CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

Promoção de Estratégias de Economia Circular na Indústria da Fundição Através de Simbioses Industriais

Associação Portuguesa de Fundição

NORTE2020
PROGRAMA OPERACIONAL REGIONAL DO NORTE

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

FICHA TÉCNICA

Projeto
Capacitação do Setor de Fundição: a transição para uma economia circular e digital

Código Projeto
NORTE-02-0853-FEDER-037639

Promotora
Associação Portuguesa de Fundição (APF)

Elaboração e Coordenação Técnica do Manual
CTCV: Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro

Ano de Publicação
2022

Cofinanciamento

NORTE2020 PROGRAMA OPERACIONAL REGIONAL DO NORTE
PORTUGAL 2020
UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO:
A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

INDEX

INDEX 1

1 – OBJETIVO 3

2 – ENQUADRAMENTO GERAL 4

3 – DESCRIÇÃO E CARATERIZAÇÃO GERAL DO SETOR DE FUNDIÇÃO 8

3.1 – DESCRIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DO SETOR 8
3.2 - TIPOS DE PRODUTOS 13

4 - TIPOLOGIA DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO 15

4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS RESIDUOS DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO 15
4.2 PONTENCIAIS DESTINOS DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO 17
4.2.1 - CERÂMICA 19
4.2.2 - CONSTRUÇÃO 20

5 – INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO NA CERÂMICA 21

5.1 CARATERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS 22
5.1.1 - ANÁLISE QUÍMICA DO RESÍDUO E DO ELUATO 22
5.1.2 - ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA 30
5.1.3 - ANÁLISE MINERALÓGICA 30
5.1.4 - DETERMINAÇÃO DE CARBONO 31
5.2 INCORPORAÇÃO DAS AREIAS DE FUNDIÇÃO EM PASTAS CERÂMICAS - CASOS PRÁTICOS 32
5.2.1 - INCORPORAÇÃO DAS AREIAS DE FUNDIÇÃO EM COMPOSIÇÃO CERÂMICA DE TIJOLOS 32
5.2.2 - INCORPORAÇÃO DAS AREIAS DE FUNDIÇÃO EM COMPOSIÇÃO CERÂMICA DE GRÉS PORCELÂNICO 38

6 – CONCLUSÕES 43

7 - BIBLIOGRAFIA 44

8 - ANEXOS 46

ANEXO I – FOTOGRAFIAS DO MOSTRUÁRIO DAS AMOSTRAS COM PASTA DE TIJOLO 46
ANEXO II – FOTOGRAFIAS DO MOSTRUÁRIO DAS AMOSTRAS COM PASTA DE GRÉS 50

1 – Objetivo

O principal objetivo do estudo desenvolvido consistiu em apoiar a Associação Portuguesa de Fundição (APF) na identificação e sensibilização do seu setor para a viabilidade de implementação de estratégias inovadoras de economia circular, em sinergia com o setor dos materiais cerâmicos de construção, em concreto na gestão e valorização de resíduos do processo de fundição, nomeadamente as areias de moldação.

O presente relatório corresponde à execução física do estudo, dos ensaios laboratoriais de caraterização e incorporação dos resíduos da indústria de fundição em pastas cerâmicas, com a descrição das atividades desenvolvidas e os resultados obtidos.

2 – Enquadramento Geral

Entendidas como fatores críticos de competitividade, as atividades de promoção de economia circular, enquanto medidas de prevenção dos resíduos, conceção ecológica, reutilização e outras ações "circulares", poderão gerar poupanças líquidas de grande relevância, em particular a empresas industriais, com impacto quer no seu volume de negócios, quer na criação de empregos diretos na gestão destes resíduos e, ao mesmo tempo, viabilizando uma redução das emissões totais anuais de gases de efeito de estufa.

Este estudo visa disponibilizar informação sobre a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduos de fundição como matéria-prima na fileira cerâmica, minimizando a produção de resíduos na fundição, em simultâneo com a promoção da utilização racional dos recursos no setor da construção.

Para esta aplicação prática do conceito de simbiose industrial, importa avaliar o comportamento de um conjunto de produtos cerâmicos produzidos contendo os resíduos de fundição, enquanto caso de estudo que poderá levar à sua classificação como subproduto ou à sua desclassificação enquanto resíduo e evitar assim a deposição em aterro destes resíduos e os consequentes impactes ao nível da ocupação de solo, com os custos económicos e ambientais que daqui decorrem.

O setor de fundição inclui, na sua atividade, uma produção muito diversificada de peças, quer quanto ao seu tamanho, à sua composição química e à sua finalidade. Em Portugal existem cerca de 60 fundições, das quais aproximadamente 25 são fundições de ligas ferrosas e 35 de ligas não ferrosas. Como já mencionado, a diversidade dos seus produtos é enorme, e por consequência, os produtos fabricados por fundição estão presentes num vasto conjunto de setores que vão desde o automóvel, máquinas e equipamentos industriais, máquinas e equipamentos agrícolas, equipamentos de produção de energia, medicina, construção civil, construção naval, indústria aeroespacial, ferrovia, materiais de desgaste, mobiliário urbano, etc.

A construção automóvel é o principal mercado do setor, incorporando, nos últimos anos, cerca de 77% da produção. Na Figura 1 encontra-se a distribuição da produção do setor, por área de aplicação.

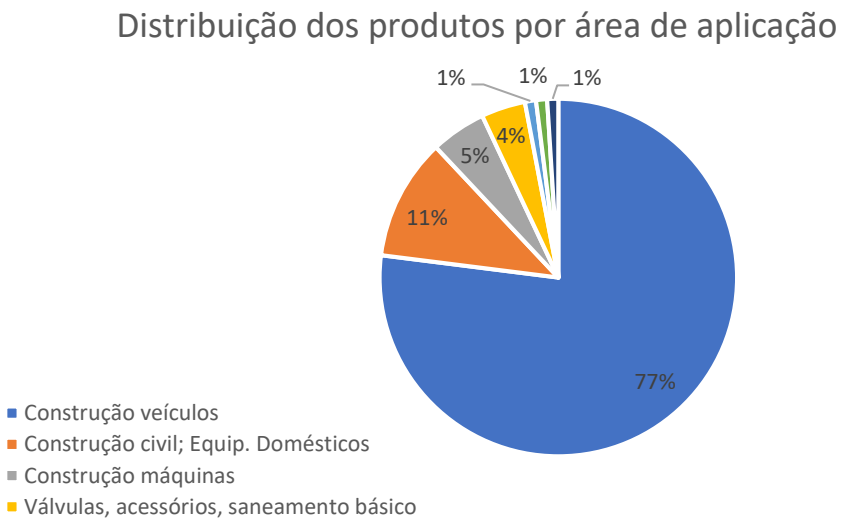


Figura 1. Distribuição por área de aplicação, tendência verificada nos últimos 5 anos.

A indústria de fundição permite a obtenção de peças através de metais e ligas metálicas. Os metais utilizados neste processo podem ser classificados como metais ferrosos ou não ferrosos, sendo que a principal distinção entre estes dois tipos de metais reside na presença ou ausência de ferro ou de um elemento equivalente a este. Nas ligas metálicas, são adicionados componentes por forma a melhorar determinadas propriedades do metal, ou permitir que lhe sejam conferidas propriedades adicionais. (Castro *et al.*, 2018) A exploração do ferro iniciou-se na idade do ferro (após a idade do cobre e do bronze), por volta de 1200 a.C. sendo que foi nesta altura que se começou a extrair o minério. (Mendes, 2000)

Em 2020, foram produzidas 156 mil ton de peças obtidas pela indústria de fundição em Portugal, sendo que 106 mil ton consistem em peças ferrosas e as restantes 50 mil ton a peças não ferrosas. Comparando estes valores com os obtidos em 2019, existiu uma diminuição de 24% na produção de peças ferrosas e uma diminuição de 11% de peças não ferrosas. (CAEF, 2022) Relativamente às vendas, de acordo com a APF, o maior volume de vendas encontra-se associado aos metais não ferrosos, tendo sido esta a tendência desde 2015 (Figura 2). (APF, 2022)

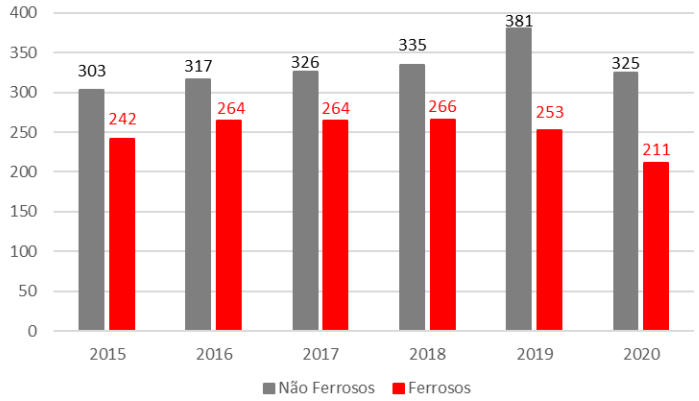


Figura 2. Vendas em milhões de euros de metais ferrosos e não ferrosos, de 2015 a 2020. (fonte: APF, 2022)

O processo de produção das peças da indústria de fundição depende do tipo de metal a utilizar, se o metal for ferroso, são aplicadas as etapas de moldação, fusão dos metais, vazamento, desmoldação e acabamento. No caso dos metais não ferrosos, aplicam-se etapas de fusão e tratamento do metal fundido, injeção ou vazamento do metal líquido no molde metálico e acabamento das peças. (Castro *et al*., 2018)

O Setor de Fundição pode, a montante, ser considerado um paradigma do conceito de Economia Circular (Figura 3), fruto do reaproveitamento que faz do metal em fim de utilização. No entanto, a jusante, enfrenta dificuldades que o impedem de concretizar esse objetivo. Ou seja, os resíduos ou subprodutos da sua atividade, constituídos esmagadoramente por areias não reutilizáveis provenientes dos seus processos de moldação (cerca de 70 mil ton / ano), constituem-se como matérias-primas de outras fileiras industriais, como é o caso das cimenteiras, dos betões asfálticos, dos barros ou mesmo dos materiais de construção.

Algumas destas possibilidades de incorporação foram já testadas no âmbito de projetos diversos, alguns dos mais significativos, promovidos pela própria APF em conjuntos com os seus Associados.

Figura 3. Representação do modelo de Economia Circular.

O setor de fundição está alinhado com a estratégia europeia de redução da sua pegada ecológica com objetivo na neutralidade carbónica através de várias ações como a redução de emissões dos gases com efeito de estufa, a sustentabilidade e a economia circular.

Para tal, o setor está fortemente comprometido na adoção das melhores técnicas disponíveis definidas no BREF (*Best Available Techniques Reference Documents*), documento no qual tem participação ativa na sua elaboração e revisão, sempre com a perspetiva de uma melhoria contínua do seu impacto ambiental. Assim, é necessária a aplicação de planos de eficiência energética, da redução do consumo de água, bem como da redução de consumíveis e matérias-primas através da otimização do processo produtivo. Não menos importante é a modernização que o setor, de uma forma consistente, tem vindo a fazer ao longo dos anos, substituindo equipamentos obsoletos por novos equipamentos, mais eficientes e menos poluidores.

3 – Descrição e caraterização geral do setor de fundição

3.1 – Descrição e Caraterização do Setor

O setor de fundição é responsável pela criação de peças, a partir de metais ferrosos e não ferrosos que, através de um molde com a dimensão e a forma desejada para a peça em causa. O processo de produção necessário para a obtenção da peça final depende do tipo de metal utilizado: se o metal for ferroso, normalmente, é utilizado um processo de moldação não permanente, que se serve da utilização de areias, enquanto que, no caso dos metais não ferrosos, a moldação é feita normalmente, por uma via permanente, de caráter metálico.

Na moldação permanente, podemos definir etapas de fusão e tratamento do metal fundido, a introdução do metal fundido no molde metálico, que pode ser realizada por injeção do metal líquido (fundição por injeção) ou pelo seu vazamento (fundição por gravidade), e o acabamento das peças. (Castro *et al*., 2018)

Na moldação não permanente, o processo de produção inclui a preparação da moldação e dos machos (incluindo ainda a preparação de areias, macharia e moldação), a fusão e tratamento do metal fundido, o vazamento do metal fundido e o acabamento (incluindo o abate/desmoldação e rebarbagem das peças). (Castro *et al*., 2018) O fluxograma do processo de produção das peças e dos diversos componentes necessários para a sua produção encontra-se na Figura 4 para o caso da utilização de areia verde e na Figura 5 para o caso da areia auto-secativa.

Na preparação da moldação são produzidas as moldações, que consistem em duas meias-moldações (uma superior e uma inferior), às quais pode ainda ser adicionado um macho (produzido a partir de areia) no seu interior. As duas meias-moldações irão ser unidas formando um "bolo" de areia, ao qual irá ser colocado, posteriormente, no seu interior, o metal fundido. Os moldes são apenas utilizados para fornecer a forma pretendida à peça, sendo depois destruídos após o processo de vazamento do metal, numa etapa de desmoldação.

As areias utilizadas neste processo têm como objetivo alcançar a forma pretendida para a peça, e podem ser de dois tipos: areia verde e areia auto-secativa. Ambas as areias têm como base grãos minerais, normalmente, com um alto teor de sílica, ao qual é adicionado um ligante (bentonite), pó de carvão (responsável por um contato menos agressivo entre a areia e o metal) e aditivos, no caso da areia verde, e resina e um catalisador, no caso da areia auto-secativa. A estes dois tipos de areia, podem ser acoplados machos. Estes são fabricados a partir de uma mistura de areia, catalisador e ligantes químicos, que é introduzida numa caixa de machos. Os machos devem ser colapsáveis, para poderem ser removidos da peça após o seu arrefecimento. Na moldação com areia, ocorre a libertação de finos de despoeiramento e perdas residuais de areia.

Após a obtenção dos moldes e dos machos, o metal desejado (ao qual podem ter sido retiradas impurezas) para o processo pode ser fundido, com a composição desejada e vazado nas moldações, de forma a obter a peça em bruto. O abate da moldação consiste na remoção da peça do molde, sendo que ao se ter optado por um processo não permanente, através do uso de areias, esta etapa passa pela aplicação de vibrações que separam a areia da peça metálica. Deste processo resulta a produção de poeiras e gases.

O acabamento das peças pode incluir uma remoção de restos de areia da superfície da peça metálica e de machos das cavidades da peça, assim como uma rebarbagem das peças. Podem ainda ser feitos processos adicionais, como a aplicação de revestimentos na superfície das peças e tratamento térmico.

Existem dois tipos de processos de moldação em fundição, a moldação em areia verde e a moldação em areia auto-secativa. Em ambos os tipos de moldação, esta é constituída por duas meias-moldações, podendo ainda ser colocado um macho dentro das meias-moldações. Estas duas meias-moldações são depois unidas formando uma espécie de "bolo" de areia dentro do qual é vazado o metal fundido após o processo de fusão. Na fusão o metal é fundido com a composição desejada e depois vazado nas moldações, de modo a obter-se a peça em bruto. Nas Figuras 4 e 5 estão ilustrados os processos de fabrico de peças, na Figura 4 através de moldação em areia verde e na Figura 5 através de moldação em areia auto-secativa.

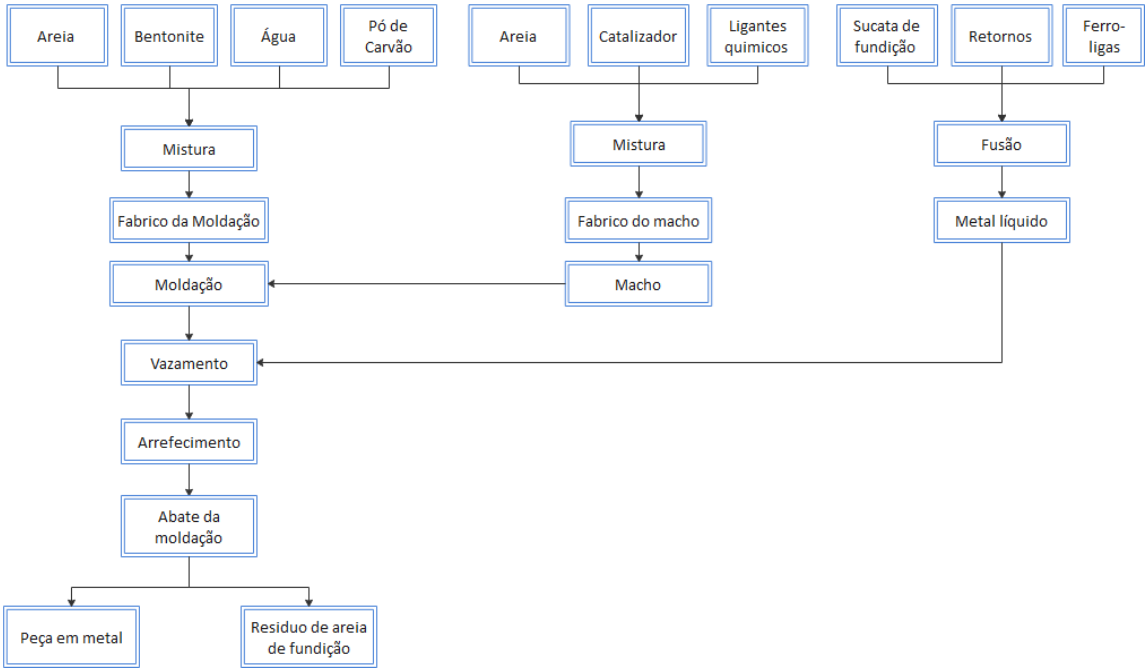


Figura 4. Fluxograma dos processos de moldação em areia verde, fabrico de machos, fusão e posterior vazamento, com a obtenção da(s) peça(s) no final do ciclo produtivo.

Na moldação em areia verde, areia é constituída pela mistura adequada de vários componentes (areia, ligante, pó de carvão e aditivos). Esta mistura forma uma moldação na qual podem ser acoplados machos. Neste processo libertam-se finos de despoeiramento e ocorrem pequenas perdas de areia. O produto final do processo são, as moldações.

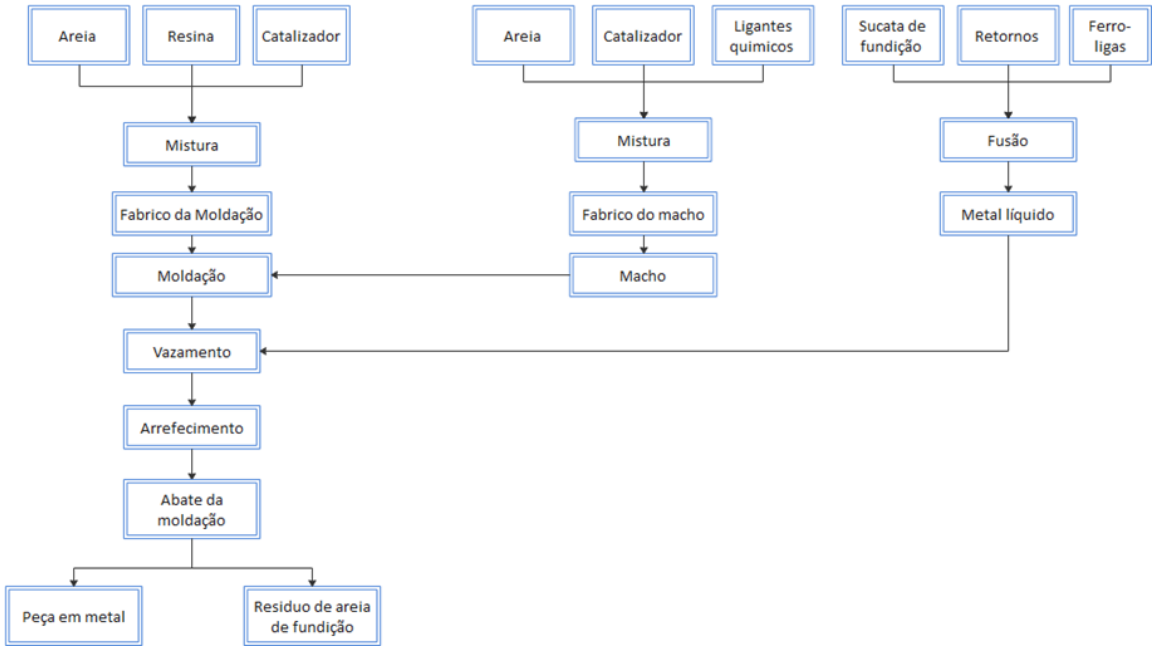


Figura 5. Fluxograma dos processos de moldação em areia auto-secativa, fabrico de machos, fusão e posterior vazamento, com a obtenção da(s) peça(s) no final do ciclo produtivo.

Na moldação em areia auto-secativa, areia é constituída pela mistura adequada de vários componentes (areia, resina e catalisador). Esta mistura forma uma moldação na qual podem ser acoplados machos. Neste processo libertam-se finos de despoeiramento e ocorrem pequenas perdas de areia. O produto final do processo são, uma vez mais, as moldações.

No fabrico de machos, os machos são fabricados a partir da mistura de areia, catalisador e ligantes químicos. Deste processo resultam também areias usadas e finos de despoeiramento.

Analisando a produção do setor de fundição, verificou-se que o conjunto de países pertencentes à The European Foundry Association (CAEF), em 2020, foi responsável pela produção de 9.1 milhões de toneladas de peças obtidas por fundição. No entanto, comparando o desempenho da produção de peças de metais ferrosos, pelos diversos países do mundo, é possível verificar que este setor é dominado por países como a Alemanha, Turquia, França, Itália, Espanha e Polónia, que contribuem para 79.8% da produção destes materiais (Figura 6). De

acordo com estes dados, em 2020, de entre os países do CAEF, Portugal foi o 12º maior produtor de peças de ferro e aço. (CAEF, 2022)

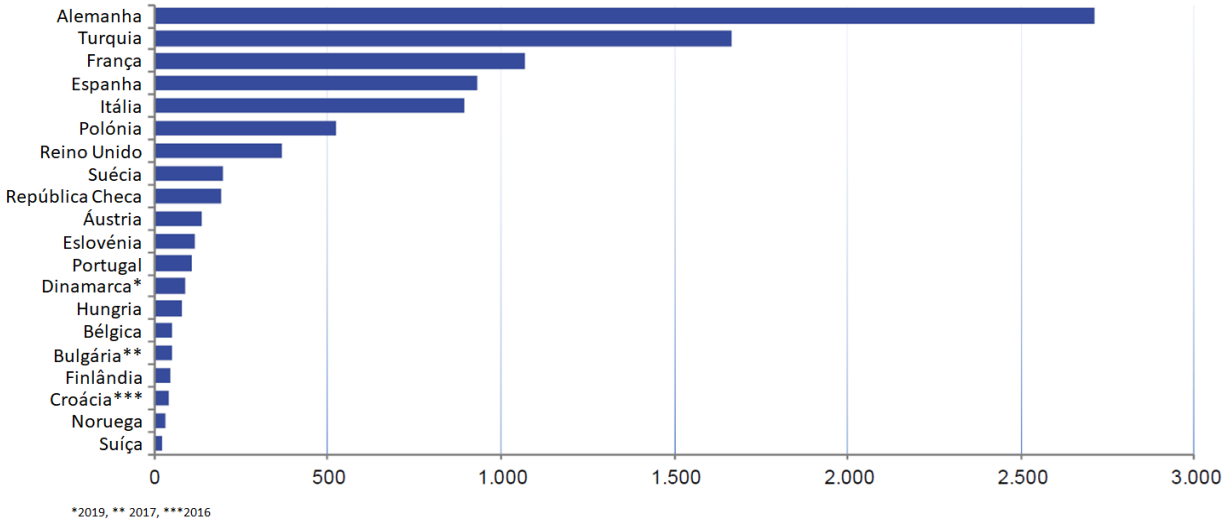


Figura 6. Produção de peças de ferro e de aço na CAEF em 2020 (em 1000 ton). (fonte: CAEF, 2022)

Comparando agora os países pertencentes à CAEF com outros países, relativamente à quantidade de peças produzidas (em ton) de ferro, ferro nodular e aço, é possível verificar que, relativamente à produção de peças de ferro, em 2019, a China, a Índia e os Estados Unidos contribuíram para a produção da maioria destas peças (Figura 7). Para o caso das peças de ferro nodular (Figura 8) e de aço (Figura 9), a China distingue-se também por contribuir grandemente para o seu fabrico. De notar que para estes dois metais, não foram registados valores de produção para os Estados Unidos. (CAEF, 2022)

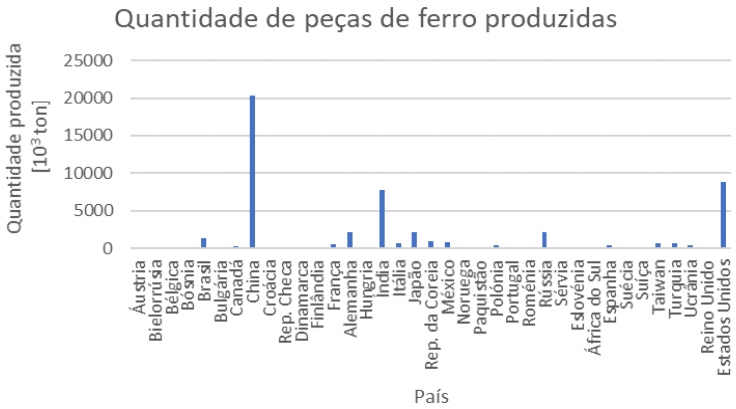


Figura 7. Quantidade (em ton) de peças de ferro produzidas por diversos países, em 2019. (fonte: CAEF, 2022)

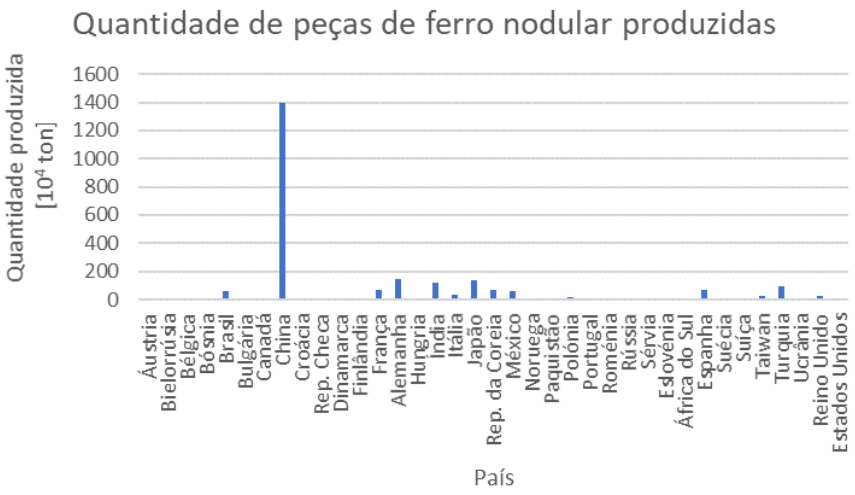


Figura 8. Quantidade (em ton) de peças de ferro nodular produzidas por diversos países, em 2019. (fonte: CAEF, 2022)

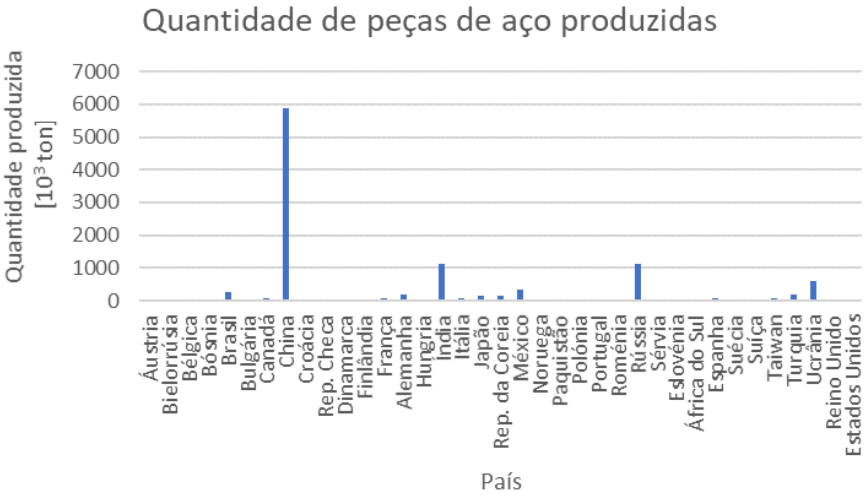


Figura 9. Quantidade (em ton) de peças de aço produzidas por diversos países, em 2019. (fonte: CAEF, 2022)

Analisando mais detalhadamente a produção de metais e ligas ferrosas em Portugal, em particular a produção de aço, peças de ferro e de ferro nodular, em 2020 verificou-se uma diminuição de 24.3% da produção da junção destes metais e ligas ferrosas, comparativamente com o ano de 2019, possivelmente devido aos impactos causados pela pandemia do Covid-19. No entanto, comparando cada um destes metais e ligas ferrosas individualmente, foi possível verificar que a produção de peças de ferro foi a mais afetada entre 2019 e 2020 (Tabela 1). Analisando a Tabela 1 é possível verificar ainda uma grande discrepância entre a dimensão

da produção de peças de ferro e ferro nodular comparativamente com as peças à base de aço, sendo que estas últimas são produzidas em quantidades muito inferiores. (CAEF, 2022)

Tabela 1. Produção de peças de metais e ligas ferrosas. (CAEF, 2022)

	2019	2019	2020	2020	2020/2019
Peças de ferro	41 062 ton	29.2%	26 093 ton	24.5%	-36.5%
Ferro nodular	94 419 ton	67.2%	76 119 ton	71.6%	-19.4%
Aço	4 937 ton	3.5%	4 126 ton	3.9%	-16.4%
Total	140 418 ton	100%	106 338 ton	100%	-24.3%

3.2 - Tipos de Produtos

- O aço consiste num material que integra, em massa, um conteúdo de carbono geralmente inferior a 2%, contendo também outros elementos. O conteúdo de carbono descrito permite a distinção entre uma classificação como aço ou ferro fundido. (EN 10020)
- O ferro fundido apresenta um conteúdo em carbono entre 2% a 4% e, habitualmente, apresenta quantidades significativas de ferro e silício e pequenas quantidades de outros elementos. As caraterísticas apresentadas pelo ferro dependem da sua composição química, da sua velocidade de arrefecimento e do tipo de grafite formada. O ferro fundido pode ser classificado como cinzento, branco, nodular, maleável ou vermicular (Figura 10), consoante a sua composição e a estrutura do metal. (Ahmad, 2006)
  - O ferro fundido cinzento geralmente contém uma percentagem de carbono entre os 2.5% e os 4% e uma quantidade de silício entre os 1% e os 3%. Este tipo de ferro pode ser utilizado para fazer, por exemplo, componentes de motores e queimadores de gás, devido à sua capacidade de resistência ao desgaste, mesmo quando a lubrificação é limitada. (Ahmad, 2006)
  - No ferro fundido branco, o carbono apresenta-se na forma de carboneto, e não apresenta grafite na sua composição, conferindo-lhe uma aparência clara. Este tipo de ferro pode ser utilizado para fazer trituradoras ou moinhos de rolo entre outros produtos, devido à sua forte resistência ao desgaste e abrasão. (Ahmad, 2006)
  - O ferro fundido nodular é caraterizado por possuir propriedades específicas, resultantes da adição de magnésio à liga. A presença de magnésio permite que a grafite apresente uma configuração esférica, que não é desenvolvida no ferro fundido vermicular. Algumas das aplicações associadas a este tipo de ferro podem estar relacionadas com a indústria automóvel (componentes para as suspensões,

componentes hidráulicos, entre outros). Este ferro apresenta uma boa resistência à tração e à fadiga, não deixando de ser resistente ao desgaste. (Ahmad, 2006)

- O ferro fundido maleável apresenta propriedades mecânicas entre as do ferro cinzento e as do ferro nodular. O ferro fundido maleável é capaz de reter e armazenar lubrificantes e a sua superfície porosa é capaz de reter detritos abrasivos. A sua aplicação pode ser feita, por exemplo, em maquinaria agrícola e de construção. (Ahmad, 2006)
- O ferro fundido vermicular apresenta propriedades entre as do ferro fundido de grafite nodular e as de uma estrutura composta por perlite e grafite. Este tipo de ferro pode ser aplicado na produção de bombas de alta pressão e discos de travão para comboios. (Ahmad, 2006)

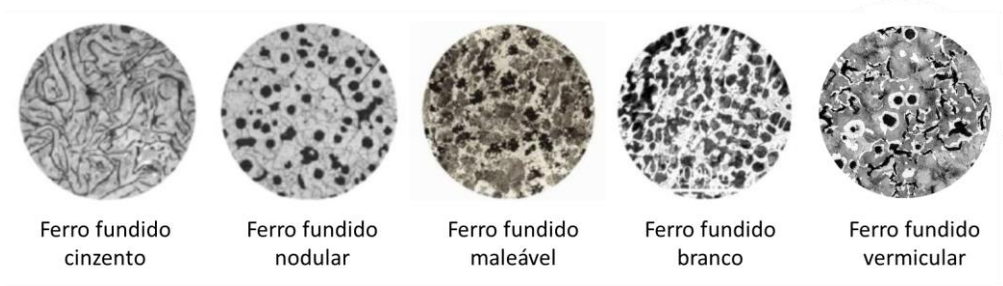


Figura 10. Tipos de ferro fundido.

4 - Tipologia dos resíduos da indústria de fundição

4.1 Identificação dos Principais Residuos da Indústria de Fundição

Os principais resíduos associados à indústria de fundição englobam as areias de fundição, as escórias lamas e poeiras, e ainda efluentes líquidos e gasosos. A produção destes resíduos e efluentes, tendo em conta as etapas do processo de fundição, encontram-se na Tabela 2 e a sua descrição encontra-se a seguir. (Castro *et al*., 2018)

- A **areia de fundição** é um dos principais resíduos da indústria de fundição, sendo que por cada tonelada de produto, é esperada, em média, a produção entre 250 kg a 1 tonelada de resíduos sólidos, constatando-se que entre 66% a 88% destes resíduos correspondem a areias de fundição de ligas ferrosas. Após algumas utilizações, as areias necessitam de ser substituídas por novas, ficando estas inutilizáveis. Deste modo, as etapas de moldação e macharia são as fases com uma maior geração de resíduos. (FIEMG, n.d.; Castro *et al.*, 2018)
- A **escória** constitui até cerca de 25% dos resíduos sólidos e pode ser composta por óxidos metálicos, materiais refratários derretidos e areia. (Castro *et al.*, 2018)
- As **poeiras** da indústria de fundição são formadas em várias etapas do processo, como na fusão do metal, na moldação e macharia, no manuseamento da areia, na desmoldação e no acabamento. Também a utilização de ligantes na moldação e na macharia, que garantem que a areia possa ser aglutinada, conduz à libertação de componentes inorgânicos e orgânicos, como aminas, fenóis e COV, sendo estes produtos de reação e de decomposição, e ainda de metais pesados. (FIEMG, n.d.; Penkaitis, 2012; Castro *et al.*, 2018)
- As **lamas** da indústria de fundição são originárias do tratamento das águas e, portanto, podem conter metais pesados, óleos e gordura. (Penkaitis, 2012)
- Os **efluentes líquidos** podem incluir compostos inorgânicos, como os metais pesados e algumas substâncias químicas, ou ainda efluentes da água utilizada para sistemas de arrefecimento ou de aquecimento. (FIEMG, n.d.; Castro *et al.*, 2018)
- Quanto às **emissões atmosféricas**, prevalecem os vapores originários da fusão e do vazamento dos metais e material particulado, originário das pequenas partículas existentes na areia utilizada no processo. (FIEMG, n.d.; Castro *et al.*, 2018)

Tabela 2. Efluentes e resíduos produzidos nas diversas etapas do processo de fundição (Castro et al., 2018)

	Macharia e moldação	Fusão, Vazamento e Arrefecimento	Desmoldação e acabamento
Emissões atmosféricas	Poeiras Emissões atmosféricas[1] (ex. material particulado (PM), óxidos de enxofre (SOx), gases de efeito de estufa (GEE), componentes orgânicos voláteis (COV), aminas)	Poeiras Emissões atmosféricas[1] (ex. metais gasosos, PM, GEE como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), SOx, óxidos de nitrogénio (NOx), sulfeto de hidrogénio (H_2S), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), COV, cloreto de hidrogénio (HCl), metais pesados, chumbo, dioxinas e furanos, componentes orgânicos)	Poeiras Emissões atmosféricas (ex. PM, COV, componentes orgânicos)
Resíduos sólidos	Areias Fragmentos de machos e machos queimados Poeiras e lamas de instalações de aspiração e despoeiramento e de pinturas Óleos e lubrificantes Resíduos de ligantes e de aditivos	Escória Resíduos metálicos Refratários Óleos e lubrificantes Resíduos de aditivos	Areia usada (moldes e machos) Aparas, limalhas e poeiras Granalha Abrasivos Poeiras e lamas de instalações de aspiração e despoeiramento Óleos e lubrificantes
Efluentes líquidos	Efluentes líquidos	Efluentes líquidos	Efluentes líquidos

[1] Dependentes do sistema de fusão usado.

A contabilização dos resíduos originários pelo setor de fundição encontra-se presente na Figura 11. Estes resíduos deverão ser encaminhados para operadores de gestão de resíduos devidamente licenciados. De acordo com os códigos LER dos resíduos identificados, é possível verificar que estes correspondem a:

- **resíduos da fundição de peças ferrosas**, mais concretamente escórias do forno (código LER 10 09 03), machos e moldes de fundição vazados, não contendo substâncias perigosas (código LER 10 09 08) e machos e moldes de fundição não vazados, não contendo substâncias perigosas (código LER 10 09 06);
- **resíduos da fundição de peças não ferrosas**, mais especificamente machos e moldes de fundição vazados, não contendo substâncias perigosas (código LER 10 10 08); machos e moldes de fundição não vazados, não abrangidos em 10 10 05 (código LER 10 10 06).
- **resíduos da moldagem e do tratamento físico e mecânico de superfície de metais e plásticos**, nomeadamente poeiras e partículas de metais ferrosos (código LER 12 01 02).

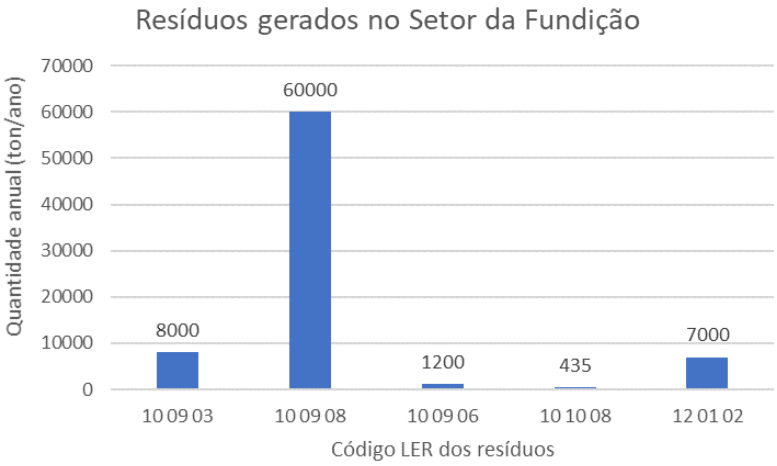


Figura 11. Quantidades de resíduos gerados no setor de fundição.

Comparando os diferentes resíduos gerados no setor de fundição é possível verificar que os resíduos gerados em maior quantidade são resíduos da fundição de peças ferrosas, provenientes dos machos e moldes de fundição vazados, que não contêm substâncias perigosas, e que correspondem a cerca de 78% dos resíduos gerados anualmente.

4.2 Pontenciais Destinos dos Resíduos da Indústria de Fundição

A finalidade usual para os resíduos desta indústria consiste no encaminhamento para enchimento de vazios de escavação para recuperação paisagística (R10).

Na gestão dos resíduos gerados pela indústria de fundição, pode ser aplicada uma seleção, desenho e construção de áreas de armazenamento para os metais, assim como para as poeiras de filtros, resíduos de refratários, escória e resíduos de areia. Neste processo, é necessário ter em conta as condições geológicas e hidrogeológicas do local, por forma a evitar que ocorra uma lixiviação de metais pesados. (Castro *et al.*, 2018) Assim sendo, uma deposição incorreta destes resíduos pode conduzir a um impacto ambiental a nível do solo e das águas superficiais e subterrâneas. (Penkaitis, 2012)

O metal presente na composição das **escórias** pode ser recuperado, sendo o restante reutilizado por outras indústrias, tendo, por exemplo, como finalidade o fabrico de blocos ou a construção de estradas. Na sua composição, a escória pode apresentar chumbo, cádmio ou crómio, resultantes da aplicação de fundição de aço ou de metais não ferrosos sendo, portanto, necessário um maior cuidado nestas situações, dado que a escória passa a ser perigosa. (Castro *et al.*, 2018)

As **poeiras** e o material particulado pode ser considerado como um resíduo perigoso, dependendo do seu teor em metais como o zinco, chumbo, níquel, cádmio, cobre, alumínio, estanho, crómio, entre outros. A recuperação dos metais presentes nesta poeira é normalmente mais realizado para a fundição de metais não ferrosos, devido a um maior conteúdo em metais neste tipo de fundição. (Castro *et al.*, 2018)

As **lamas** podem ser recicladas internamente, tendo de ser sujeitas a um pré-tratamento, com uma fase de prensagem, de secagem e de granulação. No entanto, a maioria das lamas é depositada em aterros. É importante realçar que a opção pela reciclagem ou pela deposição em aterro deste resíduo, é fortemente dependente do potencial de lixiviação do metal, que deve ser analisado antes de se tomar qualquer uma destas vias. (Castro *et al.*, 2018)

As **areias** podem, em grande parte, ser recuperadas e reutilizadas no processo, no entanto, existe uma porção destas areias que contém restos de liga fundida e componentes da decomposição térmica do sistema usado para ligação entre as meias-moldações, que conduz à lixiviação de metais pesados e de poluentes orgânicos. (Castro *et al.*, 2018) Relativamente à areia verde, a sua recuperação pode ser realizada através de uma regeneração primária, utilizando, por exemplo, tambores giratórios, e de uma regeneração secundária, como, por exemplo, através de uma remoção dos ligantes residuais, ou ainda por lavagem húmida. (Castro *et al*., 2018)

De forma a valorizar as **areias de fundição**, sendo que este é o principal resíduo produzido neste setor industrial, é necessário identificar o tipo de operações de valorização mais adequadas. Para esta classificação foi tido em conta a classificação estipulada no Decreto-Lei n° 102-D/2020, tendo-se sido verificadas as operações seguintes:

- R5 – Reciclagem/recuperação de outros materiais inorgânicos;
- R10 – Tratamento do solo para benefício agrícola ou melhoramento ambiental.

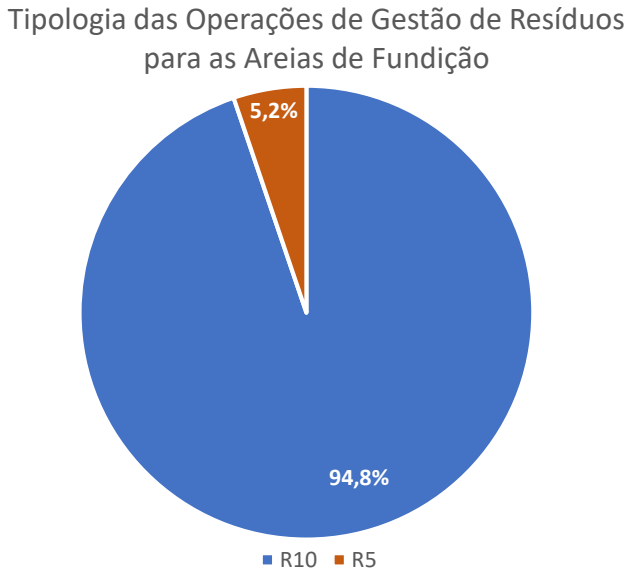


Figura 12. Tipologia de operações de gestão das areias de fundição em Portugal.

Por forma a reaproveitar os resíduos da indústria de fundição (areias), a operação de gestão mais utilizada é enchimento de vazios de escavação para recuperação paisagística. Este é o tipo de operação de resíduo que prevalece, sendo a solução aplicada a 94.8% das areias de fundição geradas (Figura 12).

Para além das finalidades identificadas anteriormente para as areias de fundição, estas podem também ser aplicadas noutras indústrias, como é o caso da indústria cimenteira, cerâmica, construção, entre outras. (APF, 2017; Castro *et al*., 2018)

4.2.1 - Cerâmica

No setor cerâmico, as areias de fundição podem ser aproveitadas nos materiais cerâmicos de barro vermelho. Segundo um estudo da APF, a mistura de areia verde com a argila utilizada no fabrico de tijolos de barro vermelho, não conduz a uma alteração significativa da resistência à flexão do material, tendo-se verificado que este desempenho se mantém válido até uma substituição de 20% da argila pela areia de fundição. (APF, 2017)

Quaranta *et al*. (2010) avaliaram a incorporação de resíduos de areias provenientes da indústria de fundição, em diferentes percentagens (10, 20, 30, 40 e 50%), para a produção de telhas e tijolos. Concluíram que é possível incorporar até 50% destes resíduos, diminuindo as temperaturas de cozedura, obtendo-se menores variações volumétricas e menor perda ao rubro, e melhores propriedades mecânicas, nomeadamente, maior resistência mecânica.

Roa *et al.* (2019) investigaram a possibilidade de incorporação de resíduos de areia da indústria de fundição para a produção de materiais cerâmios. Avaliaram percentagens de incorporação de 10 a 40 % e temperaturas de cozedura diferentes (850, 950 e 1050ºC). Após a avaliação das propriedades físicas e mecânicas concluíram que os resíduos de areia de fundição podem ser usadas como agentes redutores da plasticidade em materiais cerâmicos. Verificaram ainda que com o aumento da temperatura a resistência à compressão, a densidade e a retração linear aumentaram, já a absorção de água diminuiu. A escolha da temperatura de cozedura deve ser adequada ao tipo de produto cerâmico que se pretenda produzir.

Alonso-Santurde *et al*. (2012) estudaram a mistura de resíduos de areia de fundição, nas proporções de 0 a 50%, para temperaturas de cozedura de 850 a 1050ºC, para a produção de tijolos cerâmicos. Constataram que tijolos produzidos com areia verde, cozidos a 1050ºC, apresentaram propriedades físicas melhoradas. Para se obterem tijolos de qualidade industrial a quantidade ideal de incorporação é de 35% de areia verde.

Existem também estudos da introdução de resíduos da areia de fundição para a produção louça branca triaxial (Bragança *et al.*, 2006). Estes autores avaliaram a introdução de resíduos de areia de fundição, em substituição da sílica, e vidro reciclado, em substituição do feldspato. As formulações foram desenvolvidas para uma substituição de 50% das matérias-primas originais, e os materiais cerâmicos cozidos a diferentes temperaturas (1100 a 1300ºC). A qualidade dos corpos cerâmicos obtidos mostrou-se boa para a produção de faiança e porcelana. Não houve variação significativa na densidade das formulações com o teor de areia de fundição, que pode ser até 45% na massa cerâmica triaxial. Para as temperaturas de 1200 a 1250ºC obtiveram melhores resistências mecânicas, sendo que a partir destas temperaturas ocorreram deformações dos materiais cerâmicos.

4.2.2 - Construção

As características das areias de fundição, nomeadamente a composição e granulometria, fazem destes resíduos potenciais substitutos dos agregados finos utilizados na construção, em particular em argamassas e betões.

Monosi *et al*. (2010) avaliaram as propriedades de argamassas e betões, no estado fresco e endurecido, com diferentes percentagens de adição de areias de fundição, como substituinte parcial da areia. No que diz respeito aos betões com adição de areia de fundição, concluiram que para manter uma boa trabalhabilidade é necessário aumentar a quantidade de superplastificante. As argamassas com um rácio de areia de fundição/cimento de 0,5 apresentaram uma diminuição na resistência mecânica. No entanto, concluiram que as areias de fundição podem ser usadas como substituinte parcial da areia natural usada quer para argamassas quer para betões.

Também Çevik *et al.* (2017) estudaram as propriedades mecânicas e caracterizaram argamassas de cimento com incorporação de areias de fundição em substituição parcial da areia. As misturas de argamassas foram preparadas com diferentes percentagens de incoporação de areia de fundição, que variaram entre 15 a 60%. Verificaram que à medida que aumenta a percentagem de incorporação a resistência mecânica das argamassas diminiu. No entanto, para a percentagem de adição de 15% obtiveram os resultados mais elevados de resistância mecânica. Depois de avaliarem outras propriedades concluiram que a percentagem ótima de substituição de areia será de 15%.

A incorporação de areias de fundição na produção de betão foi estudada por Kavitha *et al*. (2021), nas percentagens de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, de areais de fundição tratadas e não tratadas biologicamente. Obtiveram os melhores valores de resistência mecânica para as incorporações de 30% de areia de fundição. Também Parashar *et al*. (2022) avaliaram a incorporação de areias de fundição para a produção de betão, nas percentagens de substituição de 10 a 40%. Neste mesmo estudo analisaram também a incorporação de uma escória como ligante em diferentes percentagens de adição. Verificaram que a introdução de escória como ligante até 15% e a substituição da areia natural por areia de fundição até 30% levam a um incremento nas propriedades mecânicas do betão.

Gonçalves (2017) durante a sua tese de mestrado avaliou a incorporação de areias e escórias de fundição em argamassas e betão. Concluiu que a incorporação de escória como substituinte parcial do agregado no betão é vantajosa havendo um incremento na resistência à compressão. Já em relação às argamassas analisou a substituição de areia natural por areia de fundição nas percentagens de 25%, 50%, 75% e 100% e verificou que e à medida que a percentagem de incorporação aumenta a resistência à compressão diminui.

As areias de fundição podem ainda ser utilizadas para as estradas de baixo volume de tráfego e vias urbanas, como material de base e de sub-base destas. Segundo Klinsky & Fabbri (2009), foi verificado que uma adição de 60% de areia de fundição aos solos argilosos, pode ser uma via de produção para as camadas base e sub-base dos pavimentos de tráfico leve.

5 – Incorporação dos Resíduos da Indústria de Fundição na Cerâmica

A realização do trabalho de incorporação contemplou a caraterização laboratorial com a realização de vários ensaios. Estes ensaios foram efetuados aos resíduos de fundição, às pastas cerâmicas de referência e ensaios de incorporação dos resíduos em duas composições cerâmicas, de dois produtos distintos, tijolo e grés.

Descrevem-se de seguida os ensaios laboratoriais efetuados para o estudo pretendido, os quais foram precedidos da recolha nas fábricas participantes, das respetivas amostras dos resíduos e das pastas cerâmicas.

- ✓ **Caracterização dos resíduos**

Foi efetuada a análise química quantitativa por Fluorescência de Raio-X das areias.

Caracterização química das areias (para efeitos de deposição em aterro, de acordo com o Decreto-Lei n.º 102-D/2020para admissão em aterro para resíduos inertes).

Análise mineralógica por difração de raio-X e determinação do carbono por análise química quantitativa de acordo com deteção IR.

- ✓ **Caracterização das composições cerâmicas**

Os parâmetros avaliados nas composições cerâmicas em uso industrial (composições de referência) e nas composições com incorporação de resíduos, tendentes à respetiva caracterização, foram os seguintes:

- Ensaios após secagem e cozedura a 3 temperaturas (para a composição de tijolo, em ambiente laboratorial), e cozedura a uma temperatura para a composição de referência de grês (na empresa) em provetes conformados para o efeito, com a determinação de:
  - Humidade de conformação
  - Retração verde-seco e seco-cozido
  - Resistência mecânica em seco e em cozido
  - Absorção de água após cozedura
  - Avaliação de eflorescências
  - Análise de textura, cor e deteção de defeitos

5.1 Caraterização dos Resíduos

Embora os resultados do estudo tenham interesse para o universo global de associados, esta atividade abrangeu um conjunto de cinco empresas do sector de fundição, pretendendo-se desta forma, efetuar uma caraterização representativa dos resíduos existentes no setor.

Para tal, a APF contactou as cinco empresas de fundição que servirão de caso de estudo e permitiram validar o processo pretendido. Estas empresas mostraram pleno interesse em participar no projeto e permitiram a visita de técnicos do CTCV e da APF às suas instalações, por forma a recolher a informação e as amostras necessárias ao estudo.

Em cada empresa foi recolhida uma amostra de resíduo de areia de moldação e ainda, em algumas delas, uma amostra de areia de machos, contabilizando no total um universo de vinte amostras.

A primeira fase do estudo consistiu na caraterização, nos laboratórios do CTCV, dos vários resíduos de areias de fundição recolhidos nas cinco empresas do sector da fundição.

Salienta-se que os ensaios de mineralogia e carbono foram realizados apenas em algumas amostras, por forma a obter-se uma análise genérica destes parâmetros analíticos.

Os resultados obtidos da caraterização efetuada, nesta primeira fase, aos resíduos de areias de fundição, permitem definir a fase seguinte, que consiste em ensaios de incorporação destes resíduos, resultantes da indústria de fundição, em composições industriais da indústria cerâmica, proporcionando assim as simbioses industriais e a valorização de recursos.

5.1.1 - Análise Química do Resíduo e do Eluato

No âmbito desta fase do estudo, foram realizadas análises químicas ao resíduo das areias de fundição e ao respetivo lixiviado, de acordo com a metodologia indicada no Decreto-Lei n° 102-D/2020, de 10 de dezembro, resultantes do processo de fabrico das diferentes empresas selecionadas para o projeto, os quais se apresentam nas tabelas seguintes.

Tendo em conta que esta caraterização é efetuada com regularidade pelas empresas do setor foi efetuada uma recolha exaustiva dos valores existentes, disponibilizados pela APF, por forma a conseguir uma maior abordagem relativamente a este ensaio e aos vários valores encontrados para os resíduos do setor. Assim, apresenta-se de seguida um resumo dos valores, para os resíduos de areia de moldação e areia de machos (LER 10 09 08).

Tabela 3. Análise química do resíduo das Areias de Moldação

Parâmetro (mg/kg)	Valor obtido														Valor limite DL 102-D/2020	
	Areia 1	Areia 2	Areia 3	Areia 4	Areia 5	Areia 6	Areia 7	Areia 8	Areia 9	Areia 10	Areia 11	Areia 12	Areia 13	Areia 14	Inertes	Não perigosos
COT	1600	5100	7100	3500	5100	9300	n.d.	11000	n.d.	8 700	23400	n.d.	n.d.	n.d.	30 000	50 000
BTEX	0,09	0,25	0,35	1	0,25	4	n.d.	1	n.d.	1,5	0,4	0,035	0,044	0,21	6	999
PCB	0,021	0,07	0,07	0,01	0,07	0,02	n.d.	0,01	n.d.	0,007	0,022	0,023	0,025	0,022	1	50
Óleo mineral	20	40	40	100	40	59	n.d.	190	n.d.	20	400	460	270	250	500	999
HAP	0,16	0,8	0,8	2	0,8	2	n.d.	2	n.d.	0,61	2,6	2,9	2,5	3,7	30	100

n.d. – não determinado
COT: Carbono Orgânico Total
BTEX: Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
PCB: policlorobifenilos 7 congéneres
HAP: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Tabela 4. Análise química do eluato do resíduo das Areias de Moldação.

Parâmetro (mg/kg)	Valor obtido														Valor limite DL 102-D/2020	
	Areia 1	Areia 2	Areia 3	Areia 4	Areia 5	Areia 6	Areia 7	Areia 8	Areia 9	Areia 10	Areia 11	Areia 12	Areia 13	Areia 14	Inertes	Não perigosos
Arsénio (As)	0,04	0,05	0,07	0,17	0,05	0,054	0,2	0,02	0,02	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	5
Bário (Ba)	0,35	0,04	1,32	0,15	0,04	0,055	0,5	0,38	0,15	0,05	0,13	0,14	0,18	0,22	20	100
Cádmio (Cd)	0,005	0,003	0,003	0,005	0,003	0,003	0,005	0,04	0,002	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	2
Crómio total (Cr)	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,1	0,5	0,05	0,014	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5	20
Cobre (Cu)	0,2	0,05	0,03	0,01	0,05	0,01	0,15	0,25	0,02	0,05	0,6	0,6	0,6	0,6	2	50
Mercúrio (Hg)	0,0001	0,002	0,002	0,0001	0,002	0,002	0,005	0,01	0,004	0,0005	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,01	0,5
Molibdénio (Mo)	0,2	0,01	0,08	0,07	0,01	0,079	0,11	0,02	0,04	0,05	0,024	0,027	0,036	0,044	0,5	10
Níquel (Ni)	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,05	0,3	0,03	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	10
Chumbo (Pb)	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,06	0,3	0,01	0,1	0,08	0,05	0,05	0,05	0,5	10
Antimónio (Sb)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,019	0,01	0,01	0,01	0,039	0,01	0,011	0,01	0,021	0,06	0,7
Selénio (Se)	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,012	0,01	0,05	0,039	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,5
Zinco (Zn)	1,8	0,1	0,55	0,7	0,1	0,1	0,15	0,5	0,03	0,2	0,2	0,23	0,2	0,3	4	50
Cloreto	120	10	110	18,9	10	52	44	50	100	12	128	76	208	192	800	50 000

Fluoreto	7,1	4	6,7	4,7	4	4,2	4	9,3	11,3	4,1	n.d.	n.d.	n.d.	7	10	250
Sulfato	160	34	215	300	34	300	430	240	563	22	297	n.d.	100	906	1 000	20 000
Índice de fenol	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,12	0,05	0,05	0,05	0,31	0,07	0,05	0,05	n.d.	1	-
COD	36	10	130	13	10	13	32	200	39	23	53,9	161	77,6	95,5	500	800
SDT	2300	100	n.d.	1100	100	1040	1500	3100	2050	660	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4 000	60 000

Tabela 5. Análise química do resíduo das Areias de Machos

Parâmetro (mg/kg)	Valor obtido						Valor limite DL 102-D/2020	
	Areia 1	Areia 2	Areia 3	Areia 4	Areia 5	Areia 6	Inertes	Não perigosos
COT	8100	1 000	1 000	1 000	15200	7000	30 000	50 000
BTEX	0,09	6	1	6	0,029	0,085	6	999
PCB	0,021	0,021	0,01	0,02	0,023	0,023	1	50
Óleo mineral	20	20	100	20	200	430	500	999
HAP	0,47	0,16	2	0,16	0,023	0,86	30	100

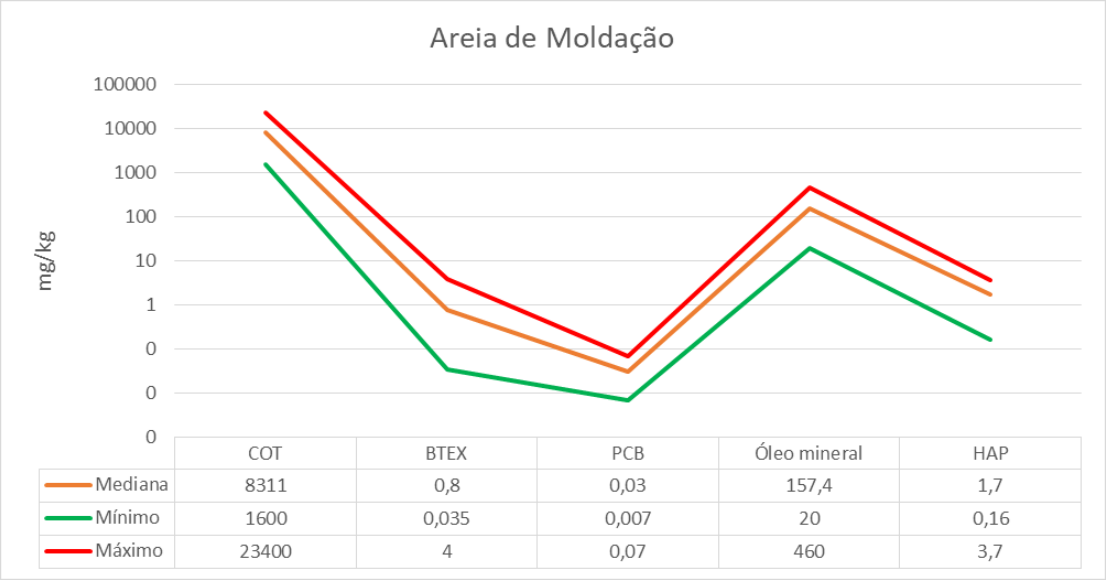
COT: Carbono Orgânico Total; BTEX: Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno; PCB: policlorobifenilos 7 congéneres; HAP: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Tabela 6. Análise química do eluato do resíduo das Areias de Machos

Parâmetro (mg/kg)	Valor obtido						Valor limite DL 102-D/2020	
	Areia 1	Areia 2	Areia 3	Areia 4	Areia 5	Areia 6	Inertes	Não perigosos
Arsénio (As)	0,01	0,01	0,12	0,01	0,1	0,1	0,5	5
Bário (Ba)	0,1	0,03	0,03	0,03	3,1	0,61	20	100
Cádmio (Cd)	0,005	0,04	0,005	0,04	0,01	0,01	0,04	2
Crómio total (Cr)	0,05	0,5	0,08	0,5	0,15	0,05	0,5	20
Cobre (Cu)	0,02	0,25	0,01	0,25	0,6	0,6	2	50
Mercúrio (Hg)	0,003	0,01	0,0001	0,01	0,0001	0,0001	0,01	0,5
Molibdénio (Mo)	0,01	0,25	0,01	0,25	0,01	0,01	0,5	10
Níquel (Ni)	0,03	0,3	0,03	0,3	0,2	0,2	0,4	10
Chumbo (Pb)	0,01	0,3	0,01	0,3	0,1	0,05	0,5	10
Antimónio (Sb)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,7
Selénio (Se)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,5
Zinco (Zn)	0,02	0,5	0,04	0,5	0,36	0,2	4	50
Cloreto	19	10	24	10	117	23	800	50 000
Fluoreto	2,1	2,9	2	2,9	5	2	10	250
Sulfato	50	100	50	100	239	100	1 000	20 000
Índice de fenol	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	n.d.	1	-
COD	28	200	23	200	n.d.	344	500	800
SDT	600	920	660	920	n.d.	510	4 000	60 000

n.d. – não determinado; COD: Carbono Orgânico DissolvidoSDT: Sólidos Dissolvidos Totais

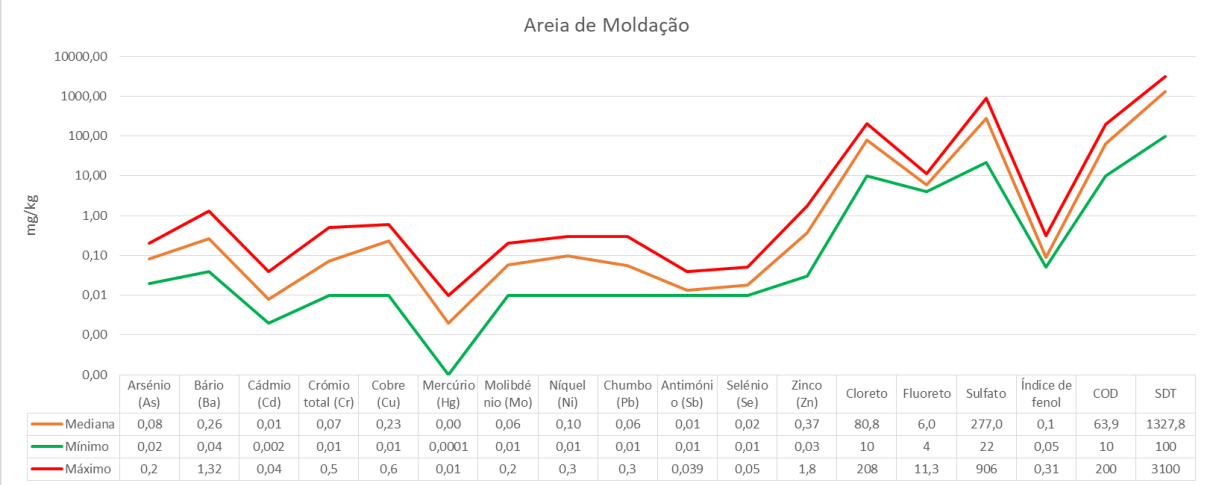
Da análise química do resíduo das areias de fundição verifica-se que a areia de moldação e a areia de machos podem ser classificadas como “inertes”, de acordo com a DL n° 102-D/2020.



	COT	BTEX	PCB	Óleo mineral	HAP
Mediana	8311	0,8	0,03	157,4	1,7
Mínimo	1600	0,035	0,007	20	0,16
Máximo	23400	4	0,07	460	3,7

Figura 13. Análise química do resíduo da Areia de Moldação.

(COT: Carbono Orgânico Total; BTEX: Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno; PCB: policlorobifenilos 7 congéneres;HAP: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)



	Arsénio (As)	Bário (Ba)	Cádmio (Cd)	Crómio total (Cr)	Cobre (Cu)	Mercúrio (Hg)	Molibdénio (Mo)	Níquel (Ni)	Chumbo (Pb)	Antimónio (Sb)	Selénio (Se)	Zinco (Zn)	Cloreto	Fluoreto	Sulfato	Índice de fenol	COD	SDT
Mediana	0,08	0,26	0,01	0,07	0,23	0,00	0,06	0,10	0,06	0,01	0,02	0,37	80,8	6,0	277,0	0,1	63,9	1327,8
Mínimo	0,02	0,04	0,002	0,01	0,01	0,0001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	10	4	22	0,05	10	100
Máximo	0,2	1,32	0,04	0,5	0,6	0,01	0,2	0,3	0,3	0,039	0,05	1,8	208	11,3	906	0,31	200	3100

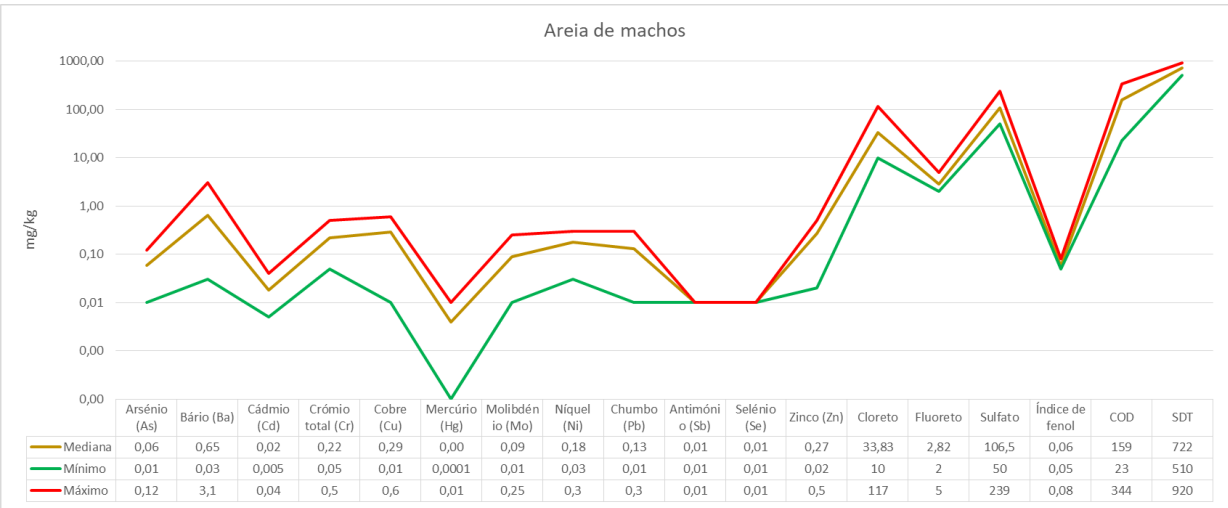
Figura 14. Análise química do eluato do resíduo da Areia de Moldação

(COD: Carbono Orgânico Dissolvido; SDT: Sólidos Dissolvidos Totais)

	COT	BTEX	PCB	Óleo mineral	HAP
Mediana	5550	2	0,02	132	0,6
Mínimo	1000	0,029	0,01	20	0,023
Máximo	15200	6	0,023	430	2

Figura 15. Análise química do resíduo da Areia de machos.

(COT: Carbono Orgânico Total; BTEX: Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno; PCB: policlorobifenilos 7 congéneres; HAP: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)



	Arsénio (As)	Bário (Ba)	Cádmio (Cd)	Crómio total (Cr)	Cobre (Cu)	Mercúrio (Hg)	Molibdénio (Mo)	Níquel (Ni)	Chumbo (Pb)	Antimónio (Sb)	Selénio (Se)	Zinco (Zn)	Cloreto	Fluoreto	Sulfato	Índice de fenol	COD	SDT
Mediana	0,06	0,65	0,02	0,22	0,29	0,00	0,09	0,18	0,13	0,01	0,01	0,27	33,83	2,82	106,5	0,06	159	722
Mínimo	0,01	0,03	0,005	0,05	0,01	0,0001	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	10	2	50	0,05	23	510
Máximo	0,12	3,1	0,04	0,5	0,6	0,01	0,25	0,3	0,3	0,01	0,01	0,5	117	5	239	0,08	344	920

Figura 16. Análise química do eluato do resíduo da Areia de machos.

(COD: Carbono Orgânico Dissolvido; SDT: Sólidos Dissolvidos Totais)

5.1.2 - Análise Química Quantitativa

A composição química quantitativa dos resíduos das areias de fundição foi efetuada por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), após secagem a 100-110ºC e posterior moagem e peneiração a 75µm (#200 ASTM), tendo-se obtido os teores apresentados na tabela seguinte.

Tabela 6. Análise química quantitativa por FRX das reias de fundição.

Parâmetro analítico (%)	Amostras						
	Areia Moldação 1	Areia Moldação 2	Areia Moldação 3	Areia Moldação 4	Areia Moldação 5	Areia Machos 1	Areia Machos 2
Perda ao rubro	2,9	3,3	4,8	6,8	3,9	2,0	1,0
SiO_2	95	89	86	84	88	95	96
Al_2O_3	1,4	4,2	4,5	5,0	4,6	1,4	0,78
Fe_2O_3	0,65	0,94	1,8	1,1	3,0	0,22	0,32
CaO	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	0,68	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.
MgO	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	0,68	0,83	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.
Na_2O	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	0,53	0,82	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.	< 0,50L.q.
K_2O	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	0,57	0,37	< 0,30L.q.	0,54	< 0,30L.q.
TiO_2	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.
MnO	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.
P_2O_5	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.	< 0,30L.q.

L.q. - Limite de quantificação

Na composição química destes resíduos destaca-se o teor de sílica (84 a 96%), o qual corresponde ao componente maioritário, seguido dos valores de perda ao rubro (1 a 6,8%) e alumínio (0,78 a 5,0%).

5.1.3 - Análise Mineralógica

A mineralogia dos resíduos das areias de fundição foi efetuada por difração de raios-X (DRX), num difractómetro de raios-X. A composição mineralógica das amostras ensaiadas encontra-se sintetizada na tabela seguinte.

Tabela 7. Análise mineralógica por DRX.

Composição mineral	Amostras				
	Areia Moldação 1	Areia Moldação 4	Areia Moldação 5	Areia Machos 1	Areia Machos 2
Quartzo (SiO_2)	x	x	x	x	x
Cristobalite (SiO_2)	x				
Silimanite (Al_2SiO_5)	x	x	x	x	x
Cordierite ($(Mg,Fe)2Al_4Si_5O_{18}$)		x			
Microclina ($KAlSi_3O_8$)		x		x	x
Montmorilonite ($(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 .nH_2O$)		x	x		
Analcite ($NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$)				x	

Através dos resultados para a análise mineralógica das areias (Tabela 7), é possível verificar que o quartzo apresenta-se na composição de todas as areias, assim como a silimanite. No que diz respeito à microclina, esta foi identificada nas duas areias de machos e na areia moldação 4. Para além destas composições, existem alguns minerais presentes em apenas algumas areias: a areia moldação 1 é a única areia que apresenta cristobalite, o mesmo se verifica para a cordierite na areia 4 e para a analcite na areia de machos 1. Quanto à montmorilonite esta encontra-se presente na areia moldação 4 e 5.

5.1.4 - Determinação de Carbono

O carbono foi determinado por análise química quantitativa de acordo com deteção IR, baseado em normas internacionais. Os resultados obtidos encontram-se sintetizados no quadro seguinte.

Tabela 8. Análise de carbono.

Parâmetro (%)	Amostras				
	Areia Moldação 1	Areia Moldação 2	Areia Moldação 3	Areia Machos 1	Areia Machos 2
Matéria Seca a 105º	99,7	98,8	99	99,5	99,9
Carbono total	2,22	2,02	3,42	1,43	0,77
Carbono Inorgânico total	< 0,42L.q.	< 0,42L.q.	< 0,64L.q.	< 0,32L.q.	< 0,11L.q.
Carbono Orgânico total	2,17	2,04	3,22	1,34	0,7

L.q. - Limite de quantificação

Quanto ao carbono, pelos resultados obtidos, este é maioritariamente orgânico, sendo que a percentagem de carbono inorgânico total é muito reduzida e inferior ao limite de quantificação do equipamento.

5.2 Incorporação das Areias de Fundição em Pastas Cerâmicas - Casos Práticos

O estudo de incorporação de resíduos de areia provenientes da indústria de fundição na indústria cerâmica, pretendeu explorar o potencial da simbiose industrial entre os dois setores industriais. Para tal, foram realizados ensaios de secagem e cozedura para avaliar o desempenho das composições cerâmicas com e sem incorporação de areia verde.

5.2.1 - Incorporação das Areias de Fundição em Composição Cerâmica de Tijolos

Os ensaios cerâmicos após secagem e cozedura foram realizados na pasta fornecida pela empresa cerâmica e nas composições formuladas com a referida pasta (tijolo refractário) com diferentes percentagens de incorporação das areias de fundição.

A incorporação das areias foi avaliada para diferentes adições ponderadas na pasta de referência, 2, 5 e 10% (Tabela 9). A pasta de referência é para a produção de tijolo.

Tabela 9. Composições formuladas com a pasta cerâmica de tijolo

Materiais	Composições			
	PCF0	PCF2	PCF5	PCF10
Pasta cerâmica	100%	98%	95%	90%
Areias de fundição	0%	2%	5%	10%

A preparação das várias composições para conformação envolveu a secagem em estufa elétrica a 100-110ºC e posterior desagregação/moagem em moinho de martelos. Tendo sido simulada a atomização através da humidificação (5%) do material e respetiva homogeneização da humidade (24 h), seguida da passagem ao peneiro de 1 mm.

Para efetuar os ensaios cerâmicos foi necessário conformar provetes de ensaio. Com este fim, foram preparados provetes paralelepipédicos (≈12x2x1 cm) conformados por extrusão, numa fieira laboratorial com dispositivo de vácuo (≈0,85 bar).

A secagem dos provetes efetuou-se, primeiramente, à temperatura ambiente e posteriormente, em estufa elétrica a 100-110ºC.

A cozedura dos provetes foi realizada, no laboratório, em forno elétrico programável às temperaturas de pirómetro de 980, 1120º e 1150ºC.

A determinação do teor de humidade após extrusão (base húmida) foi realizada recorrendo à norma NP 84. A resistência mecânica à flexão em seco e cozido realizou-se de acordo com as normas ASTM C689 e ASTM C674, respetivamente, em que a velocidade de carga aplicada nos provetes secos e cozidos foi de 1 N/s e 50 N/s, respetivamente, a célula de carga com capacidade de 5 kN e a distância interapoios de 8 cm. A retração linear foi determinada com recurso à norma ASTM C326 e os restantes parâmetros realizados de acordo com procedimentos internos do CTCV.

Os resultados obtidos após secagem e cozedura das várias composições ensaiadas são os constantes da Tabela 10 e representam-se nas Figs 17 a 19.

Tabela 10. Ensaios de secagem e cozedura na composição de referência e em composições com incorporação de resíduo.

Parâmetro	PCF0	PCF2	PCF5	PCF10
Temperatura de secagem: 110ºC				
Humidade de extrusão* (%)	20,2	20,3	20,2	20,0
Retração verde-seco (%)	7,27	7,46	7,61	7,44
Resistência mecânica à flexão (kgf/cm2)	33	33	33	34
Temperatura de cozedura: 980ºC				
Retração seco-cozido (%)	-0,17	-0,14	-0,13	-0,22
Resistência mecânica à flexão (kgf/cm2)	114	106	105	93
Absorção de água (%)	15,7	16,0	15,7	15,6
Temperatura de cozedura: 1120ºC				
Retração seco-cozido (%)	2,43	2,36	2,28	2,19
Resistência mecânica à flexão (kgf/cm2)	163	156	147	139
Absorção de água (%)	11,5	11,9	11,8	12,0
Temperatura de cozedura: 1150ºC				
Retração seco-cozido (%)	2,88	2,75	2,63	2,49
Resistência mecânica à flexão (kgf/cm2)	175	173	155	146
Absorção de água (%)	10,5	10,8	10,7	10,9

* Base Húmida

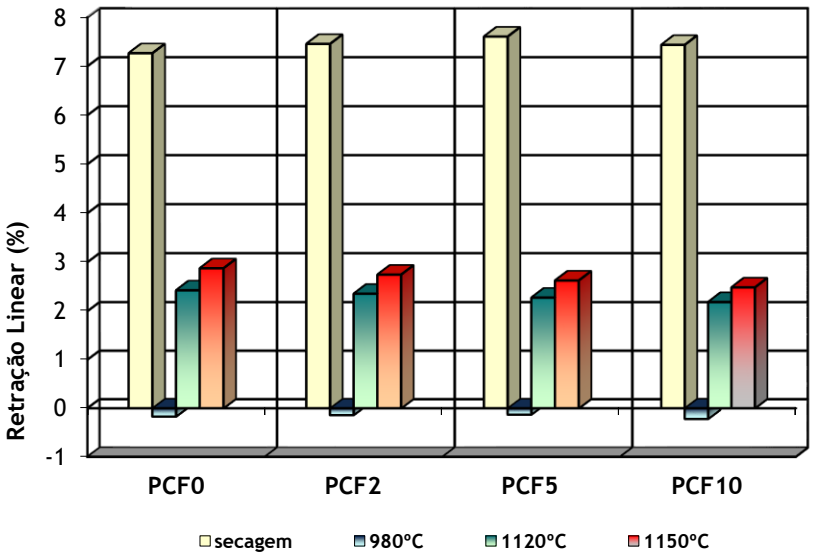


Figura 17. Retração das composições, na secagem e versus temperatura de cozedura.

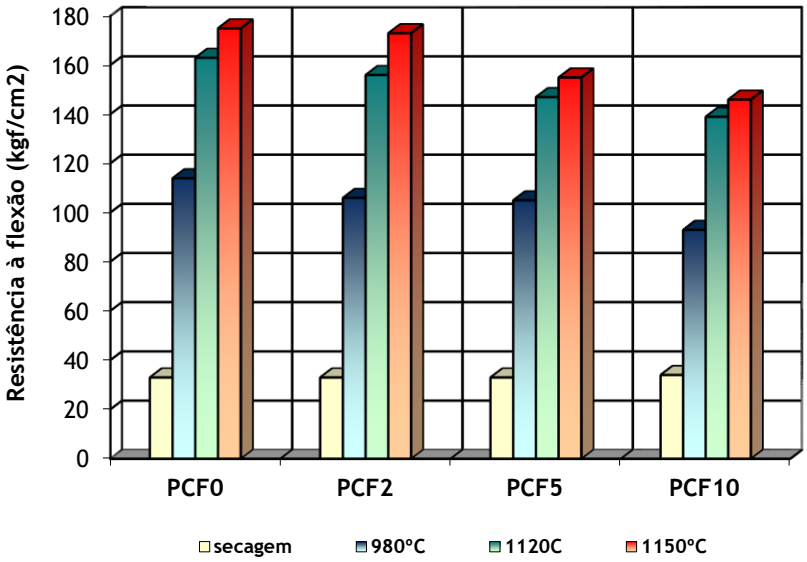


Figura 18. Resistência mecânica à flexão das composições, na secagem e versus temperatura de cozedura.

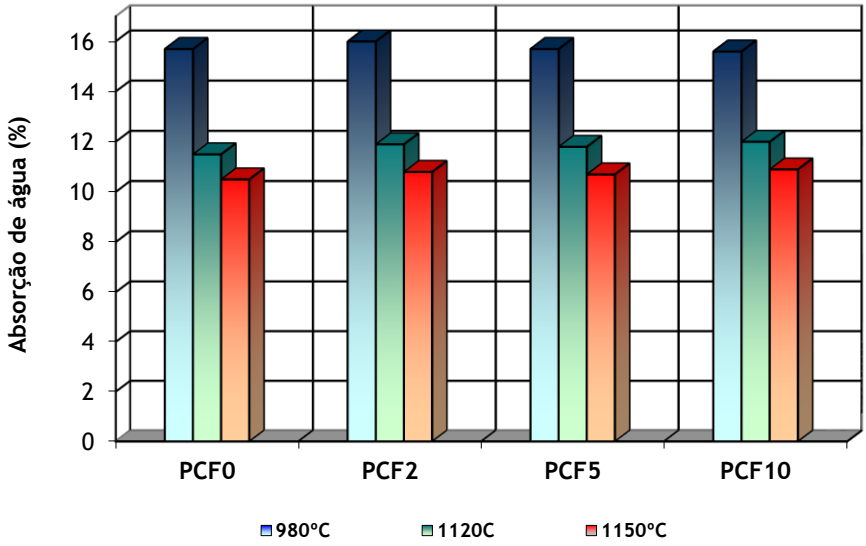


Figura 19. Absorção de água das composições, versus temperatura de cozedura.

Das propriedades cerâmicas, de secagem e cozedura, reveladas pelas composições ensaiadas com incorporação de lamas em comparação com a pasta de referência de tijolo, salienta-se o seguinte:

- ✓ A humidade de extrusão nas condições laboratoriais ensaiadas, com a incorporação das areias de fundição, mantém-se sensivelmente na mesma ordem de grandeza da pasta cerâmica em uso;
- ✓ A retração linear após secagem mantém-se sensivelmente na mesma ordem de grandeza com a adição das várias percentagens de areia;
- ✓ Na temperatura de cozedura de 980ºC e nas diferentes adições das areias ensaiadas, as composições mantém o comportamento de dilatação observado na composição de referência, sem alterações de relevância. Enquanto nas restantes temperaturas de cozedura ensaiadas as várias composições apresentam um valor de retração linear na mesma ordem de grandeza;
- ✓ A resistência mecânica à flexão após secagem, para as diferentes adições de areia de fundição, apresenta valores na mesma ordem de grandeza da pasta cerâmica de referência. Enquanto que, após a cozedura apresenta uma ligeira tendência decrescente que aumenta com o aumento da percentagem de incorporação das areias, no entanto, os valores obtidos são dentro do intervalo aceitável para a produção de tijolo;
- ✓ Os valores do índice de absorção de água mantêm-se na mesma ordem de grandeza com a incorporação das areias, relativamente à composição de referência.

Nos provetes cozidos das várias composições foi avaliada visualmente a cor de cozedura e a eventual presença de defeitos, tendo sido efetuado, também, o ensaio de manifestação de eflorescências. Neste ensaio os provetes cozidos às várias temperaturas ensaiadas foram colocados em água até metade da sua espessura, durante 24 h, e de seguida secos a cerca de 110ºC. Os resultados obtidos constam da Tabela 11 (fotografias no Anexo I).

Tabela 11 – Caraterísticas de cozedura e manifestação de eflorescências

	980ºC	*1120ºC*	*1150ºC*
PCF0			
Cor	*Bege escuro*	*Cinzento*	*Cinzento*
Coração negro	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
PCF2			
Cor	*Bege escuro*	*Cinzento*	*Cinzento*
Coração negro	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
PCF5			
Cor	*Bege escuro*	*Cinzento*	*Cinzento*
Coração negro	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
PCF10			
Cor	*Bege escuro*	*Cinzento*	*Cinzento*
Coração negro	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*	*Negativo*	*Negativo*

Das características observáveis nas composições ensaiadas, às temperaturas ensaiadas, salienta-se o seguinte:

- ✓ A cor de cozedura da pasta de referência permanece inalterável com as várias incorporações ensaiadas, verificando-se que a cor torna-se mais escura da temperatura de cozedura de 980ºC (bege escuro) para a temperatura de cozedura de 1120ºC e 1150ºC (cinzento);
- ✓ Nas três temperaturas ensaiadas e nas três adições de resíduo não ocorrem fenómenos de coração negro, conforme acontece na pasta de referência;
- ✓ Não se verificou a manifestação de eflorescências nas várias incorporações ensaiadas, conforme acontece na pasta de referência.

5.2.2 - Incorporação das Areias de Fundição em Composição Cerâmica de Grés Porcelânico

Os ensaios cerâmicos após secagem e cozedura foram realizados na pasta fornecida pela empresa cerâmica e nas composições formuladas com a referida pasta (grés porcelânico) com diferentes percentagens de incorporação das areias de fundição.

A incorporação das areias foi avaliada para diferentes adições ponderadas na pasta de referência, 2, 5 e 10% (Tabela 12). A pasta de referência é para a produção de grés porcelânico.

Tabela 12. Composições formuladas com a pasta cerâmica de grés porcelânico

Materiais	Composições			
	PLF0	PLF2	PLF5	PLF10
Pasta cerâmica	100%	98%	95%	90%
Areias de fundição	0%	2%	5%	10%

A preparação das amostras para conformação envolveu a secagem em estufa elétrica a 100-110ºC e desagregação em moinho de martelo. Tendo sido simulada a atomização através da humidificação (5%) do material e respetiva homogeneização da humidade (24 h), seguida da passagem ao peneiro de 1 mm.

Para efetuar os ensaios cerâmicos foi necessário conformar provetes de ensaio. Com este fim, foram preparados provetes paralelepipédicos (10x5x0,5 cm) conformados por prensagem, numa prensa laboratorial com uma pressão de 250 Kgf/cm2. A secagem destes provetes efetuou-se, primeiramente, à temperatura ambiente e posteriormente, em estufa elétrica a 110ºC. A cozedura dos provetes foi realizada em forno industrial da unidade cerâmica, a uma temperatura de 1100ºC.

A resistência mecânica à flexão em seco e cozido realizou-se de acordo com as normas ASTM C689 e ASTM C674, respetivamente, em que a velocidade de carga aplicada nos provetes secos e cozidos foi de 1 N/s e 50 N/s, respetivamente, a célula de carga com capacidade de 5 kN e a distância interapoios de 8 cm. A retração linear foi determinada com recurso à norma ASTM C326 e os restantes parâmetros realizados de acordo com procedimentos internos do CTCV.

Os resultados obtidos após secagem e cozedura das várias composições ensaiadas são os constantes do Tabela 13 e representam-se nas Figs. 20 a 22.

Tabela 13. Ensaios de secagem e cozedura na composição de referência e em composições com incorporação de resíduo.

Parâmetro	PLF0	PLF2	PLF5	PLF10
Temperatura de secagem: 110ºC				
Humidade de prensagem* (%)	5,2	5,5	5,5	5,4
Retração verde-seco (%)	-0,46	-0,41	-0,38	-0,38
Resistência mecânica à flexão (kgf/cm2)	19	21	20	21
Temperatura de cozedura: 1100ºC				
Retração seco-cozido (%)	7,58	6,71	6,6	5,75
Resistência mecânica à flexão (kgf/cm2)	422	406	397	405
Absorção de água (%)	1,7	0,7	1	2,1

* Base Seca

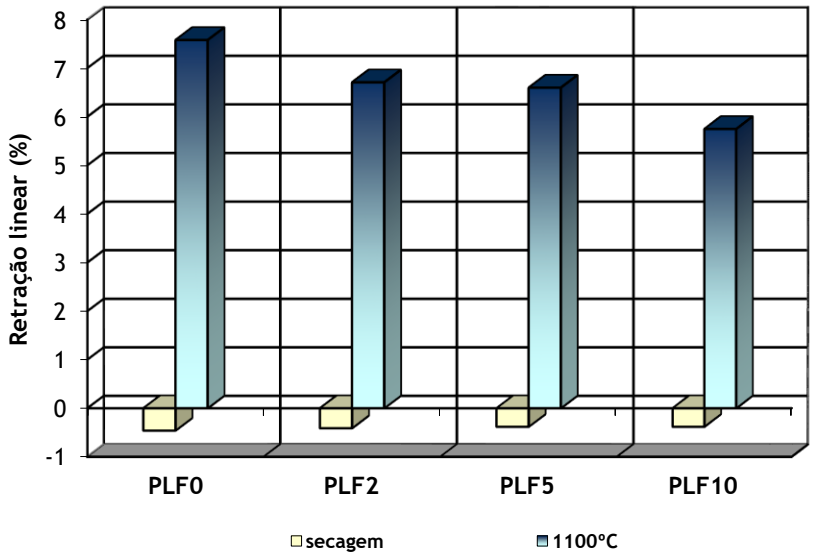


Figura 20. Retração das composições, na secagem e versus temperatura de cozedura.

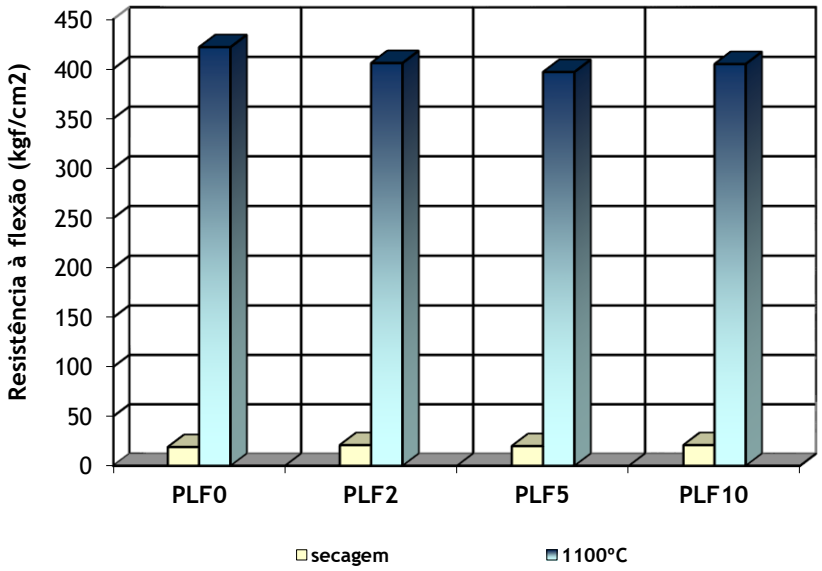


Figura 2. Resistência mecânica à flexão das composições, na secagem e versus temperatura de cozedura.

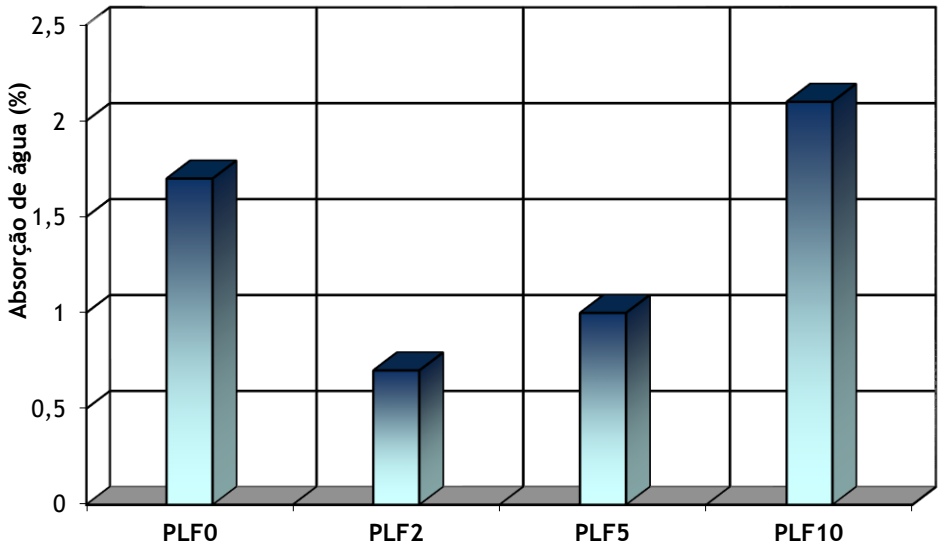


Figura 23. Absorção de água das composições, versus temperatura de cozedura.

Das propriedades cerâmicas, de secagem e cozedura, reveladas pelas composições ensaiadas com incorporação das areias de fundição em comparação com a pasta de referência de grés porcelânico, salienta-se o seguinte:

- ✓ A humidade de prensagem nas condições laboratoriais ensaiadas, com a incorporação de areias de fundição, mantém-se sensivelmente na mesma ordem de grandeza da pasta cerâmica em uso;
- ✓ Nas diferentes adições do resíduo ensaiadas a retração linear após secagem mantém o comportamento de dilatação observado na composição de referência e sensivelmente na mesma ordem de grandeza;
- ✓ A retração linear após cozedura diminui ligeiramente com o aumento da percentagem de incorporação de areias de fundição;
- ✓ A resistência mecânica à flexão após secagem aumenta ligeiramente com a incorporação das areias de fundição, enquanto após cozedura diminui ligeiramente com a incorporação das areias de fundição, no entanto, mantém-se dentro dos valores aceitáveis para este tipo de produto;
- ✓ O valor do índice de absorção de água diminui ligeiramente para as incorporações de 2 e 5%, e aumenta ligeiramente para a incorporação de 10% de areias de fundição, contudo estes valores mantém-se dentro da mesma ordem de grandeza.

Nos provetes cozidos das várias composições foi avaliada visualmente a cor de cozedura e a eventual presença de defeitos, tendo sido efetuado, também, o ensaio de manifestação de eflorescências. Neste ensaio

os provetes cozidos às várias temperaturas ensaiadas foram colocados em água até metade da sua espessura, durante 24 h, e de seguida secos a cerca de 110ºC. Os resultados obtidos constam da Tabela 14 (fotografias no Anexo II).

Tabela 14. Caraterísticas de cozedura e manifestação de eflorescências

	1100ºC
PLF0	
Cor	*Bege*
Coração negro	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*
PLF2	
Cor	*Bege*
Coração negro	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*
PLF5	
Cor	*Bege*
Coração negro	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*
PLF10	
Cor	*Bege*
Coração negro	*Negativo*
Eflorescências	*Negativo*

Das caraterísticas observáveis nas composições, às temperaturas ensaiadas, salienta-se o seguinte:

- ✓ A cor de cozedura da pasta de referência (bege) permanece inalterável com as várias incorporações ensaiadas com as areias de fundição;
- ✓ Para a temperatura ensaiada e nas três adições de resíduo não ocorrem fenómenos de coração negro, conforme acontece na pasta de referência;
- ✓ Não se verificou a manifestação de eflorescências nas várias incorporações ensaiadas, conforme acontece na pasta de referência.

6 – Conclusões

Os principais resíduos associados à indústria de fundição englobam as areias de fundição, as escórias, lamas e poeiras, sendo as areias o resíduo com maior expressão no setor.

Estas areias de fundição apresentam potencialidade para serem incorporadas industrialmente no setor cerâmico, nomeadamente no setor da construção, no tijolo e em grés porcelânico.

O estudo laboratorial realizado com as composições cerâmicas PCF0 e PLF0 permitiu verificar que as caraterísticas tecnológicas destas pastas de referência, nomeadamente os parâmetros de secagem e cozedura, não sofreram alterações significativas, no que concerne às incorporações com adição de 2%, 5% e 10% de areias de fundição, demonstrando a viabilidade de incorporação deste tipo de resíduo na indústria cerâmica. Salienta-se que em cenário industrial poderá mesmo ocorrer melhoria nas caraterísticas dos produtos relativamente às determinadas em laboratório.

Desta forma, com a incorporação das areias na cerâmica poderá diminuir a percentagem de matérias-primas silicatadas na sua composição, substituindo-as por um resíduo de uma outra atividade industrial, contribuindo, assim para uma economia mais verde.

Podemos concluir que a indústria de fundição poderá contribuir para a estratégia de circularidade, através da introdução dos seus resíduos num outro ciclo de vida, sendo a indústria cerâmica um exemplo de viabilidade desta aplicação.

Coimbra, 28 de setembro de 2022

Marisa Almeida (Responsável Unidade de Ambiente e Sustentabilidade)	**Anabela Amado** (Técnica Qualificada Unidade de Ambiente e Sustentabilidade)	**Cristiana Costa Claro** (Técnica Qualificada Unidade de Ambiente e Sustentabilidade)

7 - Bibliografia

Ahmad, Z. (2006) Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. Butterworth-Heinemann

Alonso-Santurde, R., Coz, A., Viguri, J.R., Andrés, A.(2012) Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks. Construction and Building Materials 27, 97–106pp. (https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022)

APF – Associação Portuguesa de Fundição. Consultado a 17 de março de 2022 em https://apf.com.pt/

APF (2017) Qualificação e renovação: a fundição portuguesa na EU. Estudo eficiência de processos produtivos para as PME do setor.

Bragança, S. R., Vicenzi, J., Guerino, K., Bergmann, C. P. (2006) Recycling of iron foundry sand and glass waste as raw material for production of whiteware. Waste Manage Res 24, 537–544pp.

CAEF – The European Foundry Association. Consultado a 18 de março de 2022 em https://www.caef.eu/

Castro, A., Leitão, A., Silva, F. (2018) Contributos para um plano estratégico para a indústria portuguesa da fundição. Associação Portuguesa da Fundição. pp. 15-22. Disponível em: https://apf.com.pt/plano-estrategico/

Çevik, S., Umtuk, T., Oktay, B. M., Demirbas, A. K. (2017) Mechanical and microstructural characterization of cement mortars prepared by waste foundry sand (WFS). . Aust Ceram Soc 53, 829-837 pp. (https://doi.org/10.1007/s41779-017-0096-9)

Decreto-Lei n° 102-D/2020 de 10 de dezembro. Relativo ao regime geral da gestão de resíduos, deposição de resíduos em aterro e gestão de fluxos específicos de resíduos. Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República n° 239 Série I de 10/12/2020.

Decreto-Lei n° 73/2011 de 17 de junho. Relativo aos resíduos, procedendo à alteração de diversos regimes jurídicos na área dos resíduos. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República n° 116 Série I de 17/06/2011.

EN 10020. 2000, Definition and classification of grades of steel.

FIEMG (n.d.) Guia de boas práticas do setor fundição.

Gonçalves C. (2017) Incorporação de areias e escórias de fundição em argamassas e betões. Dissertação de Mestrado, Ciclo de Estudos Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade do Minho.

https://apf.com.pt/plano-estrategico/

https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/102-d-2020-150908012

https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/73-2011-670034

https://www.apf.com.pt/wp-content/uploads/2021/03/CVR_relatorio-final-APF-2018-01-23.pdf

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-29032012-121843/publico/GabrielaPenkaitis.pdf

INE - Instituto Nacional de Estatística. Consultado a 18 de março de 2022 em www.ine.pt

Kavitha, O. R., Shyamala, G., Akshana, V. (2021) Study os sustainable concrete property containing waste foundry sand. Materiasl Today: Proceedings 39, 855-860pp. (https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.663)

Klinsky, L.M.G., Fabbri, G.T.P. (2009) Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Transportes. Vol. 17, n° 2, pp. 36-45

Mendes, J.A. (2000) O ferro na história: das artes mecânicas às belas-artes. Gestão e Desenvolvimento, n° 9, pp. 301-318.

Monosi, S., Sani, D., Tittarelli, F. (2010) Used Foundry Sand in Cement Mortars and Concrete Production. The Open Waste Management Journal, 3, 18-25pp.

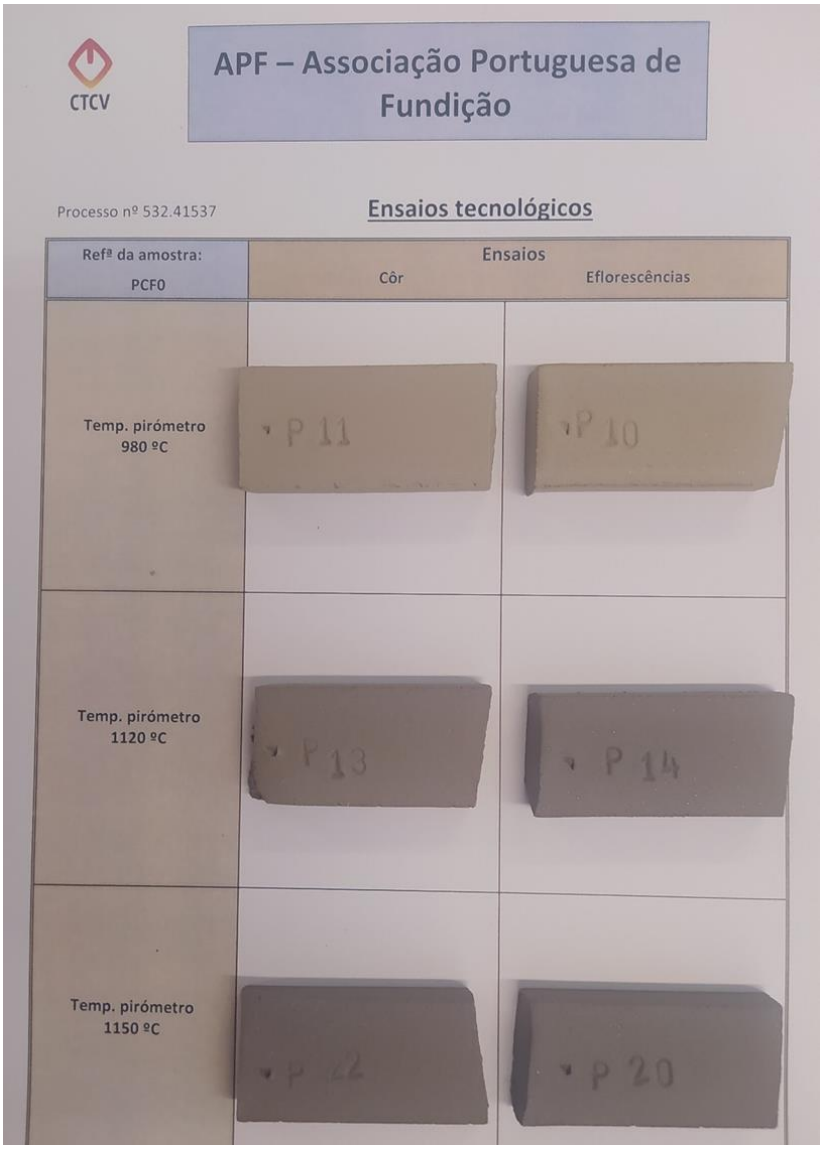
Penkaitis, G. (2012) Impacto ambiental gerado pela disposição de areias de fundição: estudo de caso. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciência Ambiental. Universidade de São Paulo.

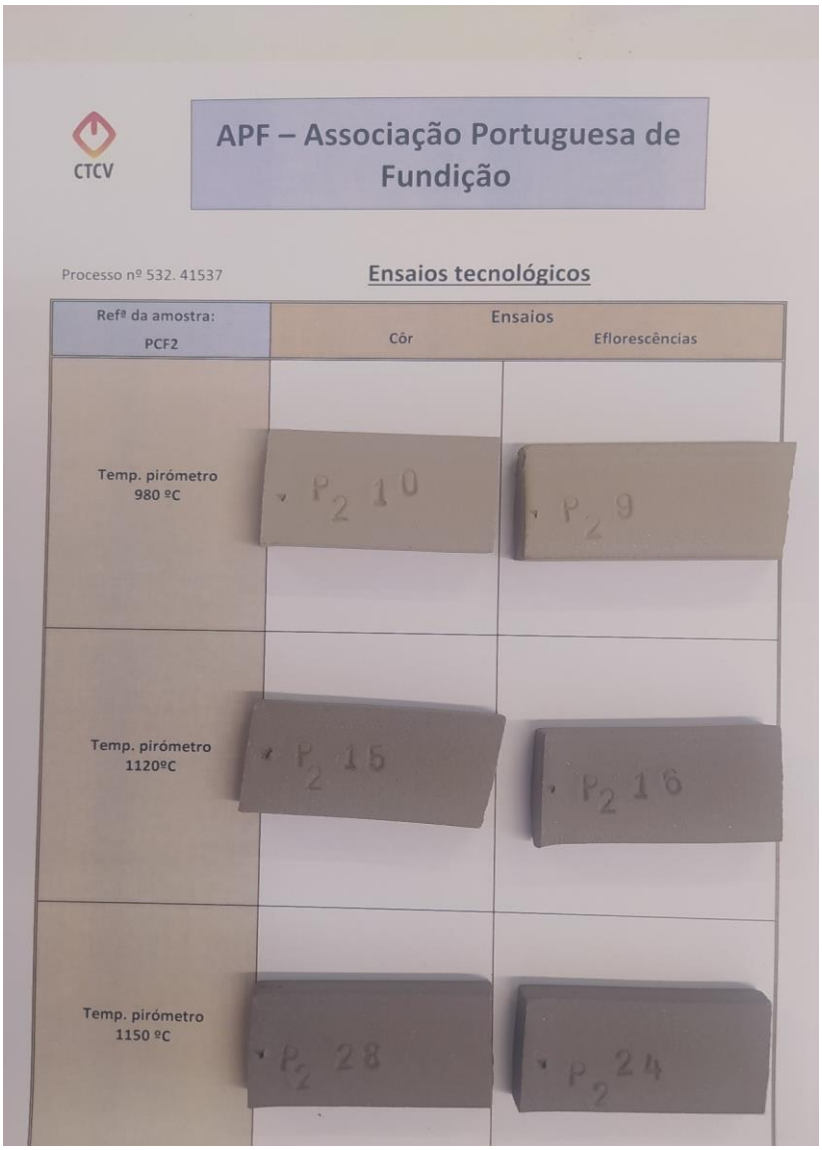
Quaranta, N. E., Lalla, N. S., Caligaris, M. G., Boccaccini, A. R., Vieira, C. M. (2010) Ceramic tiles adding waste foundry sand to different clays. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 140 (https://doi.org/0.2495/WM100101)

Roa, K.L., Paredes, R.A., Trejo, F., Castro, H.F., Vera, E., Peña, G. (2019) Modelling the effect of temperature on the physical and mechanical properties of ceramic composites filled with foundry sand waste. Journal of Physics: Conference Series, 1386, 012-126pp. (https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012126)

8 - Anexos

Anexo I – Fotografias do mostruário das amostras com pasta de tijolo





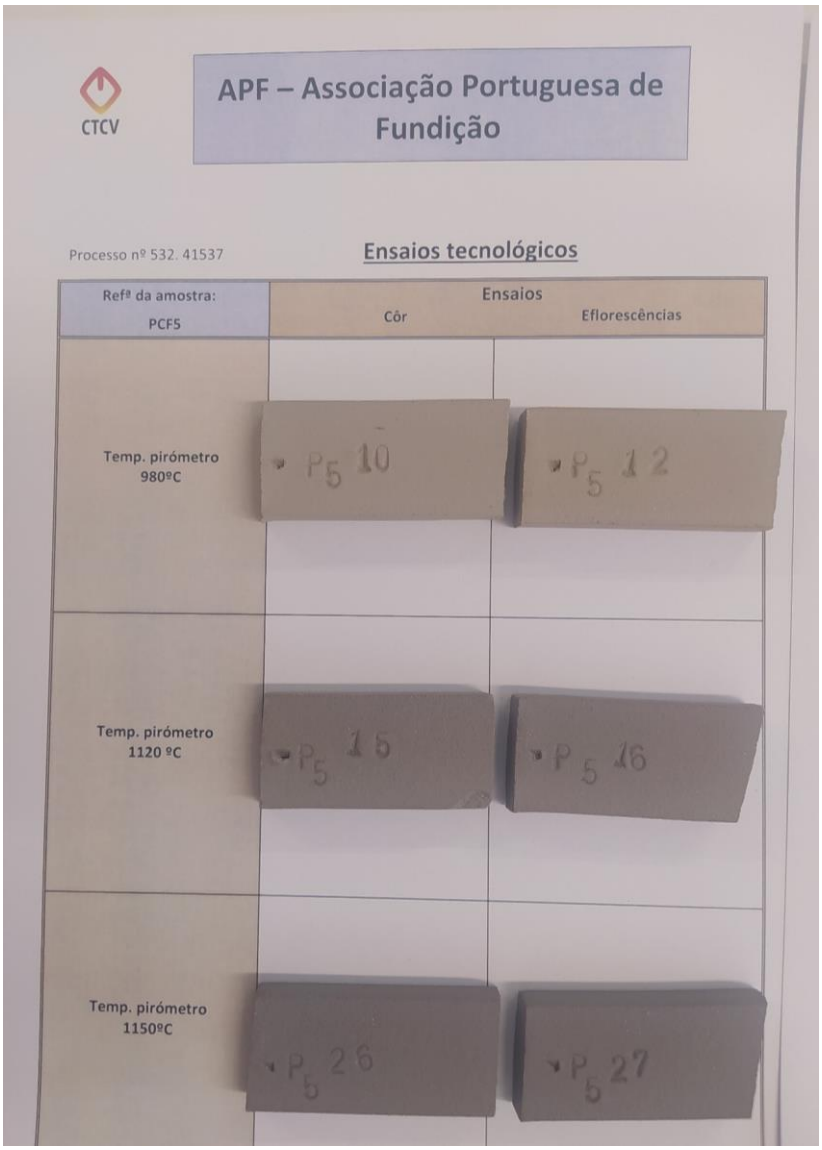
CTCV

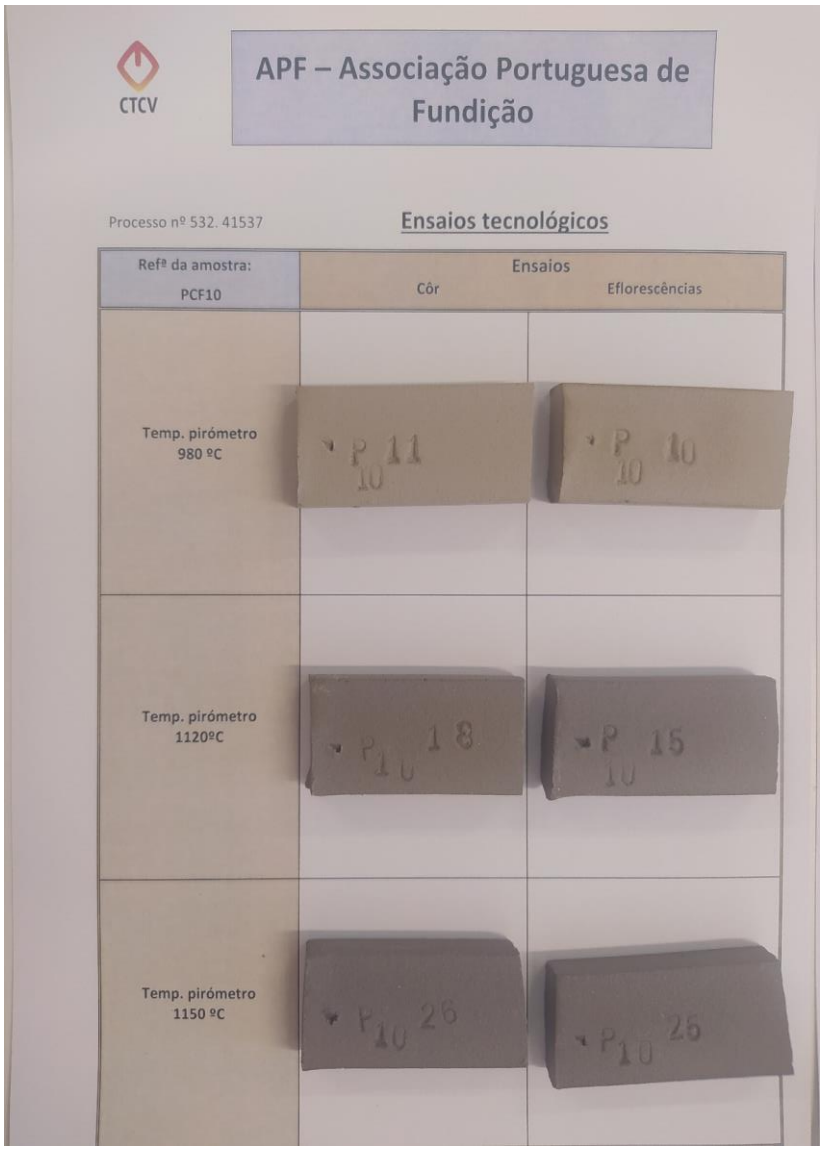
APF – Associação Portuguesa de Fundição

Processo nº 532. 41537

Ensaios tecnológicos

Refª da amostra: PCF2	Ensaios	
	Côr	Eflorescências
Temp. pirómetro 980 ºC	P2 10	P2 9
Temp. pirómetro 1120ºC	P2 15	P2 16
Temp. pirómetro 1150 ºC	P2 28	P2 24


CTCV
APF – Associação Portuguesa de Fundição
Processo nº 532. 41537
Ensaios tecnológicos
Refª da amostra: PCF5
Ensaios
Côr
Eflorescências
Temp. pirómetro 980ºC
P5 10
P5 12
Temp. pirómetro 1120 ºC
P5 15
P5 16
Temp. pirómetro 1150ºC
P5 26
P5 27



CTCV

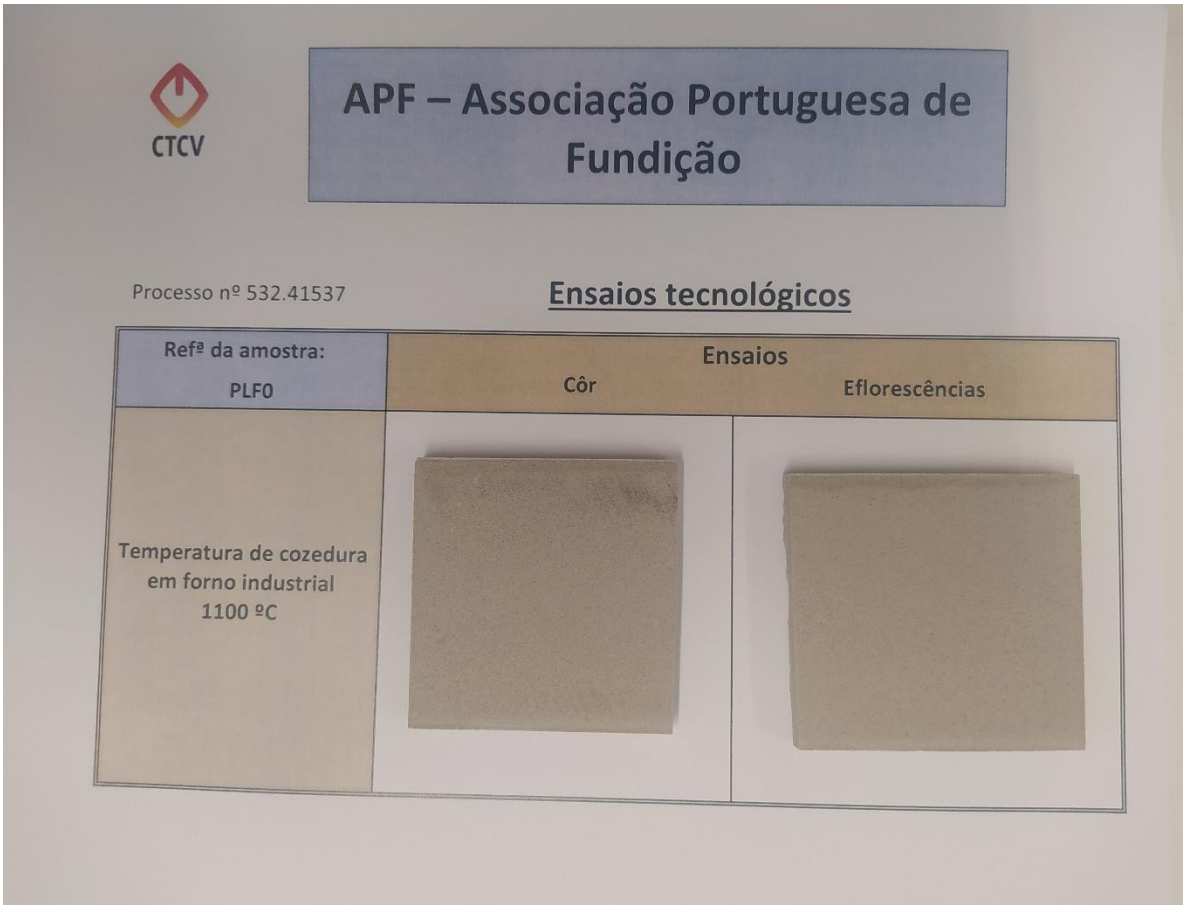
APF – Associação Portuguesa de Fundição

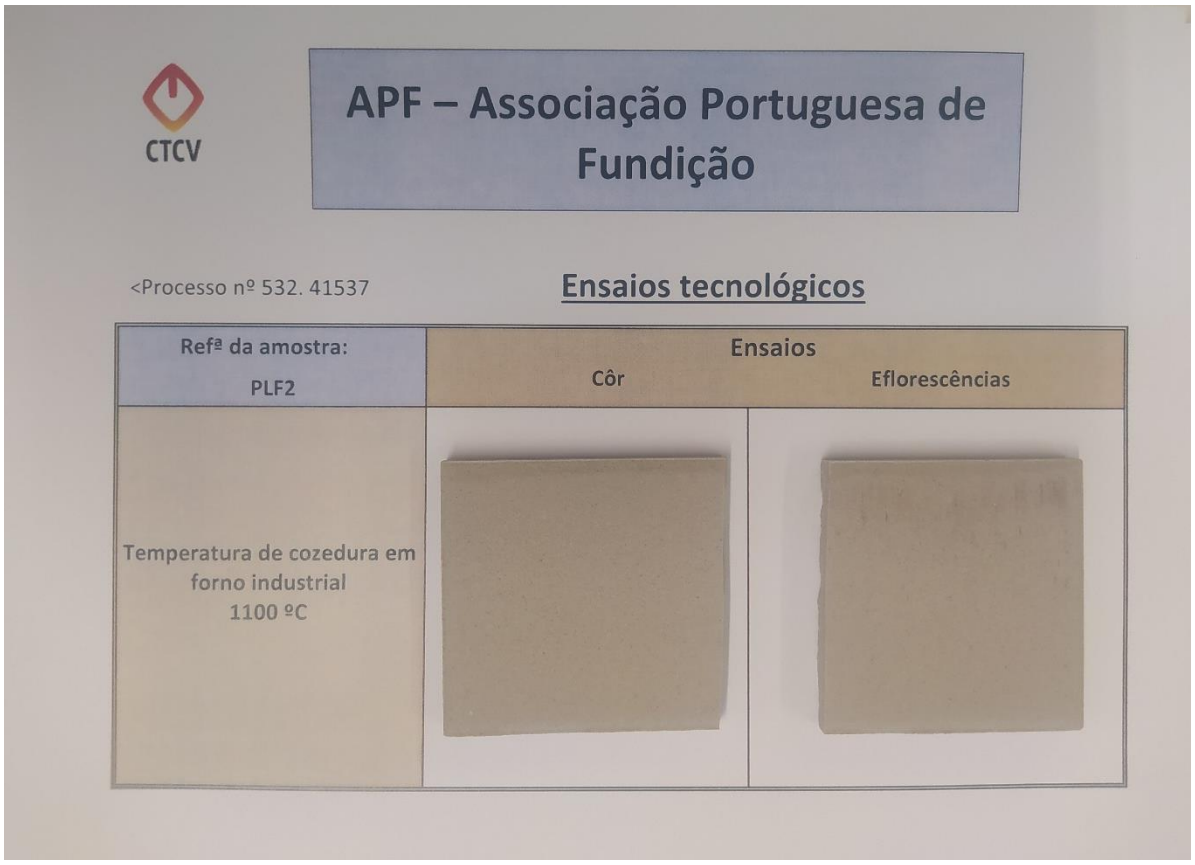
Processo nº 532. 41537

Ensaios tecnológicos

Refª da amostra: PCF10	Ensaios	
	Côr	Eflorescências
Temp. pirómetro 980 ºC	P 11 10	P 10 10
Temp. pirómetro 1120ºC	P 18 10	P 15 10
Temp. pirómetro 1150 ºC	P 26 10	P 25 10

Anexo II – Fotografias do mostruário das amostras com pasta de grés





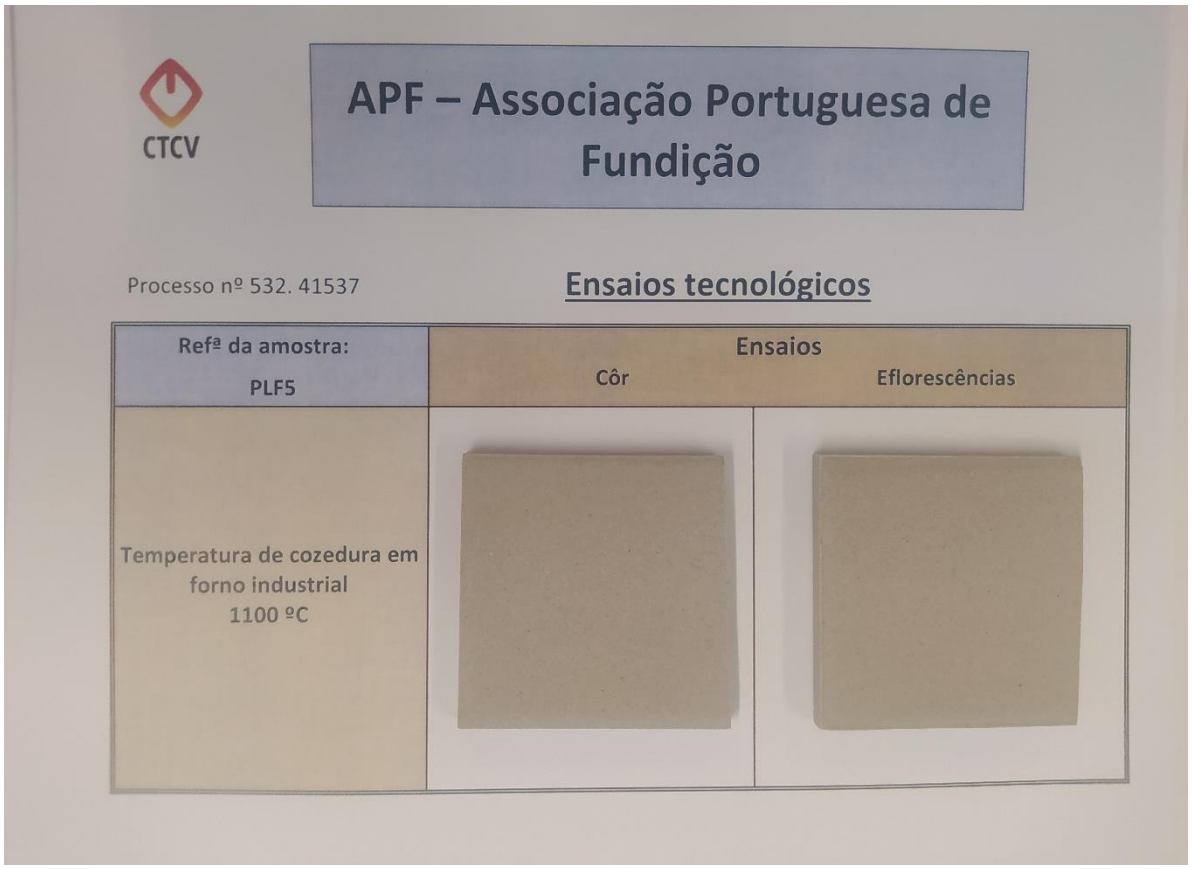
CTCV

APF – Associação Portuguesa de Fundição

<Processo nº 532. 41537

Ensaios tecnológicos

Refª da amostra: PLF2	Ensaios	
	Côr	Eflorescências
Temperatura de cozedura em forno industrial 1100 ºC		



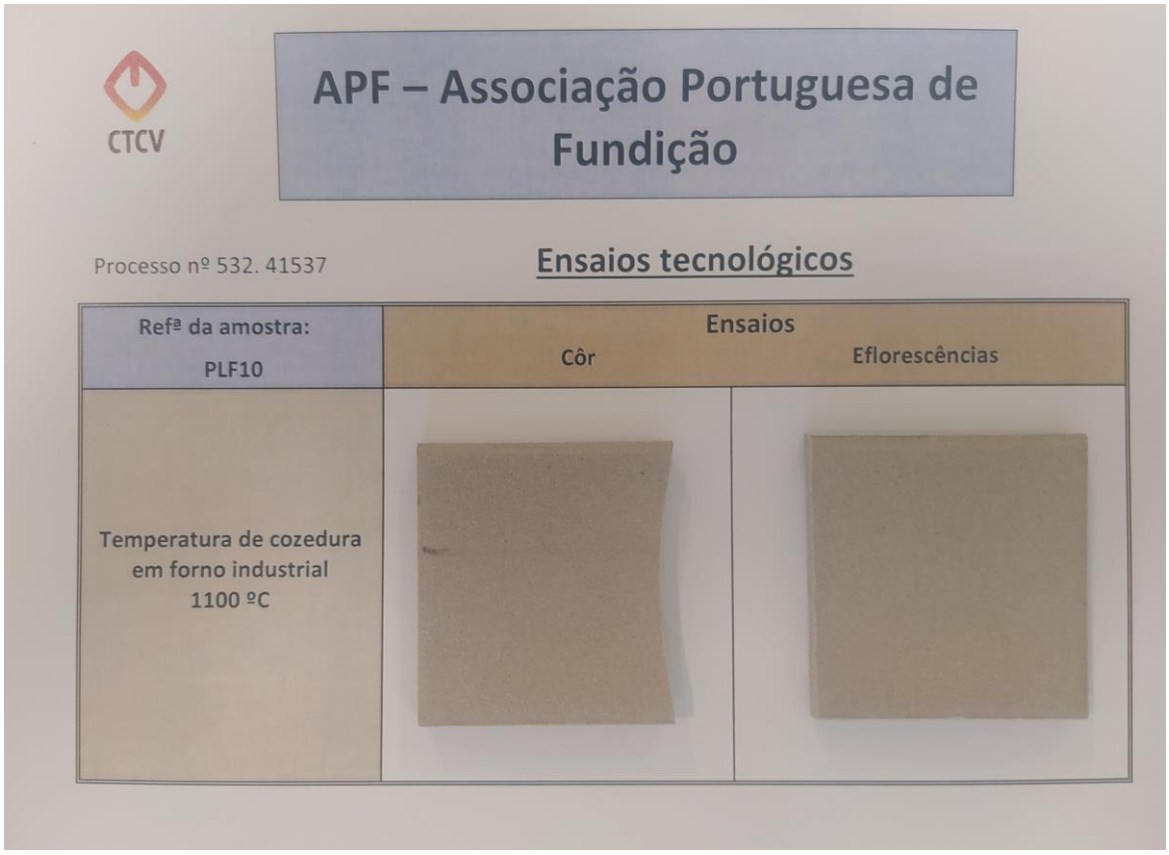
CTCV

APF – Associação Portuguesa de Fundição

Processo nº 532. 41537

Ensaios tecnológicos

Refª da amostra: PLF5	Ensaios	
	Côr	Eflorescências
Temperatura de cozedura em forno industrial 1100 ºC		



CTCV

APF – Associação Portuguesa de Fundição

Processo nº 532. 41537

Ensaios tecnológicos

Refª da amostra: PLF10	Ensaios	
	Côr	Eflorescências
Temperatura de cozedura em forno industrial 1100 ºC		