

IMPACTO DA FRAÇÃO DE RETORNOS NA QUALIDADE DO BANHO METÁLICO

NUM PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR MODELO EM CERA PERDIDA

LUÍS GONÇALO DA COSTA REGUEIRAS

DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM 21 DE JULHO DE 2021

LUÍS FILIPE MALHEIROS

ORIENTADOR

PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, FEUP

<i>CANDIDATO</i>	Luís Gonçalo da Costa Regueiras	<i>Código</i>	201606089
<i>TÍTULO</i>	Impacto da Fração de Retornos na Qualidade do Banho Metálico num Processo de Fundição por Modelo em Cera Perdida		
<i>DATA</i>	21 de julho de 2021		
<i>HORA</i>	9:00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Hélder Jesus Fernandes Puga	EE/UM
	<i>Orientador</i>	Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP

Resumo

A presente Dissertação encontra-se integrada num projeto da empresa ZOLLERN & Comandita Portugal, tendo como objetivo explorar o impacto da fração de retornos na qualidade do banho metálico e, conseqüentemente, na sanidade dos fundidos produzidos. O trabalho desenvolvido compreendeu essencialmente duas partes. Na primeira, a principal, foi realizado um conjunto de vazamentos para a produção de peças relativas a um único modelo e para a mesma liga metálica (aço), tendo-se variado o rácio matérias-primas novas/retornos na constituição das cargas metálicas para fusão. De cada vazamento, foram recolhidas amostras para observação em microscopia ótica e provetes para ensaios de tração e choque. O número de ensaios realizados não permitiu estabelecer uma relação entre a fração de retornos e a qualidade do banho metálico.

Na segunda parte, tendo-se utilizado o modelo da peça e a classe de aço do estudo empreendido na primeira parte, procedeu-se à elaboração de dois banhos metálicos, tendo-se recorrido, no final dessa etapa, à injeção de árgon gasoso, através de um tijolo poroso colocado no fundo do forno de indução.

A realização destes ensaios tinha em vista a melhoria do grau de limpeza do banho metálico, através de uma remoção mais eficaz das inclusões presentes no seu seio. Nestes, verificou-se uma redução considerável da fração de inclusões. Todavia, apurou-se um aumento da porosidade dos fundidos, muito provavelmente devido à utilização de parâmetros de injeção desajustados. No que concerne aos resultados dos ensaios de tração e choque, não se registou um impacto significativo da insuflação de árgon sobre a melhoria das propriedades mecânicas do aço.

Os resultados deste trabalho incentivam à realização de novos estudos no âmbito do aperfeiçoamento do processo de fusão, através da avaliação de diferentes parâmetros e metodologias.

Palavras-chave

Fundição de precisão por modelo em cera perdida; Fusão; Retornos; Sanidade; Inclusões; Preparação de Cargas

Abstract

This dissertation is integrated into a ZOLLERN & Comandita Portugal project, aiming to explore the impact that an increase in the fraction of foundry returns has on the quality of the melt and, consequently, on the internal sanity of the components produced. This work comprises essentially two parts. In the first and main one, a set of castings for a single component and steel alloy were produced to explore different ratios of raw materials/foundry returns concerning the composition of the metallic charges. A set of samples was obtained from the castings to perform an optical microscopy analysis and tensile and shock testing. A substantial relation was not found between the foundry returns fraction and the quality of the melt.

In the second part of the work, an argon purging technique was applied in two test melts, maintaining the general methodology used in the first part of this work. This study aimed to improve the quality of the melt by providing the means for more efficient removal of non-metallic inclusions. These experiments revealed a considerable reduction of non-metallic inclusions and increased porosity, possibly caused by inadequate injection settings. Regarding the tensile and shock tests, neither showed a substantial impact of the argon injection on the mechanical properties of the cast component.

The results obtained in this work incite the need for new studies aiming to improve the casting process by evaluating different parameters and methodologies.

Keywords

Investment Casting; Casting; Casting's returns; Quality; Non-metallic inclusions; Preparation of the melting's charge

Agradecimentos

Trilhar este percurso tão complexo foi um enorme desafio para mim e a sua conclusão só foi possível com o apoio dos que me rodeiam e fizeram parte da minha formação académica. A todos, devo a minha enorme gratidão.

Ao Professor Doutor Luís Filipe Malheiros, agradeço todo o seu trabalho como orientador desta Dissertação de Mestrado. O seu acompanhamento foi essencial para a minha progressão. Ademais, agradeço o seu apoio ao longo de todo o curso, incutindo, reiteradamente, aos alunos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM), a sua paixão e dedicação à área da Metalurgia.

Agradeço ao Engenheiro Virgílio Oliveira, Diretor geral da ZOLLERN, e ao Engenheiro Rui Félix, Diretor Técnico, o facto de terem possibilitado a realização deste estágio, proporcionando todas as condições para o sucesso deste trabalho.

Ao Engenheiro Francisco Oliveira, responsável pelo acompanhamento dos trabalhos na ZOLLERN, o meu reconhecido agradecimento pela sua disponibilidade e ajuda na tomada de decisões. O começo em ambiente industrial é intrincado, sendo difícil a compreensão das diferentes práticas aplicadas no chão de fábrica; porém, tudo se tornou mais simples com a sua ajuda. Agradeço, ainda, ao Luís Batista, responsável do setor da fusão na ZOLLERN, a toda a sua equipa e a todo o pessoal do laboratório da ZOLLERN a colaboração na realização da parte prática desta Dissertação.

Um especial obrigado ao meu colega e amigo Ricardo Queirós, pelas discussões de ideias e momentos de companheirismo, durante o nosso estágio simultâneo, na mesma empresa, que se revelaram cruciais nas diferentes etapas desta Dissertação.

Aos meus amigos, Rui, Daniel e Cláudia. Confesso-me grato por toda a ajuda e por todos os momentos de convivência e partilha, que dão muito mais sentido à nossa caminhada como seres humanos neste mundo.

Aos professores da Escola Secundária de Ermesinde, em especial ao professor Raúl Aparício, Helena Fonseca, Carla Fachada e Maria do Céu. O meu profundo agradecimento por me terem incutido um espírito de trabalho e dedicação na demanda pelos meus objetivos.

À minha namorada, Catarina, necessito de fazer um reconhecimento singular, por tudo aquilo que significa para mim. É um alicerce fundamental nas minhas decisões, acompanhando-me em todos os momentos, nos mais complicados e nos de maior alegria. A sua serenidade foi muito importante para a chegada do trabalho desenvolvido a bom porto.

Finalmente, um enorme agradecimento à minha família. Em particular ao meu irmão, pais e avós, pelo apoio incalculável, que tem permitido o meu contínuo crescimento como estudante, futuro profissional e como homem. Foram, são e serão fundamentais em todas as etapas da minha vida.

“Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-032460 - GRIS: Refinamento de Grão Induzido por Agitação Eletromagnética: Desenvolvimento de uma Abordagem Preditiva para Implantes Médicos em Co-Cr, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e no âmbito dos projetos com a referência POCI-01-0247-FEDER-038128 MAGI4.0 Afinação de grão por correntes eletromagnéticas rotativas e tecnologias da indústria 4.0 para a fundição por cera perdida e POCI-01-0247-FEDER-045391 HIPERCAST: Desenvolvimento do processo de cera perdida para a fundição de peças de elevado desempenho cofinanciados pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).”

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional



Índice

1. Introdução	1
1.1. Principais Objetivos do Trabalho	1
1.2. Apresentação da Empresa	2
1.3. Estrutura da Dissertação de Mestrado	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Processo de Fundição por Modelo em Cera Perdida com Carapaça Cerâmica	3
2.1.1. Etapas do Processo	3
2.2. Fusão	5
2.2.1. Fornos Elétricos de Indução	5
2.2.2. Reações do Banho Metálico com o Meio Envolvente	7
2.2.3. Escória	9
2.2.4. Fluidez do Banho Metálico	9
2.2.5. Desvanecimento de Elementos de Liga	9
2.2.6. Tratamento do Banho Metálico	10
2.2.7. Vazamento	13
2.2.8. Carapaça Cerâmica	14
2.3. Preparação das Cargas	16
2.3.1. Matérias-Primas	16
2.3.2. Cuidados na Preparação de Cargas	17
2.3.3. Sequência de Carregamento	17
2.4. Controlo da Qualidade	18
2.4.1. Inclusões	19
2.4.2. Porosidade	25
3. Caso de Estudo	27
3.1. Peça e Liga em Estudo	27
3.2. Procedimento Experimental	29
3.2.1. Análise da Gestão de Retornos no Armazém	30
3.2.2. Análise do Processo de Fusão	31
3.2.3. Metodologia de Análise	35
3.3. Apresentação e Discussão de Resultados	37

3.3.1. Sanidade Interna.....	37
3.3.2. Propriedades Mecânicas	41
3.3.3. Injeção de Árgon pelo Fundo do Forno de Fusão	43
4. Conclusões	48
4.1. Trabalhos Futuros.....	49
Referências Bibliográficas	50
Anexos.....	57
Anexo 1	57
Anexo 2	58
Anexo 3	59
Anexo 4	60
Anexo 5	61
Anexo 6	62

Índice das Figuras

Figura 1. Esquema das etapas do processo de FMCP; adaptada de [6].	3
Figura 2. Representação esquemática de um forno de indução de cadinho; adaptada de [11].	5
Figura 3. Diagrama de Ellingham [21].	8
Figura 4. Formação de bi-filmes de óxidos [23].	9
Figura 5. Influência do grau de sobreaquecimento do aço líquido e duração da sua fusão sobre o desvanecimento do Si e do Mn; adaptada de [30].	10
Figura 6. Injeção de argon através do tijolo poroso, para remoção de impurezas; adaptada de [39].	13
Figura 7. Classificação do tipo e quantidade de inclusões não metálicas presentes nos aços com base em análise metalográfica (ampliação 100X) [32].	20
Figura 8. Clusters de inclusões de alumina em amostras de aço (100x) [54].	21
Figura 9. Grau de clustering das inclusões de alumina em função da sua morfologia [55].	22
Figura 10. Efeito da agitação do banho metálico sobre a distribuição granulométrica das inclusões de alumina num banho de aço. N_i - concentração média de inclusões; r_i - raio das inclusões [57].	22
Figura 11. Morfologia das inclusões de alumina em função dos teores de Al e de O do aço [59].	23
Figura 12. Secção longitudinal de um provete, sujeito a um ensaio de tração que foi interrompido antes da sua rotura [60].	23
Figura 13. Representação esquemática das secções de um provete de aço, a ser sujeito a esforços de tração, em que a matriz apresenta inclusões que patenteiam: A - elevada anisotropia; B - elevada isotropia (Isotropic Quality Steel); adaptada de [61].	24
Figura 14. Impacto do tipo e dimensões das inclusões sobre as propriedades dos aços, aferido através do índice de perniciosidade conforme definido por Monnot et al. [62]; adaptada de [61].	24
Figura 15. Ocorrência de porosidade gasosa na matriz de um aço [63].	26
Figura 16. Algumas variáveis do processo com impacto sobre a sanidade dos fundidos.	28
Figura 17. Peça a estudar: A - modelo em cera; B - carapaça cerâmica; C - após vazamento.	28
Figura 18. Metodologia utilizada para avaliar o impacto da fração de retornos das cargas de fusão sobre a qualidade dos fundidos.	29
Figura 19. Gestão do armazenamento de retornos na ZCP.	30

Figura 20. Procedimentos e sequência de carregamento utilizados na elaboração dos banhos metálicos em estudo.	32
Figura 21. Limpeza da superfície livre do banho: A - escorificante utilizado; B - operação de limpeza do banho (remoção da escória).	32
Figura 22. Controlo da temperatura do banho metálico.	33
Figura 23. Etapa de vazamento do metal: A - do forno para a colher; B - da colher para as carapaças cerâmicas.	34
Figura 24. Operação de limpeza do forno após vazamento.	34
Figura 25. A - Zonas de amostragem do gito; B - Padrão de registo de imagens em microscopia ótica.....	36
Figura 26. A - Máquina de ensaio de tração; B - Provette de ensaio de tração a que está acoplado o extensómetro.	36
Figura 27. Máquina e provetes de ensaio de choque Charpy.	37
Figura 28. Fotomicrografias (100x): A e B - Clusters de inclusões de alumina de elevadas dimensões.	38
Figura 29. Fotomicrografias (100x): A - Cluster de inclusões de alumina de pequena dimensão; B - Dispersão de inclusões individuais pela matriz.....	38
Figura 30. Imagem em SEM e espectro de emissão de raios-X relativo à inclusão da zona assinalada (Z1).	39
Figura 31. Imagem em SEM e espectro de emissão de raios-X relativo à inclusão assinalada (Z3).	39
Figura 32. Imagem em SEM e espectro de emissão de raios-X relativo à inclusão assinalada (Z2).	40
Figura 33. Resistência máxima à tração vs. fração de retornos da carga de fusão.	42
Figura 34. Resistência ao choque vs. fração de retornos da carga de fusão.	42
Figura 35. Injeção de argon pelo fundo do forno de indução: A - desenho do tijolo poroso (adaptado) [75];	44
Figura 36. Porosidade gasosa nas amostras obtidas a partir dos banhos metálicos tratados com insuflação de argon (Fotomicrografias (100X)).	45
Figura 37. Identificação de porosidade gasosa através da desfocagem da imagem.	45
Figura 38. Resistência máxima à tração do aço, objeto deste estudo, determinada em provetes vazados a partir dos dois banhos metálicos tratados com insuflação de argon.	46
Figura 39. Resistência ao choque do aço, objeto deste estudo, determinada em provetes vazados a partir dos dois banhos metálicos tratados com insuflação de argon.	46

Índice das Tabelas

Tabela 1. Principais reações de desoxigenação do banho de aço e valores da energia livre de Gibbs (ΔG°) de formação dos respectivos óxidos [33]	12
Tabela 2. Propriedades térmicas de alguns materiais refratários utilizados no fabrico de carapaças cerâmicas [44]	15
Tabela 3. Componentes de uma carga de fusão típica da ZCP, e respetiva ordem de oxidação dos materiais [34]	18
Tabela 4. Potenciais causas para o aparecimento de inclusões e respetivas medidas corretivas [52]	19
Tabela 5. Potenciais causas de ocorrência de porosidade nos aços e respetivas medidas corretivas [17]	26
Tabela 6. Composição química da liga GX 6 Cr Ni 18 9 (% ponderal - especificação interna da ZCP)	28
Tabela 7. Cargas utilizadas na elaboração dos banhos metálicos em estudo	31
Tabela 8. Composição química (% ponderal) dos banhos metálicos elaborados no âmbito do estudo desenvolvido	35

Lista de Abreviaturas

FIFO – *First-In-First-Out*

FMCP – Fundição por Modelo em Cera Perdida com Carapaça Cerâmica

IC – *Investment Casting*

SEM/EDS – Microscopia Eletrónica de Varrimento e Microanálise por raios-X

ZCP – ZOLLERN & Comandita, Portugal

1. Introdução

Na conjuntura atual, a constante competição vigente no seio empresarial promove uma procura incessante e contínua pelo progresso. Numa indústria, este deve visar sempre três objetivos: a melhoria do processo, do impacto ambiental e a redução de custos. Estes três objetivos podem, por vezes, criar obstáculos entre si; contudo, a procura pelo “melhor dos três mundos”, envolvendo todas as pessoas que trabalham diariamente para atingir o mesmo objetivo, coloca as indústrias no bom caminho, aumentando a sua competitividade.

O tema a desenvolver, “Impacto da fração de retornos na qualidade do banho metálico num processo de fundição por modelo em cera perdida” surgiu de um projeto da empresa ZOLLERN & Comandita Portugal (ZCP), no âmbito da Dissertação de Mestrado, no intento de compreender a influência do rácio matérias-primas novas/retornos da carga metálica na qualidade dos fundidos produzidos. O desenvolvimento do projeto centrou-se na etapa de preparação de cargas e fusão, tendo sido utilizadas, para a produção de peças relativas a um único modelo e com a mesma liga metálica (aço), diferentes frações de retornos (*i.e.*, material dos sistemas de gitagem e alimentação de vazamentos anteriores e fundidos não conformes) por banho elaborado. Recorreu-se, principalmente, a ensaios mecânicos e análise por microscopia ótica para a formulação de conclusões no âmbito dos objetivos deste trabalho.

1.1. Principais Objetivos do Trabalho

Este projeto visou a otimização do processo de elaboração de um banho metálico, tendo como foco a etapa de preparação de cargas. O principal objetivo do trabalho consistiu na determinação da influência da sanidade interna dos retornos (fração de inclusões e porosidade) na qualidade do banho metálico e, conseqüentemente, da fração mais adequada a ser utilizada nas cargas dos fornos de fusão. Para a sua consecução, tornou-se crucial o seguimento de algumas premissas, enumeradas abaixo:

- estudar a gestão da utilização dos retornos para fusão e determinar o impacto financeiro da sua utilização;
- estudar a elaboração do banho metálico e compreender a influência dos retornos na sua qualidade;
- analisar os principais defeitos responsáveis pela redução da sanidade dos fundidos, *i.e.*, inclusões e porosidade;
- sugerir aspetos a aprimorar nas práticas de fusão utilizadas na ZCP e novas técnicas que potenciem a melhoria do processo;
- perceção do impacto da injeção de argon gasoso, pelo fundo do forno, através de um tijolo poroso, na sanidade interna dos fundidos.

1.2. Apresentação da Empresa

A ZOLLERN foi fundada na Alemanha em 1708 pela família Hohenzollern, carregando consigo mais de 300 anos de história no processo de fundição por modelo em cera perdida. Compreende, neste momento, 18 unidades fabris implantadas em 3 continentes diferentes (Europa, América e Ásia). Em Portugal, a ZOLLERN & Comandita foi fundada em 1991, na freguesia de Vermoim, concelho da Maia, e conta, atualmente, com cerca de 250 colaboradores. Nesta unidade fabril, grande parte das peças produzidas são destinadas ao setor automóvel, embora, sejam também produzidas peças para outras indústrias. Estas podem pesar entre 1-2 g até 15kg e integrar séries que variam entre as 5 e as 100000 peças por lote. No que concerne às ligas e ao setor da fusão, são produzidos na ZCP diversos tipos de aço (de baixa a alta liga), sendo este o principal metal vazado. Para além do aço, são também processadas superligas de Ni, ligas de Co-Cr e de Cu-Zn.

1.3. Estrutura da Dissertação de Mestrado

A presente Dissertação está estruturada e devidamente dividida em 4 capítulos principais. No primeiro capítulo, é descrito o problema em estudo, o contexto em que este se insere na ZCP e a descrição parcial da abordagem utilizada. São também descritos os objetivos principais do trabalho e a sua relevância no contexto industrial atual. No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica das principais temáticas relevantes para o trabalho prático desenvolvido. No seguimento do mesmo, é dada especial ênfase à fusão de materiais ferrosos, assim como aos temas relacionados, como fornos de indução e processo de elaboração do banho metálico, incluindo as reações do banho com o meio e o seu processo de tratamento. São ainda abordadas, neste capítulo, as etapas de preparação de cargas e de controlo da qualidade, ambas cruciais para o caso de estudo. Todo o trabalho prático desenvolvido no âmbito deste estudo encontra-se agrupado no terceiro capítulo da Dissertação. Neste, é abordada não só a metodologia e os procedimentos experimentais adotados, mas também as etapas do processo acompanhadas durante o semestre, bem como os resultados obtidos. Por fim, no quarto e último capítulo, apresentam-se as conclusões formuladas com base nos resultados obtidos durante o estudo e um conjunto de propostas relevantes para futuras investigações.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Processo de Fundição por Modelo em Cera Perdida com Carapaça Cerâmica

A fundição por modelo em cera perdida com carapaça cerâmica (FMCP) é uma das variantes do processo *Investment Casting* (IC), tendo surgido na indústria da fundição como uma técnica altamente especializada. O seu aparecimento data de há milhares de anos, tendo sido originalmente utilizada pelas civilizações chinesa e egípcia no fabrico de peças decorativas em Cu, ligas do sistema Cu-Sn e Au [1, 2].

Sensivelmente a meio do século XX, a FMCP alavancou para um processo de fundição a nível mundial e totalmente distinto. Isto deveu-se à elevada procura, durante a II Guerra Mundial, por processos com a capacidade de produzir fundidos, de elevada complexidade geométrica, com elevada precisão dimensional e um bom grau de acabamento superficial [1-3].

A FMCP apresenta como característica de maior destaque a possibilidade de produzir peças de geometria complexa, com espessuras de parede muito finas, sem recorrer, em grande extensão, a operações de acabamento final (daí ser conhecido como um processo *near-net-shape*), comparativamente aos processos convencionais. Porém, as restrições do processo em termos de dimensões e peso dos fundidos, associadas à baixa produtividade, constituem o maior obstáculo à sua utilização; no entanto, o elevado valor acrescentado das peças obtidas por este processo, em conjunto com as vantagens já referidas, permite superar os prejuízos inerentes à baixa produtividade [2-5].

2.1.1. Etapas do Processo

O processo de FMCP é complexo pois envolve muitas etapas que têm de estar sob controlo de modo a diminuir potenciais fatores indutores de defeitos. Desde o projeto e conceção dos moldes para injeção de cera, até ao controlo da qualidade das peças produzidas, na Figura 1 estão representados os diferentes passos que constituem o processo de FMCP.

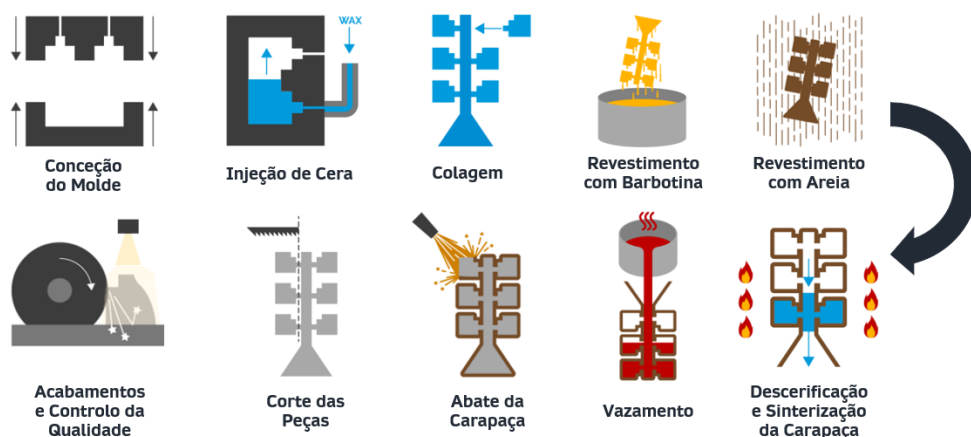


Figura 1. Esquema das etapas do processo de FMCP; adaptada de [6].

O processo tem início no projeto/concepção de um molde metálico, cuja cavidade permitirá gerar, com elevada precisão, o modelo da peça a fabricar. O material mais frequentemente utilizado para criar o modelo é a cera, devido à sua excelente capacidade de conformação; porém, é importante tomar em consideração a contração deste material aquando do dimensionamento dos moldes metálicos. O ponto de fusão da cera varia entre 55 e 90°C, sendo esta introduzida no molde metálico com recurso a uma máquina de injeção de cera [3, 7].

Após a injeção, a cera solidifica no interior do molde, seguindo-se a remoção do modelo e o seu controle visual no intento de detetar eventuais não conformidades. A fim de produzir modelos com cavidades internas, utilizam-se machos feitos com uma cera de composição química distinta, que são previamente colocados no interior do molde metálico. Posteriormente, é realizada a colagem dos modelos no gito, originando o cacho em cera [3, 7].

As etapas seguintes desenrolam-se no setor da cerâmica, no qual os cachos em cera são revestidos por uma carapaça cerâmica que constituirá a moldação. Primeiro, o cacho em cera é mergulhado numa barbotina (agregado refratário misturado com sílica coloidal e outros aditivos) com o objetivo de aumentar a aderência da areia cerâmica ao cacho; depois, é revestido com diferentes camadas de areia de refratário de granulometria definida. Este processo é repetido o número de vezes necessárias até que seja obtida a resistência da carapaça cerâmica pretendida. É necessário assegurar a adequada secagem dos materiais cerâmicos, antes da sua transição para o ciclo subsequente [2, 7].

Segue-se a etapa de remoção de cera do interior da carapaça cerâmica (descerificação). Os cachos são colocados dentro de um autoclave, onde, por ação de calor ($T \approx 180^\circ\text{C}$) e pressão (≤ 9 bar), a cera é fundida e removida do interior da carapaça. Tendo em conta que o coeficiente de dilatação térmica da cera é aproximadamente 40 vezes superior ao do material cerâmico, é importante que sejam abertos orifícios na carapaça para drenagem da cera da superfície dos modelos, antes das suas zonas mais internas aquecerem o suficiente para se expandirem [2, 7].

Após remoção da cera, as carapaças cerâmicas são colocadas num forno rotativo onde é promovida a sua sinterização, a uma temperatura entre os 870°C e os 1100°C (utilizando gás natural como combustível para se atingir esta temperatura no interior do forno). Seguidamente, as carapaças são retiradas do forno e, após o seu arrefecimento, colocadas em armazém. Posteriormente, realiza-se o vazamento do metal para o interior da carapaça cerâmica, previamente aquecida a uma temperatura estabelecida em função da liga a vazar e da geometria da(s) peça(s) a produzir [2, 7].

Por fim, os cachos arrefecem, seguindo-se o abate da carapaça cerâmica, com recurso a martelos pneumáticos, e posteriormente as operações de corte, para separar as peças do sistema de alimentação e gitage, o acabamento e o controlo da qualidade [2, 7].

2.2. Fusão

No contexto do trabalho prático desenvolvido na ZCP, é importante conhecer de forma mais profunda o processo de fusão. Deste modo, são abordados ao longo deste capítulo os principais parâmetros a considerar nesta etapa, como, por exemplo, o tipo de forno utilizado na ZCP e algumas características do processo de elaboração do banho metálico e seu posterior vazamento.

2.2.1. Fornos Elétricos de Indução

Os fornos utilizados para a elaboração dos banhos metálicos têm uma influência crucial sobre o processo produtivo e os resultados obtidos. Existe uma ampla variedade de fornos, com características específicas, nomeadamente em termos de: capacidade, frequência de operação, se dispõem ou não de núcleo magnético e se operam por aquecimento direto ou indireto. Todavia, neste capítulo serão apenas abordados os fornos elétricos de indução de cadinho (fornos de indução sem núcleo magnético de aquecimento indireto).

A indução no processo de fusão corresponde ao método utilizado para aquecer materiais eletricamente condutores, como os metais. O princípio de funcionamento de um forno de indução é semelhante ao de um transformador, em que é aplicada uma corrente elétrica alternada sobre uma bobine de fios condutores, criando-se um campo magnético à sua volta. À medida que este campo varia (alterna), gera uma corrente elétrica sobre uma segunda bobine de fios condutores. A este processo dá-se o nome de indução eletromagnética pois a corrente gerada num fio condutor é induzida sobre um segundo fio, também este condutor. Num forno de indução de cadinho (Figura 2), o processo é muito semelhante; a única diferença é que a segunda bobine de fios condutores anteriormente referida é na verdade a carga metálica, que aquece e funde por ação da corrente elétrica aplicada sobre si (efeito de Joule) [8-10].

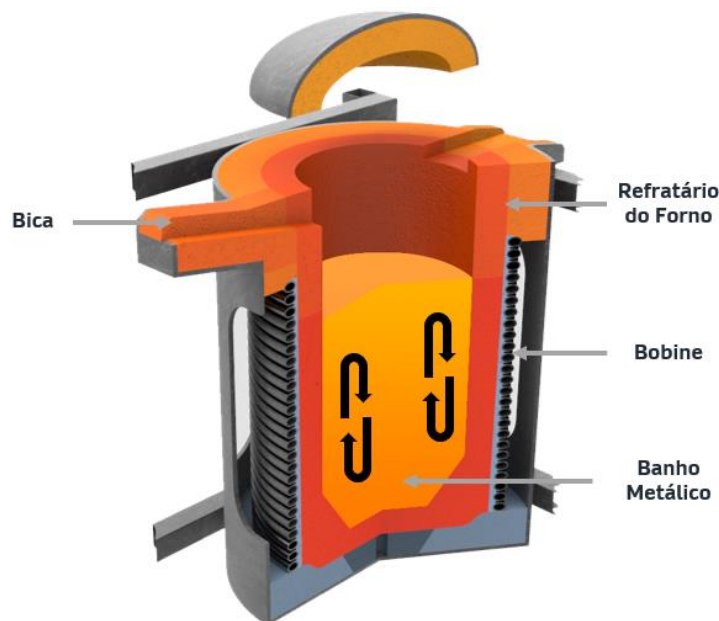


Figura 2. Representação esquemática de um forno de indução de cadinho; adaptada de [11].

Os fornos de indução de cadinho são constituídos por uma bobine, em tubo de cobre que induz a corrente sobre a carga metálica. Essa bobine é arrefecida com água, através de um sistema de refrigeração, e encontra-se montada numa estrutura basculante em aço. A bobine é revestida por um refratário apisoado (compactado) e posteriormente sinterizado, que constitui o cadinho (Figura 2) [7, 12-14].

Normalmente, os fornos de indução são caracterizados pela sua frequência e potência máxima. A maioria opera entre os 200 e 3000 Hz, sendo o seu valor determinado pela carga metálica a fundir e pela profundidade de aquecimento necessária, bem como pelo grau de agitação a promover no banho metálico. No caso da fusão de aços, as potências especificadas para este tipo de fornos rondam os 560 kWh/t. de metal [10, 12-16].

Como é possível visualizar na Figura 2, todo o banho metálico é agitado pelo campo eletromagnético, permitindo obter uma melhor homogeneização em termos de composição química e temperatura. O grau de agitação está diretamente relacionado com a potência e frequência do forno, sendo o seu aumento promovido pela utilização de elevadas potências e baixas frequências. Quanto maior for o grau de agitação do banho, maior é a probabilidade de absorção de gás [7, 10, 12-15].

Os fornos de indução de cadinho proporcionam um excelente controlo metalúrgico, conjuntamente com uma excelente eficiência térmica e um baixo impacto ambiental, sendo estes os mais adequados para a fusão de ligas ferrosas. Uma das grandes vantagens da sua utilização é a versatilidade de ligas metálicas que podem fundir, permitindo cumprir os requisitos de composição química estabelecidos. Contudo, é necessário avaliar a retenção de elementos no revestimento do forno, não só entre operações com banhos metálicos da mesma liga, mas principalmente entre banhos metálicos de ligas distintas, de forma a evitar a contaminação entre fusões e, conseqüentemente, possíveis desvios de composição química. A capacidade de garantir uma boa homogeneização do banho metálico e de permitir a realização de ajustes graduais de composição química (através da adição de elementos de liga) são também duas vantagens relevantes que a utilização dos fornos de indução de cadinho confere [7, 10, 12-14].

2.2.1.1. Revestimentos Refratários do Forno

O refratário é um componente fundamental do forno e a sua seleção depende da temperatura de trabalho, do tipo de liga a elaborar e do índice de basicidade da escória associada à sua produção. É de capital importância considerar estas variáveis na seleção do refratário a fim de minimizar as reações entre o metal/escória e o refratário, que promovem a sua rápida degradação. O refratário é o componente do forno que mais desgaste sofre, pelo que tem de ser substituído com alguma regularidade [7, 13].

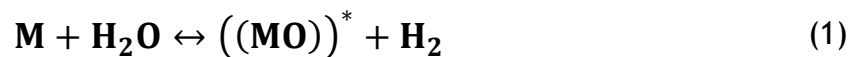
Os revestimentos mais comuns são os siliciosos e os aluminosos. Os primeiros apresentam um carácter ácido, sendo normalmente utilizados na elaboração de ligas ferrosas uma vez que não reagem extensivamente com a escória ácida formada, constituída principalmente por ortossilicatos de ferro. Por sua vez, os revestimentos aluminosos são neutros e são normalmente utilizados quando existe a necessidade de recorrer a um revestimento de refratariedade mais elevada devido às elevadas

temperaturas associadas ao processo. No entanto, há que ter em atenção a sua menor resistência ao choque térmico [7, 17].

2.2.2. Reações do Banho Metálico com o Meio Envolvente

A fusão é uma forma antiga e relativamente simples de combinar diferentes materiais metálicos. É elaborado um banho metálico, cuja monitorização da temperatura e composição química permite obter, com elevado rigor, a liga que se pretende vazar. A reatividade do metal líquido a elevadas temperaturas é, de um modo geral, considerável e as reações do banho metálico com o meio envolvente (principalmente na fusão ao ar atmosférico) são um dos pontos chave a ter em atenção na produção de ligas metálicas. Assim, é necessário um bom controlo do processo de fusão para prevenir a formação de inclusões e a incorporação de gases no banho metálico [10, 18, 19].

A incorporação de H é um fator comum, associada à presença de humidade no revestimento refratário, na carga metálica, ou até mesmo na própria atmosfera envolvente [10, 18, 19]. A reação entre o metal e a água é traduzida pelo equilíbrio:



* (x) – óxido presente na escória

A temperaturas elevadas, ocorre a dissociação das moléculas de hidrogénio, segundo o equilíbrio:



* \underline{x} – elemento em solução no banho metálico

Às temperaturas de operação, os átomos de H difundem-se livremente no banho, podendo originar defeitos críticos nas peças finais, como porosidade ou fragilização pelo H, devido à diminuição da sua solubilidade e mobilidade no metal durante a solidificação. O teor de H, em solução no banho metálico, pode ser estimado por aplicação da lei de Sievert, a partir da pressão parcial de H no equilíbrio (reação 2) [10, 18, 19]:

$$\mathbf{x}_{\underline{\mathbf{H}}} = \sqrt{k p_{\mathbf{H}_2}} \quad (3)$$

O H presente no banho metálico pode surgir nos fundidos sob a forma de solução sólida intersticial ou segregado nas imperfeições da estrutura cristalina em zonas próximas de microporos ou em precipitados de uma segunda fase com os quais reagiu [19].

2.2.2.1. Formação de Filmes de Óxidos

Devido à interação do metal líquido com a atmosfera envolvente, criam-se na sua superfície filmes de óxidos. A viabilidade termodinâmica de ocorrência de uma reação química, mormente a formação de um óxido de um dado elemento, a uma dada

temperatura, é aferida pela variação da energia livre de *Gibbs* (ΔG°), associada a essa reação e a essa temperatura, também conhecida por energia livre de formação desse óxido. Esta expressa a afinidade que um determinado elemento apresenta relativamente ao oxigénio. Quanto mais negativo for o seu valor, maior é a reatividade desse elemento, *i.e.*, maior a sua propensão para reagir com o oxigénio e formar um óxido estável. Assim, em 1944, surgiu o diagrama de *Ellingham* (Figura 3), que expressa graficamente a relação entre a temperatura e a energia livre de *Gibbs*/potencial químico de oxigénio para reações de oxidação de diversos elementos [20].

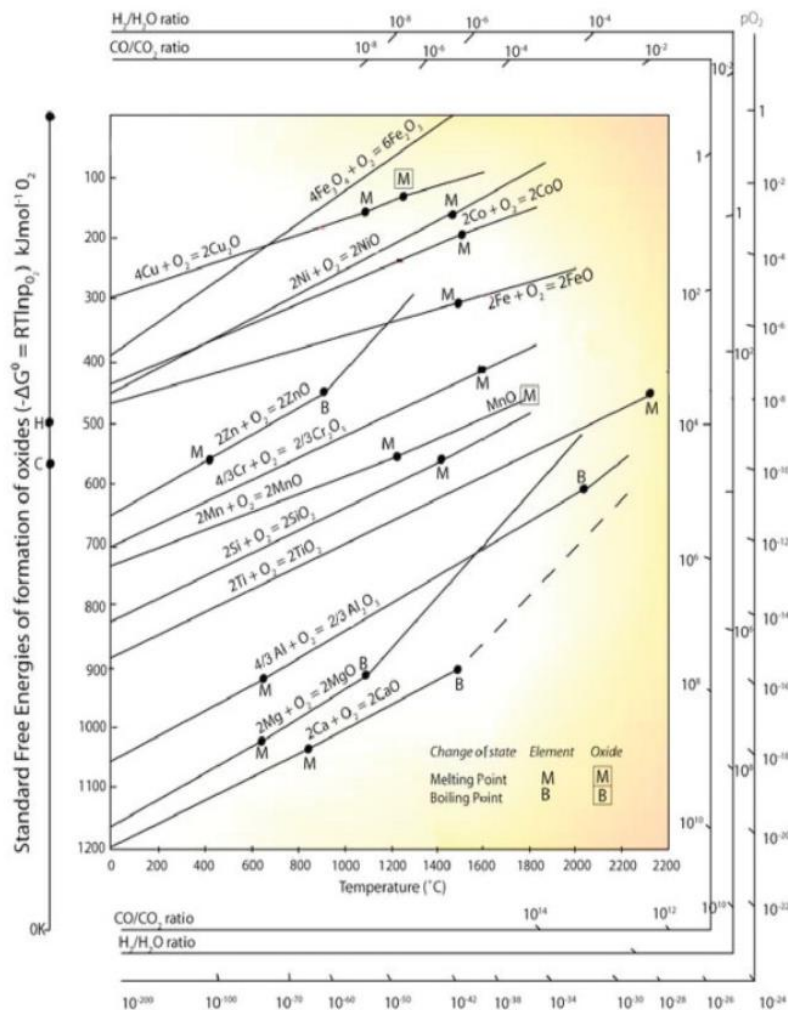


Figura 3. Diagrama de Ellingham [21].

Na temática dos filmes de óxidos, a formação de bi-filmes é um importante aspeto a considerar. Estes têm origem quando, por agitação do banho metálico, os filmes de óxidos criados dobram sobre si mesmos e ficam aprisionados no seio do banho (Figura 4). Os bi-filmes apresentam uma morfologia semelhante a uma fenda, *i.e.*, uma forma irregular e de comprimento considerável. Estes podem ser simplesmente dois filmes de óxidos unidos, ou conter no seu interior gás (aprisionado devido à agitação do banho metálico) ou até mesmo metal. Estes são um dos principais responsáveis pelo aparecimento de defeitos nos fundidos pois são difíceis de evitar [22].

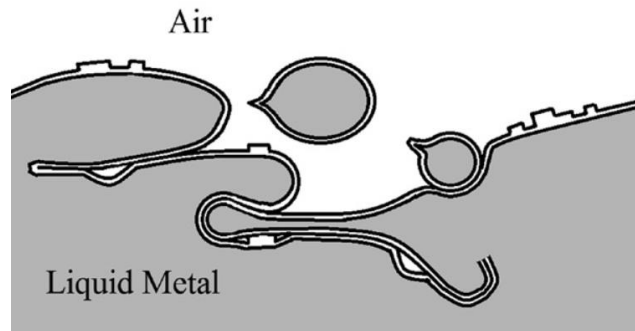


Figura 4. Formação de bi-filmes de óxidos [23].

2.2.3. Escória

A escória é um subproduto inevitável de todos os processos de fusão, resultante do desgaste do revestimento refratário do forno, de impurezas eventualmente presentes nas matérias-primas da carga e, principalmente, das reações de oxidação entre os elementos do banho metálico e a atmosfera. Os seus principais constituintes são: MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO e óxidos de ferro [24-27].

Um importante parâmetro a ter em consideração é o índice de basicidade das escórias. Este é estabelecido pelo quociente entre os somatórios dos teores de todos os radicais básicos e de todos os radicais ácidos. A sua temperatura de fusão e fluidez são também parâmetros de elevada relevância [24-27].

Durante a operação do forno, as correntes de indução promovem a mistura da escória com o banho metálico. Impõe-se assim, imediatamente antes do seu vazamento, promover uma decantação adequada dessa escória, pelo que se desliga o forno por breves instantes e se adiciona um escorificante à superfície do banho [17].

2.2.4. Fluidez do Banho Metálico

A fluidez do banho metálico determina a capacidade que o metal tem em preencher integralmente uma cavidade moldante, sobretudo as secções de menor espessura, aquando do seu vazamento. Esta é uma propriedade empírica e complexa que é influenciada pelas propriedades físico-químicas da liga metálica [10, 28].

A presença de gases em solução, óxidos, ou outras impurezas podem reduzir de forma acentuada a fluidez do metal, uma vez que limitam o rendimento de adição do Si, elemento que promove o aumento desta propriedade. Um banho adequadamente limpo possibilita a utilização de temperaturas de vazamento mais baixas e a obtenção de peças com melhores propriedades mecânicas [10, 28].

2.2.5. Desvanecimento de Elementos de Liga

O desvanecimento de elementos de liga do banho metálico, durante a sua elaboração e vazamento, é um processo que deve ser sempre tomado em atenção, com vista a serem atingidas as especificações de composição química. Existem dois tipos principais de

desvanecimento: o que ocorre por vaporização dos elementos, e o resultante das reações do banho metálico com a atmosfera.

2.2.5.1. Vaporização

Durante a fusão, as temperaturas atingidas podem ultrapassar facilmente os 1500°C, atingindo assim valores acima dos pontos de ebulição de alguns elementos presentes no banho metálico. A evaporação destes elementos pode originar problemas, principalmente em termos de rendimento de adição, com consequências sobre a composição final do banho metálico [29].

2.2.5.2. Reações do Banho Metálico

Num processo de fusão, no seio de uma atmosfera livre, vários elementos presentes no aço líquido reagem com o oxigênio e o azoto até se atingir um estado de equilíbrio entre o banho metálico e a atmosfera envolvente. A reação mais relevante para o seu desvanecimento é a oxidação [30].

Nos aços mais comumente elaborados pela ZCP, os elementos mais suscetíveis ao desvanecimento por oxidação são: C, Mn, Cr, Si, Ti e V. Todos apresentam um elevado impacto sobre as propriedades mecânicas dos aços pelo que o seu desvanecimento tem de ser cuidadosamente considerado e interpretado. O desvanecimento de elementos tem uma relação intrínseca com a composição química da liga a produzir, as dimensões do forno (sobretudo em termos da área da superfície livre do banho metálico), a frequência a que opera, o grau de sobreaquecimento do banho e a duração da fusão (Figura 5) [30].

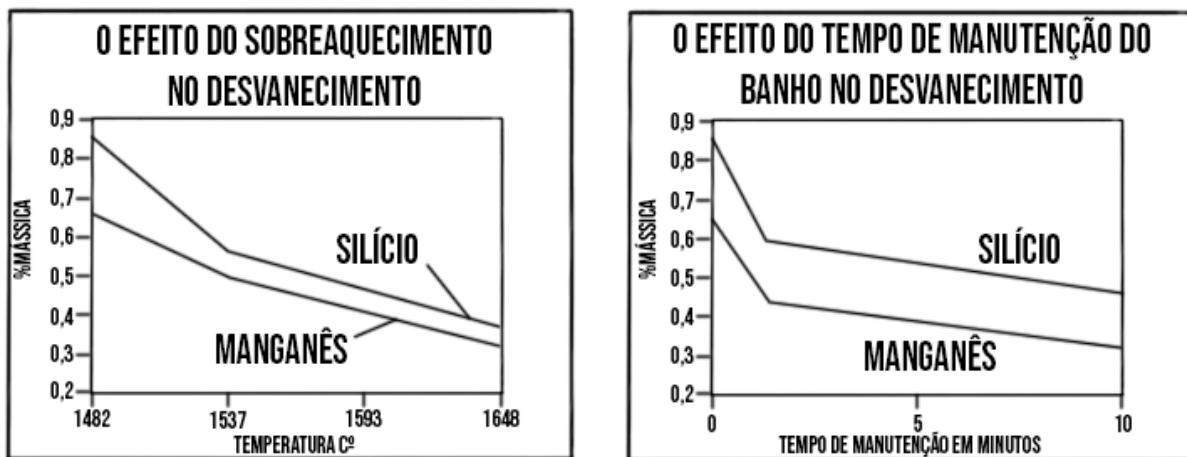


Figura 5. Influência do grau de sobreaquecimento do aço líquido e duração da sua fusão sobre o desvanecimento do Si e do Mn; adaptada de [30].

2.2.6. Tratamento do Banho Metálico

A elaboração de uma liga, em conformidade com as especificações, requer a aplicação de várias práticas de tratamento do banho metálico. Entre estas, podemos considerar a desoxigenação do banho metálico, a utilização de escorificantes e a aplicação de uma cortina protetora de argon sobre a superfície livre do banho ou a injeção desse gás pela parte inferior

do forno de indução. Deste modo, ao longo deste capítulo, são descritas as diferentes etapas de tratamento do banho metálico.

2.2.6.1. Desoxigenação

É importante conhecer o teor de oxigénio de um banho metálico, a fim de garantir a composição química e sanidade requeridas para uma dada liga. O teor de oxigénio de um banho metálico pode ser determinado, fundamentalmente, de duas formas: análise química, ou através de uma sonda de oxigénio.

O processo de remoção de oxigénio de um banho de aço é feito principalmente através do método de desoxigenação por precipitação pois é o que proporciona os melhores resultados. Este método consiste na adição de elementos químicos ao banho que apresentam uma maior afinidade para o oxigénio do que o Fe, formando-se óxidos que, após decantação, são incorporados na escória [17, 31].

Da análise do diagrama de *Ellingham* (Figura 3) é possível avaliar, de forma expedita, a afinidade de determinados elementos para o oxigénio e assim compreender o seu poder desoxigenante do banho metálico. Elementos como o Si, Mn, Al, Mg e Ca têm maior afinidade para o oxigénio que o Fe, pelo que se oxidam preferencialmente. Estes são frequentemente utilizados, a nível industrial, para promover a desoxigenação do banho metálico. Ocasionalmente, elementos como o Ti, Zr, B, Ce, V e Nb podem também ser utilizados; contudo, são bastante mais caros que os mencionados em primeiro lugar [20, 31].

A desoxigenação do banho metálico de aço pelo Al é preferível à promovida pelo Si, visto que esta última leva à formação de óxidos de remoção mais difícil. Quando são utilizados vários elementos para a desoxigenação do banho, a operação é considerada complexa. Este tipo de desoxigenação pode ser muito relevante no controlo da modificação química e morfológica das inclusões. Conhecer as práticas de desoxigenação e os seus efeitos no banho metálico é fundamental para controlar o tipo, características e quantidade de inclusões formadas [32, 33].

O processo de desoxigenação deve ser realizado com o forno colocado na sua posição vertical visto que a sua inclinação promove um aumento da superfície livre do banho metálico em contacto com a atmosfera envolvente, potenciando as interações entre esses meios. A desoxigenação do banho, para um grau de inclinação elevado, para além de ser pouco eficiente, pode originar inclusões de elevadas dimensões, prejudiciais para a qualidade dos fundidos [34].

Na Tabela 1 são apresentadas as principais reações que ocorrem durante a desoxigenação, em função dos elementos desoxigenantes adicionados ao banho de aço.

Tabela 1. Principais reações de desoxigenação do banho de aço e valores da energia livre de Gibbs (ΔG°) de formação dos respectivos óxidos [33]

Reação Química	ΔG° (kJ/mol)
$2\text{Al} + 3\text{O} \Leftrightarrow ((\text{Al}_2\text{O}_3))$	$-1225 + 0,393T$
$\text{Ca} + \text{O} \Leftrightarrow ((\text{CaO}))$	$-491,14 + 0,1465T$
$\text{Si} + 2\text{O} \Leftrightarrow ((\text{SiO}_2))$	$-576,44 + 0,218T$
$\text{Mn} + \text{O} \Leftrightarrow ((\text{MnO}))$	$-288,12 + 0,1283T$

A operação de desoxigenação pode ser dividida em quatro etapas, que ocorrem de forma sequencial [31]:

- I. Dissolução e repartição de forma homogênea do elemento desoxigenante no banho metálico;
- II. Nucleação homogênea do produto de desoxigenação;
- III. Progressão da desoxigenação, com aumento da fração de produtos daí resultantes;
- IV. Decantação do produto de desoxigenação do banho que irá ser incorporado na escória.

2.2.6.2. Escorificação

A escorificação é, na grande maioria das vezes, um dos passos mais importantes para garantir um banho metálico limpo, podendo ser efetuada ao longo das diferentes fases do processo de fusão. Esta etapa consiste na adição de um composto químico (ou mistura de compostos) ao banho, designado escorificante, que promove a remoção das impurezas do interior do banho para a escória e a sua aglomeração. Na fusão do aço, o escorificante apresenta duas ações fulcrais: transformar as impurezas em produtos passíveis de serem escorificados, e fornecer um composto que tem maior afinidade para as impurezas do que o banho metálico [12, 35].

De um modo geral, o escorificante consiste numa mistura de sais de elementos metálicos, sob a forma granular. A fim de assegurar a remoção eficaz das impurezas do banho, o escorificante deve apresentar, à temperatura de operação, uma boa fluidez e decompor-se em aniões, tais como nitratos, carbonatos ou sulfatos, de modo a potenciar a sua reação com essas impurezas. O tipo de escorificante depende diretamente da composição química do banho metálico e do revestimento refratário do forno [12, 35].

2.2.6.3. Utilização de Árgon

O árgon, no estado gasoso ou líquido, pode ser utilizado para assegurar a obtenção de um banho metálico com um grau de limpeza mais elevado. Este pode ser aplicado sobre

a superfície livre do banho metálico, criando uma camada de argon protetora que permite minimizar as interações com a atmosfera envolvente, nomeadamente a oxidação. Por sua vez, a aplicação de argon no estado líquido assegura uma proteção mais eficiente do que a do argon no estado gasoso [17, 36, 37].

Outra forma de aplicação do argon, embora com um objetivo diferente, consiste na sua injeção através de um tijolo poroso colocado na base do forno de indução (Figura 6). Este método potencia, devido à agitação do banho, não só a decantação das impurezas, mas também uma maior homogeneização em termos da sua composição e temperatura. Durante esta operação, o forno deve permanecer desligado para permitir que óxidos e/ou partículas indesejáveis decantem para a superfície, procedendo-se de seguida à sua remoção, normalmente de modo manual [17, 36, 38].

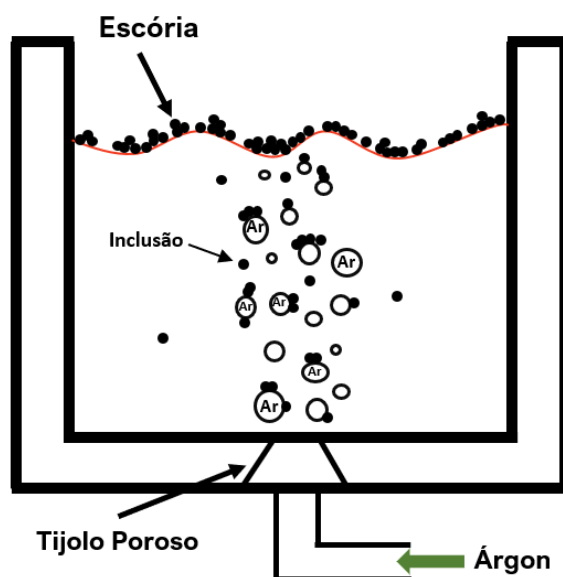


Figura 6. Injeção de argon através do tijolo poroso, para remoção de impurezas; adaptada de [39].

As referidas técnicas, para além de permitirem a obtenção de um banho metálico com um grau de limpeza mais elevado, proporcionam também o aumento da vida útil do revestimento refratário do forno e da fluidez do banho metálico (menor quantidade de impurezas no seu seio). Um banho protegido por um gás inerte promove uma diminuição do volume de escória formada, e assegura uma menor quantidade de inclusões nos fundidos. Assim, a utilização de argon não só melhora a qualidade dos fundidos, como também permite obter retornos mais limpos, potenciando a sua reutilização em fornadas subsequentes [17].

2.2.7. Vazamento

O vazamento é uma etapa minuciosa, subsequente ao processo de fusão, com uma elevada influência sobre a qualidade dos fundidos. O controlo da temperatura do metal antes do vazamento e a velocidade a que este se processa são os principais parâmetros a considerar nesta etapa do processo. A temperatura de vazamento situa-se geralmente a cerca de 110 a 165°C acima do ponto de fusão da liga metálica. O sobreaquecimento

excessivo do banho é a causa de muitos defeitos de fundição (porosidade, rechupes e fissuração a quente), contribuindo também para a ineficiência do processo, nomeadamente a redução da vida útil dos refratários dos fornos de indução e o aumento da incidência dos custos energéticos. Por outro lado, uma temperatura de vazamento demasiado baixa pode também originar defeitos críticos (mal-cheio), para além de permitir que mais material se deposite sobre o refratário do forno, diminuindo assim o seu volume e a eficiência energética [30, 40, 41].

A velocidade de vazamento depende diretamente da eventual necessidade de assegurar uma uniformidade térmica durante a solidificação do metal. Caso seja necessária essa uniformidade, então o vazamento deve ser realizado de forma célere, de modo a evitar a criação de gradientes térmicos. Quando tal não se impõe, então realiza-se um vazamento mais suave de forma a reduzir a turbulência do metal no interior da carapaça cerâmica. A altura a que se processa o vazamento e o grau de inclinação da colher permitem estabelecer a velocidade a que este é realizado. Quando a velocidade de vazamento é demasiado baixa, a probabilidade de um enchimento deficiente da cavidade moldante aumenta, potenciando o aparecimento de defeitos (mal-cheio). Quando a velocidade de vazamento é demasiado elevada, cria-se, tal como anteriormente referido, uma elevada turbulência no metal líquido, o que propicia a incorporação de gases e filmes de óxidos. O tempo de vazamento ideal é estabelecido com base nas dimensões e geometria da carapaça cerâmica, na temperatura de vazamento, nas características de solidificação da liga, na sensibilidade da liga à fissuração a quente e nas características da carapaça cerâmica, em termos de transferência de calor e estabilidade térmica [30, 40].

2.2.8. Carapaça Cerâmica

A escolha dos materiais para a produção das carapaças cerâmicas é de capital importância uma vez que estes se encontram em contacto direto com o metal líquido (elevada reatividade). Os critérios de seleção utilizados apoiam-se nas propriedades dos materiais a utilizar, nomeadamente [42, 43]:

- estabilidade química dos seus constituintes;
- temperatura de fusão/amolecimento;
- propriedades térmicas;
- disponibilidade/preço.

A Tabela 2 apresenta algumas propriedades térmicas dos materiais cerâmicos utilizados na produção das carapaças cerâmicas.

Tabela 2. Propriedades térmicas de alguns materiais refratários utilizados no fabrico de carapaças cerâmicas [44]

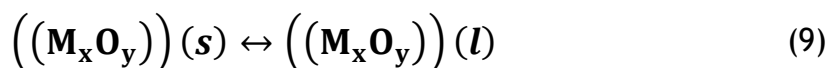
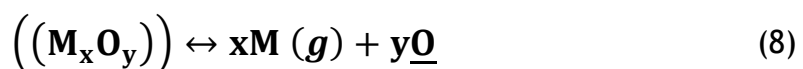
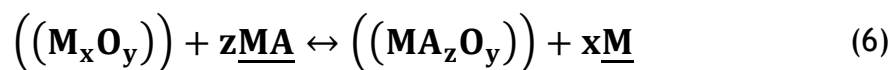
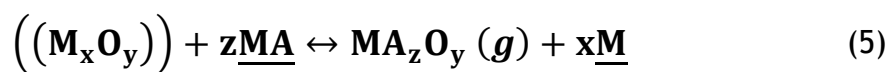
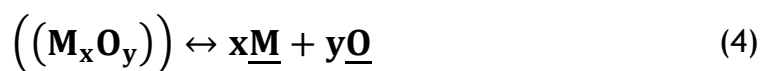
Óxidos	ΔG° a 1000K (kJ/mol)	Temperatura de amolecimento (°C)	Coefficiente de expansão térmica ($\times 10^{-6}K^{-1}$); 20-1000°C	Condutividade térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$); 20°C
Y ₂ O ₃	1079,1	1811	8,1	8-12
ZrO ₂	895,1	2036	10 (ZrO ₂ /6% CaO)	2,5(ZrO ₂ /6%CaO)
CaO	1069,4	2195	-	-
MgO	997,2	2139	-	-
Al ₂ O ₃	906,6	1541	8,0	28-35

Como referido anteriormente, quanto mais negativa for a energia livre de *Gibbs* associada à formação de um determinado óxido, maior a sua estabilidade (Figura 3). Desta forma, a energia livre de Gibbs é uma grandeza de capital importância na avaliação do comportamento do refratário durante o vazamento e solidificação do metal [42, 43].

2.2.8.1. Interação Metal-Cerâmico

O volume de interações entre a carapaça e o metal líquido é dependente de múltiplos fatores como, por exemplo, a composição química do refratário e do metal e a extensão e tipo de contacto entre os dois sistemas. Para além disso, a temperatura e a massa de metal são igualmente fatores críticos a ter em consideração [45].

As reações químicas, representativas da interação metal-carapaça, podem ser representadas pelos seguintes equilíbrios [44, 46]:



em que (M_xO_y) corresponde a um óxido, MA a um elemento de liga e M e O a um elemento metálico e ao oxigênio em solução, respetivamente.

A reação (4) diz respeito à decomposição térmica de um constituinte da carapaça cerâmica e consequente dissolução no metal líquido dos seus componentes. As reações 5, 6 e 7 traduzem a reação do metal fundido com a carapaça cerâmica. A reação 5 é particularmente importante quando os produtos gasosos atingem uma pressão de vapor superior à de trabalho. Um exemplo da reação 5 será a descarburagem do aço. A reação 6 corresponde ao processo de redução de um dos constituintes da carapaça cerâmica, com formação de um novo óxido metálico, mais estável que o anterior. A reação 7 é muito semelhante à 6, mas envolve a formação de óxidos duplos. Por fim, a reação 8 descreve a obtenção de um produto de reação gasoso no metal e o equilíbrio 9 reporta-se à fusão de um dos constituintes cerâmicos da carapaça [44, 46].

No caso específico do vazamento de aços, e quando a carapaça cerâmica é constituída essencialmente por silicatos, sendo a sílica o ligante, a interação entre os dois sistemas resulta na formação de uma fina camada de ferro, que praticamente não contém elementos de liga, sobre a carapaça cerâmica. Esses elementos difundem-se para a primeira camada do revestimento cerâmico, ocorrendo a sua mistura com o ligante, o que provoca pequenas alterações na composição química do fundido à sua superfície.

Esta interação ocorre até uma profundidade de aproximadamente 85 μm , a partir da qual o metal líquido não promove alterações das propriedades da carapaça cerâmica. Para além disso, atendendo à velocidade de entrada do metal na moldação, pode ocorrer uma deterioração física da carapaça cerâmica, o que leva à incorporação de partículas de óxidos no metal líquido, constituindo inclusões [42, 45].

2.3. Preparação das Cargas

No contexto da elaboração de um banho metálico, é importante otimizar a etapa de preparação das cargas uma vez que esta desempenha um papel crucial em termos da qualidade do banho.

2.3.1. Matérias-Primas

Os materiais utilizados no processo de fusão são uma parte considerável do investimento feito na produção e, por isso, existe uma tendência natural nas empresas em reduzir custos através da utilização de materiais de qualidade inferior. Porém, esta opção tem um limite a partir do qual a taxa de refugo, por lote fabricado, começa a aumentar devido à ocorrência de defeitos como porosidade e inclusões [34, 47].

A constituição da carga metálica usada na elaboração dos banhos de aço na ZCP pode ser dividida em dois grupos principais de matérias-primas: retornos, constituídos pelos sistemas de gítagem e alimentação de vazamentos anteriores e peças rejeitadas pelo controlo da qualidade; matérias-primas novas, como por exemplo FeCr 70, FeSi 75, Fe Armco e alguns elementos de elevada pureza [17].

2.3.2. Cuidados na Preparação de Cargas

É crucial que as matérias-primas utilizadas na elaboração do banho metálico se apresentem bem limpas, *i.e.*, isentas de óxidos superficiais, sujidades, óleos e humidade, de modo a reduzir a quantidade de escória, bem como a incorporação de gases no banho metálico. Assim, estas devem ser devidamente separadas e armazenadas em locais cobertos e pouco húmidos [48].

A granalhagem é uma forma de promover a limpeza superficial dos materiais. Esta consiste na projeção de um material abrasivo, de pequena dimensão e formato esférico (granalha), sobre a superfície dos materiais. Este processo promove a remoção das camadas de óxidos e dos resíduos cerâmicos que contaminariam o banho metálico, originando inclusões nos fundidos [17].

2.3.3. Sequência de Carregamento

As matérias-primas das cargas dos fornos de indução diferem principalmente em termos de composição, forma, dimensões, densidade média e ponto de fusão. Por sua vez, a composição química, temperatura e grau de agitação do banho metálico influenciam o tempo de fusão e a dissolução dos materiais adicionados. Quando uma dada matéria-prima entra em contacto com o banho metálico, forma-se uma camada sólida à sua volta, resultante do arrefecimento abrupto do banho metálico envolvente, retardando assim a sua fusão/dissolução. Com a fusão gradual do material adicionado e a constante agitação do banho, ocorre a sua dissolução, obtendo-se um banho com composição homogénea. Quanto maiores forem as dimensões do material adicionado, mais demorada será a sua dissolução, obtendo-se rendimentos térmicos de operação mais baixos [17, 49].

A sequência de carregamento para elaboração de um banho metálico é muito importante e, caso seja descuidada, poderá levar a que o efeito da oxidação seja severo e fora de controlo, prejudicando a qualidade final dos fundidos. A planificação do carregamento deve ser realizada com base na Termodinâmica, de forma a assegurar uma reação adequada dos diferentes componentes da carga, ou seja, deve ser considerada a sua afinidade para o oxigénio. Se não forem atendidos os princípios termodinâmicos, dentre os vários problemas suscetíveis de ocorrer, destacam-se: elevada fração de inclusões no metal; diminuição da fluidez do banho metálico; e baixa sanidade interna dos fundidos. A título de exemplo, apresenta-se na Tabela 3 a constituição de uma carga simples, compreendendo apenas quatro componentes [17, 34].

Tabela 3. Componentes de uma carga de fusão típica da ZCP, e respetiva ordem de oxidação dos materiais [34]

Material	Energia livre de Gibbs de formação de diferentes óxidos, a 1300°C (kJ/mol)	Ordem de oxidação
FeCr 70	-474,37 ± 16,74 (Cr ₂ O ₃)	3
Fe Armco	-322,45 ± 12,55 (Fe ₂ O ₃)	4
FeSi 75	-600,59 ± 12,55 (SiO ₂)	1
Mn	-539,00 ± 12,55 (MnO)	2

A sequência de adição destes materiais é realizada com base no aumento progressivo da sua reatividade para com o oxigénio, *i.e.*, parte-se do componente menos reativo (4) para o mais reativo (1). Uma sequência de carregamento adequada potencia a obtenção de uma composição química final próxima dos *targets* estabelecidos. Se o material mais reativo fosse adicionado em primeiro lugar, este seria gradualmente consumido até ao final da elaboração do banho metálico, daí resultando um rendimento de adição muito baixo [17, 34].

2.4. Controlo da Qualidade

Em qualquer etapa do processo de IC impõe-se o recurso ao controlo da qualidade para garantir, no final da cadeia de produção, a obtenção de produtos que cumpram com os requisitos do cliente. Em qualquer organização, o controlo da qualidade tem influência direta sobre os custos globais de produção. O custo da qualidade é um indicador industrial utilizado para avaliar o investimento no controlo da qualidade e o dispêndio associado à obtenção de produtos não conformes [50].

O investimento no controlo da qualidade reparte-se por custos de prevenção e custos de avaliação. Por sua vez, os custos de produtos não conformes repartem-se entre custos de não conformidade detetada dentro e fora da empresa [50]. A não conformidade de uma peça depende, entre outros parâmetros, da presença de defeitos. Os principais defeitos de fundição observados na ZCP são:

- inclusões: presença de partículas estranhas, *i.e.*, óxidos metálicos ou não metálicos, na matriz metálica, como por exemplo escória, resíduos de produtos de adição insuficientemente dissolvidos ou partículas de cerâmico da carapaça [51];
- porosidade: excesso de gás dissolvido no aço líquido, após vazamento [17];
- mal-cheio: resultante da incapacidade do metal em preencher totalmente a cavidade moldante, originando zonas sem metal. As causas associadas a este tipo de defeito são: velocidade e temperatura de vazamento inadequadas, baixa fluidez do metal e elevada complexidade da cavidade moldante [17, 51];

- fissuração a quente: presença de fendas recortadas e irregulares sobre a superfície dos fundidos. Ocorre quando o metal ainda se encontra a temperaturas elevadas, no estado líquido ou pastoso, sendo a sua contração condicionada pela carapaça cerâmica [51].

No contexto do trabalho desenvolvido, as inclusões e porosidades são os principais defeitos a considerar.

2.4.1. Inclusões

As inclusões têm elevado impacto sobre as propriedades mecânicas do aço, a qualidade superficial das peças produzidas e a sua resistência à corrosão. Na Tabela 4 são apresentadas algumas causas e as correspondentes medidas corretivas para este tipo de defeito.

Tabela 4. Potenciais causas para o aparecimento de inclusões e respetivas medidas corretivas [52]

Causas	Medidas corretivas
Contaminação da carga	Granalhagem/limpeza da carga para remover camadas de óxidos ou de refratário, óleos ou emulsões
Formação de inclusões durante a etapa de desoxigenação do banho metálico	Modificação da operação de desoxigenação
Partículas de refratário do forno e da colher	Utilização de um refratário mais adequado e compatível com a basicidade da escória
Partículas de refratário da carapaça cerâmica	Sinterização e temperatura da carapaça adequada antes do vazamento
Incorporação de escória e/ou bi-filmes de óxidos durante o vazamento	Desoxigenação mais adequada e limpeza do banho metálico

Existem diferentes critérios de classificação de inclusões presentes nos aços; os mais utilizados assentam na origem, tamanho e momento de formação das inclusões [32].

Consoante a sua origem, as inclusões podem ser divididas em endógenas e exógenas. As inclusões endógenas resultam, tal como a sua designação indica, de reações que ocorrem no seio do banho metálico, devido à oxidação excessiva, a más práticas de desoxigenação, ou como resultado da formação de óxidos no seio do metal durante a sua solidificação. Por sua vez, as inclusões exógenas resultam da incorporação de escórias, de partes de refratário do forno ou da carapaça cerâmica e de outros materiais com os quais o banho metálico entra em contacto. A origem deste segundo tipo de inclusões é mais difícil de determinar pois é necessário considerar a composição dos diferentes materiais

que contactam com o metal líquido, bem como as diversas reações que podem ocorrer entre si [32].

As inclusões podem ainda ser classificadas em primárias, secundárias, terciárias ou quarternárias, em função do momento da sua formação. As primárias formam-se imediatamente após a adição de elementos desoxigenantes ao banho metálico; as secundárias, durante o arrefecimento do metal até ao início da sua solidificação; as terciárias, durante o arrefecimento do metal entre a temperatura de *liquidus* e de *solidus*; e, finalmente, as inclusões quaternárias, durante o arrefecimento do metal a partir de uma temperatura inferior à de *solidus*. É muito difícil a remoção das inclusões secundárias e terciárias, sendo praticamente impossível a eliminação das quaternárias [32].

Entre os diversos tipos de classificações de inclusões, destaca-se a estabelecida por Jernkontoret [32], apresentada na Figura 7. As inclusões são agrupadas em quatro tipos (de A a D), sendo a sua fração classificada numa escala de 1 a 5 (ordem crescente).

A Tipo Sulfureto		B Tipo Alumina		C Tipo Silicato		D Tipo Óxido, Globular			
Série fina Espessura até 4µm	Série grossa Espessura até 6µm	Série fina Espessura até 9µm	Série grossa Espessura até 15µm	Série fina Espessura até 5µm	Série grossa Espessura até 9µm	Série fina Espessura até 8µm	Série grossa Espessura até 12µm		
1									1
2									2
3									3
4									4
5									5

Figura 7. Classificação do tipo e quantidade de inclusões não metálicas presentes nos aços com base em análise metalográfica (ampliação 100X) [32].

A morfologia e dimensões das inclusões, e a sua distribuição pela matriz têm grande impacto sobre as propriedades mecânicas dos aços. A morfologia varia consoante a composição e origem das inclusões. Em termos de dimensões, as inclusões são classificadas

como submicroscópicas ($< 1 \mu\text{m}$), microscópicas ($1-100 \mu\text{m}$) e macroscópicas ($> 100 \mu\text{m}$), sendo as últimas as que apresentam maior impacto sobre as propriedades dos fundidos. Por sua vez, a distribuição pela matriz depende essencialmente das práticas utilizadas na elaboração do banho metálico [32].

2.4.1.1. Inclusões de Alumina

Tendo em conta a frequente utilização, pela ZCP, de Al para a desoxigenação dos banhos de aço, é importante compreender o mecanismo de formação de inclusões de alumina, e seu coalescimento, de modo a poder formular práticas que permitam minimizar a presença deste tipo de inclusões nos fundidos.

Segundo Sloman *et al.* [53], as inclusões de alumina têm tendência para formarem *clusters* de dimensões consideráveis (Figura 8). Os estudos desenvolvidos indicam que o *clustering* ocorre facilmente para inclusões que apresentam reduzida molhabilidade pelo banho metálico. No caso das inclusões não serem molháveis pelo metal, é potenciada, em termos de balanço energético, a remoção do filme de metal que permeia as inclusões, facilitando assim o processo de *clustering*. No caso oposto, quando apresentam elevada molhabilidade, o filme de metal permanece entre as inclusões, inibindo a sua aglomeração.

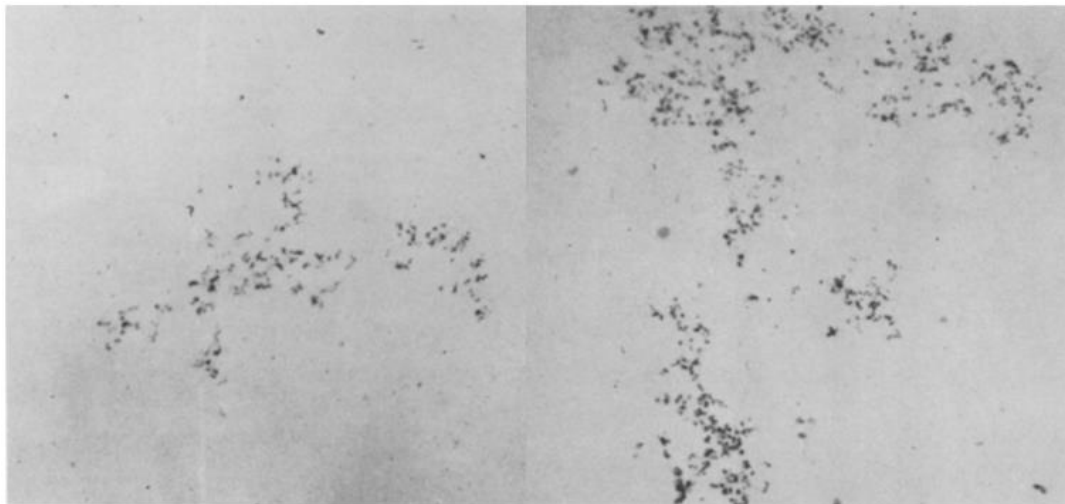


Figura 8. Clusters de inclusões de alumina em amostras de aço (100x) [54].

Da análise metalográfica convencional de superfícies polidas das amostras, os *clusters* de alumina aparentam ser constituídos por diversas inclusões perfeitamente individualizadas; porém, quando analisadas a três dimensões, constata-se que grande parte das inclusões se encontram interligadas. Assim, os *clusters* podem resultar em imperfeições graves nos fundidos caso não sejam removidos previamente ao vazamento do metal [54].

As inclusões de alumina podem apresentar quatro tipos de morfologia: dendrítica, facetada, “*plate-like*” e esférica (Anexo 1). As diferentes morfologias estão diretamente relacionadas com as propriedades interfaciais das inclusões, com impacto sobre a probabilidade de formação de *clusters* (Figura 9) [53-55].

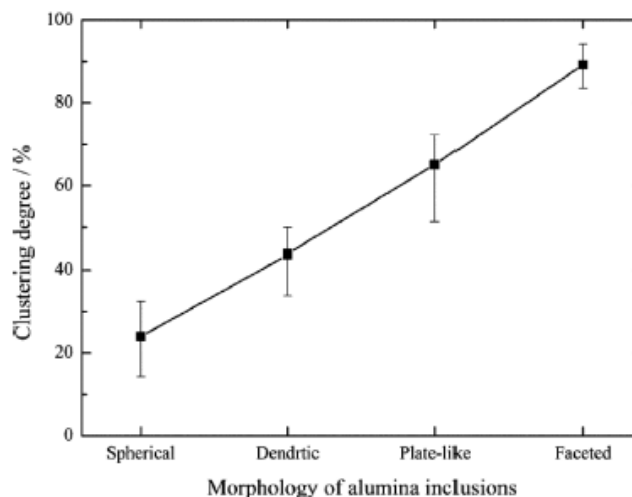


Figura 9. Grau de clustering das inclusões de alumina em função da sua morfologia [55].

Têm sido formuladas várias teorias para explicar a aglomeração das inclusões de alumina; porém, a que reúne maior consenso é a da formação espontânea de cavidades entre superfícies de inclusões não molháveis pelo aço. No seio do banho de aço, à medida que as inclusões de alumina se aproximam (por ação das correntes de convecção geradas no seio do banho metálico), constata-se uma tendência de transição da interface alumina-aço para alumina-gás devido a uma redução da energia interfacial, promovendo assim a formação de cavidades gasosas entre as partículas de alumina. Como a diminuição da energia do sistema favorece a coalescência das cavidades gasosas (menor área interfacial), gera-se uma força de atração entre as inclusões de alumina. Segundo Sasai *et al.* [56], a presença de FeO no banho potencia o *clustering* das inclusões de alumina, atuando como uma espécie de ligante [55].

Os principais fatores responsáveis pelo *clustering* são a agitação do banho metálico e o tempo de manutenção do banho a uma dada temperatura. Se o grau de agitação for moderadamente elevado e a duração de agitação suficientemente extensa, praticamente todas as inclusões formarão *clusters* [54, 57]. O gráfico patente na Figura 10 representa o efeito da agitação do banho metálico sobre as dimensões das inclusões.

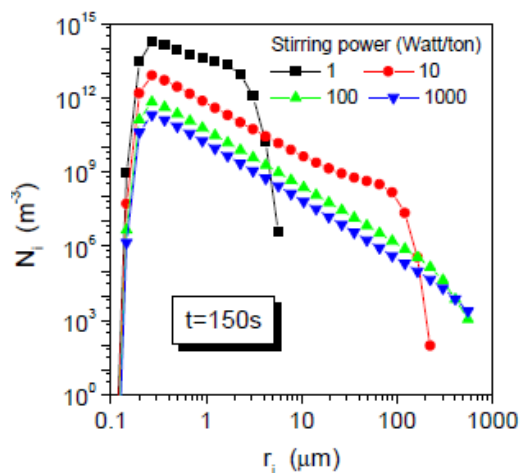


Figura 10. Efeito da agitação do banho metálico sobre a distribuição granulométrica das inclusões de alumina num banho de aço. N_i - concentração média de inclusões; r_i - raio das inclusões [57].

Para além dos dois principais fatores anteriormente enunciados, podem ainda ser tidos em consideração os teores de Al e O do banho metálico. A Figura 11 apresenta a evolução da morfologia das inclusões de alumina em função dos teores desses dois elementos, segundo os estudos desenvolvidos por Tiekink *et al.* [58].

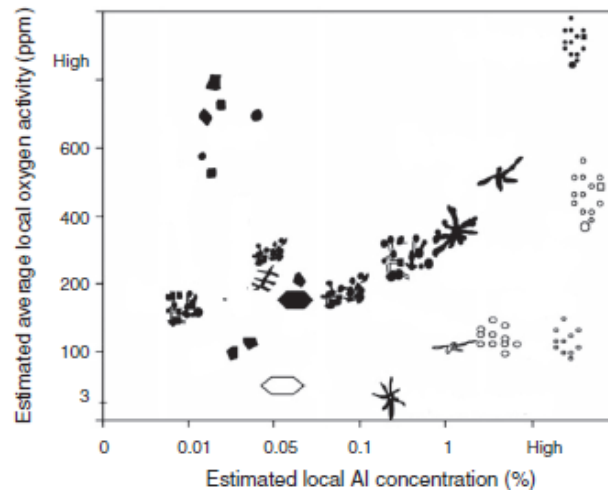


Figura 11. Morfologia das inclusões de alumina em função dos teores de Al e de O do aço [59].

2.4.1.2. Impacto das Inclusões sobre as Propriedades dos Aços

O impacto das inclusões sobre as propriedades mecânicas do aço tem sido alvo de inúmeros estudos. A sua melhoria só se tornou possível com a compreensão da sua relação com o tamanho, tipo e distribuição das inclusões presentes na matriz do aço.

As inclusões afiguram-se a descontinuidades da matriz; são normalmente frágeis à temperatura ambiente e não apresentam uma forte ligação à matriz. Assim, considerando que a fratura dúctil dos aços ocorre normalmente como consequência da nucleação, crescimento e coalescência de cavidades, a presença de inclusões torna-se crítica visto que a sua fragmentação ou arrancamento da matriz potenciam a formação de cavidades. Este processo ocorre a duas escalas distintas: nas inclusões de maior dimensão, em que nucleiam cavidades de dimensões consideráveis, e nas inclusões de tamanho diminuto, onde surgem pequenas cavidades que facilitam a união das maiores [60]. Na Figura 12 é possível observar o aparecimento de cavidades junto às inclusões, num provete sujeito a uma tensão de tração e que foi cortado longitudinalmente antes da sua fratura.

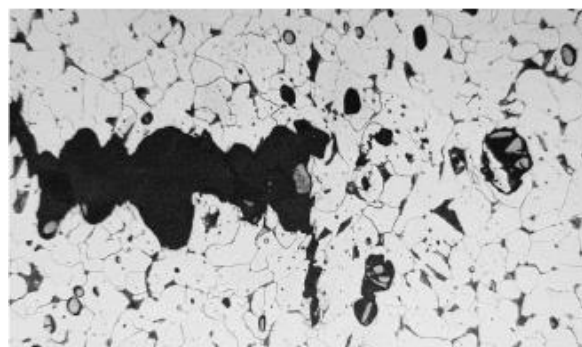


Figura 12. Secção longitudinal de um provete, sujeito a um ensaio de tração que foi interrompido antes da sua rotura [60].

A distribuição, morfologia e tamanho das inclusões tem um elevado impacto sobre a anisotropia da fratura. Na Figura 13, à esquerda, encontra-se representada esquematicamente a matriz de um aço contendo inclusões com morfologia e dimensões aleatórias. Se o aço fosse submetido a um esforço de tração segundo a direção representada pelas setas de cor vermelha, a sua resistência seria superior à que apresentaria caso, porventura, essa tração ocorresse segundo uma direção perpendicular à indicada anteriormente (setas de cor amarela). Por sua vez, na imagem da direita da mesma figura, o material apresenta uma menor anisotropia em termos de inclusões (elevado grau de esfericidade, e com dimensões muito semelhantes) pelo que não será expectável uma grande diferença entre os valores da tensão de rotura nas duas direções anteriormente referidas [60, 61].

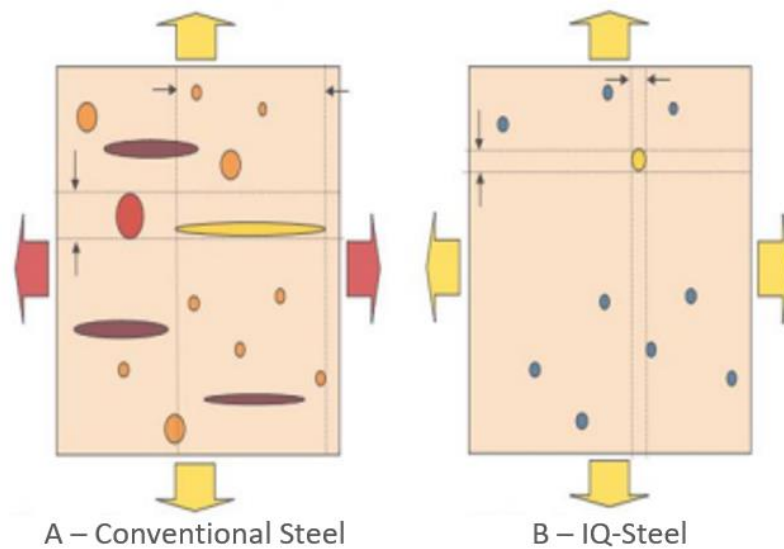


Figura 13. Representação esquemática das secções de um provete de aço, a ser sujeito a esforços de tração, em que a matriz apresenta inclusões que patenteiam: A - elevada anisotropia; B - elevada isotropia (Isotropic Quality Steel); adaptada de [61].

A Figura 14 resume, de forma esquemática, o efeito pernicioso de diferentes tipos de inclusões sobre as propriedades mecânicas dos aços.

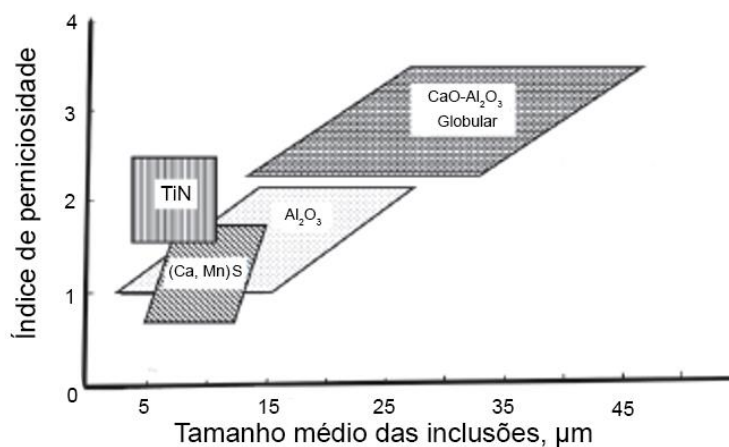


Figura 14. Impacto do tipo e dimensões das inclusões sobre as propriedades dos aços, aferido através do índice de perniciosidade conforme definido por Monnot et al. [62]; adaptada de [61].

Assim, por exemplo, para dimensões e formas equivalentes, os sulfuretos de cálcio apresentam menor impacto sobre as propriedades mecânicas dos aços do que os óxidos; por sua vez, os nitretos de titânio são o tipo de inclusões com maior impacto [61].

Para além das propriedades mecânicas, as inclusões apresentam igualmente elevado impacto sobre a resistência à corrosão e à fissuração induzida pelo H dos aços. No caso específico das inclusões de alumina, a corrosão ocorre essencialmente na sua vizinhança uma vez que o potencial eletroquímico da alumina é superior ao da matriz. No caso das inclusões provocarem uma diminuição do teor de Cr da matriz, a sua presença tem um efeito mais acentuado sobre a resistência à corrosão do aço [60, 61].

Por sua vez, a fissuração induzida pelo H é igualmente promovida pela presença de inclusões devido à criação de zonas denominadas *hydrogen traps* (armadilhas de hidrogénio). As *hydrogen traps* correspondem a regiões na matriz de um material onde se observa a tendência, por minimização da energia interna do sistema, para a acumulação dos átomos de H. Correspondem a descontinuidades na matriz, sob a forma de lacunas, deslocações, fronteiras de grão e inclusões. Estas regiões desempenham um papel importante na movimentação e distribuição dos átomos de H no aço [61].

Métodos de Determinação e Identificação de Inclusões em Aços

É essencial enumerar métodos que permitam a identificação e quantificação das inclusões com vista a modificar variáveis do processo que minimizem o aparecimento deste tipo de defeito. As seguintes técnicas podem ser utilizadas [32]:

- Microscopia Ótica: permite obter informações acerca da forma, dimensão, quantidade e distribuição das inclusões;
- Microscopia Eletrónica de Varrimento e Microanálise por raios-X (SEM/EDS): permite obter informação equiparável à da microscopia ótica, tendo como principal vantagem a possibilidade de identificar os elementos que constituem as inclusões.

2.4.2. Porosidade

A porosidade está diretamente relacionada com a absorção de gases pelo banho metálico durante a sua elaboração e vazamento. Durante o seu arrefecimento, à medida que o limite de solubilidade de um dado gás no metal vai sendo ultrapassado, formam-se bolhas gasosas que ficam retidas no seu interior, caso não existam condições para proporcionar a sua libertação. O H e o N são os principais elementos gasosos responsáveis por este tipo de defeito [17]. Na Tabela 5 são apresentadas algumas possíveis causas de porosidade e as correspondentes medidas corretivas para a sua eliminação.

A porosidade pode apresentar-se à superfície ou no interior dos fundidos. A porosidade interna pode surgir durante a solidificação da liga, sob a forma de macro ou microporosidade, consoante a sua dimensão. A porosidade resultante da presença de gases no seio do banho metálico apresenta normalmente forma arredondada (Figura 15), podendo apresentar filmes de óxidos sobre a sua superfície [39].

Tabela 5. Potenciais causas de ocorrência de porosidade nos aços e respectivas medidas corretivas [17]

Causas de Porosidade	Medidas corretivas
Elevado teor de N, O ou H no banho	Utilizar matérias-primas com baixo teor nestes elementos. Utilizar uma fração adequada de retornos nas cargas
Matérias-primas com camadas de óxidos, óleos ou humidade à sua superfície	Granalhagem/limpeza dos materiais. Armazenar as matérias-primas em locais com baixa humidade
Desoxigenação deficiente do banho metálico	Estabelecer um procedimento adequado para a desoxigenação do banho metálico
Práticas de vazamento desajustada	Reduzir a altura de vazamento de forma a diminuir a velocidade e turbulência do metal à entrada na carapaça cerâmica
Baixa permeabilidade da carapaça cerâmica	Redução do número de camadas das carapaças cerâmicas e aumento da granulometria da areia cerâmica utilizada

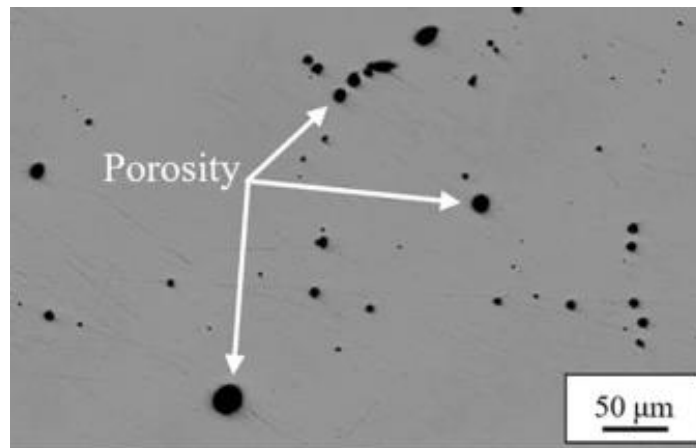


Figura 15. Ocorrência de porosidade gasosa na matriz de um aço [63].

Tal como as inclusões, a porosidade tem também um efeito negativo sobre as propriedades mecânicas dos fundidos [64].

3. Caso de Estudo

A redução da quantidade de impurezas presentes no seio do banho metálico é elementar para a obtenção de fundidos com elevada qualidade. Existem várias formas de promovê-la, sendo a qualidade (grau de sanidade) das matérias-primas das cargas para fusão um dos parâmetros mais importantes. Normalmente, os retornos constituem a maior fração da carga pois, quando utilizados de forma otimizada, permitem reduzir os custos globais de produção, face ao decréscimo do uso de matéria-prima nova e ao menor consumo energético na preparação do banho. Todavia, a sua utilização pode influenciar diretamente a qualidade do banho uma vez que os retornos apresentam, por via de regra, um grau de sanidade inferior ao das matérias-primas novas [65-67].

O carregamento do forno de indução com materiais contaminados com impurezas origina a incorporação de partículas no seio do banho metálico, propiciando o aparecimento de defeitos (nomeadamente inclusões e porosidade), potencialmente comprometedores do desempenho das peças vazadas. Por conseguinte, será exigido um trabalho árduo de correção dos defeitos na fase de acabamento das peças, podendo este resultar unicamente na sua total rejeição. A presença de impurezas nos materiais das cargas de fusão também origina a formação de maior quantidade de escória que, para além de promover uma redução da eficiência energética do processo de fusão, pode potenciar um desgaste excessivo do revestimento refratário do forno de fusão, sobretudo caso este não seja compatível com o índice de basicidade da escória formada [48].

O estudo desenvolvido no âmbito desta Dissertação de Mestrado surgiu no sentido de avaliar o impacto da fração de retornos, nas cargas metálicas de fusão, e do seu grau de sanidade sobre a qualidade dos banhos metálicos elaborados pela ZCP, na produção de fundidos numa dada classe de aço. O objetivo centrou-se essencialmente em estabelecer um equilíbrio entre a fração de retornos e a sua sanidade sem comprometer a qualidade dos fundidos. Desse modo, procurava-se minimizar os impactes ambientais (consumos específicos de energia e de matérias-primas) bem como os prejuízos económicos associados à produção de peças não-conformes. Assim, estipulou-se neste trabalho a realização de um aumento progressivo da fração de retornos nas cargas para a elaboração de uma liga metálica pré-selecionada e analisaram-se as propriedades mecânicas e a sanidade das peças vazadas.

3.1. Peça e Liga em Estudo

A qualidade dos fundidos, no que diz respeito à presença de defeitos, como porosidade e inclusões, é influenciada por um conjunto de variáveis conforme esquematizado na Figura 16.

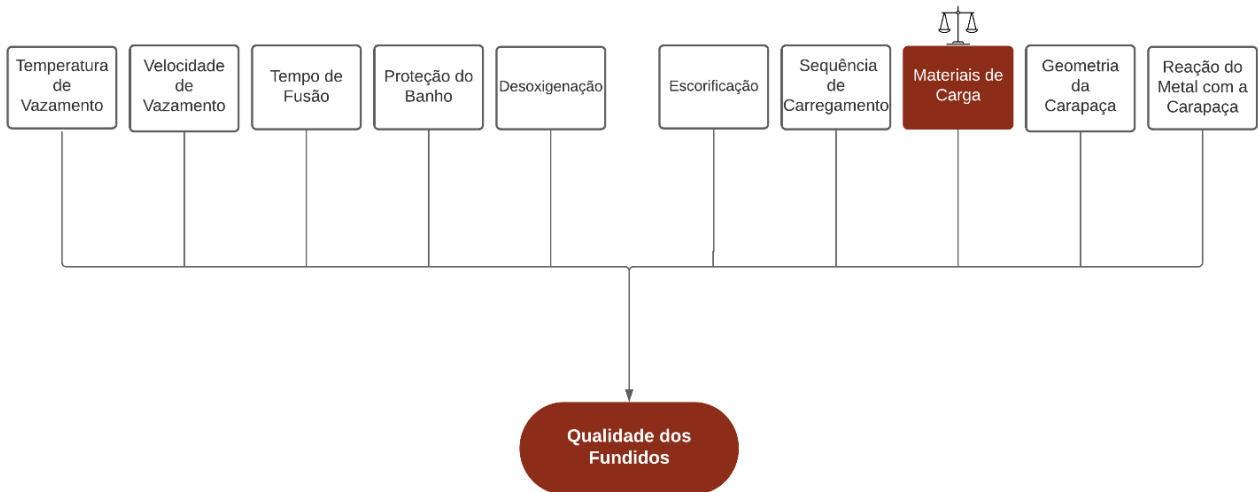


Figura 16. Algumas variáveis do processo com impacto sobre a sanidade dos fundidos.

No intuito de garantir um estudo focado unicamente no objetivo do trabalho, tornou-se imperativo acompanhar todo o processo produtivo para compreender o impacto de diferentes variáveis na qualidade dos fundidos. O trabalho desenvolvido incidu sobre uma única liga metálica (uma classe de aço; Tabela 6) e modelo de peça de forma a eliminar a influência da composição química e do fator geométrico sobre os resultados relativos à sanidade dos fundidos. A peça em estudo, apresentada na Figura 17, é designada por “apoio”, sendo utilizada na área da medicina (acessórios).



Figura 17. Peça a estudar: A - modelo em cera; B - carapaça cerâmica; C - após vazamento.¹

A peça é produzida na liga GX 6 Cr Ni 18 9, que apresenta elevados teores de Cr e Ni (Tabela 6).

Tabela 6. Composição química da liga GX 6 Cr Ni 18 9 (% ponderal - especificação interna da ZCP)

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Mín.	65,760	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,000	8,000	0,000
Máx.	74,000	0,070	1,500	1,500	0,040	0,030	20,000	11,000	0,100

¹ Figura desfocada por questões de confidencialidade

3.2. Procedimento Experimental

O trabalho foi iniciado com quatro vazamentos para a peça em estudo, sendo o primeiro realizado com 100% de matérias-primas novas e os seguintes com 25%, 50% e 75% de retornos. Para que o estudo fosse fidedigno ao processo de fabrico da ZCP, utilizaram-se, unicamente, retornos disponíveis em armazém, nas condições em que estes são habitualmente armazenados. Na Figura 18 está esquematizada a planificação do trabalho experimental desenvolvido.

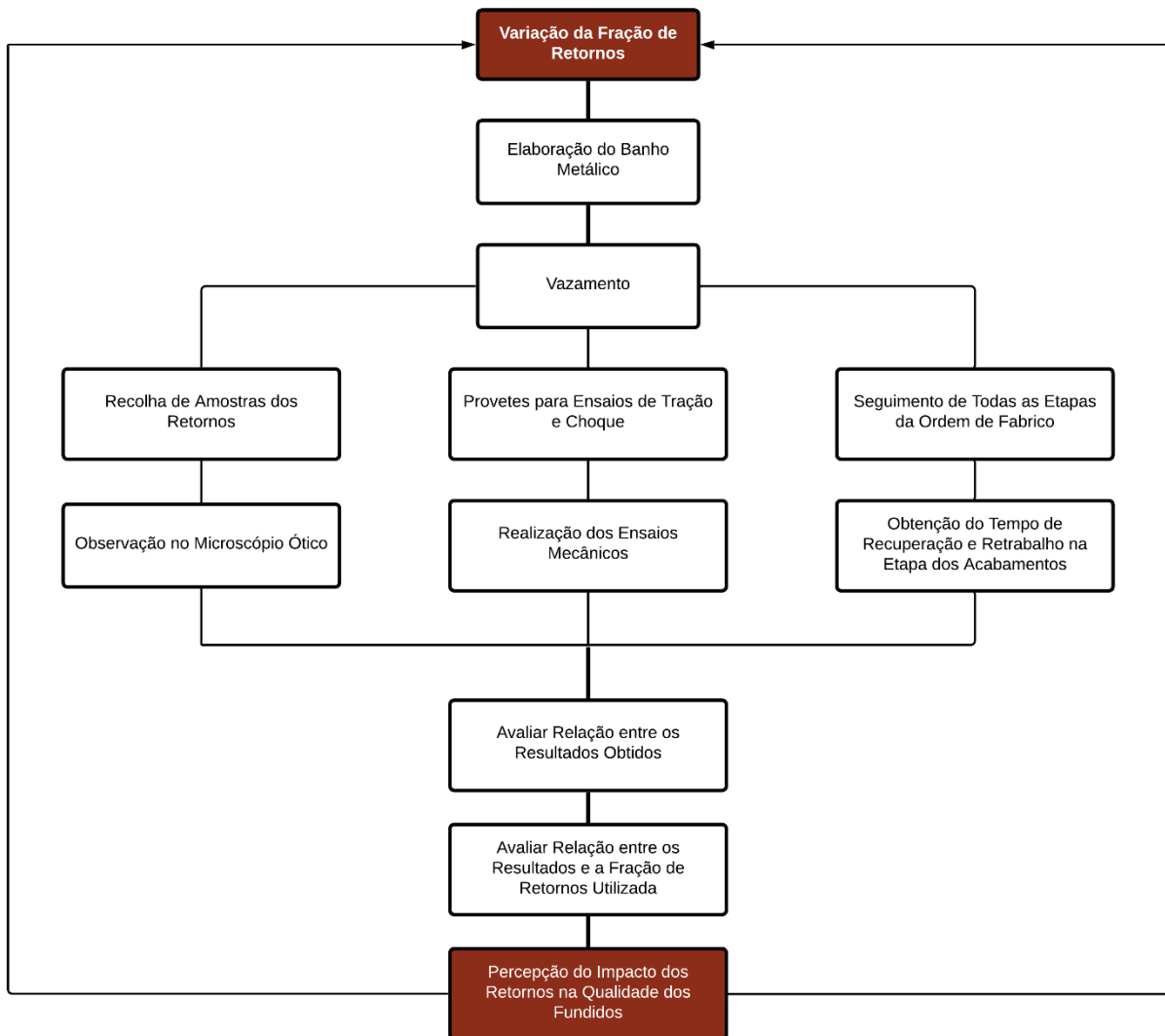


Figura 18. Metodologia utilizada para avaliar o impacto da fração de retornos das cargas de fusão sobre a qualidade dos fundidos.

Posteriormente, foram realizados mais três vazamentos, para as mesmas frações de retornos consideradas anteriormente, dos quais se obtiveram unicamente provetes para ensaios de tração e choque, de forma a complementar os resultados obtidos.

Tendo em conta que o trabalho a realizar exige um acompanhamento constante do processo no chão de fábrica, como primeiro passo foi fundamental perceber a logística de operações na ZCP, nomeadamente na fase de preparação de cargas e fusão.

3.2.1. Análise da Gestão de Retornos no Armazém

A ZCP utiliza uma rotina industrial segundo a qual os retornos resultantes de uma dada fornada são utilizados para produzir o mesmo tipo de liga numa operação subsequente, pelo que é necessário que exista uma gestão de inventário constante e eficiente.

A quantidade de retornos obtida por vazamento pode ser calculada através do rendimento metálico por cacho e do volume médio de peças sucataadas por ordem de fabrico. A peça em estudo origina por vazamento aproximadamente 60% a 65% de retornos; no entanto, retornos da mesma liga, mas de diferentes peças, podem ser utilizados em conjunto. Surge assim a necessidade de, apesar da dificuldade (dado o número elevado de peças produzidas com a mesma liga), tentar manter um equilíbrio entre a fração de retornos utilizada e a fração de retornos resultante de vazamentos anteriores, de forma a criar uma carga circulante regular, diminuindo a necessidade de *stockagem*.

Na ZCP, após o corte das peças, os retornos são devidamente separados para evitar misturas com outros materiais durante o seu armazenamento. Posteriormente, estes são transportados para o armazém, onde são granalhados (para remover a totalidade de vestígios de carapaça cerâmica), pesados e, finalmente, armazenados como esquematizado na Figura 19.

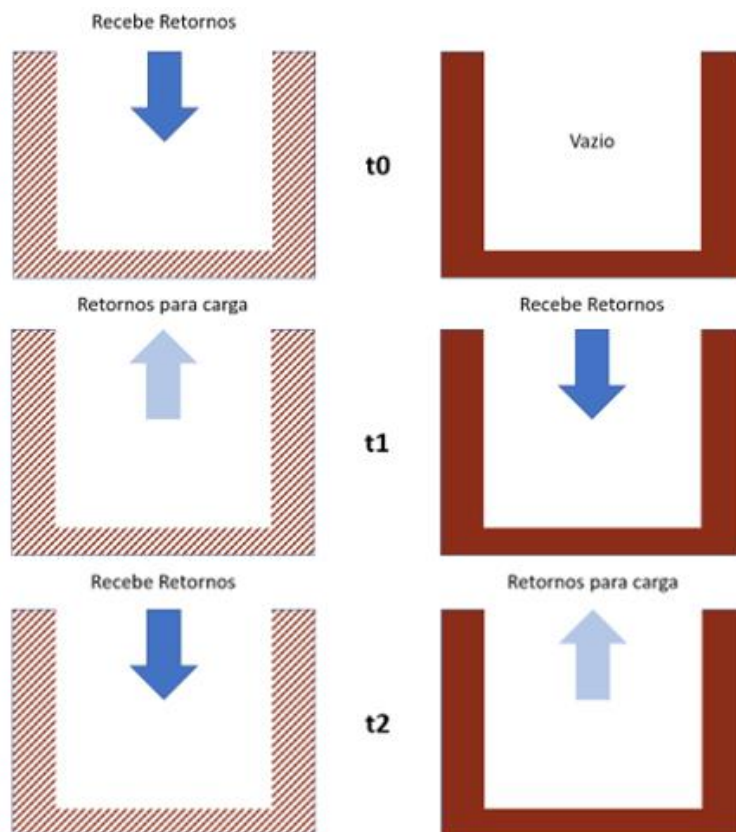


Figura 19. Gestão do armazenamento de retornos na ZCP.

Um armazenamento deste tipo possibilita que a sucata interna seja refundida, tanto quanto possível, à medida que é gerada. Isto permite a redução da mistura de retornos da

mesma liga, mas de vazamentos diferentes. Esta técnica vai de encontro à metodologia *First-In-First-Out* (FIFO) de *Lean Management*, que se foca na criação de um fluxo contínuo de cargas de forma a garantir uma redução do número de itens em inventário inutilizados por motivos de degradação causada por um tempo de *stockagem* excessivo (*stock* deteriorado e/ou obsoleto). Esta metodologia permite uma logística de armazenamento simplificada que melhora o fluxo de produção [68, 69].

3.2.2. Análise do Processo de Fusão

O acompanhamento do processo de fusão foi fundamental no decorrer deste trabalho para determinação da influência das práticas empregues no setor nos resultados obtidos. Na Tabela 7 é apresentada a constituição de todas as cargas utilizadas na elaboração dos banhos metálicos em estudo. Foram sempre utilizados os mesmos componentes nas diversas cargas, tendo-se variado unicamente as suas frações.

Tabela 7. Cargas utilizadas na elaboração dos banhos metálicos em estudo

	Retornos (%)	Fe Armco (%)	Mn (%)	FeCr70 (%)	FeSi75 (%)	Ni (%)	Total (kg)	Poupança Relativa (%)*
1ª Parte	0	57	0,31	28	1,2	9,3	390	-
	25	46	0,26	22	0,86	7,0	395	23,5
	50	32	0,18	15	0,66	5,0	250	45,8
	75	16	0,11	7,6	0,43	2,2	300	74,6
2ª Parte	25	46	0,29	21	0,95	7,1	270	23,8
	50	31	0,19	14	0,66	4,6	345	49,6
	75	16	0,14	7,1	0,44	2,3	270	74,2

* Redução de custos estimada em função da fração de retornos de cada carga relativamente à constituída unicamente por matérias-primas novas.

Por sua vez, os procedimentos e a sequência de carregamento seguidos na elaboração dos diferentes banhos metálicos são apresentados na Figura 20.



Figura 20. Procedimentos e seqüência de carregamento utilizados na elaboração dos banhos metálicos em estudo.²

A seqüência de adição das diferentes matérias-primas ao banho metálico afigura-se a mais adequada, do ponto de vista termodinâmico, uma vez que os elementos menos reativos são adicionados em primeiro lugar (ver diagrama de Ellingham apresentado no Anexo 2). Antes da adição dos elementos mais reativos, nomeadamente FeCr 70, Mn e FeSi 75, realizou-se uma etapa de desoxigenação com Al de modo a aumentar o rendimento de adição destes. O Al foi também adicionado ao banho imediatamente antes e/ou durante a fase de vazamento. Atendendo a que a quantidade de FeCr 70 a adicionar ao banho foi elevada, realizou-se um período de manutenção de 5 minutos a 1650°C, a fim de assegurar a dissolução total do Cr.

Durante a elaboração dos banhos metálicos, o forno esteve sempre coberto com uma manta de fibras cerâmicas, de forma a minimizar as perdas térmicas. Não foi utilizada, na elaboração de nenhum dos banhos metálicos, qualquer cortina protetora de argon sobre a sua superfície.

Após a adição e dissolução de todos os componentes da carga no banho metálico, procedeu-se à operação de limpeza da sua superfície livre, mediante a adição de escorificante e posterior remoção manual da escória, com recurso a uma vareta de aço (Figura 21).

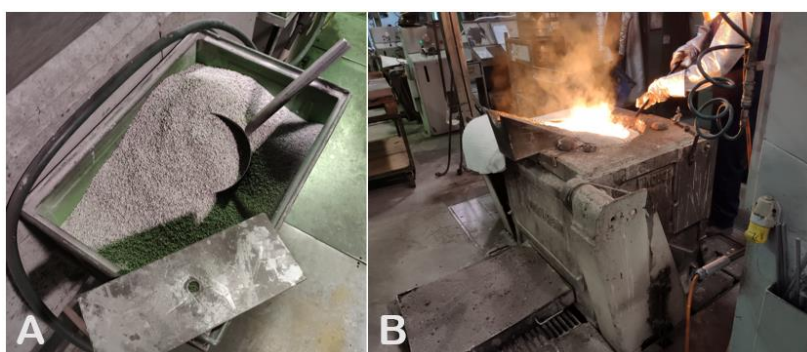


Figura 21. Limpeza da superfície livre do banho: A - escorificante utilizado; B - operação de limpeza do banho (remoção da escória).

² Figura desfocada por questões de confidencialidade

O momento da adição dos componentes da carga ao banho e a sua limpeza são da responsabilidade do forneiro (operador responsável pela elaboração do banho metálico). Deste modo, sendo a etapa de fusão um processo com baixo grau de automatização, este necessita de ser muito bem monitorizado para a obtenção de bons resultados de forma consistente.

A temperatura do banho é controlada pelo forneiro através de uma cana pirométrica (Figura 22); apenas se avançando para a etapa de vazamento após a obtenção de duas leituras ligeiramente superiores à temperatura estabelecida (1650°C).



Figura 22. Controlo da temperatura do banho metálico.

A temperatura de vazamento selecionada deverá assegurar o mais elevado grau de homogeneização do banho metálico bem como o total enchimento da cavidade moldante. Para elevados graus de sobreaquecimento, a reatividade do banho aumenta, potenciando o desvanecimento de elementos de liga por oxidação e vaporização (Figura 5). Como consequência, maior será a quantidade de óxidos (impurezas) que se formam no seu seio, promovendo o aumento da fração de inclusões no produto final, caso não se verifique a sua adequada decantação. Pelas mesmas razões, deverá ser devidamente controlado o tempo de manutenção do banho metálico no forno a uma dada temperatura.

A sinterização das carapaças cerâmicas no forno rotativo é realizada de forma síncrona com a elaboração do banho metálico. Na primeira parte do trabalho, a temperatura de sinterização não variou, ao invés do que se verificou na segunda, na qual foram vazados unicamente provetes.

O vazamento (Figura 23) é realizado de forma manual, tal como a remoção das carapaças cerâmicas do forno rotativo, onde se processou o seu pré-aquecimento até à temperatura estipulada. Assim, é difícil assegurar a regularidade das condições de vazamento, nomeadamente em termos de temperatura da carapaça cerâmica e da altura de vazamento (consequentemente, da velocidade de vazamento), parâmetros cruciais a ter em consideração para assegurar a qualidade do produto final. Nesta etapa, é essencial a existência de uma excelente sincronização entre os operadores para que o vazamento seja bem executado, minimizando os tempos de espera do metal na colher ou da carapaça

cerâmica fora do forno rotativo. Quanto maior for o tempo de permanência do metal na colher, maior a sua suscetibilidade à oxidação e à absorção de H da atmosfera envolvente. Por sua vez, quanto mais longa for a permanência da carapaça fora do forno, antes do vazamento, maior a probabilidade de vir a ocorrer o seu rebenamento devido ao choque térmico que esta sofre com a entrada do metal, vazado a temperaturas ligeiramente acima dos 1600°C. Para além disso, existe uma maior propensão à ocorrência de defeitos, como mal-cheio, devido a um arrefecimento mais rápido do metal no interior da carapaça cerâmica.



Figura 23. Etapa de vazamento do metal: A - do forno para a colher; B - da colher para as carapaças cerâmicas.

A ZCP produz, tal como já referido, uma elevada variedade de ligas pelo que existem muitas transições de composição ao longo de um dia de fusão. Destarte, após vazamento, realiza-se a limpeza das paredes do forno (Figura 24) a fim de minimizar a contaminação e incorporação de escórias ou outras impurezas no banho metálico a elaborar de seguida. Este processo é realizado de forma manual pelo forneiro.



Figura 24. Operação de limpeza do forno após vazamento.

A composição química final obtida para cada um dos banhos metálicos produzidos no âmbito deste estudo, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Composição química (% ponderal) dos banhos metálicos elaborados no âmbito do estudo desenvolvido

	Retornos (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Al	N
1ª Parte	0	0,027	0,780	0,340	0,006	0,002	19,14	10,13	0,008	0,004	0,011	0,028
	25	0,037	1,031	0,466	0,010	0,005	19,82	9,660	0,012	0,014	0,016	0,043
	50	0,042	0,953	0,459	0,009	0,003	19,930	9,690	0,013	0,010	0,031	0,071
	75	0,032	0,842	0,402	0,010	0,007	19,68	9,640	0,015	0,005	0,013	0,032
2ª Parte	25	0,028	0,910	0,424	0,007	0,005	19,660	9,820	0,009	0,004	0,009	0,028
	50	0,032	0,921	0,422	0,010	0,006	19,74	9,50	0,011	0,007	0,025	0,029
	75	0,032	0,980	0,410	0,008	0,005	18,960	9,330	0,012	0,005	0,021	0,035
Desvio Padrão		0,0052	0,084	0,042	0,0016	0,0017	0,36	0,25	0,0024	0,0037	0,0080	0,015

3.2.3. Metodologia de Análise

A avaliação do efeito da fração de retornos sobre a qualidade do banho metálico foi realizada através da análise da sanidade interna de amostras, em microscopia ótica, e de ensaios mecânicos.

3.2.3.1. Microscopia Ótica

Um controlo de sanidade adequado relativamente ao tipo, tamanho, forma e distribuição das inclusões é essencial para o fabrico de componentes de elevada qualidade. Este é apenas útil quando utilizado para estabelecer comparação entre diferentes amostras de forma a reduzir a subjetividade da análise realizada. Por conseguinte, neste trabalho, estabeleceu-se um método de análise padrão que consistiu em recolher um gito de um dos cachos da peça em estudo, por cada vazamento, de onde se recolheram amostras (de dimensão idêntica - cerca de 4 cm de largura) de três zonas distintas, conforme apresentado na Figura 25 (A). Seguiu-se a sua preparação metalográfica, envolvendo o desbaste normal, na sequência de lixas de SiC de 120-400-600-1000 mesh, e o polimento com panos contendo suspensão de diamante de 6 e 1 µm. Não se realizou qualquer ataque químico devido ao elevado contraste das inclusões em relação à matriz.

Posteriormente, realizou-se a sua observação em microscopia ótica, tendo-se registado, de forma aleatória, uma imagem, para uma ampliação de 100x (conjunto objetiva - ocular), de cada uma das doze regiões assinaladas na Figura 25 (B).

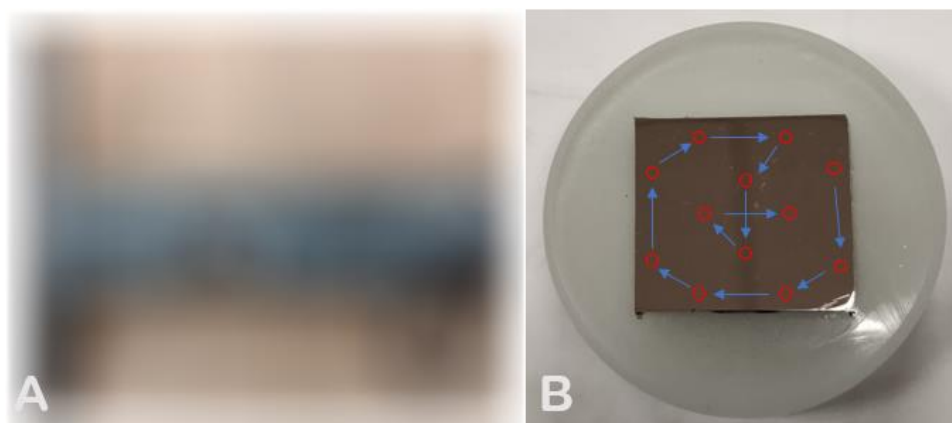


Figura 25. A - Zonas de amostragem do gito; B - Padrão de registo de imagens em microscopia ótica.³

De realçar que, para além da metodologia estabelecida, todas as amostras foram alvo de uma minuciosa análise em microscopia ótica.

3.2.3.2. Ensaios Mecânicos

A realização de ensaios mecânicos é de capital importância para a avaliação do impacto da fração de retornos das cargas sobre a sanidade das peças produzidas. Neste trabalho, realizaram-se quatro ensaios de tração e de choque sobre provetes vazados a partir de cada um dos banhos metálicos em estudo.

Os ensaios de tração foram realizados, segundo a norma DIN EN ISO 6892-1, a uma velocidade de 10 MPa/s. A Figura 26 apresenta uma imagem do equipamento utilizado (A) e do provete (B) a que está acoplado o extensómetro utilizado para determinar a extensão.



Figura 26. A - Máquina de ensaio de tração; B - Provete de ensaio de tração a que está acoplado o extensómetro.

Os ensaios de choque Charpy foram realizados, à temperatura ambiente, segundo a norma DIN EN ISO 148-1:2016. O equipamento e os provetes utilizados são apresentados na Figura 27 (A e B respetivamente).

³ Figura desfocada por questões de confidencialidade

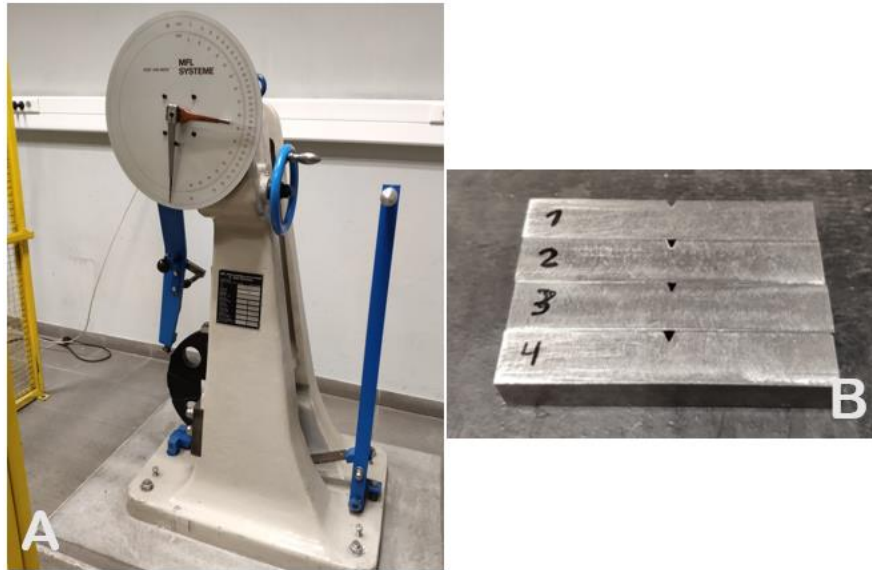


Figura 27. Máquina e provetes de ensaio de choque Charpy.

3.2.3.3. Acompanhamento da Etapa de Acabamento das Peças

Na etapa de acabamentos, as peças produzidas ganham uma forma mais próxima da final. Na ZCP esta compreende duas fases. Na primeira, efetua-se o abate da carapaça cerâmica, separam-se as peças do gito e realiza-se a sua granalhagem. Tendo em conta a geometria da peça em estudo, poderá ser necessário recorrer à utilização de um jato de água sob pressão e/ou soda cáustica para remover a totalidade dos resíduos de carapaça cerâmica presentes à superfície das peças. Na segunda fase dos acabamentos, as peças são sujeitas a rebarbagem, polimento, eventual recuperação (soldadura para reparação de defeitos), desempenho e controlo visual. O tempo despendido nas etapas de polimento e recuperação é um excelente indicador do grau de sanidade das peças vazadas. Todavia, devido a dificuldades na sua recolha, não foi possível obter dados relativos aos tempos de acabamento das peças de cada um dos lotes produzidos a partir dos banhos metálicos em estudo.

3.3. Apresentação e Discussão de Resultados

3.3.1. Sanidade Interna

As observações feitas por microscopia ótica não evidenciaram qualquer influência da fração de retornos das cargas sobre a sanidade das diferentes amostras analisadas, tendo-se registado frações de inclusões e porosidade semelhantes. Contudo, denotou-se um grau de sanidade inferior nas amostras recolhidas na zona mais próxima da bacia de vazamento (Amostra A - Figura 25). A distribuição das inclusões pelas matrizes das várias amostras é bastante heterogénea. Constatou-se que a maioria das inclusões se apresentam sob a forma de *clusters* (aglomerados de inclusões), alguns deles de dimensões muito consideráveis (Figura 28 A e B). No entanto, de referir que é mais comum a presença de *clusters* de menores dimensões (Figura 29 (A)).

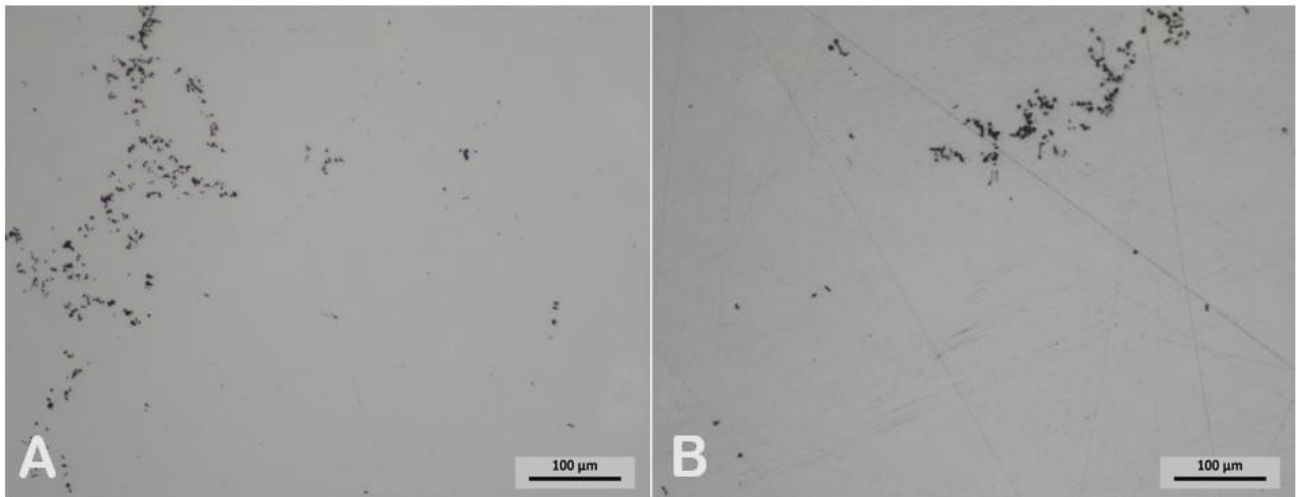


Figura 28. Fotomicrografias (100x): A e B - Clusters de inclusões de alumina de elevadas dimensões.

Conforme evidenciado na Figura 29 (A) e (B), em todas as amostras é notória uma dispersão de inclusões individuais pela matriz.

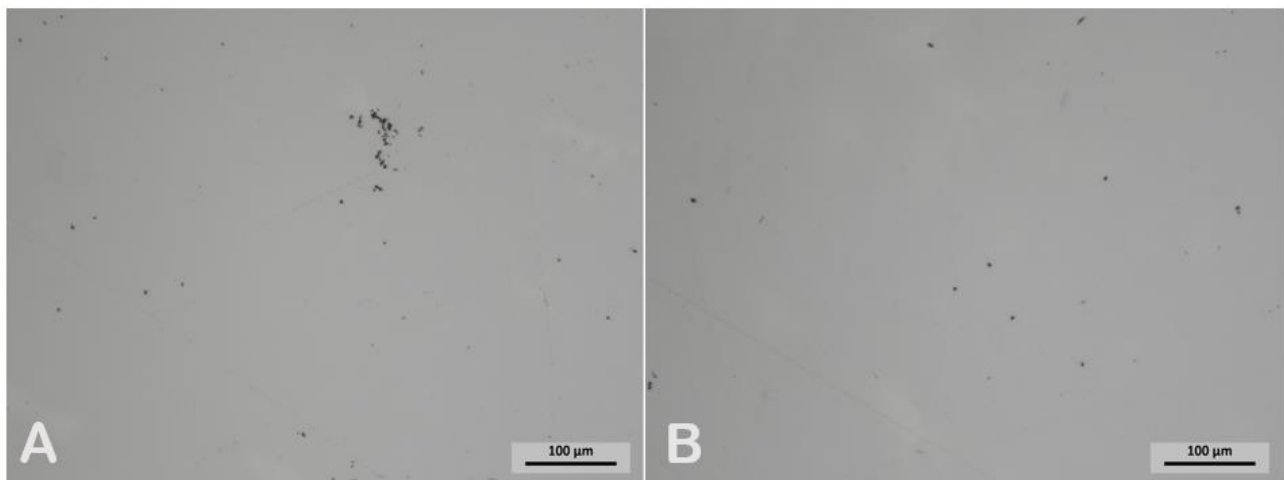


Figura 29. Fotomicrografias (100x): A - Cluster de inclusões de alumina de pequena dimensão; B - Dispersão de inclusões individuais pela matriz.

Tal como anteriormente abordado (ver subcapítulo 2.4.1.2), uma distribuição não uniforme das inclusões, como a resultante da sua aglomeração sob a forma de *clusters*, promove a anisotropia das propriedades mecânicas do aço, comprometendo o desempenho em serviço dos fundidos produzidos [60, 70]. No Anexo 3 são apresentadas mais algumas fotomicrografias recolhidas neste estudo.

Com vista à identificação das inclusões, realizou-se uma análise em Microscopia Eletrónica de Varrimento e Microanálise por raios-X (SEM/EDS). Na Figura 30 é apresentada uma imagem obtida em SEM bem como o espectro de emissão de raios-X relativo a um dos vários *clusters* de inclusões observados.

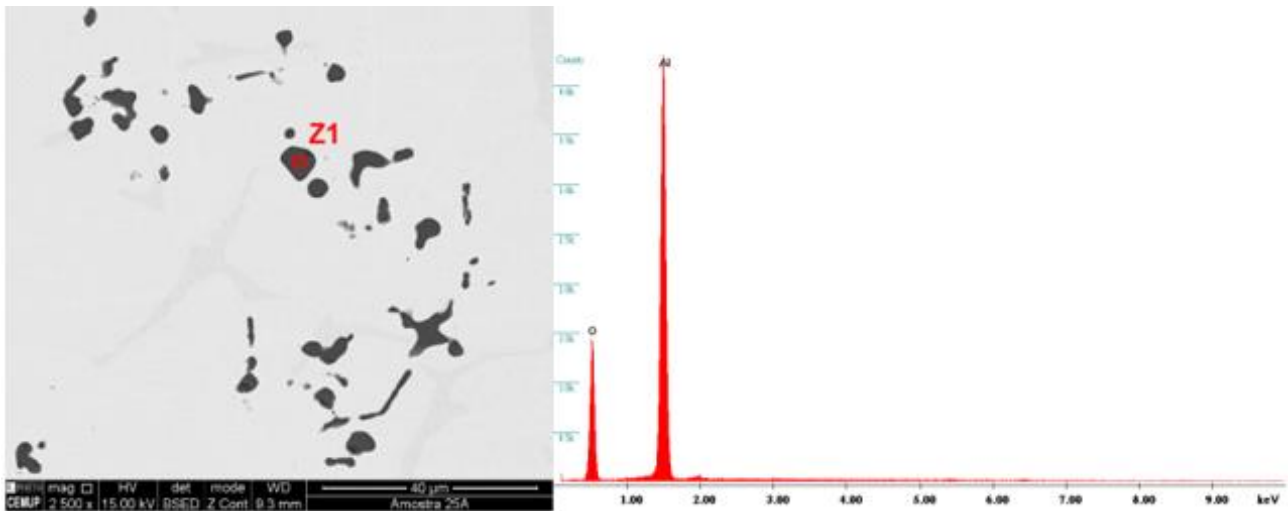


Figura 30. Imagem em SEM e espectro de emissão de raios-X relativo à inclusão da zona assinalada (Z1).

O espectro relativo ao precipitado assinalado (Z1) na figura revela a presença de Al e O, indicando que se tratará de uma inclusão de alumina. Todos os *clusters* observados são semelhantes ao patente na Figura 30; logo, a grande maioria das inclusões observadas serão de alumina. Estas podem ter resultado da desoxigenação do banho (Figura 20) uma vez que, pouco depois da adição do Al, as partículas de alumina nucleiam, precipitam e coalescem. Ademais, algumas destas inclusões podem igualmente provir do revestimento refratário do forno de fusão.

Relativamente às inclusões que não se apresentam sob a forma de *clusters*, verificou-se, por análise, que são maioritariamente de alumina. Foram ainda identificadas, muito embora em muito menor quantidade, inclusões de sulfureto de manganês e de nitreto de titânio (Figura 31 e Figura 32, respetivamente).

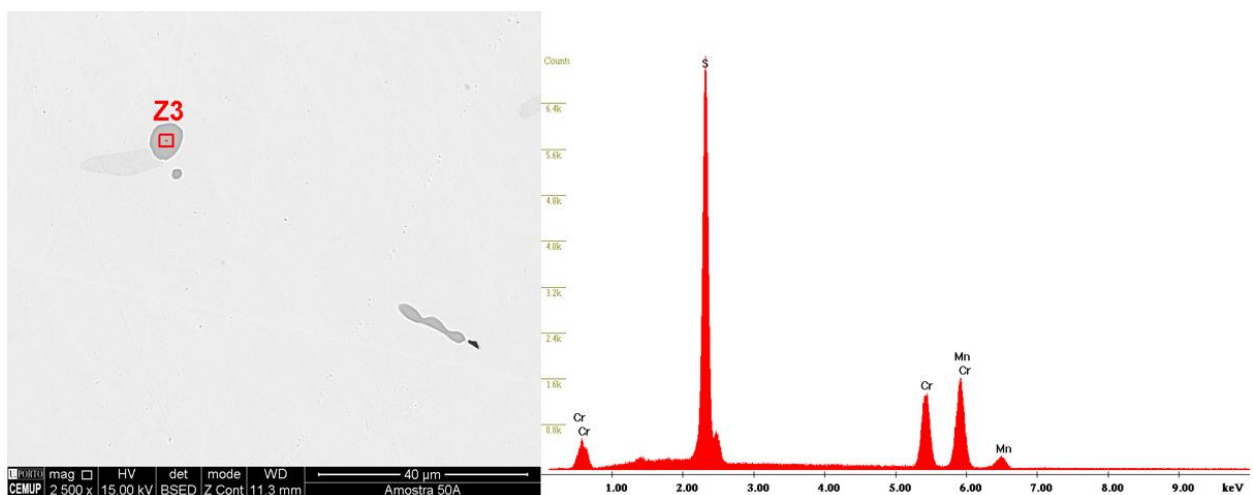


Figura 31. Imagem em SEM e espectro de emissão de raios-X relativo à inclusão assinalada (Z3).

As inclusões de sulfureto de manganês, resultantes da reação do S com o Mn em solução, apresentam uma cor cinza-claro e uma morfologia arredondada. A presença dos picos de Cr no espectro patente na Figura 31 pode resultar de uma solubilização incompleta

deste elemento no metal, que serviu de gérmen de nucleação heterogénea do sulfureto de manganês.

No espectro da Figura 32, referente à zona Z2, identificam-se os picos do Ti e N, o que indicia a presença de uma inclusão de nitreto de titânio. Nesse espectro, é ainda registada a presença dos picos de Al e O devido à proximidade da inclusão de alumina (zona Z3).

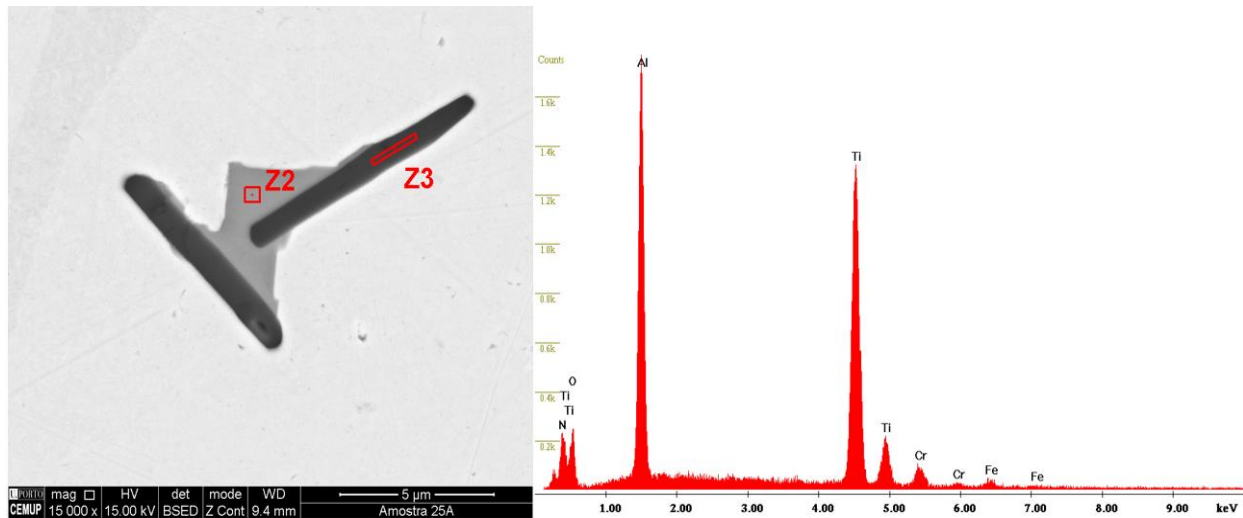


Figura 32. Imagem em SEM e espectro de emissão de raios-X relativo à inclusão assinalada (Z2).

Os nitretos de titânio resultaram, muito provavelmente, da reação do Ti do banho metálico com a atmosfera envolvente (incorporação de N no banho), dando origem a um composto bastante estável (ver diagrama apresentado no Anexo 4). Estas inclusões apresentam uma cor cinza-claro e uma morfologia mais angulosa que os sulfuretos de manganês, com arestas bem definidas.

A presença de sulfuretos de manganês e nitretos de titânio associados a inclusões de alumina é bastante comum nas amostras observadas, o que pode ser explicado pelo facto destas terem servido de gérmen de nucleação heterogénea. A presença desses gérmes promove uma redução do raio crítico necessário para que se forme um núcleo estável [71, 72].

O estudo do comportamento das inclusões no seio do banho metálico é uma área importante da Metalurgia, permitindo delinear as melhores metodologias a adotar no processo de fusão. A agitação do banho, promovida pela indução do forno, é um dos parâmetros com elevado impacto sobre a fração de impurezas presentes no seu seio. Um aumento da agitação promove a aglomeração das inclusões em *clusters* (Figura 10), facilitando a sua decantação, de acordo com a lei de Stokes. Porém, se a agitação do banho metálico for muito intensa na parte final da sua elaboração, a decantação não será tão eficaz uma vez que haverá menos tempo para esta ocorrer. Assim, a prática mais adequada consiste em promover uma intensa agitação do banho no início e a meio do processo de fusão, para promover a formação de aglomerados de inclusões de grandes dimensões (*clusters*). Posteriormente, a agitação deverá ser menos intensa a fim de evitar a formação de novos aglomerados de inclusões [54, 57].

A sequência de carregamento das matérias-primas no forno de fusão e a desoxigenação do banho metálico afiguram-se igualmente cruciais para a redução da fração de inclusões no produto final. Apesar de se ter utilizado uma sequência de carregamento adequada na elaboração dos banhos metálicos da liga em estudo (Figura 20), foram realizadas adições de Al imediatamente antes e durante a etapa de vazamento (com o forno inclinado), com vista reduzir o potencial químico de oxigénio do banho, conforme referido no subcapítulo 3.2.2. No entanto, tal como mencionado no subcapítulo 2.2.6, esta prática dever ser evitada uma vez que as inclusões formadas podem atingir dimensões consideráveis, não havendo tempo para a sua decantação. Assim, será mais adequado o recurso à deposição de uma camada de proteção de árgon gasoso sobre a superfície livre do banho metálico [54, 57].

Outras técnicas podem ser aplicadas para reduzir a fração de inclusões ou o seu impacto sobre as propriedades mecânicas dos aços, nomeadamente: insuflação de um gás inerte pelo fundo do banho metálico e modificação de inclusões. A segunda tem em vista a alteração das propriedades das inclusões, sendo o termo “engenharia de inclusões” atribuído a esta área de estudo. A engenharia de inclusões começa com o estabelecimento das propriedades que estas devem apresentar. Posteriormente, recorrendo a diferentes metodologias, como por exemplo a adição de determinados elementos ao banho, promove-se a formação de inclusões com um efeito menos deletério, ou até potencialmente benéfico, sobre as propriedades mecânicas do aço. Um exemplo de aplicação desta técnica é a modificação da composição e morfologia dos óxidos e sulfuretos em aços através da adição de Ca. Alguns dos benefícios daí resultantes são a melhoria da maquinabilidade e aumento tanto da ductilidade do aço, como da sua resistência máxima à tração [60, 73]. Segundo Zheng *et al.* [55], poder-se-á adicionar Te ao banho metálico com vista a modificar a morfologia das inclusões de alumina, de dendrítica e esférica para “plate-like”, tendo esta alteração um elevado impacto na formação de *clusters* (Figura 9).

3.3.2. Propriedades Mecânicas

O grau de sanidade dos retornos é, de uma maneira geral, inferior ao das matérias-primas novas, pelo que a sua incorporação, em elevadas frações, nas cargas de fusão pode dar origem a um banho metálico e, conseqüentemente, a fundidos de qualidade inferior.

Neste trabalho, não foi possível estabelecer qualquer relação entre a fração de retornos das cargas e as propriedades mecânicas do aço produzido (nos diferentes banhos elaborados), muito provavelmente devido à reduzida dimensão da amostragem. Os resultados relativos aos ensaios de tração e choque são apresentados na Figura 33 e na Figura 34, respetivamente. Cada barra corresponde à média de quatro ensaios, para uma determinada carga utilizada na elaboração de um banho metálico, sendo igualmente apresentado o respetivo desvio padrão.

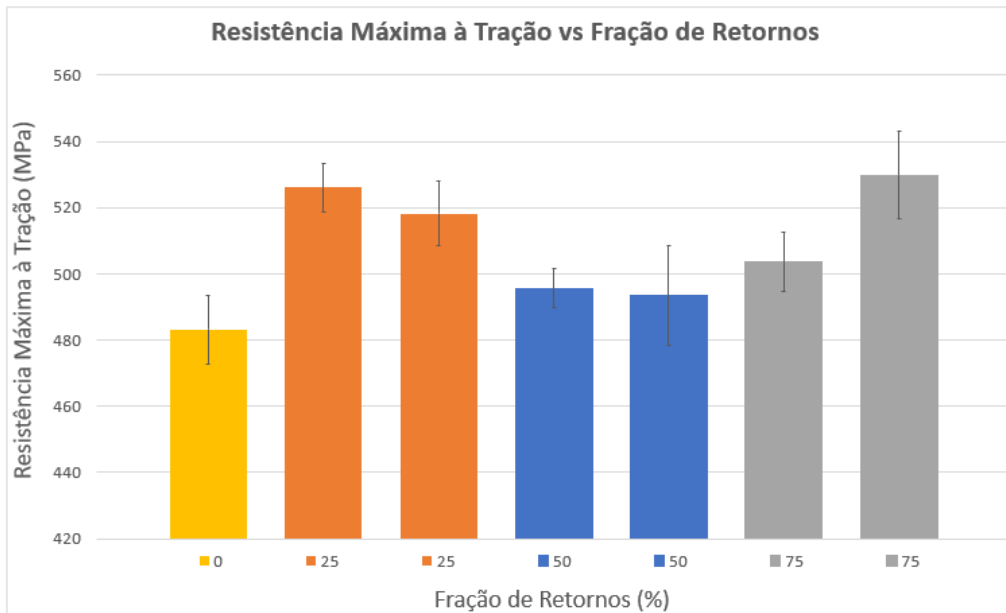


Figura 33. Resistência máxima à tração vs. fração de retornos da carga de fusão.

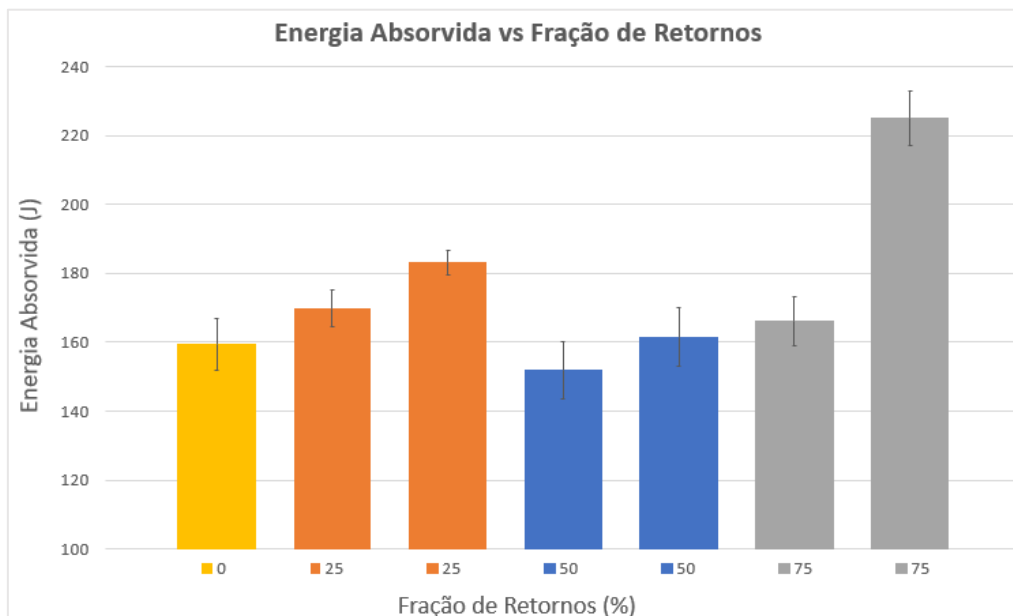


Figura 34. Resistência ao choque vs. fração de retornos da carga de fusão.

Da análise dos resultados obtidos, verifica-se que, para o banho elaborado unicamente a partir de matérias-primas novas, se obtiveram os valores mais baixos para a resistência máxima à tração, e os segundos mais baixos em termos de tenacidade. Estes resultados não eram expectáveis uma vez que, em teoria, esta seria a carga que proporcionaria um grau de sanidade mais elevado. No entanto, é importante referir que as condições de elaboração deste banho foram bastante distintas dos restantes uma vez que foi utilizado para a sinterização do revestimento refratário do forno. Assim, os tempos de manutenção do banho a temperaturas elevadas foram bastante superiores aos dos restantes ensaios, daí resultando uma maior interação com o revestimento e a atmosfera envolvente. Ademais, o facto do refratário se encontrar numa fase inicial de sinterização,

terá potenciado a incorporação de algumas partículas não metálicas no banho metálico, comprometendo assim a qualidade do mesmo.

Por outro lado, contrariamente ao que seria de esperar, para uma das cargas com uma fração de retornos de 75%, obtiveram-se os valores mais elevados tanto em termos de resistência máxima à tração como de tenacidade.

O nível de automatização do setor da fusão da ZCP é baixo, existindo por isso um conjunto de variáveis difíceis de controlar e que podem influenciar os resultados obtidos. Por exemplo, a não utilização de uma proteção de argon gasoso sobre a superfície livre do banho metálico, potencia a sua oxidação pela atmosfera envolvente, tornando o seu grau de limpeza mais dependente do forneiro. Para controlo do processo, o baixo nível de automatização pode ser gerido através da sistematização de uma recolha de dados minuciosa, abrangente a todas as etapas da fusão.

Analisando os valores relativos a outras grandezas, como o limite elástico e o alongamento (ver Anexo 5), verifica-se, igualmente, não ser notória uma relação entre as propriedades mecânicas do aço e a fração de retornos das cargas. Todavia, não se pode assumir que essa fração não tem qualquer impacto sobre a qualidade do banho metálico, mas sim que, nas condições em que o estudo foi realizado e para o número de ensaios efetuados, não se constatou qualquer influência. Aliás, os estudos de Deşoţ *et al.* [65] e de Glavaš *et al.* [74] comprovam o impacto negativo que a fração de retornos das cargas pode exercer sobre as propriedades mecânicas do aço.

Dado que o estudo foi efetuado num período de tempo relativamente curto, não foi possível acompanhar a evolução da sanidade dos retornos ao longo de várias refusões. Este acompanhamento poderia revelar uma gradual deterioração destes, provocada pela saturação do banho com óxidos. Consequentemente, poder-se-ia constatar um impacto negativo da sua utilização na qualidade do banho metálico.

3.3.3. Injeção de Argon pelo Fundo do Forno de Fusão

A presença de inclusões nas amostras analisadas alertou para a necessidade imperiosa de introduzir melhorias no processo de fusão. De forma a reduzir a probabilidade da degradação da sanidade dos retornos e respetivo impacto sobre as propriedades das ligas produzidas, surgiu a necessidade de aplicar técnicas que permitissem obter no seu todo um banho mais limpo. Assim, decidiu-se testar o impacto da injeção de argon gasoso pelo fundo do forno de indução, através de um tijolo poroso (Figura 35), sobre a qualidade de dois banhos metálicos elaborados para o vazamento da peça em estudo (Figura 17). As cargas utilizadas na sua preparação compreendiam uma fração de 75% de retornos uma vez que, em teoria, originariam a uma maior fração de impurezas no banho metálico.

Nos dois ensaios, aplicou-se um caudal de injeção de argon de aproximadamente 12,5 L/min, ao longo de 5 minutos, após solubilização de todos os componentes da carga. Estes valores foram estabelecidos com base na observação do borbulhar do gás à superfície do banho metálico, durante a fase inicial da sua insuflação.

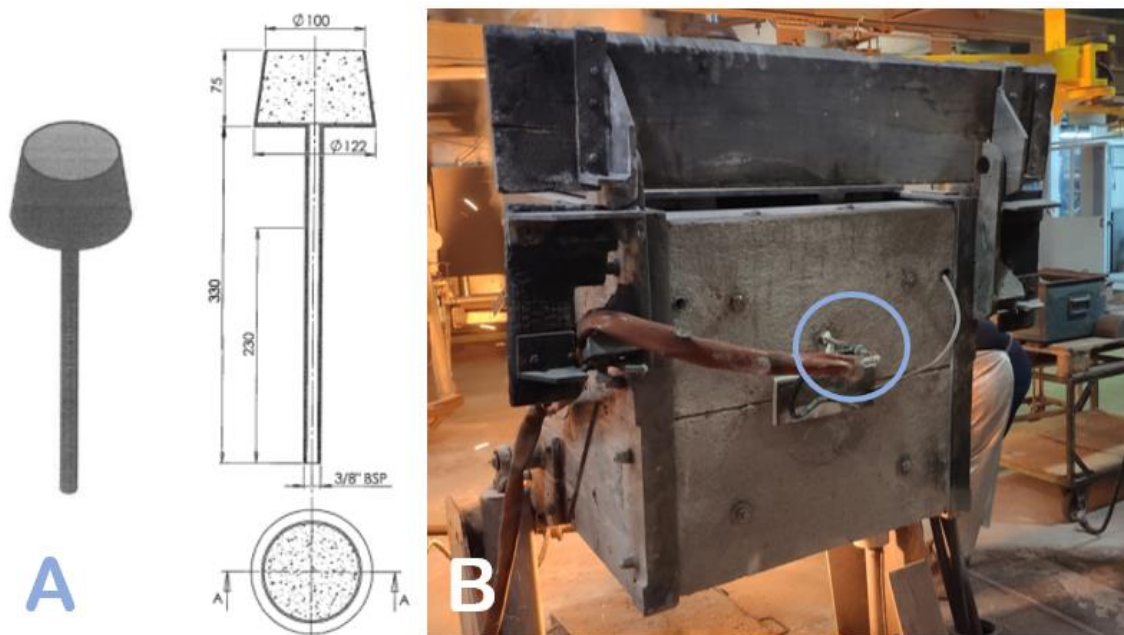


Figura 35. Injeção de árgon pelo fundo do forno de indução: A - desenho do tijolo poroso (adaptado) [75]; B - montagem utilizada nos fornos da ZCP.

No segundo ensaio, uma vez que a temperatura do banho, antes da etapa de limpeza, era inferior à pretendida, o forno não foi desligado. Este fator pode ter sido decisivo sobre o impacto desta técnica pois a agitação do banho, promovida pela indução, dificulta o transporte das inclusões por arrastamento pelas bolhas de árgon e pode, inclusivamente, propiciar a incorporação de gases no seu seio, nomeadamente de oxigénio. Por cada um dos vazamentos, foram recolhidas amostras para avaliação da sanidade interna em microscopia ótica e provetes para a realização de ensaios de tração e choque.

Relativamente à análise em microscopia ótica, verificou-se uma elevada redução da presença de inclusões de alumina nas amostras resultantes dos banhos tratados com insuflação de árgon, comparativamente às amostras analisadas na primeira parte do trabalho; inclusive, o número de *clusters* de inclusões foi praticamente nulo. Isto é explicado pelo facto de as bolhas de árgon promoverem o arrastamento das inclusões, presentes no seio do banho metálico, até à superfície livre deste, segundo um mecanismo designado por transporte de massa [75]. Todavia, registou-se um nível mais elevado de porosidade gasosa nos fundidos (Figura 36).

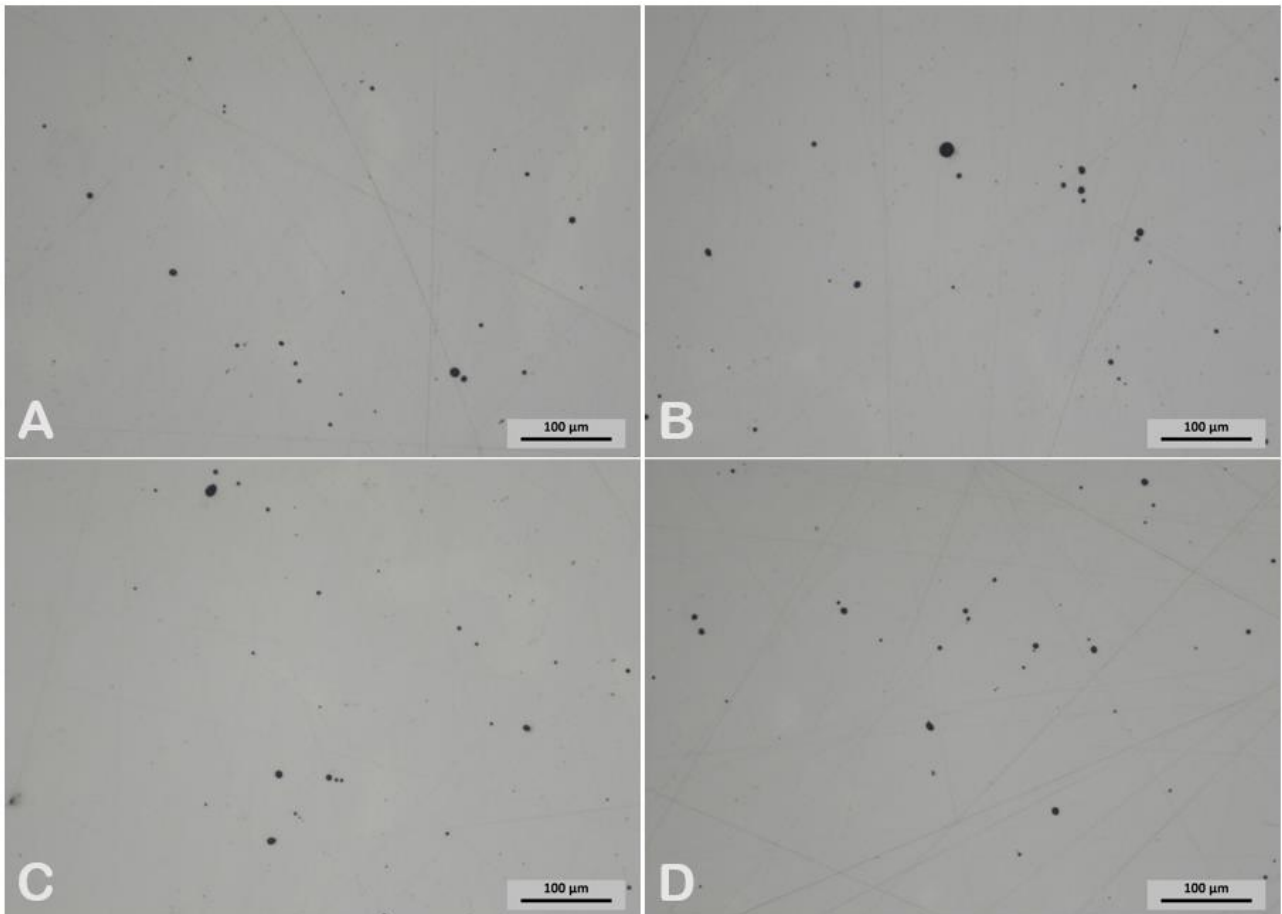


Figura 36. Porosidade gasosa nas amostras obtidas a partir dos banhos metálicos tratados com insuflação de argônio (Fotomicrografias (100X)).

A porosidade é facilmente identificável com base na sua esfericidade e desfocagem da imagem resultante da observação da amostra a dois níveis distintos (Figura 37).

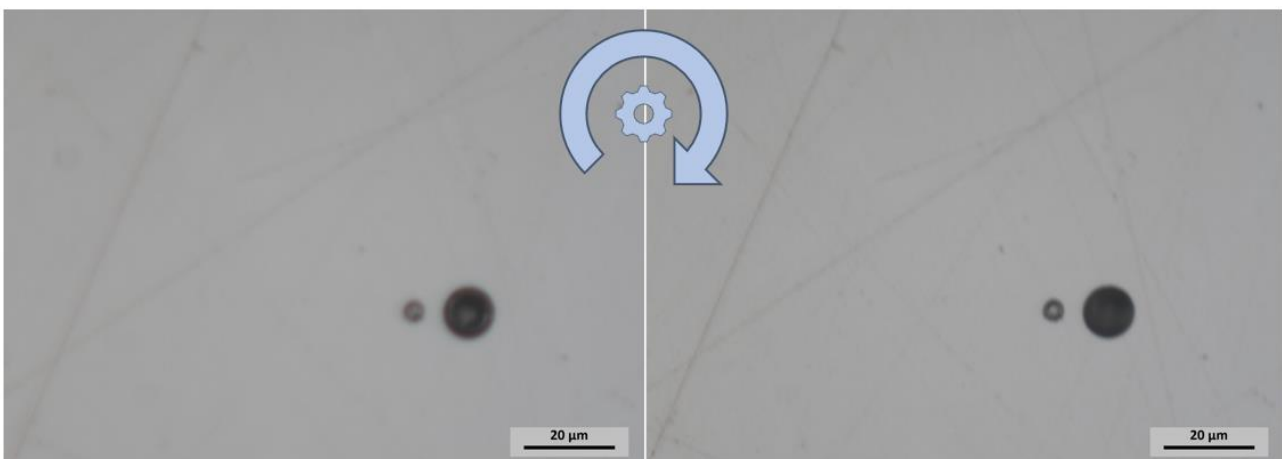


Figura 37. Identificação de porosidade gasosa através da desfocagem da imagem.

O aumento da porosidade poderá ter resultado da utilização de parâmetros de injeção de argônio desadequados para a elaboração da liga metálica em estudo.

Os resultados dos ensaios mecânicos dos provetes vazados são apresentados na Figura 38 e na Figura 39.

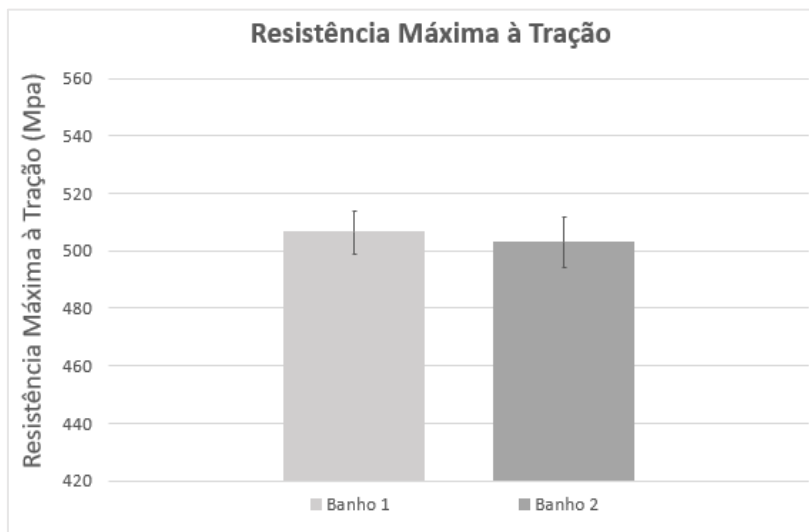


Figura 38. Resistência máxima à tração do aço, objeto deste estudo, determinada em provetes vazados a partir dos dois banhos metálicos tratados com insuflação de argon.

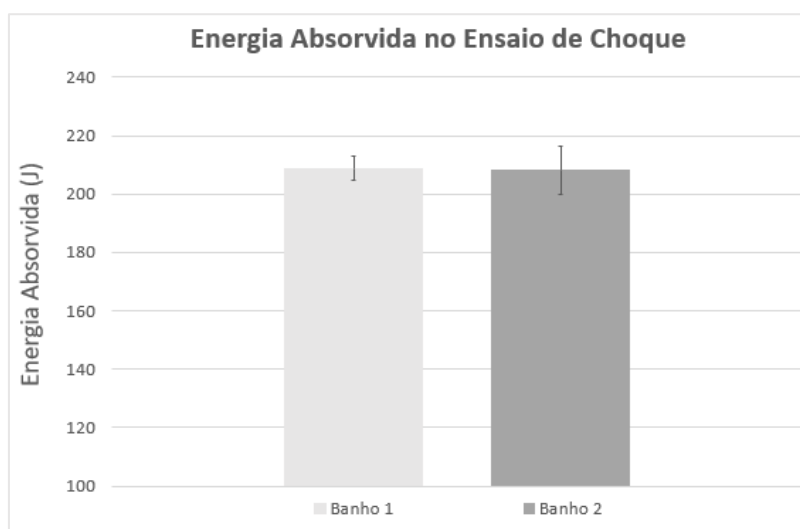


Figura 39. Resistência ao choque do aço, objeto deste estudo, determinada em provetes vazados a partir dos dois banhos metálicos tratados com insuflação de argon.

Nos ensaios de tração, para os banhos tratados com insuflação de argon, não se verificou um aumento da resistência máxima à tração, relativamente aos resultados obtidos na primeira parte do trabalho (Figura 33). O mesmo se observou para as restantes propriedades mecânicas determinadas no ensaio de tração (Anexos 5 e 6).

No que toca aos resultados dos ensaios de choque (Figura 39), contrariamente ao que se observou para os ensaios de tração, constatou-se um aumento da resistência ao choque (Figura 34). Tal facto indicia uma potencial melhoria do grau de sanidade interna dos provetes em consequência da insuflação de argon no banho metálico. No entanto, o reduzido número de ensaios realizados não permite tirar conclusões. Ainda assim, é importante referir que há estudos que comprovam a melhoria das propriedades mecânicas

dos aços em consequência dessa insuflação de argon. É disso exemplo, em particular, o trabalho desenvolvido por Terrazas *et al.* [75].

Para além do potencial da injeção de argon, através do tijolo poroso, na remoção das inclusões de alumina, a sua utilização pode também ser vantajosa em termos de [75, 76]:

- homogeneização da temperatura e da composição química do banho;
- aumento da vida útil do refratário do forno;
- redução do teor de gases no banho metálico.

A insuflação de argon deve ser sempre realizada após a fusão completa de todos os componentes da carga metálica. Para além disso, é fortemente recomendado que o refratário do forno já esteja suficientemente sinterizado para que não ocorra a sua degradação, por arrancamento, em consequência da agitação promovida pela insuflação de argon [75, 76].

A fluidez do banho metálico, dependente da sua composição química (sobretudo no que diz respeito ao teor de Si) e do seu grau de sobreaquecimento, é um parâmetro relevante para a eficácia da técnica de insuflação de argon uma vez que afeta as dimensões e o modo como as bolhas se deslocam até à superfície do banho. Segundo Zhang *et al.* [77], para uma melhor remoção das inclusões, o diâmetro das bolhas deve ser o menor possível (entre 1 e 5 mm), sendo a dimensão mínima das bolhas estabelecida com base na necessidade de uma pressão superior no seu interior em relação à pressão metalostática. O diâmetro das bolhas pode ser controlado, principalmente, por regulação da pressão de injeção, que deve ser estabelecida de modo a assegurar um borbulhar suave do banho ao nível da sua superfície livre [75, 76].

Alguns estudos recomendam a insuflação de argon durante 5 a 10 minutos de forma faseada. Inicialmente, aplica-se uma pressão um pouco mais elevada, com o intuito de promover a formação de bolhas de pequena dimensão, favorecendo assim a eliminação das inclusões. Posteriormente, dever-se-á baixar a pressão, mantendo-se o efeito de limpeza do banho com uma menor turbulência e garantindo uma melhor gestão do volume de argon utilizado. Como é evidente, o período entre o fim da injeção de argon e o vazamento do aço deverá ser o mais curto possível a fim de evitar a formação de novas inclusões de óxidos [76, 78].

4. Conclusões

A qualidade do banho metálico é fulcral para a produção de fundidos com o menor número de defeitos possível, que não comprometam o seu desempenho em serviço. Neste trabalho, tendo em vista a melhoria do processo de fusão, foi estudado o impacto da fração de retornos das cargas de fusão sobre a qualidade dos banhos metálicos, relativos a uma determinada classe de aço regularmente utilizada pela ZCP na produção de fundidos.

Nas condições em que o estudo foi desenvolvido, não foi possível assinalar um impacto negativo da fração de retornos nas propriedades do aço vazado e no grau de sanidade interna das amostras analisadas. Todavia, não é possível concluir que esta não exista, face ao número limitado de ensaios realizados no âmbito desta Dissertação. A avaliação cabal do impacto da fração de retornos sobre a qualidade do banho metálico implica a realização de novos estudos, em número significativamente mais elevado, envolvendo a monitorização de uma elevada quantidade de cargas circulantes de retornos, ao longo de vários ciclos de fusão. Salienta-se ainda a imprescindibilidade de uma boa recolha de dados na fase de acabamento das peças, para aferir mais aprofundadamente a qualidade dos fundidos produzidos.

Na primeira parte do trabalho, na avaliação da sanidade das diferentes amostras em microscopia ótica, constatou-se a presença de uma elevada fração de inclusões de alumina, tendo estas sido identificadas, sobretudo, sob a forma de *clusters* de pequena/média dimensão. Estas terão tido origem, muito presumivelmente, na desoxigenação do banho metálico, ou na incorporação de partículas do revestimento refratário do forno e/ou da colher de vazamento. A formação de *clusters* é influenciada por diferentes variáveis, nomeadamente: os teores de Al e O do banho metálico e o seu grau de agitação, bem como a morfologia das inclusões. Assim, o controlo da formação, seu eventual coalescimento, e evolução da morfologia das inclusões, assume particular relevância na melhoria do processo de fusão.

Na parte final dos ensaios, foi ainda estudado o impacto da insuflação de argon, pelo fundo do forno de fusão, na sanidade dos fundidos produzidos a partir de dois banhos metálicos que foram alvo deste tratamento. Constatou-se a exequibilidade desta técnica na redução da fração de inclusões nos fundidos, tendo-se verificado a eliminação, quase total, dos *clusters* de inclusões de alumina. Porém, observou-se um aumento da porosidade gasosa, muito provavelmente devido à utilização de parâmetros de injeção de argon desadequados para a elaboração da liga metálica em estudo. Apesar do número de ensaios realizados com esta técnica ter sido diminuto, demonstra-se, neste trabalho, o potencial da sua aplicação na obtenção de um banho metálico mais limpo, sendo impreterível a concretização de mais ensaios para validação da sua real eficácia a longo prazo.

4.1. Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados obtidos neste trabalho não terem sido conclusivos, levantaram-se várias questões que podem ser determinantes para a compreensão do impacto dos retornos na qualidade do banho metálico. À semelhança do que já foi abordado ao longo da Dissertação, novos estudos poderão incidir sobre os seguintes temas:

- avaliação do impacto de diferentes parâmetros e práticas de fusão na obtenção de um banho metálico mais limpo, tais como: agitação do banho metálico, e utilização de uma cortina de proteção de argon sobre a sua superfície livre;
- aprofundamento do estudo do impacto da insuflação de argon sobre a qualidade do metal produzido, contemplando nomeadamente a análise do impacto das seguintes variáveis: temperatura e composição química do banho metálico, duração e pressão de injeção bem como o seu eventual faseamento ao longo do período de elaboração do banho metálico;
- monitorização da qualidade do banho metálico, ao longo de vários ciclos de refusão de retornos, procurando-se ajustar a sua fração de modo a manter uma carga circulante constante, e estudo do seu impacto económico;
- monitorização do teor de oxigénio do banho metálico visando a diminuição da ocorrência de formação de inclusões de óxidos no seu seio;
- obtenção de padrões-tipo de graus de sanidade que permitam avaliar de forma expedita e objetiva o grau de sanidade interna dos retornos;
- estender o trabalho desenvolvido de identificação das inclusões a outras ligas elaboradas pela empresa.

Referências Bibliográficas

- [1] InvestCastinc. "History of Investment Casting" <https://www.investcastinc.com/history-of-investment-casting/> (acedido em 21/10/2020).
- [2] I. C. Institute. "What is Investment Casting?" <https://www.investmentcasting.org/what-is-investment-casting.html> (acedido em 17/10/2020).
- [3] P. R. Beeley and R. F. Smart, "1. Introduction", in *Investment Casting*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B8UITJ/investment-casting/introduction>
- [4] A. Information Resources Management, "46.5.2. The Investment Casting", in *Industrial Engineering - Concepts, Methodologies, Tools and Applications, 3 Volume Set*: IGI Global. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00TWZZ36/industrial-engineering/investment-casting>
- [5] K. G. Swift and J. D. Booker, "2.4.1.6 Investment Casting", in *Process Selection - From Design to Manufacture (2nd Edition)*: Elsevier. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009XPAK2/process-selection-from/investment-casting>
- [6] A. C. Company. "Investment Casting Process Steps (Lost Wax)" <http://americancastingco.com/investment-casting-process/> (acedido em 03/02/2021).
- [7] F. C. Campbell, "2. Casting", in *Metals Fabrication - Understanding the Basics*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U9L5W2/metals-fabrication-understanding/casting>
- [8] M. J. P. V. Costa, "Fornos de Indução", Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1960. [Online]. Disponível: <https://hdl.handle.net/10216/11313>
- [9] A. Moses, P. Anderson, K. Jenkins and H. Stanbury, "5.2 Lenz's Law", in *Electrical Steels, Volume 1 - Fundamentals and Basic Concepts*: Institution of Engineering and Technology. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0125WSW3/electrical-steels-volume/lenzs-law>
- [10] 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. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B8UKS9/investment-casting/melting-and-casting>
- [11] Calderys. "Coreless Induction Furnace (CIF)" <https://www.calderys.com/refractory-by-industry/foundry/coreless-induction-furnace-cif>

- [12] A. C. Reardon, "5. Modern Alloy Production", in *Metallurgy for the Non-Metallurgist (2nd Edition)*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009JBRJ1/metallurgy-non-metallurgist/modern-alloy-production>
- [13] C. Schmitz, "3.5.1.5 Induction Furnace", in *Handbook of Aluminium Recycling (2nd Edition) - Mechanical Preparation - Metallurgical Processing - Heat Treatment*: Vulkan Verlag. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0120S3XB/handbook-aluminium-recycling/induction-furnace>
- [14] F. Beneke, B. Nacke and H. Pfeifer, "1.3.1.1 Furnace Types and Applications", in *Handbook of Thermoprocessing Technologies, Volume 2 - Plants - Components - Safety*: Vulkan Verlag. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0120S9Z5/handbook-thermoprocessing/furnace-types-applications>
- [15] S. Zinn, S. L. Semiatin, E. P. R. Institute and B. M. I. C. Laboratories, "*Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications*". ASM International, 1988. [Online]. Disponível: <https://books.google.pt/books?id=zXmTLYwO3McC>
- [16] R. Timothy, "2.3.4 Plasma Processing", in *Radio-Frequency and Microwave Radiation (3rd Edition)*: American Industrial Hygiene Association (AIHA). [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B71VN1/radio-frequency-microwave/plasma-processing>
- [17] F. N. C. Oliveira, "Impacto da Preparação e Fusão de Cargas na Qualidade dos Fundidos", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2019. [Online]. Disponível: <https://hdl.handle.net/10216/122680>
- [18] J. Campbell, "1. Melt Reactions", in *Castings*: Elsevier. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt002YY002/castings/melt-reactions>
- [19] G. Totten, M. Howes and T. Inoue, "Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel", ed: ASM International.
- [20] E. Dötsch, "7.1.3 Oxygen Content of the Melt and C/Si Isotherms", in *Inductive Melting and Holding - Fundamentals - Plants and Furnaces - Process Engineering (2nd Edition)*: Vulkan Verlag. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0120THO1/inductive-melting-holding/oxygen-content-melt-c>
- [21] A. T. Tabereaux and R. D. Peterson, "Chapter 2.5 - Aluminum Production", in *Treatise on Process Metallurgy*, S. Seetharaman, Ed. Boston: Elsevier, 2014, pp. 839-917. [Online]. Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080969886000237>
- [22] J. Campbell, "Chapter 2 - Entrainment", in *Complete Casting Handbook*, Elsevier, Ed., 2011.
- [23] J. Campbell, "Melting, Remelting, and Casting for Clean Steel", *Steel Research International*, vol. 88, no. 1, p. 1600093, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201600093>.
- [24] R. L. Boxman, D. M. Sanders and P. J. Martin, "7.2.2 Metal/Slag/Gas Reaction", in *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology - Fundamentals and Applications*:

- William Andrew Publishing/Noyes. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt005I0KH6/handbook-vacuum-arc-science/metal-slag-gas-reaction>
- [25] F. Kongoli and R. G. Reddy, "51.4.4 Interfacial Reactions between Slag and Metal", in *Advanced Processing of Metals and Materials (Sohn International Symposium), Volume 1 - Thermo and Physicochemical Principles - Non-Ferrous High-Temperature Processing*: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0110K18A/advanced-processing-metals/interfacial-reactions>
- [26] L. Lu, "17.4.1 Unit Size", in *Iron Ore - Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*: Elsevier. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UOWLZ7/iron-ore-mineralogy-processing/unit-size>
- [27] J. Zhang, H. Matsuura and F. Tsukihashi, "Chapter 4.4 - Processes for Recycling", in *Treatise on Process Metallurgy*, S. Seetharaman, Ed. Boston: Elsevier, 2014, pp. 1507-1561. [Online]. Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080969886000365>
- [28] J. Campbell, "2.4 Fluidity (Maximum-Fluidity Length)", in *Castings*: Elsevier. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt002YY103/castings/fluidity-maximum-fluidity>
- [29] J. Campbell, "Chapter 1 - The Melt", in *Complete Casting Handbook*, Elsevier, Ed., 2011.
- [30] T. K. I. J. P. Kiely, in *Remelting Practice for the Precision Caster*, Muskegon, Michigan: Cannon-Muskegon Corporation.
- [31] R. H. Tupkary and V. R. Tupkary, "4. Principles of Steel Making", in *Modern Steel Making Handbook*: Mercury Learning and Information. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011HAX35/modern-steel-making-handbook/modern-ste-principles>
- [32] M. F. Neto, "Análise de Inclusões Não-Metálicas em Aço de Baixo Carbono Desoxidado ao Alumínio Produzido por Lingotamento Contínuo", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- [33] L. Marcon, "Estudo da Evolução das Inclusões do Aço SAE 8620 com o Tratamento de Inclusões com Cálcio em Escala Laboratorial", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [34] B. Fragoso, "Improvement of cleanliness of steel melts", presented on 12th World Conference on Investment Casting, 2008.
- [35] S. American Foundry, "3.1.1 Fluxes", in *Aluminum Permanent Mold Handbook*: American Foundry Society. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CY8UP3/aluminum-permanent-mold/fluxes>
- [36] A. S. M. I. H. Committee, "24. Steel Melt Processing", in *ASM Handbook, Volume 15 - Casting*: ASM International. [Online]. Disponível:

- <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008I32BN/asm-handbook-volume-15/steel-melt-processing>
- [37] V. Rudnev and G. E. Totten, "49.1.1.2 Argon", in *ASM Handbook, Volume 04C - Induction Heating and Heat Treatment*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4IVK1/asm-handbook-volume-4c/argon>
- [38] J. R. Davis, "1. General Introduction to Carbon and Alloy Steels", in *ASM Specialty Handbook Carbon and Alloy Steels*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011P5RN1/asm-specialty-handbook/part-i-general-introduction>
- [39] D. V. F. Moreira, "Método de Quantificação da Porosidade em Ligas de Alumínio Fundidas", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017. [Online]. Disponível: <https://hdl.handle.net/10216/106992>
- [40] A. S. M. I. H. Committee, "104.4 Pouring Practice", in *ASM Handbook, Volume 15 - Casting*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008I4742/asm-handbook-volume-15/shape-cast-pouring-practice>
- [41] D. M. Stefanescu, "56.5.1.4 Molds, Patterns, and Casting Design", in *ASM Handbook, Volume 1A - Cast Iron Science and Technology*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011OC9R7/asm-handbook-volume-1a/nickel-chr-molds-patterns>
- [42] J. A. N. P. Pereira, "Interação Metal-Cerâmica no Vazamento de Aços no Processo de Fundição por Cera Perdida", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017. [Online]. Disponível: <https://hdl.handle.net/10216/105885>
- [43] P. R. Beeley and R. F. Smart, "4.2 Basic Shell Build", in *Investment Casting*: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B8UK8D/investment-casting/basic-shell-build>
- [44] R. M. C. Félix, "Desenvolvimento do Fabrico de Próteses por Fundição de Precisão à Medida do Paciente", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. [Online]. Disponível: <https://hdl.handle.net/10216/57774>
- [45] S. Jones, "Improved Sol Based Ceramic Moulds for Use in Investment Casting", PhD thesis, Faculty of Engineering of the University of Birmingham, 1993.
- [46] T. H. Frye, M. Yasrebi, D.H. Sturgis, "Basic Ceramic Considerations for Lost Wax Processing of High Melting Alloys", presented on The Santa Fe Symposium, Portland, USA, 2011. [Online]. Disponível: <https://www.techformcasting.com/wp-content/uploads/2018/12/2000-Basic-Ceramic-Consideration-for-Lost-Wax-Processing.pdf>
- [47] V. Rudnev and G. E. Totten, "35.1.4.1 Steel Scrap", in *ASM Handbook, Volume 04C - Induction Heating and Heat Treatment*: ASM International. [Online]. Disponível:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4IJZU/asm-handbook-volume-4c/steel-scrap>

- [48] A. S. M. I. H. Committee, "12. Induction Furnaces", in *ASM Handbook, Volume 15 - Casting*: ASM International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008I2WN1/asm-handbook-volume-15/induction-furnaces>
- [49] L. H. a. S. L. Petri Väyrynen, "Simulation of Melting of Alloying Materials in steel Ladle", Aalto University, School of Chemical Technology, Espoo, Finland, 2012. [Online]. Disponível: <https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/08/Simulation-of-Melting-of-Alloying-Materials-in-Steel-Ladle.pdf>
- [50] P. Ramakrishnan, "References", in *Powder Metallurgy for Automotive, Aluminium Alloys, Hard and Super Hard Materials*: Scientific International. [Online]. Disponível: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011J0GJ1/powder-metallurgy-automotive/rat-cat-in-references>
- [51] Investacast. "Defects in Investment Casting - Part 1" <https://www.investacast.com/news/defects-in-investment-casting> (acedido em 15/12/2020).
- [52] "Atlas of Casting Defects", I. C. Institute, 2004.
- [53] H. Sloman and E. Evans, "Studies in The Deoxidation of Iron-Deoxidation by Aluminium", *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 165, no. 1, 1950.
- [54] T. B. Braun, J. F. Elliott and M. C. Flemings, "The clustering of alumina inclusions", *Metallurgical Transactions B*, vol. 10, no. 2, pp. 171-184, 1979, doi: 10.1007/BF02652461. [Online]. Disponível: <https://doi.org/10.1007/BF02652461>
- [55] L. Zheng, A. Malfliet, P. Wollants, B. Blanpain and M. Guo, "Effect of Alumina Morphology on the Clustering of Alumina Inclusions in Molten Iron", *ISIJ International*, vol. 56, no. 6, pp. 926-935, 2016, Disponível: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-561>.
- [56] K. Sasai and Y. Mizukami, "Mechanism of Alumina Adhesion to Continuous Caster Nozzle with Reoxidation of Molten Steel", *ISIJ International*, vol. 41, no. 11, pp. 1331-1339, 2001, Disponível: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1331>.
- [57] L. Zhang and B. Thomas, "Alumina Inclusion Behavior during Steel Deoxidation", presented on 7th European Electric Steelmaking Conference, Venice, Italy, 2002.
- [58] W. Tiekink, R. Boom, A. Overbosch, R. Kooter and S. Sridhar, "Some Aspects of Alumina Created by Deoxidation and Reoxidation in Steel", *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 37, pp. 488-495, 2010, Disponível: <https://doi.org/10.1179/030192310X12700328925822>.
- [59] A. L. V. Costa e Silva, "Non-Metallic Inclusions in Steels - Origin and Control", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 283-299, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003>.
- [60] A. L. V. Costa e Silva, "The Effects of Non-Metallic Inclusions on Properties Relevant to the Performance of Steel in Structural and Mechanical Applications", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 2408-2422, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>.

- [61] J. M. N. Espinosa, "The Effect of Deoxidation Practice on Non-Metallic Inclusions and their Effect on Mechanical Properties of a Low Alloy Steel", PhD thesis, The University of Sheffield, Sheffield, 2018. [Online]. Disponível: <https://etheses.whiterose.ac.uk/23851/7/Thesis%20Final%20WhiteRose.docx.pdf>
- [62] J. Monnot, B. Héritier and J. Cogne, "Relationship of Melting Practice, Inclusion Type, and Size with Fatigue Resistance of Bearing Steels", 1988.
- [63] A. Saboori *et al.*, "Critical Features in the Microstructural Analysis of AISI 316L Produced by Metal Additive Manufacturing", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 9, no. 1, pp. 92-96, 2020, doi: 10.1007/s13632-019-00604-6. [Online]. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s13632-019-00604-6>
- [64] R. A. Hardin and C. Beckermann, "Effect of Porosity on Deformation, Damage, and Fracture of Cast Steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, no. 12, pp. 5316-5332, 2013, doi: 10.1007/s11661-013-1669-z. [Online]. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1669-z>
- [65] B. Deşoġ, R. Zapala and P. Paġka, "Influence of Internal Scrap on Mechanical Properties of Selected Cobalt Alloys", *Journal of Casting & Materials Engineering*, vol. 1, p. 59, 2017, doi: 10.7494/jcme.2017.1.3.59.
- [66] O. Westerberg, M. Gartz, E. Stark and R. Gyllenram, "Improving Steel Quality and Decreasing Production Cost and Carbon Footprint Through Raw Material Management", 2012. [Online]. Disponível: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-steel-quality-and-decreasing-production-Westerberg-Gartz/bde7d275f1681b6e0e317fed99e893d1c7af92b4>
- [67] J. Malik, I. Vaskova, D. Fecko and P. Futas, "Homogeneity of Die Casting and Returning Material", *Archives of Foundry Engineering*, vol. 12, 2012, Disponível: <https://doi.org/10.2478/v10266-012-0037-6>.
- [68] A. A. Alamri and A. A. Syntetos, "Beyond LIFO and FIFO: Exploring an Allocation-In-Fraction-Out (AIFO) policy in a two-warehouse inventory model", *International Journal of Production Economics*, vol. 206, pp. 33-45, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.025>.
- [69] T. Panneman. "First-In-First-Out" <https://www.mudamasters.com/en/lean-production-lean-toolbox/first-first-out-fifo> (acedido em 11/12/2020).
- [70] Q. Liu, S. Yang, M. Zhao, L. Zhu and J. Li, "Pitting Corrosion of Steel Induced by Al₂O₃ Inclusions", *Metals*, vol. 7, no. 9, p. 347, 2017. [Online]. Disponível: <https://www.mdpi.com/2075-4701/7/9/347>
- [71] Y. Ren and L. Zhang, "Effect of Al₂O₃-SiO₂-MnO Inclusions on Precipitation of MnS in Si-Mn-killed 304 Stainless Steels", *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 46, no. 6, pp. 558-563, 2019, doi: 10.1080/03019233.2018.1491170. [Online]. Disponível: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1491170>
- [72] O. M. Adaba, "Oxide Inclusion Evolution and Factors that Influence their Size and Morphology", PhD thesis, Missouri University of Science and Technology, 2019. [Online]. Disponível: https://scholarsmine.mst.edu/doctral_dissertations/2801/
- [73] O. Adaba, "Formation and Evolution of Spinel in Aluminum Killed Calcium Treated Linepipe Steels", Master Thesis, Missouri University of Science and Technology, 2015. [Online]. Disponível: https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7455/

- [74] Z. Glavaš, "The Influence of Metallic Charge on Metallurgical Quality and Properties of Ductile Iron", *Kovove Materialy*, vol. 50, pp. 75-82, 2012, Disponível: https://doi.org/10.4149/km_2012_2_75.
- [75] S. D. Mario Terrazas, "Installation of Porous Plug and Injection of Argon Gas through the Bottom in Induction Furnaces at Matrix Metals - Acerlan Foundry", presented on 74th Technical & Operating Conference of the Steel Founder's Society of America, Chicago, Illinois, 9 December 2020, 2020. [Online]. Disponível: <https://www.sfsa.org/doc/2020-Acerlan%20-%20Terrazas.pdf>.
- [76] H. F. F. Peixoto, "Injeção de gases e pós reativos em Aço Líquido", Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2015. Disponível: <http://hdl.handle.net/1822/41876>
- [77] L. Zhang and S. Taniguchi, "Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation", *International Materials Reviews*, vol. 45, no. 2, pp. 59-82, 2000, doi: 10.1179/095066000101528313. [Online]. Disponível: <https://doi.org/10.1179/095066000101528313>
- [78] A. A. Garcia, "Técnicas de Soplado para la Metalurgia en Cucharas", Lugones (Asturias), 1989, pp. 395-405. [Online]. Disponível: <http://boletines.secv.es/upload/198928395.pdf>
- [79] P. Ettmayer and W. Lengauer, "Nitrides: Transition Metal Solid-State Chemistry", 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc0146.pub2>.

Anexos

Anexo 1

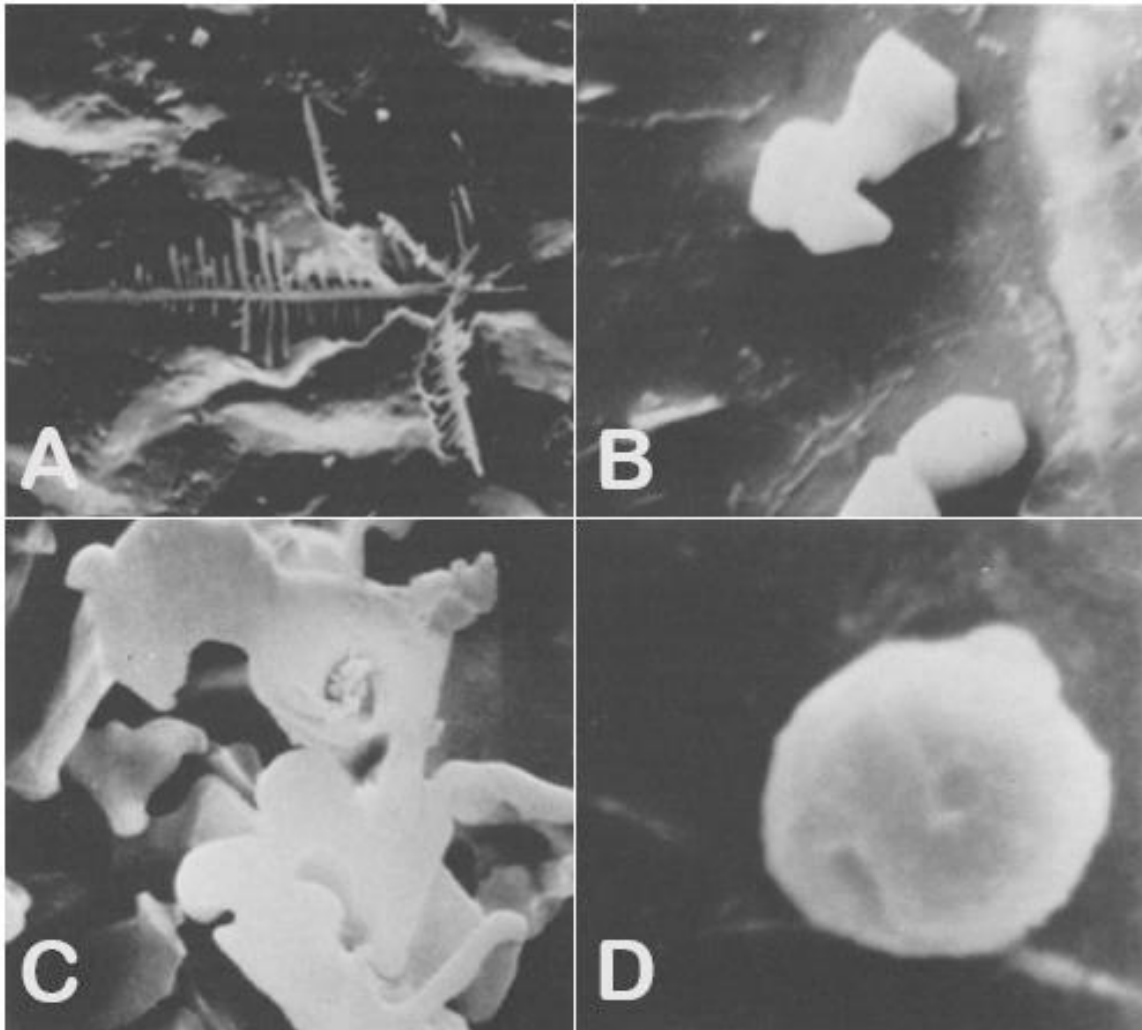


Figura A.1 - Morfologias das inclusões de alumina: A - dendrítica; B - facetada; C - "plate-like"; D - esférica [54].

Anexo 2

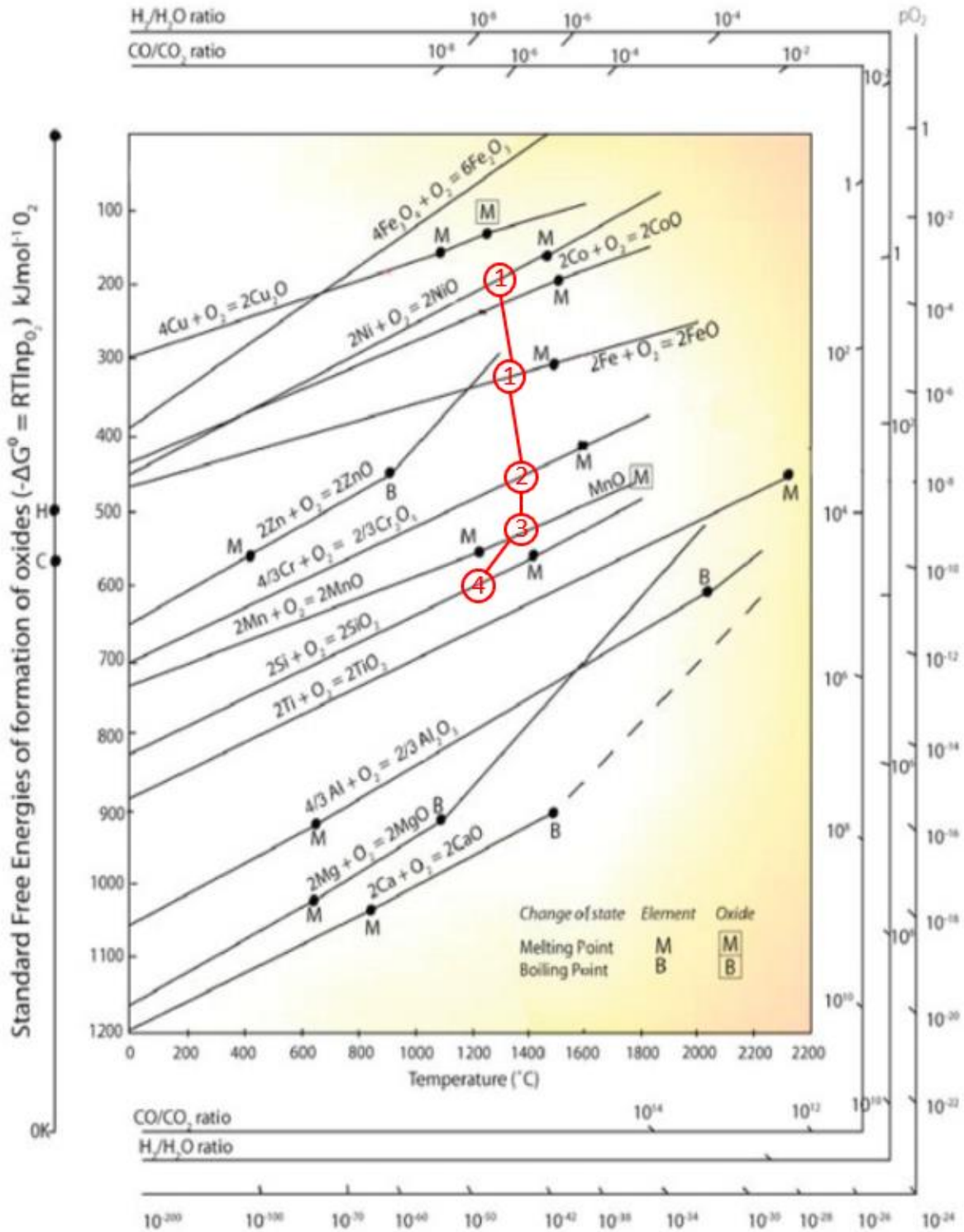


Figura A.2 - Diagrama de Ellingham, com indicação da seqüencia de carregamento das matérias-primas utilizadas na elabora o da liga estudada; adaptada de [21].

Anexo 3

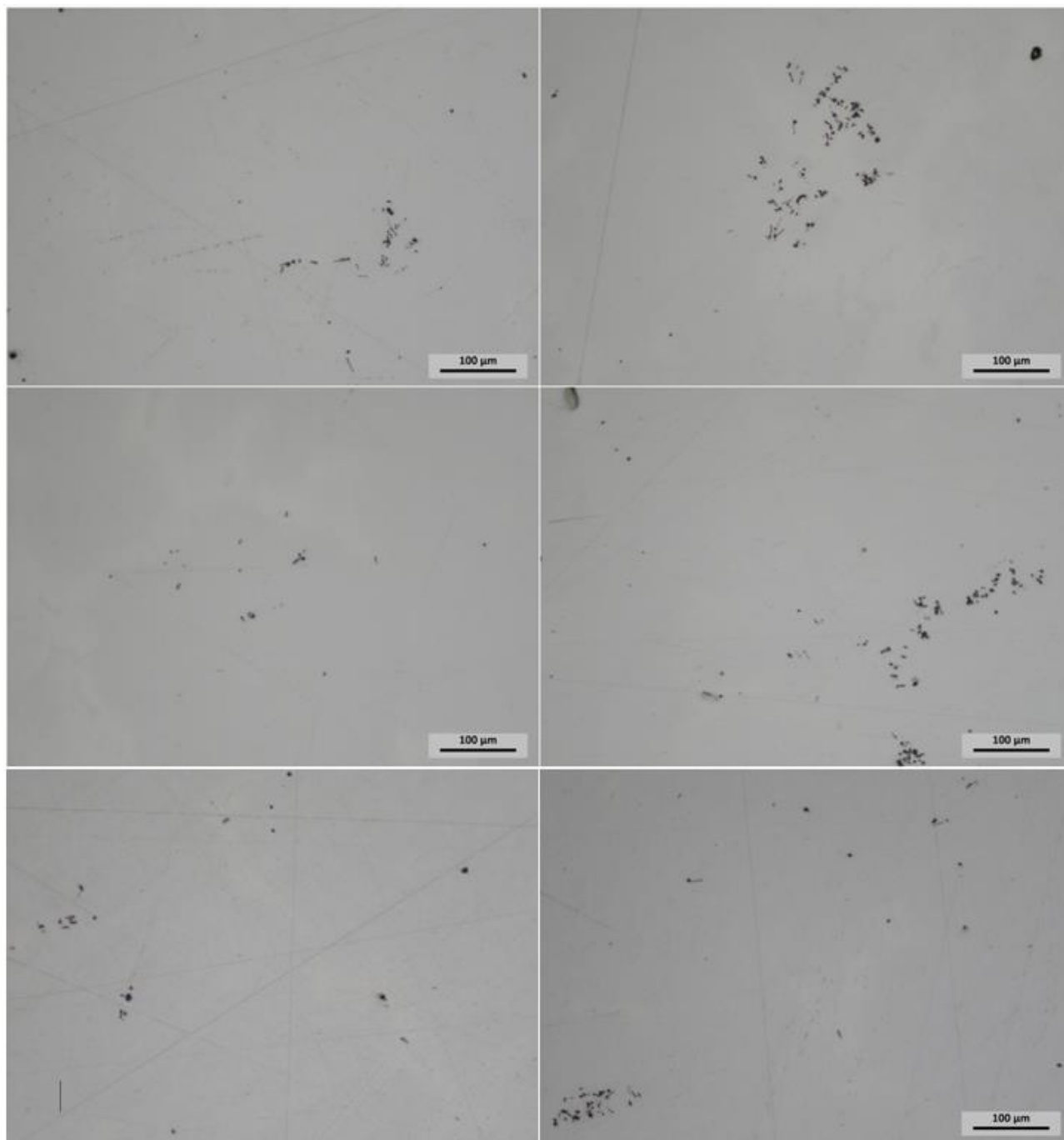


Figura A.3 - Fotomicrografias (100x) de inclusões de alumina, em amostras de aço recolhidas na primeira parte do trabalho, que se apresentam sob a forma de clusters ou dispersas pela matriz.

Anexo 5

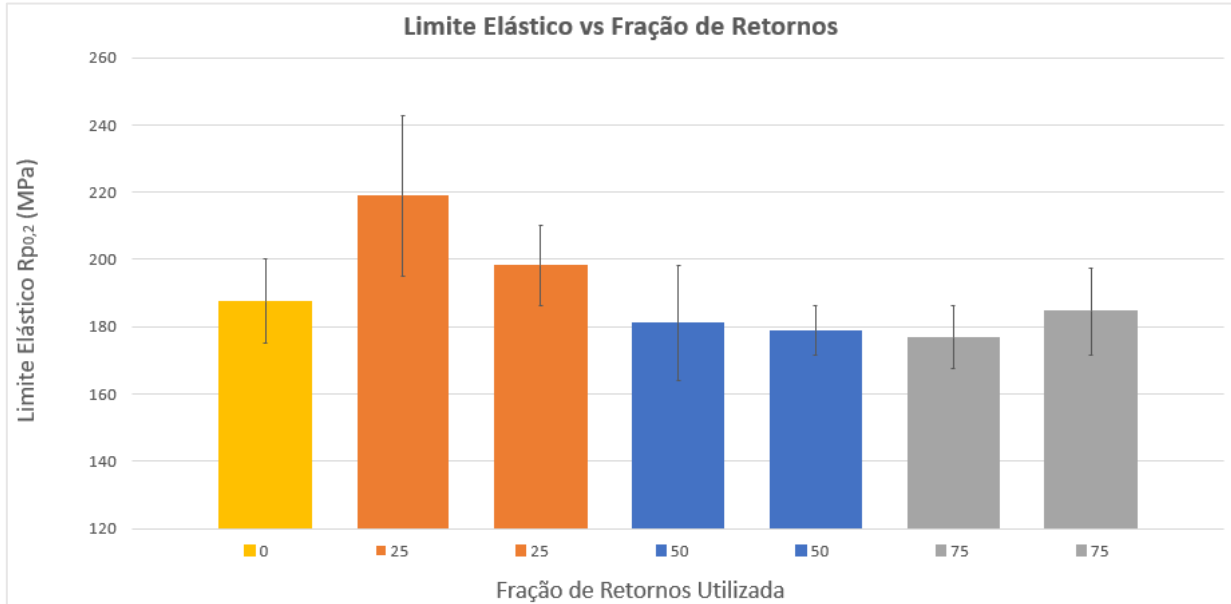


Figura A.5 - Limite elástico ($R_{p0,2}$) vs. fração de retornos da carga de fusão.

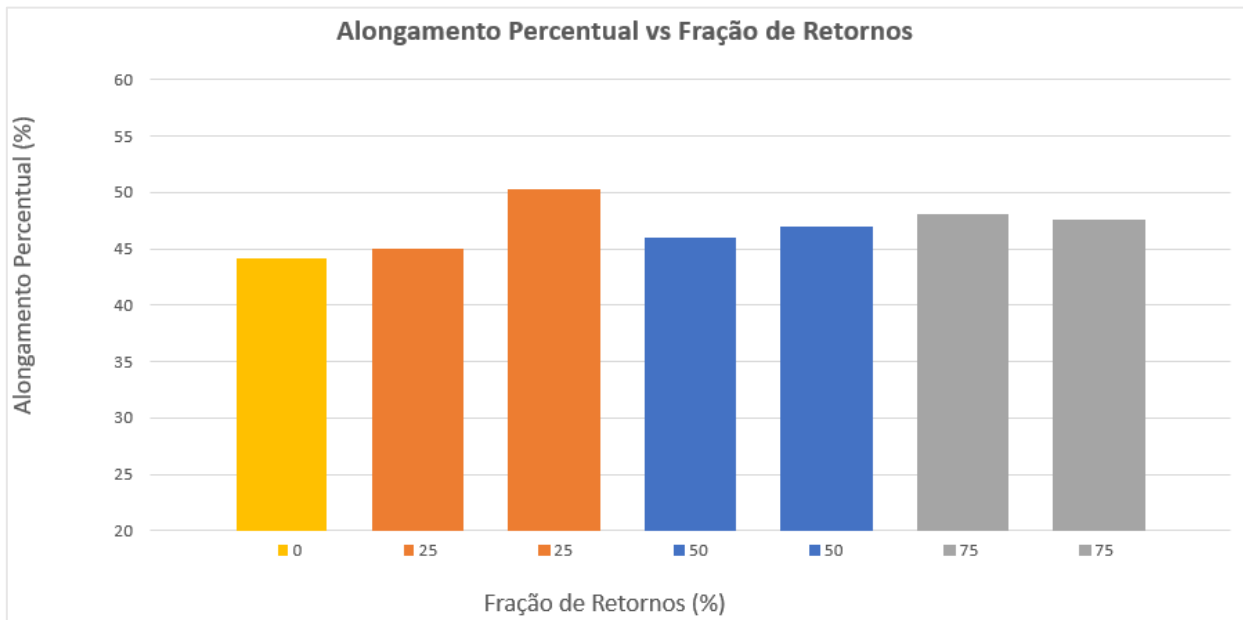


Figura A.5 - Alongamento (%) vs. fração de retornos da carga de fusão.

Anexo 6

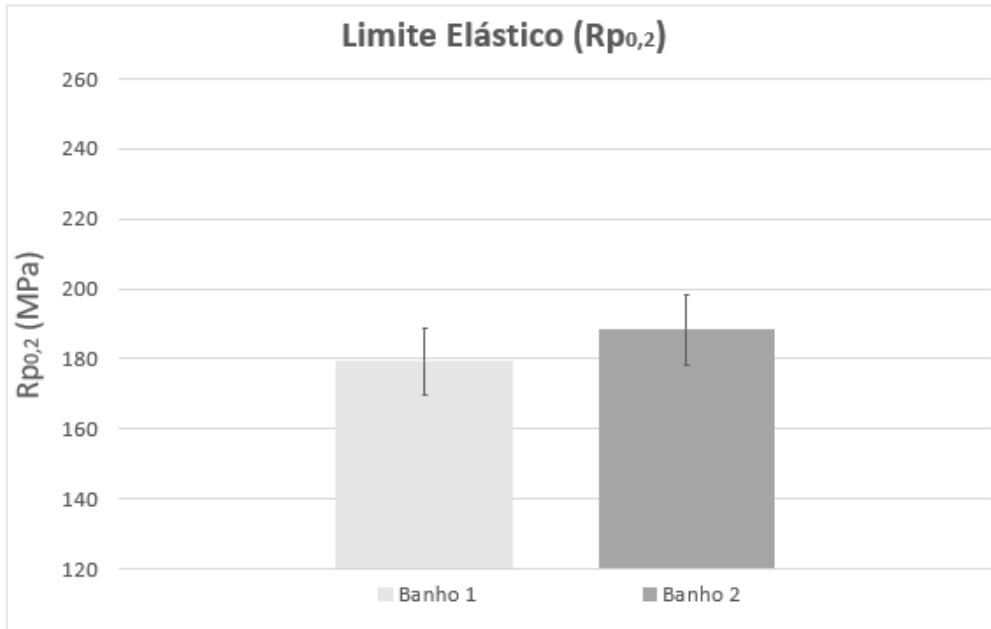


Figura A.6 - Limite elástico ($R_{p0,2}$) do aço, objeto deste estudo, determinado em provetes vazados a partir dos dois banhos metálicos tratados com insuflação de árgon.

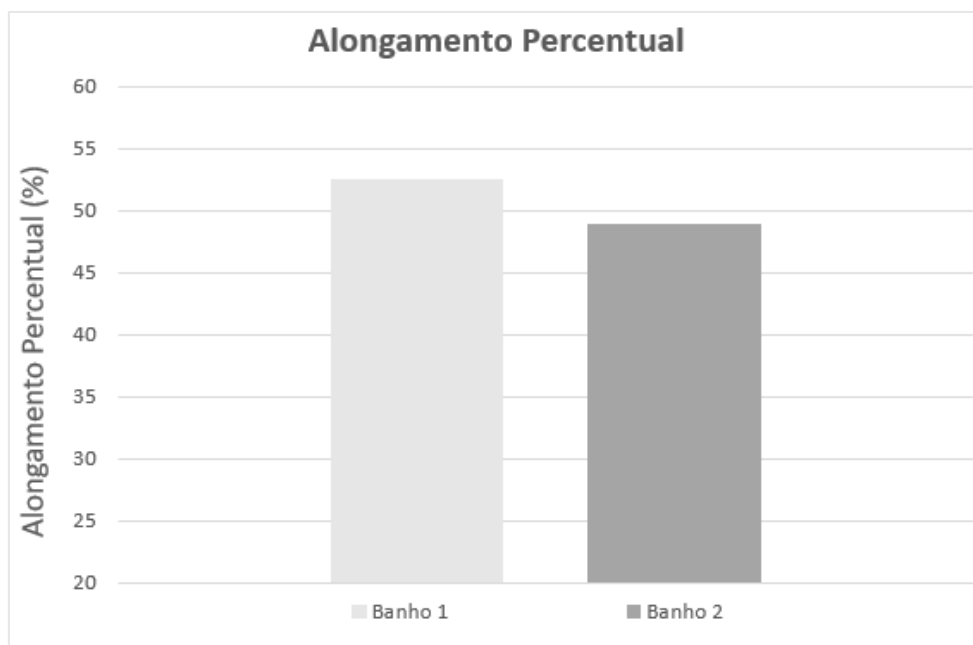


Figura A.6 - Alongamento (%) do aço, objeto deste estudo, determinado em provetes vazados a partir dos dois banhos metálicos tratados com insuflação de árgon.