



Instituto Politécnico de Coimbra  
Escola Superior Agrária de Coimbra

# **Economia Circular na Indústria Cerâmica**

Proposta de classificação do resíduo “caco cozido”  
como subproduto

Relatório de Estágio Profissionalizante

Mestrado em Gestão Ambiental

Ana Filipa Batista Seabra Simões

Aluno nº 21427008

Coimbra

2017



Instituto Politécnico de Coimbra  
Escola Superior Agrária de Coimbra

# **Economia Circular na Indústria Cerâmica**

## Proposta de classificação do resíduo “caco cozido” como subproduto

Relatório de Estágio Profissionalizante

Mestrado em Gestão Ambiental

Entidade de Acolhimento:

CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro

Orientadora externa:

Eng.<sup>a</sup> Marisa Almeida

Orientadora interna:

Prof.<sup>a</sup> Daniela Santos

Ana Filipa Batista Seabra Simões

Aluno n.º 21427008

Coimbra

2017

## **Agradecimentos**

Gostaria de dedicar este breve texto a todos aqueles que me ajudaram e acompanharam durante este percurso.

Agradeço à Eng.<sup>a</sup> Marisa Almeida e à Prof.<sup>a</sup> Daniela Santos que me disponibilizaram todos os meios necessários à realização deste estágio e por me facilitarem e explicitarem a metodologia de trabalho, além de me transmitirem conhecimentos essenciais.

Agradeço também ao Eng.<sup>o</sup> Pedro Frade e Anabela Amado pela amizade e enorme ajuda prestadas durante o estágio.

À minha família, especialmente, aos meus pais, irmão e padrinhos, que me apoiaram sempre nesta fase importante da minha vida e do meu percurso académico.

Aos meus amigos mais próximos, com quem partilhei momentos e histórias do tempo de estágio, agradeço o apoio, compreensão e dedicação.

## **Resumo**

O modelo económico da atualidade exerce grande pressão nos recursos naturais do planeta, sendo indispensável a aplicação de uma metodologia mais sustentável. A quantidade de resíduos produzidos atualmente pelas indústrias cerâmicas poderá ser uma oportunidade para tal, não só reaproveitando materiais que são considerados desperdício, e correntemente depositados em aterro, como também para produzir diferentes tipos de produtos tecnicamente viáveis e com desempenho melhorado.

O presente relatório tem como principal objetivo a classificação do resíduo caco cerâmico cozido como subproduto, com o intuito de reduzir o consumo de matérias-primas naturais e promover um destino final mais sustentável através de simbioses industriais de valorização de recursos. Deste modo, é possível desenvolver soluções adequadas do ponto de vista técnico, ambiental e económico.

Neste sentido, foi realizada a caracterização do caco cozido proveniente dos diversos sectores da indústria cerâmica, através de ensaios de lixiviação, para se aferir a sua natureza inerte. De seguida, foi realizado um estudo do estado da arte de potenciais destinos do caco cozido, com o intuito de investigar a viabilidade da sua incorporação no fabrico de diferentes tipos de materiais.

O trabalho desenvolvido permitiu justificar o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 para classificação do caco cozido como subproduto.

**Palavras-chave:** economia circular, indústria cerâmica, caco cozido, resíduos cerâmicos, subproduto.

## **Abstract**

The current linear production model puts a lot of pressure on the reserves of natural resources, being crucial the application of a more sustainable method. The amount of waste currently produced by ceramic industries might be an opportunity, not only for the reuse of materials considered waste and frequently landfilled, but also for the production of different products technically reliable and with an improved behavior.

The main goal of the present report is to classify the ceramic waste, which occurs during production, as a byproduct. Thus, decreasing the natural raw materials consumption and promoting a more sustainable destination, through industrial symbioses and resource valorization. With this method, it is possible to develop solutions that are technically feasible, environmentally and economically viable.

In this sense, the characterization of different types of ceramic waste was carried out through leaching tests to verify its inert nature. Subsequently, a state of the art study about the potential destinations of ceramic waste was developed, in order to test the viability of its incorporation in the production of different types of materials.

The developed study allowed us to meet the criteria established by Decree-Law n°. 73/2011 to classify the ceramic waste as a byproduct.

**Key Words:** circular economy, ceramic industry, ceramic waste, byproduct.

# Índice Geral

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice Geral</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>ix</b>
<b>Abreviaturas</b> .....	<b>x</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1. Enquadramento Geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2. Objetivos</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3. Estrutura e Conteúdo</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1. A Economia Circular</b> .....	<b>14</b>
2.1.1. Evolução da economia linear a circular.....	14
2.1.2. Benefícios da economia circular.....	17
2.1.3. Desafios em “fechar o ciclo”.....	19
2.1.4. Política de apoio à transição.....	22
2.1.5. Estratégias da economia circular.....	23
<b>2.2. A Indústria Cerâmica</b> .....	<b>25</b>
2.2.1. Caracterização geral do sector.....	25
2.2.2. Descrição geral do processo de produção.....	27
2.2.3. Aspetos ambientais do sector.....	29
2.2.4. Tipologia de resíduos na cerâmica.....	30
<b>3. Enquadramento do objetivo de estudo</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1. Caracterização do caco cerâmico cozido</b> .....	<b>34</b>

<b>3.2. Potenciais destinos do caco cerâmico cozido.....</b>	<b>41</b>
3.2.1. Reutilização no processo produtivo.....	42
3.2.2. Indústria da Construção Civil .....	43
3.2.2.1. <i>Cimento</i> .....	43
3.2.2.2. <i>Argamassas</i> .....	45
3.2.2.3. <i>Betão</i> .....	48
3.2.2.4. <i>Pavimentos betuminosos</i> .....	52
3.2.2.5. <i>Agregados</i> .....	53
3.2.3. Solos artificiais .....	55
<b>3.3. Exemplos de aplicação .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4. Classificação de resíduo para subproduto .....</b>	<b>60</b>
3.4.1. O caso de estudo.....	62
3.4.1.1. <i>Justificação do cumprimento dos requisitos</i> .....	62
<b>4. Conclusão.....</b>	<b>65</b>
4.1. Síntese global e objetivos propostos .....	65
4.2. Proposta de trabalhos futuros .....	67
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>68</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> – Exemplo de sequência típica da Economia Linear (ISWA 1, 2015).....	14
<b>Figura 2</b> - Consequências da Economia Linear em cada etapa da cadeia de valor (adaptado de ISWA 6, 2015). .....	15
<b>Figura 3</b> – Exemplo de sequência típica da Economia Circular (República Portuguesa, 2017). .....	16
<b>Figura 4</b> - Benefícios da transição para uma Economia Circular.....	17
<b>Figura 5</b> - Economia Circular com fluxos adicionais referentes à entrada e saída de materiais (adaptado de ISWA 2, 2015).....	21
<b>Figura 6</b> - Subsectores da Indústria Cerâmica (adaptado de Almeida, 2004).....	26
<b>Figura 7</b> - Distribuição percentual do volume de negócios pelos subsectores da indústria cerâmica, em 2014 (INE, 2014).....	27
<b>Figura 8</b> - Fluxograma genérico do processo de fabrico do produto cerâmico (adaptado de CE, 2006).....	28
<b>Figura 9</b> - Distribuição percentual dos resíduos diretamente resultantes do processo de fabricos de produtos cerâmicos (Andrade, 2004). .....	32
<b>Figura 10</b> - Árvore de decisão para a distinção entre resíduos e subprodutos (adaptado de COM (2007) 59).....	61

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Exemplos de produtos cerâmicos com interesse do ponto de vista do ecodesign (adaptado de InEDIC, 2011). .....	24
<b>Tabela 2</b> – Produtos produzidos por subsetor da indústria cerâmica, em 2013, 2014 e 2015 (INE). .....	27
<b>Tabela 3</b> - Aspectos ambientais significativos no fabrico de produtos cerâmicos (Almeida <i>et al.</i> , 2004). .....	29
<b>Tabela 4</b> - Resíduos diretamente resultantes do fabrico de produtos cerâmicos (Decisão 2014/955/UE). .....	31
<b>Tabela 5</b> - Produção nacional de cacos cozidos por subsector, em toneladas. ....	32
<b>Tabela 6</b> - Análise química do caco cozido (CTCV, 2017). .....	36
<b>Tabela 7</b> - Análise química do eluato do caco cozido (CTCV, 2017). .....	37
<b>Tabela 8</b> - Resumo dos parâmetros obtidos nos vários eluatos do subsetor dos ladrilhos (CTCV, 2012). .....	40
<b>Tabela 9</b> - Resumo dos parâmetros obtidos nos vários eluatos do subsetor das telhas (CTCV, 2012). .....	41
<b>Tabela 10</b> – Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de cimento. ....	44
<b>Tabela 11</b> - Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de argamassas. ....	46
<b>Tabela 12</b> - Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de betão. ....	49
<b>Tabela 13</b> - Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de pavimentos betuminosos. ....	52
<b>Tabela 14</b> - Lista de Normas Harmonizadas no âmbito do mandato M 125 - Agregados. ..	54
<b>Tabela 15</b> - Especificações técnicas do LNEC para utilização de materiais provenientes de RCD. ....	55

## **Abreviaturas**

APICER – Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica e de Cristalaria

As – Arsénio

Ba – Bário

BTEX – Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno

Cd – Cádmio

COD – Carbono Orgânico Dissolvido

COT – Carbono Orgânico Total

Cr – Crómio

CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro

Cu – Cobre

DL – Decreto-Lei

ETARI – Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais

GEE – Gases com Efeito de Estufa

HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Hg – Mercúrio

INE – Instituto Nacional de Estatística

InEDIC – Inovação e Ecodesign na Indústria Cerâmica

LER – Lista Europeia de Resíduos

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Mo – Molibdénio

MTD – Melhor Técnica Disponível

Ni – Níquel

Pb – Chumbo

PCB – Policlorobifenilos 7 congéneres

PME – Pequenas/Médias Empresas

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

Sb – Antimónio

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

Se – Selénio

UE – União Europeia

Zn – Zinco

## 1. Introdução

### 1.1. Enquadramento Geral

As inter-relações entre população, recursos naturais e desenvolvimento há muito têm sido objeto de preocupação social e de estudos científicos. Com a contínua pressão quantitativa sobre os recursos naturais, é necessário aplicar uma perspetiva interdisciplinar e uma reorientação completa do pensamento sobre o desenvolvimento (Hogan, 1993).

Em particular, no domínio dos resíduos, a prevenção vem assumindo cada vez maior importância, quer na perspetiva ambiental, quer na redução de custos e racionalização de recursos. Fomentar a reutilização e reciclagem de resíduos com vista a prolongar o seu ciclo de vida e desenvolver estratégias de economia circular são também prioridades governamentais na temática da gestão de resíduos, especialmente, a nível industrial (Almeida *et al.*, 2016).

As indústrias têm empreendido um esforço crescente para tornarem os seus processos produtivos menos agressivos, especialmente no que se refere à produção e gestão de resíduos. De entre as diversas atividades económicas em Portugal, pode-se destacar a indústria transformadora como o principal gerador de resíduos industriais.

A indústria cerâmica é um setor relevante do tecido empresarial nacional, com uma vasta gama de produtos fabricados para as mais diversas utilidades. Este setor de atividade, como muitos outros setores, gera ao longo do seu ciclo de vida alguns impactos ambientais, com destaque neste relatório para a produção de resíduos. Na indústria cerâmica os resíduos produzidos são, na sua maioria, inertes ou não perigosos, como sejam, os produtos não conformes gerados ao longo do processo de fabrico (caco cru, caco seco, caco cozido), refratários, diversas embalagens das matérias-primas, aditivos e outros, moldes de gesso, lamas de ETARI, partículas provenientes de sistemas de tratamento de emissões gasosas, equipamentos fora de uso, resíduos de limpeza e manutenção, etc. (Almeida *et al.*, 2004).

A aplicação da MTD (Melhor Técnica Disponível) na área da gestão de resíduos é uma prática que tem vindo a ser desenvolvida pelos diferentes subsectores da indústria cerâmica, com o objetivo da racional utilização dos recursos naturais e evitar ou minimizar a deposição em aterro, permitindo desta forma, um desenvolvimento sustentável, privilegiando-se a sua reutilização e reciclagem, contribuindo para a diminuição da utilização de energia ao longo

da cadeia de produção e conseqüentemente para a redução de emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

Neste contexto, de mencionar que a indústria cerâmica é um setor com fortes potencialidades para incorporação/ inertização de resíduos, sendo esta uma prática crescente a nível nacional, tanto de resíduos cerâmicos como de resíduos/ subprodutos de outros sectores industriais.

O diploma referente ao regime geral da gestão de resíduos, o Decreto-Lei n.º 73/2011, estabelece requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo, cujo principal objetivo não seja a sua produção, possam ser considerados subprodutos e não resíduos. Para esse efeito, pretende-se com este estudo obter parâmetros de caracterização que possam contribuir para a reclassificação de resíduos, nomeadamente, os cacos cozidos provenientes dos vários subsectores da indústria cerâmica.

## **1.2. Objetivos**

O presente relatório reflete algumas tarefas desenvolvidas no âmbito da atividade 5 (promoção de estratégias de economia circular) do projeto CER++ (Cerâmica + Produtiva + Eficiente), promovido pela APICER (Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica e de Cristalaria) e concretizado, durante o período de estágio, na unidade de Ambiente e Sustentabilidade do CTCV (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro), com o objetivo final de se apresentar uma proposta de classificação do resíduo caco cozido como subproduto; promovendo, deste modo, estratégias de economia circular na indústria cerâmica. Sequencialmente foram estudados e desenvolvidos os seguintes temas:

- Descrição dos ensaios de lixiviação realizados a cacos cozidos e análise dos resultados obtidos para se aferir a sua natureza inerte;
- Estudos do estado da arte em matéria de potenciais destinos para o caco cerâmico cozido;
- Proposta de classificação do resíduo caco cozido como subproduto, justificando o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 73/2011.

### **1.3. Estrutura e Conteúdo**

O presente relatório encontra-se organizado em 4 capítulos.

Após a introdução, que corresponde ao presente capítulo, surge o Capítulo 2, no qual é apresentada a recolha bibliográfica da informação relevante para implementação de estratégias da economia circular na indústria cerâmica. Inicialmente é efetuado um enquadramento sobre a evolução da economia linear a circular, salientando os respetivos benefícios, desafios e estratégias aplicadas. Apresenta-se também uma caracterização geral do sector da indústria cerâmica, incluindo a descrição do processo de fabrico e os aspetos ambientais resultantes, com especial foco no tipo de resíduos gerados.

No capítulo 3 é efetuado um enquadramento do objeto de estudo, descrevendo com pormenor os objetivos do estágio e qual a necessidade de se desenvolver este tema. Inclui uma caracterização do caco cerâmico cozido através da análise química da sua composição e do respetivo lixiviado, de modo a se poder aferir a sua natureza inerte. De seguida, e tendo em conta um dos principais propósitos do trabalho, apresentam-se vários estudos que têm vindo a ser desenvolvidos por diferentes autores relativamente à incorporação de resíduos de cerâmica, provenientes dos diversos sectores, no próprio e/ou outros processos produtivos, de forma a se compreender os efeitos do caco cozido no produto fabricado. Também são indicados vários exemplos bem-sucedidos de empresas que aplicam este método, reincorporando resíduos cerâmicos no seu processo produtivo. Por fim, a última secção deste capítulo, corresponde ao culminar do trabalho realizado anteriormente, tornando possível justificar o cumprimento dos requisitos estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 para classificação do caco cozido como subproduto.

No capítulo 4 apresentam-se as conclusões gerais obtidas ao longo de todo o trabalho desenvolvido e é efetuada uma análise crítica dos aspetos mais importantes. É avaliado o cumprimento dos objetivos propostos e são indicados trabalhos futuros que poderão ter algum contributo para o tema abordado.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo procede-se a uma análise do estado dos conhecimentos relativos à economia circular, nomeadamente, um enquadramento histórico da sua evolução, benefícios e desafios, políticas de apoio à transição e exemplos de estratégias que se podem aplicar a produtos oriundos do setor cerâmico. Seguidamente, é efetuada uma caracterização da indústria cerâmica, descrevendo o seu processo produtivo e principais aspetos ambientais decorrentes desse processo, salientando o tipo e quantidade de resíduos gerados.

### 2.1. A Economia Circular

#### 2.1.1. Evolução da economia linear a circular

As tendências atuais de crescimento populacional, aumento da procura e consequente pressão nos recursos naturais têm vindo a salientar a necessidade de as sociedades modernas desenvolverem um paradigma mais sustentável. O modelo económico da atualidade, baseado numa abordagem linear de “recolha, transformação e eliminação” (Figura 1), onde todos os produtos atingem eventualmente um estatuto de “fim de vida útil”, está a atingir os seus limites físicos face à escassez de recursos para satisfazer as necessidades presentes (Almeida *et al.*, 2016).



Figura 1 – Exemplo de sequência típica da Economia Linear (ISWA 1, 2015).

Confrontam-se hoje questões referentes à vida útil de curta duração dos materiais numa economia linear, onde 80-90% dos bens produzidos são transformados em resíduos em menos de 1 ano (World Economic Forum, 2011). As condições de mercado e a legislação em vigor, relativamente à saúde, segurança e meio ambiente, apoiam geralmente este tipo de modelo, expondo empresas e países a riscos relacionados com a volatilidade dos preços dos recursos e interrupções de fornecimento.

Em cada etapa do modelo de produção linear são descartados materiais, resultando na produção de grandes volumes de resíduos na extração de matérias-primas e respetivo processamento através das várias fases de fabrico, na embalagem e no ponto de consumo (Figura 2).

Na economia linear, as oportunidades para reduzir os custos de fabrico ocorrem principalmente por meio de melhorias na produtividade, ou seja, os fabricantes aumentam o lucro através da venda de mais bens, incentivando a procura do consumidor final com o auxílio de marketing constante de novos produtos com melhorias que os diferenciam no mercado (ISWA 1, 2015).

A redução dos preços resulta em consumidores que investem no consumo de mais bens, pois estes são incentivados a seguir novas modas e a descartar bens antes do seu fim de vida útil.

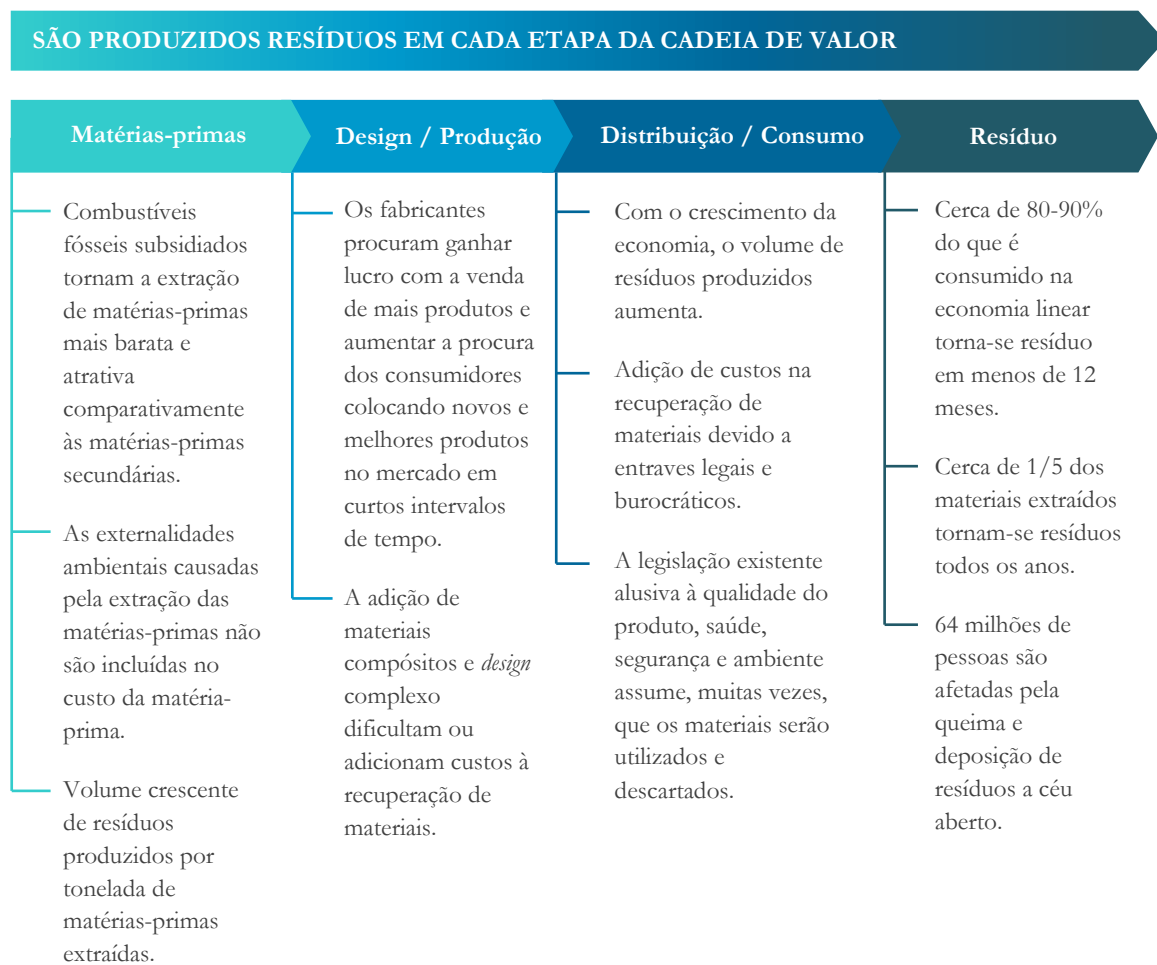


Figura 2 - Consequências da Economia Linear em cada etapa da cadeia de valor (adaptado de ISWA 6, 2015).

Um novo modelo económico que funcione em circuitos fechados, catalisados pela inovação ao longo de toda a cadeia de valor, é defendido como uma solução alternativa para minimizar consumos de materiais e perdas de energia (República Portuguesa, 2017). A transição para uma economia circular redireciona o foco para a reutilização, reparação, renovação e

reciclagem dos materiais e produtos existentes, ou seja, o que era visto como um “resíduo” pode ser transformado num recurso.

A Economia Circular (Figura 3) consiste numa “resposta ao desejo de um crescimento sustentável no contexto da pressão crescente que a produção e o consumo exercem sobre o ambiente e os recursos mundiais” (CE, 2014). É regenerativa e restaurativa por princípio, tendo como objetivo manter produtos, componentes e materiais no seu mais alto nível de utilidade e valor ao longo do tempo (Ellen MacArthur Foundation, 2012).

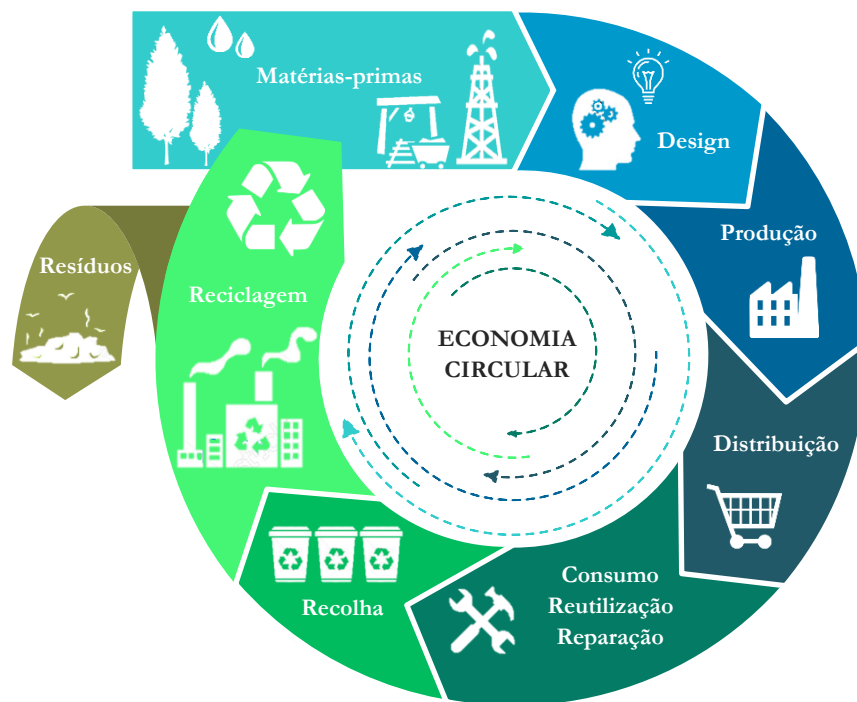


Figura 3 – Exemplo de sequência típica da Economia Circular (República Portuguesa, 2017).

Esta transição oferece diversos mecanismos de criação de valor dissociados do consumo de recursos finitos, substituindo o conceito de fim-de-vida da economia linear, por novos fluxos circulares de reutilização, restauração e renovação, num processo integrado. Tem em vista uma ação mais ampla, desde o redesenho de processos, produtos e novos modelos de negócio até à otimização da utilização de recursos (“circulando”, o mais eficientemente possível, produtos, componentes e materiais nos ciclos técnicos e/ou biológicos) (República Portuguesa, 2017).

A Economia Circular tem como principal objetivo minimizar a extração de recursos, maximizar a reutilização, aumentar a eficiência e desenvolver novos modelos de negócios, centrando-se no “fecho do ciclo” em toda a cadeia de valor desde as seguintes fases (State of Green, 2016):

- **Design** – Desenho ou redesenho de produtos de concepção mais duradoura e utilizando menos recursos;
- **Produção** – Adoção de processos de produção mais limpa, limitando a utilização de substâncias tóxicas, promovendo a eficiência energética e de materiais e identificando novas utilizações para subprodutos;
- **Distribuição** – Organização de serviços de logística para partilha de redes de distribuição, escolhas mais sustentáveis de modos de transporte, bem como preocupações com a utilização de materiais recicláveis e redução do “sobre-embalamento”;
- **Utilização** – Melhoria da eficiência energética, maximização da vida útil do produto e otimização da reparação e reutilização;
- **Eliminação** (ou melhor, reentrada no ciclo) – Dinamização de redes de retoma, reuso e reciclagem. Foco no *upcycling* (“reutilização criativa”, processo de reconversão de resíduos em novos materiais ou produtos de maior valor acrescentado) ou no *downcycling* (processo de reconversão de resíduos em novos materiais ou produtos de menor qualidade/funcionalidade reduzida).

### 2.1.2. Benefícios da economia circular

A política da União Europeia em matéria de resíduos já contribui para o desenvolvimento da economia circular, principalmente através de medidas que favorecem a reciclagem. No entanto, há benefícios numa transição mais ampla para uma economia circular em quatro áreas, nomeadamente, economia, meio ambiente, uso de recursos e aspetos sociais (Figura 4). Contudo, o processo de transição requer diversas mudanças criando também custos de transição.

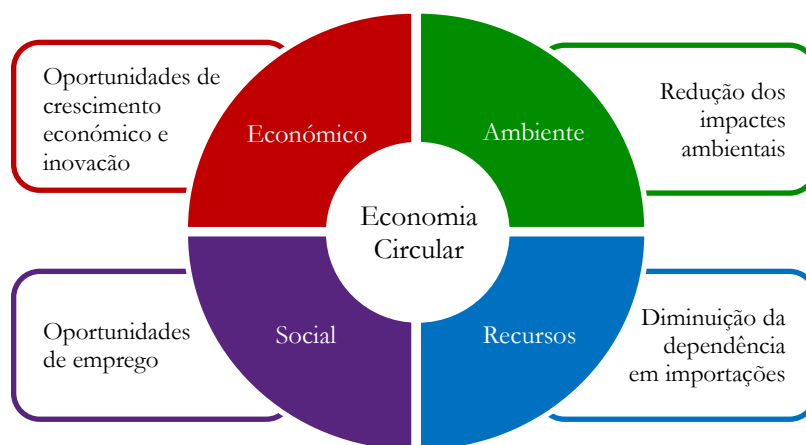


Figura 4 - Benefícios da transição para uma Economia Circular.

### **A) Benefícios económicos**

A economia circular oferece uma plataforma de abordagens inovadoras, nomeadamente, tecnologias e modelos de negócio que ajudam a aumentar o valor económico utilizando menos recursos naturais. Por exemplo, para certos bens de consumo - alimentos, bebidas, têxteis e embalagens - estima-se um potencial global de 645 mil milhões de euros por ano em poupanças líquidas, ou seja, cerca de 20% dos custos de entrada em matérias-primas nos respetivos sectores (EMF, 2013).

Com a implementação de medidas “circulares” que incentivem a prevenção de resíduos, recuperação de materiais, mudança de práticas de aquisição e reconcepção de produtos, estima-se um benefício líquido que varia entre 245 mil milhões de euros e 604 mil milhões de euros, representando uma média de 3 a 8% do volume de negócios anual (AMEC Environment & Infrastructure and Bio Intelligence Service, 2013).

### **B) Benefícios ambientais**

O principal objetivo da política de eficiência energética da UE é dissociar a produção económica do bem-estar social, da utilização dos recursos e da energia, e dos impactos ambientais relacionados (EU, 2013). Embora as atuais políticas em matéria de resíduos contribuam já para isso, a Comissão Europeia estima que diferentes combinações de objetivos mais ambiciosos para a reciclagem de resíduos e a redução de aterros podem levar a uma redução das emissões de gases com efeito de estufa até 424-617 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente em 2015-2035, para além das reduções resultantes da implementação de metas existentes (EC, 2015).

### **C) Benefícios no uso de recursos**

A transição para uma economia circular pode resultar num aumento na eficiência do consumo de recursos primários, nomeadamente, através da conservação de materiais incorporados em produtos de alto valor, ou na reutilização de resíduos como matérias-primas secundárias de alta qualidade, reduzindo assim a demanda de matérias-primas primárias. Estas medidas ajudariam não só a reduzir a dependência da Europa em importações, como também, diminuiria a exposição dos sectores industriais à volatilidade dos preços dos recursos e interrupções de fornecimento (EEA, 2016).

Atualmente, como resultado da aplicação de políticas de reciclagem, prevenção de resíduos e conceção ecológica, estima-se que se reduziu o consumo de matérias-primas em 6-12%,

sendo o potencial máximo estimado de 10-17%. Por outro lado, utilizando tecnologias inovadoras, a melhoria da eficiência dos recursos ao longo de todas as cadeias de valor poderia reduzir a entrada de matérias-primas na Europa em 24% até 2030 (EC, 2011).

#### **D) Benefícios sociais**

De acordo com a Comissão Europeia, o aumento das metas de reciclagem, simplificação da legislação, melhoria da monitorização e difusão das melhores práticas para aumentar a reciclagem e reduzir a quantidade de resíduos para aterros, poderá resultar na criação de 178 000 novos empregos diretos até 2030 (EC, 2015).

No Reino Unido, estima-se que o desenvolvimento de cadeias de valor totalmente circulares pode originar a criação de cerca 500 000 postos de trabalho até 2030 (Morgan & Mitchell, 2015). Este estudo também demonstra como diferentes estratégias circulares poderiam gerar diferentes tipos de empregos. Por exemplo, as estratégias de mão-de-obra intensiva, tais como a preparação e triagem de produtos e materiais para reutilização ou reciclagem, produziram rendimentos para pessoas pouco qualificadas; criação de empregos de qualificação média na reciclagem em circuito fechado e na reutilização de materiais no fabrico de produtos; e a criação de postos de trabalho altamente qualificados na biorefinação (refinação da biomassa).

#### **2.1.3. Desafios em “fechar o ciclo”**

De acordo com o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, reciclagem significa “qualquer operação de valorização, (...) através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins (...)”. Inclui o reprocessamento de materiais orgânicos, mas não abrange a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento.

Basicamente, reciclagem significa que os materiais são conduzidos num ciclo, no entanto, devido às propriedades integrais dos materiais e aos processos envolvidos na sua produção e reciclagem em matérias-primas secundárias, uma reciclagem completa não é possível por diversas razões (ISWA 2, 2015), nomeadamente:

### **A) Perdas de material devido a efeitos abrasivos, corrosivos e desgastes**

Uma certa fração do material é libertada durante todo o seu ciclo de vida (inclusive durante a reciclagem) em formas irrecuperáveis. Exemplos disso são a corrosão do cobre de telhados e tubulações de água e a oxidação de alumínio (Uchida *et al.*, 2000).

O desgaste de elementos pode causar danos ambientais e danos à saúde quando libertados. Estas perdas já não estão disponíveis para serem recicladas, o que significa que uma taxa de reciclagem de 100% nunca pode ser alcançada.

### **B) Contaminação por mistura irreversível com outros materiais**

A mistura de materiais ocorre maioritariamente durante a fase de produção, uma vez que um produto consiste numa variedade de componentes. O *design* do produto visa otimizar a reciclagem, por exemplo, limitando o número de materiais a serem utilizados. No entanto, o oposto acontece, visto que os produtos estão cada vez mais complexos e contêm diversos tipos de materiais. Um exemplo disso são os produtos de aço que contêm outros metais, tais como o cobre e o estanho, com a finalidade de reduzir a flexibilidade do aço a temperaturas elevadas. Em particular, as sucatas recuperadas de veículos em fim-de-vida podem conter quantidades consideráveis de cobre, e a mistura (fusão) dessa sucata com outras classes de sucata de aço mais puras vai ter um impacto negativo na qualidade do material reciclado (Reck *et al.*, 2012).

Esta contaminação pode ser minimizada através da separação dos diferentes graus de qualidade dos materiais durante os processos de reciclagem. Contudo, tal separação nem sempre é possível, impossibilitando a reciclagem em ciclo fechado. Este efeito também pode ocorrer durante a fase de utilização, por exemplo, os têxteis podem ser contaminados com óleo ou outras substâncias durante o uso e, portanto, a reciclagem subsequente é evitada.

### **C) Degradação ou destruição**

Alguns materiais podem degradar-se durante a fase de produção e/ou utilização devido às suas propriedades moleculares. Estas podem ser sensíveis ao calor (por exemplo durante a fusão), à radiação (radiação ultravioleta durante o uso) ou impactos mecânicos, que levam à sua degradação ou destruição e, em casos extremos, torna a reciclagem impossível (Badía *et al.*, 2009). A reciclagem do papel é um exemplo do processo de degradação, uma vez que

durante o reprocessamento das fibras de celulose, ocorre uma redução irreversível da resistência e comprimento da fibra, limitando o número de ciclos que são possíveis.

Tendo em conta estes aspetos, é inevitável uma diminuição em termos de quantidade e qualidade do material reciclado. A Figura 5 dá uma visão mais realista da situação, incluindo fluxos adicionais aos encontrados na Figura 3.

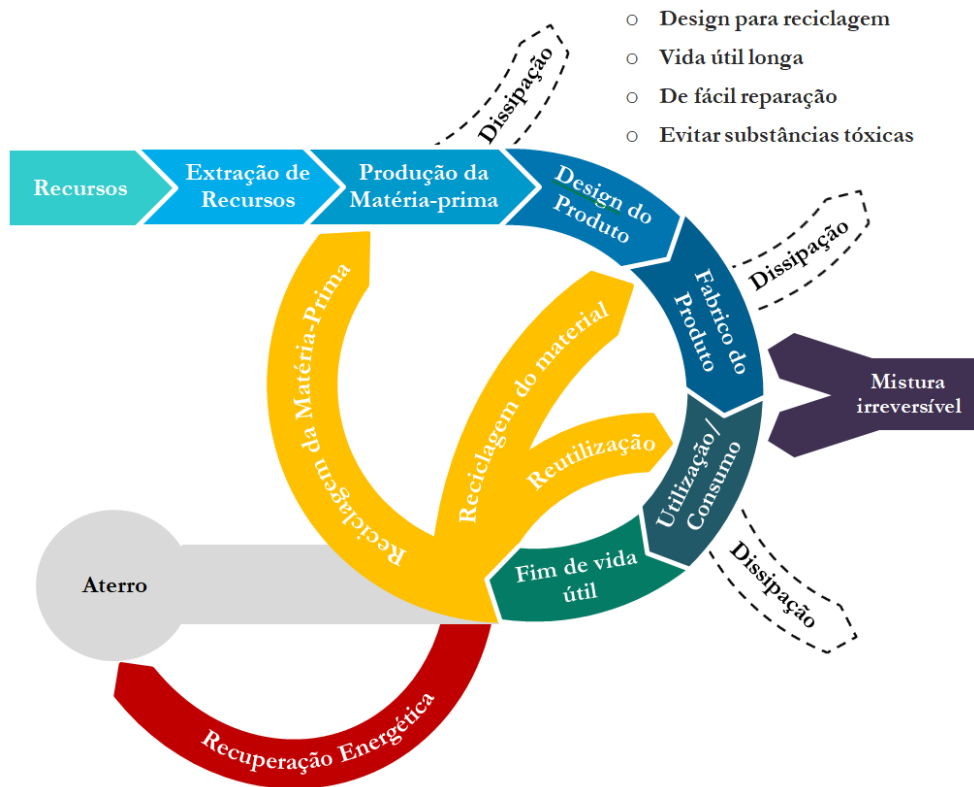


Figura 5 - Economia Circular com fluxos adicionais referentes à entrada e saída de materiais (adaptado de ISWA 2, 2015).

De acordo com a Figura 5, quando um produto atinge o seu fim de vida útil pode ser encaminhado para diferentes fluxos, nomeadamente:

- **Reutilização**, em que a constituição química e física do material é conservada, mas o produto não é utilizado para o objetivo inicial (por exemplo, utilização de pneus e garrafas de vidro como materiais de construção).
- **Reciclagem do material**, em que a constituição química de um material é mantida e apenas a constituição física é alterada. Esta forma de reciclagem inclui, por exemplo, fusão e reprocessamento de metais e compostagem de matéria orgânica.
- **Reciclagem da matéria-prima**, em que se altera a constituição física e química do material, como a despolimerização (por exemplo em plásticos). Geralmente, o

esforço técnico na reciclagem da matéria-prima é maior do que para a reciclagem de materiais, no entanto, a sua aplicabilidade é maior.

- **Recuperação energética**, visto que, em certos casos, a inevitável perda de qualidade na reciclagem de materiais pode tornar a incineração mais favorável, pois esta não só recupera energia, como também destrói substâncias tóxicas.

No entanto, quando não é possível nenhum destes fluxos, o destino dos materiais será o aterro.

#### **2.1.4. Política de apoio à transição**

A mudança para uma economia circular é um elemento essencial da visão definida pela União Europeia e respetivos Estados Membros no 7º Programa de Ação em matéria de Ambiente (Comissão Europeia, 2013), no qual é referido o seguinte:

“A nossa prosperidade e a sanidade do nosso ambiente resultam de uma economia circular inovadora em que nada se desperdiça e em que os recursos naturais são geridos de forma sustentável e a biodiversidade é protegida, valorizada e recuperada de modo a reforçar a resiliência da nossa sociedade.”

Uma “Europa eficiente em termos de recursos” é uma das iniciativas emblemáticas no quadro da estratégia “Europa 2020” que visa um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo, referindo mesmo que “num mundo com crescentes pressões sobre os recursos e o ambiente, a UE não tem escolha a não ser ir para a transição para uma economia circular eficiente dos recursos e finalmente regenerativa”. Esta iniciativa tem como objetivo contribuir para dissociar o crescimento económico da utilização dos recursos, assegurar a transição para uma economia hipocarbónica, aumentar a utilização das fontes de energia renováveis, modernizar o setor dos transportes e promover a eficiência energética (Comissão Europeia, 2011)

A iniciativa visa proporcionar um enquadramento a longo prazo em numerosos domínios políticos, nomeadamente no que respeita a programas estratégicos nos domínios da luta contra as alterações climáticas, da energia, dos transportes, da indústria, das matérias-primas, da agricultura, das pescas, da biodiversidade e do desenvolvimento regional, de modo a gerar um clima de segurança propício ao investimento e à inovação e assegurar que todas as políticas relevantes têm em conta, de uma forma equilibrada, a eficiência em termos dos recursos.

A Comunicação da Comissão "Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia circular" de 2015 veio realçar o empenho e apoio da UE na prossecução desse objetivo e definir medidas concretas envolvendo os Estados-Membros e as empresas europeias.

Em dezembro de 2015 foi apresentado o Pacote de Economia Circular pela Comissão Europeia com o intuito de dinamizar a Economia Circular na Europa. Este Pacote prevê propostas legislativas revistas (Proposta sobre os resíduos e um Plano de Ação para a Economia Circular) que, identificadas as linhas estratégicas da UE para uma economia mais circular, confere à Comissão Europeia um mandato concreto nesse sentido (produção; consumo; aprovisionamento responsável de matérias-primas primárias; gestão de resíduos; conversão de resíduos em recursos - matérias-primas secundárias; consumidores; inovação e investimento) (Comissão Europeia, 2015). Desta forma, este Pacote prevê linhas fortes em relação à melhoria da gestão dos resíduos, aumento da reciclagem e redução da deposição em aterros.

#### **2.1.5. Estratégias da economia circular**

A economia circular possibilita múltiplas estratégias que podem ser combinadas na criação de valor, nomeadamente, ecodesign, extensão do ciclo de vida, simbioses industriais, valorização de subprodutos e resíduos, entre outros.

Na Dinamarca, *Kalundborg Symbiosis* é o primeiro exemplo mundial de bom funcionamento de um parque de simbiose industrial. É atualmente constituído por oito empresas, públicas e privadas, que compram e vendem resíduos umas às outras num ciclo fechado de produção industrial, tal que resíduos de uma empresa se tornam matérias-primas de outra empresa. São negociados vários produtos derivados, como, por exemplo, vapor, cinza, gás, calor, lama e outros que podem ser transformados fisicamente de uma empresa para outra. Este parque tornou-se um exemplo de poupança eficaz de recursos e reciclagem de materiais na produção industrial. Os benefícios ambientais são uma prioridade, contudo, a principal motivação no estabelecimento das relações simbióticas prende-se com o benefício económico das empresas participantes (Leitão, 2015).

Apesar das vantagens proporcionadas aos fabricantes em matéria de custos e materiais, muitas empresas são confrontadas com obstáculos legais e burocráticos dificultando esta transição para uma economia circular. Outra complicação que se coloca aos operadores que pretendem utilizar as matérias-primas secundárias é a incerteza quanto à sua qualidade, podendo ser difícil determinar os níveis de impurezas ou a adequação para uma reciclagem

de elevada qualidade (Comissão Europeia, 2015). Por conseguinte, uma evolução na burocracia relativa aos resíduos e a existência de normas de qualidade aplicáveis às matérias-primas secundárias tornam-se indispensáveis.

No caso concreto da cerâmica, a Associação Europeia da Indústria Cerâmica (Cerame-Unie) salienta que a eficiência de recursos requer uma avaliação do ciclo de vida em todas as fases do processo de fabrico do produto, incluindo a durabilidade, tempo de vida útil e redução do consumo de recursos na fase de utilização.

A indústria cerâmica tem investido em inovações no âmbito da economia circular, nomeadamente, na reutilização de telhas e na reciclagem de materiais cerâmicos provenientes de resíduos de construção e demolição, que através da sua moagem, são reutilizadas como matérias-primas secundárias para diferentes aplicações (Cerame-Unie, 2014). No entanto, para estas opções serem viáveis, é necessário haver um acesso apropriado aos materiais, uma adequada separação e tratamento de resíduos e um bom funcionamento do mercado de matérias-primas secundárias.

Muitas das inovações aplicadas a produtos cerâmicos portugueses podem ser classificadas como estratégias de ecodesign (InEDIC, 2011), como se pode verificar na Tabela 1, contribuindo para um futuro desenvolvimento sustentável, tendo em conta, que integram uma abordagem de pensamento de ciclo de vida.

Tabela 1 - Exemplos de produtos cerâmicos com interesse do ponto de vista do ecodesign (adaptado de InEDIC, 2011).

<b>Estratégia</b>	<b>Atividade</b>	<b>Exemplos</b>
Seleção de materiais de baixo impacte	Incorporação de resíduos	Incorporação de resíduos industriais na produção de ladrilhos cerâmicos, até 80% em peso, mantendo-se a resistência (Green Earth, Roca).
		Incorporação até 90% de materiais reciclados na produção de ladrilhos cerâmicos (EcoTECH, Revigrés, desenvolvido no âmbito do projeto InEDIC).
Redução da utilização de materiais	Redução da espessura dos produtos	Redução da espessura de ladrilhos cerâmicos de 12 mm para 6,5 mm (Ladrilho cerâmico Light – Revigrés).
Redução do impacte ambiental na fase de produção	Redução de quebras na produção e, consequentemente, perdas de ecoeficiência	Evitar formas complexas, ângulos retos e alterações de espessura nas paredes da peça, uma vez que estas propiciam o aparecimento de fissuras e quebras na produção (Designer: Dulce Fernandes).

<b>Estratégia</b>	<b>Atividade</b>	<b>Exemplos</b>
Redução do impacte ambiental na fase de utilização	Elementos construtivos de elevada eficiência	Desenvolvimento de tijolos com elevados desempenhos térmicos, mecânicos e acústicos, melhorando a eficiência energética do edifício (CBloco, CTCV).
		Produtos multifuncionais – SolarTiles - produtos cerâmicos fotovoltaicos integrados, de elevada eficiência, para revestimentos de edifícios (telhas e revestimentos exteriores de fachada) que incorporem, de raiz e por deposição, filmes finos fotovoltaicos.
		Easy clean and selfclean - Superfícies hidrófilas com efeito fotocatalítico. Revestimentos cerâmicos exteriores com propriedades autolimpantes, de elevada eficácia e durabilidade.
		ThermoCer - Pavimentos cerâmicos com materiais de mudança de fase para melhoria da eficiência energética em edifícios
		Produtos multifuncionais – Minimus (Costa Verde), desenvolvido no âmbito do projeto InEDIC.
Otimização do sistema de fim de vida	Novo método de instalação e desmantelamento	Pavimento técnico elevado que reduz e facilita a separação de resíduos de demolição e permite a montagem de sistemas de aquecimento radiante e flexibilidade para alterar o pavimento (Pavimento elétrico elevado, Porcelanosa).

## 2.2. A Indústria Cerâmica

### 2.2.1. Caracterização geral do sector

A indústria cerâmica engloba um conjunto de atividades destinadas à produção de materiais inorgânicos, a partir de compostos não metálicos e estabilizados por um processo de cozedura em fornos.

Hoje em dia, a cerâmica moderna inclui uma grande variedade de produtos com uma pequena fração de argila ou mesmo sem argila, podendo os produtos ser vidrados ou não vidrados, porosos ou vitrificados (CE, 2006). Este sector engloba uma grande variedade de aplicações que pode ser dividida em diferentes segmentos tendo em conta diversos fatores, tais como, matérias-primas, propriedades do produto e áreas de aplicação.

Considerando o tipo de produto final obtido, esta divisão pode ser geralmente estabelecida como se ilustra na Figura 6.

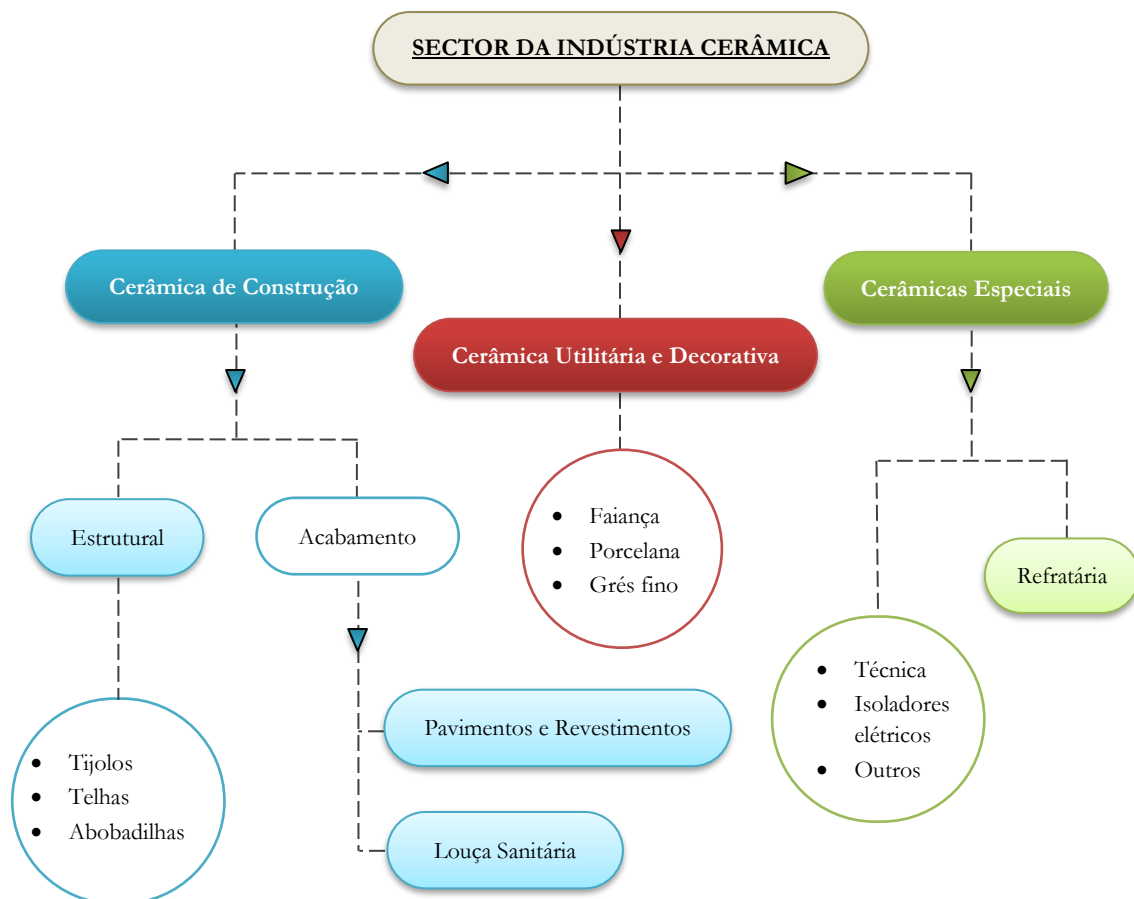


Figura 6 - Subsectores da Indústria Cerâmica (adaptado de Almeida, 2004).

O sector cerâmico é constituído por cerca de 1100 empresas, que apresentam um total de 958 milhões de euros de volume de negócios (1,2% do total da indústria transformadora) e cerca de 16.000 postos de trabalho (INE, 2014). A forte concentração do tecido empresarial localiza-se na Zona Centro de Portugal e é composta essencialmente por pequenas/médias empresas (PME), representando cerca de 85% do tecido económico do sector. A tendência atual do sector cerâmico aponta para uma diminuição do número destas empresas, devido à dificuldade em penetrar no mercado, em virtude da forte competição com os concorrentes já estabelecidos, bem como à forte recessão económica mundial. No entanto, as pequenas e médias, bem como as grandes empresas, são as responsáveis pela maioria da riqueza gerada no sector, sendo que, entre 2012 e 2014, observou-se um aumento de 7,95% no volume de negócios, correspondente a cerca de 76 milhões de euros.

Como se pode verificar na Figura 7, os subsectores que mais contribuem para a riqueza gerada na indústria cerâmica são os subsectores de pavimentos e revestimentos (36%), cerâmica utilitária e decorativa (31%) e louça sanitária (21%), restando os subsectores de

cerâmica estrutural e refratários com uma contribuição de, 10% e 2%, respetivamente (INE, 2014).

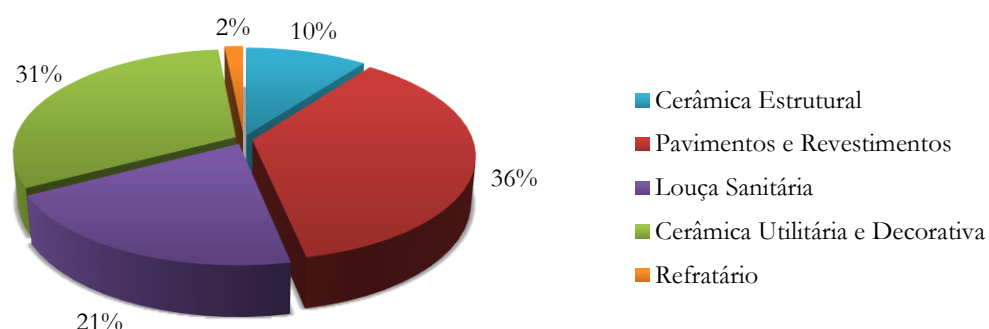


Figura 7 - Distribuição percentual do volume de negócios pelos subsectores da indústria cerâmica, em 2014 (INE, 2014).

Em geral, relativamente às quantidades de produtos fabricados, pode-se verificar na Tabela 2, uma tendência com comportamento variável na maioria dos subsectores, nos anos em análise. Em concordância com crescimento do volume de negócios, pode-se verificar um aumento na produção de pavimentos e revestimentos, louça sanitária e telhas.

Tabela 2 – Produtos produzidos por subsector da indústria cerâmica, em 2013, 2014 e 2015 (INE).

Tipo de produto cerâmico	Unidades	Quantidade de produtos fabricados			Tendência
		2013	2014	2015	
<b>Cerâmica Estrutural:</b>					
○ Tijolos	m <sup>3</sup>	1 030 947	950 048	954 959	↓
○ Telhas	n.º/unid.	137 443 184	145 177 286	141 434 592	↑
○ Abobadilha, tijoleira	kg	67 927 167	107 583 070	61 345 455	↓
<b>Pavimentos e Revestimentos</b>	m <sup>2</sup>	39 485 596	38 166 578	40 554 377	↑
<b>Louça Sanitária</b>	n.º/unid.	4 758 327	5 216 625	6 081 939	↑
<b>Cerâmica Utilitária e Decorativa</b>	kg	157 614 154	104 090 684	106 769 106	↓
<b>Refratário</b>	kg	27 425 693	25 696 884	22 823 459	↓

### 2.2.2. Descrição geral do processo de produção

O processo de fabrico dos produtos cerâmicos varia de acordo com o subsector e o tipo de artigo em produção, tendo lugar em diferentes tipos de fornos, com uma ampla gama de matérias-primas e diversas formas, tamanhos e cores. Contudo, todos envolvem o mesmo conjunto de operações básicas, típicas do sector, como ilustra a Figura 8.

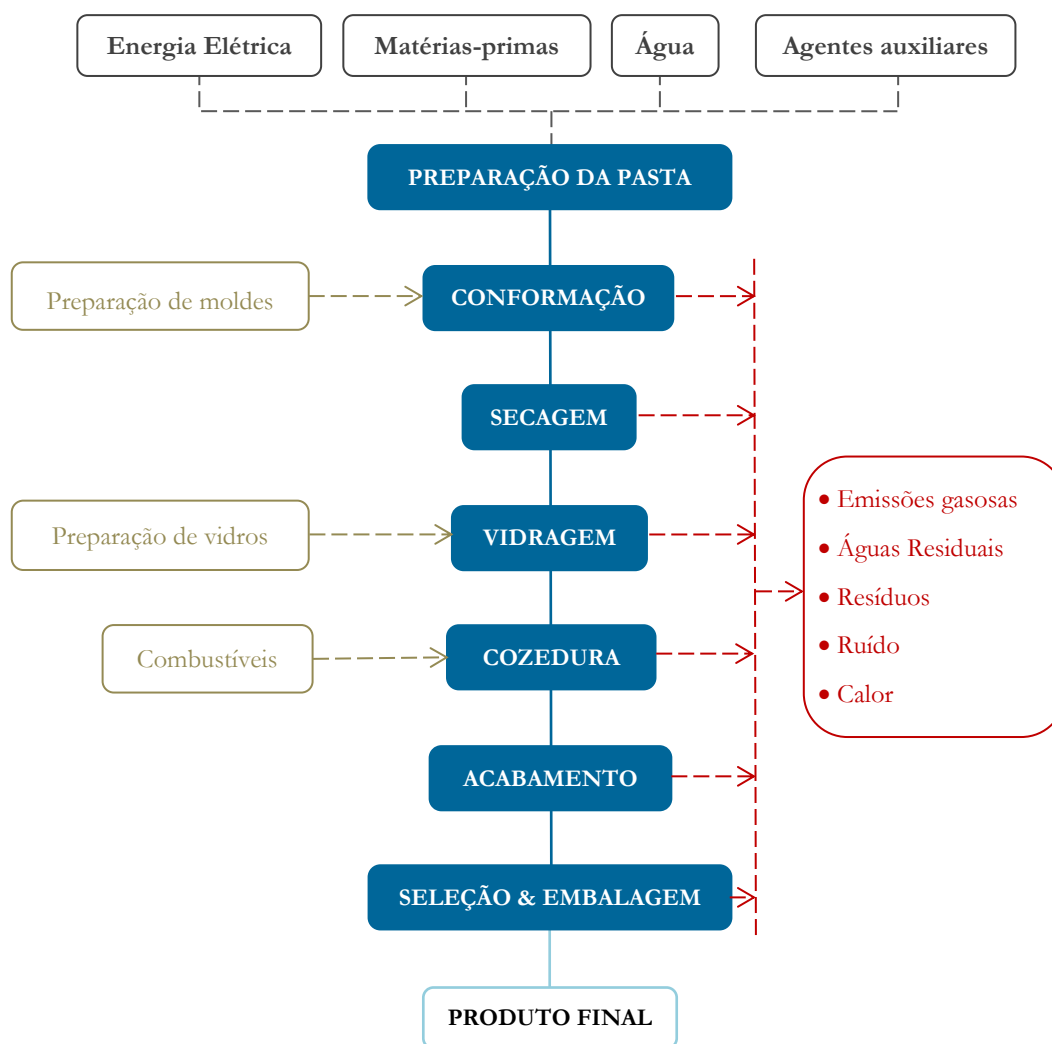


Figura 8 - Fluxograma genérico do processo de fabricação do produto cerâmico (adaptado de CE, 2006).

A indústria cerâmica utiliza diversos tipos de materiais, variando de acordo com as necessidades de cada subsetor. Em geral, as matérias-primas e os aditivos constituintes dos diversos tipos de pasta são areias, argilas, feldspatos, caulinos, calcite, dolomite e talco. Depois de doseadas nas devidas proporções, estas são misturadas até se obter uma composição com características o mais homogêneas possível e adequadas à conformação dos produtos (em termos de mistura, granulometria e de humidade), sendo então moldadas/prensadas até se obter a forma pretendida. Existem empresas que adquirem a pasta já pré-preparada a empresas fornecedoras de matérias-primas.

A água presente na mistura é evaporada em secadores e os produtos são depois colocados no forno que funcionam em contínuo ou em modo intermitente. Para que os produtos sejam submetidos a um tratamento correto, é necessário que se mantenha um gradiente de temperatura muito rigoroso durante o processo de cozedura, pois estes adquirem uma

estrutura cerâmica irreversível. Posteriormente, para que os produtos libertem o calor gradualmente e conservem a sua estrutura cerâmica, é necessário realizar um arrefecimento controlado. Por fim, os produtos são embalados e armazenados para distribuição (CE, 2006).

### 2.2.3. Aspetos ambientais do sector

Existem vários aspetos que contribuem para o impacto ambiental do setor da indústria cerâmica, decorrentes do processo produtivo. Passam pelo consumo de recursos naturais (matérias-primas, água e energia), emissões gasosas, descargas de efluentes líquidos, produção de resíduos e emissões de ruído. Na Tabela 3 são apresentados os aspetos ambientais mais representativos associados ao processo de fabrico de materiais cerâmicos.

Tabela 3 - Aspetos ambientais significativos no fabrico de produtos cerâmicos (Almeida *et al.*, 2004).

Processo Produtivo	ENTRADAS			SAÍDAS				
	Matérias-primas	Água	Energia	Emissões gasosas	Águas residuais	Resíduos	Ruído	Calor
Preparação de pasta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Conformação (prensagem)			✓	✓		✓	✓	
Conformação (moldagem)		✓	✓		✓	✓	✓	
Secagem			✓	✓		✓	✓	✓
Vidragem			✓	✓		✓	✓	
Cozedura			✓	✓		✓	✓	✓
Acabamento		✓	✓		✓	✓	✓	
Seleção						✓	✓	
Embalagem	✓		✓	✓		✓	✓	

O tipo e a quantidade de emissões gasosas, resíduos e águas residuais dependem de parâmetros distintos, por exemplo, das matérias-primas, dos agentes auxiliares, dos combustíveis utilizados e dos métodos de produção (CE, 2006):

### **A) Emissões atmosféricas**

O manuseamento de matérias-primas e o acabamento do produto pode resultar em emissões de partículas e poeiras. A combustão de fuelóleo ou de diferentes combustíveis sólidos podem provocar fuligem. O processo de cozedura e secagem de produtos cerâmicos libertam emissões gasosas, que podem derivar das matérias-primas e/ou dos combustíveis utilizados. De entre as emissões gasosas, assumem particular importância os óxidos de carbono, os óxidos de azoto, os óxidos de enxofre, compostos inorgânicos fluorados e clorados e compostos orgânicos. Devido ao uso de substâncias para fins decorativos que contêm metais pesados, ou devido ao uso de fuelóleo pesado como combustível, pode haver ainda emissão de metais pesados.

### **B) Águas residuais**

As emissões para o meio aquático ocorrem sobretudo durante o processo de fabrico de produtos cerâmicos, mais especificamente, produtos cerâmicos tradicionais, e as águas residuais resultantes do processo contêm maioritariamente componentes minerais (partículas insolúveis). Dependendo do método de produção, as águas residuais de processo contêm também outras matérias inorgânicas, pequenas quantidades de diversas matérias orgânicas e ainda alguns metais pesados. Além da água de processo, frequentemente limpa e reutilizada em circuitos fechados, também a água de arrefecimento, águas pluviais e águas residuais sanitárias (domésticas) podem contribuir para a emissão de água na unidade cerâmica.

### **C) Resíduos**

As perdas de processo provenientes do fabrico de produtos cerâmicos consistem sobretudo nos seguintes materiais: diferentes tipos de lamas (lamas provenientes do tratamento das águas residuais de processo, lamas de vidragem, lamas de gesso, lamas de trituração); artigos quebrados ou cacos provenientes de moldagem, secagem, cozedura e material refratário; poeiras oriundas do tratamento de efluentes gasosos, incluindo os sistemas de despoeiramento; moldes de gesso usados; resíduos de embalagens (plástico, madeira, metal, papel, etc.); resíduos sólidos, por exemplo, cinzas provenientes da cozedura com combustíveis sólidos.

#### **2.2.4. Tipologia de resíduos na cerâmica**

A indústria cerâmica é responsável pela produção de resíduos de diversos tipos. Na sua maioria, estes resíduos são inertes ou não perigosos, constituindo os resíduos perigosos uma

pequena fração dos resíduos produzidos e associados geralmente a operações de manutenção ou tratamento de emissões (gasosas ou líquidas). Na Tabela 4 estão indicados os resíduos gerados no processo produtivo da indústria cerâmica, bem como os respetivos códigos LER.

Tabela 4 - Resíduos diretamente resultantes do fabrico de produtos cerâmicos (Decisão 2014/955/UE).

<b>Resíduos produzidos no fabrico de produtos cerâmicos</b>	<b>Código LER</b>
Resíduos de preparação da mistura (antes do processo térmico) – Caco cru	10 12 01
Partículas e poeiras	10 12 03
Lamas de bolos de filtração do tratamento de gases	10 12 05
Moldes fora de uso	10 12 06
<b>Resíduos de fabrico de peças cerâmicas, tijolos, ladrilhos, telhas e produtos de construção (após o processo térmico) – Caco cozido</b>	<b>10 12 08</b>
Resíduos sólidos do tratamento de gases contendo substâncias perigosas	10 12 09*
Resíduos sólidos do tratamento de gases não abrangidos em 10 12 09*	10 12 10
Resíduos de vitrificação contendo metais pesados	10 12 11*
Resíduos de vitrificação não abrangidos em 10 12 11*	10 12 12
Lamas do tratamento local de efluentes	10 12 13
Resíduos do fabrico de peças cerâmicas, tijolos ladrilhos, telhas e produtos de construção, sem outras especificações	10 12 99

Dos subsectores da indústria, a cerâmica de construção representa cerca de 90% dos resíduos produzidos resultantes do processo de fabrico, com a cerâmica estrutural (tijolo, abobadilha e telha) a produzir entre 90 000 e 100 000 toneladas, e o subsector de pavimentos e revestimentos, entre 70 000 e 80 000 toneladas (Andrade, 2004). Estes valores são referentes a um estudo realizado para a Região Centro em 2003, no entanto, atualmente deverão ser inferiores devido à recessão do setor. Os resíduos gerados são, essencialmente, constituídos de material cerâmico não conforme, antes e após os processos térmicos, ou seja, material cru ou cozido, como se encontra ilustrado na Figura 9.

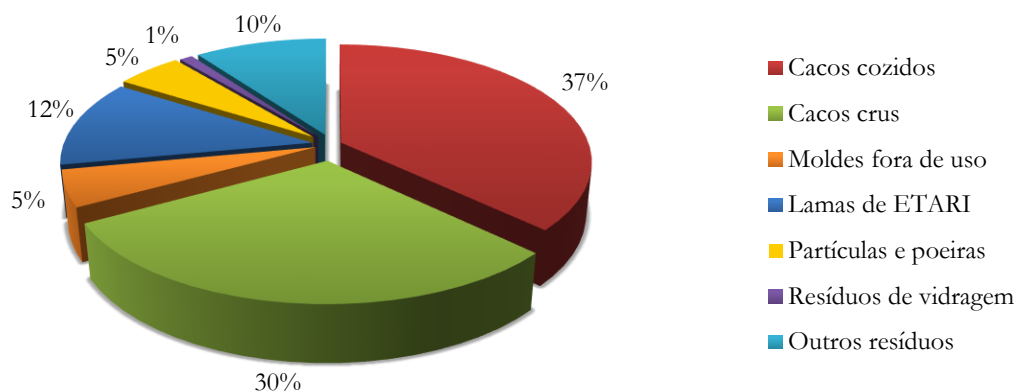


Figura 9 - Distribuição percentual dos resíduos diretamente resultantes do processo de fabricos de produtos cerâmicos (Andrade, 2004).

Com se pode verificar na Figura 9, o caco cozido rejeitado (material resultante do produto final que é rejeitado em pequenas percentagens que variam de 0,5% a 10% consoante o subsector da indústria cerâmica), representa cerca de 37% dos resíduos gerados no sector. Isto deve-se ao facto de os produtos cerâmicos fabricados poderem, por vezes, apresentar determinados defeitos, como por exemplo fendilhamento e empeno, que tornam o produto não comercializável, de acordo com requisitos de qualidade estabelecidos.

Para 2016, o CTCV estima, em termos de produção nacional de cacos cerâmicos sujeitos a tratamento térmico, as quantidades indicadas na Tabela 5. Esta estimativa foi realizada em função de produções e fatores de geração de resíduos específicos.

Tabela 5 - Produção nacional de cacos cozidos por subsector, em toneladas.

Cerâmica Estrutural	18 700
Pavimentos e Revestimentos	22 500
Louça Sanitária	15 000
Cerâmica Utilitária e Decorativa	9 000
Refratário	800

### 3. Enquadramento do objetivo de estudo

Como referido no subcapítulo 1.2., o objetivo final deste trabalho é apresentar uma proposta de classificação do resíduo caco cozido como subproduto. Para tal, foi necessário realizar primeiro duas tarefas:

- Ensaio de lixiviação a cacos cerâmicos cozidos

Foram recolhidas várias amostras de cacos cozidos dos diferentes setores da indústria cerâmica, nomeadamente, tijolo, telha, abobadilha, pavimento, revestimento, sanitário, e louça de faiança, porcelana e grés, perfazendo um total de 12 amostras. Estas foram enviadas para o Laboratório de Análise de Materiais do CTCV onde foram efetuadas, pela Eng.<sup>a</sup> Alice Oliveira (Responsável de laboratório), análises químicas ao caco e respetivo lixiviado. De seguida, foi realizada uma análise dos resultados, comparando os valores obtidos com os valores estipulados no Decreto-Lei n.º 183/2009, com o intuito de se aferir a sua natureza inerte.

- Potenciais destinos para o caco cozido

Foi realizado um estudo de trabalhos, desenvolvidos anteriormente por outros autores, no que concerne à incorporação de resíduos de cerâmica, oriundas de diversos sectores, no próprio e/ou outros processos produtivos, de modo a avaliar o seu efeito no produto fabricado.

Com a informação recolhida nos pontos referidos anteriormente, é então possível justificar o cumprimento dos requisitos estabelecidos no Decreto-Lei n.º 73/2011 para classificar o caco cozido como subproduto.

Este estudo foi realizado no âmbito de um projeto SIAC, promovido pela APICER e concretizado durante o período de estágio na unidade de Ambiente e Sustentabilidade do CTCV, no sentido de dar resposta à problemática da deposição de resíduos em aterro e desperdício de recursos, como também para promover sinergias e simbioses industriais, com o potencial para fabricar produtos eficientes do ponto de vista técnico, ambiental e económico.

### 3.1. Caracterização do caco cerâmico cozido

O caco cerâmico cozido é um resíduo que possui uma composição igual à do produto cerâmico comercializável, pois trata-se de um material que foi submetido ao mesmo processamento industrial, mas que não regista conformidade no âmbito das especificações de qualidade exigidas pelo cliente e pelas normas em vigor (Almeida, 2005).

Apesar do crescente investimento em soluções inovadoras na valorização deste resíduo, ainda existem algumas dificuldades na sua adoção, devido essencialmente a obstáculos legais, nomeadamente, na valorização por outros sectores ou atividades.

Quer se trate da simples deposição em aterro (opção apenas de recurso), quer da reutilização deste material em trabalho de construção ou enchimento para recuperação paisagística de pedreiras (operações já preconizadas na proposta de revisão da Diretiva Quadro dos Resíduos (COM(2014) 397 final, de 2 de Julho de 2014), apresentada pela Comissão Europeia no âmbito do Pacote da Economia Circular), a definição de objetivos mais exigentes de reciclagem de resíduos, conforme proposto pela Comissão, são considerações prévias para uma transição rumo a uma economia circular.

Assim, torna-se relevante assegurar que o caco cozido possui as características de um resíduo inerte, ou seja, um “resíduo que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não pode ser solúvel nem inflamável, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química, e não pode ser biodegradável, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entre em contacto de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana, e cuja lixiviabilidade total, conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e/ou subterrâneas.” (Decreto-Lei n.º 73/2011).

Para tal, foram realizadas análises químicas ao caco cozido e ao respetivo lixiviado, de acordo com a metodologia indicada no Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, resultantes do processo de fabrico dos diferentes subsectores da indústria cerâmica (tijolo, telha, abobadilha, pavimento, revestimento, sanitário e louça de faiança, porcelana e grés). Estas análises foram efetuadas no Laboratório de Análise de Materiais no CTCV, pela Eng.<sup>a</sup> Alice Oliveira no âmbito da atividade 5 (promoção de estratégias de economia circular) do projeto CER++ (Cerâmica + Produtiva + Eficiente), promovido pela APICER.

As várias amostras ensaiadas foram lixiviadas com água em condições definidas: adicionou-se a quantidade de água calculada após o teste de humidade, de forma a obedecer uma relação

líquido/sólido (L/S) = 10 L/kg, durante a extração. A lixiviação decorreu à temperatura de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , durante  $24 \text{h} \pm 0,5 \text{h}$ , num agitador a 10 rpm.

Após as 24 horas, os componentes não dissolvidos são separados por filtração e a concentração dos componentes a serem determinados são medidos no filtrado (eluato), usando métodos adequados.

Os resultados obtidos para a ecotoxicidade constam nas Tabelas 6 e 7 e são comparados, para efeitos de classificação de resíduos como inertes, não perigosos ou perigosos, com os valores constantes da Tabela 2 e 3 da Parte B do Anexo IV do referido diploma.

Estes valores permitem classificar os cacos dos produtos cerâmicos analisados essencialmente como “inertes”, de acordo com os critérios de aceitação estipulados no Decreto-Lei n.º 183/2009, embora alguns parâmetros para a abobadilha (arsénio e fluoreto) estejam dentro dos critérios dos resíduos “não perigosos”. Salienta-se que estes valores são consequência das matérias-primas utilizadas (argilas), as quais são naturais e possuem na sua composição química aqueles parâmetros (Almeida *et al.*, 2001).

Verifica-se, ainda, que a maioria dos parâmetros analisados encontram-se abaixo do limite de quantificação do equipamento, nomeadamente, parâmetros orgânicos (COT, BTEX, PCB, óleo mineral, HAP), metais pesados (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), cloretos, sulfatos e índice de fenol.

Nas Tabelas 6 e 7 encontram-se ainda os valores limite quantificados na legislação holandesa relativa ao solo – *Dutch regulations on dangerous substances – Soil quality decree*, os quais foram aplicados noutros estudos de lixiviação efetuados a materiais de construção. Estes limites, considerados como uma referência na área, apresentam-se genericamente menos exigentes que os da legislação portuguesa, para a deposição de resíduos inertes em aterro, consequência dos diferentes objetivos pretendidos.

Se considerarmos estes limites holandeses, os valores obtidos no estudo realizado encontram-se consideravelmente inferiores, com exceção de um valor de fluoreto, o qual é dependente das matérias-primas argilosas existentes no solo do nosso país.

Tabela 6 - Análise química do caco cozido (CTCV, 2017).

Parâmetro (mg/kg)	Valor obtido												Valor limite	
	Tijolo	Telha 1	Telha 2	Abobadilha	Pav/Rev 1	Pav/Rev 2	Pav/Rev 3	Pav. extrudido	Sanitário	Louça Faiança	Louça Porcelana	Louça Grés	DL 183/2009	Holanda
COT	-	-	<10 000 <sup>l.q.</sup>	<10 000 <sup>l.q.</sup>	<3 000 <sup>l.q.</sup>	<500 <sup>l.q.</sup>	<500 <sup>l.q.</sup>	<10 000 <sup>l.q.</sup>	<10 000 <sup>l.q.</sup>	<10 000 <sup>l.q.</sup>	<10 000 <sup>l.q.</sup>	<10 000 <sup>l.q.</sup>	30 000	-
BTEX	-	-	<1,2 <sup>l.q.</sup>	<1,2 <sup>l.q.</sup>	<5 <sup>l.q.</sup>	0,068	<0,16 <sup>l.q.</sup>	<1,2 <sup>l.q.</sup>	<1,2 <sup>l.q.</sup>	<1,2 <sup>l.q.</sup>	<1,2 <sup>l.q.</sup>	<1,2 <sup>l.q.</sup>	6	4,75
PCB	-	-	<0,024 <sup>l.q.</sup>	<0,023 <sup>l.q.</sup>	<0,1	<0,01 <sup>l.q.</sup>	<0,021 <sup>l.q.</sup>	<0,022 <sup>l.q.</sup>	<0,022 <sup>l.q.</sup>	<0,024 <sup>l.q.</sup>	<0,022 <sup>l.q.</sup>	<0,023 <sup>l.q.</sup>	1	0,5
Óleo Mineral	-	-	<200 <sup>l.q.</sup>	<200 <sup>l.q.</sup>	<0,1	<50 <sup>l.q.</sup>	<100 <sup>l.q.</sup>	<200 <sup>l.q.</sup>	<200 <sup>l.q.</sup>	<200 <sup>l.q.</sup>	<200 <sup>l.q.</sup>	<200 <sup>l.q.</sup>	500	500
HAP	-	-	<0,072 <sup>l.q.</sup>	<0,070 <sup>l.q.</sup>	<0,1	<0,4 <sup>l.q.</sup>	<0,8 <sup>l.q.</sup>	<0,066 <sup>l.q.</sup>	<0,066 <sup>l.q.</sup>	<0,073 <sup>l.q.</sup>	<0,066 <sup>l.q.</sup>	<0,070 <sup>l.q.</sup>	100	50

< l.q. – inferior ao limite de quantificação

Pav/Rev: Pavimento/Revestimento

COT: Carbono Orgânico Total

BTEX: Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno

PCB: Policlorobifenilos 7 congêneres

HAP: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Tabela 7 - Análise química do eluato do caco cozido (CTCV, 2017).

Parâmetro (mg/kg)	Valor obtido												Valor limite DL 183/2009			Valor limite Holanda
	Tijolo	Telha 1	Telha 2	Abobadilha	Pav/Rev 1	Pav/Rev 2	Pav/Rev 3	Pav. extrudido	Sanitário	Louça Faiança	Louça Porcelana	Louça Grés	Inertes	Não perigosos	Perigosos	
pH (Escala de Sorensen)	-	7,1	7,1	6,9	-	-	-	7,3	6,2	7,5	6,1	6,5	-	-	-	-
Condutividade (25°C) (µS/cm)	-	34,5	34,4	47,1	-	-	-	29	4,3	42	4,5	7,3	-	-	-	-
Arsénio (As)	0,26	0,28	<0,10 <sup>lq</sup>	0,56	<0,02 <sup>lq</sup>	0,0096	0,0096	<0,10 <sup>lq</sup>	<0,10 <sup>lq</sup>	0,16	<0,1 <sup>lq</sup>	<0,1 <sup>lq</sup>	0,5	5	25	0,9
Bário (Ba)	0,43	0,483	0,337	0,640	<1,8 <sup>lq</sup>	0,097	0,16	0,75	2,52	1,21	0,74	0,986	20	100	300	22
Cádmio (Cd)	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	0,01	<0,003 <sup>lq</sup>	<0,003 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	0,04	2	5	0,04
Crómio (Cr)	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,5 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	0,07	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	0,5	20	70	0,63
Cobre (Cu)	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	0,016	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	<0,6 <sup>lq</sup>	2	50	100	0,9
Mercúrio (Hg)	<0,005 <sup>lq</sup>	0,005 <sup>lq</sup>	<0,005 <sup>lq</sup>	<0,005 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,002 <sup>lq</sup>	<0,002 <sup>lq</sup>	<0,005 <sup>lq</sup>	<0,005 <sup>lq</sup>	<0,005 <sup>lq</sup>	<0,005 <sup>lq</sup>	<0,0054 <sup>lq</sup>	0,01	0,5	2	0,02
Molibdénio (Mo)	<0,25 <sup>lq</sup>	0,092	0,059	0,195	<0,01 <sup>lq</sup>	0,02	0,021	0,368	0,062	0,11	0,09	0,17	0,5	10	30	1
Níquel (Ni)	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,4 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,25 <sup>lq</sup>	0,4	10	40	0,44
Chumbo (Pb)	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	0,015	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	0,07	<0,05 <sup>lq</sup>	0,5	10	50	2,3
Antimónio (Sb)	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	0,06	0,7	5	0,16
Selénio (Se)	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,02 <sup>lq</sup>	<0,02 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	<0,01 <sup>lq</sup>	0,1	0,5	7	0,15
Zinco (Zn)	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	1,6	0,13	<0,1 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	<0,2 <sup>lq</sup>	4	50	200	4,5
Cloreto	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	20	<6 <sup>lq</sup>	7,9	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	800	50 000	25 000	616
Fluoreto	9,7	9,9	4,3	20,9	0,32	<1,5 <sup>lq</sup>	<1,5 <sup>lq</sup>	<5 <sup>lq</sup>	<5 <sup>lq</sup>	<5 <sup>lq</sup>	<5 <sup>lq</sup>	<5 <sup>lq</sup>	10	250	500	18
Sulfato	247	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	5,4	5,5	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	<100 <sup>lq</sup>	1 000	20 000	50 000	1 730
Índice de fenol	<0,25 <sup>lq</sup>	<0,1 <sup>lq</sup>	0,19	<0,1 <sup>lq</sup>	0,29	0,03	<0,05 <sup>lq</sup>	<0,10 <sup>lq</sup>	<0,1 <sup>lq</sup>	<0,1 <sup>lq</sup>	<0,1 <sup>lq</sup>	<0,1 <sup>lq</sup>	1	-	-	1,25
COD	320	22	23	40	<50 <sup>lq</sup>	20	16	<20 <sup>lq</sup>	<20 <sup>lq</sup>	31	<20 <sup>lq</sup>	22	500	1 000	1 000	-
SDT	1 180	230	320	900	80	110	230	420	910	260	190	430	4 000	60 000	100 000	-

< l.q. – inferior ao limite de quantificação; Pav/Rev: Pavimento/Revestimento; COD: Carbono Orgânico Dissolvido; SDT: Sólidos Dissolvidos Totais.

O Decreto-Lei n.º 183/2009 classifica como inerte os resíduos de construção e demolição (RCD) com o código LER 17 01 02 (tijolos), 17 01 03 (ladrilhos telhas e materiais cerâmicos) e 17 01 07 (misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos), referentes a resíduos de construção e demolição selecionados (de acordo com a Tabela 1 da Parte B do Anexo IV – Lista de resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes sem necessidade de ensaios).

No entanto, não refere diretamente os materiais à saída da unidade industrial cerâmica (uma fração constituinte dos RCD) que, pelas razões óbvias, também terão que manter essa classificação. No diploma salientam que os materiais de construção cerâmicos (por exemplo, telhas e tijolos) oriundos de demolições poderão estar agregados a outros materiais utilizados na construção como betão, metal, tintas, etc. Tecnicamente, parece mais coerente que, para além de abranger esses códigos LER (17 01 02, 17 01 03 e 17 01 07), deveria incluir também o código 10 12 08, referente a resíduos do fabrico de peças cerâmicas, tijolos, ladrilhos, telhas e produtos de construção após o processo térmico (caco cozido), já que a sua composição (igual à do material cerâmico de construção) e efeitos no meio ambiente é bem conhecida e o resíduo possui uma composição bem definida.

Por outro lado, seriam evitados custos adicionais inerentes à caracterização sistemática deste tipo de materiais; perdas de tempo com aspetos burocráticos legais (preenchimento de guias e mapas de resíduos exigido por muitas das entidades oficiais quando os resíduos são utilizados na regularização ou reparação dos acessos aos próprios barreiros, muitas vezes localizados nas imediações das fábricas), assim como, onerosos processos de contraordenação associado à cedência de caco cozido a operadores que não sejam gestores autorizados de resíduos (Almeida *et al.*, 2016).

Pelo exposto, pode-se verificar que a deposição de cacos cerâmicos cozidos diretamente nos solos não gera riscos para o meio ambiente, podendo ser mesmo um dos materiais mais adequados para a recuperação de alguns caminhos, entre os quais os de acessos às explorações de matérias-primas argilosas, campos de ténis, enchimento de obras de construção civil, recuperação em jardins, etc., contribuindo para o fecho do ciclo de vida do produto, facto que sustenta a proposta da Comissão na versão revista da Diretiva Quadro dos Resíduos.

Com a publicação da Diretiva 2008/98/CE, de 19 de novembro (Diretiva Quadro de Resíduos), do Parlamento Europeu e do Conselho, a União Europeia estabeleceu para 2020

a meta de 70% de preparação de reutilização, reciclagem e valorização de outros materiais, incluindo operações de enchimento utilizando resíduos como substituto de outros materiais, de resíduos de construção e demolição não perigosos, com exclusão de materiais naturais definidos na categoria 17 05 04 da lista de resíduos (solos e rochas não contendo substâncias perigosas).

Entre 2011 e 2012, o CTCV desenvolveu um estudo de quantificação de substâncias libertadas dos produtos cerâmicos para o meio aquoso, de empresas cerâmicas representativas de dois subsectores (ladrilhos e telhas), tendo sido desenvolvida uma metodologia de identificação das substâncias contidas nos materiais cerâmicos que possam migrar para a água, bem como as quantidades de migração, de produtos tal qual.

As telhas (15 amostras) e ladrilhos (25 amostras) em questão foram caracterizados, através de ensaios de lixiviação sucessivos (8 ensaios) com o teste de difusão (teste tanque em ambiente controlado), com um agente de lixiviação mais agressivo (ácido nítrico), para determinação dos vários parâmetros indicativos da libertação das substâncias para o meio aquoso, com base na norma EA NEN 7375:2004 (amostragem e metodologia de determinação).

O princípio do teste de difusão é similar à lixiviação dos componentes inorgânicos e orgânicos de materiais monolíticos e moldados, sob condições aeróbias, durante 64 dias. Tendo sido levado a cabo em 8 estágios, numa gama de temperatura entre os 18°C e os 22°C e medidas as concentrações dos componentes lixiviados nos sucessivos eluatos.

Os vários eluatos amostrados foram sujeitos a vários métodos de ensaio para determinação da concentração das várias substâncias pretendidas (eletrometria, gravimetria, espectrofotometria de absorção molecular, potenciometria, espectrofotometria de absorção atómica, espectrofotometria de emissão por plasma, cromatografia gasosa, espectrofotometria de infravermelhos).

Das várias análises realizadas resultaram as concentrações dos parâmetros indicativos da libertação das substâncias para o meio aquoso, nos 8 eluatos amostrados, para cada produto cerâmico, os quais foram comparados com os valores limites para admissão em aterro (Decreto-Lei n.º 183/2009), tendo em conta que em Portugal não existe nenhuma referência legislativa sobre lixiviação de produtos de construção.

Nas Tabelas 8 e 9 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para os dois tipos de produtos, ladrilhos e telhas.

Tabela 8 - Resumo dos parâmetros obtidos nos vários eluatos do subsetor dos ladrilhos (CTCV, 2012).

Parâmetro (mg/Kg)	Pavimento (Porcelânico) Grupo BIa			Pavimento (Grés) Grupo BIb		Pavimento (Extrudido) Grupo A1a	Revestimento Grupo BIII	Valor limite DL 183/2009		
	Min	Max	Med.	Min	Max	-	-	Parâmetros orgânicos		
COT	-	-	-	-	-	-	-	30 000		
BTEX	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	6		
PCB	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1		
Óleo Mineral	17	27	21	25	30	19	28	500		
HAP	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	100		
								Lixiviação		
								Inertes	Não perigosos	Perigosos
As	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,5	5	25
Ba	19	30	24	28	33	21	31	20	100	300
Cd	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	2	5
Cr	0,03	0,1	0,04	0,05	0,1	0,03	0,8	0,5	20	70
Cu	0,4	0,6	0,5	0,6	0,7	0,4	0,6	2	50	100
Hg	0,03	0,05	0,04	0,05	0,06	0,03	0,05	0,01	0,5	2
Mo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	10	30
Ni	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	10	40
Pb	0,03	0,1	0,04	0,05	0,1	0,03	0,05	0,5	10	50
Sb	0,06	0,58	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,7	5
Se	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	7
Zn	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	4	50	200
Cloretos	19	33	25	28	33	60	31	800	50 000	25 000
Fluoretos	1	1	1	1	1	1	4	10	250	500
Sulfatos	62	100	79	94	110	70	103	1 000	20 000	50 000
Índice de Fenol	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1	-	-
COD	-	-	-	-	-	-	-	500	1 000	1 000
SDT	-	-	-	-	-	-	-	4 000	60 000	100 000

Min. – Mínimo; Máx. – Máximo; Med. – Mediana.

No caso dos ladrilhos verificou-se que os parâmetros bário, crómio e mercúrio, e nas telhas, os parâmetros arsénio, bário, mercúrio e fluoretos, apresentam valores de lixiviação que a título exemplificativo, não se enquadram nos aterros de resíduos inertes, mas nos resíduos não perigosos. Isto deve-se à aplicação dos limites nacionais de deposição em aterro que se destinam a resultados com outro tipo de ensaio significativamente menos agressivo/exigente (água e não ácido).

Tabela 9 - Resumo dos parâmetros obtidos nos vários eluatos do subsector das telhas (CTCV, 2012).

Parâmetro (mg/Kg)	Telhas "normais" - não vidrados			Telhas - vidrado ou engobado			Valor limite DL 183/2009		
	Min	Max	Med.	Min	Max	Med.	Parâmetros orgânicos		
COT	-	-	-	-	-	-	30 000		
BTEX	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	6		
PCB	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1		
Óleo Mineral	28	34	29	27	35	32	500		
HAP	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	100		
							Lixiviação		
							Inertes	Não perigosos	Perigosos
As	0,1	1,3	0,2	0,1	0,4	0,1	0,5	5	25
Ba	31	38	32	30	38	35	20	100	300
Cd	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	2	5
Cr	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,5	20	70
Cu	0,6	0,8	0,6	0,6	0,8	0,7	2	50	100
Hg	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,01	0,5	2
Mo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	10	30
Ni	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	10	40
Pb	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,5	10	50
Sb	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,7	5
Se	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	7
Zn	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	4	50	200
Cloretos	31	38	32	30	38	35	800	50 000	25 000
Fluoretos	1	13	5	3	25	5	10	250	500
Sulfatos	102	261	111	103	256	127	1 000	20 000	50 000
Índice de Fenol	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1	-	-
COD	-	-	-	-	-	-	500	1 000	1 000
SDT	-	-	-	-	-	-	4 000	60 000	100 000

Min. – Mínimo; Máx. – Máximo; Med. – Mediana.

Salienta-se que o tipo de ensaio realizado é mais agressivo por ser realizado com ácido em vez de água, com o intuito de representar as condições mais desfavoráveis possíveis do meio a que os produtos poderão estar sujeitos, sendo referentes a oito lixiviações sucessivas.

### 3.2. Potenciais destinos do caco cerâmico cozido

A produção de quantidades significativas de caco cozido na indústria cerâmica resultantes do fabrico de elevadas quantidades de materiais cerâmicos, decorre de não conformidades no processo, tipicamente entre os 0,5 a 10% consoante os subsectores industriais e o grau de automatização existentes, sendo as baixas percentagens de caco associadas à produção de materiais cerâmicos de construção, como o tijolo, abobadilha, telha e pavimento e revestimento cerâmico.

Esta situação proporciona um contínuo estudo e desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações, não só com o intuito de solucionar problemas ambientais, mas também, para encontrar novas sinergias e simbioses industriais que possam promover estratégias de economia circular, que contribuam para novos ciclos de vida de novos produtos de diferentes características e potenciais de utilização.

As soluções de valorização dos resíduos cerâmicos são várias e diversos sectores industriais têm demonstrado uma grande disponibilidade para os incorporar nos seus processos produtivos, assim como na própria pasta cerâmica, substituindo total ou parcialmente a areia adicionada à mistura. A utilização destes resíduos como inertes, após moagem, na pavimentação de alguns caminhos de acesso às unidades extrativas (barreiros), em arruamentos, como material de enchimento na construção civil e na pavimentação de campos de ténis (designados campos de terra batida), ou a utilização como subproduto na indústria cimenteira, são exemplos de soluções de reciclagem possíveis (Almeida, 2005).

### **3.2.1. Reutilização no processo produtivo**

Uma das possíveis soluções para valorização do caco cerâmico é a sua reincorporação no próprio processo produtivo, possuindo vantagens evidentes a nível económico e ambiental, sendo por isso uma prática crescente em algumas empresas.

Os resíduos produzidos nas etapas prévias à cozedura (caco verde e caco seco) podem ser reincorporados a 100% no processo produtivo (nas empresas dotadas de sistemas de preparação de pastas), não chegando a constituir resíduos, mas antes subprodutos ou desperdícios (visto que já incorporam alguma energia e tempo).

Também se tem verificado alguma reutilização de caco cozido no processo, através da sua moagem a uma granulometria adequada e posterior incorporação na preparação da pasta cerâmica, substituindo total ou parcialmente os materiais arenosos adicionados à mistura. Apresenta benefícios a nível da estabilidade dimensional dos produtos cozidos, sendo que as expansões finais são muito pouco sensíveis à quantidade de resíduo incorporado. Contudo, esta adição afeta significativamente as propriedades mecânicas dos produtos seco e cozido (redução da resistência mecânica), não podendo ultrapassar, em média, os 10% da composição final da pasta (Bastos, 2008).

No entanto, esta prática é ainda reduzida a nível nacional atendendo às características técnicas e tecnológicas exigidas para os materiais cerâmicos, à necessidade da constância das propriedades dos cacos incorporados, e necessidade adicional de moagem (uma vez que nem

todas as empresas dispõem da secção de preparação de pasta dotada de infraestruturas adequadas) (Almeida *et al.*, 2016). Assim, é necessário procurar e avaliar outras opções para valorizar em maior escala os resíduos cerâmicos cozidos.

### **3.2.2. Indústria da Construção Civil**

Os impactes associados ao fornecimento de recursos minerais naturais para a atividade industrial são cada vez maiores, tanto a nível ambiental como a nível económico. Neste contexto, torna-se interessante promover a utilização de desperdícios (resíduos e/ou subprodutos) de sectores industriais como o da cerâmica, em matérias-primas alternativas no sector da construção civil, em substituição de matérias-primas virgens, diminuindo o impacte ambiental e custos associados.

Têm vindo a ser efetuadas diversas investigações no sentido de avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos cerâmicos (caco cozido) em diversos tipos de materiais de construção civil, nomeadamente, na produção de cimento, argamassas, betões e materiais para pavimentos betuminosos. Os estudos realizados consistem, sobretudo, na determinação de propriedades específicas dos materiais com incorporação de cerâmicos, com o objeto de comparar a sua performance com o material convencional.

#### **3.2.2.1. Cimento**

O cimento é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem de clínquer, e consiste num dos materiais de construção mais utilizados na construção civil (cimento Portland), devido à elevada resistência mecânica adquirida pela ação exclusiva da água. Adições pozolânicas ao cimento comum conferem à mistura uma alta impermeabilidade e, conseqüentemente, maior durabilidade, resultantes de uma hidratação lenta com baixa libertação de calor. Estes materiais pozolânicos contêm elevados teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que, ao reagir com hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , na presença de água, dão origem a silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis pela resistência mecânica do cimento.

A utilização de cimentos Portland pozolânicos ou substituição parcial do cimento Portland por pozolanas tornou-se cada vez mais comum na produção de argamassas e betão, levando à procura de fontes alternativas às naturais. As pozolanas artificiais são materiais originados de tratamento térmico ou como subprodutos industriais, destacando-se as argilas calcinadas e cinzas volantes.

A argila em forma crua não possui propriedades pozolânicas, no entanto, por tratamento térmico, a estrutura cristalina das argilas é destruída, formando uma estrutura sílica-alumina ( $Al_2SiO_5$ ) amorfa e, por isso, com potencial pozolânico (Ay e Unal, 2000). Os produtos cerâmicos são constituídos por materiais naturais que contêm elevadas percentagens de argila. Estas, através de um processo de desidratação, seguida por uma cozedura a temperaturas controladas, adquirem as propriedades características da argila cozida. Ou seja, o processo de fabrico dos materiais cerâmicos requer elevadas temperaturas de cozedura que podem ativar a argila, conferindo-lhes propriedades pozolânicas (Juan *et al.*, 2010).

Vários autores investigaram a potencialidade pozolânica do caco cerâmico cozido tendo em conta a temperatura utilizada no processo da cozedura e o seu efeito no desempenho geral do cimento, contribuindo para a reutilização dos resíduos gerados nos processos de fabrico do sector. A maioria dos autores tem vindo a confirmar a potencialidade pozolânica deste tipo de materiais, desempenhando, assim, um papel importante como matéria-prima na indústria da construção civil. Na Tabela 10 apresenta-se o resumo de alguns exemplos, os quais se descrevem de seguida.

Tabela 10 – Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de cimento.

Autores (ano)	Material adicionado	Material substituído	Destino	% Incorporação	Principais resultados
Ay e Unal (2000)	Ladrilhos	Clínquer	Produção de cimento	35%	Cumprir os requisitos da norma de especificação dos cimentos.
Puertas <i>et al.</i> (2008, 2010)	Ladrilhos de cerâmica vermelha e branca			12% (vermelha) 15% (branca) 10% (ambas)	Cumprir os requisitos da norma de especificação dos cimentos, sendo desnecessária a separação dos resíduos.
Lavat <i>et al.</i> (2009)	Telhas			20-30%	Não afeta o comportamento do cimento de forma significativa.
Medina <i>et al.</i> (2013a)	Cerâmica Sanitária e RCD			20% (RCD) 10% (ambos)	Adição de RCD aumenta a resistência às tensões de corte e adianta o processo de hidratação, ao contrário do que acontece com a adição da cerâmica sanitária.

Ay e Unal (2000) estudaram a possibilidade de incorporação de resíduos de ladrilhos, produzidos a 1100-1200°C, em cimento Portland, enquanto pozolanas. O clínquer foi substituído em 25, 30, 35 e 40 % pelo resíduo e foram determinadas as propriedades

pozolânicas, recorrendo a ensaios de tempo de presa, estabilidade dimensional, granulometria, massa volúmica, superfície específica e resistência mecânica. Verificaram que até 35% de incorporação daquele resíduo, as misturas cumprem os requisitos da norma europeia de especificação dos cimentos (NP EN 197-1:2012).

Puertas *et al.* (2008, 2010) estudaram diversas misturas cruas para preparação de clínquer e de cimento com incorporação de resíduos de ladrilho de cerâmica vermelha e branca. Verificaram que as misturas cumprem os requisitos da norma de especificação de produto correspondente. Os resultados obtidos para a mistura composta pelos dois tipos de cerâmica foram bastante satisfatórios, o que torna desnecessária a separação destes resíduos.

Lavat *et al.* (2009) estudaram o comportamento pozolânico de resíduos de telhas (cozidas a 950-1000°C), para a produção de cimento composto, tendo-se preparado diversas misturas com incorporação até 30%. Foi possível confirmar a potencialidade pozolânica do resíduo e avaliar a sua resistência mecânica. Verificaram que para uma substituição de 20 % a 30 % do clínquer pelo resíduo de cerâmica não afeta de forma significativa o seu comportamento.

Medina *et al.* (2013a) estudaram o comportamento de misturas de cimentos com cerâmica sanitária e RCD (resíduos de construção e demolição), para a produção de cimento comercial. Caracterizaram o comportamento mecânico e reológico das misturas e verificaram que a adição de cerâmica reduz a resistência às tensões de corte e retarda o processo de hidratação, ao contrário do que acontece com a adição de RCD.

De acordo com Juan *et al.* (2010) e Zimbili *et al.* (2014), as temperaturas de cozedura utilizadas na produção do material cerâmico são adequadas para potenciar a atividade pozolânica. Assim, pode-se afirmar que, os materiais cerâmicos rejeitados (cacos cozidos), também possuem características adequadas para uso como materiais pozolânicos, uma vez que as temperaturas de cozedura aplicadas no fabrico são ideais para ativar as argilas a partir do qual eles são constituídos.

### **3.2.2.2. Argamassas**

Além da utilização do caco cozido como pozolana, para redução do teor de clínquer, na produção de argamassa, também é possível aplicá-lo como agregado fino, ou seja, substituir total ou parcialmente os agregados naturais por agregados de origem cerâmica, com uma granulométrica idêntica. O preenchimento dos poros (efeito filler) da argamassa convencional, através da adição de materiais cerâmicos finos, pode originar argamassas mais compactas, isto é, com melhores características mecânicas. Seguidamente são indicados

alguns exemplos de estudos referentes a este tópico, os quais se encontram resumidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de argamassas.

Autores (ano)	Material adicionado	Material substituído	Destino	% Incorporação	Principais resultados
Nacéri e Hamina (2009)	Tijolos	Clínquer	Argamassas (de cimento)	10%	Melhoria nas características mecânicas da argamassa.
Silva <i>et al.</i> (2009)	Pó de tijolo de barro vermelho			10%	Melhoria no desempenho geral da argamassa.
Pereira de Oliveira <i>et al.</i> (2012)	Telhas e tijolos			30%	Não causa efeitos prejudiciais no comportamento da argamassa.
Matias <i>et al.</i> (2014)	Telhas e tijolos	Agregados/Ligantes	Argamassas (de cal aérea)	100%	A resistência mecânica é superior comparativamente à argamassa de referência.
Ferreira (2014)	Azulejos cerâmicos vidrados	Ligante		20%	Melhorias em todos os parâmetros avaliados.
Higashiyama <i>et al.</i> (2012)	Isoladores elétricos cerâmicos	Agregados naturais finos (areia)	Argamassas	20%	Aumento da resistência à compressão e da resistência a cloretos.
Ladesma <i>et al.</i> (2015)	Alvenaria (tijolos)			50%	Argamassa viável para utilização interior.
Yacine <i>et al.</i> (2016)	Ladrilhos, azulejos e louças sanitárias			50%	Melhor performance comparativamente à argamassa convencional.

Nacéri e Hamina (2009) investigaram a potencialidade pozolânica do resíduo de tijolo enquanto substituto do cimento em argamassas. Prepararam misturas com diferentes percentagens de substituição do clínquer (até 20%) e, para além das propriedades químicas e físicas dos materiais, analisaram a microestrutura das argamassas e determinaram as suas resistências mecânicas, em diferentes períodos de cura. Com este estudo, confirmaram a potencialidade pozolânica do resíduo de tijolo para produção de cimentos pozolânicos. Os resultados obtidos mostram que uma substituição até 10% dos resíduos de tijolos melhora as características mecânicas da argamassa.

Silva *et al.* (2009), com o intuito de reduzir a quantidade de cimento utilizado na produção de argamassas de cimento, avaliaram a viabilidade da substituição deste por resíduos de tijolo

de barro vermelho (após moagem). Foram avaliados os parâmetros relativos à resistência mecânica, absorção da água, retração, permeabilidade ao vapor de água e durabilidade para uma incorporação até 10%. Os resultados mostraram que uma substituição de 10% dos agregados melhora o desempenho geral da argamassa, com exceção dos parâmetros relativos à retração e à permeabilidade ao vapor de água. As diferenças apresentadas para estes dois parâmetros, comparativamente à argamassa convencional, foram consideradas insignificantes.

Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012) recolheram telhas e tijolos de cerâmica, produzidos a temperaturas de 1100 a 1200°C e 800 a 1000°C, respetivamente. Foi analisada viabilidade da incorporação destes materiais em argamassas de cimento. A pozolanicidade foi avaliada através de ensaios de resistência à compressão, sendo que esta foi detetada apenas para o caso das telhas. Verificaram que cerca de 30% do clínquer pode ser substituído por este resíduo (com uma granulometria de 45-75mm) na produção da argamassa, sem causar efeitos prejudiciais ao seu comportamento.

Matias *et al.* (2014) recolheram e caracterizaram resíduos de indústrias cerâmicas da Região Centro de Portugal, relativamente aos processos de produção e propriedades mecânicas e químicas. Estes resíduos foram incorporados em argamassas de cal aérea como agregados ou ligantes, sendo posteriormente analisado o seu efeito no comportamento mecânico da argamassa. A resistência mecânica das argamassas preparadas com resíduos foi superior comparativamente à argamassa de referência sem resíduos, independentemente da percentagem de substituição, distribuição do tamanho das partículas (poeiras ou partículas granulares) e do tipo de material cerâmico. Os resíduos com um tratamento térmico a temperaturas de 900°C a 1100°C revelaram sinais de pozolanicidade.

Ferreira (2014) explora a viabilidade da incorporação de resíduos de azulejos cerâmicos vidrados em argamassas, destinadas a condições severas de humidade e salinidade. Foram formuladas argamassas de cal aérea com diferentes teores de substituição do ligante, submetidas a diferentes condições de cura. Foi feita a caracterização física, química, mineralógica e mecânica de modo a avaliar o seu desempenho ao longo do tempo. Verificaram melhorias em todos os parâmetros avaliados até uma percentagem de substituição de 20%. Estas melhorias estão associadas ao efeito de filler que provoca um aumento da compacidade das argamassas.

Higashiyama *et al.* (2012a, 2012b) analisaram argamassas com incorporação parcial de resíduos cerâmicos (10, 20 e 30% em peso) como substituto para agregados finos, e analisaram parâmetros referentes à resistência à compressão e resistência aos cloretos. Os resultados revelaram um aumento na resistência à compressão da argamassa com incorporação dos resíduos, exceto para uma incorporação de 30%. Também verificaram que a resistência a cloretos é significativamente maior comparativamente à argamassa com agregados finos naturais.

Ladesma *et al.* (2015) estudaram a quantidade máxima viável de resíduos de alvenaria que podem ser incorporados na produção de argamassas. Determinaram a resistência mecânica e a retração das argamassas com uma substituição de 0, 25, 50, 75 e 100% do agregado natural (areia) pelo resíduo. Os autores verificaram que se obtém uma argamassa viável para utilização interior com uma incorporação até 50%, sendo necessário realizar estudos específicos para melhorar a trabalhabilidade e diminuir a retração.

Yacine *et al.* (2016) tiveram como objetivo avaliar o efeito da incorporação de agregados reciclados finos provenientes de resíduos de ladrilhos, azulejos e louças sanitárias. Analisaram a resistência à compressão e flexão, a durabilidade em ambientes ácidos (HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), a elasticidade e as propriedades mecânicas. Verificaram que, com o aumento da percentagem de substituição até 50%, os parâmetros apresentam uma melhor performance comparativamente à argamassa convencional (com areia das dunas), principalmente em termos do aumento da resistência e diminuição da absorção da água. Também detetaram que as argamassas com incorporação destes resíduos são mais resistentes ao ataque de soluções de HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ou seja, apresentam maior durabilidade em ambientes ácidos.

### **3.2.2.3. Betão**

A vertente mais explorada na utilização de resíduos de cerâmica em materiais de construção, corresponde à produção de betões, ou seja, através da substituição total ou parcial de componentes de agregados grossos ou finos naturais por agregados de cerâmica com granulometria idêntica, nomeadamente, tijolos, azulejos e ladrilhos, cerâmica sanitária, entre outros.

A seguir são referidos alguns estudos relativos a este tema, salientando o tipo de material cerâmico utilizado como agregado e o seu efeito na performance do betão, apresentado a Tabela 12 um resumo desses estudos.

Tabela 12 - Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de betão.

Autores (ano)	Material adicionado	Material substituído	Destino	% Incorporação	Principais resultados
López <i>et al.</i> (2007)	Cerâmica Branca	Agregados finos	Betão	50%	Características similares ao betão convencional.
Debid e Kenai (2008)	Tijolos	Agregados finos e grosseiros (areia)		50% (finos) e 25% (grosseiros)	Não causa efeitos prejudiciais no comportamento do betão.
Cachim (2009)		Agregados de calcário natural		15%	Não causa efeitos prejudiciais no comportamento do betão
Jankovic <i>et al.</i> (2012)		Agregados		32,5%	Cumprir os requisitos da norma europeia para pavês de betão.
				65%	Cumprir os requisitos da norma europeia para lajetas de betão.
Guerra <i>et al.</i> (2009)	Cerâmica Sanitária	Agregados grosseiros naturais		5%	Melhoria significativa na tração do betão.
Medina <i>et al.</i> (2012a, 2012b, 2013b)				25%	Melhoria a resistência do betão à compressão e da resistência ao ciclo de gelo-degelo.
Anderson <i>et al.</i> (2014, 2016)	Azulejos e ladrilhos			100%	Efeitos mínimos nas propriedades mecânicas do betão.
Pacheco-Torgal e Jalali (2010)	Cerâmica vermelha e branca			Cimento	20%
Raval <i>et al.</i> (2013)	Ladrilhos	30%			Aumento da resistência mecânica. Não afeta as propriedades do betão em estado fresco e endurecido.
Sales <i>et al.</i> (2013)	Cerâmica vermelha	20%	Aumento da resistência mecânica.		
Suzuki <i>et al.</i> (2009)	Cerâmica porosa	Agregados grosseiros naturais	Betão de alto desempenho	40%	Reduz drasticamente a retração intrínseca do betão. Resistência à compressão superior às do betão convencional.

López *et al.* (2007) prepararam betões com incorporação de finos de cerâmica branca, provenientes de RCD e da indústria, e determinaram algumas das suas propriedades físicas e mecânicas. Verificaram que os betões preparados com diversas dosagens de resíduos com granulometria fina apresentam características mecânicas similares aos betões com agregado convencional.

Debied e Kenai (2008) desenvolveram betões com resíduos de tijolo em substituição parcial da fração grossa e da fração fina de areia natural. Determinaram algumas propriedades físicas e mecânicas como a porosidade, a permeabilidade à água e a retração e obtiveram resultados bastante satisfatórios para os betões com incorporação dos resíduos grossos com substituição parcial da areia até 25% e da fração fina até 50%.

Cachim (2009) avaliou as propriedades do betão com incorporação de tijolos em substituição dos agregados de calcário natural. Foram investigadas as propriedades relativas à trabalhabilidade e a densidade do betão em estado fresco, assim como também as resistências mecânicas à tração por flexão e à compressão, módulo de elasticidade e o comportamento tensão-deformação do betão em estado endurecido. Os resultados observados indicaram que os resíduos cerâmicos podem ser utilizados como substituto parcial dos agregados naturais sem redução das propriedades do betão para uma incorporação de 15% e com reduções de 20% com uma incorporação de 30%.

Jankovic *et al.* (2012) avaliaram a viabilidade de incorporação de resíduos de tijolos em lajetas e pavês de betão. Verificaram que, com a incorporação da cerâmica, os elementos estudados apresentam menor massa volúmica, com resistências mecânicas inferiores e absorção de água superiores. Contudo, para uma substituição de 32,5% do agregado natural por reciclado, o betão cumpre os requisitos das normas europeias para pavês de betão e, para uma percentagem de substituição de 65% são cumpridos os requisitos para latejas de betão.

Guerra *et al.* (2009) investigaram propriedades mecânicas e físicas do betão, onde diferentes porções de agregados grosseiros foram substituídos por cerâmica sanitária. Os resultados dos testes mostraram que o betão produzido não implica qualquer redução significativa na tração do betão. Pelo contrário, produz uma melhoria significativa para amostras com 5% de incorporação. No que diz respeito à resistência, o efeito dos resíduos mantém-se comparativamente ao betão convencional.

Medina *et al.* (2012a, 2012b, 2013b) analisaram a viabilidade da substituição de agregado grosso natural por material reciclado de sanitário, na produção de betão ecoeficiente.

Utilizando percentagens de substituição de 15, 20 e 25 %, verificaram que a substituição do agregado não só não interfere no processo de hidratação, como melhora a resistência do betão à compressão. Por outro lado, foi observado que a microestrutura na interface ligante-agregado é mais compacta no caso do betão com agregado de cerâmica. Também determinaram a resistência deste tipo de betões a ciclos de gelo-degelo, para as percentagens de substituição de 20 e 25 %, e observaram que o aumento da resistência aos ciclos de gelo-degelo é diretamente proporcional ao aumento da percentagem de substituição dos agregados, havendo, deste modo, uma melhoria representativa do comportamento dos betões.

Anderson *et al.* (2014, 2016) estudaram a substituição de agregados grosseiros naturais com azulejos e ladrilhos de três fontes diferentes na produção de betão. Os resultados mostram que o agregado natural pode ser substituído até 100% por estes materiais, com efeitos mínimos nas propriedades mecânicas do betão resultante. Os parâmetros referentes às resistências à compressão, tensão e flexão mostraram pequenas alterações, com apenas um ligeiro aumento no módulo de elasticidade. Verificaram que quando o método de preparação é adequado, os resíduos cerâmicos apresentam um grande potencial na produção de betão.

Pacheco-Torgal e Jalali (2010) analisaram a viabilidade da substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica de barro vermelho e por cerâmica branca com diferentes tratamentos térmicos na produção de betão. Verificaram que a substituição parcial de cimento por estes materiais melhora a performance dos betões, levando, por isso a que os betões apresentem durabilidades bastante satisfatórias.

Raval *et al.* (2013) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de diversas misturas de betão, utilizando resíduos cerâmicos como substituto parcial do cimento. Esta incorporação revelou um aumento da resistência mecânica até 30% de substituição do cimento sem afetar as propriedades do betão em estado fresco e em estado endurecido.

Sales *et al.* (2013) estudaram a utilização de pó de resíduo de cerâmica em substituição ao cimento Portland na produção de betão. Os ensaios de resistência mecânica à compressão mostraram que, aos 28 dias, houve redução de 11% dessa propriedade para a substituição de 10% do cimento; houve aumento de 11% para a substituição de 20% do cimento; e 17% de redução para a substituição de 40% do cimento. O módulo de elasticidade do betão não sofreu significativas variações, registando-se apenas um aumento de 8% para o betão com 20% de adição.

Suzuki *et al.* (2009) estudaram os efeitos da incorporação de agregado grosso de cerâmica, recolhido numa indústria local, no comportamento de betões de alto desempenho. Recorrendo especificamente a uma cura húmida e com 4 percentagens de substituição do agregado natural pelo agregado de cerâmica, verificaram que a incorporação deste material reduz drasticamente ou elimina totalmente (no caso de 40% de substituição do agregado) a retração intrínseca do betão, durante a cura. Consequentemente, os betões preparados nestas condições apresentam resistências à compressão sempre superiores às do betão convencional, mesmo a longo prazo.

### 3.2.2.4. Pavimentos betuminosos

De seguida são referidos alguns estudos referentes à incorporação de resíduos de cerâmica na produção de pavimentos cerâmicos, os quais se encontram resumidos na Tabela 13.

Tabela 13 - Principais resultados na reutilização de resíduos cerâmicos na produção de pavimentos betuminosos.

Autores (ano)	Material adicionado	Material substituído	Destino	% Incorporação	Principais resultados
Huang <i>et al.</i> (2009)	Resíduos cerâmicos	Agregados finos naturais	Betão	10%	Melhoria da resistência à compressão.
			Pavimentos	15%	Melhorias na deformabilidade, módulo de elasticidade e resistência à tração indireta.
Silvestre <i>et al.</i> (2013a, 2013b)	Ladrilhos e grés	Agregados	Misturas betuminosas para regularização de pavimentos	30%	Desempenho adequado para estradas com volume de tráfego médio a baixo.
Penteadó <i>et al.</i> (2016)	Ladrilhos e azulejos (porcelanato, porosa e grés)	Cimento Areia	Fabrico de blocos de pavimentação	20% (cimento) ou 30% (areia)	Adequado para estradas com volume de tráfego elevado.

Huang *et al.* (2009) analisaram a possibilidade de incorporar resíduos cerâmicos em betão e pavimentos asfálticos, em substituição dos agregados finos naturais. Efetuaram a caracterização mecânica e física das misturas, tendo verificado uma melhoria da resistência à compressão do betão com a introdução do resíduo. No entanto, também se verificou um aumento da absorção de água, sendo recomendado uma incorporação não superior a 10%. No caso dos pavimentos asfálticos foram também detetadas melhorias no desempenho, com incorporação até 15%, relativamente à deformabilidade, ao módulo de elasticidade dinâmico e à resistência à tração indireta.

Silvestre *et al.* (2013a, 2013b) avaliaram a viabilidade da incorporação de resíduos de ladrilhos de cerâmica e de grés em misturas betuminosas a quente, para camadas de regularização de pavimentos. Prepararam diversas misturas, nas quais o agregado natural foi parcialmente substituído pelos resíduos cerâmicos, e avaliaram o seu comportamento, em laboratório e *in situ*. Verificaram que a substituição até 30 % do agregado natural permite obter um desempenho adequado para estradas com volume de tráfego médio a baixo.

Penteado *et al.* (2016) investigaram o uso de resíduos resultantes do polimento de ladrilhos e azulejos como substituto parcial para o cimento e areia no fabrico de blocos de pavimentação de betão. A areia foi substituída por resíduos provenientes de três linhas de produção (porcelanato, cerâmica porosa e grés) utilizando percentagens de substituição até 30%. Também prepararam outra mistura de betão com o resíduo de porcelanato a substituir o cimento. Os blocos desenvolvidos foram sujeitos a uma análise nos parâmetros referentes à resistência à compressão, absorção da água e porosidade. Os resultados mostram que é possível substituir 30% do agregado fino ou 20% do cimento com resíduos resultantes do polimento de azulejos e fabricar blocos de pavimentação adequado para estradas com volume de tráfego elevado.

#### **3.2.2.5. Agregados**

Do ponto de vista da sustentabilidade e preservação ambiental, a incorporação de resíduos cerâmicos no fabrico de materiais para a construção civil, consiste numa forma ambientalmente correta de gerir o caco cozido. Neste sentido, é importante garantir a conformidade dos produtos de construção com a legislação estabelecida, assegurando a qualidade das infraestruturas em que estes são aplicados.

A caracterização e avaliação da conformidade dos “agregados cerâmicos”, efetuados a partir do caco cerâmico, para os fins desejados devem ser executadas segundo as Normas Europeias de Produto para os agregados (Tabela 14). Estas especificam as propriedades a ensaiar e os requisitos para as diferentes aplicações, assim como a classificação do agregado tendo em conta os resultados da caracterização.

As versões iniciais das normas harmonizadas dos agregados não incorporavam explicitamente no seu âmbito de aplicação os agregados reciclados. Em finais de 2007, no caso da EN 13 242, e no início de 2008, no caso da EN 12 620, estas normas passaram a explicitar estes agregados, tendo, em consequência disso, sido feitas algumas alterações, nomeadamente ao nível das categorias especificadas para a resistência à fragmentação e por

acréscimo de uma propriedade unicamente aplicável aos agregados reciclados e que consiste na classificação dos seus constituintes, determinada seguindo o procedimento de ensaio especificado pela norma EN 933-11 (Branco, 2009).

Tabela 14 - Lista de Normas Harmonizadas no âmbito do mandato M 125 - Agregados.

Referência	Título
EN 12 620	Agregados para betão
EN 13 043	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação
EN 13 055-1	Agregados leves – Parte 1: Agregados leves para betão, argamassa e calda de injeção
EN 13 055-2	Agregados leves – Parte 2: Agregados leves para misturas betuminosas e tratamentos superficiais e para aplicações em camadas de materiais não ligados ou ligados
EN 13 139	Agregados para argamassa
EN 13 242	Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária
EN 13 383-1	Enrocamentos – Parte 1: Especificações
EN 13 450	Agregados para balastro de via-férrea

O sector da construção civil é responsável por uma parte muito significativa dos resíduos produzidos, situação comum à generalidade dos vários países da União Europeia, nomeadamente Portugal. A deposição não controlada e o recurso a sistemas apoiados em tratamentos de fim de linha, constituem constrangimentos inerentes às características dos resíduos de construção e demolição (RCD) e do sector em causa.

Estas práticas, conducentes a situações ambientalmente indesejáveis e incompatíveis com os objetivos nacionais e comunitários em matéria de desempenho ambiental, deram origem a legislação específica para o fluxo dos RCD.

Em Portugal existe legislação específica sobre esta matéria, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, que estabelece o regime das operações de gestão de RCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação, e que transpõe a Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos.

Neste sentido, surgiram ainda especificações técnicas definidas pelo LNEC sobre RCD (Tabela 15) e respetivas aplicações, as quais traduzem as utilizações potenciais mais comuns

no sector da construção civil, permitindo dar resposta às principais necessidades dos operadores e agentes do sector.

Estas especificações estabelecem as condições de utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em obras de engenharia civil, permitindo assim minimizar o recurso a matérias-primas primárias e contribuir para a sustentabilidade na construção.

Além disso, a valorização dos RCD em obra, quer seja a obra de origem ou qualquer outra obra, de acordo com as especificações técnicas do LNEC, dando cumprimento ao disposto no artigo 7.º do Decreto-Lei n.º 46/2008, permite que os resíduos sejam utilizados e comercializados para as aplicações para que foram processados sem necessidade de licenciamento.

Tabela 15 - Especificações técnicas do LNEC para utilização de materiais provenientes de RCD.

Referência	Título
LNEC E 471 - 2009	Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos
LNEC E 472 - 2009	Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central
LNEC E 473 - 2009	Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos
LNEC E 474 - 2009	Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte
LNEC E 484 - 2016	Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em caminhos rurais e florestais
LNEC E 485 - 2016	Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em preenchimento de valas

### 3.2.3. Solos artificiais

Os solos artificiais são misturas compostas por materiais fabricados pelo Homem, mas que apresentam as características básicas de um solo gerado por processos naturais. Para produzir solos artificiais com as características físico químicas ideais, é necessário avaliar diversos tipos de matérias-primas tendo em conta as suas quantidades relativas.

O solo natural é constituído por uma fração sólida, nomeadamente, matéria mineral (areia, calcário, argila) e matéria orgânica, uma fração líquida, constituída por água e sais minerais dissolvidos e uma fração gasosa, isto é, a atmosfera do solo.

A aplicação dos resíduos cerâmicos supre as necessidades de matéria mineral, contudo, devido às suas características inertes e estéreis, será naturalmente necessária a adição de uma fonte de matéria orgânica à mistura (Ribeiro, 2009). Assim, a produção de solos apresenta não só, um elevado potencial de valorização de resíduos cerâmicos através da sua utilização na fração mineral do substrato, como também, para outro tipo de materiais (resíduos orgânicos).

### **3.3. Exemplos de aplicação**

Neste ponto são apresentados vários exemplos bem-sucedidos de inovação na indústria cerâmica decorrentes da reincorporação de resíduos e subprodutos no processo produtivo.

#### **Wienerberger – Steinzeug-Keramo**

O uso de matérias-primas recicladas a partir de resíduos de cerâmica, provenientes de materiais não conformes da indústria ou de resíduos construção e demolição, na produção de tijolos é tecnicamente viável, mas segundo a empresa, a viabilidade económica ainda tem de ser otimizada.

A Steinzeug-Keramo (empresa subsidiária da Wienerberger) utiliza material reciclado das suas próprias instalações e matérias-primas secundárias de fontes externas da sua produção. Todas as instalações reciclam os seus resíduos cerâmicos internos e utilizam material refratário reciclado.

O consumo de matérias-primas pode ser reduzido com a reciclagem do próprio desperdício cerâmico, e com a utilização de técnicas de ecodesign para o uso eficiente de recursos. A Steinzeug-Keramo minimiza o consumo de matérias-primas, reintroduzindo todos os resíduos de produção no processo de fabrico. No entanto, a viabilidade técnica depende dos tipos de materiais e das aplicações em causa.

O uso de matérias-primas secundárias como substituto das matérias-primas primárias é um desafio mais complicado. Embora o material residual das próprias instalações da Steinzeug-Keramo possa ser reciclado para a produção, devido ao seu elevado grau de pureza, o uso de material cerâmico secundário de fontes externas é muito mais complicado. Todos os

produtos Wienerberger podem ser reciclados até certo ponto, mas a percentagem de materiais reciclados utilizados na produção depende do material e da complexidade técnica do processo de reutilização. Por conseguinte, a taxa real de reciclagem depende da unidade de negócio em causa.

Os resíduos internos da produção, tais como produtos não conformes, são reutilizados no processo de produção após a preparação necessária. Isto aplica-se, em particular, aos tubos da Steinzeug-Keramo, certificados de acordo com a abordagem berço-a-berço. Na produção de tubos de grés também são utilizados resíduos de cerâmica da produção de pavimentos, telhas, ladrilhos, sanitários e outros produtos cerâmicos que não podem ser reutilizados no local.

### **Cerame-Unie**

De acordo com a Federação Europeia Cerame-Unie, em algumas empresas cerâmicas britânicas, cerca de 20% do material total utilizado na produção é proveniente de fontes alternativas, recicladas e secundárias, sendo que 200 mil toneladas de argila por ano são substituídas por materiais que, de outra forma, teriam sido rejeitados. O caco cru pode reutilizar-se e os cacos cozidos são moídos e usados como agregados na indústria de construção.

Os resíduos de construção e de demolição, incluindo resíduos de cerâmica e moldes de gesso utilizados em alguns processos, são amplamente utilizados na construção de estradas ou como agregados secundários. Na indústria refratária, 20% dos refratários utilizados são novamente reciclados em aplicações refratárias, 27% são reutilizados em aplicações não refratárias, 35% são dissolvidos durante o uso e apenas 18% permanecem como resíduos inutilizáveis.

Após a demolição de um edifício, os produtos de construção cerâmica (por exemplo, produtos cerâmicos de alvenaria, tijolos, abobadilhas, blocos cerâmicos, ladrilhos e louça sanitária) podem ser triturados e posteriormente utilizados como matérias-primas secundárias para diferentes aplicações, incluindo a construção de estradas, produção de cimento, aterros, campos de ténis, substrato para telhados verdes e agregados de betão. Os cacos cozidos resultantes das unidades de fabrico de tijolos e abobadilhas proveniente da demolição de edifícios também podem ser utilizados para substituir matérias-primas primárias no fabrico de um produto cerâmico equivalente.

A reciclagem de refratários após a sua fase de uso tornou-se o estado da arte na Europa, sendo que mais de 80% de todos os produtos refratários europeus são reciclados, reutilizados ou consumidos. Um fabricante alemão usa telhas, recolhidas no fim de vida de um edifício, para a produção de blocos cerâmicos. Estas telhas trituradas são adicionadas à mistura de matéria-prima sem perder as propriedades técnicas dos blocos. Como resultado, o fabricante utiliza menos material virgem no processo de produção. Um fabricante de tubos de grés vitrificado introduziu uma abordagem de berço-a-berço na produção de tubos cerâmicos. Não há perda de material na fase de produção, isto é, 100% de tubos não conformes são triturados e reincorporados no processo de fabrico. Os tubos vitrificados são compostos por 30-40% de matérias-primas secundárias, incluindo tubos cerâmicos partidos e materiais cerâmicos provenientes de pavimentos e revestimentos.

### **Indústria Cerâmica Portuguesa**

A grande maioria das empresas cerâmicas a nível nacional incorpora as poeiras e partículas de despoeiramento no seu processo de fabrico, desde que disponham de secção de preparação de pastas. Os resíduos da preparação da mistura podem também ser incorporados se forem constituídos por restos de materiais argilosos.

As empresas fornecedoras de matérias-primas e pastas, como as do grupo ADM (Adelino Duarte da Mota, SA; Mota Soluções cerâmicas, SA; Mota II – Soluções cerâmicas, SA) e as do grupo Lagoa, são exemplos de valorização de resíduos cerâmicos, nomeadamente, as poeiras e partículas de despoeiramento, lamas da ETARI e caco cerâmico, que são introduzidas na composição das suas misturas cerâmicas, as quais são, posteriormente, fornecidas aos vários tipos de setores cerâmicos e demais setores industriais. Estes são exemplos de abordagem de incorporação de simbioses e estratégias de economia circular, para cada tipologia de resíduo que se encontram autorizados a valorizar.

Existem algumas empresas nacionais que promovem a moagem do seu caco cozido (em moinhos existentes para outra tipologia de matérias-primas) e posteriormente reincorporam no seu processo de fabrico ou em processos de fabrico afins, diminuindo assim as necessidades de extração de matérias-primas para o processo de fabrico de materiais cerâmicos.

### **Cerâmica refratária**

As empresas portuguesas de fabricação de produtos cerâmicos refratários, como o caso da Cerâmica do Liz, SA., incorporam na sua composição cerâmica, além dos resíduos da sua própria produção (caco seco e cozido), outros resíduos gerados em várias empresas, com o intuito de valorizar os resíduos e reduzir a matéria-prima natural, destacando-se a chamote, cimento refratário (para betão) e cacos de grés.

Estes resíduos passam por uma pré-preparação onde são sujeitos a uma operação de moagem (em moinho de martelos), passagem numa britadeira e separação de calibres com recurso a uma sequência de peneiros vibratórios, antes de serem misturados com as matérias-primas naturais, de acordo com as especificações da empresa para a formulação de composições.

### **Cimenteira Nacional**

A cimenteira nacional, nomeadamente a CMP – Cimentos Maceira e Pataias, SA, incorpora no seu processo de fabrico, resíduos provenientes de diversos subsectores cerâmicos (caco de porcelana, faiança, pavimento e revestimento, sanitário e moldes de gesso) como matérias-primas secundárias (MPS), reduzindo desta forma o consumo de matérias-primas naturais e promovendo um destino final mais sustentável para os resíduos que, de outra forma, poderiam ter como destino a deposição em aterro, promovendo deste modo simbioses industriais de valorização de recursos.

### **Agregados**

Existem diversas empresas nacionais de agregados, como as Misturas Milenares, Lda., que incorporaram cacos cerâmicos para fabrico de agregados reciclados a serem utilizados na construção civil.

No setor da construção civil também existem diversas empresas nacionais que no fabrico dos seus agregados, incorporam cacos cerâmicos, são os chamados agregados reciclados que obedecem aos requisitos das normas anteriormente referidas, destacando-se com maior volume de incorporação a área do betão.

Tendo em conta que a cerâmica produz caco com diversas características e cores, as empresas de agregados não podem misturar os vários cacos recebidos, mas têm de proceder inicialmente a uma triagem pelo tipo de caco cerâmico, salientando-se que o caco de grés

porcelânico é o que apresenta maiores problemas no processo devido ao desgaste que provoca nos equipamentos.

### **3.4. Classificação de resíduo para subproduto**

No artigo 44º-A do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, republicado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, estabelecem-se requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos. Assim, “Podem ser considerados ‘subprodutos e não resíduos’ quaisquer substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo cujo principal objetivo não seja a sua produção quando verificadas as seguintes condições”:

- (a) Existir a certeza de posterior utilização da substância ou objeto;
- (b) A substância ou objeto poder ser utilizado diretamente, sem qualquer outro processamento que não seja o da prática industrial normal;
- (c) A produção da substância ou objeto ser parte integrante de um processo produtivo;
- (d) A substância ou objeto cumprir os requisitos relevantes como produto em matéria ambiental e de proteção da saúde e não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana, face à posterior utilização específica.

O mesmo diploma legal refere ainda que, na ausência de critérios comunitários, para efeitos da aplicação do disposto anteriormente, a Autoridade Nacional de Resíduos (ANR) pode, depois de ouvidos os operadores económicos diretamente interessados ou as suas estruturas representativas, definir os critérios que garantam o cumprimento das condições a verificar para que uma substância ou objeto seja considerado ‘subproduto’. Deste modo, para que determinada substância ou objeto possa ser considerado ‘subproduto’, os interessados, através das respetivas associações sectoriais ou individualmente, apresentam um pedido junto da ANR, o qual é decidido no prazo de 90 dias. Posteriormente, a ANR publicita no seu sítio na Internet os critérios que determinam o cumprimento das condições a verificar para que a substância ou objeto seja considerado ‘subproduto’, a lista dos interessados que obtiveram decisão favorável, bem como a informação relevante para a decisão adotada.

Precedente à definição existente no atual Regime Geral de Gestão de Resíduos, foi emitida pela Comissão Europeia uma comunicação, a COM (2007) 59, "Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu relativa a resíduos e subprodutos, que auxilia na distinção entre resíduo e subproduto. Assim sendo, além dos conteúdos integrantes do referido comunicado, no seu Anexo I são apresentados alguns exemplos destinados a ilustrar casos em que os materiais podem ser classificados como resíduos ou subprodutos, e no

Anexo II é apresentada uma árvore de decisão para a distinção entre resíduos e subprodutos (Figura 10).

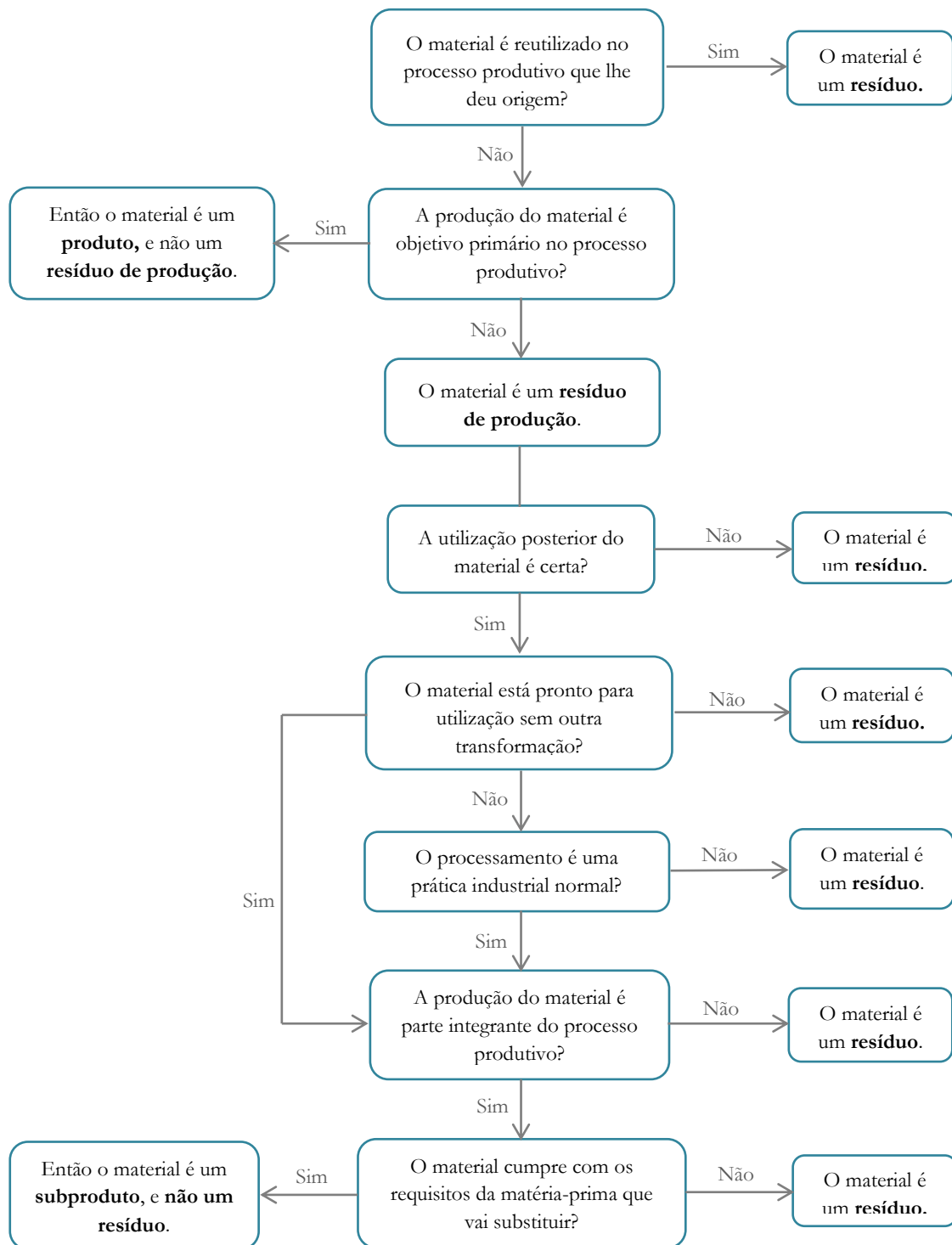


Figura 10 - Árvore de decisão para a distinção entre resíduos e subprodutos (adaptado de COM (2007) 59).

### **3.4.1. O caso de estudo**

Nos vários processos de fabrico do setor cerâmico, são gerados vários tipos de resíduos, na sua maioria, inertes ou não perigosos, sendo a maior percentagem de resíduos oriundos de produtos não conformes (produtos secos e cozidos), gerados ao longo do processo de fabrico.

A gestão de resíduos tem vindo a ser desenvolvida e melhorada pelas empresas dos diferentes subsectores da indústria cerâmica, tendo em conta a redução da utilização dos recursos naturais e a minimização ou mesmo a eliminação da deposição em aterro dos resíduos produzidos, privilegiando a sua reutilização e reciclagem, contribuindo, desta forma, para um desenvolvimento sustentável, extensão do ciclo de vida e estratégias que promovem a economia circular.

No que se refere aos produtos finais não conformes após a sua cozedura, caco cozido, os quais possuem a mesma composição/caraterísticas dos produtos finais colocados no mercado, as empresas procuram soluções para a sua valorização, as quais dependem do tipo de caco produzido e do subsector considerado.

As soluções de valorização do caco cozido têm sido várias e diversos setores industriais têm demonstrado disponibilidade para os incorporar nos seus processos produtivos, nomeadamente a construção civil, incorporando os cacos em cimento, argamassas, betão, pavimentos betuminosos e agregados, os solos artificiais e mesmo a recuperação de caminhos, enchimento de cotas e pavimentação de campos de ténis. Além destes setores, uma percentagem considerável destes cacos poderá ser incorporada na própria composição cerâmica.

Neste sentido, a APICER, através do CTCV elaborou o estudo referido anteriormente, para obter parâmetros de caracterização, de forma a contribuir para a reclassificação de resíduos, nomeadamente os cacos cozidos provenientes dos vários subsectores da cerâmica entre outros resíduos (poeiras e partículas de despoeiramento, etc.), para cumprir os requisitos do Decreto-Lei n.º 73/2011.

#### **3.4.1.1. Justificação do cumprimento dos requisitos**

Apesar dos vários estudos realizados com sucesso e incorporações já realizadas em vários setores industriais, existem ainda diversos constrangimentos legais e alguns técnicos na sua implementação na prática.

Neste contexto, o caco cozido cerâmico, as poeiras e partículas de despoeiramento, até hoje classificados como resíduos, cumprem de forma inequívoca os requisitos definidos pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, para poderem ser considerados subprodutos e não resíduos da produção, uma vez que são “quaisquer substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo cujo principal objetivo não seja a sua produção quando verificadas as seguintes condições:

**(a) “Existir a certeza de posterior utilização da substância ou objeto;”**

Os cacos cozidos, os resíduos da preparação da mistura, as poeiras e partículas de despoeiramento, podem ser utilizados no próprio processo de fabrico na cerâmica ou em diversos sectores industriais (cimento, argamassas, betão, pavimentos betuminosos e agregados, os solos artificiais e mesmo a recuperação de caminhos, construção de estradas, enchimento de cotas e pavimentação de campos de ténis, etc.);

**(b) “A substância ou objeto poder ser utilizado diretamente, sem qualquer outro processamento que não seja o da prática industrial normal;”**

Os cacos cozidos, os resíduos da preparação da mistura, as poeiras e partículas de despoeiramento podem ser utilizados diretamente ou após processos de redução da granulometria como seja a trituração ou moagem (nomeadamente para o caco cozido), recorrendo à prática industrial normal.

**(c) “A produção da substância ou objeto ser parte integrante de um processo produtivo;”**

No processo de fabrico de materiais cerâmicos são produzidos vários resíduos da produção, entre os quais os que se pretendem que venham a ser considerados subprodutos, nomeadamente os cacos cozidos (inerente a não conformidades do processo), os resíduos da preparação da mistura (oriundos das operações de preparação das misturas cerâmicas), as poeiras e partículas de despoeiramento (inerente a operações que visam melhorar o nível de empoeiramento inerente a este processo de fabrico).

**(d) “A substância ou objeto cumprir os requisitos relevantes como produto em matéria ambiental e de proteção da saúde e não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana, face à posterior utilização específica.”**

As poeiras e partículas de despoeiramento têm a mesma composição química das matérias-primas que lhe deram origem e conseqüentemente podem ser utilizadas no fabrico de produtos cerâmicos, desde que as empresas possuam secção de preparação de pasta. Sendo sujeitas ao mesmo processo de fabrico das outras matérias-primas cerâmicas, contribuindo para uma menor extração de recursos naturais.

No caso dos cacos cozidos, material com a mesma composição dos produtos cerâmicos, diretamente ou preferencialmente após a redução granulométrica, podem ser utilizados para o fabrico de outros materiais, promovendo-se a extensão do seu ciclo de vida. Desta forma, a incorporação de resíduos cerâmicos no fabrico de materiais na própria indústria ou noutros sectores, consiste numa forma ambientalmente correta de gerir o caco cozido, promovendo estratégias de economia circular e simbioses industriais, onde um “resíduo” de uma indústria se “transforma” em “matéria-prima secundária” de outra indústria, contribuindo para a sustentabilidade e preservação ambiental.

Finalmente, as análises químicas ao caco cozido e ao respetivo lixiviado permitiram classificar os cacos dos produtos cerâmicos analisados essencialmente como “inertes”, de acordo com os critérios de aceitação estipulados no DL n.º 183/2009, bem como nos ensaios de lixiviação sucessivos (8 extrações sucessivas com ácido - ensaio mais agressivo)).

Do estudo realizado podemos concluir que a valorização dos cacos cozidos, resultantes do processo cerâmico, poderá ser efetuada na própria cerâmica ou em vários outros setores industriais, com ou sem necessidade de um pré-tratamento (ex. moagem), apresentando vantagens ambientais e contribuindo para um correto ciclo de vida daqueles produtos, indo, assim, ao encontro do pretendido pela União Europeia, na revisão da Diretiva Quadro dos Resíduos.

## 4. Conclusão

Para o desenvolvimento do presente relatório foi sugerido apresentar uma proposta de classificação do resíduo caco cozido como subproduto, no sentido de dar resposta à problemática da deposição de resíduos em aterro e conseqüente desperdício de recursos, e também à produção de materiais tecnicamente mais eficientes e ecológicos através de simbioses industriais.

Deste modo, foi necessário obter-se parâmetros de caracterização do caco cozido, através de ensaios de lixiviação e estudos do seu comportamento quando incorporado, como matéria-prima secundária, no próprio e/ou outros processos produtivos.

Os resultados obtidos permitiram a obtenção de um conjunto alargado de informação que possibilitou justificar o cumprimento dos critérios estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 para classificação do caco cozido como subproduto. De um modo global, podemos afirmar que existe um elevado potencial na incorporação de resíduos cerâmicos no próprio e em outros sectores industriais.

Espera-se com este estudo, incentivar empresas a estabelecer relações simbióticas, possuindo um papel mais ativo na implementação de estratégias de economia circular, visto que estas podem apresentar diversas vantagens a nível económico para as empresas participantes.

### 4.1. Síntese global e objetivos propostos

Em termos gerais, foi demonstrado que diversos setores industriais têm capacidade para inovar o seu processo de fabrico e valorizar resíduos/subprodutos da indústria cerâmica, promovendo estratégias de economia circular e simbioses industriais.

A análise crítica do cumprimento de cada objetivo proposto e a síntese geral dos resultados obtidos são apresentados seguidamente:

- **Aferir a natureza inerte do caco cozido**

É fundamental assegurar que o caco cozido possui as características de um resíduo inerte, por forma a não afetar negativamente substâncias com as quais entre em contacto, e cuja lixiviabilidade total seja insignificante, não colocando em perigo o ambiente e a saúde humana.

As análises químicas realizadas ao caco cozido e ao respetivo lixiviado permitiram classificar os cacos dos produtos cerâmicos analisados essencialmente como “inertes”, tendo em conta os critérios estipulados no Decreto-Lei n.º 183/2009, bem como nos ensaios de lixiviação sucessivos (ensaio mais agressivo realizado com ácido).

- **Incorporação de agregados cerâmicos (caco cozido)**

Os agregados cerâmicos contêm propriedades diferentes dos agregados naturais pétreos, sendo expectável a produção de produtos com características distintas. No entanto, este facto não invalida a sua possível utilização, podendo existir vantagens a nível técnico, adequados a situações específicas, com possíveis ganhos na eficiência geral do processo. Assim, é importante compreender os efeitos das diferentes propriedades do material cerâmico no comportamento do produto fabricado. Portanto, foi elaborado um estudo de vários ensaios, elaborados por diversos autores, a uma ampla variedade de materiais cerâmicos, com o objetivo de criar uma base de dados que permita correlações precisas entre o material cerâmico incorporado e as características do produto fabricado.

Alguns estudos referidos no subcapítulo 3.2 revelaram ligeiros decréscimos na resistência do produto resultante (cerâmica, cimento, argamassa, betão) com o aumento da incorporação de agregados cerâmicos. Outros apresentaram uma melhoria na resistência à medida que as taxas de substituição do agregado aumentavam. Esta discrepância nos resultados deve-se, maioritariamente, ao tipo de materiais cerâmicos e respetivos métodos de preparação utilizados antes da sua incorporação na mistura como agregado.

Ainda existem muitos aspetos que podem ser melhorados, sendo necessário considerar abordagens em circuitos abertos e fechado, existir um funcionamento adequado do mercado de materiais reciclados e evitar uma abordagem “*one size fits all*”, sendo necessário uma solução específica para o sector.

- **Justificação do cumprimento dos requisitos**

Com a informação recolhida, é possível afirmar que o caco cozido, até hoje classificado como resíduo, cumpre de forma inequívoca os requisitos definidos pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, para poder ser considerado subproduto e não resíduo da produção.

A implementação desta estratégia em diversas indústrias pode trazer vários benefícios a nível ambiental, técnico e económico, no entanto, ainda se encontra aquém da situação ideal,

devido principalmente a entraves burocráticos, custos associados elevados (nomeadamente quando necessitam de pré-processamento) e às características dos resíduos (e sua falta de homogeneidade).

#### **4.2. Proposta de trabalhos futuros**

Como trabalho futuro, e considerando, não só, os resultados obtidos, mas também as limitações sentidas ao longo de todo o processo, é proposto realizar estudos ou ensaios que permitam correlações mais precisas entre o tipo de material cerâmico incorporado e as características do produto fabricado, contribuindo para uma base de dados mais completa que incentive as empresas a aderir a esta prática, promovendo estratégias de economia circular e simbioses industriais.

## Referências bibliográficas

Almeida, M.; Sousa, A.; Dias, A., (2004). *Impactes Ambientais e Comércio de Emissões – Indústria Cerâmica: um caso de estudo*. Coimbra: CTCV.

Almeida, Marisa I. (2005). *Potencial Contaminante de cacos de cerâmica estrutural depositados no solo*. *Kéramica* n.º 275, pp. 22-28.

Almeida, Marisa I., Amaral, R., Correia, A.M.S. (2001). *Incorporação de resíduos em materiais cerâmicos*. *Kéramica* n.º 245, pp. 22-32.

Almeida, M., Simões, F., Dias, F., Amado, A. (2016). *Ceramic Industry contribution to a Circular Economy*. Congress of Innovation on Sustainable Construction CINCOS'16, Curia, Portugal.

AMEC Environment & Infrastructure and Bio Intelligence Service, (2013). *The opportunities to business of improving resource efficiency — Final report*. Contract Ref. 070307/2011/610181/ETU/F.1., Northwich.

Anderson, D. J., Smith, Scott T. & Au, F. T. K. (2014). *Mechanical behaviour of sustainable concrete with waste ceramic aggregate replacement*. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Vol. 1, pp. 243-248.

Anderson, D. J., Smith, Scott T. & Au, F. T. K. (2016). *Mechanical properties of concrete utilizing waste ceramic as coarse aggregate*. *Construction and Building Materials*, 117, pp. 20-28.

Andrade, Inês (2004). *Produção de Resíduos Industriais na Indústria Cerâmica*. Ministério das Cidades, Administração Local, Habitação e Desenvolvimento Regional. CCDRC – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro.

Ay, N. & Ünal, M. (2000). *The use of waste ceramic tile in cement production*. *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 497-499.

Badía, J., Vilaplana, F., Karlsson, S. & Ribes-Greus, A. (2009). *Thermal analysis as a quality tool for assessing the influence of thermo-mechanical degradation on recycled poly(ethylene terephthalate)*. *Polymer Testing*, 28, 169-175.

Bastos, Sónia J. P. (2008). *Bicozedura BioAmigável – Estudo Físico-Químico de Resíduos Industriais*. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro. Universidade de Aveiro.

Branco, Fernando C. & Ferreira, Mário Q. (2009). *Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal*. Departamento de Ciências da Terra e Centro de Geociências. FCTUC.

Cachim, Paulo B. (2009). *Mechanical properties of brick aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 1292-1297.

CE – Comissão Europeia (2006). *Prevenção e controlo integrados da poluição – Documento de referência sobre as Melhores Técnicas Disponíveis na Indústria Cerâmica*. Direção Geral JRC Centro de Investigação Conjunta. Instituto de Estudos de Tecnologia Prospetiva.

CE - Comissão Europeia (2014). *A Economia Circular – Interligação, criação e conservação de valor*.

CE (2007). *Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu relativa a Comunicação interpretativa relativa a resíduos e subprodutos*. (COM(2007) 59 FINAL) – Comissão Europeia, Bruxelas.

Cerame-Unie – *The European Ceramic Industry Association (2014)*. *Cerame-Unie's Views on Resource Efficiency & the Circular Economy Package*. Brussels.

Cerame-Unie – *The European Ceramic Industry Association, (2015)*. *Annual Report 2015*.

Comissão Europeia (2011). *Uma Europa eficiente em termos de recursos – Iniciativa emblemática da estratégia Europa 2020*. COM(2011)21final, Bruxelas.

Comissão Europeia (2013). *Viver bem, dentro dos limites do nosso planeta – 7.º PAA – o Programa Geral de Ação da União para 2020 em matéria de Ambiente*.

Comissão Europeia (2015). *Fechar o ciclo – plano de ação da EU para a economia circular*. COM(2015) 614 final, Bruxelas.

Debied, Farid & Kenai, Said (2008). *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete*. *Construction and Building Materials*, 22, pp. 886-893.

Decisão 2014/955/EU (LER – Lista Europeia de Resíduos), da Comissão, de 18 de Dezembro. Diário da República. Ministério do Ambiente.

Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de março. Diário da República, 1ª série – N.º51 – 12 de março de 2008. Ministério do Ambiente.

Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho. Diário da República, 1ª série – N.º116 – 17 de junho de 2011. Ministério do Ambiente.

Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto. Diário da República, 1ª série – N.º153 – 10 de agosto de 2009. Ministério do Ambiente.

Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro. Diário da República, 1ª série – N.º171 – 5 de setembro de 2006. Ministério do Ambiente.

Dush regulations on dangerous substances – Soil quality decree (2006). *Preliminary draft of the Soil Quality Regulation*. pp. 29-30.

EC, 2011. *Commission staff Working Paper — Analysis associated with the Roadmap to a Resource Efficient Europe, Part II*. (SEC(2011) 1067 final) - European Commission, Brussels.

EC, 2015. *Commission staff working document, Additional analysis to complement the impact assessment SWD (2014) 208 supporting the review of EU waste management targets*. SWD(2015) 259 final - European Commission, Brussels.

EEA, 2016. *Circular economy in Europe – Developing the knowledge base*. European Environment Agency, Denmark. ISBN 978-92-9213-719-9.

Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the circular economy 1: economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes, Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation.

EMF, 2013. *Towards the circular economy: Opportunities for the consumer goods sector*, Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight.

EU, 2013. *Decision N° 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 Living well, within the limits of our planet*. OJ L 354, 20.12.2013, pp. 171–200.

Ferreira, André (2014). *Incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea sujeitas a condições severas de humidade e salinidade*. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Guerra, I., Vivar I., Llamas, B., Juan, A. & Moran, J. (2009). *Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete*. Waste Management, 29, pp. 643-646.

Higashiyama, H., Sappakittipakorn, M., Sano, M. & Yagishita, F. (2012b). *Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate*. Construction and Building, 33, pp. 48-54.

- Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M. & Takahashi, O. (2012a). *Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate*. Construction and Building Materials, 25, pp. 96-101.
- Hogan, Daniel (1993). *Crescimento populacional e desenvolvimento sustentável*. Lua Nova: Revista de Cultura e Política.
- Huang, B., Dong, Q. & Burdette, Edwin G. (2009). *Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete*. Construction and Building Materials, 23, pp. 3451-3456.
- INE – Instituto Nacional de Estatística, (2013, 2014, 2015). *Produtos produzidos na indústria por tipo de produto e atividade económica*. Portal do INE.
- INE – Instituto Nacional de Estatística, (2014). *Empresas (n.º) por localização geográfica e atividade económica*. *Pessoal ao serviço (n.º) das empresas por localização geográfica e atividade económica*. *Volume de negócios (€) das empresas por localização geográfica e atividade económica*. Portal do INE.
- InEDIC – Innovation and ecodesign in the ceramic industry (2011). *Manual de Ecodesign*.
- ISWA 1 (2015). *Circular Economy: Trends and Emerging Ideas (1)*. International Solid Waste Association, Austria.
- ISWA 2 (2015). *Circular Economy: Cycles, Loops and Cascades (2)*. International Solid Waste Association, Austria.
- ISWA 6 (2015). *Circular Economy: Resources and Opportunities (6)*. International Solid Waste Association, Austria.
- Jankovic, K., Nikolic, D. & Bokovic, D. (2012). *Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate*. Construction and Building Materials, 28, pp. 659-663.
- Juan, A., Medina, C., Guerra, M. I., Morán, Julia M., Aguado, Pedro J. Sánchez de Rojas, M. I., Frías, M. & Rodrigues, O. (2010). *Re-use of ceramic wastes in construction*. Ceramic Materials, Wilfried Wunderlich (Ed.), 10, pg.197-214.
- Lavat, Araceli E., Trezza, Monica A. & Poggi, M. (2009). *Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture*. Waste management, 29, pp. 1666-1674.

- Ledesma, Enrique F., Jiménez, José R., Ayuso, J., Fernández, José M. & Brito, J. (2015). *Journal of Cleaner Production*, 87, pp. 692-706.
- Leitão, Alexandra (2015). *Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI*. Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting. Universidade Católica Portuguesa, Faculdade de Economia e Gestão do Porto.
- López, V., Llamas, B., Juan, A., Morán, J. M. & Guerra I. (2007). *Eco-efficient Concretes: Impacto of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete*. *Biosystems Engineering*, 96, pp. 559-564.
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2014). *Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of componentes and their influence on the mechanical behaviour*. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 523-534.
- Medina, C., Banfill, P.F., Sánchez de Rojas, M.I. & Frías, M. (2013a). *Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste*. *Construction and Building Materials*, 40, pp. 822–31.
- Medina, C., Sánchez de Rojas, M.I. & Frías, M. (2013b). *Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate*. *Journal of Cleaner Production*, 40, pp. 151-60.
- Medina, C., Frías, M. & Sánchez de Rojas, M.I. (2012a). *Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate*. *Construction and Building Materials*, 31, pp. 112–18.
- Medina, C., Sánchez de Rojas, M.I. & Frías, M. (2012b). *Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes*. *Cement and Concrete Composites*, 34, pp. 48–54.
- Morgan, J. and Mitchell, P., 2015. *Employment and the circular economy. Job creation in a more resource-efficient Britain*. Green Alliance, London.
- Naceri, A. & Hamina, M.C. (2009). *Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar*. *Waste Management*, 29, pp. 2378-2384.
- Pacheco-Torgal, F. & Jalali, S. (2010). *Reusing ceramic wastes in concrete*. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 832-838.

- Penteado, Carmenlucia S. G., Carvalho, Eduardo V. & Lintz, Rosa C. C. (2016). *Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing*. Journal of Cleaner Production, 112, pp. 514-520.
- Pereira-de-Oliveira, Luiz A., Castro-Gomes, João P. & Santos, Pedro M. S. (2012). *The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components*. Construction and Building Materials, 31, pp. 197-203.
- Puertas, F., García-Díaz, I., Palacios, M., Gazulla, M.F., Gómez, M.P. & Orduna, M. (2010). *Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a raw material. Characterization, hydration and leaching studies*. Cement & Concrete Composites, 32, pp. 175–186.
- Puertas, F., García-Díaz, I., Barba, A., Gazulla, M.F., Palacios, M. & Gómez M.P. (2008). *Ceramic wastes as alternative raw materials for the Portland cement clinker production*. Cement and Concrete Composites, 30, pp. 798–805.
- Raval, A. D., Patel I. & Pitroda, J. (2013). *Re-use of ceramic industry wastes for the elaboration of eco-efficient concrete*. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, Vol. 2, pp. 103-105.
- Reck, B. & Graedel, T. (2012). *Challenges in Metal Recycling*. Science, 337, 690-695.
- República Portuguesa (2017). *Eco.nomia – dinamizar a economia circular*. Disponível em: [eco.nomia.pt](http://eco.nomia.pt)
- Ribeiro, Jorge L. (2009). *Resíduos Cerâmicos – Gestão e Valorização como Agregados*. Departamento de Engenharia Minas. FEUP.
- Sales, Angela T. C. & Filho, Ricardo S. A. (2013). *Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto*. Ambiente Construído, Porto Alegre, pg. 113-125.
- Silva, J., Brito, J. & Veiga, R. (2009). *Incorporation of fine ceramics in mortars*. Construction and Building Materials, 23, pp. 556-564.
- Silvestre, R., Medel, E., García, A. & Navas, J. (2013a). *Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses*. Construction and Building Materials, 45, pp. 115-122.

- Silvestre, R., Medel, E., García, A. & Navas, J. (2013b). *Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis*. *Materials and Design*, 50, pp. 471-478.
- State of Green (2016). *Circular Economy: Denmark as a circular economy solution hub*. Think Denmark, White papers for a green transition.
- Suzuki, M., Meddah, M. & Sato, R. (2009). *Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete*. *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 373-381.
- Uchida, H. & Ohga, S. (2000). *Recycling of aluminum products*. *Journal of Advanced Science*, 12, 185-188.
- Wienerberger, (2014). *The Wienerberger Sustainability Report*.
- World Economic Forum (2011). *Cradle to Cradle and Evolutionary Business Models*. An Initiative of the Forum of Young Global Leaders Taskforce.
- Yacine, A., Ratiba, M. & Abderrahmane, G. (2016). *Ceramic waste influence on dune sand mortar performance*. *Construction and Building Materials*, 125, pp. 703-713.
- Zimbili, O., Salim, W. & Ndambuki, M. (2014). *A review on the usage of ceramic wastes in concrete production*. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, Vol 8, pp. 91-95.