



# **IMPACTO DA PREPARAÇÃO E FUSÃO DE CARGAS NA QUALIDADE DOS FUNDIDOS**

**FRANCISCO NEVES COUTO DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM 23 DE JULHO DE 2019

**LUÍS FILIPE MALHEIROS**

**ORIENTADOR**

PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, FEUP

|                  |                                                                       |                                                            |                           |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <i>CANDIDATO</i> | Francisco Neves Couto de Oliveira                                     |                                                            | <i>Código</i> - 201405753 |
| <i>TÍTULO</i>    | Impacto da Preparação e Fusão de Cargas na Qualidade dos Fundidos     |                                                            |                           |
| <i>DATA</i>      | 23 de julho de 2019                                                   |                                                            |                           |
| <i>LOCAL</i>     | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 - 14:00h |                                                            |                           |
| <i>JÚRI</i>      | <i>Presidente</i>                                                     | Professor Doutor Laura Maria Melo Ribeiro                  | DEMM/FEUP                 |
|                  | <i>Arguente</i>                                                       | Professor Doutor Delfim Fernandes Soares                   | DEM/Uminho                |
|                  | <i>Orientador</i>                                                     | Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira | DEMM/FEUP                 |

## Resumo

A presente dissertação, desenvolvida na empresa ZOLLERN & Comandita Portugal, teve como principal objetivo melhorar/otimizar o nível da taxa de refugo de um componente (microfuso), a que corresponde um grande volume de produção desta fundição. O foco do trabalho incidiu sobre o estudo da influência dos principais parâmetros do processo de fabrico, potencialmente responsáveis pelo aparecimento de poros (defeito crítico) na peça, e seu respetivo reajuste com vista a baixar a taxa de refugo.

No início do trabalho, a produção deste fundido vinha apresentando grandes problemas de porosidade ( $\approx 66\%$  do refugo desse componente), pelo que se impunha escarpelizar as principais causas indutoras do aparecimento desse tipo de defeito com vista a otimizar a sua produção.

Em primeiro lugar, e com principal destaque para a etapa de fusão, este trabalho pretende investigar o ponto de situação da empresa em relação à problemática em estudo, visto que, nos últimos tempos, a taxa de refugo devido a porosidade nesta referência era superior a 10%. Para isso, foi necessário estudar, por exemplo, a sequência de carregamento das matérias-primas no forno, a extensão e *timing* de desoxigenação e o rendimento de adição dos elementos de liga devido ao seu impacto no desenrolar do processo. De seguida, e após otimizar todos os parâmetros influentes desta etapa do processo, foi possível analisar e comparar todos os resultados obtidos com os da empresa, anteriores a qualquer alteração, de modo a quantificar todos os ganhos daí resultantes. Assim, e após uma análise de todo o histórico de alterações do processo e do produto, de um extenso trabalho de campo, e da observação de todo o processo em causa, foi possível considerar outros fatores, com importância para o caso, o que implicou a realização de mais ensaios com vista a melhorar a sanidade final deste componente.

Os resultados obtidos permitiram constatar que uma adequada sequência de carregamento do forno, uma boa desoxigenação do banho, as propriedades da carapaça cerâmica e o método de vazamento utilizado são parâmetros fulcrais na melhoria e controlo do processo, tendo-se conseguido reduzir a porosidade em cerca de 96,6% do valor inicial.

## Palavras-chave

*Fundição de precisão por modelo de cera perdida (Investment Casting); Preparação de cargas; Fusão; Aços*

## Abstract

The present dissertation was carried out at ZOLLERN & Comandita Portugal.

The main objective was to optimize the foundry processes and, at the same time, improve the overall quality of a particular component (micro spindle). Due to the high-volume production, the focus of the work was to study the influence of the main and most important parameters of the manufacturing process that could induce the formation of pores (critical defect) in the castings.

In the beginning, the micro spindle had high porosity problems (representing about 66% of the scrap of the component); so, it was necessary to find and understand their causes. First, with the main emphasis on the melting and casting practices, this work was carried out to understand the impact of the practices in the scrap rate. The scrap rate, above 10%, was perceived as mainly caused by the melting, deoxidation and pouring of the bath.

So, it was necessary to study, for example, the impact of the sequence of addition of all raw materials to the melt, the fading of the alloying elements during the melting and the degree and duration of deoxidation since they are critical steps of the foundry process. Then, and after optimizing all the critical parameters of this process, it was possible to analyse and compare the results obtained with historical results, allowing us to quantify and understand the influence of any changes to the process on the final quality of the product. Thus, after an investigation of the entire history of changes in the process and product, extensive work in the shop floor and the observation of the entire manufacturing process, it was possible to consider other causes, with the same importance for the product quality, guaranteeing the improvement of the final quality of this component/product.

The results of this work allowed to confirm that the proper loading sequence of the raw materials, a good deoxidation of the melt, the properties of the ceramic shell and the pouring method are key tools for process control and improvement, reducing porosity by about 96.6% of the initial value.

## Keywords

*Lost Wax (Investment Casting); Charge preparation; Steel melting; Steels*

## Agradecimentos

Ao Professor Luís Filipe Malheiros, como meu orientador desta Dissertação de Mestrado na FEUP, quero agradecer por me ter desafiado a seguir em frente com este tema. Um tema que desde logo me deu a possibilidade de trabalhar dentro da área que mais me fascinou ao longo do curso, garantindo que conseguia conciliar o trabalho árduo com a paixão diária pelo que estava a fazer, o que torna tudo mais fácil. Para além disso, agradeço pelo facto de, ao longo destes anos, ter elevado o nível de exigência não só neste trabalho como também no decorrer do curso, fazendo sempre uma ponte importantíssima entre os conceitos teóricos lecionados e a prática industrial. Esta ligação, juntamente com a possibilidade que dão aos alunos de poder experimentar diferentes estágios nas mais variadas áreas, ao longo do curso, elevam o DEMM além-fronteiras.

Ao Engenheiro Bernardo Valente, como meu orientador na ZOLLERN, agradeço o acompanhamento excecional e a confiança demonstrada desde o início do trabalho, acompanhando-me em todas as decisões tomadas. Nos momentos de desespero, estive sempre lá para me ensinar e mostrar como se desenrola a atividade industrial, em consonância com a teoria que aprendemos ao longo destes cinco anos. Rapidamente, ajudou-me a crescer como pessoa, a acreditar mais em mim e a transparecer os valores que levo comigo para o trabalho. Sem dúvida que o sucesso deste trabalho também é dele.

Ao Luís Batista, responsável do setor da fusão, e a toda a sua equipa pelo apoio e ensinamentos práticos sobre o processo. Quando saímos da Faculdade e ingressamos no mundo de trabalho, por mais estágios que já tenhamos feito, ainda temos muito a aprender. Essa aprendizagem faz-se no chão de fábrica, com as pessoas que vivem aquilo há muitos anos. Tudo isto foi essencial para o desenrolar desta dissertação.

Ao Dr. Bruno Fragoso e aos restantes colaboradores da empresa, com quem tive o grande prazer de contactar, agradeço por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada desde o primeiro dia de estágio.

Ao Engenheiro Virgílio Oliveira, Diretor Geral, e ao Engenheiro Rui Félix, Diretor Técnico da ZOLLERN, agradeço a oportunidade de realizar este estágio e a confiança que depositaram em mim desde início. Sem isso era impossível melhorar.

Amigos são a família que nós temos a possibilidade de escolher a dedo. A todos os meus amigos, uma enorme palavra de apreço, não só pelo apoio que me deram ao longo desta “jornada”, como também pelo apoio que me foram dando ao longo desta “maratona”, chamada vida. Agradeço a todos pelos bons e maus momentos que passámos, pelas inúmeras histórias e pela confiança que sempre depositaram em mim.

Por fim, um agradecimento enorme à minha família, especialmente aos meus pais, avós e namorada, que sempre me ajudaram e incentivaram em todos os momentos, sem nunca duvidar de mim. Em todos os momentos difíceis da minha vida, foram as pessoas que sempre estiveram lá, sem nunca desistir, e, se sou alguém hoje, é graças ao amor que sempre depositaram em mim. Sem vocês, nada disto teria sido possível.

**Obrigado!**

# Índice

|                                                                      |          |
|----------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1. Introdução .....</b>                                           | <b>1</b> |
| 1.1. Principais Objetivos do Trabalho .....                          | 1        |
| 1.2. Apresentação da empresa - ZOLLERN & Comandita Portugal.....     | 2        |
| 1.3. Estrutura da Dissertação de Mestrado .....                      | 2        |
| <b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>                                | <b>3</b> |
| 2.1. Processo de Fundição por Modelo em Cera Perdida .....           | 3        |
| 2.1.1. Características do Processo.....                              | 3        |
| 2.1.2. Etapas do Processo .....                                      | 3        |
| 2.2. Fornos de Indução de Cadinho .....                              | 5        |
| 2.2.1. Fornos de Indução sem Núcleo Magnético .....                  | 5        |
| 2.2.2. Indução Eletromagnética.....                                  | 5        |
| 2.2.3. Fornos de Indução de Cadinho .....                            | 5        |
| 2.2.4. Importância das Características do Forno.....                 | 6        |
| 2.3. Fusão.....                                                      | 7        |
| 2.3.1. Reações do Banho Metálico com a Atmosfera .....               | 7        |
| 2.3.2. Transporte de Gases no Banho Metálico.....                    | 8        |
| 2.3.3. Formação de um Filme de Óxido à Superfície .....              | 10       |
| 2.3.4. Formação de Escórias.....                                     | 12       |
| 2.3.5. Fluidez do Banho Metálico .....                               | 12       |
| 2.3.6. Vaporização de Elementos de Liga .....                        | 12       |
| 2.3.7. Impacto de um Banho Metálico Limpo .....                      | 13       |
| 2.4. Refratários .....                                               | 15       |
| 2.4.1. Refratários Siliciosos .....                                  | 15       |
| 2.4.2. Refratários Aluminosos .....                                  | 15       |
| 2.4.3. Magnesite .....                                               | 16       |
| 2.4.4. Zircão .....                                                  | 16       |
| 2.4.5. Composição Química dos Refratários .....                      | 16       |
| 2.5. Preparação das Cargas.....                                      | 17       |
| 2.5.1. Retornos e Matérias-Primas.....                               | 17       |
| 2.5.2. Efeito da Adição de Elementos de Liga ao Banho Metálico ..... | 19       |
| 2.5.3. Sequência de Carregamento.....                                | 20       |
| 2.5.4. Agentes Desoxigenantes.....                                   | 23       |

|           |                                                                   |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.      | Aços .....                                                        | 24        |
| 2.6.1.    | Aços de Alta e Baixa Liga .....                                   | 24        |
| 2.6.2.    | Defeitos nos fundidos .....                                       | 25        |
| <b>3.</b> | <b>Caso de Estudo - Microfuso .....</b>                           | <b>27</b> |
| 3.1.      | Liga em Estudo .....                                              | 27        |
| 3.2.      | Análise de Defeitos do Microfuso .....                            | 28        |
| 3.3.      | Defeito Crítico - Porosidade .....                                | 30        |
| <b>4.</b> | <b>Parâmetros de Processo .....</b>                               | <b>31</b> |
| 4.1.      | Seleção dos Parâmetros do Processo .....                          | 31        |
| 4.2.      | Análise dos Parâmetros do Processo .....                          | 31        |
| <b>5.</b> | <b>Procedimento Experimental .....</b>                            | <b>39</b> |
| 5.1.      | Principais Variáveis em Estudo .....                              | 39        |
| 5.2.      | Metodologia e Realização de Ensaios .....                         | 39        |
| 5.3.      | Método de Análise de Resultados .....                             | 41        |
| <b>6.</b> | <b>Contextualização do Problema .....</b>                         | <b>42</b> |
| 6.1.      | Desoxigenação e Sequência de Carregamento do Forno .....          | 42        |
| 6.2.      | Resultados Iniciais .....                                         | 45        |
| <b>7.</b> | <b>Resultados e Discussão .....</b>                               | <b>46</b> |
| 7.1.      | Sequência de Carregamento do Forno e Desoxigenação do banho ..... | 46        |
| 7.2.      | Resultados Obtidos .....                                          | 48        |
| 7.3.      | Comparação da Composição Química do Banho e dos Retornos .....    | 49        |
| 7.4.      | Modificação de Outros Variáveis .....                             | 52        |
| 7.5.      | Análise de Resultados Finais .....                                | 54        |
| 7.6.      | Impacto da Otimização .....                                       | 54        |
| <b>8.</b> | <b>Conclusões .....</b>                                           | <b>56</b> |
| 8.1.      | Trabalhos Futuros .....                                           | 57        |
|           | <b>Referências Bibliográficas .....</b>                           | <b>58</b> |
|           | <b>Anexos .....</b>                                               | <b>61</b> |

## Índice de Imagens

|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Esquema representativo das etapas do processo de fundição de precisão por modelo em cera perdida [5].....                                                                                                               | 4  |
| <b>Figura 2</b> - Forças de repulsão entre as correntes do indutor e do induzido que promovem a agitação do banho metálico.....                                                                                                           | 6  |
| <b>Figura 3</b> - Solubilidade do hidrogénio vs. temperatura, em vários metais (figura adaptada a partir da original) [5].....                                                                                                            | 8  |
| <b>Figura 4</b> - Coeficientes de difusão, de alguns elementos, no seio do ferro, vs. temperatura (figura adaptada a partir da original) [15].....                                                                                        | 9  |
| <b>Figura 5</b> - Diagrama de Ellingham, ilustrando as energias livres de formação de óxidos em função da temperatura (figura adaptada a partir da original) [16]. ....                                                                   | 10 |
| <b>Figura 6</b> - Representação esquemática da formação de um bi-filme de óxido (figura adaptada a partir da original) [25]. ....                                                                                                         | 11 |
| <b>Figura 7</b> - Diferentes morfologias de um bi-filme (figura adaptada a partir da original) [25]. ....                                                                                                                                 | 11 |
| <b>Figura 8</b> - Variação da pressão de vapor, com a temperatura, de alguns dos elementos mais voláteis (figura adaptada a partir da original) [5]. ....                                                                                 | 13 |
| <b>Figura 9</b> - Representação esquemática da utilização de um “manto” de proteção de gás inerte (árgon) sobre a superfície livre do banho metálico e da insuflação desse gás através de um tijolo poroso colocado na base do forno..... | 14 |
| <b>Figura 10</b> - Taxas de solubilização de diferentes aditivos num banho de aço em função da sua granulometria (figura adaptada do original) [41].....                                                                                  | 18 |
| <b>Figura 11</b> - Taxa de solubilização de partículas de Fe-Cr com diferentes granulometrias em função da velocidade de agitação do banho metálico (figura adaptada a partir da original) [41]. ....                                     | 19 |
| <b>Figura 12</b> - Taxa de oxidação de um banho de aço a diferentes temperaturas (figura adaptada a partir da original) [36]. ....                                                                                                        | 20 |
| <b>Figura 13</b> - Perda de Mn, por oxidação, durante o vazamento de um dado aço (figura adaptada a partir da original) [39]. ....                                                                                                        | 21 |
| <b>Figura 14</b> - Diagrama de Ellingham; a linha vermelha representa a sequência aconselhada para o carregamento do forno de modo a garantir elevadas taxas de adição (figura adaptada a partir da original) [39]. ....                  | 22 |

|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 15</b> -Representação do rácio entre a superfície e volume do banho no interior de um forno, durante o seu basculamento (figura adaptada a partir da original) [39]. .....                                       | 23 |
| <b>Figura 16</b> - a) Esquema representativo da atuação do microfuso; b) Microfuso.....                                                                                                                                    | 27 |
| <b>Figura 17</b> - Diagrama de Pareto aplicado aos defeitos do microfuso (dados desde 2017). .....                                                                                                                         | 28 |
| <b>Figura 18</b> - Evolução da taxa de refugo, para a produção do microfuso, desde a primeira ordem de fabrico. ....                                                                                                       | 29 |
| <b>Figura 19</b> - Exemplo da existência de poros em duas peças do componente em estudo. ....                                                                                                                              | 30 |
| <b>Figura 20</b> - Diagrama causa-efeito relativo aos principais defeitos analisados no caso de estudo. ....                                                                                                               | 31 |
| <b>Figura 21</b> - Limpeza do forno de fusão. ....                                                                                                                                                                         | 33 |
| <b>Figura 22</b> Montagem para aplicação de um “manto” de árgon líquido na superfície do banho metálico durante a sua fusão. ....                                                                                          | 34 |
| <b>Figura 23</b> - Medição da temperatura do banho com um termopar.....                                                                                                                                                    | 34 |
| <b>Figura 24</b> - Vazamento para carapaças cerâmicas utilizadas na produção do microfuso. ....                                                                                                                            | 36 |
| <b>Figura 25</b> - A - Módulo em cera do sistema de gitagem do microfuso; B - Cacho cerâmico do componente em estudo. ....                                                                                                 | 38 |
| <b>Figura 26</b> - Amostras (medalhões) para análise de composição química do metal (A) no espectrómetro (B).....                                                                                                          | 40 |
| <b>Figura 27</b> -Percurso da carapaça cerâmica desde o forno rotativo (A), onde se processa o seu pré-aquecimento, até ao local de vazamento (B), e da colher, desde o forno de fusão (C) até ao local de vazamento. .... | 41 |
| <b>Figura 28</b> - Sequência (original) do carregamento do forno de fusão. ....                                                                                                                                            | 43 |
| <b>Figura 29</b> - Análise da evolução dos teores de Alumínio e Crómio do banho metálico ao longo da sequência (original) de carregamento do forno de fusão.....                                                           | 43 |
| <b>Figura 30</b> - Evolução dos teores de Mn, Si e Ti no banho metálico após a sua adição. ..                                                                                                                              | 44 |
| <b>Figura 31</b> - Nova sequência de carregamento do forno de fusão.....                                                                                                                                                   | 47 |
| <b>Figura 32</b> - Evolução dos teores de Alumínio e Crómio do banho metálico ao longo da nova sequência de carregamento do forno de fusão. ....                                                                           | 47 |
| <b>Figura 33</b> - Evolução dos teores de Mn, Si e Ti no banho metálico após a sua adição. ..                                                                                                                              | 48 |

|                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 34</b> - Transporte das carapaças cerâmicas após vazamento do forno: A- Carro de transporte; 1,2 e 3 - Carapaças cerâmicas com respetiva tampa de proteção da atmosfera.<br>..... | 49 |
| <b>Figura 35</b> - Variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno (traço contínuo a azul) e do sistema de gitagem (tracejado a vermelho).....            | 50 |
| <b>Figura 36</b> - Variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno (traço contínuo a azul) e do sistema de gitagem (tracejado a vermelho).....            | 51 |
| <b>Figura 37</b> - Variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno (traço contínuo a azul) e do sistema de gitagem (tracejado a vermelho).....            | 51 |
| <b>Figura 38</b> - Análise dos rebentamentos de carapaças cerâmicas.....                                                                                                                    | 53 |
| <b>Figura 39</b> - Inserção de respiros no topo do sistema de gitagem.....                                                                                                                  | 53 |
| <b>Figura 40</b> - Variação da taxa de refugo, devido a porosidade, após aplicação de várias medidas corretivas ao longo deste estudo. ....                                                 | 54 |

## Índice de Tabelas

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> - Elementos de carga e energia livre de formação de óxidos [39].....                                                 | 21 |
| <b>Tabela 2</b> - Possíveis causas que originam porosidade e respetivas ações corretivas [53]                                        | 26 |
| <b>Tabela 3</b> - Composição química da liga X 38 Cr Mo V 5-1 usada na produção do microfuso (% ponderal). ....                      | 28 |
| <b>Tabela 4</b> - Rendimento de adição de vários elementos representativos da composição química do microfuso (em percentagem). .... | 45 |
| <b>Tabela 5</b> - Impacto registado nos desvios da composição química da liga utilizada no fabrico do microfuso .....                | 55 |

## Lista de Abreviaturas

**CNC** - *Computer Numeric Control*

**FIC** - Forno de Indução de Cadinho

**FMCP** - Fundição por Modelo de Cera Perdida

**IC** - *Investment Casting*

**SPAL** - *Surface Protection Air Liquide*

**ZCP** - *Zollern & Comandita Portugal*

## 1. Introdução

A elevada competitividade do mercado obriga cada vez mais as empresas a apostar no aumento da produtividade, da capacidade de resposta e da qualidade dos seus produtos, e, ao mesmo tempo, numa redução de custos. Desta forma, torna-se imperativo otimizar os seus métodos de produção, envolvendo todas as pessoas que trabalham diariamente para atingir o mesmo objetivo, alcançando vantagens competitivas que só se conseguem atingir dominando todos os parâmetros do processo.

O tema a desenvolver, “Impacto da Preparação e Fusão de Cargas na Qualidade dos Fundidos”, surgiu de um projeto interno da empresa ZOLLERN & Comandita Portugal (ZCP), que advém da necessidade de melhorar a qualidade dos fundidos produzidos, em aço inoxidável, pelo processo de fundição por cera perdida. Assim, urge a necessidade de perceber, com base no trabalho de campo junto ao forno e na otimização de algumas *nuances* dentro do processo, se seria possível resolver alguns dos seus maiores problemas. O trabalho realizado foi dirigido para a etapa de fusão com o objetivo de investigar a influência dos principais parâmetros do processo na qualidade dos componentes vazados num dos fundidos com maior volume de produção na empresa (microfuso). Este apresentava um defeito crítico, porosidade gasosa, que chegou a alcançar um resultado médio de aproximadamente 10% de refugo por lote produzido.

De entre os vários parâmetros e variáveis que só esta etapa de fusão envolve, tendo em conta o desenrolar do problema ao longo dos tempos, foram essencialmente analisados os seguintes: preparação da carga e seu carregamento no forno, desoxigenação do banho metálico e impacto do rácio matéria-prima nova/retornos da carga na qualidade dos fundidos.

### 1.1. Principais Objetivos do Trabalho

O projeto desta dissertação de mestrado tinha como principal objetivo a resolução/otimização de alguns problemas relacionados principalmente com a etapa de fusão na produção de um componente automóvel denominado microfuso. Para tal, foi necessário:

- perceber a variabilidade do processo;
- estudar a sanidade do banho/metal;
- analisar o impacto da preparação de cargas, sequência de carregamento do forno e desoxigenação;
- analisar o defeito crítico desse componente e estabelecer as condições para os parâmetros controladores do processo que permitissem a sua otimização;
- analisar a contribuição de cada um desses parâmetros, de modo a hierarquizá-los em termos do seu impacto;
- avaliar o impacto do ajuste desses parâmetros;
- implementar ações de melhoria de acordo com o estudo realizado.

Outros objetivos de extrema relevância e de cariz industrial são: perceber quais os principais parâmetros a valorizar para uma futura implementação da Indústria 4.0 no processo, tentar uniformizar o processo e acima de tudo garantir o envolvimento direto de todas as pessoas com o processo produtivo.

## **1.2. Apresentação da empresa - ZOLLERN & Comandita Portugal**

A ZCP integra o grupo alemão ZOLLERN, com sede na Alemanha. Com mais de 300 anos de história, é um dos pioneiros da indústria de fundição por modelo em cera perdida, com vários marcos no desenvolvimento deste sector ao longo da sua história. Esta foi fundada em 1708 pela família Hohenzollern, pertencente à casa real alemã. Com mais de 3000 funcionários e 21 fábricas e filiais próprias distribuídas pela Europa, Ásia e América, a ZOLLERN desenvolve, produz e vende uma ampla gama de produtos em metal para os sectores energético, automóvel, aeroespacial, naval, aeronáutico e médico.

Situada na Maia, e fundada em 1991, a ZCP é uma fundição que assenta no mesmo processo e conta atualmente com cerca de 250 colaboradores. As peças técnicas são produzidas segundo os requisitos e especificações dos clientes em aços, superligas de níquel e ligas de cobalto-crómio, para os mais diversos mercados. Em 2017 foram produzidas cerca de 1300 referências diferentes em mais de 120 ligas distintas. Os componentes podem pesar entre 1-2 g até 15 kg e constituir séries que variam entre 5 e as 100000 peças por lote. Em termos de mercado, cerca de 50% da produção é destinada à indústria automóvel.

## **1.3. Estrutura da Dissertação de Mestrado**

A dissertação foi redigida e devidamente estruturada em oito capítulos. O primeiro, com uma breve introdução ao tema proposto e à empresa, clarificando quais os principais objetivos a cumprir. O segundo, dedicado exclusivamente à revisão bibliográfica do estado da arte, na qual são abordados extensivamente todos os temas de cariz relevante para a realização do trabalho prático. Este foi assim realizado para que se consiga adquirir facilmente os principais conceitos relacionados com o tema. Ao longo deste capítulo, abordam-se temáticas como a fusão de materiais ferrosos e as principais variáveis a ter em conta, os fornos de indução de cadinho, como equipamento base do processo, os refratários utilizados, a preparação e sequência de carregamento do forno bem como o tipo de material em causa neste trabalho, os aços, e a desoxigenação do banho metálico. O terceiro capítulo descreve sucintamente o componente e liga específica deste trabalho, e o quarto capítulo enumera os principais parâmetros e variáveis determinantes para otimizar o processo. No quinto capítulo, é abordada, de forma detalhada, a parte experimental do trabalho; por sua vez, no sexto e sétimo capítulos é descrito o problema específico do componente em estudo e são analisados os resultados obtidos no âmbito do trabalho desenvolvido, respetivamente. Por último, no oitavo capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas, sugestões de melhoria bem como propostas de temas a desenvolver no futuro.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Processo de Fundição por Modelo em Cera Perdida

*Investment Casting* (IC) é uma das mais antigas técnicas de fundição utilizadas pelo Homem. Este termo é empregue quando um determinado modelo, comumente em cera, é imerso em barbotina cerâmica ou gesso, com o objetivo de, posteriormente, se vazarem o metal para dentro da cavidade onde outrora se encontrava o modelo. Derivadas dos princípios gerais do IC, surgiram outras técnicas, sendo que o processo de fundição por modelo de cera perdida (FMCP) em carapaça cerâmica foi, dentre outras, o considerado com maior pertinência para o presente trabalho.

#### 2.1.1. Características do Processo

A FMCP é uma tecnologia que permite a produção de peças com elevado grau de precisão dimensional, sendo por isso também designada fundição de precisão. Esta tem um papel de grande importância a nível mundial devido à sua versatilidade, tanto em termos de processo como da gama de ligas utilizadas. Garante também uma grande liberdade em termos de *design* dos fundidos, oferecendo muitas vezes soluções que, de outra forma, não seriam viáveis. Obtêm-se assim peças que não necessitam de grandes acabamentos finais, sendo para isso o conceito geométrico “*near-net shape*” fundamental (permitindo redução de custos relativamente a um processo convencional). Adicionalmente, este processo permite a produção de peças que apresentam contrassaias devido à versatilidade que a cera confere a esta tecnologia [1-3].

No entanto, apresenta algumas limitações, nomeadamente a dimensão e peso dos fundidos a fabricar, o custo dos equipamentos, as diminutas séries de produção e a baixa produtividade devido ao tempo inerente à produção dos cachos e das carapaças cerâmicas. Contudo, estas limitações são, por vezes, ultrapassadas devido ao enorme valor acrescentado que as peças produzidas apresentam [1, 3].

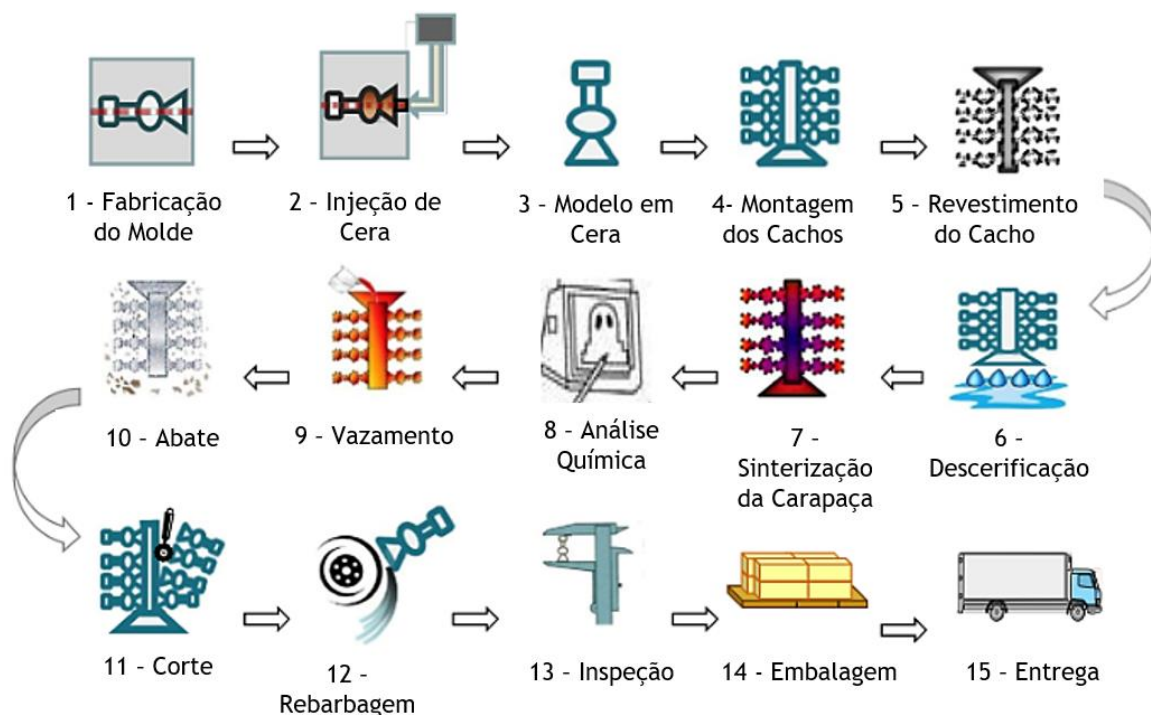
#### 2.1.2. Etapas do Processo

A FMCP é um processo complexo que envolve várias etapas. Na Figura 1 é possível observar as diferentes etapas deste processo, que serão de seguida descritas.

Primeiramente, é necessário adquirir ou fabricar um molde, quer seja por eletroerosão, quer por CNC, por exemplo. Este deve ser capaz de dar forma à cera aquando da sua injeção, a fim de se obterem modelos que constituem réplicas dos componentes finais pretendidos. É de notar que, no fabrico da cavidade moldante onde se vai injetar a cera, é importante ter em conta a contração tanto da cera, como do metal. (Figura 1 - Fabricação do Molde e Injeção da Cera) [2, 3, 5].

Após obter os modelos finais em cera, procede-se à montagem dos cachos (operação *assembly*), que devem ser dimensionados de forma a não ultrapassar a volumetria dos equipamentos utilizados no processo. Além disso, os modelos acoplados devem ser dispostos de modo a que, durante a descerificação, o escoamento da cera se processe de forma livre e fácil por ação da gravidade. Procede-se, de seguida, à limpeza e ativação

da superfície do cacho com o objetivo de promover a aderência do material cerâmico da barbotina (suspensão cerâmica) ao cacho em cera [1, 3, 4].



*Figura 1 - Esquema representativo das etapas do processo de fundição de precisão por modelo em cera perdida [5].*

De seguida, dá-se início à imersão do cacho na barbotina e, de seguida, à pulverização de partículas de refratário (Figura 1 - Revestimento do Cacho); esta operação é repetida em vários ciclos de forma a garantir o número de camadas pretendidas para a carapaça cerâmica. A espessura final irá ditar o comportamento em termos de resistência mecânica, resistência térmica e permeabilidade da carapaça obtida [1, 3, 4].

Posteriormente, procede-se à secagem do refratário, com vista à remoção da humidade, seguida da sua descerificação (Figura 1 - Descerificação) que consiste em remover a cera do cacho por fusão ou volatilização dos seus constituintes. Após este processo, surge a sinterização da carapaça cerâmica (Figura 1 - Sinterização) que tem como objetivo garantir o aumento da sua resistência mecânica. O pré-aquecimento das carapaças, imediatamente antes do vazamento, visa uma redução do choque térmico induzido pelo vazamento do metal. Ao mesmo tempo, ao longo do ciclo de sinterização, é possível garantir a remoção de pequenos vestígios de cera ainda presentes no interior da carapaça de forma a evitar o potencial aparecimento de defeitos nas peças. Do mesmo modo, a utilização de uma “moldação quente”, aquando do vazamento, permite a obtenção de peças com paredes muito finas [1, 3, 4].

Subsequentemente, dá-se o vazamento do metal (Figura 1 - Vazamento) e posterior arrefecimento dos fundidos, seguindo-se o abate da carapaça cerâmica (Figura 1 - Abate). Por fim, procede-se à separação dos componentes do sistema de alimentação e gítagem (operações de corte) (Figura 1 - Corte) para depois se iniciar a fase de acabamentos (Figura 1 - Rebarbagem) e controlo de qualidade dos fundidos (Figura 1 - Inspeção) [1, 3, 4].

## **2.2. Fornos de Indução de Cadinho**

### **2.2.1. Fornos de Indução sem Núcleo Magnético**

Inicialmente é importante conhecer melhor quais os intervenientes mais determinantes para o desenrolar desta etapa. Desta forma, um dos mais importantes a ter em consideração é o tipo de forno utilizado no processo, bem como a forma como este interage com o banho metálico. Para além de conhecer o equipamento utilizado e os seus componentes, é importante compreender a forma como as suas características e o método de funcionamento afetam o processo [5].

### **2.2.2. Indução Eletromagnética**

Existem diversos fornos que podem ser utilizados neste processo; no entanto, o presente trabalho irá incidir, essencialmente, sobre os fornos de indução eletromagnética, princípio esse que é conhecido há mais de uma centena de anos.

O aquecimento por indução eletromagnética é fruto da passagem de corrente elétrica alternada através de uma bobine (refrigerada) de cobre, daí resultando um campo magnético variável que, por sua vez, gera um fluxo de corrente no banho metálico. O metal a fundir irá oferecer resistência à passagem dos eletrões, assistindo-se ao seu aquecimento e fusão por efeito de Joule. Por sua vez, a corrente induzida na carga produz um segundo campo magnético. As rápidas variações entre os dois campos magnéticos em direções opostas criam uma força mecânica perpendicular às linhas de fluxo. Estas são responsáveis pela agitação do banho metálico [5-9].

### **2.2.3. Fornos de Indução de Cadinho**

Entre os vários tipos de fornos de indução, os mais comumente utilizados na elaboração de ligas metálicas são os fornos de indução de cadinho (FIC). Graças aos avanços registados a nível eletrónico e tecnológico, é já possível construir fornos altamente eficientes. Estes tipos de fornos podem ser utilizados quer para fusão atmosférica tradicional, quer para fusão em vácuo, sendo amplamente utilizados até temperaturas de 1700°C, muitas vezes para a fusão de ligas ferrosas [5-9].

Uma das suas vantagens é a viabilidade de se aumentar a densidade de potência destes fornos sem aumentar necessariamente as suas dimensões. Assim a capacidade de fusão é aumentada, mantendo a agitação do banho em níveis desejados [5-9].

Os FIC (que se encontra representado no Anexo 1) são constituídos por uma bobine em espiral de cobre arrefecida por um fluxo de água que circula no seu interior. Entre a bobine e o interior do forno existe um revestimento refratário protetor e um refratário de trabalho que compõe o fundo e as paredes. No topo do forno existe o refratário que compõe a gola e bica do mesmo. Além disso, como são basculantes, facilitam a operação do vazamento do metal fundido quer para uma colher de vazamento, quer diretamente para a carapaça cerâmica [5-9].

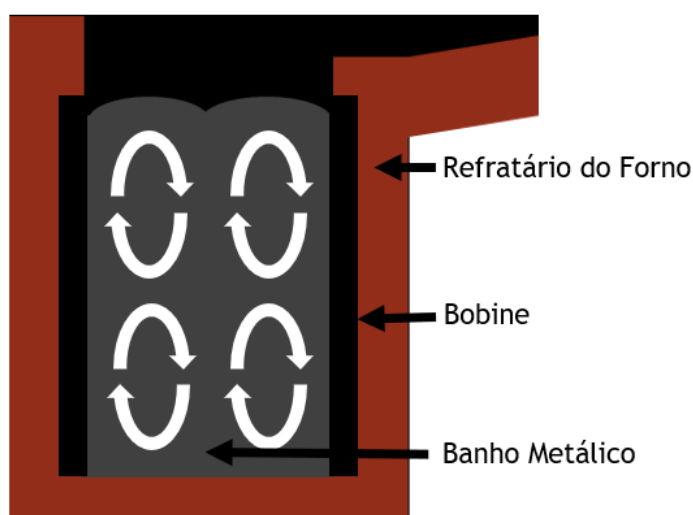
#### 2.2.4. Importância das Características do Forno

Os fornos de indução podem ser alimentados em praticamente todas as frequências, embora a maioria opere entre 200 e 3000 Hz. A utilização de elevadas frequências dá origem ao denominado efeito pelicular, resultante da distribuição desigual do campo eletromagnético pelo banho metálico. Efetivamente, à medida que aumenta a frequência da corrente elétrica na bobine, aumenta a intensidade do campo magnético, especialmente no centro do banho. Deste modo, pela reactância natural do metal, a corrente tem tendência a deslocar-se para a periferia do material condutor, daí resultando uma diminuição da área efetiva de passagem, aumentando a sua resistividade e, consequentemente, a eficiência do aquecimento do banho [10-15].

No caso das ligas ferrosas, existe uma fonte de aquecimento adicional uma vez que o intenso campo magnético alternado magnetiza e desmagnetiza repetidamente o banho metálico. Esta inversão rápida de domínios magnéticos, que se regista até 700°C (ponto de Curie), provoca um consequente aquecimento do banho metálico [10-15].

Num forno de indução, os três parâmetros essenciais para implementar um aquecimento por indução são a fonte de energia elétrica de alta frequência, a bobine responsável por gerar um campo magnético e o banho metálico que apresenta propriedades condutoras. De entre os três parâmetros apresentados, o banho metálico será o principal fator que fará variar o comportamento da potência do forno. Quanto maior for a condutividade da carga, mais intensa será a indução eletromagnética, atingindo uma maior potência e estabilidade. A bobine do forno é mantida a uma temperatura relativamente baixa ao longo do processo devido ao sistema de refrigeração que opera em circuito fechado [10-15].

Relativamente à agitação do banho metálico, esta é promovida pelas correntes de indução (Figura 2), daí resultando uma maior homogeneização do banho metálico, em termos da sua composição química e temperatura, bem como uma dissolução mais fácil dos elementos de liga. Essa agitação aumenta com a potência induzida e a diminuição da frequência [10-15].



*Figura 2 - Forças de repulsão entre as correntes do indutor e do induzido que promovem a agitação do banho metálico.*

Uma vantagem deste tipo de fornos é a possibilidade de operar com diferentes tipos de ligas metálicas, como por exemplo, aços, ligas de alumínio e ligas de cobre. Isto oferece uma capacidade útil para atender às necessidades urgentes dos clientes e perspetivar a exploração de novos mercados [10-15].

### 2.3. Fusão

De entre todas as etapas deste processo, a fusão e o vazamento de ligas metálicas têm bastante relevância, não só para este trabalho como para todo o processo de FMCP, visto ser nesta etapa que ocorre a preparação da liga, permitindo assim garantir que a peça final cumpre os requisitos químicos e de sanidade exigidos pelo cliente.

O metal no estado líquido é altamente reativo, nomeadamente com os gases envolventes, a escória formada, os constituintes do próprio banho e até com o refratário, seja do forno, seja da colher de vazamento. Esta reatividade assenta na tendência do metal em estabelecer o equilíbrio, tanto em termos térmicos como químicos, com o meio ambiente, sempre condicionado pelo tempo disponível e pela cinética das reações envolvidas [16].

#### 2.3.1. Reações do Banho Metálico com a Atmosfera

O processo de fusão pode ser realizado tanto em contacto com a atmosfera como em vácuo [9, 16]. No processo convencional de fusão à pressão atmosférica, poder-se-ão fundir várias ligas, como por exemplo: alumínio, cobre, ouro, prata, platina, todos os tipos de aço, ferro fundido nodular, a maioria das ligas de cobalto e ligas à base de níquel, que não contenham elementos reativos [8, 16-18]. Para este trabalho, as ligas com maior pertinência são, seguramente, os aços de alta liga.

A reação do banho metálico com a humidade da atmosfera é, de todas as reações, a que tem maior importância. A mesma, pode reagir diretamente com o banho ou até com os refratários do forno. Esta reação acontece, principalmente, nos momentos de paragem do forno, onde o refratário, quando contém elementos higroscópicos na sua composição, pode absorver água até 10% do seu peso. Essa evaporar-se-á posteriormente, podendo reagir com o banho metálico [19, 20]. O hidrogénio difunde-se livremente na maioria dos metais e suas ligas, a partir de temperaturas de 700°C, aproximadamente. A água reage com o metal M, formando um óxido e libertando hidrogénio:



O hidrogénio molecular dissocia-se em hidrogénio atómico, segundo o equilíbrio:

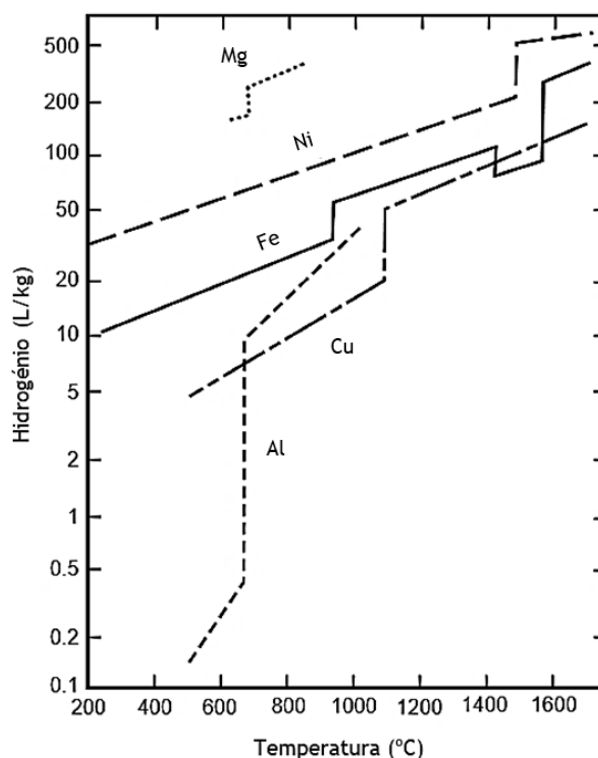


O teor de hidrogénio, em solução ([H]) num dado banho metálico, poderá ser estimado por aplicação da lei de *Sievert*, a partir da pressão parcial daquele gás na atmosfera em equilíbrio com o banho e de uma constante K [16, 17]:

$$[H]^2 = K p_{H_2} \quad (3)$$

A Figura 3 mostra que, apesar de em alguns metais a solubilidade do hidrogénio ser mais elevada que no ferro, neste regista-se um aumento significativo da solubilidade deste

elemento à medida que a temperatura do banho metálico aumenta. Este facto pode ser bastante prejudicial, especialmente em ambientes com elevada humidade, uma vez que pode induzir um aumento da porosidade da peça final [16, 17]. Assim, é importante analisar de que forma se consegue proteger o banho deste tipo de situação, como será averiguado em continuação.



**Figura 3** - Solubilidade do hidrogénio vs. temperatura, em vários metais (figura adaptada a partir da original) [5].

A Termodinâmica permite explicar que, caso haja diferença entre os potenciais químicos em dois ou mais sistemas, por exemplo de hidrogénio, este vai deslocar-se do sistema em que esse potencial é mais elevado até se atingir o equilíbrio [16, 17, 21, 22].

No caso dos aços inoxidáveis, a quantidade de hidrogénio para uma determinada temperatura, é um fator bastante determinante nas propriedades físicas e mecânicas finais do aço. Este pode permanecer em solução até à solidificação da liga, daí podendo resultar defeitos no interior dos fundidos [23].

### 2.3.2. Transporte de Gases no Banho Metálico

Como é sobejamente conhecido, a agitação do banho metálico tem grande impacto na incorporação de gases no mesmo. Quando este se encontra num estado estacionário ou próximo dele, a situação é diferente uma vez que se formará um filme de óxido na superfície. Nesta camada, a difusão dos átomos de soluto processa-se de forma mais lenta. Outra zona de bastante importância é a camada superficial do banho metálico, parcialmente solidificada, na qual a agitação do metal é mais reduzida.

No estado sólido, a difusão é o único mecanismo a atuar. A distância  $d$  (em m) à qual átomos de soluto se podem difundir, no tempo  $t$  (em s) (seja no estado líquido, sólido ou gasoso), é determinada a partir da expressão:

$$d = (Dt)^{1/2} \quad (4)$$

onde D representa a difusividade (em  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ).

Existem dois grandes processos de difusão: o intersticial e o substitucional. A difusão intersticial corresponde à inserção dos átomos de menor dimensão nos interstícios dos átomos maiores do solvente. Este é um processo relativamente simples e, portanto, analogamente rápido, caracterizado por um elevado valor de D. A difusão substitucional está associada à permuta ou substituição de um átomo do soluto por um átomo do solvente, de tamanho semelhante. Este processo é mais difícil, ou seja, apresenta uma energia de ativação mais elevada uma vez que um átomo de soluto precisa esperar que seja criada uma lacuna, de tamanho suficiente, antes de poder abrir caminho entre a multidão de átomos, com tamanho similar, de forma a alcançar o espaço recém-criado. Assim, para a difusão substitucional, D é relativamente baixo [16, 18].

O hidrogénio, atendendo à dimensão dos seus átomos, é um elemento que pode difundir-se intersticialmente. No ferro, os elementos C, N e O comportam-se da mesma maneira, embora apresentando difusividades inferiores à do hidrogénio [16].

A Figura 4 ilustra a difusão de alguns elementos, no seio das variedades alotrópicas do ferro: a taxa de difusão tende a aumentar ao longo do tempo; no entanto, no seio da fase  $\gamma$ , devido a ser uma fase mais compacta, esta tende a ser mais lenta. No seio da fase líquida, essa taxa é mais elevada, tal como seria de esperar [17, 24].

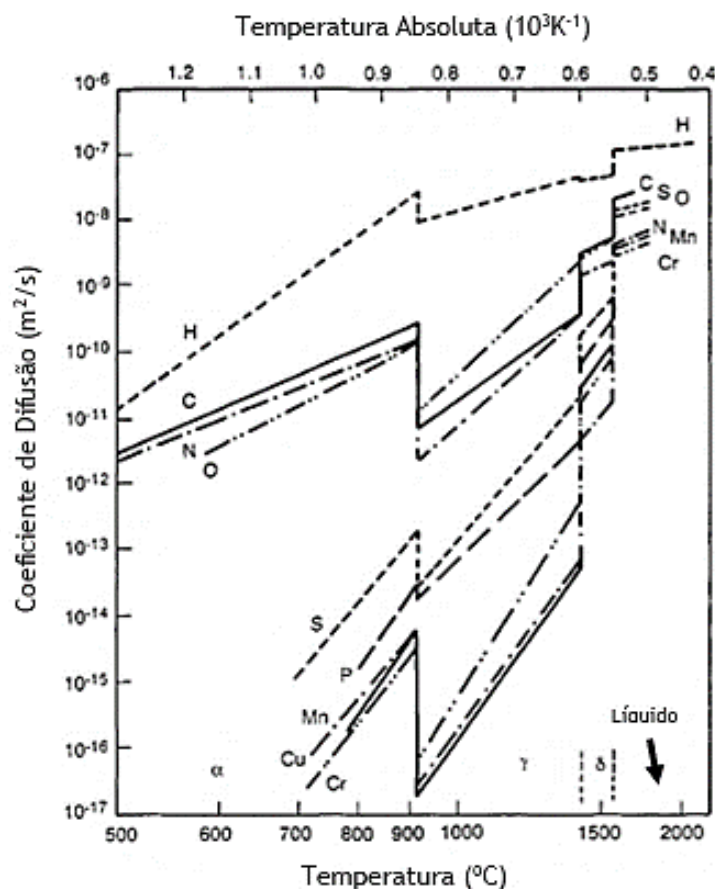


Figura 4 - Coeficientes de difusão, de alguns elementos, no seio do ferro, vs. temperatura (figura adaptada a partir da original) [15].

### 2.3.3. Formação de um Filme de Óxido à Superfície

Na superfície do banho metálico, sujeita a uma interação direta com o meio ambiente, há formação de filmes de óxidos. A formação destes filmes é determinada, do ponto de vista termodinâmico, pela sua energia livre de formação. O diagrama de *Ellingham* (Figura 5) representa, de forma expedita e simplificada, a variação dessa energia em função da temperatura; as retas relativas aos óxidos mais estáveis situam-se na parte inferior desse diagrama, onde a reatividade com o oxigénio é superior [16, 17, 21].

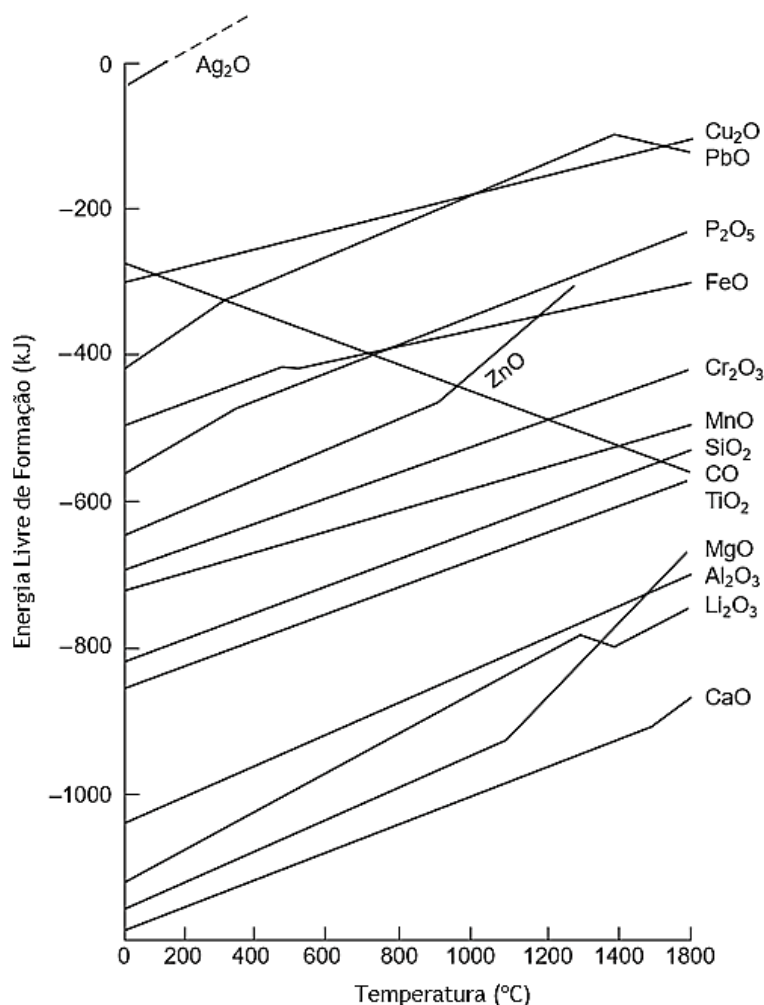
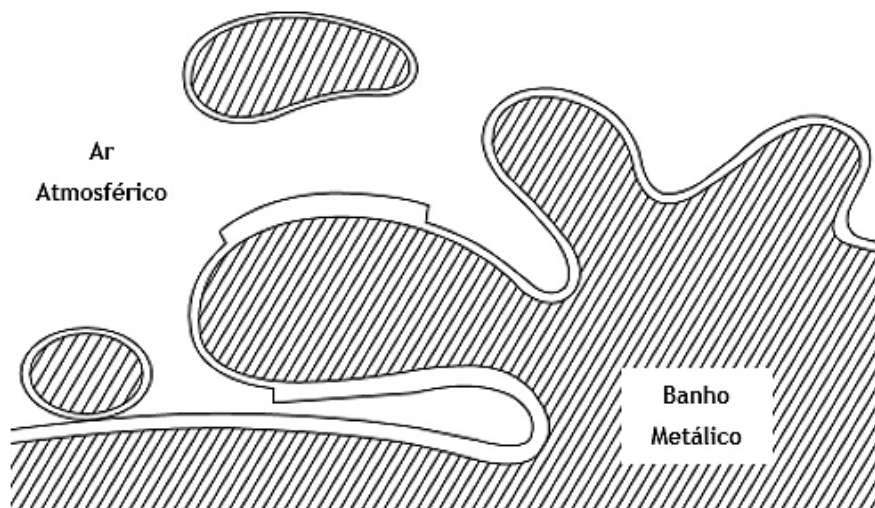


Figura 5 - Diagrama de Ellingham, ilustrando as energias livres de formação de óxidos em função da temperatura (figura adaptada a partir da original) [16].

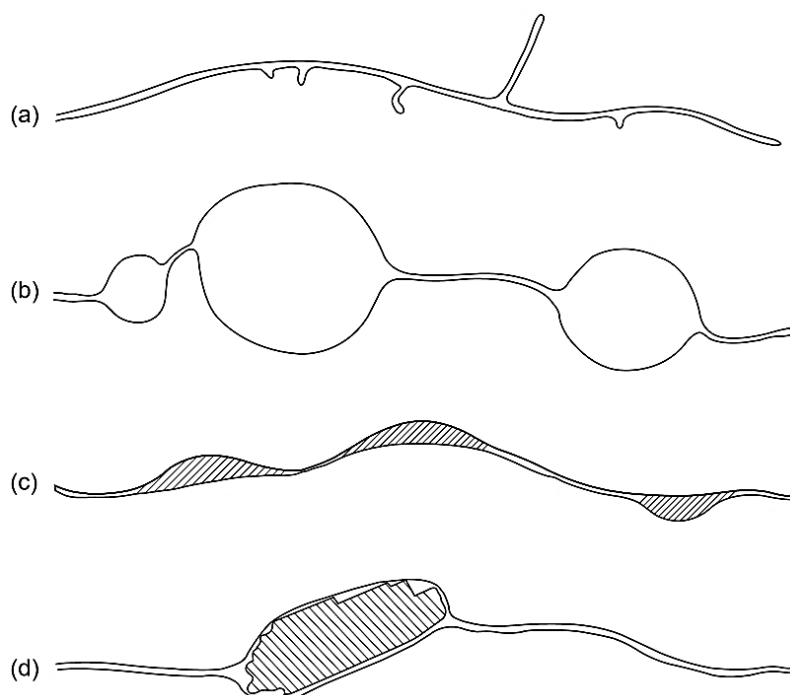
A eliminação dos filmes criados é bastante complexa, passando, muitas vezes, a constituir um defeito permanente no banho metálico. Deste modo, é necessário aprender a lidar com a sua existência e tentar ao máximo evitar ou retardar o seu aparecimento. Uma solução prática para a redução do impacto deste tipo de defeitos passa pela adoção de um *design* aprimorado do cacho cerâmico. Apesar de não ser uma solução direta para os filmes que se encontram no interior do banho, é importante para evitar o aprisionamento dos que se encontram à sua superfície. A adição de alumínio ou outros elementos desoxigenantes ao aço líquido também é uma solução pois reduz o potencial químico do oxigénio do banho e minimiza a formação desses óxidos [25].

Por fim, resta falar da formação de bi-filmes de óxidos no banho metálico. Com a agitação do banho metálico ou durante um vazamento turbulento, os filmes de óxido formados à superfície acabam por se dobrarem sobre si mesmos e até esferoidizarem-se. Estes acabam por se misturar com o banho metálico, originando um filme duplo no seu interior, como se a superfície do banho tivesse sofrido um enrugamento (Figura 6) [25].



**Figura 6** - Representação esquemática da formação de um bi-filme de óxido (figura adaptada a partir da original) [25].

Aquando da solidificação do metal, a morfologia do filme pode variar (Figura 7). Em (a), a união do duplo filme de óxido, após a solidificação, é bastante semelhante a uma fissura. Nos exemplos (b) e (c), os bi-filmes formam uma superfície esférica: no primeiro caso, não se regista a sua união devido à presença de um gás no seu interior; no segundo caso, em vez do aprisionamento de um gás, verifica-se o encurralamento de metal. Por último, em (d), regista-se ainda o arrastamento de resíduos sólidos [25].



**Figura 7** - Diferentes morfologias de um bi-filme (figura adaptada a partir da original) [25].

#### 2.3.4. Formação de Escórias

Num processo de fusão há que ter em consideração o balanço mássico de elementos químicos. Os resultados do processo são o banho metálico líquido, que é vazado no final, a formação de escória e a libertação de gases [26-28].

Durante a fusão, regista-se a formação de escória. Esta tem propriedades não condutoras e, por isso, não é afetada pela indução eletromagnética. Enquanto o forno permanece sob corrente, as correntes de indução promovem a envolvimento da escória com o banho. Se o forno for desligado e o banho se tornar estático, a escória fica a sobrenadar o banho metálico, assistindo-se à sua decantação [26-28].

A composição dessas escórias é bastante complexa. Estas resultam de reações complexas com o refratário dos revestimentos, os óxidos de ferro da sucata de aço e ainda os resultantes de uma ou outra oxidação de elementos do banho metálico durante a sua elaboração. A escória resultante pode conter, por exemplo, óxidos de ferro (da sucata e os resultantes da reação do banho com a atmosfera), alumina, óxidos de silício (provenientes da reação do banho com o refratário), entre outros [26-28].

#### 2.3.5. Fluidez do Banho Metálico

A ocorrência de alguns dos defeitos de fundição poderá ser evitada caso se consiga assegurar a adequada fluidez do banho metálico. Esta é avaliada através da capacidade que um metal tem de continuar a avançar na cavidade moldante, até terminar a sua solidificação. À medida que este avança no interior da cavidade moldante, as suas propriedades vão influenciar a forma como o banho metálico se vai comportar durante o seu enchimento [29].

Existem, portanto, dois conceitos associados ao termo fluidez, que atuam em conjunto aquando do vazamento [30]:

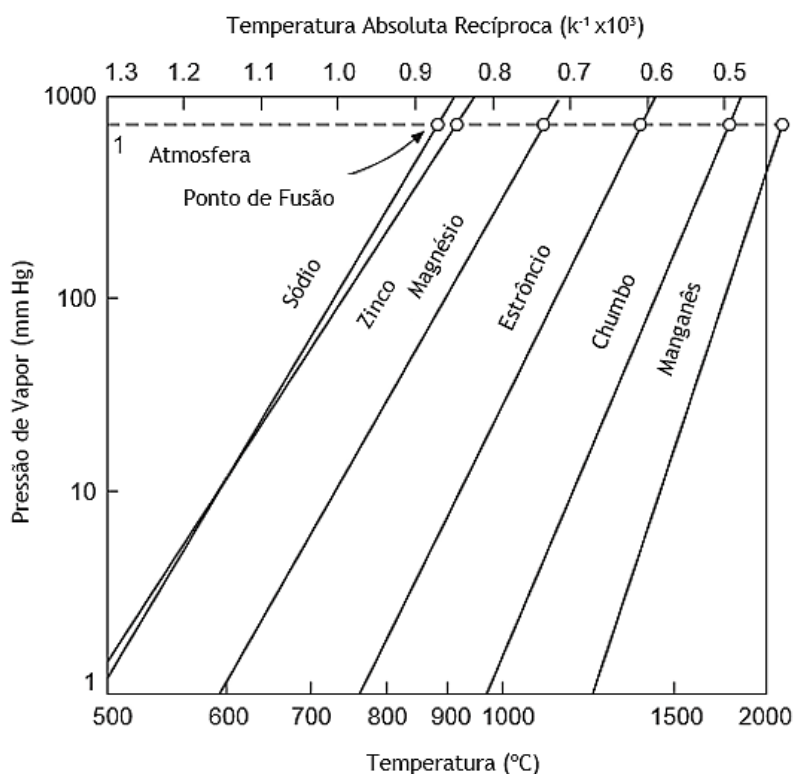
- i) capacidade de escoamento (*flowability*), determinada pelo coeficiente de transferência de calor da interface metal-moldação, pelas propriedades da liga e da carapaça cerâmica [30];
- ii) capacidade de enchimento (*fillability*), dependente da tensão superficial da liga a vazar.

Existem vários fatores importantes para garantir a fluidez de um banho metálico, como por exemplo: a composição, a temperatura de vazamento e até mesmo a temperatura de pré-aquecimento da carapaça cerâmica antes do vazamento.

#### 2.3.6. Vaporização de Elementos de Liga

No processo de fusão são muitas vezes atingidas temperaturas suficientemente elevadas para promover a vaporização de alguns dos elementos de liga. A sua evaporação pode ser severa e acarretar graves consequências, principalmente em termos do seu rendimento. A Figura 8 representa a variação das pressões de vapor de alguns elementos, em função da temperatura.

A fusão sob uma atmosfera de um gás inerte, como o árgon, reduz a taxa de vaporização dos elementos de liga e, conseqüentemente, acaba por minimizar alguns destes problemas [16, 17, 21].



**Figura 8** - Variação da pressão de vapor, com a temperatura, de alguns dos elementos mais voláteis (figura adaptada a partir da original) [5].

### 2.3.7. Impacto de um Banho Metálico Limpo

Existem dois métodos capazes de contribuir para a limpeza do banho: a presença de uma camada de árgon à superfície (com o objetivo de evitar o contacto da superfície do banho com o ar atmosférico) e a injeção de árgon gasoso, que atravessa um tijolo poroso colocado no fundo do forno, que promove uma agitação do banho a fim de fomentar uma maior homogeneização, tanto da sua composição como da temperatura, bem como a decantação das partículas não metálicas presentes no seu seio, daí resultando um metal com um grau de limpeza mais elevado.

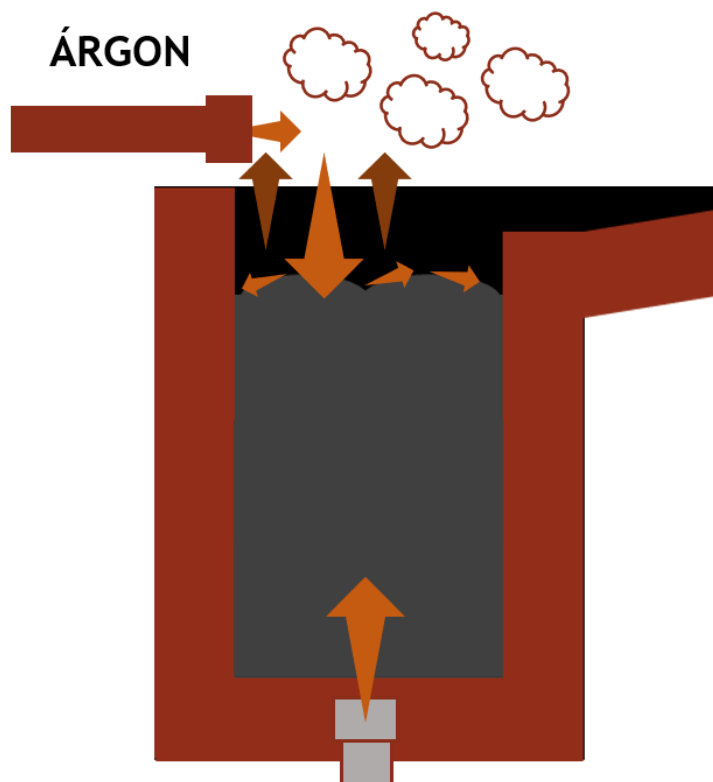
A utilização do “manto” de árgon à superfície contribui para a produção de um banho metálico, com elevado grau de limpeza, de capital importância para o processo, nomeadamente:

- Aumento significativo da vida útil do revestimento do forno;
- Aumento da fluidez do metal fundido, por decréscimo da formação de óxidos;
- Melhoria das propriedades mecânicas dos fundidos devido à redução da fração de partículas não metálicas no seio do fundido [9, 13-15].

Para tal, procede-se à deposição de uma camada de árgon sobre a superfície do banho metálico. O árgon é tradicionalmente utilizado na sua forma gasosa ou, segundo

desenvolvimentos mais recentes, sob a forma de um líquido a temperaturas criogénicas. Como apresenta uma densidade superior à do ar, o árgon mantém-se no topo do banho, minimizando o contacto deste com a atmosfera (Figura 9) [18, 31-33].

Quando utilizado no estado líquido, o árgon vaporiza e, consequentemente, dá-se a expansão do seu volume até 840 vezes o seu volume inicial. Desta forma, reduz-se consideravelmente a interação entre o metal fundido e os gases da atmosfera envolvente, como o oxigénio e o hidrogénio. A utilização de árgon no estado líquido promove uma proteção do banho mais eficiente que a do árgon no estado gasoso [18, 31-33].



*Figura 9 - Representação esquemática da utilização de um “manto” de proteção de gás inerte (árgon) sobre a superfície livre do banho metálico e da insuflação desse gás através de um tijolo poroso colocado na base do forno.*

Segundo um estudo desenvolvido pela empresa SPOKANE INDUSTRIES, a camada de árgon formada na interface entre o metal líquido e o ar permite a obtenção de um banho metálico mais limpo no final de cada ciclo de fusão. Esse banho apresentará menor formação de escória e uma menor presença de inclusões não metálicas, em comparação com um processo sem proteção por um gás inerte. Para além das vantagens já referidas, é também importante destacar outros ganhos da aplicação desta proteção, tais como a obtenção de material de retorno mais limpo e a redução da quantidade de desoxigenantes utilizados [34].

O tijolo poroso (Figura 9) não entra em contacto direto com o banho metálico devido à colocação de uma camada de refratário. Neste processo, regista-se uma agitação do banho metálico promovida pelo campo magnético gerado pela bobine do forno. No momento da aplicação desta técnica, a indução deve ser nula para garantir que qualquer tipo de escória ou partícula (refratários, filmes de óxidos, entre outras) se desloquem até à superfície no momento antes da limpeza do forno, permitindo rentabilizar a mesma.

## 2.4. Refratários

Torna-se de igual forma importante compreender a influência dos refratários no processo uma vez que estão em contacto direto com o banho metálico. De forma a selecionar o tipo de revestimento a utilizar num dado forno de indução, é necessário ter em conta vários parâmetros, desde a temperatura de trabalho até ao tipo de liga a fundir. Os revestimentos mais comumente utilizados são os siliciosos e os aluminosos.

Qualquer refratário pode ser classificado consoante o seu comportamento ácido, básico ou neutro. Por exemplo, os revestimentos siliciosos apresentam um comportamento ácido, enquanto os aluminosos apresentam um comportamento neutro. Tal facto é preponderante para perceber como um dado refratário reage na presença de determinados tipos de escória [35, 36].

### 2.4.1. Refratários Siliciosos

Na fusão da maioria das ligas ferrosas, em que se observa a formação de escórias ácidas, o revestimento silicioso é uma opção adequada, sendo reduzidas as reações entre a escória e o refratário. Quando as escórias apresentam teores de radicais básicos acima de determinado valor, ocorre um desgaste mais acentuado do refratário [37, 38].

Da análise das curvas patentes no Anexo 2, é possível observar que a sílica (quartzo) apresenta um comportamento diferente da maioria dos outros refratários. Apresenta uma expansão abrupta até cerca dos 400°C, que se torna menos acentuada na gama 400-600°C, vindo a estabilizar-se para temperaturas mais elevadas; em contrapartida, a dilatação dos outros refratários é mais suave e regular. Este comportamento particular da sílica está associado às transformações alotrópicas que ocorrem nessa gama de temperaturas, e que podem conduzir ao aparecimento de fissuras no refratário, principalmente se não for prestada atenção redobrada durante a sua sinterização ou durante o seu aquecimento inicial. Com a subida da temperatura, o coeficiente de expansão térmica da sílica acaba por estabilizar, ao contrário do que acontece com os outros materiais refratários. De salientar que, apesar das condicionantes anteriormente enumeradas, os refratários siliciosos acabam por ser das soluções mais abrangentes e económicas que o mercado oferece [17, 35, 36].

A sílica também pode ser utilizada sob a forma de sílica fundida, resultante da fusão de areia de quartzo natural. Esta solidifica sob a forma de vidro, que é posteriormente moído de forma a poder proceder-se à montagem do refratário. A sílica fundida apresenta um coeficiente de expansão térmica extremamente baixo comparativamente a outros refratários e até mesmo ao da sílica (quartzo). Tal facto confere à sílica fundida uma elevada resistência ao choque térmico e um conseqüente elevado custo [17].

### 2.4.2. Refratários Aluminosos

Os refratários aluminosos acabam por ser uma solução intermédia a outro tipo de materiais refratários apresentados em termos de reatividade do refratário com o banho metálico, coeficiente de expansão térmica e preço. Estes são divididos em refratários de alumina de alta pureza, e aluminossilicatos [17].

A refratariedade e o preço destes refratários aumenta, como é óbvio, com o teor de alumina. Por outro lado, à medida que o teor de alumina aumenta, a fração de mulite também aumenta, o que leva à diminuição de sílica livre. Aquando desta diminuição, quando se obtém 72% de alumina pode-se afirmar que o material contém apenas mulite, isto porque, de facto, o único composto estável formado entre a alumina e a sílica, a temperaturas elevadas, é a mulite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) que contém cerca de 72% de alumina [17].

Os refratários de alumina são produzidos, pelo processo de Bayer, a partir da bauxite. Estes são mais refratários e menos reativos, em relação a muitas ligas, do que os refratários siliciosos [17].

#### 2.4.3. Magnesite

Este material refratário é bastante sensível ao choque térmico uma vez que tem uma maior expansão térmica. Uma vez fissurado, este revestimento não é suscetível a qualquer tipo de recuperação, resultando numa penetração de metal que pode causar elevados danos caso o metal atinja a bobine do forno. Um problema ainda mais grave deste material refratário está associado à sua elevada higroscopia, sobretudo a temperaturas elevadas, que promove uma dilatação abrupta do material e a total destruição do revestimento. Assim sendo, este tipo de refratário só pode ser utilizado em ambientes em que o grau de humidade é muito baixo [17, 35, 36].

#### 2.4.4. Zircão

O zircão é um material que apresenta elevada refratariedade e baixa higroscopia; é comercializado sob a forma de partículas com elevado grau de esfericidade. As elevadas dimensões dos seus grãos impedem, geralmente, que este sirva de elemento base para o refratário uma vez que, nesse caso, o mesmo apresentaria uma elevada porosidade, acabando por permitir que o metal atingisse a bobine. Muitas vezes atua em conjunto com sílica fundida ou aluminossilicatos [17].

#### 2.4.5. Composição Química dos Refratários

Nos dias de hoje, é possível encontrar no mercado uma vasta diversidade de materiais passíveis de serem utilizados como refratários em fornos de indução. Por este motivo, e dadas as suas características, urge a necessidade de balancear os que poderão integrar a composição final do refratário base. Tal estudo permitirá garantir a longevidade do refratário, mas também que a escolha seja viável economicamente e resistente à diversidade de ligas ao qual será exposto, quer física ou quimicamente.

Existem ainda outros fatores ao qual uma empresa terá de prestar especial cuidado aquando da escolha do refratário, não tendo apenas em conta as ligas que produz, mas também a relação qualidade/preço, a reatividade destes com as ligas, a granulometria, o pH, a relação entre a expansão térmica do material, os ciclos de aquecimento e arrefecimento a que este vai ser exposto e ainda o tempo de vida médio dos refratários em causa.

## 2.5. Preparação das Cargas

A nível industrial, a existência de porosidade na peça final bem como a formação de inclusões são graves problemas a considerar, especialmente se o banho metálico estiver em contacto direto com a atmosfera. Estes defeitos surgem nas peças finais, essencialmente graças à oxidação do banho. Por este motivo, a escolha das matérias-primas, a sequência pela qual são introduzidas no banho metálico e a desoxigenação do mesmo são fatores cruciais a ter em conta e que devem ser previamente analisados, numa perspetiva termodinâmica [39].

### 2.5.1. Retornos e Matérias-Primas

O processo de fusão inicia-se com a preparação da carga metálica, sendo esta constituída normalmente por retornos e matérias-primas virgens (entre as quais se encontram elementos de elevado grau de pureza e ferro-ligas) de forma a obter a composição química pretendida. Para além das matérias-primas de base para a preparação de um banho metálico com uma dada composição, são também adicionados agentes desoxigenantes que visam a remoção do oxigénio do seio do banho a fim de minimizar a formação de óxidos e a presença de inclusões não metálicas na liga produzida [39, 40].

Existem muitas peças que, no final da fusão, apresentam defeitos pelo que são consideradas não conformes e que, conseqüentemente, terão de ser refundidas. Uma das matérias-primas mais utilizadas, quando se almeja produzir um aço de baixo carbono, é o ferro Armco, produto de elevada pureza naquele elemento. Qualquer base ferrosa é um componente fulcral na elaboração de um banho de aço a que são adicionadas, por exemplo ferro-ligas, como o Fe-Si 75 ou Fe-Cr 70, e elementos de elevado grau de pureza, de forma a ajustar a composição química pretendida. De notar que o carregamento destes componentes deverá processar-se de forma ponderada e gradual, tomando em consideração as possíveis reações perniciosas que possam ocorrer [39, 40].

Para que a preparação da carga seja o mais adequada possível, é necessário ter em conta duas grandes variáveis: a primeira relacionada com os materiais que são adicionados ao banho metálico, que diferem entre si, quer em tamanho, como na forma, densidade, ponto de fusão, entre outras características; a segunda está diretamente relacionada com o próprio banho metálico, nomeadamente a sua composição química, a temperatura de trabalho e a sua fluidez [41].

Após a adição de um dado componente de carga ao banho metálico, ocorrem dois estágios até à sua dissolução:

- No primeiro, assiste-se à formação de um invólucro de aço sólido em torno do componente adicionado devido à diferença entre as temperaturas; a sua espessura aumenta progressivamente até atingir um máximo, acabando entretanto por fundir e incorporar-se no banho [41];
- Por sua vez, na segunda etapa, esse componente começa a fundir-se, acabando por se misturar com o banho. Caso o elemento de liga adicionado não seja um elemento puro,

este processo dependerá de diversos fatores, tais como o teor de impurezas e a temperatura do banho [41].

O tamanho das partículas adicionadas ao banho metálico é um fator importante a ter em conta uma vez que, para um mesmo elemento de liga, poderão verificar-se tempos de fusão diferentes consoante a granulometria da matéria-prima. Tome-se como exemplo o caso do alumínio, aquando da sua adição ao banho metálico; tendo em conta que este se dissolve rapidamente no banho metálico, o tempo de fusão é praticamente igual ao da duração do invólucro de aço. Os tempos de fusão das partículas de alumínio (por exemplo, para tempos na gama 0,45-1,15 s) variam com o tamanho das partículas (respetivamente, 6 mm até 12 mm). A rápida fusão do alumínio deve-se a duas razões: o seu baixo ponto de fusão, bastante inferior ao de que qualquer outro elemento de liga adicionado, e a sua elevada condutividade térmica. Por outro lado, o Fe-Cr demora bastante tempo a solubilizar-se no banho, demorando cada unidade, de aproximadamente 100 mm de diâmetro, cerca de 140 s até à sua completa solubilização. Na Figura 10 é possível comparar, para o mesmo nível entálpico, a taxa de solubilização de vários aditivos, num banho de aço, em função da sua granulometria [41].

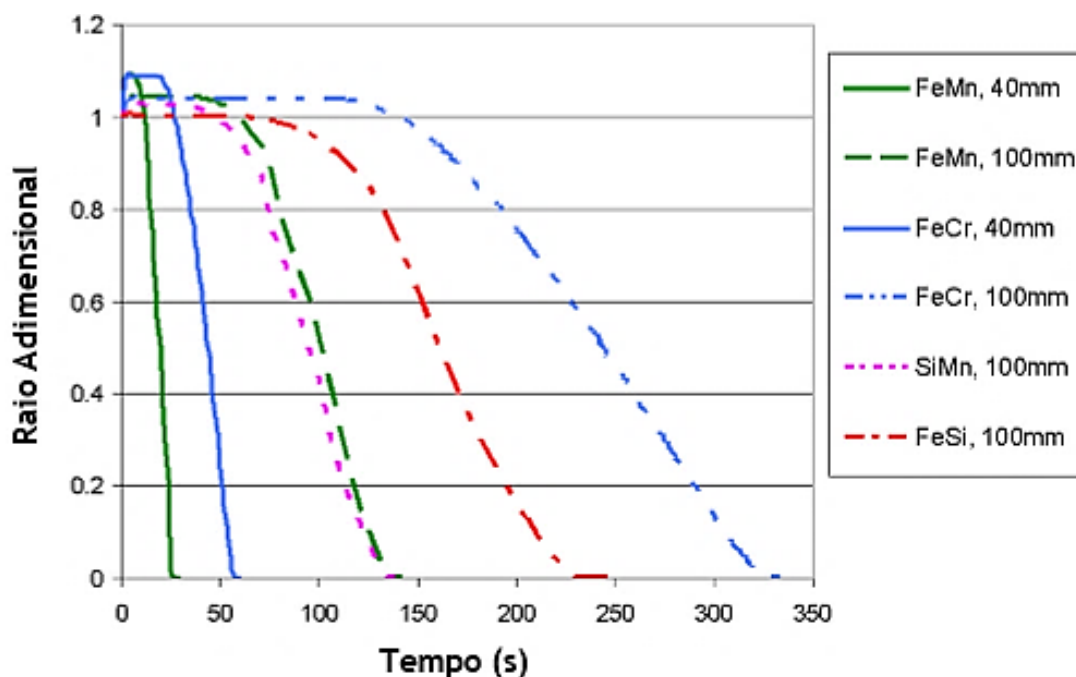


Figura 10 - Taxas de solubilização de diferentes aditivos num banho de aço em função da sua granulometria (figura adaptada do original) [41].

A velocidade de agitação do banho é controlada pela potência de indução do forno. Considerando uma dada velocidade de agitação do banho é possível calcular qual o tempo necessário para que se dê a dissolução de um dado elemento. O caso da adição de alumínio não é preocupante; no entanto, existem vários elementos ao qual a agitação do banho deve ser um fator a ter em conta, existindo assim uma velocidade ótima para que a dissolução ocorra [41].

Uma vez que o Fe-Cr apresenta um tempo de solubilização mais elevado, acaba por ser um caso de extrema importância para o presente estudo. Na Figura 11 é possível

comparar três variáveis: a velocidade de agitação do banho, o tempo de solubilização e ainda a granulometria das partículas adicionadas. A principal conclusão a retirar é que, de facto, quanto menor o tamanho da partícula, mais rápida será a sua solubilização. O mesmo acontece quando se aumenta a velocidade de agitação [41].

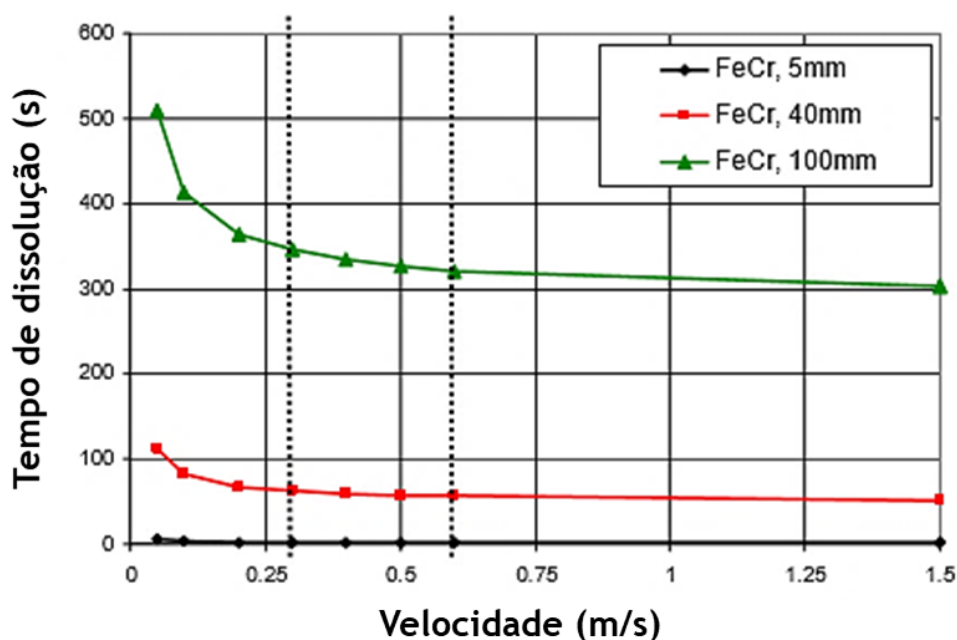


Figura 11 - Taxa de solubilização de partículas de Fe-Cr com diferentes granulometrias em função da velocidade de agitação do banho metálico (figura adaptada a partir da original) [41].

### 2.5.2. Efeito da Adição de Elementos de Liga ao Banho Metálico

A sequência de carregamento, bem como a forma como os diferentes elementos reagem com o banho, determinam a sua composição química, o rendimento de adição (e, consequentemente, o respetivo consumo específico) e a sanidade interna das peças. Desta forma, é importante saber qual a relevância dos principais elementos adicionados ao banho metálico para a sua qualidade [42, 43].

O alumínio tem uma posição de destaque para um banho de aço. Mesmo quando não integra a composição química final de um dado aço, tem um papel bastante importante na desoxigenação do banho. O grande senão da sua adição detém-se na sua baixa densidade relativamente à do banho metálico, acabando por flutuar à superfície, atuando principalmente na interface entre a escória e o aço. A solução encontrada para este problema foi a adição de alumínio sob a forma de arame de modo a conseguir introduzi-lo mais profundamente no banho.

O silício apresenta elevado poder desoxigenante; entretanto, é necessário ter em conta dois fatores de acordo com a finalidade da sua adição: se fizer parte da composição química base da liga, não se pode utilizar com esse intuito; e na capacidade que este tem de aumentar a fluidez do banho. Em peças propensas ao aparecimento de porosidade, a presença deste elemento é determinante para a fluidez do banho, sendo importante, mantê-lo num teor elevado.

O titânio forma, à temperatura ambiente, um filme de óxido estável à superfície, limitando a sua oxidação. Às temperaturas de trabalho normalmente utilizadas para o aço, este elemento forma alguns compostos estáveis com o oxigénio, carbono, azoto e até com o enxofre. Assim, é frequentemente utilizado na produção de aço para reagir com estes elementos, diminuindo assim o seu efeito nocivo. O aço deve ser previamente desoxigenado, geralmente recorrendo ao alumínio. Assim, devido à sua reatividade e preço, o titânio deve ser o último a ser adicionado ao banho, garantindo uma última desoxigenação antes da limpeza do banho.

O manganês faz parte da composição química de grande parte dos aços, mesmo que seja a nível residual. Para além disso, este elemento funciona como um desoxigenante suave do banho, e, tal como o silício, não deve ser adicionado ao banho com esse propósito.

Tal como referido anteriormente, o crómio demora bastante a solubilizar-se no banho. A adição e solubilização do crómio transporta oxigénio, expondo o banho a reações de oxidação.

### 2.5.3. Sequência de Carregamento

Devido ao contacto do banho metálico, a altas temperaturas, com o vapor de água presente na atmosfera, este tem tendência a oxidar, podendo formar inclusões e, consequentemente, comprometer a sanidade da peça final. A taxa de oxidação segue uma lei parabólica, sendo diretamente dependente da temperatura e do tempo de processamento do banho metálico (Figura 12) [39].

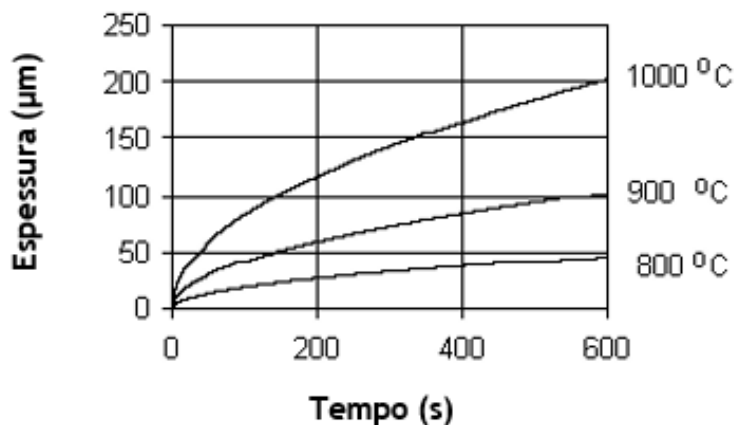
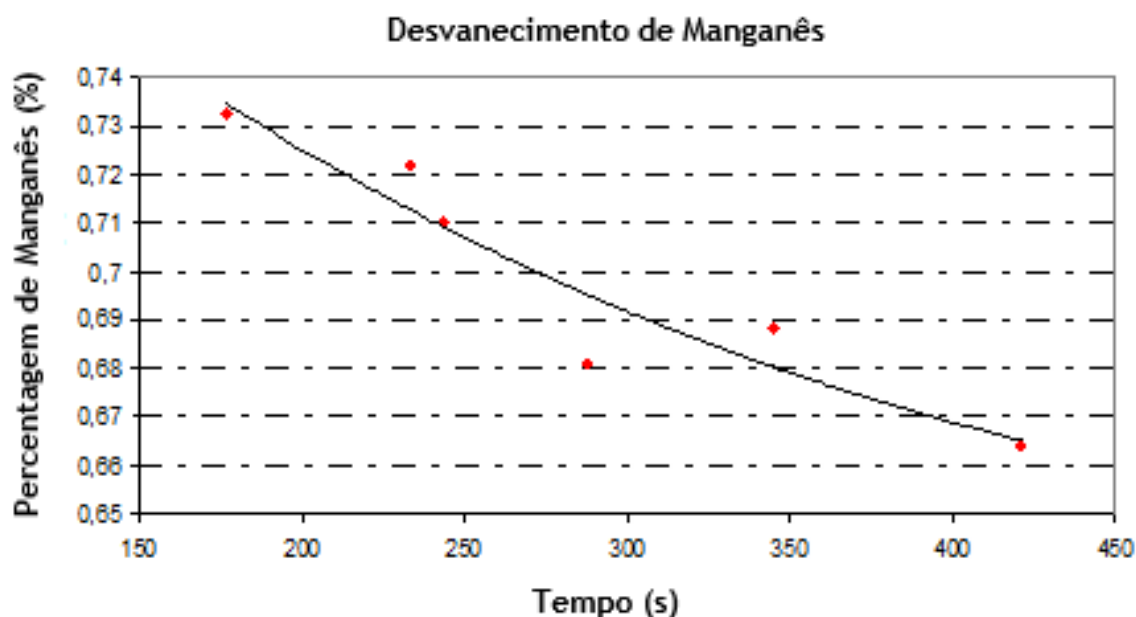


Figura 12 - Taxa de oxidação de um banho de aço a diferentes temperaturas (figura adaptada a partir da original) [36].

Um exemplo prático da relação entre o tempo de exposição do banho e a sua taxa de oxidação é apresentado na Figura 13, em que se regista a ocorrência de reações de oxidação durante o vazamento de um dado aço; em cerca de 4 minutos, assiste-se a uma perda de aproximadamente 10% do manganês inicial [39].



**Figura 13** - Perda de Mn, por oxidação, durante o vazamento de um dado aço (figura adaptada a partir da original) [39].

Da análise do diagrama de *Ellingham* (Figura 14), é possível hierarquizar a reatividade de alguns elementos com o oxigênio, podendo assim antever a ordem de ocorrência de alguns fenômenos de oxidação no banho metálico. A linha vermelha representa a sequência de fusão aconselhada para uma carga exemplo constituída por Fe-Cr 70, ferro Armco, Fe-Si 75 e manganês. Desta forma, é possível garantir que não há perda significativa dos elementos de liga mais reativos até ao final da fusão. Consequentemente, o rendimento de adição de cada elemento no banho metálico aumenta desde que suportado por um minucioso processo de desoxigenação [39].

De forma simplificada, podemos observar a execução desta hierarquização na Tabela 1, obtendo uma primeira aproximação da sequência de carregamento ideal. A ideia centra-se num princípio simples, hierarquizada em função do aumento progressivo da reatividade de um dado elemento metálico, de modo a que o rendimento de adição dos diversos elementos seja o mais elevado possível e garantindo que, durante o vazamento, ocorra o mínimo de oxidação dos elementos metálicos [39].

**Tabela 1** - Elementos de carga e energia livre de formação de óxidos [39]

| Componentes da carga de Fusão | $\Delta G^\circ$ de formação de óxidos a 1300°C (kJ/mole) | Ordem de oxidação |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|
| Fe-Cr 70                      | -474,37 $\pm$ 16,74 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )           | 3                 |
| Fe Armco                      | -322,45 $\pm$ 12,55 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )           | 4                 |
| Fe-Si 75                      | -600,59 $\pm$ 12,55 ( $\text{SiO}_2$ )                    | 1                 |
| Manganês                      | -539,00 $\pm$ 12,55 ( $\text{MnO}$ )                      | 2                 |

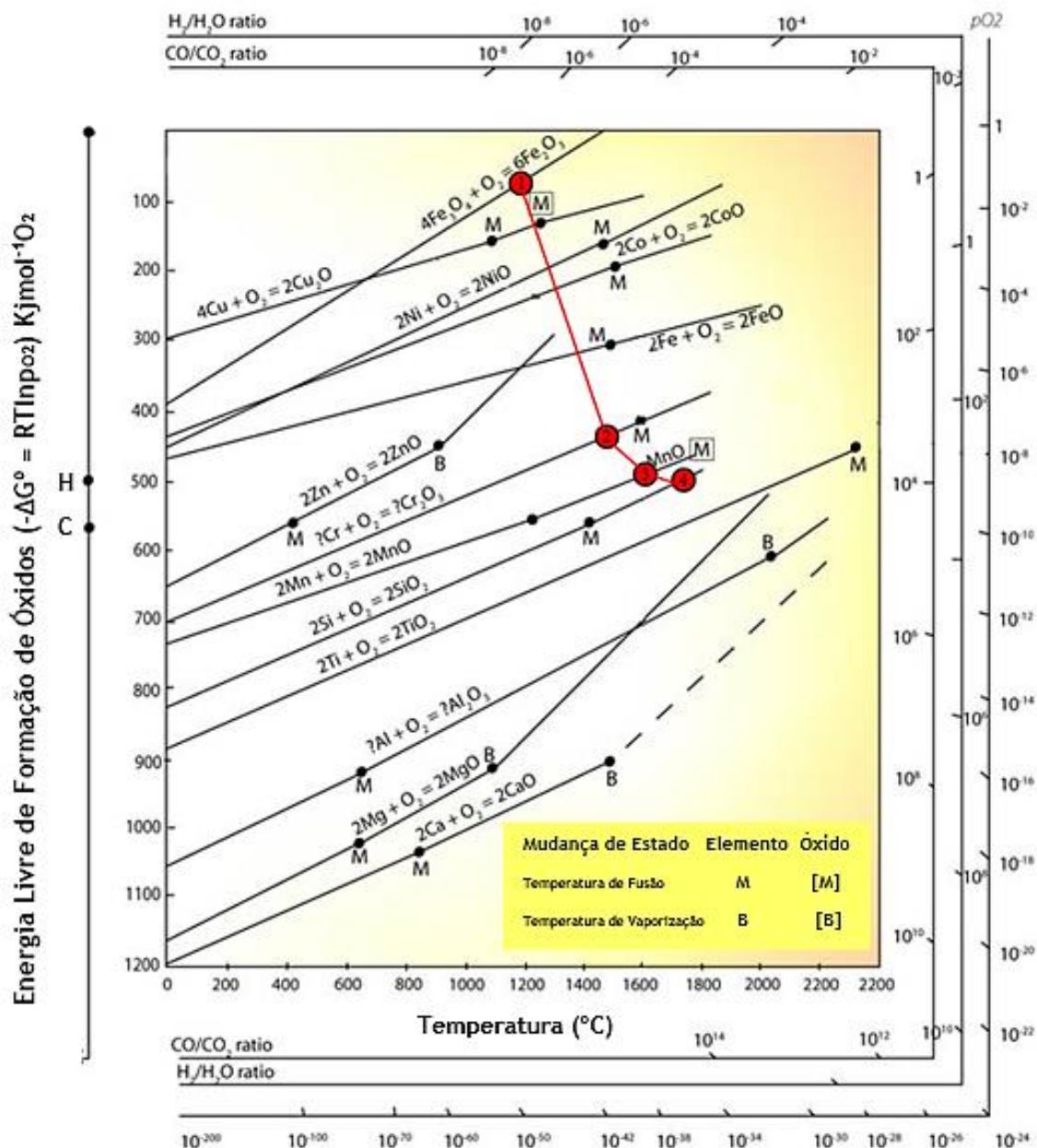


Figura 14 - Diagrama de Ellingham; a linha vermelha representa a sequência aconselhada para o carregamento do forno de modo a garantir elevadas taxas de adição (figura adaptada a partir da original) [39].

Assim, para este caso, a ordem de carregamento do forno deve ser:

1. Ferro Armco;
2. Fe-Cr 70;
3. Manganês;
4. Fe-Si 75.

No entanto, não existe uma única sequência de carregamento possível. Há casos, em que é conveniente inverter a sequência de carregamento de modo a possibilitar a obtenção de uma escória com viscosidade mais baixa devido à adição, em último lugar, do manganês [39].

Por fim, é importante lembrar que a taxa de oxidação de um banho de aço depende de vários fatores, nomeadamente da intensidade de agitação e da proteção do banho com argon bem como da sua superfície livre durante o vazamento [39].

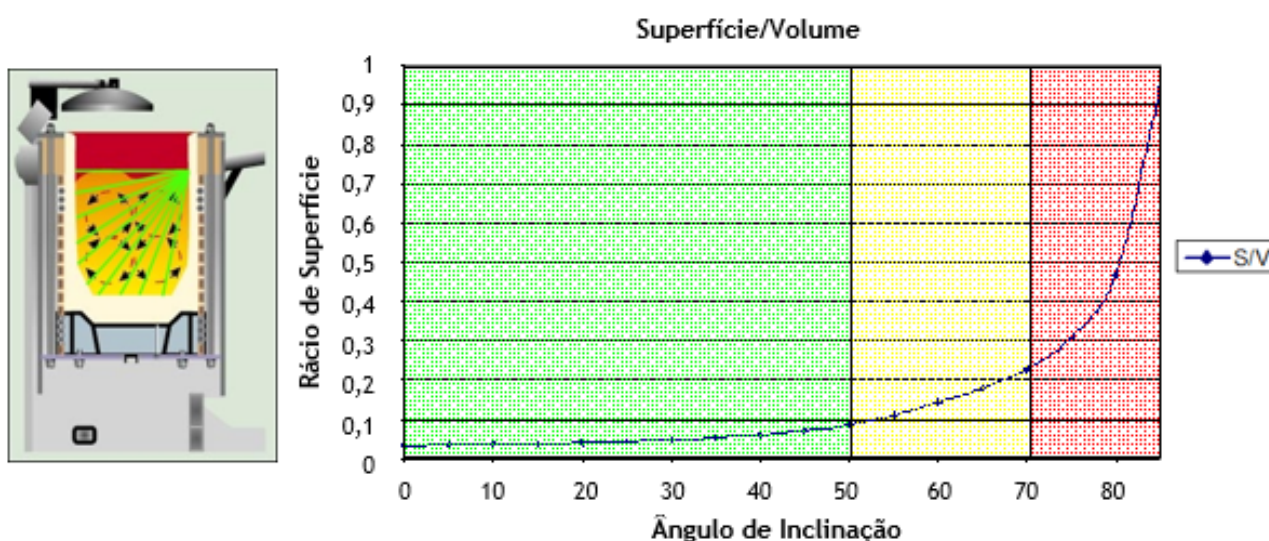
#### 2.5.4. Agentes Desoxigenantes

Os agentes desoxigenantes têm um papel determinante no desenrolar do processo. Estes, quando introduzidos no banho metálico, atuam durante a sua fusão e vazamento, minimizando possíveis reações do banho com o oxigénio. A desoxigenação ocorre enquanto existir um agente desoxigenante (elemento com elevada afinidade para o oxigénio) disponível no banho para esta reação [39].

Os agentes desoxigenantes mais comuns, que são utilizados antes ou durante o vazamento, são:

1. Titânio
2. Alumínio
3. Cálcio
4. Cério

Devido ao basculamento do forno, durante o vazamento do metal para a colher, existem três áreas de oxidação a ter em conta, tal como representado na Figura 15 [39].



**Figura 15** -Representação do rácio entre a superfície e volume do banho no interior de um forno, durante o seu basculamento (figura adaptada a partir da original) [39].

1. Zona Verde - Representativa do momento inicial de basculamento do forno. É uma área com bastante potencial para tratar o banho metálico. Nesta zona há formação contínua de inclusões de pequenas dimensões [39];

2. Zona Amarela - Verifica-se o aumento do ângulo de inclinação do forno. É uma área de perigo no que diz respeito ao tratamento do banho uma vez que há formação de inclusões de grandes dimensões e o efeito de desoxigenação é reduzido [39];

3. Zona Vermelha - Devido ao aumento exponencial da superfície do banho, nesta fase do vazamento não é recomendável realizar tratamentos de desoxigenação do banho devido ao potencial de formação de inclusões de elevada dimensão [39].

A quantidade de desoxigenante a ser adicionada a um dado banho depende do número de estágios de desoxigenação e, acima de tudo, do potencial destes elementos para reagirem com o oxigénio [39].

Existem vários fatores a ter em consideração na seleção da quantidade e momento de adição dos agentes desoxigenantes, nomeadamente: a composição da liga e dos óxidos que se irão formar, a temperatura de trabalho, a natureza dos agentes desoxigenantes utilizados, o tempo da sua solubilização e a área de exposição do banho ao ar [39].

## **2.6. Aços**

Após uma abordagem geral ao processo de FMCP, com foco na etapa de fusão bem como no estudo das principais variáveis com maior impacto na preparação de cargas e na qualidade do banho metálico, é necessário abordar com algum detalhe o tipo de liga em estudo neste trabalho

Os aços apresentam várias classificações, sendo importante enfatizar a influência da adição de alguns elementos de liga durante a sua elaboração. Após obter as peças finais, é importante observar quais os defeitos eventualmente presentes de modo a inquirir sobre a sua origem e de que forma se pode obviar o seu aparecimento, tudo isto a fim de se produzir uma peça com os níveis de sanidade exigidos.

### **2.6.1. Aços de Alta e Baixa Liga**

Os aços podem ser classificados de diferentes formas: pela sua estrutura, pelo seu campo de aplicação, pelo tipo de produto e até pela quantidade e natureza dos elementos de liga utilizados. Quanto a esta última designação, estes repartem-se em aços ligados ou não ligados e, por sua vez, dentro dos ligados, são subdivididos em: aços de baixa e de alta liga [44, 45].

O aço ao carbono comum, não ligado, apresenta teores de elementos de liga bastante reduzidos. Estes podem conter teores residuais de elementos provenientes dos materiais utilizados na sua elaboração. Estes não apresentam uma elevada resistência à corrosão nem são recomendáveis para uso a temperaturas muito baixas ou temperaturas superiores a 400°C [44, 45].

Os aços de baixa liga contêm uma pequena quantidade de elementos de liga na sua composição. Estes podem ter inúmeras designações, como por exemplo, aços C-Mn (1% a 2% Mn), aços microligados (ao Nb, Ti e V, num total inferior a 0,1%), ferríticos e ferrítico-perlíticos, entre outras. Estes aços têm uma maior resistência mecânica e uma maior tenacidade que os aços ao carbono [44, 45].

Por sua vez, os aços de alta liga apresentam teores elevados de elementos de liga, normalmente para um total superior a 8%. O objetivo da introdução destes elementos no banho metálico reside na sua capacidade de conferir aos aços propriedades químicas e

mecânicas superiores às que o metal base apresenta. Entre estas, destacam-se a resistência mecânica a elevadas temperaturas ou a meios corrosivos muito agressivos, sendo o seu custo de produção mais elevado, dependendo de quais os elementos utilizados na sua elaboração.

Entre os aços de alta liga, é importante referir o caso especial dos aços inoxidáveis, que assumem um papel bastante importante na indústria. Para garantir a resistência à corrosão, estes aços devem conter um teor mínimo de cromo de 10,5%. Este teor de cromo permite a formação de uma superfície passiva de óxido de cromo que minimiza a oxidação e corrosão do material [46-51].

### 2.6.2. Defeitos nos fundidos

Independentemente do tipo de aço requerido, o cliente, de acordo com a aplicação da peça final, define, entre muitas premissas, qual a gama aceitável de composição química das peças finais e qual o nível de sanidade a que devem obedecer. Assim, e no que diz respeito à fusão de uma dada liga, existem dois grandes alvos a atingir. Em primeiro lugar, prever qual a composição química, dentro da gama aceitável, mais apropriada para cumprir com as exigências do cliente e, em segundo lugar, garantir que a peça satisfaz os requisitos de sanidade impostos pelo mesmo. Ambos estão relacionados, mas nem sempre os balanços de materiais e sequências de carregamento das matérias-primas adotados garantem que o nível de sanidade da peça final seja satisfeito. Esta vai depender de mais fatores, como por exemplo: o erro humano implícito à técnica de vazamento adotada por cada operador, fatores externos à etapa de fusão, à reatividade, ao seu estado de oxidação, se existe ou não proteção do banho, entre muitas outras variáveis.

Para analisar a sanidade de uma peça, é necessário perceber quais os defeitos que a podem afetar, bem como de que forma é que os podemos evitar. Um defeito pode ter inúmeras causas; no entanto, neste trabalho só será dado foco às que possam estar diretamente relacionadas com a etapa da fusão. Entre os vários defeitos possíveis de se observar, existem três bastantes comuns e que podem estar, muitas vezes, diretamente relacionados com o processo de fusão e com as possíveis reações que tenham ocorrido ao longo da mesma. Fala-se assim de inclusões, de porosidade e de “mal cheio” [31, 52, 53].

O defeito “mal cheio” (Anexo 3 - A) verifica-se quando o metal não enche por completo a cavidade moldante, originando zonas com falta de material. É mais crítico quando as peças são de dimensões reduzidas e/ou têm secções finas, onde o enchimento é dificultado. No Anexo 4, é possível observar possíveis causas e respetivas ações corretivas. Este acontece sobretudo devido à baixa fluidez do metal e depende da composição química do aço a vaziar, sobretudo do teor em silício, uma vez que esta determina a gama de temperaturas de solidificação [31, 52, 53].

Para além do “mal cheio”, muitas vezes as peças são afetadas por inclusões que podem aparecer graças a diversos fenómenos. Aqueles que são diretamente suscitados pela etapa de fusão podem ter duas proveniências: inclusões provenientes da escória formada no banho metálico ou resultantes da oxidação do mesmo. Durante a fusão e

vazamento, forma-se escória em função do tempo, temperatura e disponibilidade de oxigénio. Esta mistura-se com o banho metálico durante o vazamento e, sendo menos densa que o metal, flutua na superfície superior da peça fundida, podendo originar o defeito patente no Anexo 3 - B. Tanto as possíveis causas como as respetivas ações corretivas estão organizadas ao longo da tabela do Anexo 5. Muitas vezes, durante a etapa de fusão, forma-se uma camada de óxido à superfície das peças graças à exposição do banho metálico ao oxigénio; este é o outro tipo de inclusão. Na figura do Anexo 6 é possível observar a existência de óxidos numa dada peça. Na tabela do Anexo 7 são apresentadas algumas causas para este fenómeno, bem como as respetivas ações corretivas [31, 52, 53].

Os poros (Anexo 3 - C e Anexo 3 - D) surgem quando determinados gases são absorvidos pelo metal ao longo da fusão/vazamento. Se o limite de solubilidade do gás no banho metálico exceder o limite de solubilidade do mesmo no estado sólido, formam-se bolhas durante a solidificação. Os gases mais responsáveis por esse defeito são o hidrogénio e o azoto. Este defeito é mais comum em aços ao carbono e aços de baixa liga, podendo apresentar diversas causas, como é possível observar na Tabela 2 [31, 52, 53].

*Tabela 2 - Possíveis causas que originam porosidade e respetivas ações corretivas [53]*

| <b>Causa</b>                                                          | <b>Medida corretiva</b>                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Elevado nível de azoto, oxigénio ou hidrogénio no banho</b>        | Evitar adicionar matérias-primas suscetíveis de conterem elevados níveis de azoto, oxigénio e hidrogénio. Evitar utilização exagerada de retornos.                             |
| <b>Metal oxidado</b>                                                  | O metal deve estar limpo, seco e livre de ferrugem ou óleos. Granalhar a matéria-prima bem como verificar se o forno está seco antes de ser usado.                             |
| <b>Colheres com humidade</b>                                          | Assegure a secagem adequada das bicas e colheres de vazamento.                                                                                                                 |
| <b>Excesso de cera e material de adição na cavidade moldante</b>      | Melhor prática de descerificação e sinterização das carapaças cerâmicas.                                                                                                       |
| <b>Elevada absorção de azoto, oxigénio ou hidrogénio no vazamento</b> | Reduzir a temperatura ou tempo de fusão. Usar uma atmosfera protetora inerte.                                                                                                  |
| <b>Desoxigenação deficiente</b>                                       | Melhorar as práticas.                                                                                                                                                          |
| <b>Má prática de vazamento</b>                                        | Reduzir a altura de vazamento. Assegurar um vazamento suave.                                                                                                                   |
| <b>Baixa temperatura do metal</b>                                     | Aumentar a temperatura do banho metálico de modo a facilitar o escape das bolhas gasosas do seu interior, através do sistema de gitagem ou da porosidade da carapaça cerâmica. |

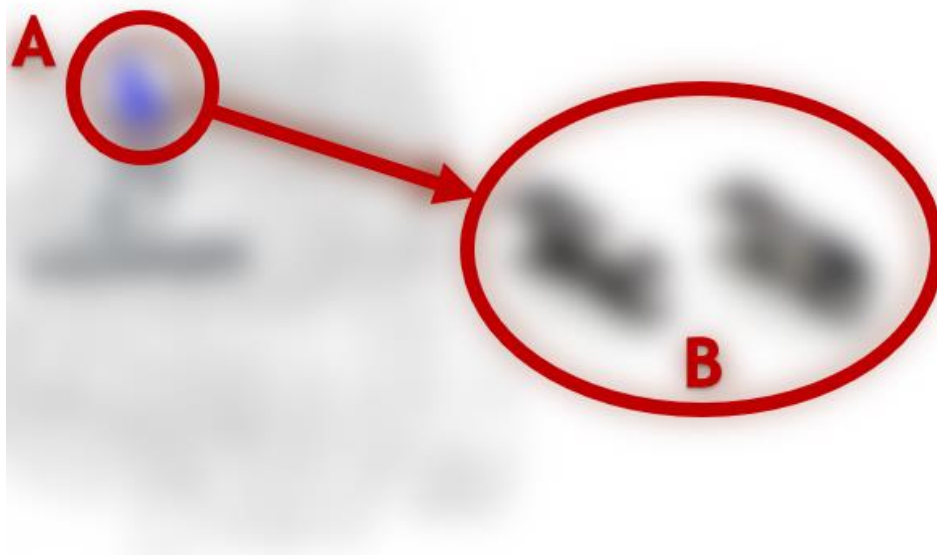
### 3. Caso de Estudo - Microfuso

#### 3.1. Liga em Estudo

No Capítulo 2 salientou-se, por várias ocasiões, a importância dos aços para este trabalho, possibilitando a revisão pormenorizada de todas as temáticas cruciais para o desenvolvimento do mesmo. Os aços são o grande enfoque da empresa, levando a cabo a produção de mais de 100 tipos de aços diferentes. Este trabalho tem como objetivo o estudo e otimização de uma liga com bastante relevo na produção desta empresa.

De facto, e como referido anteriormente, cerca de 50% da produção da ZCP destina-se à indústria automóvel. Dentro dessa fração, um dos produtos com maior destaque na produção da empresa é o microfuso (Figura 16). Este componente funciona como um braço oscilante necessário para transferir o movimento rotativo transmitido pela cambota para o movimento recíproco das válvulas de admissão, do escape e da bomba de combustível.

A produção de componentes como o microfuso é muitas vezes realizada pelo processo de FMCP uma vez que esta peça apresenta pequenas dimensões e secções muito finas. Devido à composição química da liga utilizada para a produção da peça e à sua geometria, esta apresenta elevados problemas de porosidade que podem ser críticos de acordo com os critérios de aceitação impostos pelo cliente. Assim, é necessário controlar a sequência de carregamento das matérias-primas no forno, a composição química do banho e a sua desoxigenação. Há que assegurar igualmente uma adequada fluidez do banho metálico e o escape de gases durante o vazamento, mediante uma boa permeabilidade da carapaça cerâmica e um *design* apropriado da mesma [31].



*Figura 16 - a) Esquema representativo da atuação do microfuso; b) Microfuso.*

O microfuso em estudo é vazado num aço refratário de alta liga (resistente a altas temperaturas) do sistema X 38 Cr Mo V 5-1, cuja composição química é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química da liga X 38 Cr Mo V 5-1 usada na produção do microfuso (% ponderal).

|      | Fe    | C    | Si   | Mn   | P    | S    | Cr   | Mo   | Ni   | V    | Co   | Ti   | Al   | Cu   |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Min. | 90,43 | 0,36 | 0,90 | 0,30 | 0,00 | 0,00 | 4,80 | 1,10 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Máx. | 92,29 | 0,42 | 1,20 | 0,50 | 0,02 | 0,02 | 5,50 | 1,40 | 0,15 | 0,50 | 0,10 | 0,11 | 0,15 | 0,10 |

### 3.2. Análise de Defeitos do Microfuso

Após a recolha de dados relativos à produção do microfuso, desde a primeira ordem de fabrico (15 de julho de 2017) até ao final de maio de 2019, foi possível observar a existência de um defeito que suplantava todos os outros, *i.e.*, era responsável pela taxa de refugo mais elevada na produção. Da análise do diagrama de Pareto (Figura 17), é possível observar que a porosidade é responsável por cerca de 66% do refugo deste componente. Para além disso, é também possível retirar os intervalos de refugo referentes à porosidade, possibilitando uma visão mais pormenorizada do caso. Entre as cerca das 200 produções realizadas pela ZCP, considerou-se como problemáticas 145 delas pois originaram uma taxa de refugo igual ou superior a 4%.

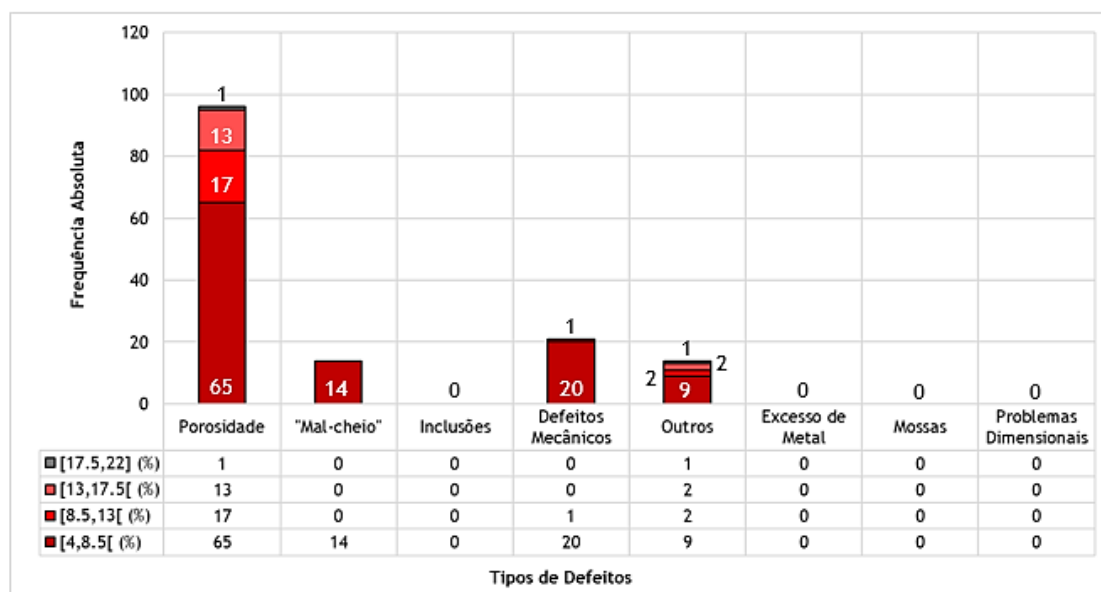


Figura 17 - Diagrama de Pareto aplicado aos defeitos do microfuso (dados desde 2017).

Este componente geralmente não é alvo de recuperações, sendo rejeitado de imediato após identificação de algum defeito crítico. Na Figura 17 é possível verificar que a porosidade (defeito crítico), para além de ser predominante na maioria das peças, consegue atingir valores superiores a 20%. Entretanto, na Figura 18, é possível analisar o problema segundo uma outra perspetiva, percebendo qual foi a evolução da porosidade ao longo do tempo. De facto, a fração de peças com porosidade foi aumentando ao longo do tempo, tornando-se um problema em grande escala na produção deste componente. É possível destacar três patamares médios de porosidade ao longo da produção do microfuso, identificados na figura como zonas A, B e C. Na zona A, com uma média  $2,79\% \pm 0,02$ , as peças apresentavam porosidade, sendo que, para uma ordem de fabrico, se obteve uma taxa de refugo de 14% devido a porosidade. Nesta fase, era importante

melhorar a liga de forma a conseguir estabilizar e uniformizar esta fase inicial de produção. Na zona B, a porosidade aumenta para cerca de  $4,92\% \pm 0,03$ ; começa-se a tentar descobrir qual a causa indutora deste aumento, obtendo valores que chegaram aos 15,40%. A zona C, o defeito crítico volta a ter um aumento considerável para valores médios de cerca de  $10,27\% \pm 0,05$  de poros por ordem de fabrico, com uma produção crítica com 21,30% de peças para sucata, não tendo em conta outros tipos de defeitos.

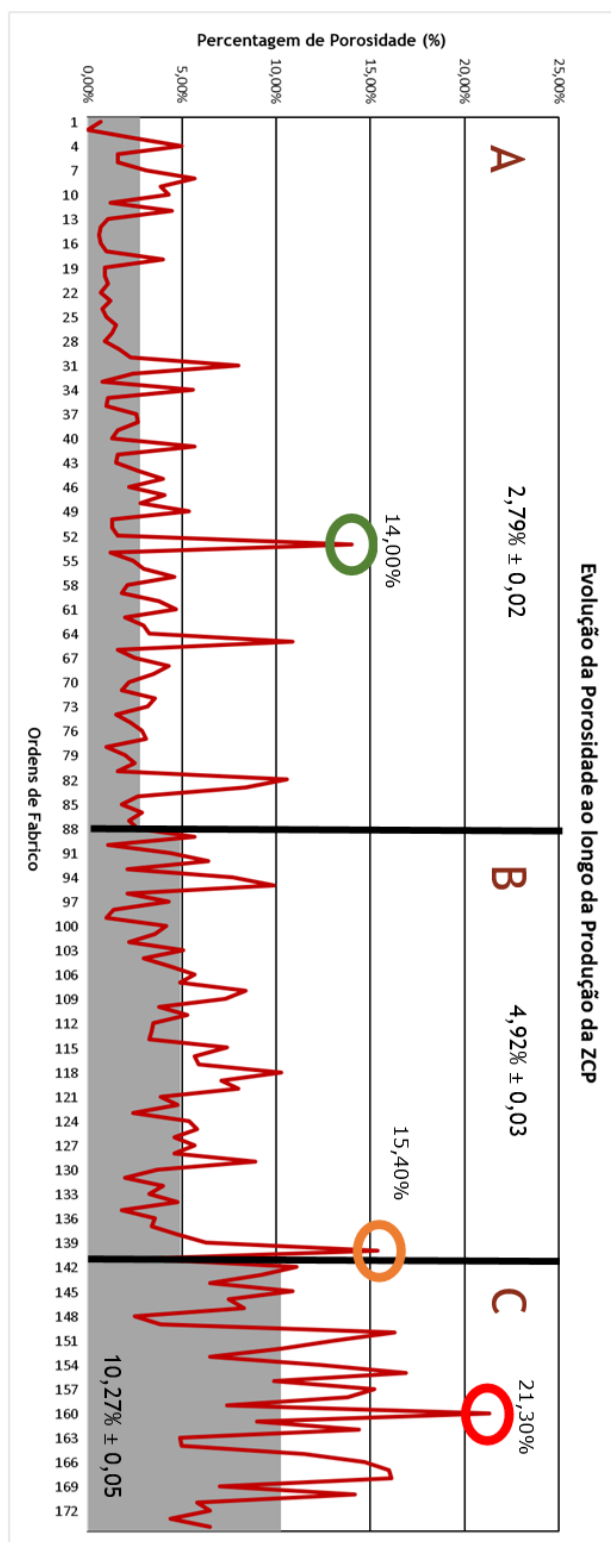


Figura 18 - Evolução da taxa de refugo, para a produção do microfuso, desde a primeira ordem de fabrico.

Facilmente se consegue distinguir estes três patamares, existindo dois pontos chave a estudar coincidentes com as duas mudanças de patamar. Qualquer alteração ao longo do processo pode ter dado origem a estas mudanças abruptas da taxa de refugo devido a porosidade nas peças. A pertinência deste trabalho vem no sentido de tentar descobrir as possíveis causas-raiz de todo este problema, tentando otimizar os procedimentos originais da empresa para a produção dos fundidos em causa. Torna-se imperativo perceber quais as condicionantes, variáveis e práticas responsáveis pela evolução deste defeito.

### 3.3. Defeito Crítico - Porosidade

Após esta abordagem geral ao problema, resta prestar alguma atenção ao defeito crítico específico deste componente. Tal como abordado no Capítulo 2.6, verifica-se que uma dada peça apresenta porosidade devido à absorção de gases ao longo da fusão ou vazamento (Figura 19). Esta pode ser resultado do contacto do banho com a atmosfera do forno, da utilização de matérias-primas oxidadas, da retenção de gases no banho, da má desoxigenação/sequência de carregamento do forno, da baixa fluidez do banho ou de uma má escolha/controlo da temperatura ao longo desta etapa, mas também, de fatores externos à etapa da fusão, como a técnica de vazamento escolhida e a influência de etapas anteriores, começando pelo projeto do sistema de gitagem, a montagem dos cachos em cera, as propriedades intrínsecas à carapaça cerâmica, entre outros.

A avaliação de um defeito num dado componente depende muito das restrições requeridas por parte do cliente. Muitas vezes, o nível de aceitação da porosidade num determinado componente está relacionado com a exigência imposta na sua área de aplicação. Ou seja, por vezes o setor automóvel é menos exigente que, por exemplo, a indústria aeronáutica. No entanto, o objetivo é estar sempre dentro do critério de aceitação do cliente, mesmo que para isso seja necessário recorrer a processos adicionais de recuperação. Como já referido anteriormente, o microfuso não é alvo de qualquer tipo de recuperação. Assim, torna-se indispensável analisar e controlar as principais variáveis a fim de ser possível detetar se, na etapa da fusão, existem práticas responsáveis pelo aumento da porosidade nesta peça.



*Figura 19 - Exemplo da existência de poros em duas peças do componente em estudo.*

## 4. Parâmetros de Processo

### 4.1. Seleção dos Parâmetros do Processo

Para o desenvolvimento deste trabalho, e antes de perceber quais os pontos chave a investigar, é necessário perceber quais os principais parâmetros que podem estar associados ao aparecimento do defeito em análise. A maior parte dos defeitos que surgem nas peças estão associados ao processo de fabrico e por vezes ao desenvolvimento do produto. Como tal, é necessário controlá-los de modo a reduzir ao máximo o número de peças defeituosas. A análise e a correta identificação dos defeitos é essencial para encontrar as causas raiz e tomar ações preventivas imediatas.

Este subcapítulo pretende elencar os parâmetros do processo mais relacionados e melhor documentados sobre a problemática do caso de estudo [52]. Para tal, tendo em conta a bibliografia e com o apoio do resto da equipa do setor da fusão da ZCP, realizou-se um *brainstorming* com o objetivo de construir um diagrama de *Ishikawa* (causa-efeito), apresentado na Figura 20. As principais causas primárias identificadas, por etapa de fabrico, foram as seguintes: Projeto, Cerâmica, Fusão e Vazamento.

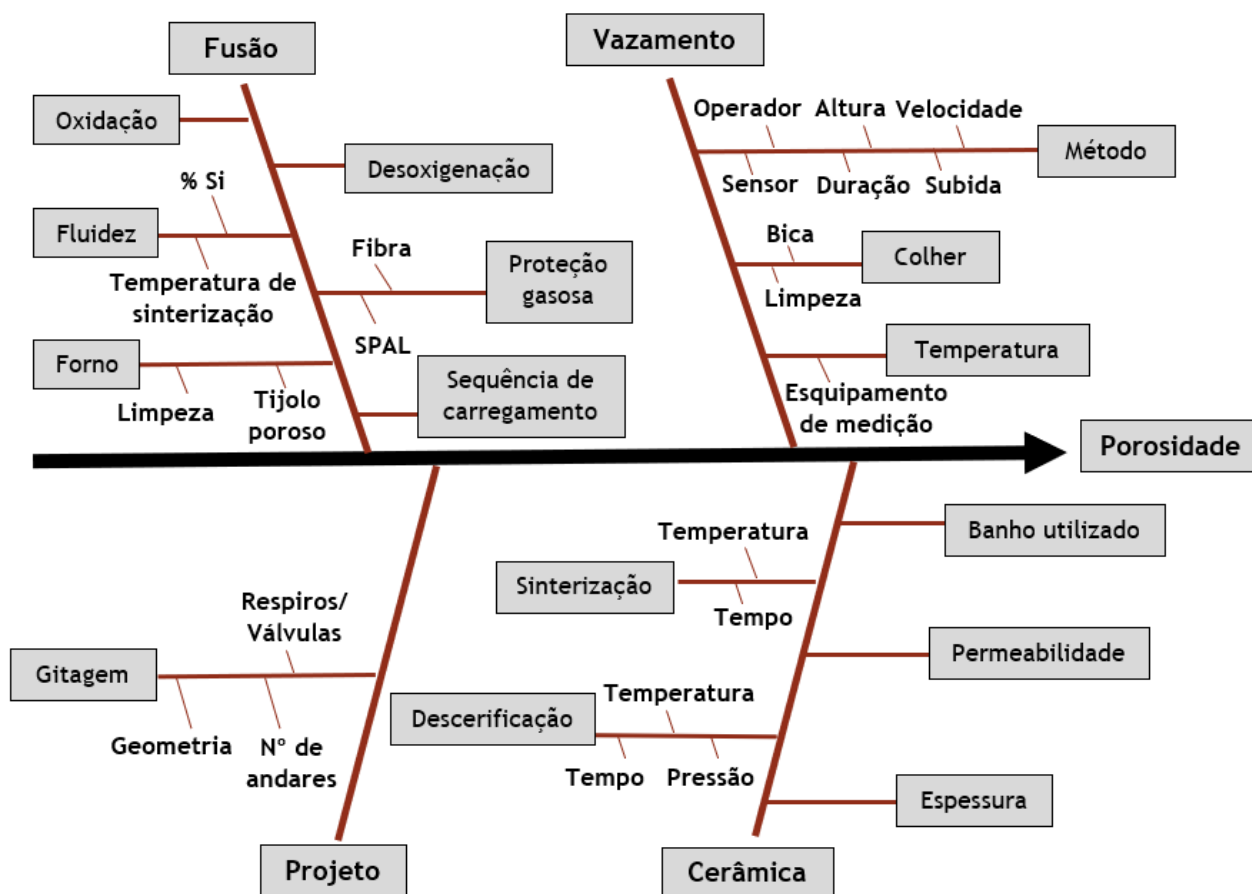


Figura 20 - Diagrama causa-efeito relativo aos principais defeitos analisados no caso de estudo.

### 4.2. Análise dos Parâmetros do Processo

A pedido da empresa, o objetivo principal de investigação para este trabalho deveria ter o seu principal foco na etapa da fusão. No entanto, após a análise detalhada

das práticas realizadas pela ZCP, foi igualmente possível otimizar outros setores do processo. De facto, quando se pretende otimizar e melhorar continuamente um dado processo, nada deve ser assumido como dogmático uma vez que há sempre “espaço” para melhorar.

A etapa da fusão, em particular, demonstra ter uma grande relevância uma vez que apresenta um grande número de parâmetros (fatores de controlo) com influência direta no controlo da porosidade. Assim, consideraram-se os seguintes parâmetros:

### **1. Sequência de Carregamento do Forno**

A sequência de carregamento das matérias-primas é muito importante para assegurar a produção de fundidos de qualidade e uma maior estabilidade ao longo da etapa de fusão. Para isso, e tal como se mencionou no capítulo 2.5, é necessário prestar muita atenção ao potencial de formação de óxidos por parte de cada elemento, que integra a composição química do banho, ao longo da fusão e posterior vazamento. Devido a este facto, existem elementos presentes no banho metálico que são de extrema importância garantir que permanecem em solução até ao final do processo, reagindo o mínimo possível. Um complemento importante para esta parte é, sem dúvida, o diagrama de *Ellingham*. Consoante os elementos adicionados ao banho, bem como a energia livre de *Gibbs* associada à formação dos seus óxidos, é possível hierarquizar os elementos consoante a sua reatividade, ganhando por isso uma melhor perspectiva da sequência de carregamento ideal do forno. Este é sem dúvida um dos parâmetros com maior importância uma vez que, ao longo de toda a produção de microfuso na ZCP, este nunca teria sido melhorado ou revisto, abrindo espaço para novas opções de trabalho.

### **2. Desoxigenação do Banho**

A desoxigenação do banho é uma prática complementar de uma boa sequência de carregamento do forno. Tal como foi dito no ponto anterior, consoante a sequência adotada e sabendo que existem vários elementos cruciais para garantir uma boa estabilidade do banho, bem como uma baixa reatividade do mesmo, é importante conhecer os pontos chave/quantidades de desoxigenante a utilizar de forma a garantir que o banho tem sempre o elemento capaz de se “sacrificar” previamente aos elementos que são mais importantes manter até à solidificação do aço.

### **3. Fluidez do Banho**

Uma das formas de melhorar esta característica do banho metálico, como indicado pela bibliografia, é o teor de silício na liga. Assim, é necessário ter em conta dois fatores: primeiramente, qual o intervalo aceitável de composição química especificado pelo cliente, de forma a conseguir variar e otimizar o teor de silício no banho metálico; em segundo lugar, estudar qual a melhor forma de garantir que não ocorre o desvanecimento deste elemento até ao final do vazamento. Tal como apresentado na Tabela 3, o teor de silício desta liga varia entre 0,9 e 1,2%; no entanto, o *target* deste elemento estabelecido pela empresa para esta liga, aponta para um valor de 1,22%, fora dos valores especificados. Isto deve-se a dois principais motivos: em primeiro lugar, a fluidez e

capacidade de enchimento da liga que variam proporcionalmente com o teor de silício; uma vez que esta peça apresenta pequenas dimensões e secções finas, este fator é relevante para o correto enchimento da mesma. Em segundo lugar, verifica-se que, para se atingirem de forma regular teores de silício na gama desejada, é necessário definir um *target* de cálculo para este elemento superior ao máximo admissível para a liga uma vez que o silício sofre desvanecimento ao longo da fusão. Assim, esta medida garante com elevada confiança que o valor final de silício obtido nas peças se encontra perto do limite máximo da gama desejada. No entanto, podem surgir raras exceções em que o limite máximo é ultrapassado sendo que este incremento, desde que não seja excessivamente elevado, não coloca em causa a aceitação dos componentes pelo cliente.

Outras duas possíveis formas de potenciar o enchimento da moldação são: aumentar a temperatura de pré-aquecimento da carapaça cerâmica e/ou aumentar a temperatura do vazamento da liga, que irão ser revistas nos próximos parâmetros de estudo.

#### 4. Limpeza do forno



Figura 21 - Limpeza do forno de fusão.

A limpeza do forno (Figura 21) é um fator preponderante para obter bons resultados na elaboração de uma liga. Muitas vezes, e devido ao facto da ZCP produzir bastantes ligas com composição diferente, é necessário planejar semanalmente a sequência de ligas a produzir, evitando que, por exemplo, duas ligas sequenciais tenham composições muito diferentes, o que iria contaminar a produção da liga produzida em segundo lugar. Fora o planeamento, e de forma a garantir que o refratário tenha uma maior vida útil, existe um conjunto de práticas que serão importantes controlar para garantir que são feitas da melhor forma. A limpeza periódica do forno evita uma grande acumulação de escória nas suas paredes, minimizando a perda de capacidade de fusão do equipamento. Ao mesmo tempo, a quantidade de desprendimentos de escória durante a fusão é reduzida, minimizando a probabilidade de incorporação de inclusões não metálicas no fundido [6, 20, 21].

#### 5. Proteção Gasosa

Outro parâmetro preponderante, tal como abordado no Capítulo 2.3, é o impacto da utilização de uma atmosfera inerte (Figura 22) para garantir um banho metálico limpo e reduzir a interação entre o metal fundido e os gases presentes na atmosfera envolvente, durante a fusão. Esta exposição e a consequente interação do banho metálico com o oxigénio são questões de extrema importância uma vez que podem aumentar os custos de produção e diminuir a qualidade dos produtos. Segundo um estudo realizado por Sorda [31], a eficiência desta técnica garante uma diminuição significativa dos custos totais de operação através do abaixamento da taxa de refugo em 25% (devido à diminuição

de defeitos como “mal-cheio” e inclusões) e da recuperação das peças finais em 25%. Devido à problemática e impacto do defeito crítico no microfuso em produção, este será um parâmetro constante em todas as produções.



*Figura 22 Montagem para aplicação de um “manto” de argon líquido na superfície do banho metálico durante a sua fusão.*

## 6. Temperatura do Banho

O aumento da temperatura de trabalho, para além de aumentar a capacidade de enchimento do metal na cavidade moldante e permitir uma melhor dissolução dos elementos adicionados ao banho, também traz bastantes inconvenientes, com destaque para o aumento da sua reatividade. Com a subida da temperatura, este está sujeito a uma maior absorção de oxigénio e muitas vezes necessita que se tomem medidas extras para evitar a sua oxidação. A principal ação a tomar, neste caso, passa por garantir que as temperaturas se encontrem perto da temperatura de vazamento para evitar ao máximo esse aumento de reatividade, garantindo igualmente uma capacidade de enchimento elevada. Através do recurso a um termopar, é possível obter a temperatura do banho (Figura 23).



*Figura 23 - Medição da temperatura do banho com um termopar.*

## 7. Prática de Vazamento

A fusão de uma liga metálica e o seu posterior vazamento (Figura 24) para o cacho cerâmico, embora interdependentes, são duas etapas distintas. Ambas podem ser determinantes para a sanidade das peças finais. Desta forma, as boas práticas de processamento do metal no estado líquido em ambas as etapas devem ser controladas ao máximo. Durante o vazamento da liga propriamente dito, e tendo em conta o defeito crítico do microfuso, destacam-se três variáveis a controlar:

### *i. Temperatura de vazamento*

Tal como abordado ao longo da revisão bibliográfica, a viscosidade do metal aumenta à medida que este arrefece. Assim, é importante que as zonas críticas sejam as primeiras a serem cheias. Além disso, é também importante que os gases sejam capazes de escapar através da carapaça de forma a não originar contrapressões, no seu interior, que pudessem comprometer o seu completo enchimento. Desta forma, e como é perceptível, a temperatura e velocidade de vazamento do metal estão diretamente relacionados com o defeito crítico em estudo. A influência da temperatura de vazamento encontra-se bem documentada na literatura, existindo uma relação linear com a fluidez em grande parte dos casos. Num estudo realizado por Raza [30], a temperatura de vazamento é o parâmetro mais influente sobre a capacidade de enchimento uma vez que uma temperatura mais elevada retarda o processo de solidificação, assegurando assim um bom enchimento da carapaça cerâmica pelo banho metálico durante um período mais longo, com preenchimento das suas secções de menor espessura. Contudo, um aumento da temperatura de vazamento pode ter efeitos adversos, ao nível do aumento da reatividade do banho metálico e da microestrutura (por exemplo, crescimento do tamanho de grão). As temperaturas adotadas pela ZCP para a produção do microfuso situam-se na gama 1650-1670°C. Ao longo de toda a produção desde 2017, abarcando os melhores e os piores resultados, a temperatura de vazamento nunca foi alterada, não sendo por isso um ponto vital a modificar neste momento. Assim, neste parâmetro é impreterível garantir junto do forneiro que, fora destes limites, o vazamento não pode ser realizado.

### *ii. Velocidade de vazamento*

Outro parâmetro que está relacionado com a capacidade de enchimento do metal nos canais de distribuição e nas peças é o caudal de vazamento. No entanto, em zonas finas, e com o aumento da tensão superficial do metal, a velocidade diminui, dificultando assim o enchimento da cavidade. É normal assumir que as zonas mais finas duma peça devem ser preenchidas de forma rápida. Contudo, se o enchimento for demasiado rápido, existe a probabilidade de ser turbulento, daí resultando defeitos como, por exemplo, porosidade [31]. É necessário por isso implementar um método de vazamento suave como critério homogéneo, evitando ao máximo discrepâncias entre vazadores. Este é um parâmetro do processo manual muito dependente do operador.

iii. Altura de Vazamento

A altura de vazamento (distância entre a bica da colher e a bacia de vazamento) é diretamente proporcional à velocidade de enchimento e, de forma a garantir que o vazamento seja menos turbulento, este deve ser realizado junto à bacia de enchimento.



*Figura 24 - Vazamento para carapaças cerâmicas utilizadas na produção do microfuso.*

## **8. Matérias-Primas/Retornos**

Em todas as produções são utilizadas no pé de banho uma dada fração quer de retornos, quer de matérias-primas virgens. Muitas vezes, devido à reutilização dos retornos (visando uma redução de custos e reaproveitamento do material) estes acabam por ficar saturados de óxidos. Este problema pode ser resolvido alterando o rácio de matéria-prima nova/retornos; desta forma, será possível perceber se a diminuição ou aumento da quantidade de retornos faz ou não variar os resultados qualitativos do caso em estudo.

### **Outros Parâmetros**

Após estudar a influência de todos esses parâmetros sobre a fusão e garantindo que estes estão otimizados, existem, de entre outros fatores, três com especial importância uma vez que podem estar diretamente relacionados com o aparecimento do defeito em estudo. Estes são:

#### **1. Sinterização da Carapaça Cerâmica**

A fluidez depende do fluxo de calor do metal para a carapaça; assim, um aumento da temperatura da carapaça cerâmica tal como da de vazamento será benéfico para promover o bom enchimento da cavidade moldante. Vários estudos revelam a existência de uma relação linear entre este parâmetro e a fluidez do metal, que pode ser explicada pela pequena diferença entre a temperatura do metal e da carapaça cerâmica, com o consequente atraso do arrefecimento. No entanto, durante o processo de sinterização,

verifica-se a densificação (redução de poros) da carapaça cerâmica, diminuindo, conseqüentemente, a permeabilidade da moldação.

Desde o início da produção deste componente, e de forma a garantir o enchimento total das cavidades moldantes, as carapaças cerâmicas são pré-aquecidas a 1100°C. Assim, é crucial garantir que esta temperatura é mantida ao longo de toda a produção.

## **2. Espessura e Permeabilidade da Carapaça Cerâmica**

A carapaça cerâmica necessita de cumprir determinados requisitos, nomeadamente, apresentar resistência mecânica em verde suficiente para suportar a descerificação sem fissurar, resistência mecânica (após sinterização) para superar a pressão metalostática, resistência ao choque térmico para prevenir rebentamentos durante o vazamento, elevada refratariedade e baixa reatividade com o metal. A carapaça deve ainda possuir uma elevada permeabilidade de forma a facilitar o seu enchimento e uma condutividade térmica adequada ao arrefecimento do metal [54-57]. A influência da espessura da carapaça sobre o tempo de solidificação da liga foi estabelecida pela expressão:

$$t = C \times (V/S_{(área)})^2 \quad (5)$$

em que  $t$  representa o tempo de solidificação (em segundos),  $V$  o volume de metal (em  $\text{mm}^3$ ),  $S_{(área)}$  a área da superfície do metal (em  $\text{mm}^2$ ) e  $C$  uma constante (em  $\text{s/mm}^2$ ) dependente do material da moldação, das propriedades do metal e da temperatura de vazamento. À medida que a espessura das paredes da carapaça aumenta, o rácio  $V/S_{(área)}$  também aumenta, ou seja, verifica-se um atraso na solidificação da liga devido a uma menor absorção de calor pela carapaça cerâmica, o que ajuda a manter um gradiente térmico entre o metal e o material cerâmico durante um maior intervalo de tempo. Assim, a espessura da carapaça determina a capacidade que a moldação tem de absorver calor. Esta é crítica no caso de geometrias com detalhes finos e complexos, uma vez que afeta o coeficiente de transferência de calor do metal adjacente às paredes da carapaça e, por sua vez, a sua capacidade de escoamento [54-57].

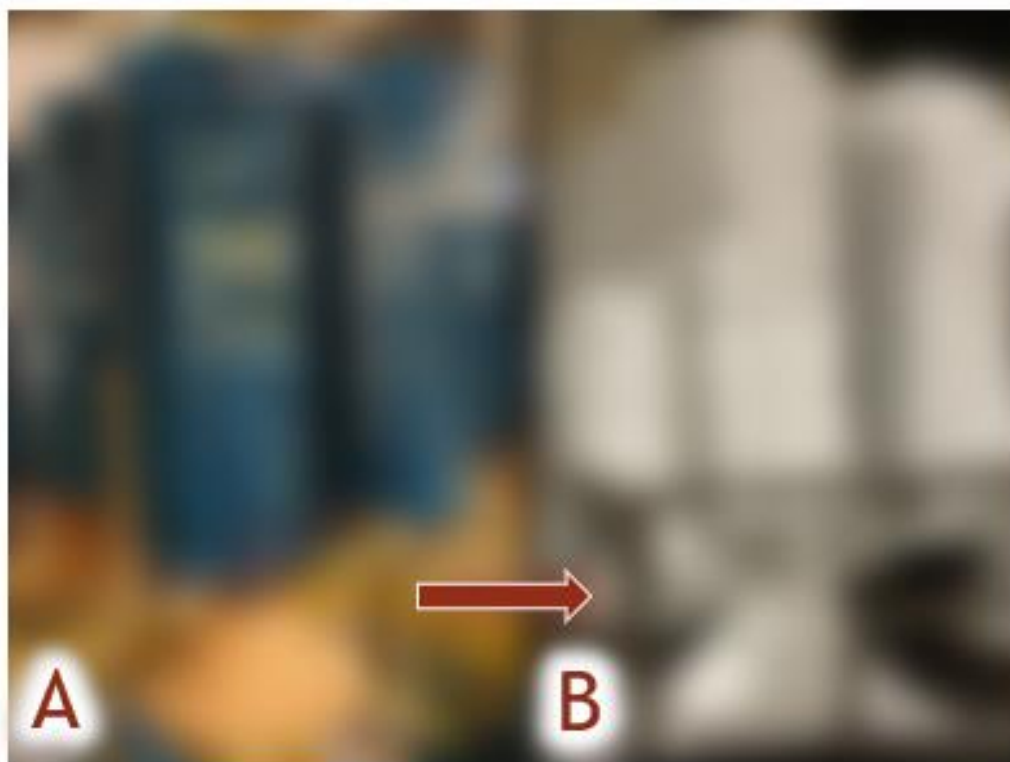
A permeabilidade da carapaça pode ser entendida como uma medida da resistência à saída dos gases presentes/gerados no interior da carapaça durante o seu enchimento pelo metal. A obtenção de componentes com geometrias complexas, paredes finas e detalhes superficiais depende, para uma dada temperatura do metal e da carapaça cerâmica, da sua permeabilidade. Se a parede for demasiado permeável, a sua resistência e estabilidade dimensional poderão ser sacrificadas; porém, a baixa permeabilidade pode originar defeitos, tais como porosidade [54-57]. Desta forma, é importante perceber quais as potenciais mudanças suscetíveis de ocorrer nas propriedades da carapaça cerâmica (principalmente relacionadas com a espessura e permeabilidade, pois são determinantes para o escape de gases) com vista a entender qual o impacto destas alterações no desenvolvimento do defeito crítico do microfuso.

A grande limitação desta análise passa pelo processo de produção e controlo da composição química das carapaças cerâmicas uma vez que, na empresa, todas as carapaças produzidas, independentemente da liga ou referência, têm propriedades

idênticas, não sendo possível quantificar de que forma pequenas alterações podem ou não influenciar o defeito em estudo.

### 3. Projeto do Sistema de Gitagem

Numa fase inicial, todas as empresas desenvolvem estudos visando o projeto e otimização do sistema de gitagem para uma determinada peça. O projeto de gitagem pode ter influência direta nos resultados; no entanto, neste caso, como não foi identificada nenhuma variação, considera-se este parâmetro como um fator constante na produção do microfuso. Na Figura 25 é possível observar o *design* final do sistema de gitagem em cera utilizado (Figura 25 - A) e o respetivo revestimento cerâmico (Figura 25 - B).



**Figura 25** - A - Módulo em cera do sistema de gitagem do microfuso; B - Cacho cerâmico do componente em estudo.

## 5. Procedimento Experimental

### 5.1. Principais Variáveis em Estudo

De entre todos os parâmetros selecionados, há que destacar dois tipos de fatores de controlo/variáveis para análise:

- Os **parâmetros de controlo**, dos quais se destacam as boas práticas de limpeza do forno, o balanço de materiais das cargas dos fornos e o controlo do rendimento de adição dos elementos ao banho metálico, garantindo que este apresente uma maior fluidez, e a utilização de proteção gasosa. O controle e monitorização da temperatura, tanto do banho como de vazamento, o acerto da técnica de vazamento utilizada (regulando a altura e velocidade do vazamento entre operadores) e a temperatura de sinterização da carapaça cerâmica são igualmente fatores a controlar. Nestes casos, a principal análise passa por garantir que os critérios descritos são cumpridos para que, em caso de problema, não se realize o vazamento em causa, garantindo a uniformização do processo através do cumprimento destes parâmetros deduzidos a partir de uma profunda e minuciosa pesquisa bibliográfica, garantindo a redução do número de variáveis.
- As **variáveis de otimização**, sendo que estas passam pelos principais pontos onde há possibilidade de melhorar o processo, otimizando a sequência de carregamento do forno, a desoxigenação do banho e a análise do estado de oxidação dos retornos utilizados. Tudo isto sem abordar possíveis alterações noutras etapas prévias do processo.

### 5.2. Metodologia e Realização de Ensaios

Para iniciar o trabalho, é importante ter uma sequência lógica para abordar o problema, permitindo quantificar as variáveis em estudo, perceber em que estado se encontra o encadeamento do processo desenvolvido pela empresa e só posteriormente saber onde agir para obter uma melhoria do processo, tendo por base conceitos teóricos.

De todas as ordens de fabrico realizadas pela ZCP, após a elaboração do banho e antes de qualquer vazamento, é retirada uma amostra (medalhão) para posterior análise por espectrometria de emissão de chispa (Figura 26). Esta serve para confirmar se a composição química do banho metálico cumpre as especificações definidas pelo cliente. No caso da composição química alvo não ter sido atingida, esse lote de produção é suspenso e na ordem de fabrico seguinte, para evitar repetições, realiza-se uma pré-análise para ser possível atuar de imediato, impedindo desvios indesejados de composição. Desta forma, o melhor método de abordagem passa por entender qual a sequência de carregamento do forno utilizada pela empresa, retirando várias amostras, no decorrer do processo, após a adição de cada elemento ao banho. Assim, consegue-se ter uma visão geral da forma como a composição química do banho vai variando ao longo de toda a fusão, permitindo atuar sobre os principais pontos críticos. De facto, principalmente com a análise da variação do teor de alumínio do banho é possível avaliar, de uma forma

indireta, a necessidade do banho ser desoxigenado, percebendo os momentos-chave ao longo da adição de matérias-primas.

Desde 2017 que a empresa utilizava a mesma sequência de carregamento do forno para a liga em estudo. Após aplicar esta metodologia e perceber como evolui a composição química do banho ao longo do processo, é possível atuar primeiramente sobre a sequência de carregamento, e posteriormente agir e modificar a desoxigenação que é feita ao banho metálico.



*Figura 26 - Amostras (medalhões) para análise de composição química do metal (A) no espectrómetro (B).*

Através de uma análise em espectrómetro de emissão de chispa, tal como é feita na generalidade para todas as amostras de validação por ordem de fabrico, dos vários medalhões retirados após a adição de cada elemento de carga, é possível obter resultados de forma expedita, podendo agrupar todas as informações numa folha de cálculo. De seguida, a ordem de fabrico que foi vazada é desmoldada, granalhada, e os componentes são cortados para separá-los do sistema de gitagem, e rebarbados. É feita uma amostragem que será analisada com recurso a ensaios não destrutivos (líquidos penetrantes) e, de seguida, todo o lote, é analisado por uma operadora responsável pela inspeção visual do componente. Esta controla peça a peça, separando as peças conformes das não conformes (devido aos mais variados defeitos). Assim, tendo em conta a taxa de refugo é possível quantificar, em termos percentuais, a quantidade de defeitos por lote. No caso da porosidade, esta percentagem é calculada a partir da Equação 6:

$$\% \text{ Porosidade} = \frac{(\text{Número de peças com poros (por ordem de fabrico)})}{(\text{Número de peças inspecionadas (por ordem de fabrico)})} \times 100 \quad (6)$$

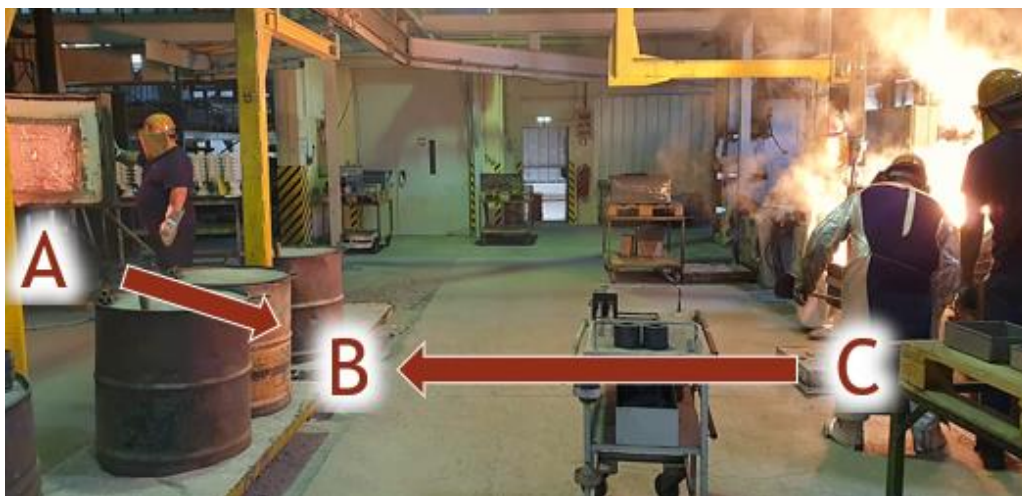
Após ser possível melhorar o processo, o objetivo é averiguar de forma indireta se os retornos utilizados se apresentam com um grau de oxidação excessivo, comprometendo a sanidade do banho metálico. A ZCP tenta, em todas as suas produções, utilizar 65% de retornos com composição química conhecida e 35% de matéria-prima nova. Então, aumentando a fração de matéria-prima nova, é possível fazer a mesma análise e, no caso de se obterem melhores resultados, concluir que os retornos, devido à sua excessiva utilização, se encontram muito oxidados. O objetivo de uma empresa, no que diz respeito à redução do número de gastos, é sempre tentar reutilizar ao máximo os seus retornos uma vez que a matéria-prima virgem apresenta um custo mais elevado. Neste caso específico, devido à utilização de Fe Armco, que apresenta grande afinidade para o

oxigénio, obriga ainda a gastos adicionais no que diz respeito a uma elevada desoxigenação do pé de banho, de forma a estabilizá-lo.

### 5.3. Método de Análise de Resultados

Neste trabalho, podemos dividir o método de análise realizado em dois grupos:

- **Acompanhamento da variação da composição química** do banho ao longo da fusão que, apesar de não ser um indicador direto da obtenção de bons resultados devido ao número de variáveis condicionantes do processo, permite perceber de que forma é que a composição química do banho evolui ao longo desta etapa, entendendo quais os principais pontos críticos na adição de elementos ao banho, possibilitando a obtenção de melhores resultados. Para além disso, é possível estabelecer uma comparação entre a composição química do sistema de gitagem (pós-vazamento) e a das amostras retiradas do forno imediatamente antes do seu vazamento para a colher. Esta análise permite perceber de que forma é que o banho, devido à sua exposição na colher, sem qualquer tipo de proteção gasosa, se comporta, quantificando o abaixamento do rendimento de adição dos elementos de liga. Estas perdas estão relacionadas principalmente com o tempo que o vazador demora no transporte desde o forno (ponto C) até à carapaça cerâmica (que é movimentada entre A e B) onde se realiza o vazamento (no ponto B; Figura 27) e com o aumento da área de exposição do banho no forno, devido ao aumento da inclinação do mesmo ao longo do tempo.



*Figura 27 -Percurso da carapaça cerâmica desde o forno rotativo (A), onde se processa o seu pré-aquecimento, até ao local de vazamento (B), e da colher, desde o forno de fusão (C) até ao local de vazamento.*

- **Análise e comparação de resultados obtidos sobre as peças** após a realização das amostragens, *i.e.*, comparando os resultados entre as peças finais obtidas nos ensaios e as peças obtidas anteriormente à manipulação de variáveis destes ensaios.

Através de ensaios não destrutivos, é possível obter resultados que quantificam o número peças conformes ou não conformes, separando-as de acordo com os defeitos encontrados. Desta forma, consegue-se perceber se houve alterações no defeito crítico ao longo de cada ordem de fabrico, permitindo ter uma análise direta dos ganhos que a ZCP está a obter com esta otimização.

## 6. Contextualização do Problema

Tendo em conta todos os parâmetros/variáveis abordados anteriormente, e sabendo qual o trajeto a seguir ao longo do presente trabalho, é de elevado interesse perceber qual o ponto de situação do processo e dos resultados em termos da qualidade do produto antes de efetuar quaisquer alterações.

### 6.1. Desoxigenação e Sequência de Carregamento do Forno

Tal como referido no Capítulo 5, para a liga em estudo, a produção assenta numa carga constituída basicamente por cerca de 35% de matéria-prima nova e 65% de retornos. Na Figura 28 é possível perceber a sequência de carregamento adotada pela ZCP.

O processo SPAL™ (*Surface Protection Air Liquide*) é responsável pela proteção gasosa do banho, utilizando árgon a temperaturas criogénicas de forma reduzir a interação entre o metal fundido e os gases presentes na atmosfera envolvente. Este encontra-se patenteado pela *Air Liquide* e é referido na Figura 28. Ao longo da sequência imposta pela empresa, foram-se retirando diferentes amostras para tentar avaliar a evolução da composição química do banho metálico, tendo-se registado igualmente o instante em que se procedeu à sua recolha. Todas as amostras estão devidamente numeradas e os resultados dessa análise são apresentados nas Figuras 29 e 30. Ao longo desta análise de composição química, foi dada bastante atenção a cinco elementos base da composição química desta liga. Desta forma, é crucial perceber como é que estes se comportam durante o carregamento de outros elementos no forno.

#### Comportamento do Alumínio

Visto que o alumínio é um elemento com elevado poder desoxigenante, e é adicionado por várias vezes ao longo da elaboração do banho metálico, é possível retirar, através da variação do seu teor, algumas conclusões importantes para este estudo. Regista-se (Figura 29) um abaixamento considerável do teor de alumínio entre as amostras 2 e 3, indiciando que esta última amostra foi recolhida quando o banho se encontrava desprotegido. De realçar que, quando o teor de alumínio se apresenta em valores residuais muito próximos de zero ou do teor inicial da primeira amostra, antes de qualquer adição, considera-se que o banho se encontra desprotegido dado que não existe um elemento de “sacrifício” desoxigenante, potenciando assim a sua dissolução no banho metálico e a sua reação com outros elementos de liga, situações essas perfeitamente indesejadas.

#### Adição de Manganês e Silício

Existem dois caminhos complementares para esta análise. Esta interpretação passa por perceber, de forma indireta, o que acontece ao alumínio após a adição destes elementos, em consonância com o gráfico pormenorizado e representativo da evolução dos teores destes elementos (Figura 30). Estes apresentam uma enorme afinidade para o oxigénio; no entanto, não são adicionados ao banho com esse propósito. O principal intuito da sua adição assenta no facto de estes baixarem o ponto de fusão da liga e, consequentemente, promoverem um aumento da sua fluidez.

| SEQUÊNCIA                             | TEMPO    |
|---------------------------------------|----------|
| 1/6 Retornos + Fe Armco<br>+ Fe Sueco |          |
| 5/6 Retornos                          |          |
| Amostra 1                             | 00:00:00 |
| 0,06% Al                              | 00:03:00 |
| Amostra 2                             | 00:04:00 |
| C + Mb                                | 00:06:00 |
| Amostra 3                             | 00:14:00 |
| FeSi 75                               | 00:16:00 |
| Mn                                    | 00:18:00 |
| Amostra 4                             | 00:20:00 |
| FeCr 70                               | 00:22:00 |
| Amostra 5                             | 00:24:00 |
| 0,02% Al                              | 00:25:00 |
| Amostra 6                             | 00:26:00 |
| FeV 80                                | 00:27:00 |
| Amostra 7                             | 00:30:00 |
| 0,03% Al + 0,04% Fe-Ti                | 00:31:00 |
| Desligar SPAL                         | 00:32:00 |
| Amostra 8                             | 00:34:00 |
| 0,03% Al                              | 00:39:00 |
| Início VAZ.                           | 00:40:00 |
| Amostra 9 (Validação)                 | 00:40:00 |
| Amostra 10                            | 00:42:00 |
| Amostra 11                            | 00:43:00 |
| Amostra 12                            | 00:46:00 |



Figura 28 - Sequência (original) do carregamento do forno de fusão.

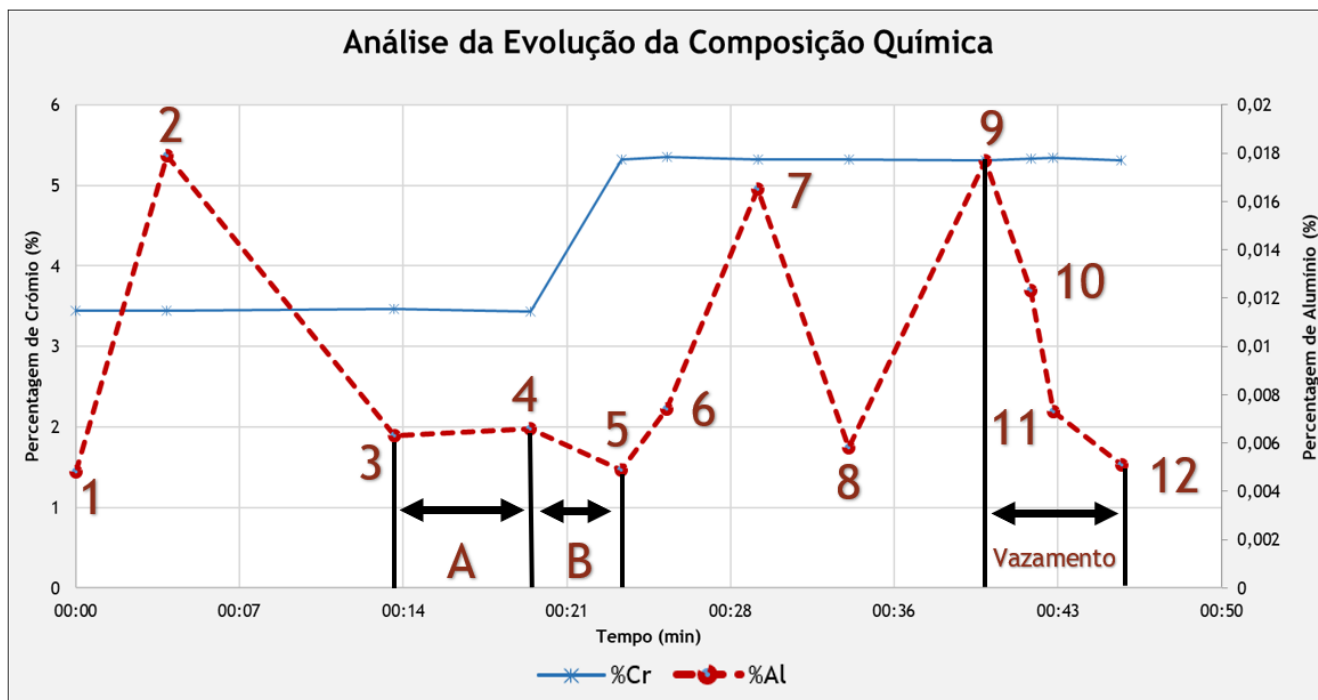


Figura 29 - Análise da evolução dos teores de Alumínio e Crómio do banho metálico ao longo da sequência (original) de carregamento do forno de fusão.

Na Figura 29, e focando no segmento A, é possível perceber que o alumínio se encontra em teores próximos do da amostra 1, o que significa que o banho se encontra desprotegido. Tendo em consideração este facto, e analisando o diagrama de *Ellingham*, é possível concluir que o silício e o manganês serão consumidos por reação de oxidação.

### Adição de Crómio

Na adição de Fe-Cr 70, existe um transporte de oxigénio para o banho. Em simultâneo, é verificado um abaixamento do teor de alumínio. Pode então concluir-se que, nesta fase, o alumínio é consumido pelo oxigénio, aumentando a suscetibilidade do banho à oxidação. O mesmo comportamento é registado para o silício e manganês, conforme se pode observar na Figura 30. De modo a garantir que o banho está permanentemente protegido, com alumínio disponível para reagir com o oxigénio, o teor de alumínio deve manter-se estável e para valores superiores ao da amostra inicial. Só desta forma é possível garantir que o silício e o manganês e outros elementos de liga não serão oxidados, o que não se verifica na zona B.

### Vazamento

Também a partir da análise da Figura 28, é possível verificar que o 32º minuto pode ser considerado como um momento crítico uma vez que corresponde ao instante em que se desliga a proteção gasosa para preparar o vazamento. Nesta altura, o banho metálico fica exposto à atmosfera envolvente pelo que deve encontrar-se devidamente preparado para essa exposição. Como é de esperar, ao longo do vazamento, o teor de Alumínio decresce. Efetivamente, devido à crescente exposição do banho à atmosfera envolvente, resultante do basculamento do forno, a reação de oxidação dos elementos é favorecida.

### Comportamento do Silício, Titânio e Manganês

Na Figura 30 é possível observar a evolução dos teores dos outros três elementos críticos da liga em estudo. Como se pode verificar, o manganês e o silício são consumidos em grande extensão, existindo uma grande diferença entre os teores das amostras 4 e 12. De facto, efetuando uma

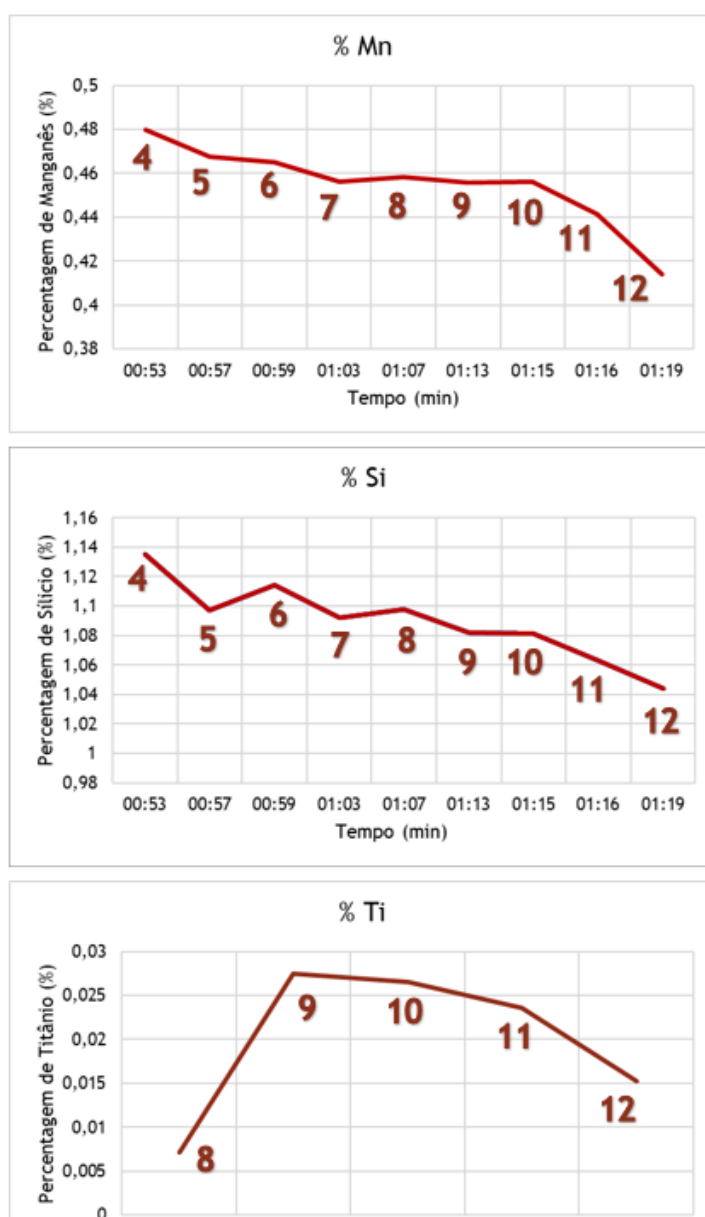


Figura 30 - Evolução dos teores de Mn, Si e Ti no banho metálico após a sua adição.

comparação entre a evolução da composição química do alumínio (Figura 29) e a destes elementos, constata-se que apresentam comportamentos semelhantes, variando apenas a sua afinidade com o oxigénio (tal como indicado pelo diagrama de *Ellingham*). Por exemplo, quando o alumínio é consumido, o decréscimo do seu teor é superior ao do silício, sendo este, por sua vez, superior ao do manganês. Já o titânio é adicionado ao banho anteriormente à sua limpeza final uma vez que apresenta um potencial desoxigenante superior ao do alumínio. A forma como este elemento se comporta permite, indiretamente, perceber se o banho se encontra preparado para o vazamento, *i.e.*, se o banho estiver protegido, o titânio pouco irá reagir, não se registando variação significativa do seu teor, o que não acontece neste caso, tal como é possível visualizar na Figura 30.

## 6.2. Resultados Iniciais

Após a análise de todos os resultados obtidos, sem qualquer alteração do procedimento original utilizado pela ZCP, foi possível retirar várias conclusões:

### Rendimento de Adição dos Elementos de Liga

Após uma análise dos balanços mássicos realizados pela empresa, bem como pelos *targets* estabelecidos, foi possível perceber que os teores de vários elementos apresentavam um desvio percentual considerável relativamente aos *targets* estabelecidos pelo balanço de massas. Na Tabela 4 apresenta-se a variação percentual do teor dos principais elementos de liga usada para a produção do microfuso. Um elemento de extrema importância como o silício, por exemplo, apresentava, em média, quebras percentuais de 12,45%, comprometendo assim seriamente a sanidade interna das peças.

**Tabela 4** - Rendimento de adição de vários elementos representativos da composição química do microfuso (em percentagem).

|                            | C             | Cr            | Mo            | V             | Si            | Mn            |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Target</b>              | 0,425         | 5,300         | 1,200         | 0,400         | 1,220         | 0,490         |
| <b>Valor obtido</b>        | 0,365 ± 0,024 | 5,322 ± 0,005 | 1,183 ± 0,012 | 0,397 ± 0,006 | 1,068 ± 0,021 | 0,442 ± 0,017 |
| <b>Variação percentual</b> | - 14,12       | + 0,42        | - 1,42        | - 0,75        | - 12,45       | - 9,80        |

### Resultados da Inspeção Visual

Nesta fase, e tal como referido na análise da Figura 18, em média, cerca de 10% das peças eram rejeitadas por apresentarem porosidade.

## 7. Resultados e Discussão

Após analisar e compreender o ponto de situação da empresa, e tendo em conta a metodologia descrita anteriormente, é possível definir quais as variáveis de otimização a serem alteradas de forma a garantir o melhoramento do processo.

### 7.1. Sequência de Carregamento do Forno e Desoxigenação do banho

Antes de alterar a sequência de carregamento das matérias-primas no forno de fusão, e tendo por base os dados do diagrama de *Ellingham* e os diferentes elementos de liga a adicionar ao banho, é necessário hierarquizá-los tendo em conta a energia livre de *Gibbs* de formação dos seus óxidos. No Anexo 8 é apresentada uma linha representativa da sequência de carregamento das matérias-primas desta referência. Seguindo esta sequência, e após várias experiências e modificações da quantidade de desoxigenante utilizada, conseguiu-se traçar a sequência de carregamento do forno apresentada na Figura 31. Foram sendo retiradas diversas amostras para avaliar a evolução do teor de cada elemento durante a elaboração da liga. Assim, e após estabilização dos resultados, é possível obter um ponto de comparação desta nova sequência relativamente à original da empresa. Todas as amostras foram devidamente numeradas e o resultado dessa análise é apresentado nas Figuras 32 e 33.

#### Comportamento do Alumínio

O comportamento do alumínio é, neste caso, totalmente diferente do apresentado no procedimento original uma vez que este apresenta uma curva muito mais regular, sem enormes desvios percentuais. De facto, na amostra 1, o alumínio apresenta-se em valores residuais uma vez que, nesta altura, ainda não tinha sido feita qualquer adição desse elemento ao banho. No entanto, a partir desse ponto, com a sua adição ponderada, conseguiu-se garantir um comportamento estável em que o banho se encontrava sempre na presença deste elemento, assegurando a sua proteção ao longo do processo.

#### Adição de Crómio

Entre as amostras 2 e 3, representadas na Figura 32 pela zona A, ocorre a adição de Fe-Cr 70 e de 0,03% de alumínio. Apesar da adição de crómio originar, tal como anteriormente referido, uma incorporação de oxigénio no banho, constata-se que a adição simultânea de Fe-Cr e de Al promove, de certa forma, a sua proteção visto que, tanto no ponto 2 como no ponto 3, o teor de alumínio mantém-se praticamente inalterado.

#### Adição de Manganês e Silício

Entre as amostras 3 e 4, procedeu-se à adição de manganês, silício e alumínio. O aumento do teor de alumínio garante que, caso ocorra algum tipo de reação, este se “sacrifique” em vez do manganês e do silício.

| SEQUÊNCIA                           | TEMPO    |
|-------------------------------------|----------|
| 30% Gitos                           |          |
| 0,06% Al                            |          |
| Fe Armco                            |          |
| 0,06% Al                            |          |
| EFP-14                              |          |
| Amostra 1                           | 00:00:00 |
| 0,06% Al + C + Mo                   | 00:03:00 |
| Amostra 2                           | 00:04:00 |
| 0,03% Al                            | 00:05:00 |
| FeCr 70                             | 00:06:00 |
| Amostra 3                           | 00:07:00 |
| 0,06% Al                            | 00:08:00 |
| FeV 80 + Mn + FeSi 75               | 00:09:00 |
| Amostra 4                           | 00:10:00 |
| 0,03% Al + 0,04% Fe-Ti              | 00:11:00 |
| Desligar SPAL +<br>Limpeza do Forno | 00:12:00 |
| Amostra 5 (Validação)               | 00:17:00 |
| 0,03% Al                            | 00:18:00 |
| Amostra 6                           | 00:19:00 |
| 0,01% Al                            | 00:20:00 |
| Amostra 7                           | 00:21:00 |
| 0,01% Al                            | 00:22:00 |
| Amostra 8                           | 00:23:00 |



Figura 31 - Nova sequência de carregamento do forno de fusão.

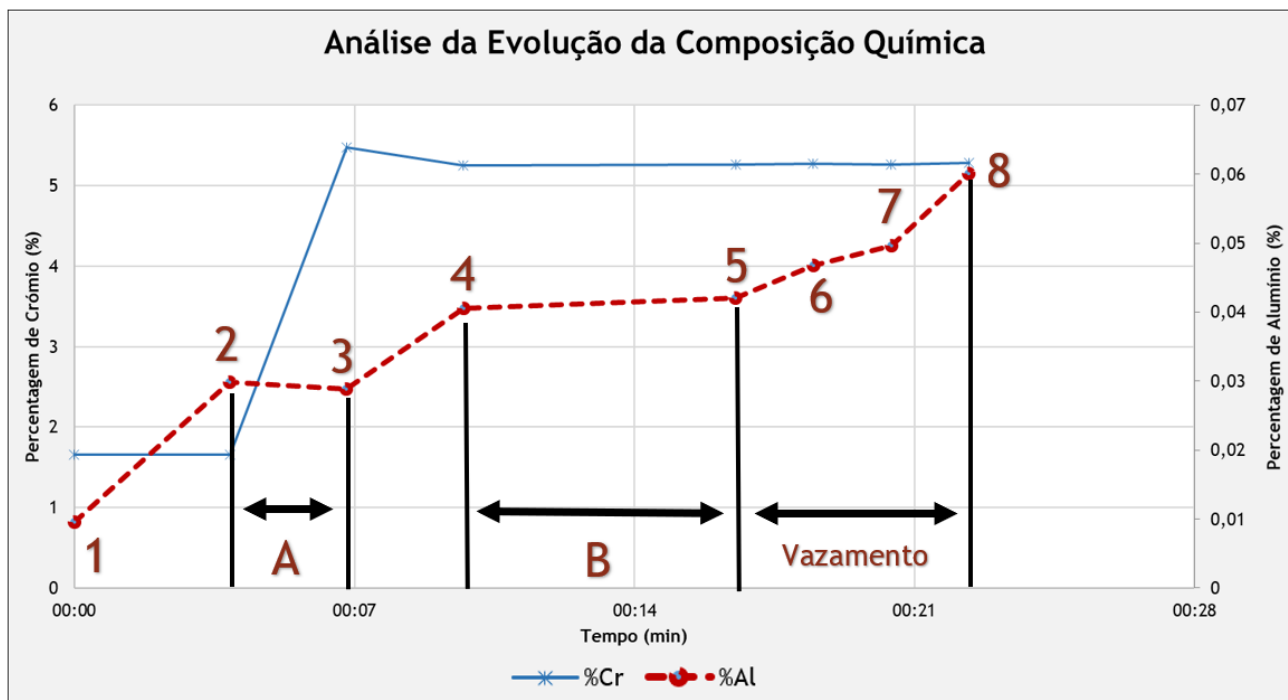


Figura 32 - Evolução dos teores de Alumínio e Crómio do banho metálico ao longo da nova sequência de carregamento do forno de fusão.

## Vazamento

O minuto 12 é um momento de alto risco para o banho metálico uma vez que se desliga a proteção gasosa para se iniciar o vazamento. Tal como referido anteriormente, nesta altura, o banho fica exposto ao ar pelo que deve encontrar-se devidamente “preparado” para fazer frente a essa exposição. Para tal, ao longo da sequência de carregamento e tendo em conta o grau de inclinação do forno (de forma a evitar a formação de inclusões de grande dimensão), foi-se doseando a quantidade de alumínio adicionada ao banho, garantindo uma evolução mais suave do seu teor (secção de vazamento representada na figura 32) de modo a proteger o banho metálico.

## Comportamento do Si, Ti e Mn

Na Figura 33 é possível observar pormenorizadamente o comportamento dos três elementos críticos para a liga ensaiada: silício, manganês e titânio.

Como é possível observar, o manganês e o silício apresentam um elevado rendimento de adição pois, apesar de serem parcialmente consumidos, a diferença entre os teores iniciais e finais é bastante reduzida. Por sua vez, o comportamento do titânio mantém-se praticamente constante ao longo do tempo o que, indiretamente, permite afirmar que o banho metálico se encontrava protegido aquando da sua adição durante a limpeza do forno.

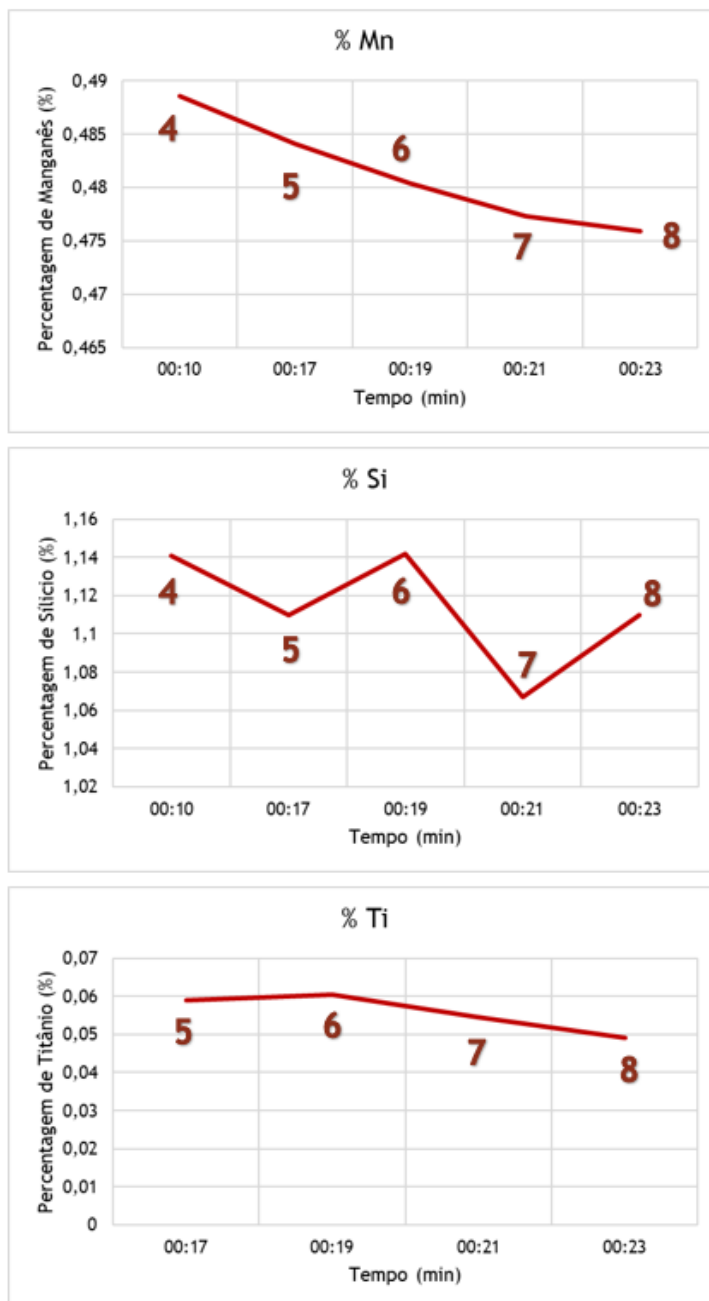


Figura 33 - Evolução dos teores de Mn, Si e Ti no banho metálico após a sua adição.

## 7.2. Resultados Obtidos

Da análise de todos os resultados obtidos, após alteração do procedimento de carregamento do forno, foi possível retirar várias conclusões:

### Rendimento de Adição dos Elementos de Liga

Nos ensaios realizados, os desvios percentuais do teor de cada elemento relativamente aos *targets* obtidos a partir do balanço mássico, diminuíram consideravelmente. Por exemplo, no caso do silício, este passou a ter uma média de

quebras percentuais de cerca de 3,69%, melhorando com este procedimento o seu rendimento em cerca de 70%. Mais à frente, e após todas as alterações realizadas no âmbito do processo, será apresentado mais pormenorizadamente o comportamento de alguns dos elementos com maior importância na produção desta liga.

### Resultados de Inspeção Visual

Através desta otimização, em média, apenas  $5,65\% \pm 0,03$  das peças passaram a ser rejeitadas devido à presença de porosidade.

### 7.3. Comparação da Composição Química do Banho e dos Retornos

Desoxigenar o banho metálico após a escorificação e a última limpeza do banho é sempre de risco elevado uma vez que o alumínio, ao reagir com o oxigénio do banho, pode originar a formação de inclusões que nunca mais serão decantadas durante o vazamento. Acresce ainda que, ao longo desta etapa, o forno vai sendo inclinado cada vez mais, potenciando a formação de inclusões cada vez maiores. Assim sendo, é necessário gerir muito bem o *timing* de adição e a quantidade de alumínio a introduzir no forno.

Relativamente ao *timing* de adição (ver Figura 15), é possível definir até que ângulo de basculamento é seguro introduzir alumínio no forno. Quanto à quantidade a adicionar, realizaram-se vários ensaios até alcançar o doseamento ideal. Estes ensaios passaram pela recolha de amostras do banho metálico e do sistema de gitagem do primeiro cacho vazado. De referir que, ao longo de cada vazamento desta referência, são utilizados quatro carros, transportando cada um três carapaças cerâmicas, ou seja, cada lote compreende doze carapaças. Como as últimas quatro amostras eram retiradas no início do vazamento de cada carro (representado por A na Figura 34), retirando uma amostra da gitagem do cacho 1 (Figura 34), era possível quantificar a perda de alumínio no percurso da colher desde o forno até à zona de vazamento.

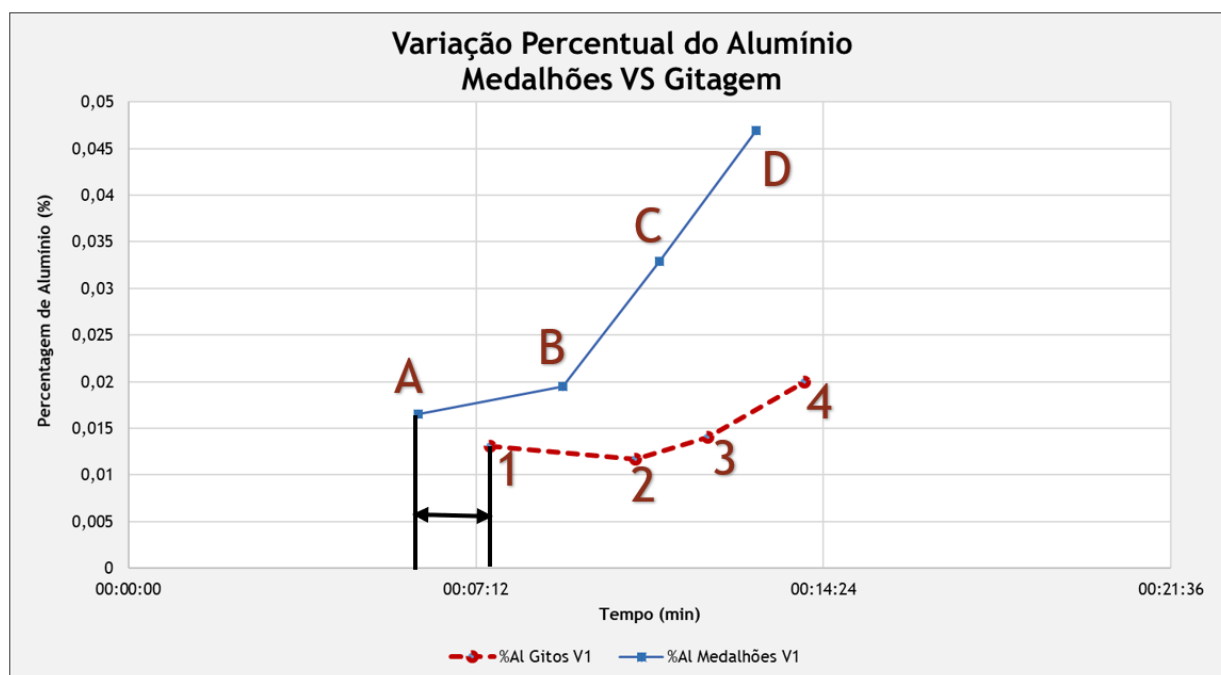


**Figura 34** - Transporte das carapaças cerâmicas após vazamento do forno: A- Carro de transporte; 1, 2 e 3 - Carapaças cerâmicas com respetiva tampa de proteção da atmosfera.

As Figuras 35, 36 e 37 representam a variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno e do sistema de gitagem. Como seria de prever, observa-se uma perda de alumínio, resultante da sua oxidação, entre as amostras retiradas

do forno e do sistema de gitagem do cacho vazado. Na Figura 35, está devidamente identificado o intervalo de tempo entre o vazamento do metal do forno e o enchimento das carapaças cerâmicas. Será possível estimar a quantidade de alumínio que se perdeu durante esse período comparando, por exemplo, os valores relativos ao ponto A e ao ponto 1. Essa perda tende a aumentar com a duração desta etapa devido ao aumento da inclinação (ângulo crítico) do forno.

Nos primeiros ensaios realizados, a quantidade de alumínio introduzida no banho aumentou exponencialmente com o tempo de vazamento (Figura 35). Este tipo de comportamento não é desejado porque pode potenciar, ao mesmo tempo, um aumento do número de inclusões.

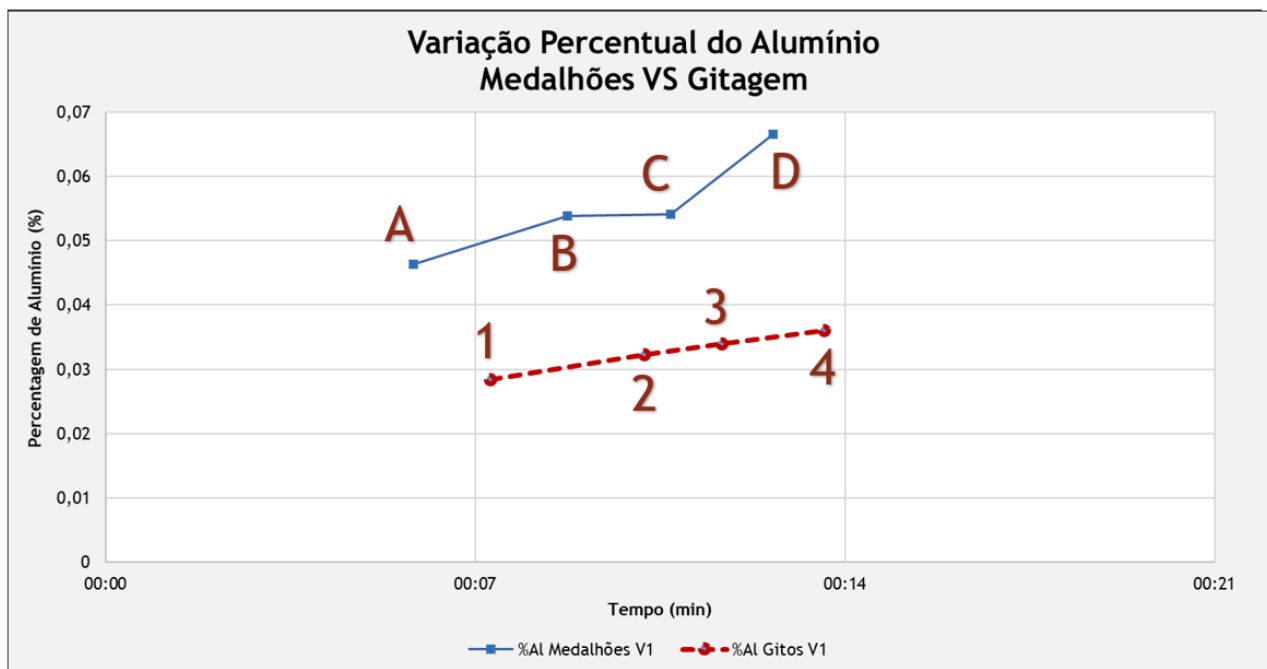


**Figura 35** - Variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno (traço contínuo a azul) e do sistema de gitagem (tracejado a vermelho).

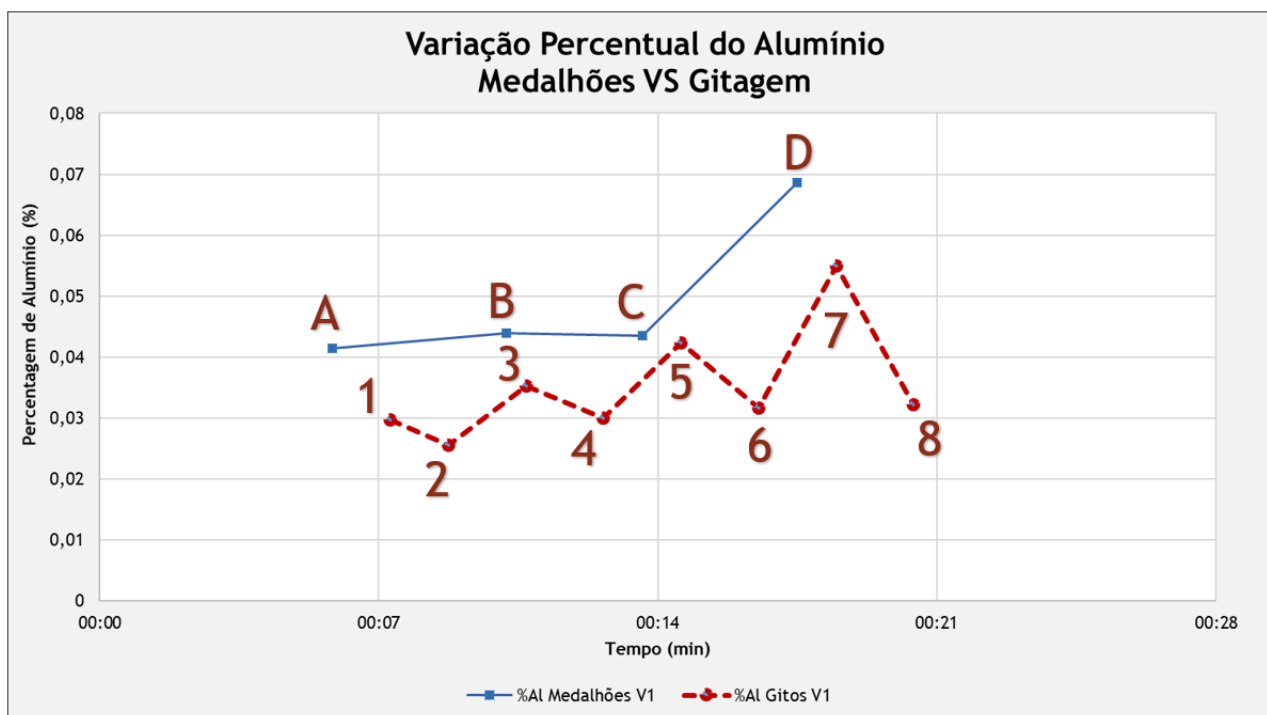
Após vários ensaios, foi possível alcançar os resultados desejados. Como se pode visualizar na Figura 36, entre as amostras 1 e 4, o teor de alumínio aumenta de uma forma mais suave, o que significa que as adições efetuadas eram suficientes para contrabalançar as eventuais perdas associadas ao processo.

Outro fator a considerar é que, nestas duas figuras, só se tem em conta o primeiro cacho de cada carro. Decidiu-se então retirar uma nova amostra por carro, antes do vazamento do último cacho e de se efetuar uma nova desoxigenação, de forma a perceber o comportamento do alumínio ao longo do vazamento. Tal como se pode observar na Figura 37, ao unir todos os números ímpares, obtém-se, tal como seria de esperar, uma reta bastante semelhante à da Figura 36 uma vez que esses pontos são relativos às amostras recolhidas no sistema de gitagem do primeiro cacho de cada carro. Ao longo do vazamento, e antes de se voltar a desoxigenar o banho metálico do forno no início de um novo carro, devido à exposição do banho metálico ao ar, o alumínio vai-se desvanecendo, obtendo-se assim teores inferiores aos iniciais. O importante a retirar da Figura 37 é que,

ao traçar um segmento de reta unindo todos os números pares, o comportamento continua a ser o mesmo, *i.e.*, retilíneo e em crescendo.



**Figura 36** - Variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno (traço contínuo a azul) e do sistema de gitagem (tracejado a vermelho).



**Figura 37** - Variação, ao longo do tempo, do teor de alumínio nas amostras recolhidas do forno (traço contínuo a azul) e do sistema de gitagem (tracejado a vermelho).

## 7.4. Modificação de Outros Variáveis

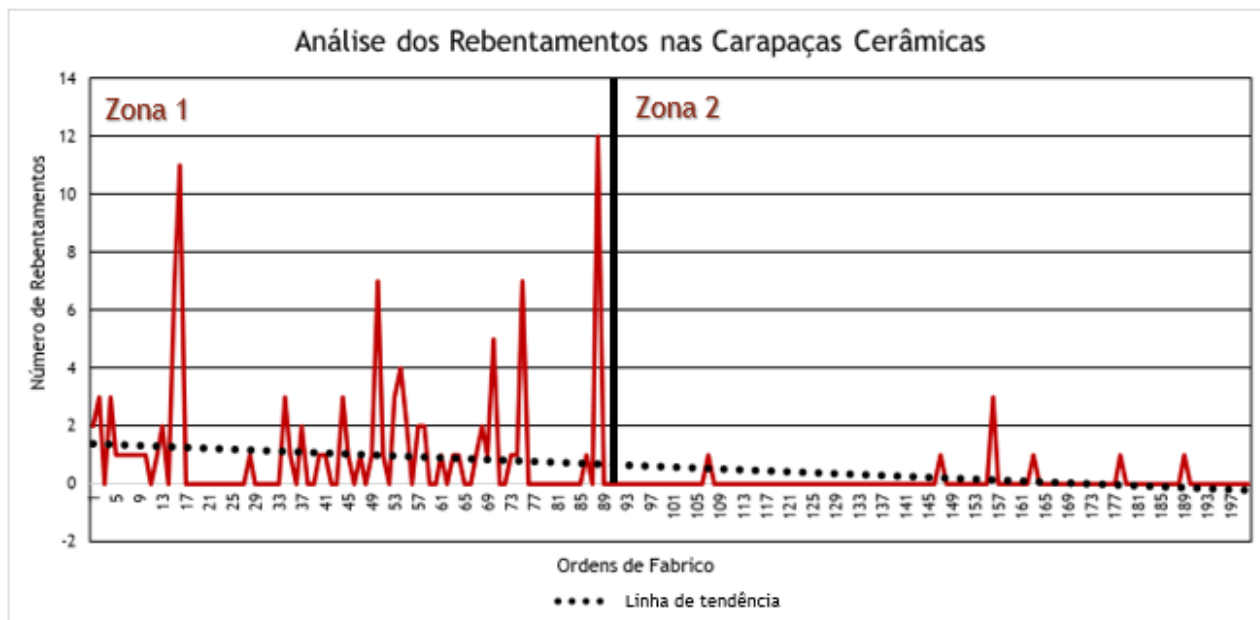
Para além da sequência de carregamento do forno e da desoxigenação utilizada no processo, alteraram-se mais três grandes variáveis antes de se obter os resultados finais.

Em primeiro lugar, e de forma a qualificar o nível de limpeza dos retornos utilizados, tentou-se alterar o rácio matéria-prima nova/retornos utilizados. Para isso, e após otimizar todas as variáveis anteriores, realizaram-se várias amostragens para verificar se os resultados mudavam. Estas amostragens tiveram como base dois ensaios distintos: um com 100% de matéria-prima nova e outro com 30% de retornos e 70% de matéria-prima virgem. Com a otimização e ajuste da desoxigenação, em ambos os casos, os resultados mantiveram-se dentro da mesma gama de valores. Assim, de uma forma indireta, consegue-se inferir que os retornos, nesta fase, ainda não se encontravam muito oxidados.

O segundo passo passou por uma ação coletiva entre setores. Relembrando o gráfico da Figura 18, existem três estágios diferentes na evolução do defeito ao longo da produção deste componente. Após a passagem da zona A para a B, e com o aumento significativo da porosidade gasosa nas peças, os critérios de avaliação deste defeito aumentaram o seu grau de exigência, ultrapassando em grande escala o nível exigido pelo cliente. Ou seja, estima-se que o aumento do número de peças não conformes ocorrido entre as zonas B e C se deu devido a este facto. Efetivamente, houve uma otimização do processo, com uma redução da porosidade por lote de fabrico; no entanto, os critérios de avaliação utilizados eram demasiado apertados relativamente à exigência do cliente. Após reunião com o Setor da Qualidade, definiu-se o critério base a seguir por todos os operadores responsáveis pela inspeção visual desta referência, visando uma maior uniformização. Assim, e após novas amostragens, obtiveram-se ainda melhores resultados, com aceitação por parte do cliente, passando os valores de refugo, devido a porosidade, de  $5,65\% \pm 0,03$  para uma média de  $1,480\% \pm 0,001$ .

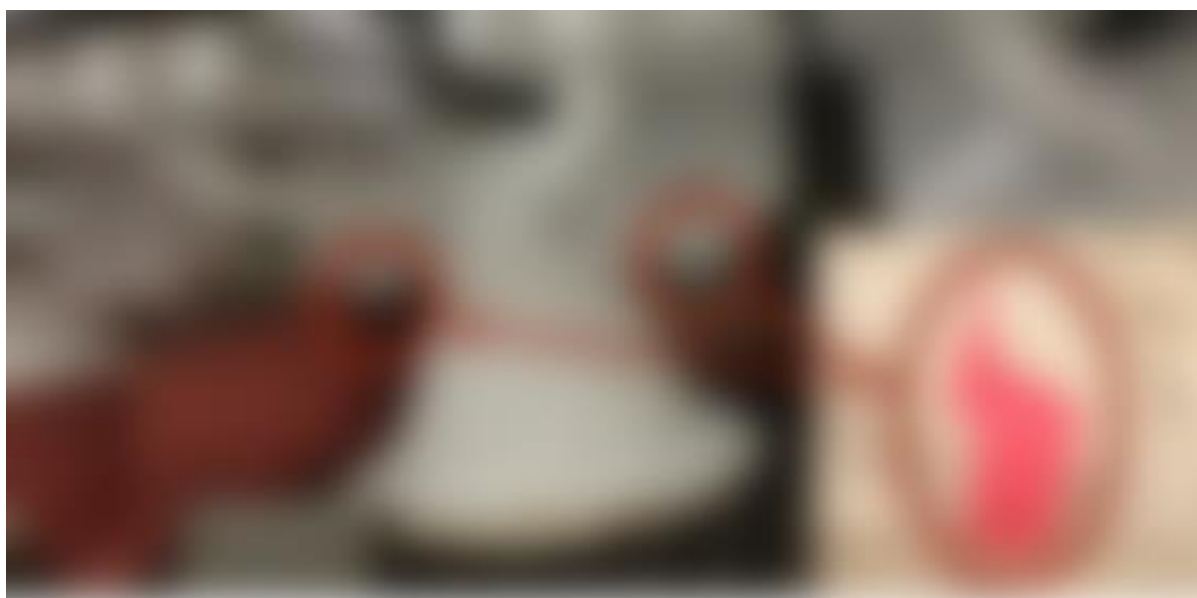
Após esta análise, resta tentar identificar a causa que deu origem ao primeiro degrau de evolução do defeito na produção, que despoletou este estudo (Figura 18, da zona A para B). Tal como se analisou no Capítulo 4, para além de todos os fatores e parâmetros associados ao setor de fusão e determinantes para o aparecimento deste defeito crítico, existem fatores externos que podem contribuir para o aparecimento de porosidade nas peças. Atendendo a que, no âmbito da fusão, todos os parâmetros foram controlados e todas as variáveis otimizadas, restava analisar o historial em termos de permeabilidade e espessura da carapaça cerâmica utilizada desde a primeira produção deste componente automóvel. O grande entrave desta análise passava pelo facto de todas as carapaças cerâmicas produzidas na ZCP terem a mesma constituição. Desta forma, era possível observar que havia uma variação significativa de permeabilidade e espessura de algumas carapaças produzidas; no entanto, não se conseguia fazer associação direta ao lote de produção, à liga e peça em causa. Então, foi realizada uma tentativa para encontrar uma variável que fosse capaz de prever indiretamente se alguma mudança na carapaça era significativa para esta liga. De facto, perto da 89ª ordem de fabrico, e coincidente com a primeira mudança de patamar da Figura 18, existe uma diminuição

brusca no número de rebentamentos das carapaças cerâmicas que ocorreram na produção do microfuso (Figura 38). Efetivamente, existe uma linha de tendência negativa e os rebentamentos que anteriormente ocorriam de forma rotineira passaram a ocorrer de forma esporádica.



*Figura 38 - Análise dos rebentamentos de carapaças cerâmicas.*

Apesar desta análise não ser conclusiva, pode ser um ponto de partida para entender se alguma alteração na carapaça assegura a obtenção de melhores resultados. Voltar à estrutura de cacho anterior não seria uma solução interessante uma vez que a taxa de rebentamentos precedente originava, da mesma forma, um enorme refugo. Então, procedeu-se à inserção de respiros no topo do sistema de gitagem (Figura 39). Assim, uma vez que se promoveu uma boa desoxigenação do banho, era possível garantir que, mesmo para aquela espessura da carapaça, havia um bom escape de gases durante o vazamento.

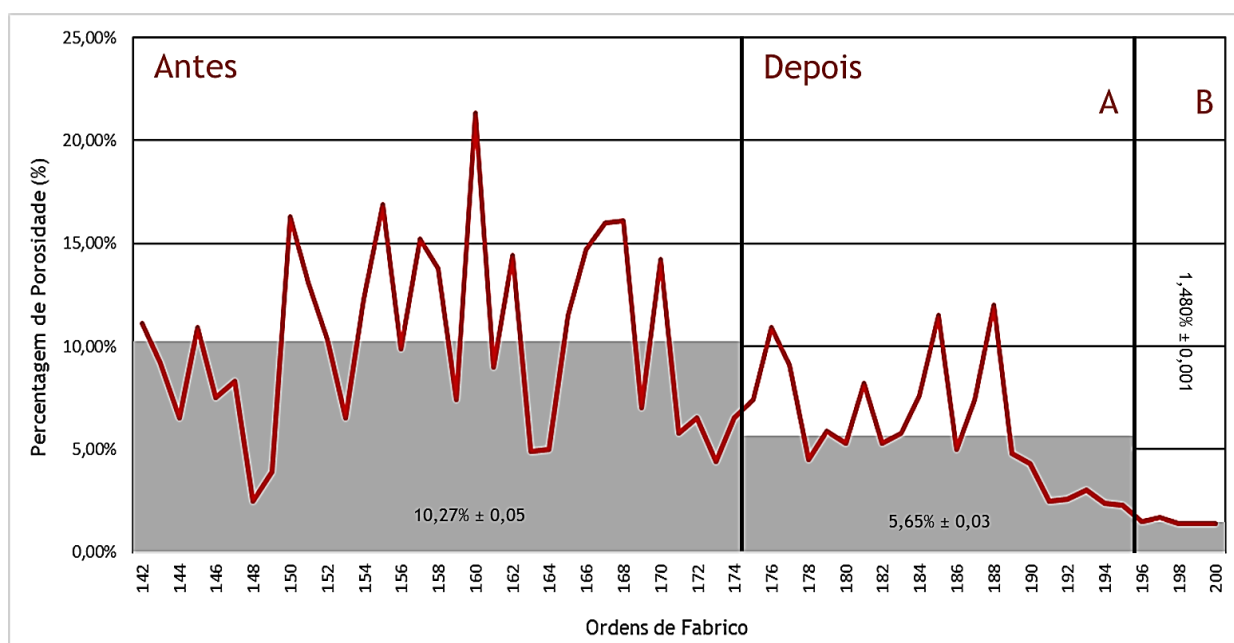


*Figura 39 - Inserção de respiros no topo do sistema de gitagem.*

Após esta prática, realizou-se o terceiro e último passo, tendo-se obtido, após poucas amostragens, uma média de  $0,351\% \pm 0,001$  de refugo em peças devido a porosidade. Tal como foi referido, não foi possível repetir esta metodologia durante mais amostragens; no entanto, tendo em conta os bons resultados obtidos, seria interessante que, futuramente, a ZCP continuasse com este procedimento.

## 7.5. Análise de Resultados Finais

De uma forma sucinta, resta perceber de que forma é que os resultados variaram, permitindo atualizar o gráfico da Figura 18. Assim, na Figura 40, é possível visualizar o panorama anterior e posteriormente à aplicação destas metodologias. A zona A, com uma média de  $5,65\% \pm 0,03$  de peças com porosidade por lote, corresponde única e exclusivamente aos resultados que têm em conta a otimização da sequência de carregamento do forno e a desoxigenação do banho metálico, e a zona B, com uma média de  $1,480\% \pm 0,001$ , corresponde à avaliação final dos lotes de fabrico que tiveram em conta a alteração realizada nos critérios de avaliação. Tal como referido, a terceira implementação ainda não poderá ser considerada muito representativa; no entanto, será de prever que iria baixar o patamar para uma média de valores nunca alcançados de cerca de  $0,351\% \pm 0,001$  de peças rejeitadas por presença de porosidade crítica. Visto que o gráfico completo de toda a produção seria muito extenso para apresentar nesta página, é possível visualizar no Anexo 9 toda a evolução deste defeito crítico, desde o primeiro lote de produção deste componente, dividindo a produção em várias zonas de atuação.



**Figura 40** - Variação da taxa de refugo, devido a porosidade, após aplicação de várias medidas corretivas ao longo deste estudo.

## 7.6. Impacto da Otimização

Ao longo de todo o trabalho, foi possível observar parte do impacto que esta metodologia teve no processo. Dividindo o trabalho em três fases (1- Otimização da Sequência de Carregamento do Forno e Desoxigenação, 2- Alteração dos Critérios de

Avaliação e 3- Aplicação dos Respiros no Sistema de Gitagem) e tendo em conta a fase crítica de início do mesmo onde, por lote de fabrico, existia uma média de  $10,27\% \pm 0,05$  de peças rejeitadas, é possível afirmar que:

- Na fase 1, ocorreu uma diminuição da taxa de refugo em cerca de 45,0%;
- Na fase 2, registou-se uma melhoria de 85,6% no valor dessa taxa;
- E por fim, na fase 3, o processo melhorou em cerca de 96,6%, relativamente ao valor inicial.

Para além disso, todos os procedimentos e ações adotadas garantiram um aumento da qualidade superficial das peças. Tal facto permitiu que todos os operadores responsáveis pela inspeção visual deste componente conseguissem diminuir o tempo gasto na inspeção das peças por lote de produção.

Da mesma forma, foi possível melhorar o rendimento de adição de cada elemento de liga. Assim, tendo em conta os principais elementos da composição química da liga utilizada na produção do microfuso, obtiveram-se as seguintes melhorias (Tabela 5), comparativamente aos valores iniciais (Tabela 4):

- O desvio percentual do teor de carbono relativamente ao *target* inicial, teve uma melhoria de cerca de 75%;
- O teor de cromo ficou muito mais perto dos valores previstos, registando uma otimização do rendimento de adição de 79%;
- O molibdénio registou uma melhoria, no mesmo rendimento, na ordem dos 53%;
- O silício manteve-se muito constante ao longo da fusão da liga, garantindo uma otimização do rendimento de adição de cerca de 70%;
- Por fim, o manganês obteve uma melhoria de cerca de 19% no rendimento de adição.

*Tabela 5 - Impacto registado nos desvios da composição química da liga utilizada no fabrico do microfuso*

|                            | C                 | Cr                | Mo                | V                 | Si                | Mn                |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Target</b>              | 0,425             | 5,300             | 1,200             | 0,400             | 1,220             | 0,490             |
| <b>Valor obtido</b>        | $0,410 \pm 0,011$ | $5,305 \pm 0,002$ | $1,192 \pm 0,007$ | $0,399 \pm 0,004$ | $1,175 \pm 0,014$ | $0,451 \pm 0,013$ |
| <b>Variação percentual</b> | - 3,53            | + 0,09            | - 0,67            | - 0,25            | - 3,69            | - 7,96            |
| <b>Taxa de otimização</b>  | 75                | 79                | 53                | 67                | 70                | 19                |

Ao mesmo tempo, todo o trabalho de campo realizado junto aos operadores foi importante para perceber quais as práticas utilizadas pelos mesmos, sendo mais fácil conseguir explicar os resultados obtidos no final de cada ordem de fabrico e permitindo tomar ações instantâneas face aos desafios encontrados.

## 8. Conclusões

A dissertação apresentada centrou-se no “Impacto da Preparação e Fusão de Cargas na Qualidade dos Fundidos” e teve como principal objetivo otimizar a qualidade de um componente de elevado volume de produção da empresa ZOLLERN & Comandita, o microfuso, através da otimização do processo de fabrico, com principal enfoque na etapa de fusão. A análise dos dados relativos à produção (em 2017) deste componente, com aplicação na indústria automóvel, permitiu identificar um defeito crítico, porosidade, com uma taxa de refugo mais elevada relativamente a outros tipos de defeitos, representando 66% do refugo total deste componente.

Antes de atuar no processo original da empresa, foi necessário identificar e avaliar os principais parâmetros/variáveis que poderiam contribuir para a resolução deste problema, que foram divididos em dois grupos:

**Parâmetros de Controlo**, sendo o seu principal objetivo monitorizar e controlar o processo, impedindo que este se realize fora destas condições. São exemplos deste tipo de parâmetros:

- Boas práticas de limpeza do forno;
- Balanço de materiais e controlo do rendimento de adição dos elementos de liga ao banho metálico;
- Utilização de proteção gasosa, através de deposição de um “manto” de argon líquido à superfície livre do banho;
- Controlo e monitorização da temperatura tanto do banho como do seu vazamento, entre 1650 e 1670°C;
- Acerto da técnica de vazamento utilizada (uniformizando a altura e velocidade do vazamento entre operadores);
- Temperatura de pré-aquecimento da carapaça cerâmica a 1100°C.

**Variáveis de Otimização**, sendo o seu principal objetivo otimizar o processo. Numa parte inicial, são exemplos deste tipo de variáveis:

- Otimização da sequência de carregamento do forno;
- Desoxigenação do banho;
- Análise do nível de oxidação dos retornos utilizados.

Posteriormente, foi necessário procurar saber, através do histórico das alterações do processo produtivo da empresa, se qualquer alteração nas propriedades da carapaça cerâmica poderá ter tido alguma influência no aumento da porosidade deste componente. Não obstante, foi necessário garantir que seria possível efetuar uma comparação de resultados antes e após qualquer alteração no processo de produção da empresa.

A execução deste trabalho permitiu obter os seguintes resultados:

- Redução das perdas de cada elemento, relativamente aos *targets* estipulados a partir do balanço mássico da liga em causa. Esta melhoria garantiu que o rendimento de adição de elementos de liga preponderantes para a liga utilizada no fabrico do microfuso, como o silício, fosse otimizado em cerca de 70% relativamente a resultados anteriores;
- Após a otimização da sequência de carregamento do forno e uma desoxigenação ponderada do banho, foi possível baixar a taxa de refugo, devido a porosidade, em cerca de 45%;
- A revisão dos critérios de avaliação adotados pela empresa permitiu uma melhoria da taxa de refugo, devido a porosidade, relativamente ao valor inicial, de cerca de 85,6%;
- Muito embora carecendo de resultados suplementares, a aplicação de respiros no topo do sistema de gitagem permitiu aumentar o nível de otimização para cerca de 96,6%.

Assim, é possível compreender que a otimização das variáveis de otimização descritas, não só com base em conceitos teóricos e num planeamento mais ponderado das diferentes operações, mas também na revisão de critérios de análise das peças bem como na garantia de um escape de gases suficiente através da carapaça cerâmica, são ferramentas cruciais para a melhoria do processo.

### 8.1. Trabalhos Futuros

Após a realização deste trabalho, como trabalhos futuros sugere-se a implementação de algumas propostas que podem trazer vários benefícios para a ZCP. Assim, urge a necessidade de ter em conta as seguintes orientações:

- Aplicação deste modelo de análise a outras ligas e peças;
- Procurar identificar novos métodos e processos para melhorar o tipo de controlo sobre as variáveis mais relevantes do processo, por exemplo, através da utilização de procedimentos mais expeditos como sensores para determinação do teor de oxigénio no banho, garantindo agir no imediato sobre a desoxigenação do banho;
- Procurar o envolvimento direto de todas as partes no processo produtivo da empresa;
- Controlo das boas práticas do processo;
- Abranger outras etapas do processo na resolução do problema e na identificação das causas raiz do mesmo;
- Uniformização do processo, garantindo que todos os setores se encontram em máxima consonância.

Por último, a aplicação de respiros no topo do sistema de gitagem permitiu a obtenção de melhores resultados na produção do microfuso. Futuramente, é crucial incorporá-los no sistema de gitagem da restante produção de forma a estabilizar o processo dentro desses resultados.

## Referências Bibliográficas

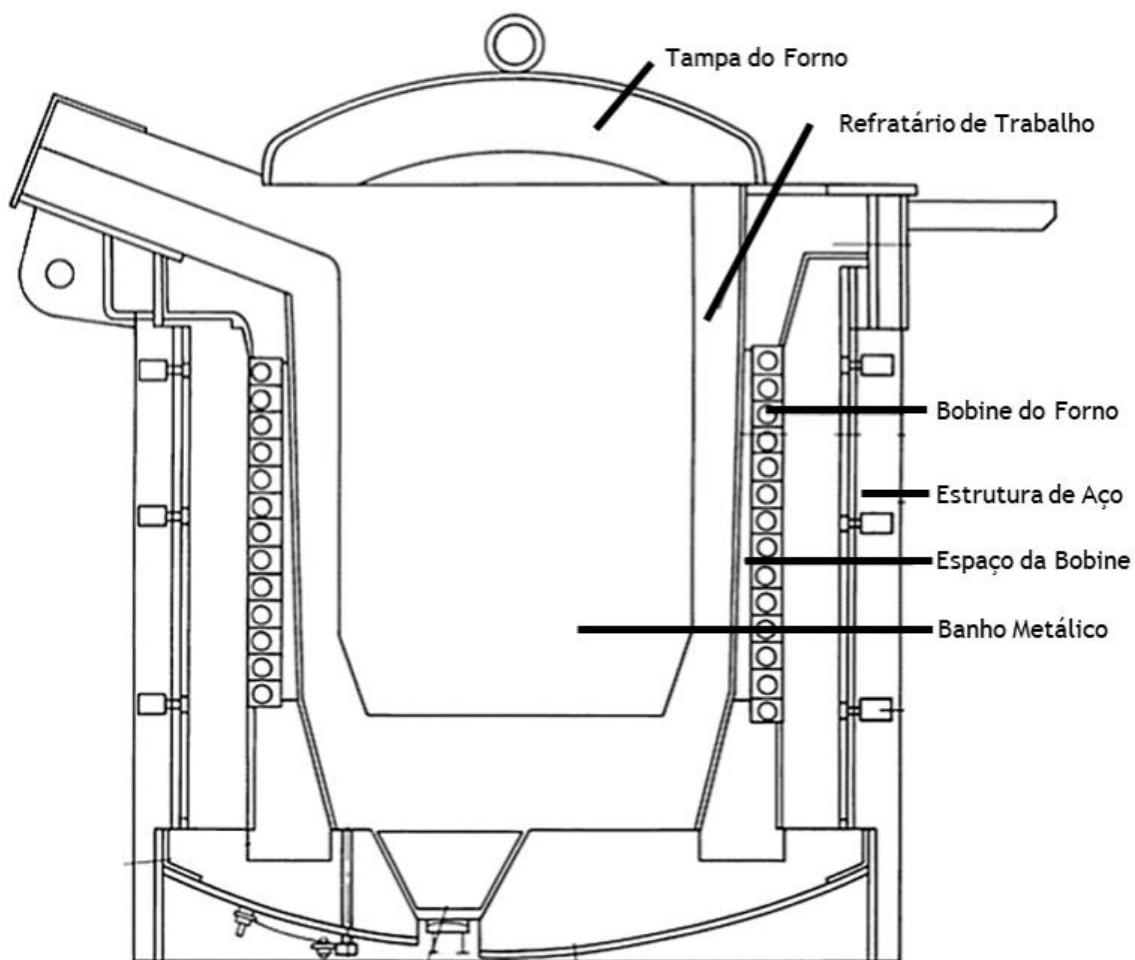
- [1] J. P. M. C. Silva, "A carapaça cerâmica e seu impacto em Investment Casting," Dissertação de Mestrado, FEUP, 2017.
- [2] D. B. K. S. Pattnaik, and P. Jha, "Developments in investment casting process - a review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, 2012.
- [3] J. C. M. B. Silva, "Fundição de precisão pelo processo de cera perdida," Dissertação de Mestrado, FEUP, 1997.
- [4] R. F. S. P. R. Beeley, and I. o. Metals, "Investment Casting," *Institute of Materials*, 1995.
- [5] M. Sahoo, S. Sahu, L. V. Whiting, and K. Sadayappan, "4.2.8 Coreless Induction Furnaces," in *Casting Copper-Base Alloys (3rd Edition)*: American Foundry Society, 2015.
- [6] P. R. Beeley and R. F. Smart, "5.5.1 Radiant Heat Furnaces," in *Investment Casting*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1995.
- [7] F. C. Campbell, "2.5.2 Cupola Melting," in *Metals Fabrication - Understanding the Basics*: ASM International, 2013.
- [8] M. J. P. V. d. Costa, "Fornos de indução," Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1960.
- [9] J. R. Davis, "94.7 Vacuum Melting," in *Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition)*: ASM International, 1998.
- [10] F. C. Campbell, "2. Casting," in *Metals Fabrication - Understanding the Basics*: ASM International, 2013.
- [11] M. Sahoo, S. Sahu, L. V. Whiting, and K. Sadayappan, "4.2.2 Crucible or Pit Furnaces," in *Casting Copper-Base Alloys (3rd Edition)*: American Foundry Society, 2015.
- [12] P. R. Beeley and R. F. Smart, "5.5.2 Electric Induction Furnaces," in *Investment Casting*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1995.
- [13] A. C. Reardon, "5. Modern Alloy Production," in *Metallurgy for the Non-Metallurgist (2nd Edition)*: ASM International, 2011.
- [14] J. R. Davis, "94.1.2 Coreless Induction Furnaces," in *Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition)*: ASM International, 1998.
- [15] V. R Gandhewar, S. V Bansod, and A. Borade, *Induction Furnace -A Review*. 2011.
- [16] J. Campbell, "Chapter 1 - The Melt," in *Complete Casting Handbook (Second Edition)*, J. Campbell, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 3-15.
- [17] A. I. H. Committee, *ASM handbook* (no. vol. 1). ASM International, 1992.
- [18] A. C. Reardon, "5.4 Molten Metal Processing," in *Metallurgy for the Non-Metallurgist (2nd Edition)*: ASM International, 2011.
- [19] P. R. Beeley and R. F. Smart, "5. Melting and Casting," in *Investment Casting*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1995.
- [20] W. J. Rankin, "8.1 Theoretical Considerations," in *Minerals, Metals and Sustainability - Meeting Future Material Needs*: CSIRO Publishing, 2011.
- [21] P. Beeley, *Foundry technology*. Elsevier, 2001.

- [22] J. Campbell, "1.1.2 Copper Alloys," in *Castings*: Elsevier, 2001.
- [23] R. A. H. J. P. Oriani and M. Smialowski, "31. Hydrogen Effects in Stainless Steel," in *Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys*: William Andrew Publishing/Noyes, 1985.
- [24] J. Campbell, "1.1 Gaseous Interactions with the Melt," in *Castings*: Elsevier, 2001.
- [25] J. Campbell, "Chapter 2 - Entrainment," in *Complete Casting Handbook (Second Edition)*, J. Campbell, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 17-90.
- [26] E. T. Turkdogan, "5.1 Structural Aspects," in *Fundamentals of Steelmaking*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1996.
- [27] E. T. Turkdogan, "6.1 Oxidation of Iron," in *Fundamentals of Steelmaking*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1996.
- [28] A. Muan and E. F. Osborn, *Phase equilibria among oxides in steelmaking*. Addison-Wesley Pub. Co., 1965.
- [29] J. Campbell, "Chapter 3 - Flow," in *Complete Casting Handbook (Second Edition)*, J. Campbell, Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 91-134.
- [30] M. Raza, "Process Development for Investment Casting of Thin-Walled Components : Manufacturing of Light Weight Components," 199 Licentiate thesis, monograph, Mälardalen University Press Licentiate Theses, Mälardalen University, Västerås, 2015.
- [31] R. P. T. L. Sorda, "The impact of clean molten metal processing on total operational cost in the production of ferrous alloy investment castings," presented at the Technical Conference & Expo, 2005.
- [32] N. P. S. Thomas J. Thornton, and James Jackson, S & A Consulting Group LLP, "Producing Inclusion-free Castings Begins and Ends with Clean Alloy," presented at the INCAST, 2005.
- [33] R. H. Tupkary and V. R. Tupkary, "5.8 Pretreatment of Hot Metal," in *Modern Steel Making Handbook*: Mercury Learning and Information, 2018.
- [34] H. E.-N. George Frigm, Phila., Philadelphia, PA; F. Vonesh, T. La Sorda, Air Liquide, "The Experimental Determination of Dissolved Hydrogen in Molten Ferrous Alloys During Application of the SPAL™ Process," presented at the Annual Technical Meeting: Investment Casting Institute, 1992.
- [35] "12th Biennial Worldwide Conference on Refractories, UNITECR 2011," in *Proceedings UNITECR 2011 Congress: 12th Biennial Worldwide Conference on Refractories - Refractories-Technology to Sustain the Global Environment*, 2011.
- [36] R. K. Sinnott and G. Towler, "7.10.4 Refractory Materials (Refractories)," in *Chemical Engineering Design - SI Edition (5th Edition)*: Elsevier, 2009.
- [37] T. Vert, "5.0.1 Refractory Texture," in *Refractory Material Selection for Steelmaking*: John Wiley & Sons, 2016.
- [38] T. Vert, "9.0 Steel Ladle Refractory Overview," in *Refractory Material Selection for Steelmaking*: John Wiley & Sons, 2016.
- [39] B. Frago, "Improvement of cleanliness of steel melts," presented at the 12Th World Conference on Investment Casting, 2008.
- [40] E. T. Turkdogan, "8.2 Furnace Charge," in *Fundamentals of Steelmaking*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1996.

- [41] P. Väyrynen, L. Holappa, and S. Louhenkilpi, *Simulation of Melting of Alloying Materials in Steel Ladle*. 2019.
- [42] E. Lunarska, *Hydrogen-Induced Degradation of Low - Carbon Steel*. 2019, pp. 712-736.
- [43] J. L. Dossett and H. E. Boyer, *Practical Heat Treating: Second Edition*. ASM International, 2006.
- [44] G. Krauss, "1.3 Steel Specifications," in *Steels - Processing, Structure, and Performance*: ASM International, 2005.
- [45] B. M. Institute, "2.3.1.5 D6AC Steel," in *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-07)*: Battelle Memorial Institute, 2012.
- [46] M. F. McGuire, "1.2 Introduction," in *Stainless Steels for Design Engineers*: ASM International, 2008.
- [47] J. C. Lippold and D. J. Kotecki, "1. Introduction," in *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*: John Wiley & Sons, 1999.
- [48] R. H. Tupkary and V. R. Tupkary, "5.1 Sources of Metallic Iron/Metallics," in *Modern Steel Making Handbook*: Mercury Learning and Information, 2018.
- [49] L. L. Shreir, R. A. Jarman, and G. T. Burstein, "8.3 Stress-Corrosion Cracking of Stainless Steels," in *Corrosion (3rd Edition) Volumes 1-2*: Elsevier, 1994.
- [50] G. Krauss, "23.1 Alloy Design and Phase Equilibria," in *Steels - Processing, Structure, and Performance*: ASM International, 2005.
- [51] J. R. Davis, "124.6 Precipitation-Hardening Stainless Steels," in *Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition)*: ASM International, 1998.
- [52] A. C. Reardon, "5. Modern Alloy Production," in *Metallurgy for the NonMetallurgist (2nd Edition)*: ASM International, ed, 2011.
- [53] I. C. Institute, *Atlas of Casting Defects*. Investment Casting Institute, 1983.
- [54] M. F. McGuire, "1.2 Introduction," in *Stainless Steels for Design Engineers*: ASM International, ed, 2008.
- [55] G. Krauss, "1.3 Steel Specifications," in *Steels - Processing, Structure, and Performance*: ASM International, ed, 2005.
- [56] M. F. McGuire, "1. Introduction," in *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*: John Wiley & Sons, ed, 1999.
- [57] B. M. Institute, "2.3.1.5 D6AC Steel," in *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-07)*: Battelle Memorial Institute, ed, 2012.

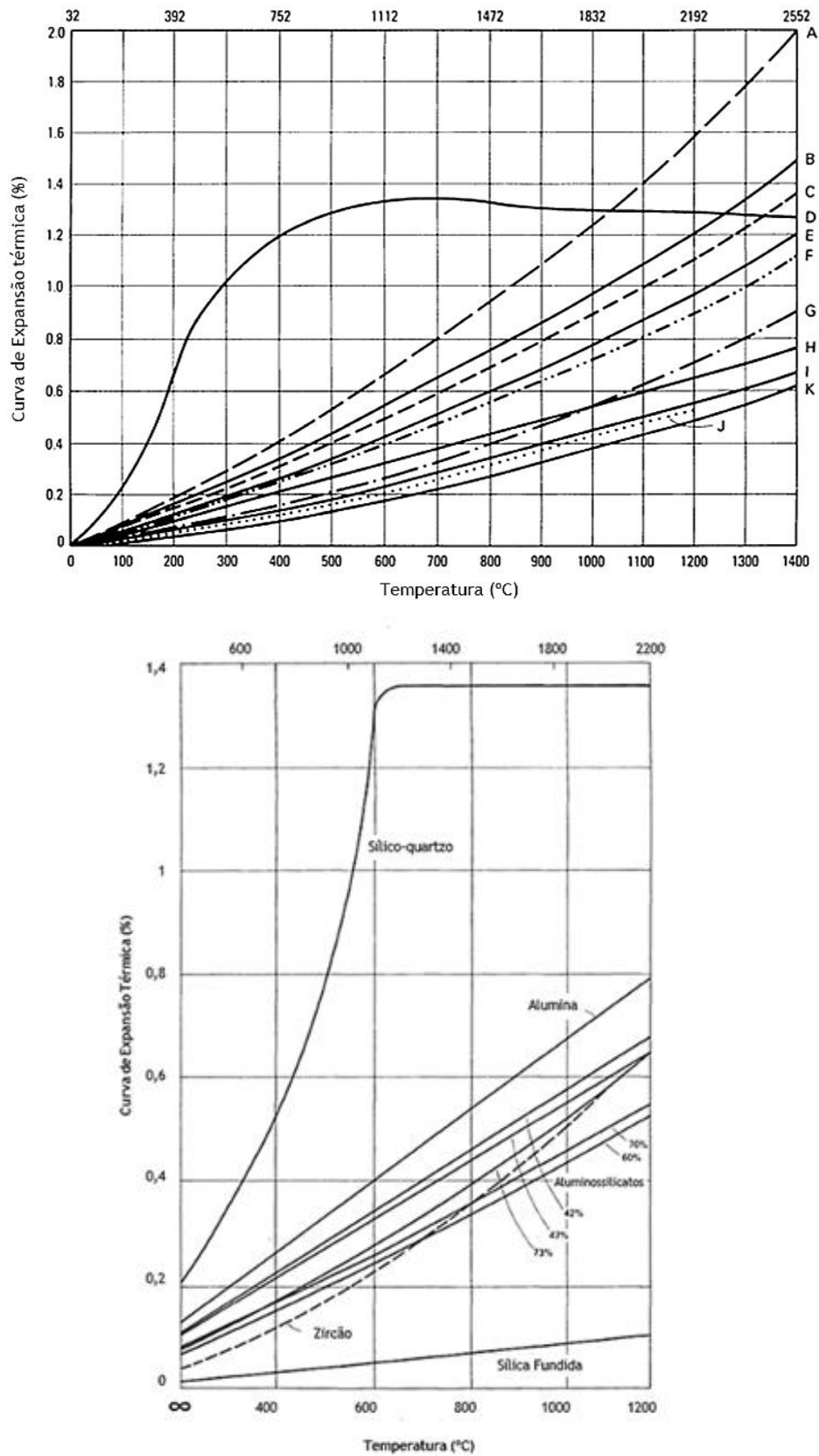
## Anexos

### Anexo 1



**Figura A.1** - Secção transversal de um forno de indução do tipo FIC. A imagem mostra o indutor, em cobre, arrefecido a água e os principais componentes estruturais (figura adaptada do original) [6].

## Anexo 2



**Figura A.2** - Curvas de expansão térmica de vários materiais refratários, utilizados como revestimentos de fornos de indução de cadinho: A, magnesite; D, sílica (quartzo); F-G, alumina, por exemplo (figura adaptada do original) [6].

### Anexo 3

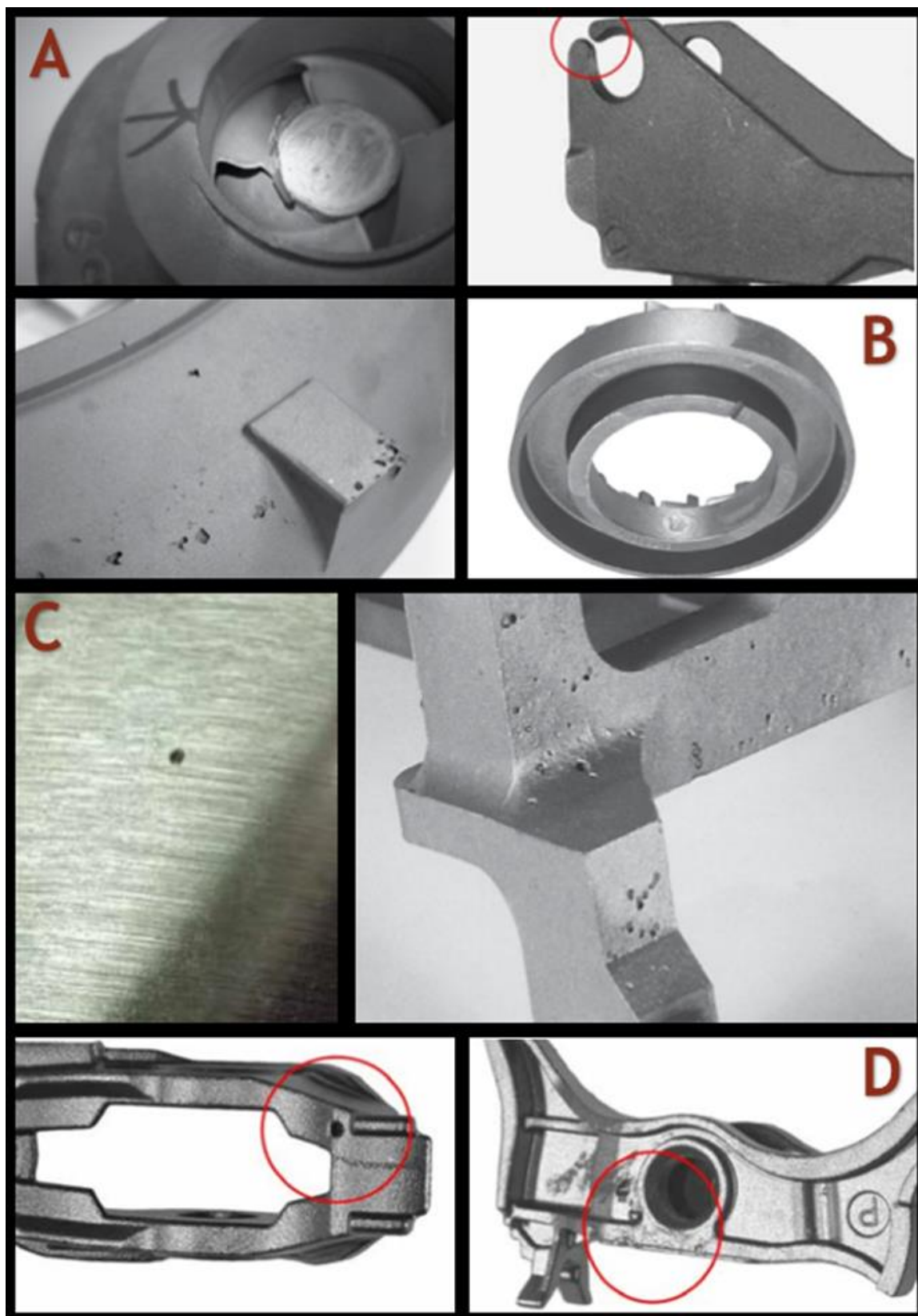


Figura A.3 - Exemplos de defeitos em peças. A - "Mal cheio"; B - Inclusões; C e D - Porosidade [53].

## Anexo 4

*Tabela A.1 - Possíveis causas de “mal cheio” e respetivas ações corretivas [53]*

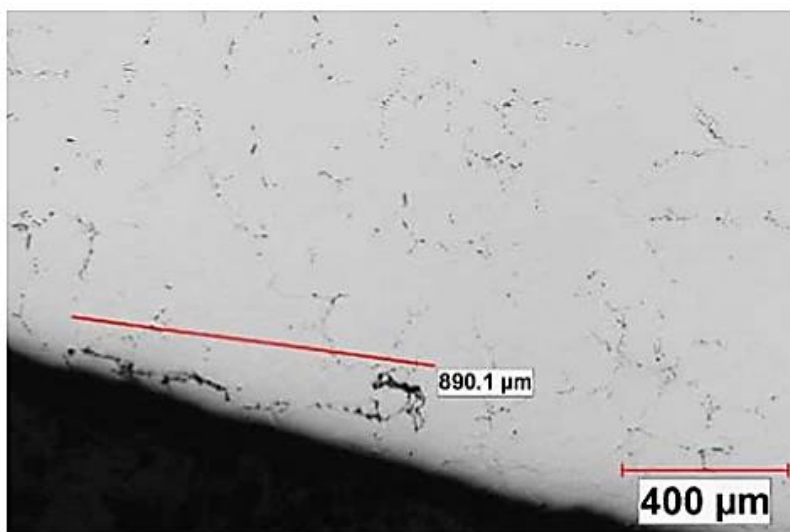
| Causa                                  | Medida corretiva                                                                                                                           |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sistema de gitagem mal direcionado     | Otimizar o sistema de gitagem                                                                                                              |
| Baixa temperatura de vazamento         | Aumentar a temperatura do metal, garantir a temperatura da colher e reduzir o tempo entre o enchimento da colher e o vazamento da moldação |
| Baixa temperatura da carapaça cerâmica | Reduzir o tempo entre o enchimento da colher e o vazamento da moldação ou isolar a carapaça cerâmica para evitar perdas de calor           |
| Interrupção do vazamento               | Evitar ao máximo, promovendo um vazamento contínuo e fluido                                                                                |
| Baixa fluidez do metal                 | Aumentar a fluidez do banho reduzindo a quantidade de óxidos metálicos ou ajustando a composição química do metal                          |

## Anexo 5

*Tabela A.2 - Possíveis causas de “inclusões de escória” e respectivas ações corretivas [53]*

| Causa                                                                      | Medida corretiva                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reação entre o refratário do forno e o banho                               | Utilizar os materiais corretos                                                                                                                                           |
| Oxidação do refratário do forno                                            | Modificar a composição do mesmo                                                                                                                                          |
| Prática de escorificação inadequada                                        | Garantir que a remoção de escória ocorre à menor temperatura possível. Utilizar escorificante para agregar a escória e dar tempo para que esta decante para a superfície |
| Temperatura de sobreaquecimento excessiva e/ou tempos de espera excessivos | Minimizar o tempo de exposição do metal a temperaturas muito elevadas                                                                                                    |
| Oxidação do metal durante a fusão                                          | Proteger o banho com gás inerte                                                                                                                                          |
| Formação de silicatos durante a desoxigenação                              | Modificar a prática de desoxigenação                                                                                                                                     |
| Arrastamento de escória da colher para a carapaça cerâmica                 | Melhorar a prática de limpeza do banho e utilizar de filtros                                                                                                             |
| Vazamento turbulento - vazamento do metal a uma altura exagerada           | Minimizar essa distância                                                                                                                                                 |

## Anexo 6



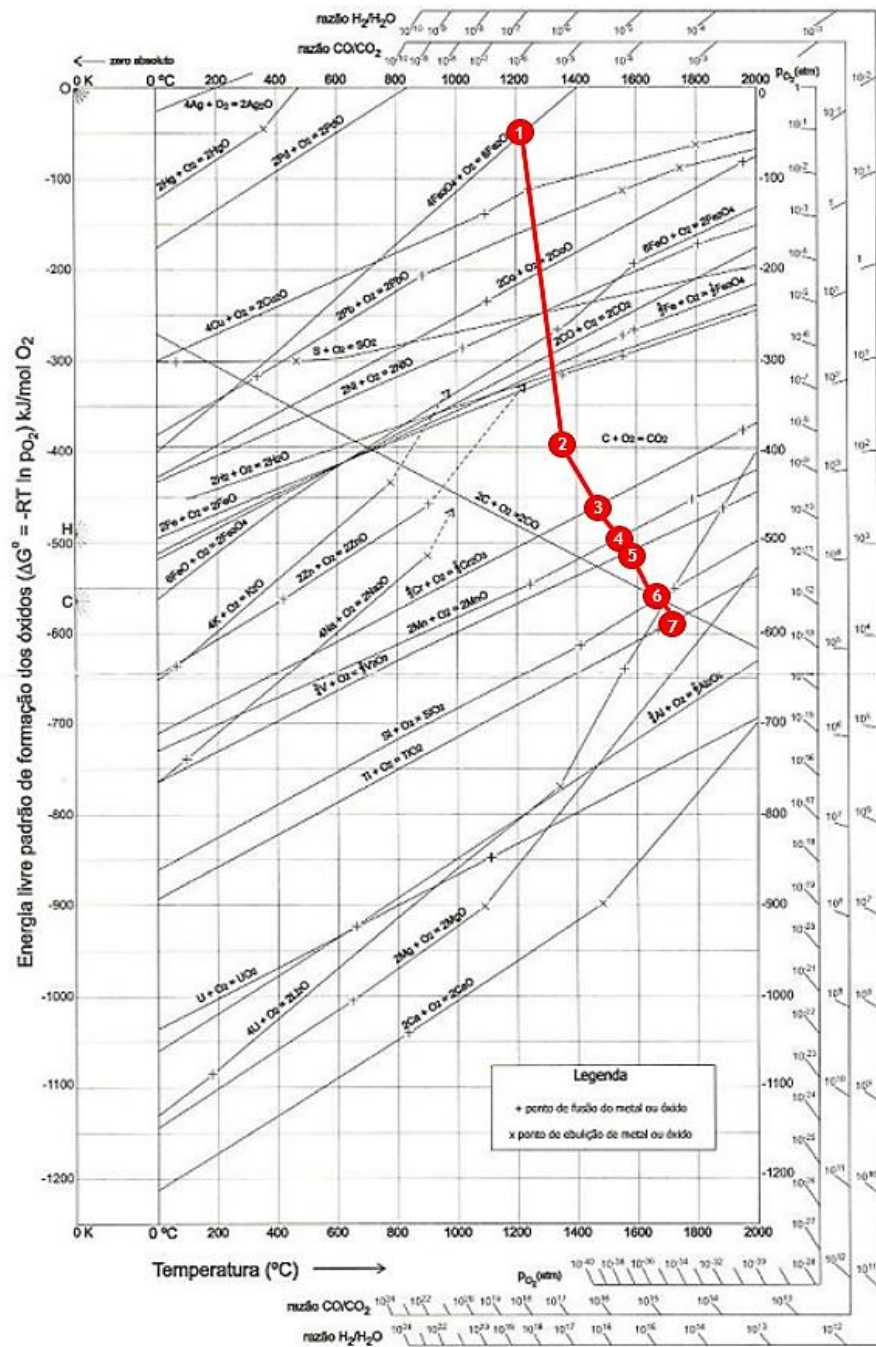
*Figura A.4 - Presença de óxidos numa peça fundida [53].*

## Anexo 7

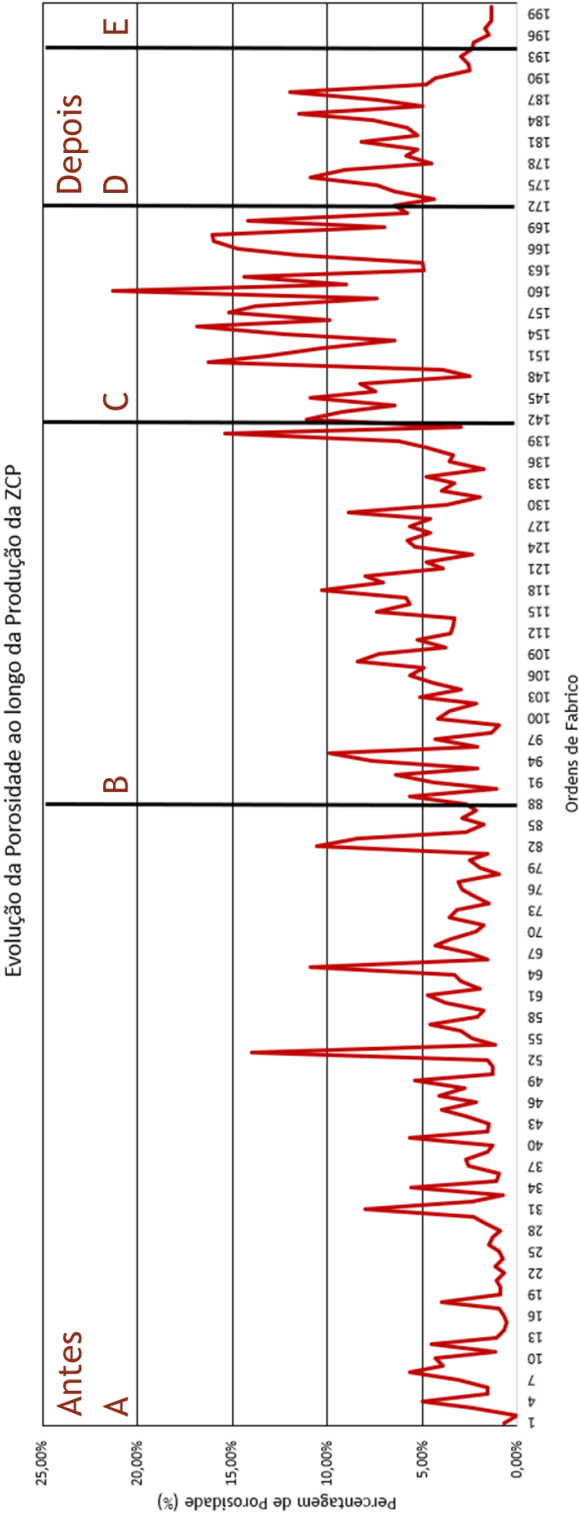
*Tabela A.3 - Possíveis causas de “inclusões de óxidos” e respectivas ações corretivas [53]*

| Causa                               | Medida corretiva                                                                  |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Matéria-prima oxidada               | Utilizar cargas limpas                                                            |
| Oxidação de elementos reativos      | Evitar a oxidação do banho através do uso de vácuo ou atmosfera protetora/inerte  |
| Prática inadequada de desoxigenação | Dar tempo à desoxigenação para que esta seja eficaz. Promover a limpeza do banho. |
| Turbulência                         | Diminuir a velocidade de enchimento                                               |

## Anexo 8



Anexo 9



**Figura A.6** - Evolução da taxa de refugo, resultante do aparecimento de porosidade nos fundidos, desde a primeira ordem de fabrico até ao final do trabalho. O gráfico está dividido em cinco zonas, em que as duas últimas são relativas ao processo de otimização da sequência de carregamento e desoxigenação do forno (D) e à alteração dos critérios de avaliação dos defeitos em peças finais (E).