado para a sua aplicação em obra. De facto, de acordo com a NP EN 197-1 (2001), os tempos de início de presa para os cimentos devem ser superiores aos 45 minutos. Estes valores contrastam com o tempo de início de presa do CPN (130 minutos), que está dentro dos valores usuais observáveis em cimentos comuns.

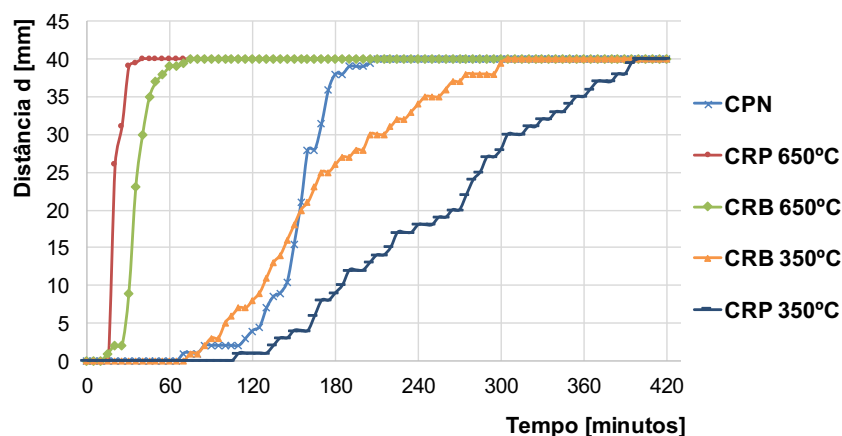


Figura 4.2 – Tempos de presa dos diferentes ligantes

O rápido desenvolvimento de presa dos cimentos reciclados demonstra que estes apresentam elevada reatividade inicial. Este fenómeno deverá estar associado ao facto de o cimento reciclado não apresentar o teor suficiente de sulfatos para satisfazer os aluminatos de cálcio desidratados, entretanto formados nos ligantes previamente submetidos a 650°C. Conforme sugerido por vários autores (Coutinho 1988, Metha 1996, Neville 2002), e prática comum da indústria cimenteira, é necessário adicionar um sulfato para que se evite a reação imediata dos aluminatos de cálcio com a água. De facto, conforme observado em 4.2 (DRX), para temperaturas superiores a 350°C, não se

identifica a presença de gesso ou qualquer outro sulfato. Assim, é necessário adicionar gesso ao material reciclado de modo a satisfazer a quantidade de aluminatos de cálcio que, entretanto, ficam disponíveis na mistura. Pela mesma razão, Shui *et al.* (2008) optaram também por adicionar gesso à sua mistura de cimento reciclado.

No presente trabalho optou-se por adicionar cerca de 1,5% de gesso para o CRP e 0,5% no caso dos CRB, ambos pré-aquecidos a 650°C. Estas dosagens foram definidas tendo por base a realização de misturas experimentais com diferentes teores de gesso, e em que se procedeu à medição dos tempos de presa. Naturalmente, as misturas com CRB, associadas a menores dosagens de cimento, e, como tal, menores teores de aluminatos de cálcio, exigem menores dosagens de gesso.

Na Tabela 4.3 apresentam-se os novos valores do início e fim de presa, relativos aos CRP e CRB previamente misturados com os teores de gesso referidos. Como se constata, em ambos os casos foi possível trazer os tempos de início e fim de presa para valores correntes e compatíveis com a sua utilização em obra.

Tabela 4.3 – Tempos de início e fim de presa dos CRP e CRB previamente submetidos a 650°C e com incorporação de gesso

ligantes	temperatura [°C]	gesso [%]	Início de presa [min]	Fim de presa [min]
CRB	650	0,5	150	240
CRP	650	1,5	120	210
CPN	-	-	130	210

O fenómeno referido, de redução do tempo de início de presa, não foi observado para os cimentos reciclados pré-aquecidos a 350°C. Neste caso, a quantidade de compostos desidratados, nomeadamente aluminatos de cálcio, não é significativa para que este efeito assumira relevância (4.2 - DRX).

Na Figura 4.2, constata-se ainda que o tempo entre o início e o fim de presa tende a ser superior nos cimentos reciclados pré-aquecidos a 350°C. Nos CRP, o fim de presa foi cerca de 7 horas, em contraste com as 3 horas e 25 minutos registadas no CPN. Este fenómeno deverá refletir o fraco teor de compostos desidratados existentes nestes cimentos de baixa temperatura, tornando-os muito menos reativos do que o CPN e os cimentos pré-aquecidos a 650°C.

4.4. Caracterização das argamassas no estado fresco

Tal como referido em 3.8, as argamassas produzidas foram caracterizadas no estado fresco em termos de massa volúmica fresca, teor de vazios e trabalhabilidade (ensaio de espalhamento). Nos pontos em seguida discutem-se os resultados relativos a cada um destes ensaios.

4.4.1. Massa volúmica fresca

Nas Figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se os resultados de massa volúmica em função da taxa de substituição de CPN por CRB e CRP, respetivamente. Os gráficos têm em consideração cimentos reciclados sem tratamento térmico e com pré-aquecimento a 350°C e 650°C. Nas Figuras tem-se ainda em consideração as misturas em que se preconizou a incorporação de CRP e CRB de maior finura (CRPF e CRBF). No anexo A1 apresentam-se todos os resultados obtidos de forma mais detalhada.

Como seria de esperar, a massa volúmica fresca diminui com o incremento da percentagem de substituição de CPN por cimento reciclado. Tal como indicado em 3.7.4, a massa volúmica dos CPN é mais elevada. Assim, ao se proceder à substituição de CPN por igual peso de cimento reciclado, aumenta o volume de pasta com conseqüente diminuição do volume de agregado, associado a maior massa volúmica.

Verifica-se ainda que existe um aumento da massa volúmica com o aumento da temperatura de calcinação, ou seja, quanto maior a temperatura de clinquerização e mais fino for o grão, menor será a variação da massa volúmica fresca.

Em todo o caso, importa referir que, em geral, mesmo para taxas de substituição de 100%, a massa volúmica das argamassas de cimento reciclado não reduzem mais do que 10% face às produzidas com CPN.

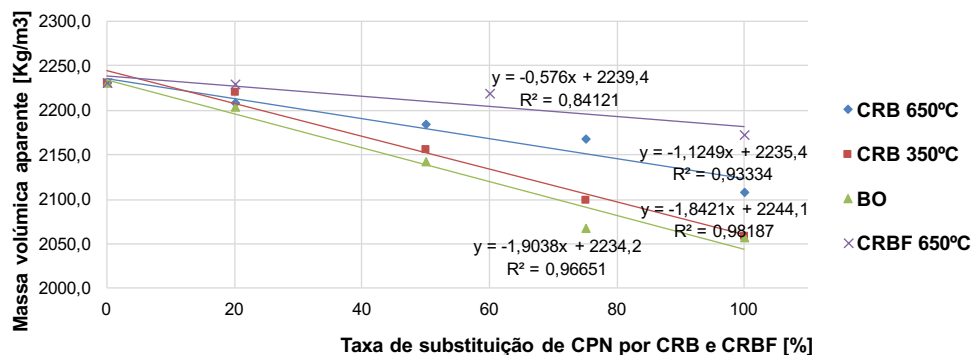


Figura 4.3 – Variação da massa volúmica aparente em função da percentagem de CRB adicionada à mistura

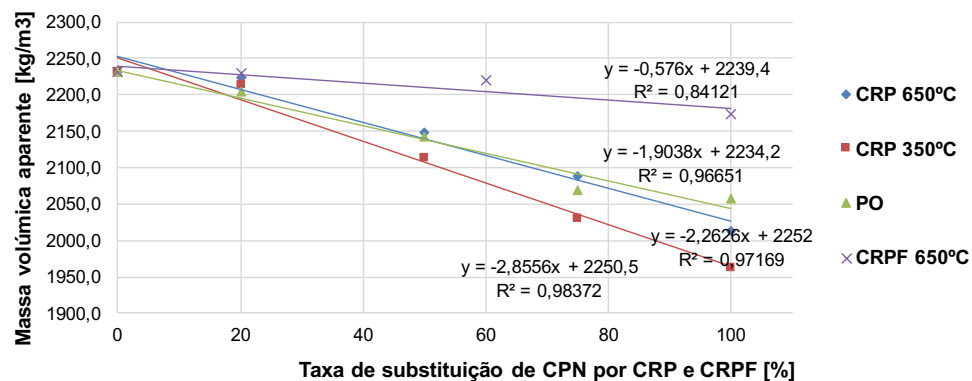


Figura 4.4 – Variação da massa volúmica aparente em função da percentagem de CRP adicionada à mistura

4.4.2. Ensaio de espalhamento

Conforme referido em 3.8.1, as argamassas de referência foram produzidas com vista a apresentarem diâmetros de espalhamento no intervalo de 150 a 170 mm, para o qual se considera argamassas de consistência normal. Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento, de acordo com a EN 1015-3, apresentam-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Espalhamento das misturas argamassas produzidas com cimento reciclado

Misturas	Temperaturas			Misturas	Temperaturas		
	[°C]				[°C]		
	20	350	650		20	350	650
AR (100%CPN)	173	173	173	-	-	-	-
A20CRB (80%CPN+20%CRB)	186	178	174	A20CRP (80%CPN+20%CRP)	186	138	151
A50CRB (50%CPN+50%CRB)	174	157	154	A50CRP (50%CPN+50%CRP)	174	141	152
A75CRB (25%CPN+75%CRB)	160	130	156	A75CRP (25%CPN+75%CRP)	160	133	148
A100CRB (100%CRB)	-	142	141	A100CRP (100%CRP)	152	144	152
A20CRBF (80%CPN+20%CRBF)	-	-	180	A20CRPF (80%CPN+20%CRPF)	-	-	165
A60CRBF (40%CPN+60%CRBF)	-	-	181	A60CRPF (40%CPN+60%CRPF)	-	-	153
A100CRBF (100%CRBF)	-	-	153	A100CRPF (100%CRPF)	-	-	166

Em relação às misturas com CRB, verifica-se que, ao contrário do observado no estudo das pastas, o espalhamento diminui com o aumento da percentagem de incorporação de cimento reciclado.

O aumento da temperatura de tratamento das misturas ligante também conduz à redução do diâmetro de espalhamento das misturas. A menor exigência de água das pastas com CRB, conforme observado em 4.3, não se traduz num maior espalhamento da argamassa. De salientar que para as misturas até 20% de taxa de substituição, a variação do diâmetro de espalhamento da argamassa foi pouco significativa.

Importa referir que a mistura com 100% CRB não pré-aquecido desagregou-se na altura da realização do ensaio de espalhamento (Figura 4.5 A), manifestando a reduzida coesão dos seus constituintes.

Em geral, constata-se que as misturas com incorporação de CRB mais fino apresentam maior espalhamento. Assim, o maior grau de finura das partículas contribui para uma menor absorção por parte destas partículas, ficando mais água disponível para a trabalhabilidade. Por outro lado, o incremento do grau de finura do novo ligante, conduz a maior área específica que contribui para a maior coesão da mistura. A menor dimensão do grão do ligante facilita também a lubrificação da mistura, com redução do contacto entre partículas de agregado.

Em relação à mistura com CRP observam-se tendências semelhantes às referidas para os CRB. Destaca-se apenas o facto de nem sempre ocorrer a redução do espalhamento com o aumento de temperatura (350°C versus 650°C).

Apesar de não se ter analisado a forma das partículas dos cimentos reciclados, acredita-se que estes possam possuir uma menor esfericidade do que o CPN. No entanto, as diferenças ao nível da forma das partículas do CRP e do CRB não deverão ser muito diferentes, apesar de, como observado, o desempenho das pastas no estado fresco ter sido distinto. Assim, a forma das partículas do cimento reciclado não deverá ser o principal factor responsável pelas reduções de trabalhabilidade observadas. Nestes termos, o incremento da relação a/c imposto nas misturas com CRP, com consequente aumento da água de amassadura, deverá ser essencialmente destinado à absorção ou retenção da água por parte do ligante, não afetando significativamente a água efetiva da mistura. Por outras palavras, o excesso de água na mistura não deverá afetar significativamente o volume de poros capilares na pasta, sem consequências na microestrutura e resistência mecânica das argamassas que possam ser atribuíveis a esta razão. Assim, assume-se que a maior relação a/c nas misturas com CRP não afetou significativamente a quantidade de água efetiva disponível para a trabalhabilidade.

Note-se ainda que o ensaio de espalhamento é afetado pela massa volúmica da amostra, que é a responsável pela força motriz necessária para a realização do ensaio. Ou seja, para as misturas de menor massa volúmica, o mesmo nível de espalhamento significa uma maior capacidade de escoamento. Este efeito é mais importante nos CRP. No entanto, conforme observado em 4.4, em geral, a diferença de massa volúmica entre as misturas não foi superior a 10%.

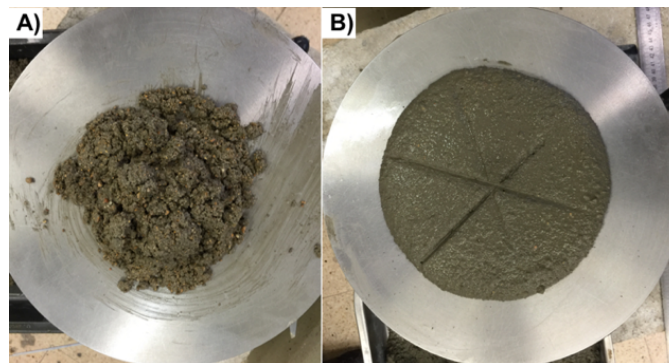


Figura 4.5 – A) Espalhamento com falta de consistência B) Espalhamento correto

4.5. Teor de vazios da argamassa

O teor de vazios calculado para cada mistura de argamassa no estado fresco, resume-se na Tabela 4.5. Em termos médios, o teor estimado de vazios foi semelhante nos CRB e nos CRP, variando usualmente entre cerca de 1 e 5%. Verifica-se uma tendência geral para o teor de vazios aumentar com a percentagem de substituição de CPN por cimento reciclado. Apenas no cimento reciclado mais moído isso não foi evidente. O teor de vazios tende ainda a diminuir com o incremento de temperatura de queima dos ligantes reciclados.

Tabela 4.5 – Volume de vazios das misturas de argamassas

Lig. Reciclado [%]	650°C		350°C		20°C		650°C (grão+fino)	
	CRP	CRB	CRP	CRB	CRP	CRB	CRP	CRB
0	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
20	0,016	0,027	0,02	0,021	0,025	0,028	0,012	0,017
50	0,026	0,03	0,052	0,042	0,039	0,049	-	-
60	-	-	-	-	-	-	0,004	0,012
75	0,028	0,031	0,08	0,062	0,062	0,076	-	-
100	0,038	0,052	0,101	0,074	0,057	0,075	0,008	0,023

Os menores volumes de vazios ocorrem nas misturas com cimento reciclado mais moído. A maior compacidade atingida nestas misturas garante um melhor acabamento dos provetes de argamassa, apresentando um aspeto menos áspero e poroso, semelhante ao observado nas argamassas com CPN (Figura 4.6).

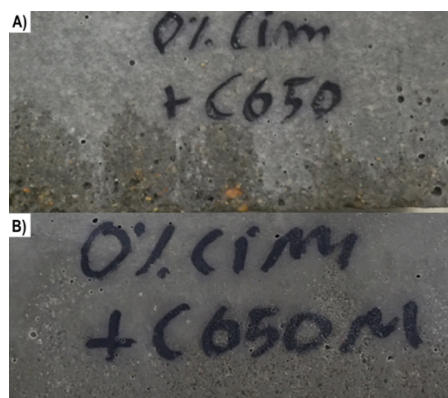


Figura 4.6 – A) Argamassa A100CRP; B) Argamassa A100CRPF

4.6. Caracterização das argamassas no estado endurecido

Nos próximos pontos apresentam-se e discutem-se os resultados referentes aos ensaios de caracterização mecânica, nomeadamente de resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade dinâmico, bem como os referentes aos ensaios de ultra-sons.

4.6.1. Resistência à compressão e flexão de argamassas

No anexo A2 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão e flexão das argamassas produzidas com CRB e CRP, ensaiados entre 7, 28 e 90 dias de idade. No mesmo anexo apresentam-se ainda os valores referentes aos coeficientes de variação, que foram, em geral, inferiores a 5 %.

De referir que as argamassas produzidas com 100% de cimento reciclado (CRB e CRP) não pré-aquecido, não apresentaram resistência suficiente para serem desmoldadas aos 7 dias de idade, pelo que a sua resistência foi apenas avaliada para idades iguais e superiores a 28 dias (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Argamassa com 100% de cimento reciclado (20°C) aos 7 dias de idade

4.6.2. Influência da temperatura de pré-aquecimento e percentagem de substituição de CPN por CRB

Na Figura 4.8 apresenta-se a resistência relativa à flexão ($f_{ctm,CRB}$) e à compressão ($f_{cm,CRB}$) das argamassas com diferentes percentagens de CRB face a argamassa de referência ($f_{ctm,AR}$ e $f_{cm,AR}$).

Verifica-se que ocorre sempre uma redução acentuada de resistência mecânica com o incremento da percentagem de substituição de CPN por CRB, embora essa redução seja inferior nos provetes com CRB previamente submetidos a temperaturas mais elevadas.

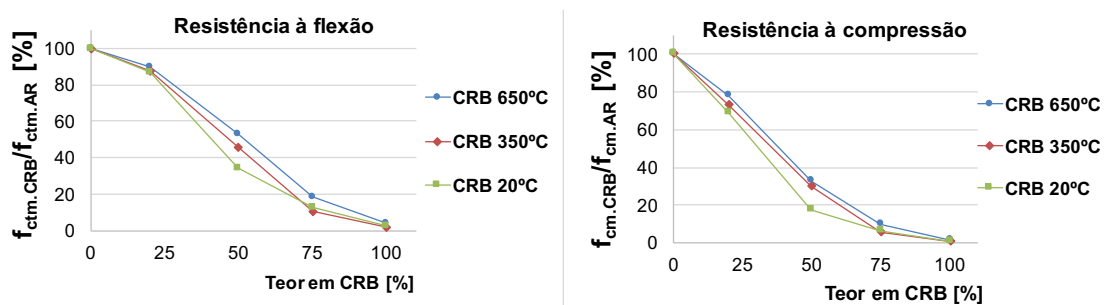


Figura 4.8 – Resistência relativa à flexão e à compressão aos 28 dias entre as argamassas com CRB e a argamassa de referência

As misturas com cimento reciclado apenas moído, sem ser submetido a tratamento térmico, deverão ter fraca capacidade de hidratação e, como tal, funcionam essencialmente por efeito de filler. Assim, e dado que a granulometria entre ligantes é aproximadamente semelhante, as maiores resistências verificadas nas misturas com cimento reciclado pré-aquecido deverão estar relacionadas com a maior capacidade de reidratação destes ligantes.

Na Figura 4.9 apresenta-se a percentagem de aumento de resistência aos 28 dias nas misturas com cimento pré-aquecido face aos provetes com cimento reciclado apenas moído. Apenas para percentagens de substituição superiores a 50% se faz notar de forma mais significativa o melhor desempenho dos CRB pré-aquecidos a maior temperatura. Neste caso, a resistência à flexão das argamassas com CRB a 350°C e 650°C foram cerca de 33% e 54% superiores à das argamassas com cimento apenas moído. Em relação à resistência à compressão, o incremento foi de 74 e 92% respetivamente. Porém, para percentagens de substituição superiores a 75%, o incremento de

resistência foi menos relevante, em especial nas misturas pré-aquecidas a 350°C. Assim, os resultados mostram que a utilização de percentagens de substituição elevadas tende a ser pouco eficaz, indiciando que o CRB não funciona adequadamente sem a presença de um mínimo de CPN. Os melhores desempenhos são observados para taxas de substituição de 50%. Tal se justifica pelo facto dos CRB incorporarem uma reduzida percentagem de cimento na sua constituição. Melhores desempenhos são esperados nas misturas produzidas com CRP, cuja a quantidade de compostos hidratáveis é significativamente superior. Nos CRB, apenas cerca de 22,2% do peso em massa corresponde a cimento, sendo os outros 77,8% relativos a agregado, atuando apenas por efeito de filler.

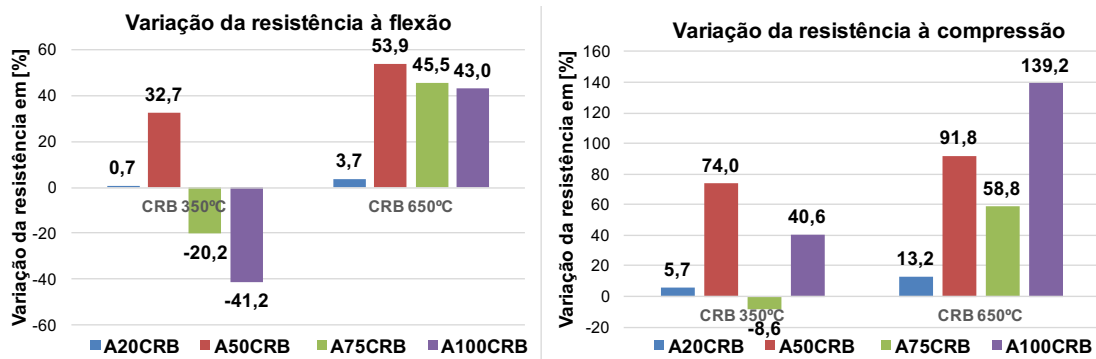


Figura 4.9 – Percentagem da variação da resistência à flexão e à compressão de misturas pré-aquecidas aos 28 dias face as misturas de CRB a 20°C

Para se compreender melhor a potencialidade reativa de cada tipo de ligante no desenvolvimento de novos produtos de hidratação, na Figura 4.10 analisa-se apenas a evolução da resistência à flexão e compressão de argamassas produzidas com 100% de cimento reciclado.

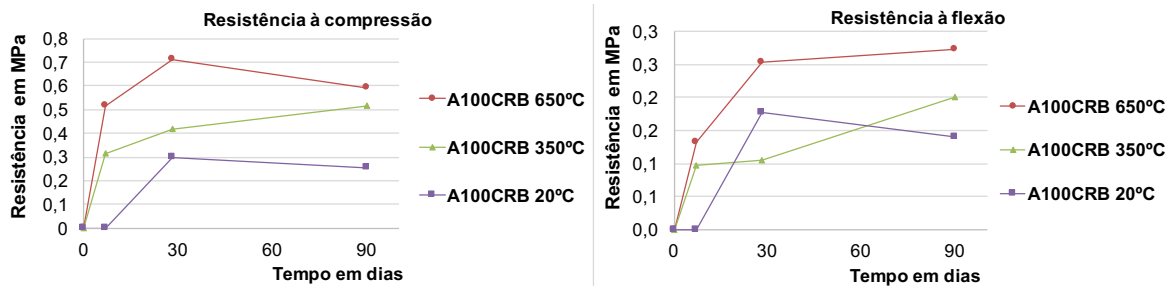


Figura 4.10 – Evolução no tempo da resistência mecânica à flexão e à compressão de argamassas com 100% de CRB

Em relação à resistência à flexão, apesar de se verificar um desempenho ligeiramente superior nas misturas com cimento pré-aquecido a 650°C, as diferenças foram pouco significativas para as restantes argamassas, estando dentro do intervalo de variabilidade do ensaio. Ainda assim, as argamassas com CRB a 650°C, apresentam resistências à flexão aos 28 e 90 dias, cerca de 30,1 e 48,9% superior à das argamassas apenas com cimento reciclado proveniente de betão sem pré-aquecimento. Contudo, importa salientar que mesmo nestas misturas de melhor desempenho, a modesta resistência à flexão de 0,2 a 0,3 MPa, é significativamente inferior à das argamassas com CPN, com valores de 6 a 6,7 MPa. O mesmo se pode constatar para a resistência à compressão.

Apesar das misturas com CRB a 650°C desenvolverem resistências à compressão aos 28 e 90 dias, cerca de 139% superiores à das argamassas apenas com cimento reciclado proveniente de betão sem pré-aquecimento, os valores foram bastante modestos quando comparados com as argamassas de 100% de CPN. De facto, enquanto nas misturas com 100% CRB a máxima resistência à compressão atinge apenas cerca de 0,9 MPa, nas misturas com CPN, a resistência atinge cerca de 42,2 MPa aos 90 dias de idade.

Para tal, importa relembrar que as argamassas produzidas com 100% de cimento reciclado de origem no betão, possuem na realidade cerca de 22,2% de cimento, o que se traduz num incremento da relação a/c de 0,6 para cerca de 2,7. Nesta situação, o teor de cimento torna-se insuficiente para envolver o material inerte da mistura e para proporcionar a coesão e resistência necessárias. O teor insuficiente de compostos desidratados nos CRB foi identificado nas análises de DRX em 4.2. A fraca contribuição dos ligantes nas misturas com excesso de agregado foi igualmente referida por Sousa e Moreno (2003). Justificam-se assim os modestos valores de resistência observados nas misturas com 100% CRB, salientando-se a importância de na produção do cimento reciclado se proceder à separação prévia do máximo possível de cimento do agregado. A necessidade desta separação prévia é salientada por Xinwei *et al.* (2010) e Shui *et al.* (2008), tendo procedido a esta tarefa inicial na produção do cimento reciclado utilizado nas suas campanhas experimentais.

Na Figura 4.11 apresenta-se a evolução da resistência à flexão e resistência à compressão nas argamassas com CRB face às argamassas de referência com CPN. Em geral, verifica-se uma redução progressiva da diferença entre as resistências nas argamassas com CPN e com CRB.

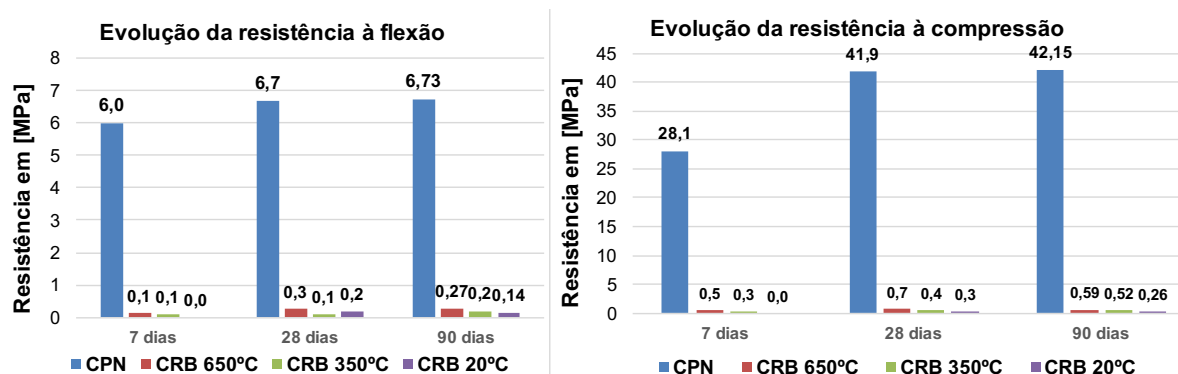


Figura 4.11 – Evolução da resistência mecânica à flexão e à compressão das argamassas com CRB face às argamassas de referência com CPN

Por exemplo, nas misturas com 20% de CRB, a resistência à flexão aos 7 dias foi cerca de 81,1% do valor da resistência na argamassa de referência, subindo para 88,2% aos 28 dias e 87,1% aos 90 dias de idade. Nas misturas com 50% de substituição as percentagens de resistência à flexão foram cerca de 39,1%, 44,2% e 46,1%, para os 7, 28 e 90 dias, respetivamente. E para 100% de substituição essas percentagens de substituição foram de 1,3%, 2,7% e 3,0%, para os 7, 28 e 90 dias, respetivamente.

Estes resultados sugerem que os cimentos reciclados apresentam um desenvolvimento de resistência mais lento, que deverá estar essencialmente relacionado com a granulometria mais grosseira desta mistura ligante. Conforme referido em 3.3, não foi possível moer os cimentos reciclados para níveis semelhantes aos dos CPN, tendo importância significativa na sua capacidade e velocidade de reação.

No entanto, em relação à resistência à compressão, esta tendência de evolução não é óbvia, não se podendo afirmar que existe uma redução da diferença entre a resistência nas misturas com CPN e CRB ao longo do tempo. Por exemplo, nas misturas com 50% de substituição, as percentagens de resistência à compressão foram cerca de 29,1%, 26,6% e 30,9%, para os 7, 28 e 90 dias, respetivamente. Por sua vez, nas misturas com 100% de substituição, as percentagens de resistência à compressão foram cerca de apenas 1% aos 7 dias e 1,1% aos 28 e 90 dias de idade. Mais uma vez, a reduzida percentagem de cimento existente nos CRB são a principal razão atribuída aos resultados obtidos.

Verifica-se ainda que na Figura 4.10, para algumas misturas, a resistência aos 90 dias foi inferior à obtida aos 28 dias. Este facto resulta das resistências das misturas serem bastante modestas, tornando-se sensíveis a pequenas variabilidades na qualidade dos provetes e condições de ensaio.

4.6.3. Influência da temperatura de pré-aquecimento e percentagem de substituição de CPN por CRP

Na Figura 4.12 apresenta-se a resistência relativa à flexão (f_{ctm}) e à compressão (f_{cm}) das argamassas com diferentes percentagens de CRP face a argamassa de referência ($f_{ctm, arg. referência}$ e $f_{cm, arg. referência}$).

Tal como observado para as misturas com CRB, ocorre uma redução acentuada da resistência mecânica com o incremento da percentagem de substituição de CPN por CRP, em especial nas misturas com cimento reciclado pré-aquecidas abaixo de 350°C. Mais uma vez se observa uma maior capacidade reativa das misturas pré-aquecidas a temperaturas mais elevadas.

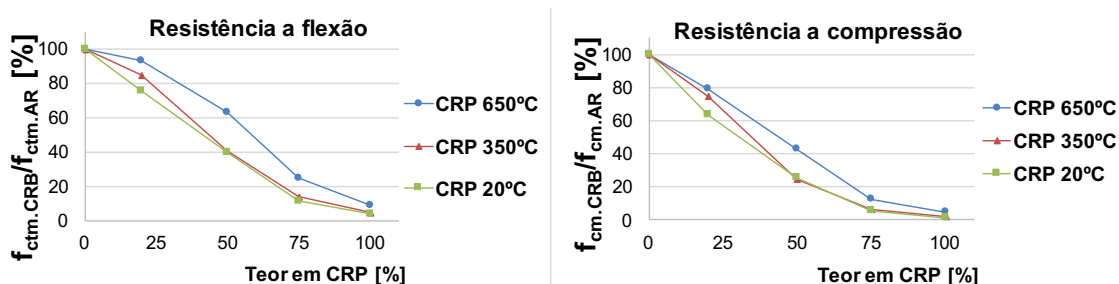


Figura 4.12 – Resistência relativa à flexão e à compressão aos 28 dias entre as argamassas com CRP e a argamassa de referência

Na Figura 4.13, apresenta-se a percentagem de aumento de resistência aos 28 dias nas misturas com cimento pré-aquecido face aos provetes com cimento reciclado apenas moído. Os CRP pré-aquecidos a maior temperatura (650°C) foram sempre mais efetivos para qualquer percentagem de substituição.

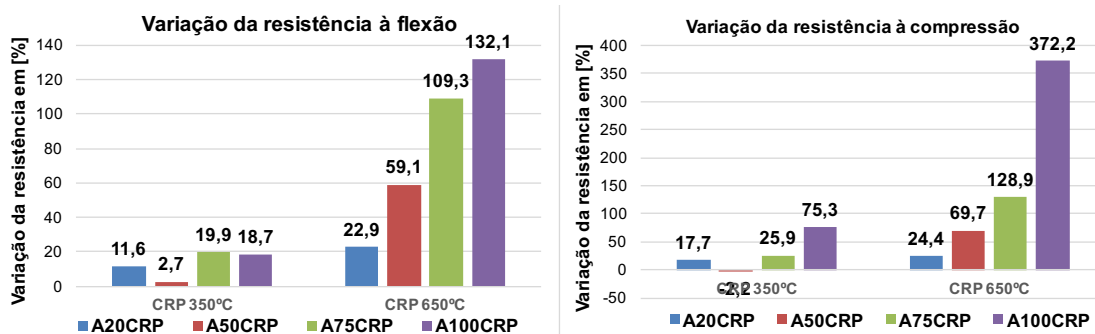


Figura 4.13 – Percentagem da variação da resistência à flexão e da resistência à compressão de misturas pré-aquecidas aos 28 dias face as misturas de CRP a 20°C

Para argamassas produzidas com 20% de substituição, a resistência à flexão das argamassas com CRP a 350°C e 650°C foram cerca de 12% e 23% superiores à das argamassas com cimento apenas moído. Em relação à resistência à compressão, o incremento foi de 18% e 24%, respetivamente. Por sua vez, a resistência à flexão das argamassas com 50% CRP a 650°C foi cerca de 59% superior à das argamassas com CRP apenas moído. Para 75% CRP o incremento foi de cerca de 109%. Em relação à resistência à compressão observam-se tendências semelhantes. Por exemplo, para 50% de substituição a resistência à compressão das argamassas com CRP a 650°C foi cerca de 70% superior à das argamassas com CRP apenas moído.

As misturas com CRP a 350°C foram inefetivas para percentagens de substituição superiores a 50%, evidenciando resistências semelhantes às dos cimentos reciclados apenas moídos, sem serem sujeitos a tratamento térmico. As quantidades de produtos hidratáveis nestas misturas assumem pouco significado, podendo-se considerar que a reciclagem a estas temperaturas não é adequada.

Para se compreender melhor a potencialidade reativa de cada tipo de ligante no desenvolvimento de novos produtos de hidratação, na Figura 4.14 analisa-se apenas a evolução da resistência à flexão e compressão de argamassas produzidas com 100% de cimento reciclado.

Tanto para a resistência à flexão como à compressão, confirma-se um desempenho superior das misturas com cimento pré-aquecido a 650°C. Mais uma vez, as diferenças foram pouco significativas para as restantes argamassas, com CRP a 350°C ou não sujeito a tratamento térmico. As argamassas com CRP a 650°C, apresentam resistências à flexão aos 28 e 90 dias, cerca de 132 e 162% superior à das argamassas apenas com cimento moído. E em relação à resistência à compressão, cerca de 372 e 291% superior, aos 28 e 90 dias, respetivamente.

Ainda assim obtêm-se valores modestos de resistência quando comparados com as misturas com apenas CPN. De facto, a resistência à flexão e à compressão até aos 90 dias de idade, não excederam 0,9 MPa e 2,6 MPa, respetivamente. Valores que são ainda significativamente inferiores às resistências das misturas com CPN, de 6,7 MPa e 42,2 MPa à flexão e compressão, respetivamente. Apesar de se verificar uma evolução significativamente superior das argamassas com CRP face às misturas com CRB, apresentando resistências à compressão cerca de 3,7 vezes superiores, ainda se obtêm ligantes de fraca reatividade. Por um lado, o facto de os CRP serem

constituídos integralmente por cimento, justificam o muito melhor desempenho face aos CRB. Daqui se conclui, uma vez mais, a importância de se proceder à separação prévia do cimento do agregado no betão moído de origem.

Por outro lado, dado que os CRP foram produzidos com uma granulometria muito grosseira, a sua reatividade tende a ser baixa, esperando-se que o desenvolvimento das reações de hidratação seja mais efetivo quando se atingem dimensões das partículas semelhantes às dos CPN, cerca de uma ordem de grandeza inferiores. Ainda assim, com os CRP foi possível produzir misturas de relação *a/c* efetiva superior a 0,6, com resistência média à compressão aos 28 dias de 1,9 MPa. Esta resistência é muito superior à observável em qualquer argamassa de cal aérea e da ordem de grandeza de algumas argamassas de cal hidráulica. Assim, e tendo ainda em conta a hidraulicidade do ligante produzido, estes tipos de ligantes hidráulicos de reduzida resistência e rigidez, podem ser soluções interessantes para a reabilitação de edifícios antigos,

Na Figura 4.15, apresenta-se a evolução da resistência à flexão e à compressão nas argamassas com CRP face às argamassas de referência com CPN. Em geral, verifica-se, tal como sucede nas argamassas com CRB, uma redução progressiva da diferença entre as resistências nas argamassas com CPN e com CRP.

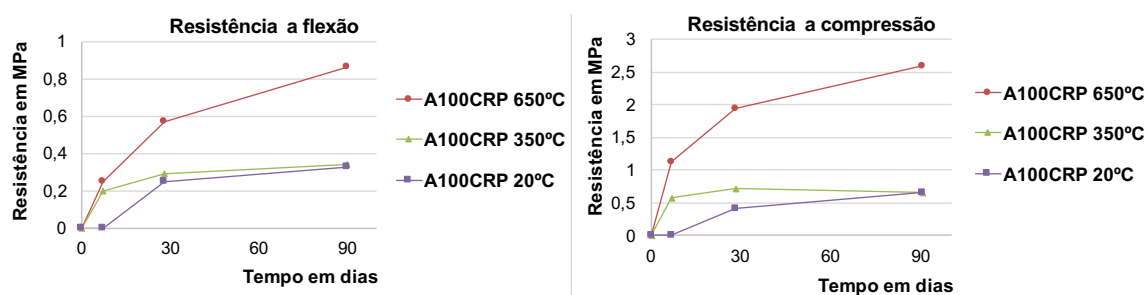


Figura 4.14 – Evolução no tempo da resistência mecânica à flexão e à compressão de argamassas com 100% de CRP.

Por exemplo, nas misturas com 20% de CRP, a resistência à flexão aos 7 dias foi cerca de 75,7% do valor da resistência na argamassa de referência, subindo para 81,1% aos 28 dias, mas diminuindo para 72,9% aos 90 dias de idade. Nas misturas com 50% de substituição as percentagens de resistência à flexão foram cerca de 39,1%, 47,8% e 47,2%, para os 7, 28 e 90 dias, respetivamente. E para 100% de substituição essas percentagens de substituição foram de 2,5%, 5,5% e 7,5%, para os 7, 28 e 90 dias, respetivamente.

Mais uma vez, estes resultados indiciam um desenvolvimento de resistência mais lento nos cimentos reciclados, que estão associados a uma granulometria mais grosseira. Pelo menos para percentagens de substituição superiores a 20%, a incorporação de CRP foi mais efetiva na recuperação da resistência ao longo do tempo, quando comparado com as misturas produzidas com CPN.

No entanto, mais uma vez esta tendência nem sempre é observada na resistência à compressão. Por exemplo, nas misturas com 50% de substituição, as percentagens de resistência à compressão foram

cerca de 33,4%, 30,1% e 28,8%, para os 7, 28 e 90 dias, respetivamente. Por sua vez, nas misturas com 100% de substituição, as percentagens de resistência à compressão foram cerca de apenas 2% aos 7 dias, 2,5% aos 28 dias e 3,1% aos 90 dias de idade.

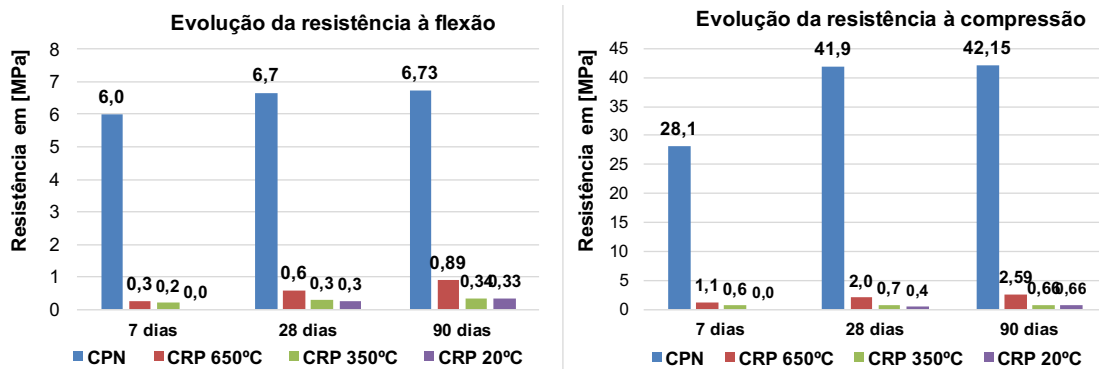


Figura 4.15 – Percentagem da variação da resistência mecânica à flexão da resistência mecânica à compressão de misturas pré-aquecidas aos 28 dias face as misturas de CRP a 20°C

De modo a se perceber a influência da dimensão do grão na reatividade dos ligantes reciclados, foram realizadas misturas complementares em que se procedeu previamente à moagem extra dos CRB e CRP sujeitos a 650°C, conforme referido em 3.3.1.4.

4.6.4. Misturas com CRP e CRB de menor granulometria

Na Figura 4.16, apresentam-se os resultados de resistência relativa à flexão ($f_{ctm,CRB/CBP}$) e à compressão ($f_{cm,CRB/CRP}$) aos 28 dias, das argamassas com diferentes percentagens de CRBF e CRPF face a argamassa de referência ($f_{ctm,AR}$ e $f_{cm,AR}$). De modo a facilitar a análise comparativa, nas mesmas figuras apresentam-se os resultados relativos às misturas com CRB e CRP antes de se proceder à moagem complementar.

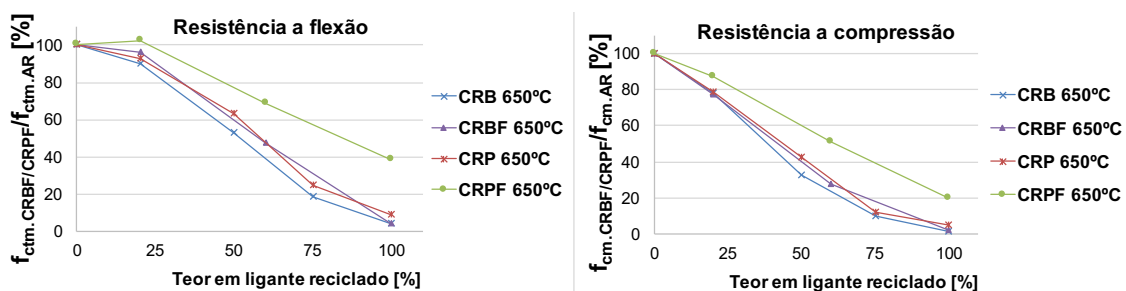


Figura 4.16 – Resistência relativa à flexão e à compressão aos 28 dias entre as argamassas com CRBF e CRPF e a argamassa de referência

Apesar de se verificar uma ligeira melhoria nas misturas com CRB mais fino (CRBF), o incremento proporcionado na resistência mecânica não foi muito significativo. Tal como referido anteriormente, o CRBF inclui apenas cerca de 22,2% de cimento efetivo, o que faz com que ocorra uma redução importante do teor de cimento total na mistura quando se procede à substituição de CPN por CRBF. Por sua vez, as misturas produzidas com CRPF, cujo cimento foi reciclado diretamente a partir da pasta, evidenciaram melhorias significativas face às misturas com CRP mais grosseiro. Verifica-se inclusivamente um aumento de 2,2% na resistência à flexão para 20% de substituição de CPN por

CRP. A moagem extra de CRPF permitiu, por exemplo, que para 60% de substituição a resistência fosse 10% superior à das misturas com apenas 50% de substituição de CRP normal. Ou seja, a utilização de CRPF permite um incremento de pelo menos 72% face às misturas com cimento reciclado não aquecido, que atua apenas por efeito de filler. Em termos de resistência à compressão, para 50% de substituição de CPN por CRPF, o incremento foi 20% superior ao das misturas com CRP normal e 103% face às misturas com cimento reciclado apenas moído.

Os resultados obtidos permitem concluir que o processo de pré-aquecimento a 650°C, das misturas recicladas, foi efetivo, tendo-se desenvolvido produtos reidratáveis conforme inicialmente pretendido. O nível de reatividade aumentou consideravelmente com a redução da dimensão média do grão de cimento reciclado, sendo bastante importante atingir granulometrias similares às utilizadas no CPN. De facto, dado que as reações se desenvolvem na superfície dos grãos, o incremento da área superficial é essencial para a maior reatividade dos ligantes.

Finalmente, é importante proceder à separação prévia do agregado e da pasta na produção do cimento reciclado, visto que tendo em conta o elevado teor de agregado usualmente presente no betão, a quantidade de ligante hidratável disponível para a mistura pode-se tornar demasiado escasso, em especial para percentagens de substituição elevadas, superiores a cerca de 50%.

Para melhor se compreender a potencialidade dos vários tipos de cimento reciclado, na Figura 4.17 resumem-se os valores de resistência à flexão e a compressão aos 28 dias para 100% de CPN, CRP, CRB, CRBF e CRPF, após serem pré-aquecidos a 650°C. Nas misturas com CRB, a moagem extra permitiu passar a resistência à flexão, de apenas 0,25 MPa para 0,27 MPa. Ao passo que nas misturas com CRP, a moagem extra permitiu passar de 0,57 MPa para um valor cerca de 4,5 vezes superior (2,57 MPa), correspondente a 38,5% da resistência à flexão das misturas com CPN. Em relação à resistência à compressão, a inclusão de CRBF apenas permitiu melhorar a resistência de 0,71 MPa para 0,90 MPa. Por sua vez, a inclusão de CRP permitiu um aumento 4,2 vezes superior na resistência à compressão, passando-se de 1,95 MPa para 8,25 MPa. Este valor corresponde a 20% da resistência à compressão da argamassa com CPN, sendo compatível com a produção de argamassas hidráulicas com melhor desempenho do que argamassas correntes de cal hidráulica. De facto, de acordo com as características apresentadas pelo CRPF, este ligante reciclado poderia ser equiparado a pelo menos uma cal hidráulica HL 5 ou NHL 5. Shui *et al.* (2008), em provetes cúbicos de pasta de 20 mm de aresta e relação a/c de 0,4, produzidas apenas com 100% de cimento reciclado pré-aquecido a 500°C, verificou também resistências na ordem dos 8,3 MPa aos 28 dias. \

Assim, demonstra-se que é possível a reciclagem de betão existente, podendo-se produzir misturas ligantes de razoável eficiência e capacidade de reidratação, sem implicar grandes consumos energéticos e a geração significativa de emissões de CO₂ para o ambiente. Atingem-se assim soluções eficientes e de maior sustentabilidade, com impacto ambiental reduzido e características mecânicas aceitáveis.

Refira-se ainda que o grau de moagem atingido nos CRPF foi ainda muito aquém do desejável (3.3.1.4). Como tal, melhores resultados serão expectáveis caso se consiga uma moagem mais efetiva, conforme se pretende averiguar em trabalhos de investigação futuros.

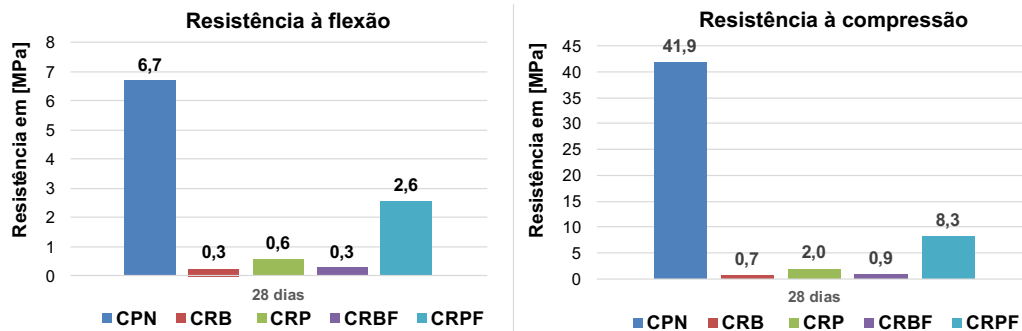


Figura 4.17 – Resistência mecânica à flexão e à compressão aos 28 dias para as argamassas de CPN e de cimento reciclado com e sem melhor moagem aquecidas a 650°C

4.6.5. Velocidade de propagação de ultra-sons nas argamassas com e sem cimento reciclado

Na Figura 4.18, apresentam-se os resultados de V_{us} relativa, aos 28 dias, das argamassas com diferentes percentagens de CRB ($V_{us_{CRB}}$) e CRP ($V_{us_{CRP}}$) face a argamassa de referência ($V_{us_{AR}}$). No anexo A5 apresentam-se em maior detalhe os vários resultados obtidos com este ensaio.

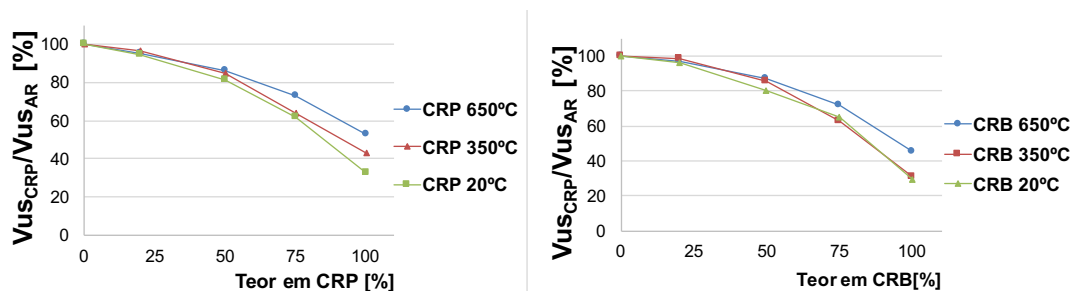


Figura 4.18 – V_{us} relativa entre as argamassas de CRB e CRP com a argamassa de referência

Em geral, os resultados obtidos corroboram a análise de caracterização mecânica efetuada em 4.6. Confirma-se que o aumento da percentagem de substituição de CPN por CRB ou CRP conduz à redução de V_{us} , dado que existe um decréscimo da massa volúmica e rigidez das misturas, associado ao aumento da sua porosidade. Porém, mais uma vez se confirma que o tratamento térmico dos ligantes reciclados a temperaturas mais elevadas conduz às menores perdas da velocidade de propagação dos ultra-sons.

A substituição de 75% de CPN por CRB aquecido a 650°C representa um aumento de aproximadamente 11% em V_{us} face aos cimentos reciclados apenas moídos, que funcionam essencialmente por efeito de filler. Por sua vez, esse aumento foi de 18% quando se procedeu à substituição de 75% de CPN por CRP. Confirma-se um melhor desempenho da mistura com CRP face às misturas com CRB, sobretudo para percentagens de substituição superiores a 75%. Para estas misturas, torna-se mais relevante a quantidade de compostos reidratáveis nos ligantes reciclados, dado que a quantidade de CPN é progressivamente inferior.

Os resultados indicam ainda que, tal como já tinha sido notado anteriormente, o pré-aquecimento do ligante a 350°C tem pouca influência no adensamento da microestrutura e desenvolvimento de resistência da argamassa. A formação de novos produtos de hidratação deverá ser pouco importante. Importa referir que sendo o ensaio de ultra-sons essencialmente dependente da massa volúmica e rigidez do material, na interpretação dos resultados deve-se ter em conta que as misturas não apresentam a mesma composição, ocorrendo variações ao nível da relação agregado/pasta. De facto, ao se proceder à substituição, em massa, de CPN por cimento reciclado de menor massa volúmica, o volume de pasta aumenta com conseqüente redução da proporção de agregado na mistura.

A redução da diferença de *V_{us}* entre as misturas com cimento reciclado e as misturas com CPN não é clara ao longo do tempo, embora a tendência seja para que essas diferenças diminuam à semelhança do que ocorre com a resistência mecânica (Tabela 4.8). A maior dimensão do grão justifica a menor velocidade de reação do CRB e CRP. Por exemplo, para 100% de substituição de CRB, *V_{us}* foi 30,8%, 35,3% e 34,4% do valor obtido nas argamassas de referência com CPN, aos 7, 28 e 90 dias, respetivamente. Para 100% de substituição de CRN por CRP, *V_{us}* foi 46,2%, 42,9% e 45,4% aos 7, 28 e 90 dias, respetivamente. Por estes resultados confirma-se que as misturas com CRP são mais efetivas e conduzem a maiores percentagens de recuperação face às argamassas com CRB.

*Tabela 4.6 – Redução da diferença de *V_{us}* entre as misturas com cimento reciclado e as argamassas de referência (AR)*

Misturas	Redução em relação a AR		
	7 dias	28 dias	90 dias
AR (100% CPN)	100%	100%	100%
A20CRB (80% CPN+20% CRB)	98%	97%	95%
A50CRB (50% CPN+50% CRB)	88%	87%	86%
A75CRB (25% CPN+75% CRB)	65%	72%	71%
A100CRB (100% CRB)	36%	45%	43%
A20CRP (80% CPN+20% CRP)	100%	95%	96%
A50CRP (50% CPN+50% CRP)	91%	86%	87%
A75CRP (25% CPN+75% CRP)	75%	73%	76%
A100CRP (100% CRP)	47%	53%	62%

Na Figura 4.19 analisa-se o efeito da moagem complementar do CRB e CRP na velocidade de propagação de ultra-sons aos 28 dias, nas misturas produzidas com diferentes percentagens de substituição de CPN por cimento reciclado.

Como seria de esperar, conclui-se que a redução da granulometria do cimento reciclado conduz ao adensamento da microestrutura e conseqüentemente ao aumento de *V_{us}*. Até cerca de 60% de substituição, a melhoria foi significativa, inclusivamente nas misturas com CRBF. Para maiores

percentagens de substituição, apenas as misturas com CRPF foram mais efetivas, pelas razões já referidas anteriormente em 4.3.

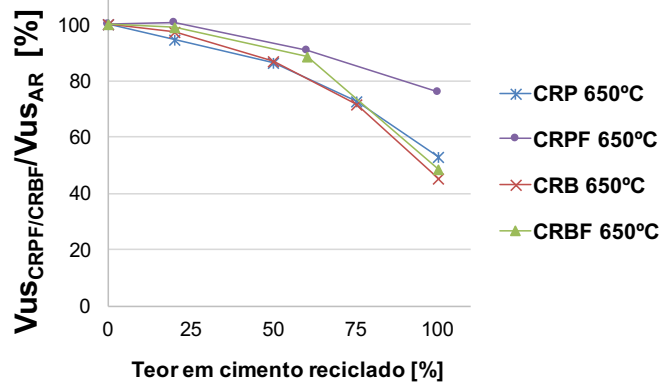


Figura 4.19 – Vus relativo entre as argamassas de CRBF e CRPF com a argamassa de referência

A substituição de 100% de CPN por CRBF conduziu a melhorias pouco significativas, aumentando-se Vus em apenas 150 m/s face às misturas com 100% de CRB. Por sua vez, esse aumento foi bastante mais significativo nas misturas com 100% de CRPF, tendo sido possível obter um aumento de Vus de 979 m/s face às misturas com CRF (um aumento de cerca de 43%). Destaca-se o facto deste valor de Vus ser 76% do valor obtido nas misturas de referência com 100% CPN.

4.6.6. Módulo de elasticidade dinâmico de misturas com CRB e CRP

Na Figura 4.20, apresentam-se os resultados do módulo de elasticidade relativa, aos 28 dias, das argamassas com diferentes percentagens de CRB (E_{CRB}) e CRP (E_{CRP}) face a argamassa de referência (E_{AR}).

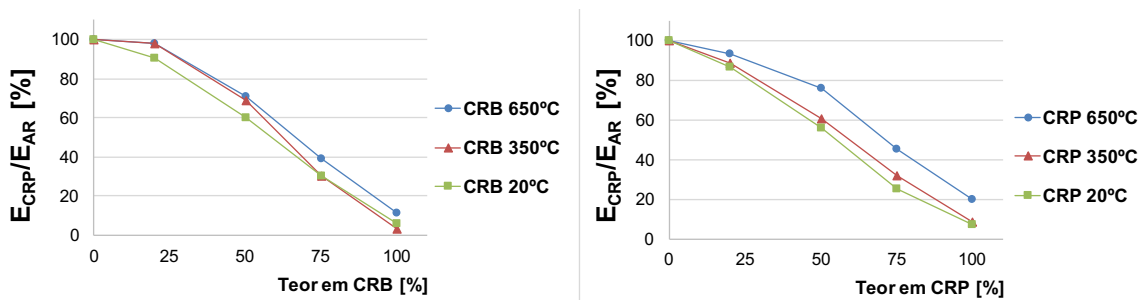


Figura 4.20 – M. Elasticidade dinâmico relativo entre as argamassas de CRB e CRP com a argamassa de referência

Como seria de esperar, os resultados estão de acordo com as tendências observadas nos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons, dado que ambos os ensaios dependem fortemente da rigidez das misturas.

Confirma-se que quanto maior a temperatura de processamento do ligante reciclado, maior é o adensamento da microestrutura da pasta, com conseqüente aumento na rigidez das argamassas com CRB ou CRP, face às misturas com cimento reciclado apenas moído.

Por exemplo, para percentagens de substituição de CPN por 50% de CRB ou CRP, o incremento de rigidez face às misturas com apenas cimento moído, foi de 18% e 36%, respetivamente. Para 100% de substituição, esse incremento foi de 93% e 179%, respetivamente.

Para percentagens de substituição superiores a 50% confirma-se também a inefectividade das misturas com CRP e, sobretudo com CRB, no aumento das propriedades mecânicas face às argamassas com cimento apenas moído. Neste caso, os CRB e CRP atuam apenas por efeito de filer e eventual efeito de nucleação de novos produtos de hidratação resultantes, essencialmente, do CPN existente na mistura.

A redução da diferença de módulo de elasticidade ao longo do tempo, entre as misturas com cimento reciclado aquecido aos 650°C e as misturas com CPN, tendem para diminuir ao longo do tempo (Tabela 4.9), confirmando a menor velocidade de reação dos cimentos reciclados associados a granulometrias mais grosseiras. Por exemplo, para 100% de substituição de CRB, o módulo de elasticidade foi 4,1%, 6,8% e 7% do valor obtido nas argamassas de referência com CPN, aos 7, 28 e 90 dias, respetivamente. Para 100% de substituição de CPN por CRP, o módulo de elasticidade foi 9,1%, 11,8% e 14,3% aos 7, 28 e 90 dias, respetivamente. Por estes resultados confirma-se que as misturas com CRP são mais efetivas e conduzem a maiores percentagens de recuperação face às argamassas com CRB.

Tabela 4.7 – Redução da diferença do M. Elasticidade dinâmico entre as misturas com cimento reciclado e as argamassas de referência (AR)

Misturas	Redução em relação a AR		
	7 dias	28 dias	90 dias
AR (100% CPN)	100%	100%	100%
A20CRB (80% CPN+20% CRB)	94%	98%	93%
A50CRB (50% CPN+50% CRB)	79%	71%	70%
A75CRB (25% CPN+75% CRB)	24%	39%	45%
A100CRB (100% CRB)	5%	11%	10%
A20CRP (80% CPN+20% CRP)	93%	93%	89%
A50CRP (50% CPN+50% CRP)	73%	76%	68%
A75CRP (25% CPN+75% CRP)	41%	45%	49%
A100CRP (100% CRP)	12%	20%	26%

Na Figura 4.21 analisa-se o efeito da moagem complementar do CRB e CRP no módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias para as misturas produzidas com diferentes percentagens de substituição de CPN por cimento reciclado.

À semelhança do observado para a resistência mecânica e velocidade de ultra-sons, a redução da granulometria do cimento reciclado, em especial do CRPF, conduz a um aumento importante do módulo de elasticidade dinâmico. Mais uma vez a moagem complementar preconizada no CRBF foi pouco efetiva, verificando-se melhorias pouco significativas face ao CRB. A menor efetividade das

misturas com CRB e CRBF corrobora os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica e velocidade de ultra-sons.

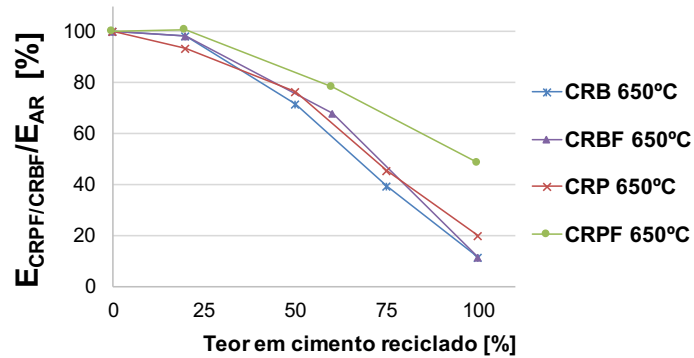


Figura 4.21 – M. Elasticidade dinâmico relativo entre as argamassas de CRBF e CRPF com a argamassa de referência

As misturas com CRPF voltaram a demonstrar melhorias significativas, independentemente da percentagem de substituição. Para substituições de 100% de CPN por CRPF ocorre um aumento de 150% no módulo de elasticidade face às misturas com 100% CRP normal, ou seja, de 7 para os 17,3 GPa, 2,5 vezes superior e 48,5% do valor da argamassa de referência. Mais uma vez, conclui-se que a moagem do CRP é fundamental para potenciar a reatividade do cimento reciclado. O CRP demonstra possuir constituintes reidratáveis que são mais fáceis de ativar quando a área superficial das suas partículas é mais elevada.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Considerações finais

De acordo com o descrito nos objetivos iniciais, na presente dissertação procurou-se caracterizar o comportamento de argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição de cimento Portland normal (CPN) por cimento reciclado proveniente de elementos de betão existentes, que foram sujeitos a um processo de moagem e subsequente queima a elevadas temperaturas.

Para tal, foi definida uma campanha experimental que envolveu, numa fase inicial, a produção e caracterização física e química do cimento reciclado, tendo em consideração a obtenção do mesmo a partir de provetes de betão (CRB) ou de provetes constituídos apenas por pasta cimentícia (CRP). Na produção do cimento reciclado foram consideradas diferentes temperaturas de processamento de modo a analisar a influência deste parâmetro no comportamento de argamassas com incorporação deste tipo de ligante. Numa fase posterior, foram então caracterizadas várias misturas de argamassa produzidas com diferentes percentagens de substituição (0, 20, 50, 75, 100%) de CPN por CRB ou CRP. Desse modo, foi possível avaliar a potencialidade de se reutilizarem elementos de betão existentes, visando a produção de cimentos associados a menores custos energéticos, menores níveis de emissão de CO₂ e menor consumo de recursos naturais, contribuindo, como tal, para uma construção mais sustentável.

No próximo ponto é efetuada uma descrição resumida das principais conclusões decorrentes do estudo de caracterização das argamassas ensaiadas ao longo da campanha experimental, nomeadamente no que se refere ao seu comportamento no estado fresco (massa volúmica fresca, trabalhabilidade, volume de vazios) e estado endurecido (massa volúmica, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade dinâmico). No final do capítulo são ainda sugeridas propostas de desenvolvimento futuro, com o propósito de aprofundar o conhecimento existente dos temas abordados.

5.2. Conclusões gerais

Os cimentos reciclados produzidos no presente trabalho resultaram da moagem de provetes de betão corrente, designados de betões de origem, ou de provetes produzidos apenas com pasta, de modo a excluir o efeito dos agregados na capacidade de reidratação do ligante reciclado. Estas misturas foram posteriormente submetidas a diferentes patamares de temperatura, de modo a incutir diferentes transformações nos produtos de hidratação, reestruturando e atribuindo diferentes capacidades de reidratação ao cimento reciclado. Os provetes de betão, ao serem constituídos por uma grande percentagem de agregado, conduziram a ligantes reciclados com apenas cerca de 22% em massa de CPN, o que afeta significativamente a sua hidráulica. A mistura granular proveniente da moagem dos vários provetes apresentou dimensões maioritariamente entre 125 e 250

μm , cerca de uma ordem de grandeza superior à normalmente observada nos CPN. Por esse motivo, foram também analisados neste trabalho misturas granulares, complementarmente moídas, que apresentavam percentagens de material retido no peneiro de $63 \mu\text{m}$ cerca de 44% a 46% inferior face ao cimento reciclado original (CRB e CRP). Esta moagem extra permitiu perceber a capacidade reativa do cimento reciclado mais fino proveniente do betão (CRBF) ou da pasta (CRPF).

Com base na análise termogravimétrica efetuada ao material granular proveniente do betão e pasta de origem, antes de ser submetido a tratamento térmico, optou-se por selecionar os patamares de temperatura de 350°C e 650°C para a produção do cimento reciclado. Estes patamares foram definidos de modo a se obterem cimentos com teores significativos de C-S-H desidratado, mas evitando libertações excessivas de CO_2 por descarbonatação dos agregados, o que não estaria de acordo com o objetivo de sustentabilidade definido para o presente trabalho.

Foram efetuadas análises de difração de raios X (DRX) ao CRP e CRB, antes e após serem sujeitos a 350°C e 650°C . Como esperado, as misturas granulares foram efetivamente afetadas por alterações composicionais, induzindo-se diferentes transformações nos produtos de hidratação da parte cimentícia. Nas amostras de cimento reciclado aquecidas a 350°C constatou-se a desidratação dos aluminatos e ferratos de cálcio hidratados, mantendo-se presente a portlandite. Verificou-se ainda o início da desidratação dos C-S-H, sendo isso mais evidente no CRP. Conclui-se que para o patamar de 350°C , a quantidade de compostos anidros é ainda escassa, indiciando uma fraca reatividade da mistura granular reciclada. Para o patamar de 650°C verifica-se a redução acentuada dos teores de portlandite e o surgimento de manifestações de CaO e silicatos de cálcio resultantes da desidratação e transformação dos C-S-H. Naturalmente, os produtos de hidratação do cimento foram sempre menos evidentes no CRB, visto que os agregados ocupam uma fração significativa nesta mistura. Deste estudo conclui-se que os cimentos reciclados sujeitos a 650°C evidenciam o maior potencial de reidratação sem implicar emissões elevadas de CO_2 durante o seu processamento térmico. As amostras aquecidas a 350°C , apesar de estarem associadas a consumos energéticos inferiores, evidenciam transformações pouco significativas ao nível dos principais produtos de hidratação. A análise de DRX realizada sustenta a escolha dos patamares de temperatura definidos para a produção do cimento reciclado.

Verificou-se que independentemente da temperatura de processamento, o CRB tem uma influência pouco significativa na trabalhabilidade de pastas produzidas com este tipo de ligante reciclado. No entanto, a fluidez foi significativamente afetada pela incorporação de CRP, em especial quando este foi previamente submetido a maiores temperaturas de processamento. Salienta-se a maior exigência de água do CRP que pode estar relacionado com uma maior absorção de água e maior teor de cal livre deste ligante. Este facto obrigou à correção da relação a/c inicialmente estabelecida para as misturas de referência com CPN.

Sem proceder a qualquer correção na composição das misturas granulares, o tempo de início e fim de presa diminuiu significativamente nas misturas produzidas com cimento reciclado previamente sujeito a 650°C . O início de presa foi inferior a 30 minutos, o que inviabiliza a sua utilização em casos correntes. De modo a contrariar este comportamento resultante da escassez de sulfatos nas misturas, capazes de se combinarem com os aluminatos de cálcio desidratados entretanto desenvolvidos, foi

necessário adicionar 0,5% e 1,5% de gesso ao CRB e CRP, respetivamente. Nas misturas pré-aquecidas a 350°C, associadas a menor teor de compostos desidratados, não foi necessário proceder à correção da sua composição. Após adição de gesso às misturas, o tempo de presa atingiu valores semelhantes aos manifestados pelo CPN. Estes resultados demonstram que os cimentos reciclados produzidos possuem capacidade ligante, apresentando hidraulicidade suficiente para o desenvolvimento regular de produtos de hidratação em presença da água, nomeadamente no caso das misturas previamente aquecidas a 650°C. As misturas pré-aquecidas a 350°C demonstraram fraca reatividade.

Em seguida procedeu-se à caracterização no estado fresco e endurecido de argamassas produzidas com incorporação de diferentes percentagens de cimento reciclado.

Como seria de esperar, a massa volúmica fresca diminuiu com o incremento da percentagem de substituição de CPN por CRB ou CRP, visto que ocorreu um incremento correspondente do volume de pasta na argamassa. No entanto, em geral, a diferença de massa volúmica entre as várias misturas não foi superior a 10%. A redução de massa volúmica diminuiu com o incremento da temperatura de calcinação e a redução da granulometria do cimento reciclado.

Em geral, verificou-se que o espalhamento diminuiu com a percentagem de substituição de CPN por CRB ou CRP, em especial quando este foi submetido a maiores temperaturas de processamento. As argamassas com 100% de cimento reciclado apresentaram fraca coesão dificultando o seu manuseamento e moldagem. A redução de finura dos ligantes reciclados permitiu melhorar a trabalhabilidade e coesão das misturas, facilitando a sua utilização. O aumento de água nas misturas com cimento reciclado não deverá ter afetado significativamente a quantidade de água efetiva na mistura.

Exceto nas misturas com cimento reciclado mais fino, o teor de vazios tendeu a aumentar com a substituição de CPN por cimento reciclado. Em termos médios o teor de vazios foi semelhante nas misturas com CRB e CRP, variando entre cerca de 1 a 5%.

Em relação ao comportamento das argamassas no estado endurecido foi analisada a sua resistência mecânica à flexão e compressão, bem como o seu módulo de elasticidade dinâmico.

Constatou-se uma redução proporcional da resistência mecânica com a percentagem de substituição de CPN por cimento reciclado, sendo essa diminuição tanto maior quanto menor a temperatura de processamento dos ligantes reciclados. As misturas com cimento reciclado apenas moído, sem serem submetidas a tratamento térmico, apresentaram valores muito modestos de resistência mecânica, resultado da mistura reciclada não apresentar capacidade ligante. De facto, estas misturas deverão funcionar essencialmente apenas por efeito de filer. Face a estas misturas, as argamassas com cimento reciclado previamente sujeitas a aquecimento desenvolveram maiores resistências, o que demonstra que o CRB e o CRP, nestas condições, apresentam também capacidade de hidratação, para além do seu efeito de filer. Por exemplo, o incremento de resistência à compressão face às misturas com cimento reciclado apenas moído foi superior a 140% e a 370% nas argamassas com 100% de substituição de CPN por CRB e CRP, respetivamente.

O cimento reciclado, pré-aquecido a 350°C, foi bastante menos efetivo no incremento da resistência das argamassas do que o cimento reciclado a 650°C. Confirma-se que a quantidade de compostos

hidratáveis nestas misturas não é suficientemente significativa para proporcionar um incremento efetivo na resistência mecânica. Nestas condições, considera-se desadequada a reciclagem do cimento para estes níveis de temperatura.

Dado que o CRB apresenta reduzida percentagem de cimento na sua constituição, a sua incorporação nas argamassas demonstrou ser bastante menos eficiente do que o CRP. De facto, dado que o CRB possui apenas 22% (em massa) de cimento na sua constituição, quando por exemplo se procede à substituição de CPN por 100% de CRB, ocorre um incremento na relação a/c de 0,6 para cerca de 2,7. Neste caso, o teor de cimento torna-se insuficiente para envolver o material inerte da mistura e proporcionar a coesão e resistências necessárias. Por este motivo, percentagens elevadas de substituição tendem a reduzir a eficiência do CRB, indiciando que estes necessitam da presença de um mínimo de CPN para serem mais efetivos. Como tal, verificou-se que o melhor desempenho destes ligantes foi observado para até 50% de taxa de substituição.

Em argamassas com 100% de substituição de CPN por CRB, a resistência à flexão e à compressão atingiram valores bastante modestos, inferiores a 0,3 MPa e 0,9 MPa, respetivamente. Estes valores são significativamente inferiores aos evidenciados pelas argamassas com CPN, que atingem resistências à flexão e à compressão de 6,7 MPa e 42,2 MPa, respetivamente. Nas argamassas com 100% de CRP, apesar dos valores terem sido ainda relativamente modestos, foi possível obter resistências à flexão e à compressão aos 90 dias, de 0,9 MPa e 2,6 MPa, respetivamente. Ou seja, resistências cerca de 3 vezes superiores às obtidas com o CRB. Assim, para misturas de relação a/c superiores a 0,6, obtiveram-se resistências médias superiores às observáveis em qualquer argamassa de cal aérea e na ordem de grandeza de algumas argamassas de cal hidráulica. Ainda assim, estes ligantes apresentam fraca reatividade, resultado da granulometria muito grosseira com que foram produzidos.

De modo a se perceber a influência da dimensão das partículas na reatividade dos ligantes reciclados, foram efetuadas misturas complementares em que se procedeu previamente à moagem extra do CRB e CRP. Nas misturas com CRB, apesar de se terem registado ligeiras melhorias na resistência mecânica, o incremento não foi muito significativo. No entanto, nas misturas com CRP registou-se um incremento importante da resistência mecânica, confirmando-se a importância de se produzirem ligantes com granulometria suficientemente fina para que a sua reatividade se torne elevada.

A moagem extra de CRPF permitiu por exemplo que, face às argamassas com CPN, se atingissem maiores resistências à flexão para 20% de substituição de CRPF. Nas misturas com 100% de substituição de CPN por CRPF foi possível atingir resistências à flexão e à compressão de 2,57 MPa e 8,25 MPa, respetivamente. Estes valores corresponderam, respetivamente, a cerca de 38,5% da resistência à flexão e 20% da resistência à compressão das misturas com apenas CPN. Face às misturas com CRP de granulometria normal, foi possível atingir resistências 4 a 4,5 vezes superiores. Os valores assim obtidos são compatíveis com a produção de argamassas hidráulicas com melhor desempenho do que as argamassas correntes de cal hidráulica.

Ao longo do tempo, por vezes verificou-se uma redução progressiva da diferença entre a resistência na argamassa com CPN e com cimento reciclado (CRB ou CRP). Isso sugere um desenvolvimento da

resistência mais lento nos cimentos reciclados, que deverá estar essencialmente relacionado com o facto destes apresentarem uma granulometria mais grosseira.

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que o processo de pré-aquecimento a 650°C, das misturas recicladas, foi efetivo, tendo-se desenvolvido produtos reidratáveis conforme inicialmente pretendido. O mesmo não se pode concluir do cimento pré-aquecido a 350°C, que manifestou fraca reatividade. O nível de reatividade aumentou consideravelmente com a redução da dimensão média do grão de cimento reciclado, sendo bastante importante atingir granulometrias similares às utilizadas no CPN. De facto, dado que as reações desenvolvem-se na superfície dos grãos, o incremento da área superficial é essencial para a maior reatividade dos ligantes.

Conclui-se também que é importante proceder à separação prévia do agregado e da pasta na produção do cimento reciclado, visto que tendo em conta o elevado teor de agregado usualmente presente no betão, a quantidade de ligante hidratável disponível para a mistura pode-se tornar demasiado escasso, em especial para percentagens de substituição elevadas, superiores a cerca de 50%.

Em geral, os resultados obtidos no ensaio de ultra-sons e módulo de elasticidade dinâmico corroboram a análise de caracterização mecânica. Confirma-se que o aumento da percentagem de substituição de CPN por cimento reciclado conduz à redução destas propriedades, sendo essa redução mais importante no caso de se adotar CRB. Mais uma vez, o tratamento térmico e a moagem extra dos cimentos reciclados contribuíram para o melhoramento do seu desempenho. A substituição de 100% de CPN por CRB ou CRP conduziu a importantes reduções da rigidez das argamassas, superiores a 90%. No entanto, a baixa rigidez destas misturas pode ser benéfica para a utilização destes materiais no revestimento de alvenarias de edifícios antigos.

Mesmo tendo em conta apenas os cimentos reciclados a partir de pasta não sujeitos a moagem extra, foi possível produzir argamassas com resistências comparáveis às de misturas produzidas com cal hidráulica. Estes ligantes hidráulicos evidenciaram ainda reduzida rigidez, podendo constituir soluções interessantes para a reabilitação de edifícios antigos. Quando se procedeu à moagem extra destes cimentos reciclados foi possível atingir resistências superiores às evidenciadas por argamassas correntes de cal hidráulica, evidenciando um grande potencial destas soluções para a indústria da construção, nomeadamente na execução de rebocos e outras aplicações não estruturais. A utilização deste tipo de cimentos reciclados, como material de substituição do CPN, tem também potencial para se tornar uma alternativa credível às adições minerais correntes, principalmente se a sua granulometria for suficientemente fina.

Em geral, foi possível demonstrar que é possível a reciclagem de betão existente, podendo-se produzir misturas ligantes de razoável eficiência e capacidade de reidratação, sem implicar grandes consumos energéticos e a geração significativa de emissões de CO₂ para o ambiente. Atingem-se assim soluções eficientes e de maior sustentabilidade, com impacto ambiental reduzido e características mecânicas aceitáveis. Melhores resultados serão expectáveis caso se consiga uma moagem mais efetiva do cimento reciclado, conforme se pretende averiguar em trabalhos de investigação futuros.

5.3. Desenvolvimentos futuros

Conforme se tornou evidente ao longo deste trabalho, a investigação neste domínio é ainda muito escassa e bastante recente, existindo ainda uma grande necessidade de investigação adicional com exploração de vários temas por abordar ou ainda pouco desenvolvidos. Em seguida são apenas referidos apenas alguns dos tópicos principais em que se justifica o desenvolvimento de futuros trabalhos nesta área do conhecimento:

- Otimização do processo de produção dos cimentos reciclados, nomeadamente no que se refere às etapas de moagem, separação de agregados e temperaturas de calcinação;
- Produção de ligantes reciclados de granulometria semelhante à do cimento Portland e estudo do seu desempenho quando incorporado em materiais cimentícios;
- Caracterização física, mecânica e de durabilidade de argamassas e betões, abrangendo uma gama mais vasta de composições e propriedades;
- Análise do desempenho e viabilidade dos cimentos reciclados quando aplicados em soluções reais;
- Avaliação económica e ambiental da produção de cimentos reciclados, com análise do seu potencial benefício face ao cimento de Portland normal;
- Análise da implementação de sistemas de produção que viabilizem a introdução economicamente e tecnicamente viável do cimento reciclado na construção.

Face aos resultados preliminares obtidos no presente trabalho, e em face de alguns trabalhos já desenvolvidos por outros autores, não existem dúvidas do interesse em se investir num maior esforço de investigação nesta área tão relevante para os objetivos atuais construir de forma mais sustentável.

6. Bibliografia

Baron Jacques et Jean-Pierre OLLIVIER, "*Lés Bétons – Base et données pour leur formulation*", Éditions Eyrolles, troisième tirage, 1999, ISBN 2-212-01316-7.

Canan, Tasdemir, Mehmet A. Tasdemir, Frank D. Lydon, e Ben I. G. Barr. "*Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete.*" *Cement and Concrete Research*, Volume 26, Issue 1, January, 1996: pp 63-68.

Cánovas, M. F. "*Patologia e Terapia do Concreto Armado*". Ed. PINI. São Paulo, 1988.

Cánovas, M.F., "*Hormigón*", Octava Edición, Octubre 2007, ISBN:978 380 0364, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos, España.

Caraslindas, H.; Barros, R.C.– Portugal. "*Degradação das Propriedades Mecânicas do Betão Exposto a Altas Temperaturas*" In: Encontro Nacional de Betão Estrutural. Porto, 2004

Choi D.S. Seo, H.B. - "*Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar*" Halla University, Republic of Korea, 2014.

Choi Heesup, Myungkwan Lim, Hyeonggil Choi, Ryoma Kitagaki, Takafumi Noguchi. "*Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete*" - The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2014.

Chuah S, Pan Z., Sanjayan J., Wang C. and Duan W. "*Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide*". *Construction and building materials*, 73:113-124, 2014.

Coutinho A. de Sousa, "*Fabrico e Propriedades do Betão*", Volume 1, LNEC, 1988.

Gartner E. Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cem Concr Res* 2004.

Kwon Eunhee, Jaecheol Ahn, Bongsuk Cho, Dongcheon Park "*A study on development of recycled cement made from waste cementitious poder*", 2015.

Landi, F. R. "*Ação do incêndio sobre estruturas de concreto armado*". Boletim técnico no 01/86 PCC-EPUSP. São Paulo, 1986.

Lima, R. C. A., KIRCHHOF L. D., CASONATO, C. A e SILVA FILHO, L. C. P. "*Efeito de altas temperaturas no concreto*". In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES, 2004, Porto Alegre.

Lin, Wei-Ming; LIN, T. D.; POWERS-COUCHE, L. J. "*Microstructures of Fire Damaged Concrete*". *ACI Materials Journal*. Vol. 93, N° 3. Technical Paper. ACI – American Concrete Institute. New York, May-June, 1996.

Markéta Chromá, Pavel Rovnaník, Dita Vořechovská, Patrik Bayer, Pavla Rovnaníková – "*Concrete Rehydration after Heating to Temperatures of up to 1200°C*". Brno University of Technology, CZECH REPUBLIC, 2011.

Matesová, D. 2007, '*Effect of exposure time after heating and w/c ratio on residual strength of concrete: pilot studies*', in XIth International Conference on Ecology and New Building Materials and Products, Telč:VUSTAH, Czech Republic

Mehta P.K., P. J. M. Monteiro, "*Concrete - Microstructure, Properties and Materials*", McGraw- Hill, Third Edition, 1996, ISBN 0-07-146289-9.

Mindess, Sidney, J.Francis Young, and David Darwin. "*Concrete*". Second edition. Edited by Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2003.

Morales Gilson, Alessandro Campos, Adriana M. Patriota Faganello – "*A ação do fogo sobre os componentes do concreto*", 2011.

Neville, A. M. "*Properties of concrete*"; Fourth edition, 2002.

Neville, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 1923.

Odler, I. "*Hydration, setting and hardening of Portland cement.*" Lea's chemistry of cement and concrete, London, 1998.

Pino Elisabete Moreira de Oliveira. "*Comportamento de betões leves à accao de temperaturas elevadas*". Msc dissertation in civil engineering, November of 2013.

Pinto Bessa, Augusto Gomes, A. P. Ferreira Pinto, "*Cimento Portland e Adições*", 2013.

Rafat, Siddique. "*Performance characteristics of high-volume class F fly ash concrete.*" Cement and Concrete Research, vol 34, 2004: pp 487-493.

Revuelra Manuel Bustillo. "*Hormigones y Morteros*". Fueyo Editores, Madrid, 2008.

Rosso, T. "*Incêndios e arquitetura*". Apostila. (São Paulo, FAUUSP, 1975)

Sakai. *Contribution of the concrete industry toward sustainable development*. Sustainable Construction Materials and Technologies, Coventry, England. Taylor& Francis Group, London, 2007.

Scrivener, Lothenbach, B., G. Le Saout, E. Gallucci. "Influence of lime-stone on the hydration of Portland cements", 2008.

Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R. & Zhang, R. 2009, '*Cementitious characteristic of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures*', Construction and Building Materials

Shui Zhonghe , Dongxing Xuan, Huiwen Wan, Beibei Cao – "*Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment*" (Wuhan University of Technology, China), 2008.

Sousa e Moreno JR "*Assessment of the influence of the type of aggregates and rehydration on concrete submitted to high temperatures*", 2010.

Sousa e Moreno Jr., A. L. "*Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto*". In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2003.

Stepkowska, E.T., Blanes, J.M., Franco, F., Real, C. & Pérez-Rodríguez, J.L. 2004, 'Phase transformation on heating of an aged cement paste', *Thermochimica Acta* 420, pp. 79–87.

Xinwei Ma, Han Zhaoxiang, and Li Xueying; "*Reactivity of Dehydrated Cement Paste from Waste Concrete Subjected to Heat Treatment*", Harbin Institute of Technology, China, 2010.

Yildiz, Oner, A., S. Akyuz, e R. "An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete." *Cement and Concrete Research*, vol 35, 2005: pp 1165-1171.

EN 1015-11:1999/A1:2006 – "Determinação da resistência à flexão e da resistência à compressão de argamassas".

EN 1015-3:1999/A2:2006 – "Determinação da consistência de argamassas pelo método da mesa de espalhamento".

EN 1015-6:1998/A1:2006 – "Determinação da massa volúmica de argamassas".

EN 1015-11:1999/A1:2006 – "Determinação da resistência à flexão e da resistência à compressão de argamassas".

LNEC E471 – "Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos"

LNEC – E378, "*Betões. Guia para a utilização de ligantes hidráulicos*", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, CDU 691.327:691.5, ISSN 0870-8592.

LNEC E64 (1979) – "Determinação da massa volúmica de um cimento"

NP EN 12350 – Ensaio do betão fresco, 2003.

NP EN 583 – "Ensaio não destrutivo. Ensaio por ultrassons. Parte 1: Princípios gerais".

NP EN 12390 – "*Ensaio no betão endurecido*".

NP 1379, LNEC E 233 – "Análise granulométrica - Método de peneiração"

NP EN 12350-2 – "Ensaio de abaixamento do betão fresco"

NP EN 12390-1 "Ensaio de betão endurecido. parte 1: forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes"

NP 955 – "Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade".

NP EN 1097-2 – "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência á fragmentação".

NP EN 1097-6 – "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água".

NP EN 196-3 – "Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade".

NP EN 583-1 – "Ensaio não destrutivo. Ensaio por ultra-sons".

NP EN 197-1 – “Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”.

NP EN 445 (2008) – “Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Métodos de ensaio.”, Norma portuguesa.

NP EN 933-1 (1997) - Análise granulométrica - Método de peneiração.

NP EN 1097-3 (2002) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Determinação da baridade e do volume de vazios.

Anexos

A1. Ensaio das argamassas no estado fresco

Tabela A1.1 – Resultados dos ensaios das argamassas de CRP e CRPF no estado fresco.

Argamassas de CRP e CRPF

Temperatura [°C]	Argamassas	% cimento reciclado	relação a/l	Estado fresco			
				espalham. (mm)		Mvol. aparente (kg/m ³)	V _{vazios} (m ³)
				EN 1015-3	NP 414		
650	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
650	A20CRP	20	0,60	151,0	160,3	2224,4	0,016
650	A50CRP	50	0,65	152,0	160,7	2148,1	0,026
650	A75CRP	75	0,73	148,0	155,0	2087,6	0,028
650	A100CRP	100	0,81	152,3	150,3	2013,6	0,038
350	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
350	A20CRP	20	0,60	136,7	149,0	2214,6	0,020
350	A50CRP	50	0,65	140,7	147,0	2114,0	0,052
350	A75CRP	75	0,73	129,7	143,7	2029,9	0,080
350	A100CRP	100	0,81	144,3	149,7	1962,3	0,101
20	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
20	A20CRP	20	0,60	186,0	180,7	2204,2	0,025
20	A50CRP	50	0,60	173,7	161,0	2142,3	0,039
20	A75CRP	75	0,60	160,0	163,0	2068,3	0,062
20	A100CRP	100	0,60	152,0	154,3	2058,0	0,057
650	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
650	A20CRPF	20	0,60	165,0	163,3	2232,0	0,012
650	A60CRPF	60	0,60	153,5	156,6	2211,1	0,004
650	A100CRPF	100	0,68	166,0	163,2	2130,6	0,008

Tabela A1.2 – Resultados dos ensaios das argamassas de CRB e CRBF no estado fresco.

Argamassas de CRB e CRBF

Temperatura [°C]	Argamassas	% cimento reciclado	relação a/l	Estado fresco			
				espalham. (mm)		Mvol. aparente (kg/m ³)	V _{vazios} (m ³)
				EN 1015-3	NP 414		
650	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
650	A20CRB	20	0,60	174,3	176,3	2208,2	0,027
650	A50CRB	50	0,60	154,3	156,3	2185,1	0,030
650	A75CRB	75	0,60	156,0	151,7	2168,3	0,031
650	A100CRB	100	0,60	141,0	141,3	2108,0	0,052
350	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
350	A20CRB	20	0,60	177,7	173,0	2221,5	0,021
350	A50CRB	50	0,60	156,7	153,3	2156,7	0,042
350	A75CRB	75	0,60	130,0	144,3	2099,9	0,062
350	A100CRB	100	0,60	142,3	156,0	2059,3	0,074
20	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
20	A20CRB	20	0,60	186,0	180,7	2294,2	0,028
20	A50CRB	50	0,60	173,7	161,0	2212,3	0,049
20	A75CRB	75	0,60	160,0	163,0	2138,3	0,076
20	A100CRB	100	0,60	152,0	154,3	2098,0	0,075
650	AR	0	0,60	176,3	187,7	2232,0	0,021
650	A20CRBF	20	0,60	180,0	172	2229,8	0,017
650	A60CRBF	60	0,60	181,3	162,3	2219,8	0,012
650	A100CRBF	100	0,60	153,3	160,0	2172,5	0,023

A2. Valores médios de resistência mecânica e respectivos coeficientes de variação

Tabela A2.1 – Valores médios de resistência mecânica e respectivos coeficientes de variação para os provetes de argamassas de CRP e CRPF

Argamassas de CRP													
Temp. [°C]	Reciclado [%]	Flexão						Compressão					
		7 dias		28 dias		90 dias		7 dias		28 dias		90 dias	
		μ	CV	μ	CV	μ	CV	μ	CV	μ	CV	μ	CV
650	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
650	20	5,0	7,5	6,2	1,8	6,1	3,7	24,0	3,1	32,9	4,4	34,7	3,7
650	50	3,0	5,1	4,2	6,8	4,1	8,4	13,1	3,1	17,9	0,1	16,9	0,5
650	75	1,2	14,9	1,6	4,5	2,0	2,2	4,5	0,7	5,1	6,4	6,6	2,0
650	100	0,3	6,9	0,6	0,2	0,9	17,9	1,1	5,3	1,9	14,6	2,6	5,8
350	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
350	20	4,5	5,5	5,6	5,9	5,4	0,3	22,1	3,0	31,2	2,1	27,6	0,7
350	50	2,3	4,1	2,7	0,8	2,9	4,0	7,3	1,8	10,3	5,3	10,7	2,4
350	75	0,7	7,1	0,9	3,0	1,0	5,7	2,3	10,4	2,8	6,8	2,8	2,4
350	100	0,2	14,7	0,3	6,6	0,3	1,8	0,6	7,9	0,7	2,7	0,7	1,2
20	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
20	20	4,1	5,8	5,0	1,7	3,2	3,9	18,8	1,2	26,5	1,8	13,0	0,8
20	50	2,1	3,8	2,6	1,4	2,5	3,1	7,7	1,0	10,5	2,4	8,9	0,8
20	75	0,5	4,2	0,8	10,1	-	-	1,7	4,8	2,2	3,5	-	-
20	100	-	-	0,2	2,3	-	-	-	-	0,4	3,7	-	-
650	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
650	20	5,4	10,0	6,8	1,0	7,1	4,4	25,8	0,8	36,7	1,0	40,1	2,7
650	60	2,1	2,7	4,6	5,1	4,5	4,4	8,6	0,9	21,4	2,0	21,9	1,4
650	100	1,2	2,9	2,6	1,3	2,5	2,2	3,4	1,3	8,3	0,9	8,5	2,4

Tabela A2.2 – Valores médios de resistência mecânica e respectivos coeficientes de variação para os provetes de argamassas de CRB e CRBF

Argamassas de CRB													
Temp. °C	% de reciclado	Flexão						Compressão					
		7 dias		28 dias		90 dias		7 dias		28 dias		90 dias	
		μ	CV	μ	CV	μ	CV	μ	CV	μ	CV	μ	CV
650	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
650	20	5,2	7,8	6,0	0,6	6,2	2,8	24,7	4,4	32,8	1,3	33,1	1,1
650	50	3,3	8,7	3,5	1,3	3,4	6,0	10,4	4,3	13,8	7,5	14,0	4,0
650	75	0,8	5,1	1,2	4,8	1,3	12,3	2,7	2,2	4,1	3,4	4,3	5,9
650	100	0,1	12,9	0,3	15,5	0,3	4,2	0,5	12,2	0,7	12,0	0,6	2,3
350	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
350	20	4,8	9,2	5,8	0,8	5,8	0,5	23,3	1,2	30,6	2,1	32,4	1,1
350	50	2,2	6,3	3,0	5,5	3,1	6,3	9,5	1,4	12,5	2,0	13,0	3,7
350	75	0,5	17,6	0,7	10,6	0,7	13,3	1,9	5,2	2,5	9,2	2,2	5,8
350	100	0,1	9,3	0,1	2,8	0,2	3,1	0,3	0,9	0,4	2,1	0,5	3,7
20	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
20	20	4,6	1,5	5,8	2,3	5,7	5,0	20,9	2,2	28,9	2,8	31,5	2,3
20	50	1,6	2,5	2,3	8,5	2,9	1,7	4,5	9,3	7,2	3,2	12,1	3,6
20	75	0,6	4,7	0,8	5,5	1,0	0,4	1,8	3,5	2,6	2,9	2,6	5,3
20	100	-	-	0,2	9,4	0,1	7,8	-	-	0,3	8,3	0,3	2,0
650	0	6,0	1,2	6,7	1,2	6,7	0,5	28,1	1,9	41,9	1,7	42,2	1,6
650	20	5,5	2,9	6,4	4,4	6,8	7,0	25,4	2,0	32,4	1,1	35,8	3,9
650	60	2,2	4,4	3,1	4,9	3,2	4,5	8,4	2,0	11,6	0,8	12,8	1,6
650	100	0,2	7,1	0,3	4,1	0,3	8,4	0,8	7,3	0,9	7,3	0,9	1,4

A3. Resistência mecânica das argamassas de CRB e CRBF

Tabela A3.1 – Resistência mecânica dos provetes de argamassas de CRB e CRBF aos 7 dias

Ensaio aos 7 dias																			
Resistência a flexão										resistência a compressão									
Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]
[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)		[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
1,963	4,59	574,00	2,332	5,46	577,60	2,329	5,45	576,20	5,17	41,63	26,02	574,00	39,36	24,60	577,60	37,42	23,39	576,20	24,67
1,500	3,51	567,10	1,226	2,87	565,90	1,464	3,43	570,10	3,27	16,54	10,34	567,10	17,64	11,03	565,90	15,91	9,94	570,10	10,44
0,327	0,77	555,00	0,361	0,84	566,40	0,322	0,75	558,80	0,79	4,18	2,61	555,00	4,37	2,73	566,40	4,17	2,61	558,80	2,65
0,067	0,16	538,70	0,052	0,12	545,00	0,051	0,12	544,30	0,13	0,69	0,43	538,70	0,86	0,54	545,00	0,93	0,58	544,30	0,52
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
2,213	5,18	584,00	1,790	4,19	579,20	2,167	5,07	581,50	4,81	37,37	23,36	584,00	36,63	22,89	579,20	37,74	23,59	581,50	23,28
0,988	2,31	573,30	0,857	2,01	571,80	0,979	2,29	573,20	2,20	14,95	9,34	573,30	15,28	9,55	571,80	15,48	9,68	573,20	9,52
0,231	0,54	550,00	0,208	0,49	540,50	0,149	0,35	543,90	0,46	3,2	2,00	550,00	3,08	1,93	540,50	2,82	1,76	543,90	1,90
0,047	0,11	528,70	0,038	0,09	533,60	0,040	0,09	530,50	0,10	0,51	0,32	528,70	0,5	0,31	533,60	0,5	0,31	530,50	0,31
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
1,949	4,56	567,20	1,959	4,58	572,40	2,018	4,72	568,50	4,62	33,03	20,64	567,20	32,78	20,49	572,40	34,47	21,54	568,50	20,89
0,652	1,53	561,40	0,692	1,62	557,30	0,664	1,55	558,60	1,57	8,18	5,11	561,40	6,64	4,15	557,30	6,89	4,31	558,60	4,52
0,259	0,61	561,70	0,281	0,66	557,20	0,290	0,68	556,40	0,65	2,8	1,75	561,70	3,05	1,91	557,20	2,93	1,83	556,40	1,83
0,000	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
2,436	5,70	578,90	2,309	5,40	582,70	2,277	5,33	581,50	5,48	39,97	24,98	578,90	41,83	26,14	582,70	40,25	25,16	581,50	25,43
0,972	2,27	570,60	0,881	2,06	571,80	0,965	2,26	572,00	2,20	13,33	8,33	570,60	13,31	8,32	571,80	13,88	8,68	572,00	8,44
0,086	0,20	561,70	0,073	0,17	557,20	0,084	0,20	556,50	0,19	1,25	0,78	561,70	1,34	0,84	557,20	1,12	0,70	556,50	0,77

Tabela A3.2 – Resistência mecânica dos provetes de argamassas de CRB e CRBF aos 28 dias

Ensaio aos 28 dias																			
Resistência a flexão									resistência a compressão										
Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]
[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)		[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,549	5,96	583,60	2,566	6,00	585,50	2,586	6,05	585,10	6,01	52,53	32,83	583,60	51,54	32,21	585,50	53,2	33,25	585,10	32,76
1,527	3,57	574,10	1,505	3,52	573,30	1,479	3,46	578,30	3,52	20,05	12,53	574,10	24,09	15,06	573,30	21,94	13,71	578,30	13,77
0,492	1,15	559,60	0,545	1,28	557,30	0,546	1,28	553,30	1,23	6,86	4,29	559,60	6,37	3,98	557,30	6,41	4,01	553,30	4,09
0,101	0,24	566,90	0,132	0,31	568,70	0,093	0,22	560,50	0,25	0,95	0,59	566,90	1,2	0,75	568,70	1,27	0,79	560,50	0,71
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,472	5,78	583,60	2,521	5,90	576,00	2,491	5,83	577,00	5,84	50,41	31,51	583,60	48,22	30,14	576,00	48,28	30,18	577,00	30,61
1,282	3,00	574,40	1,219	2,85	565,40	1,391	3,25	562,40	3,04	19,42	12,14	574,40	20,32	12,70	565,40	20,22	12,64	562,40	12,49
0,332	0,78	545,70	0,262	0,61	530,90	0,274	0,64	534,60	0,68	3,66	2,29	545,70	3,83	2,39	530,90	3,81	2,38	534,60	2,35
0,043	0,10	538,30	0,046	0,11	539,40	0,045	0,11	532,60	0,10	0,68	0,43	538,30	0,68	0,43	539,40	0,65	0,41	532,60	0,42
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,468	5,78	580,80	2,410	5,64	577,40	2,551	5,97	576,60	5,79	45,46	28,41	580,80	45,36	28,35	577,40	48,13	30,08	576,60	28,95
1,094	2,56	565,90	0,932	2,18	566,30	0,906	2,12	567,60	2,29	12	7,50	565,90	11,14	6,96	566,30	11,32	7,08	567,60	7,18
0,363	0,85	554,40	0,338	0,79	562,30	0,387	0,91	559,70	0,85	4,04	2,53	554,40	4,29	2,68	562,30	4,04	2,53	559,70	2,58
0,086	0,20	474,70	0,072	0,17	476,90	0,070	0,16	476,20	0,18	0,4	0,25	474,70	0,49	0,31	476,90	0,54	0,34	476,20	0,30
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,673	6,25	586,50	2,639	6,18	591,40	2,911	6,81	587,10	6,41	51,01	31,88	586,50	52,11	32,57	591,40	52,33	32,71	587,10	32,39
1,366	3,20	579,60	1,249	2,92	577,10	1,405	3,29	576,60	3,14	18,37	11,48	579,60	18,72	11,70	577,10	18,51	11,57	576,60	11,58
0,118	0,28	559,20	0,107	0,25	560,20	0,115	0,27	559,50	0,27	1,59	0,99	559,20	1,39	0,87	560,20	1,35	0,84	559,50	0,90

Tabela A3.3 – Resistência mecânica dos provetes de argamassas de CRB e CRBF aos 90 dias

Ensaio aos 90 dias																			
Resistência a flexão									resistência a compressão										
Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]
[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)		[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
2,528	5,92	584,85	2,670	6,25	583,75	2,695	6,31	580,20	6,16	53,66	33,54	584,85	53,11	33,19	583,75	52,23	32,64	580,20	33,13
1,499	3,51	568,95	1,352	3,16	565,15	1,562	3,66	565,60	3,44	21,87	13,67	568,95	21,71	13,57	565,15	23,71	14,82	565,60	14,02
0,479	1,12	579,70	0,649	1,52	581,10	0,594	1,39	571,50	1,34	6,31	3,94	579,70	7,27	4,54	581,10	6,97	4,36	571,50	4,28
0,111	0,26	543,35	0,123	0,29	539,50	0,116	0,27	543,85	0,27	0,94	0,59	543,35	0,93	0,58	539,50	0,98	0,61	543,85	0,59
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
2,463	5,76	587,20	2,458	5,75	584,50	2,485	5,81	584,80	5,78	51,1	31,94	587,20	52,46	32,79	584,50	52,11	32,57	584,80	32,43
1,288	3,01	570,00	1,228	2,87	570,50	1,425	3,33	571,30	3,07	19,75	12,34	570,00	21,61	13,51	570,50	20,83	13,02	571,30	12,96
0,272	0,64	543,30	0,300	0,70	546,60	0,333	0,78	545,10	0,71	3,58	2,24	543,30	3,89	2,43	546,60	3,66	2,29	545,10	2,32
0,082	0,19	538,60	0,088	0,21	537,70	0,087	0,20	537,70	0,20	0,8	0,50	538,60	0,87	0,54	537,70	0,81	0,51	537,70	0,52
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
2,251	5,27	570,60	2,469	5,78	574,80	2,530	5,92	579,20	5,66	49,22	30,76	570,60	52,01	32,51	574,80	50,17	31,36	579,20	31,54
1,239	2,90	556,10	1,273	2,98	564,20	1,222	2,86	565,00	2,91	19,78	12,36	556,10	19,83	12,39	564,20	18,35	11,47	565,00	12,08
0,427	1,00	536,50	0,426	1,00	544,60	0,430	1,01	540,20	1,00	3,85	2,41	536,50	4,38	2,74	544,60	4,1	2,56	540,20	2,57
0,055	0,13	475,40	0,066	0,15	480,00	0,058	0,14	477,70	0,14	0,42	0,26	475,40	0,4	0,25	480,00	0,41	0,26	477,70	0,26
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
2,743	6,42	588,00	3,180	7,44	584,00	2,763	6,47	582,00	6,78	55,52	34,70	588,00	60,43	37,77	584,00	55,99	34,99	582,00	35,82
1,342	3,14	569,00	1,464	3,43	569,00	1,327	3,11	566,00	3,22	20,12	12,58	569,00	20,54	12,84	569,00	20,91	13,07	566,00	12,83
0,147	0,34	547,00	0,128	0,30	550,00	0,157	0,37	548,00	0,34	1,46	0,91	547,00	1,44	0,90	550,00	1,49	0,93	548,00	0,91

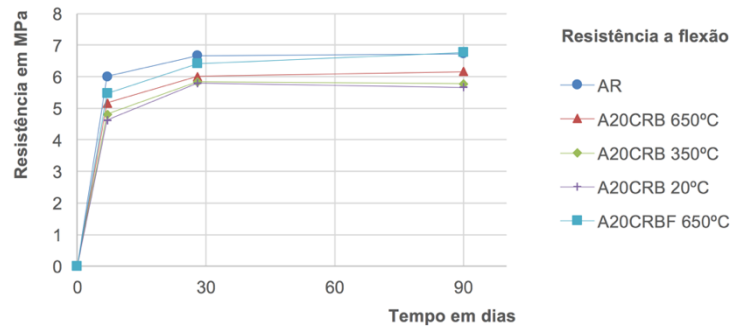


Figura A3.1 – Variação da resistência mecânica à flexão para argamassas com 20% de CRB

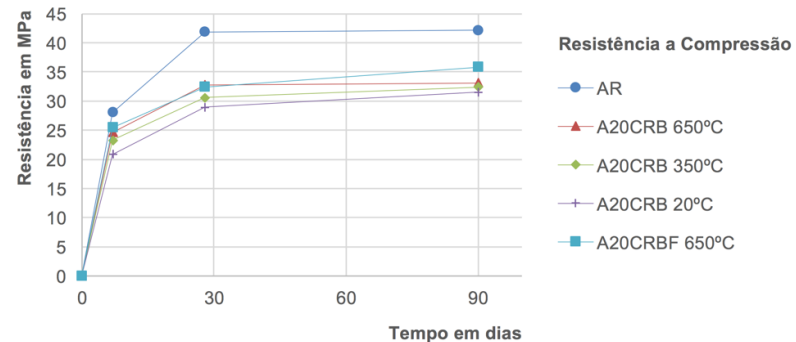


Figura A3.2 – Variação da resistência mecânica à compressão para argamassas com 20% de CRB

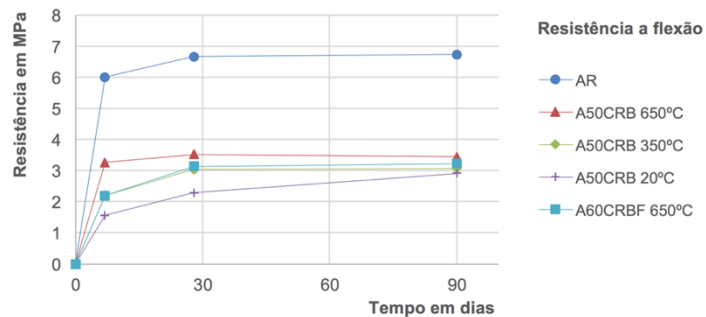


Figura A3.3 – Variação da resistência mecânica à flexão para argamassas com 50% de ligante reciclado

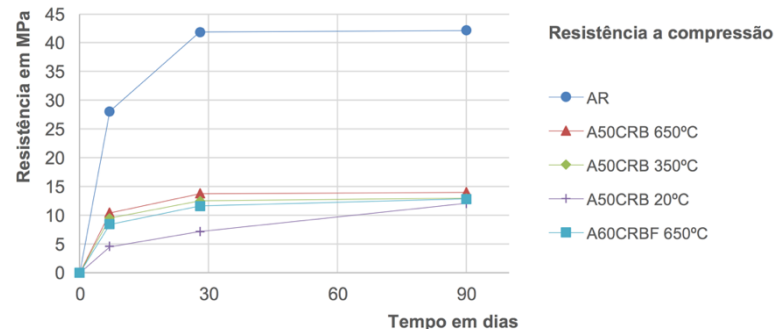


Figura A3.4 – Variação da resistência mecânica à compressão para argamassas com 50% de ligante reciclado

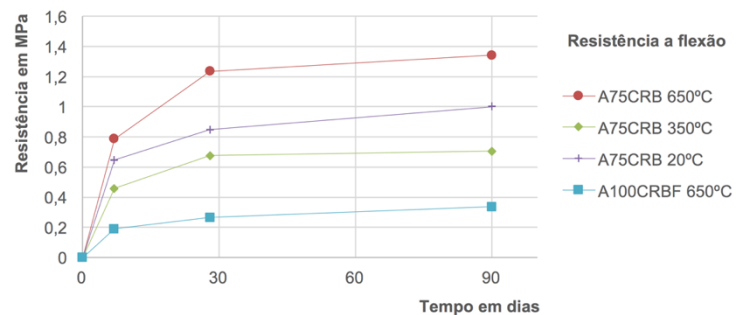


Figura A3.5 – Variação da resistência mecânica à flexão para argamassas com 75% ligante reciclado

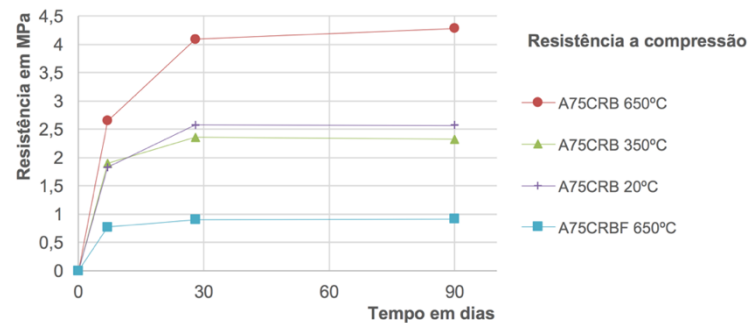


Figura A3.6 – Variação da resistência mecânica à compressão para argamassas com 75% de ligante reciclado

A4. Resistência mecânica das argamassas de CRP e CRPF

Tabela A4.1 – Resistência mecânica dos provetes de argamassas de CRP e CRPF aos 7 dias

Ensaio aos 7 dias																			
Resistência a flexão										resistência a compressão									
Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]
[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)		[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
1,923	4,50	579,00	2,293	5,37	578,80	2,223	5,20	577,70	5,02	38,51	24,07	579,00	39,7	24,81	578,80	36,82	23,01	577,70	23,96
1,336	3,13	562,20	1,192	2,79	562,90	1,327	3,11	561,40	3,01	20,18	12,61	562,20	20,94	13,09	562,90	21,79	13,62	561,40	13,11
0,622	1,46	532,30	0,507	1,19	533,10	0,433	1,01	537,40	1,22	7,26	4,54	532,30	7,18	4,49	533,10	7,3	4,56	537,40	4,53
0,107	0,25	527,80	0,116	0,27	528,60	0,098	0,23	521,60	0,25	1,68	1,05	527,80	1,9	1,19	528,60	1,86	1,16	521,60	1,13
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
1,829	4,28	579,90	1,902	4,45	576,50	2,083	4,87	573,90	4,53	36,53	22,83	579,90	35,72	22,33	576,50	33,97	21,23	573,90	22,13
0,954	2,23	554,50	1,035	2,42	556,30	0,946	2,21	553,30	2,29	12,02	7,51	554,50	11,51	7,19	556,30	11,69	7,31	553,30	7,34
0,306	0,72	526,50	0,257	0,60	531,90	0,286	0,67	531,50	0,66	3,74	2,34	526,50	3,12	1,95	531,90	4,02	2,51	531,50	2,27
0,079	0,18	518,50	0,070	0,16	524,60	0,099	0,23	519,10	0,19	0,84	0,53	518,50	1,02	0,64	524,60	0,92	0,58	519,10	0,58
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
1,704	3,99	575,75	1,878	4,39	572,55	1,639	3,84	575,40	4,07	30,57	19,11	575,75	30,01	18,76	572,55	29,67	18,54	575,40	18,80
0,880	2,06	553,70	0,924	2,16	548,10	0,842	1,97	556,10	2,06	12,36	7,73	553,70	12,49	7,81	548,10	12,18	7,61	556,10	7,71
0,238	0,56	533,35	0,215	0,50	529,85	0,223	0,52	535,95	0,53	2,6	1,63	533,35	2,66	1,66	529,85	2,9	1,81	535,95	1,70
0,000	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
2,573	6,02	584,40	2,601	6,09	587,10	2,524	5,91	586,60	6,00	44,32	27,70	584,40	46,15	28,84	587,10	44,37	27,73	586,60	28,09
1,988	4,65	573,90	2,543	5,95	574,70	2,334	5,46	575,00	5,35	41,53	25,96	573,90	40,86	25,54	574,70	41,65	26,03	575,00	25,84
0,913	2,14	564,80	0,936	2,19	564,70	0,877	2,05	562,90	2,13	13,89	8,68	564,80	13,62	8,51	564,70	13,64	8,53	562,90	8,57
0,480	1,12	536,90	0,515	1,21	538,20	0,492	1,15	538,20	1,16	5,56	3,48	536,90	5,4	3,38	538,20	5,42	3,39	538,20	3,41

Tabela A4.2 – Resistência mecânica dos provetes de argamassas de CRP e CRPF aos 28 dias

Ensaio aos 28 dias																			
Resistência a flexão									resistência a compressão										
Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]
[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)		[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,714	6,35	575,50	2,601	6,09	576,00	2,626	6,14	580,00	6,19	49,78	31,11	575,50	55,47	34,67	576,00	52,82	33,01	580,00	32,93
1,827	4,28	563,50	1,927	4,51	566,90	1,634	3,82	565,80	4,20	28,62	17,89	563,50	28,58	17,86	566,90	28,65	17,91	565,80	17,89
0,726	1,70	544,70	0,713	1,67	549,30	0,654	1,53	552,80	1,63	8,67	5,42	544,70	8,42	5,26	549,30	7,45	4,66	552,80	5,11
0,244	0,57	539,40	0,244	0,57	539,80	0,243	0,57	536,70	0,57	2,78	1,74	539,40	2,81	1,76	539,80	3,76	2,35	536,70	1,95
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,418	5,66	576,40	2,568	6,01	579,10	2,223	5,20	583,10	5,62	48,48	30,30	576,40	50,15	31,34	579,10	51	31,88	583,10	31,17
1,147	2,68	551,80	1,161	2,72	548,90	1,170	2,74	546,10	2,71	16,96	10,60	551,80	15,26	9,54	548,90	17,26	10,79	546,10	10,31
0,402	0,94	526,40	0,384	0,90	520,60	0,413	0,97	523,90	0,94	4,38	2,74	526,40	4,2	2,63	520,60	4,92	3,08	523,90	2,81
0,113	0,26	516,70	0,130	0,30	517,20	0,131	0,31	520,40	0,29	1,2	0,75	516,70	1,13	0,71	517,20	1,14	0,71	520,40	0,72
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,110	4,94	582,40	2,151	5,03	580,70	2,200	5,15	585,20	5,04	42,37	26,48	582,40	41,43	25,89	580,70	43,3	27,06	585,20	26,48
1,139	2,67	561,00	1,107	2,59	558,20	1,141	2,67	557,90	2,64	16,4	10,25	561,00	16,79	10,49	558,20	17,4	10,88	557,90	10,54
0,330	0,77	531,50	0,294	0,69	530,00	0,376	0,88	533,90	0,78	3,64	2,28	531,50	3,4	2,13	530,00	3,68	2,30	533,90	2,23
0,102	0,24	454,60	0,105	0,25	453,30	0,108	0,25	456,30	0,25	0,69	0,43	454,60	0,66	0,41	453,30	0,63	0,39	456,30	0,41
2,814	6,58	589,20	2,837	6,64	584,20	2,895	6,77	587,50	6,67	67,78	42,36	589,20	67,91	42,44	584,20	65,38	40,86	587,50	41,89
2,949	6,90	584,75	2,907	6,80	586,80	2,875	6,73	590,40	6,81	59,49	37,18	584,75	58,33	36,46	586,80	58,16	36,35	590,40	36,66
2,001	4,68	574,35	2,031	4,75	573,45	1,807	4,23	574,50	4,55	33,95	21,22	574,35	35,15	21,97	573,45	33,51	20,94	574,50	21,38
1,096	2,56	555,10	1,116	2,61	547,95	1,081	2,53	546,30	2,57	13,36	8,35	555,10	13,17	8,23	547,95	13,07	8,17	546,30	8,25

Tabela A4.3 – Resistência mecânica dos provetes de argamassas de CRP e CRPF aos 90 dias

Ensaio aos 90 dias																			
Resistência a flexão									resistência a compressão										
Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]	Provete 1			Provete 2			Provete 3			[MPa]
[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)		[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	[kN]	[MPa]	Massa (gr)	
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
2,696	6,31	571,50	2,476	5,79	571,90	2,654	6,21	575,60	6,10	54,34	33,96	571,50	53,67	33,54	571,90	58,37	36,48	575,60	34,66
1,566	3,66	561,20	1,766	4,13	563,80	1,925	4,50	561,70	4,10	26,94	16,84	561,20	27,27	17,04	563,80	27	16,88	561,70	16,92
0,843	1,97	539,00	0,887	2,08	539,10	0,855	2,00	539,20	2,02	10,39	6,49	539,00	10,48	6,55	539,10	10,87	6,79	539,20	6,61
0,287	0,67	524,10	0,448	1,05	524,30	0,367	0,86	524,50	0,86	3,88	2,43	524,10	4,07	2,54	524,30	4,46	2,79	524,50	2,59
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
2,327	5,45	573,30	2,310	5,41	570,70	2,310	5,41	571,00	5,42	44,24	27,65	573,30	44,39	27,74	570,70	43,66	27,29	571,00	27,56
1,217	2,85	553,80	1,326	3,10	551,80	1,224	2,86	548,80	2,94	17,05	10,66	553,80	17,55	10,97	551,80	16,54	10,34	548,80	10,65
0,477	1,12	527,80	0,445	1,04	523,40	0,415	0,97	526,30	1,04	4,57	2,86	527,80	4,31	2,69	523,40	4,46	2,79	526,30	2,78
0,140	0,33	509,40	0,146	0,34	516,80	0,145	0,34	509,40	0,34	1,05	0,66	509,40	1,08	0,68	516,80	1,06	0,66	509,40	0,66
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
1,297	3,03	558,50	1,422	3,33	558,60	1,390	3,25	557,30	3,21	20,84	13,03	558,50	21,08	13,18	558,60	20,69	12,93	557,30	13,04
1,057	2,47	540,60	1,028	2,41	539,20	1,109	2,60	544,70	2,49	14,13	8,83	540,60	14,37	8,98	539,20	14,14	8,84	544,70	8,88
0,318	0,74	537,00	0,313	0,73	539,10	0,337	0,79	534,30	0,76	2,93	1,83	537,00	1,70	1,06	539,10	3,10	1,94	534,30	1,61
0,141	0,33	439,90	0,131	0,31	442,50	0,149	0,35	440,90	0,33	1,05	0,66	439,90	1,04	0,65	442,50	1,08	0,68	440,90	0,66
2,892	6,77	586,35	2,860	6,69	585,00	2,879	6,74	588,00	6,73	66,7	41,69	586,35	68,97	43,11	585,00	66,66	41,66	588,00	42,15
3,172	7,42	586,00	2,859	6,69	585,00	3,096	7,24	582,00	7,12	66,41	41,51	586,00	62,27	38,92	585,00	63,67	39,79	582,00	40,07
1,868	4,37	571,00	1,841	4,31	574,00	2,030	4,75	569,00	4,48	35,51	22,19	571,00	34,32	21,45	574,00	35,09	21,93	569,00	21,86
1,112	2,60	555,20	1,055	2,47	552,00	1,098	2,57	562,00	2,55	13,52	8,45	555,20	13,22	8,26	552,00	14,0	8,75	562,00	8,49

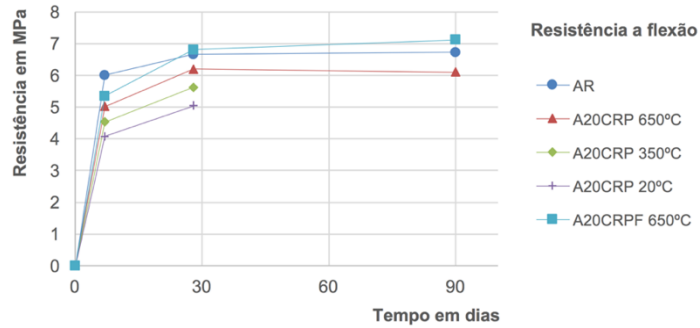


Figura A4.1 – Variação da resistência mecânica à flexão para argamassas com 20% de CRB

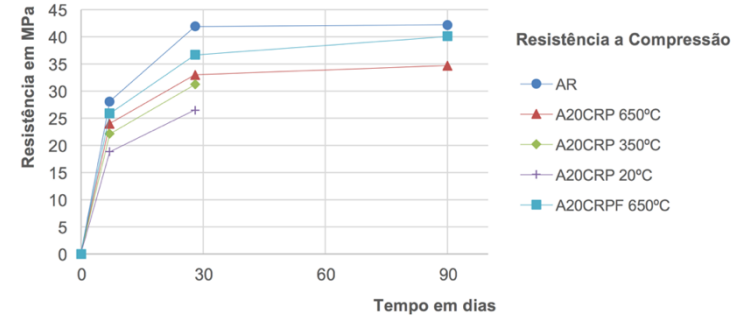


Figura A4.2 – Variação da resistência mecânica à compressão para argamassas com 20% de CRB

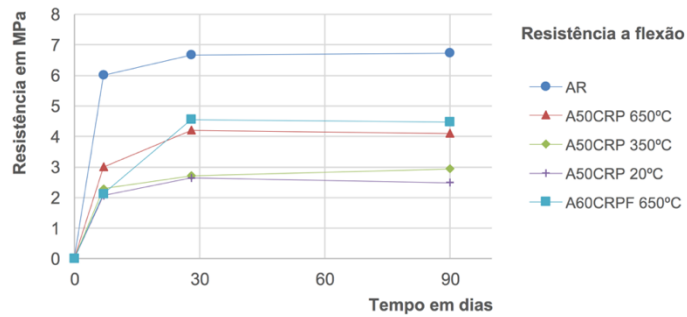


Figura A4.3 – Variação da resistência mecânica à flexão para argamassas com 50% de ligante reciclado

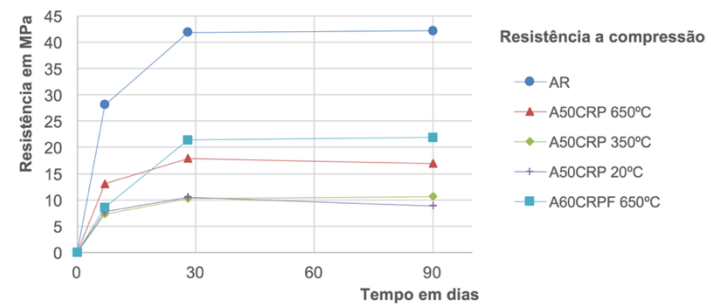


Figura A4.4 – Variação da resistência mecânica à compressão para argamassas com 50% de ligante reciclado

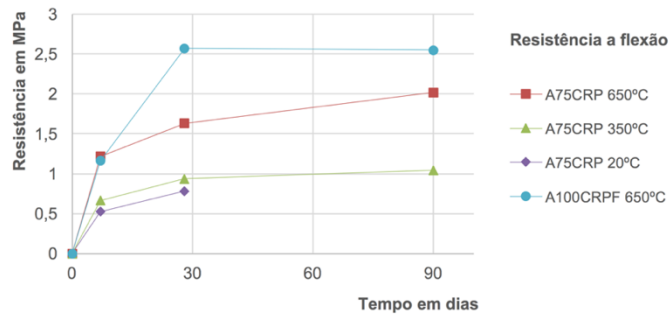


Figura A4.5 – Variação da resistência mecânica à flexão para argamassas com 75% ligante reciclado

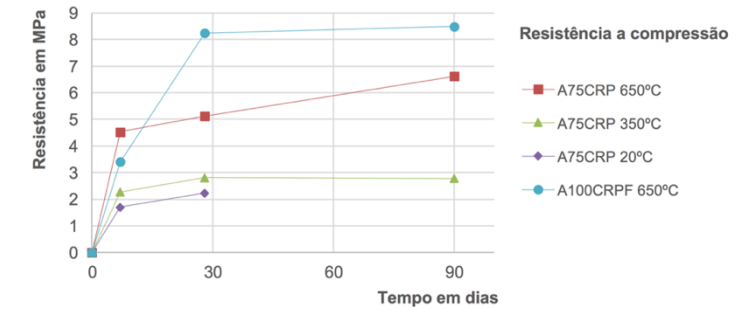


Figura A4.6 – Variação da resistência mecânica à compressão para argamassas com 75% de ligante reciclado

A5. Ensaio dos ultra-sons e módulo de elasticidade dinâmico

Tabela A5.1 – Resultado dos ensaios dos ultra-sons e módulo de elasticidade dinâmico para dos provetes de argamassa de CRB e CRBF

Argamassas de cimento reciclado de origem na pasta (CRB e CRBF)										
Temperatura °C	Argamassas	7 dias			28 dias			90 dias		
		Ultrassons (m/s)	Densidade (kg/m ³)	Modulo Elast. Dim(Gpa)	Ultrassons (m/s)	Densidade (kg/m ³)	Modulo Elast. Dim(Gpa)	Ultrassons (m/s)	Densidade (kg/m ³)	Modulo Elast. Dim(Gpa)
650	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
650	A20CRB	3855,4	2242,19	29,12	4155,8	2284,1	34,87	4188,5	2277,07	35,16
650	A50CRB	3478,3	2215,23	24,57	3712,3	2243,09	25,32	3782,5	2213,16	26,43
650	A75CRB	2560,0	2167,97	7,36	3065,1	2174,73	14,01	3143,4	2255,59	16,91
650	A100CRB	1422,2	2104,3	1,42	1927,7	2208,48	4,01	1882,4	2118,09	3,63
350	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
350	A20CRB	3855,4	2271,88	30,73	4210,5	2261,21	34,78	4199,5	2287,11	34,78
350	A50CRB	3470,7	2237,5	21,0	3653,0	2216,41	24,47	3712,3	2228,91	26,51
350	A75CRB	2560,0	2128,13	6,71	2698,1	2097,93	10,76	2614,4	2128,91	9,8
350	A100CRB	1006,3	2074,22	1,16	1333,3	2096,76	1,17	1562,5	2101,56	2,26
20	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
20	A20CRB	3921,6	2224,22	27,25	4123,7	2258,87	32,17	4278,1	2245,59	34,15
20	A50CRB	3180,9	2183,98	15,76	3411,5	2213,28	21,38	3686,6	2194,41	23,48
20	A75CRB	2450,2	2181,25	8,45	2768,2	2182,81	10,9	2680,1	2111,05	10,75
20	A100CRB	0,00	0,00	0,00	1254,9	1859,1	2,08	1100,4	1866,02	2,03
650	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
650	A20CRBF	3960,4	2269,65	32,08	4232,8	2298,16	34,95	4359,7	2283,87	37,83
650	A60CRBF	3555,6	2232,3	20,05	3782,5	2256,91	24,15	3836,9	2218,75	26,5
650	A100CRBF	2012,6	2181,52	3,21	2077,9	2186,05	4,1	2292,3	2141,91	5,22

Tabela A5.2 – Resultado dos ensaios dos ultra-sons e módulo de elasticidade dinâmico para dos provetes de argamassa de CRP e CRPF

Argamassas de cimento reciclado de origem na pasta (CRP e CRPF)										
Temperatura °C	Argamassas	7 dias			28 dias			90 dias		
		Ultrassons (m/s)	Densidade (kg/m3)	Modulo Elast. Dim(Gpa)	Ultrassons (m/s)	Densidade (kg/m3)	Modulo Elast. Dim(Gpa)	Ultrassons (m/s)	Densidade (kg/m3)	Modulo Elast. Dim(Gpa)
650	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
650	A20CRP	3921,6	2259,77	28,99	4050,6	2254,57	33,13	4210,5	2238,28	33,4
650	A50CRP	3579,4	2196,09	22,65	3686,6	2208,59	27,06	3827,8	2196,21	25,67
650	A75CRP	2963,0	2087,11	12,67	3100,8	2144,26	16,08	3361,3	2105,86	18,54
650	A100CRP	1867,0	2054,69	3,65	2259,9	2104,02	7,03	2735,0	2048,05	9,76
350	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
350	A20CRP	3883,5	2253,01	27,95	4123,7	2263,79	31,37	4092,1	2233,09	31,93
350	A50CRP	3368,4	2166,8	17,13	3603,6	2144,26	21,41	3571,4	2154,18	21,41
350	A75CRP	2635,9	2070,2	9,08	2711,9	2045,43	11,26	2841,9	2054,02	11,59
350	A100CRP	1777,8	2034,1	2,00	1841,2	2023,83	2,98	1864,8	1999,49	3,83
20	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
20	A20CRP	3809,5	2244,53	26,81	4030,2	2276,45	30,67	3686,6	2180,2	24,83
20	A50CRP	3174,6	2158,59	17,59	3463,2	2183,71	19,91	3368,4	2115,23	18,07
20	A75CRP	2259,9	2082,23	6,57	2623,0	2077,34	8,98	2527,6	2096,88	8,62
20	A100CRP	0,0	0	0	1386,5	1776,29	2,52	1397,4	1723,05	2,6
650	AR	3940,9	2282,81	31,13	4266,7	2292,97	35,54	4407,7	2290,82	37,67
650	A20CRPF	4102,6	2244,26	30,36	4312,7	2294,22	35,69	4371,6	2282,54	36,58
650	A60CRPF	3326,4	2203,63	18,07	3874,1	2242,58	27,83	3791,5	2231,76	27,58
650	A100CRPF	2680,1	2100,66	9,67	3238,9	2147,58	17,25	3245,4	2173,44	17,19

A6. DRX aos diferentes ligantes reciclados

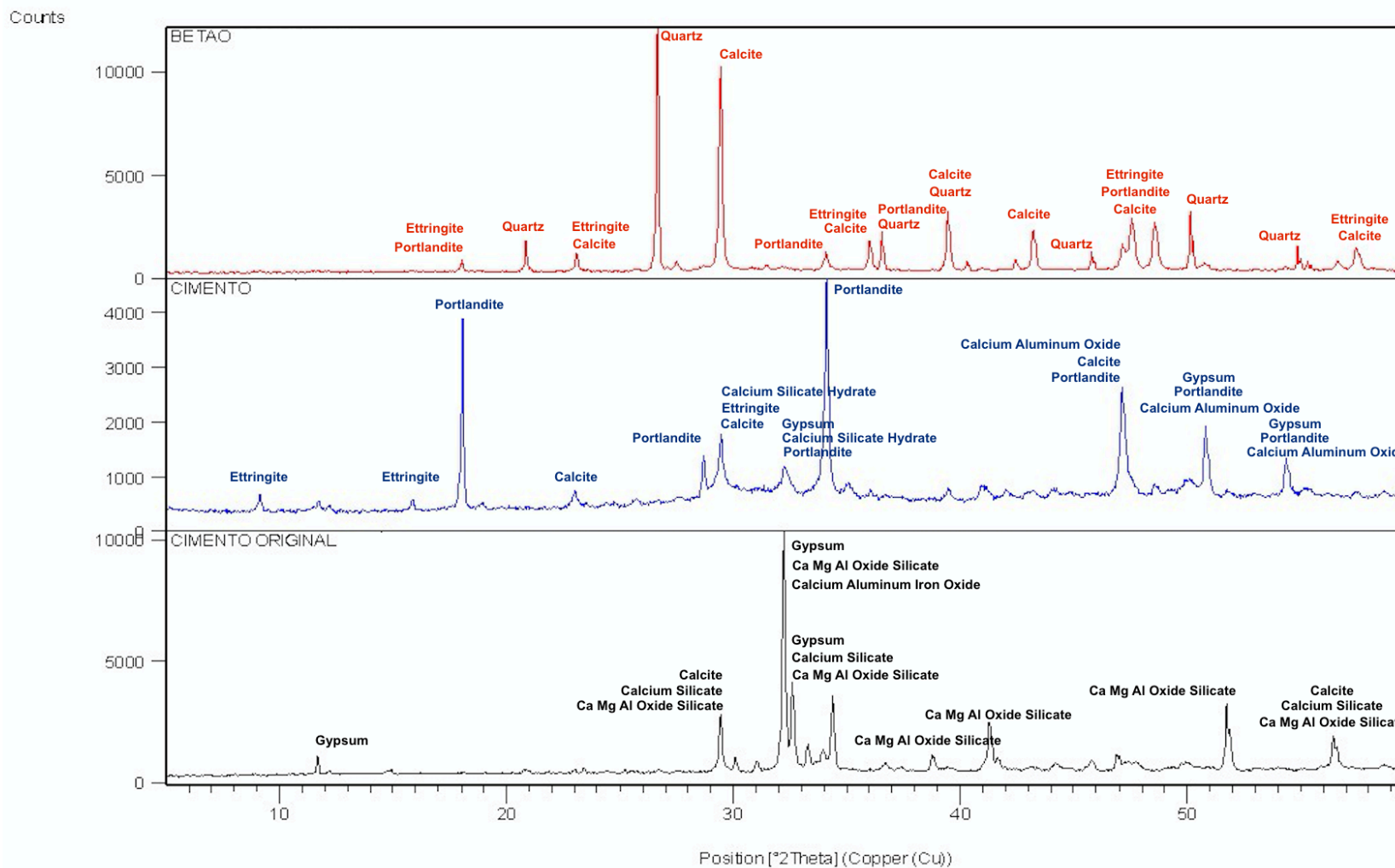


Figura A6.1 – Resultado da difração dos raios x ao CPN, CRP e CRB antes da calcinação

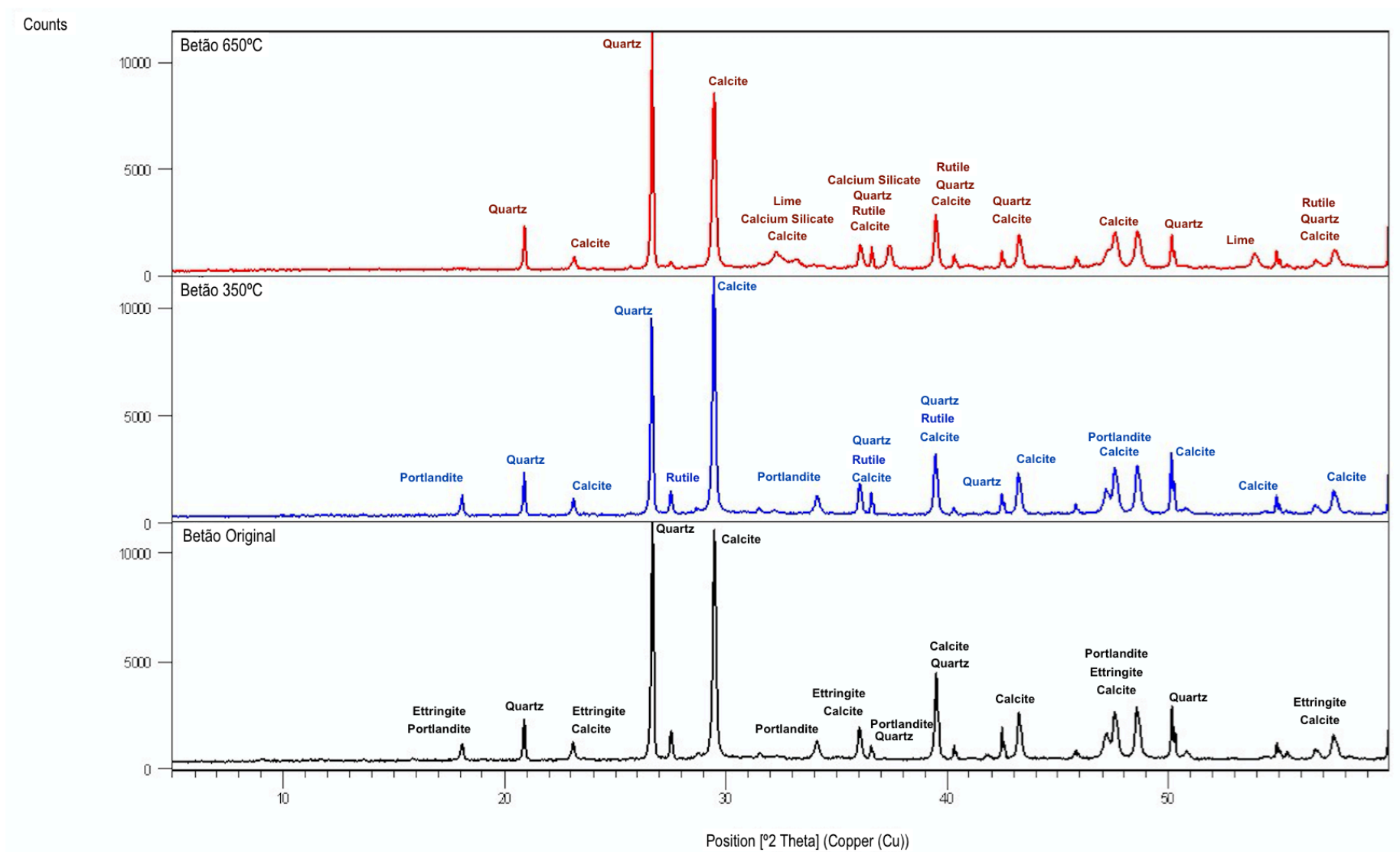


Figura A6.2 – Resultado da difração dos raios x ao CRB antes e após a calcinação

Counts

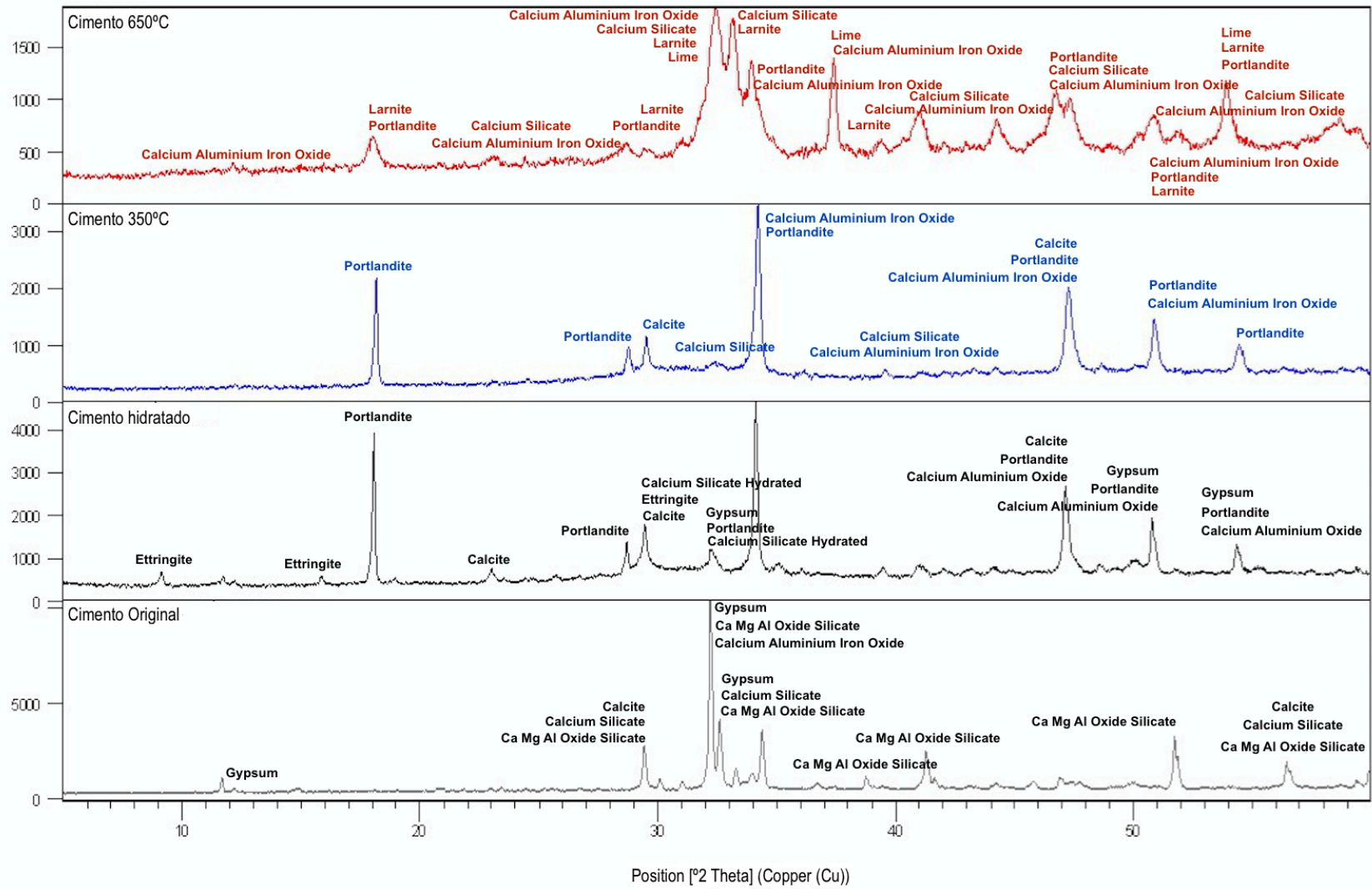


Figura A6.3 – Resultado da difração dos raios x ao CRP antes e após a calcinação