



Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Hugo Filipe Fernandes Peixoto

Injeção de gases e pós reativos em aço líquido

Setembro 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Hugo Filipe Fernandes Peixoto

Injeção de gases e pós reativos em aço líquido

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia de Mecânica

Dissertação orientada por

Eurico Seabra

Fernando Castro

Setembro 2015

Agradecimentos

A possibilidade de desenvolver esta dissertação, no âmbito do projeto realizado na empresa Ferespe – Fundação de Ferro e Aço, Lda., surge como uma importante mais-valia para a minha formação, endereçando por isso um agradecimento especial à empresa por esta oportunidade.

Aos orientadores, na pessoa do Professor Doutor Fernando Castro e o Professor Doutor Eurico Seabra, tenho a agradecer o importante contributo no acompanhamento, disponibilidade e dedicação prestados ao longo deste projeto.

Um especial agradecimento à equipa Ferespe, por toda a disponibilidade, em particular ao Joaquim Santos, Pedro Lacerda, Marco Marques, Paulo Costa e Paulo Faria.

À minha família, pelo importante suporte que representam e pelo apoio imprescindível durante o percurso universitário, quero dedicar um especial muito obrigado, estando-lhes grato por tudo. De modo particular, endereço um agradecimento especial ao António Peixoto, meu avô, pelo exemplo de perseverança que representa para mim.

A todos muito obrigado!

Resumo

No âmbito do projeto desenvolvido na empresa Ferespe – Fundição de Ferro e Aço, Lda. surge esta Dissertação de Mestrado, cujo tema passa pelo desenvolvimento e conceção de um equipamento que permita a injeção de gases e pós no banho de metal líquido. Sendo o principal objetivo a promoção da sua limpeza e homogeneização da composição do metal fundido.

Com o intuito de obter conhecimento relativamente às práticas, equipamentos e recursos utilizados nesta fase do processamento do metal fundido, recorreu-se a pesquisas bibliográficas bem como foi realizada uma visita à Siderurgia Nacional, S.A. e paralelamente efetuou-se um acompanhamento *in loco* do processo na empresa.

O estudo dos diversos dispositivos utilizados na injeção de gás e pós, as variáveis operacionais com influência na hidrodinâmica do banho, os processos de transporte e a gama de elementos normalmente utilizados nas práticas de refinação no forno, serviram de suporte ao desenvolvimento do projeto apresentado nesta dissertação.

A definição do modo operativo do equipamento, bem como os diferentes passos para a sua construção, foram os alicerces essenciais para o desenvolvimento do trabalho. Com base nas práticas aplicáveis na empresa em conjunto com a informação recolhida, definiram-se diversos fatores do processo, como a determinação do argon e da cal, elementos a insuflar. No seguimento destas opções foram definidos os principais subsistemas do equipamento de injeção, como o invólucro refratário, a tipologia de alimentação e o circuito de insuflação. Um primeiro esboço da lança, em particular a extremidade de injeção, possibilitou o início dos passos de experimentação para o dimensionamento dos subsistemas da lança. Foram realizados diversos testes, complementados por métodos numéricos, que permitiram estudar o sistema de insuflação. Numa primeira fase contemplando apenas a aspiração dos pós para posteriormente ser coadjuvado pela pressurização do depósito.

Após os ensaios de todos os subconjuntos efetuou-se a sua montagem, originando a estrutura do protótipo final para o trabalho experimental no forno. O processo evolutivo de todos os componentes, ao longo do projeto, foi conseguido graças aos inúmeros testes realizados na fundição do metal líquido, onde foram adaptadas e otimizadas as técnicas de construção do refratário. Devido aos obstáculos presentes, como a frequente obstrução da lança, houve a necessidade de redefinir os valores teóricos da pressão a injetar, para posteriormente conjugá-los com a velocidade do fluxo, de modo a conferir estabilidade no comportamento de homogeneização do banho.

Na sequência dos testes realizados para a otimização do protótipo, concluiu-se que os efeitos das suas ações sobre o banho são inofensivos. A consequente análise química e física às amostras recolhidas evidenciou os progressos na limpeza do banho fundido, em resultado das reações ao nível da composição das inclusões de óxidos e sulfuretos.

Por fim foi realizada a automatização e dimensionamento do equipamento otimizado.

Palavras-Chave: Desgaseificação do banho, injeção de gás e pós, pressão metalostática, lança metalúrgica, sucção e pressurização.

Abstract

Under the project developed in FERESPE company - Iron and Steel Foundry Ltd. has appeared this Master's Thesis, which the main subject involves the development and design of an equipment that allows the injection of gases and powders in the liquid metal bath. The main goal is the promotion of its cleanliness and the homogenization of the molten metal composition.

In order to obtain knowledge regarding to this application, equipments and resources were used at this phase of the molten metal processing, literature research and a visit to the National Steel Mill, SA were made and in the meantime makes a *in loco* process monitoring in the company.

They were made studies to support the development of the presented project, such as, several devices were used during the gas injection and after that, operating variables which influence in the hydrodynamic bath, the transport processes and the range of elements normally utilized in oven refining practices.

The setting of the operating equipment mode and the different steps for its construction, were crucial for the development work. Based on the company practices and information gathered, the process factors were defined, such as, argon flow and lime like the elements to insufflate. After get the major subsystems of the injection equipment they were defined the refractory casing, the feed type and the blowing circuit. A first draft of the spear, in particular the extremity of the injection, it made possible starting the experimental steps for the spear subsystems designing. Several tests were made, complemented by numerical methods, allowed studying the insufflation system. Initially looking only on the aspiration of the powders and later to be assisted by pressurizing the deposit.

After testing all the system subsets its assembly has been made, creating the structure of the final prototype for the realization of the experimental work in the oven. Evolutionary process of all components throughout the project, was achieved due to the numerous tests performed on the fusion of the liquid metal, which have been adapted and optimized the refractory construction techniques. Due to present obstacles, like the frequent obstruction of the spear, there was the necessity to redefine the theoretical values of the pressure to inject for later conjugate them with the speed of the flow, in order to establish stability in the homogenization of the bath behavior.

Following the tests carried out to achieve the main objective, it was concluded the optimization of the prototype, that the effects of their actions on the bath are inoffensive. The chemical and physical analysis results to the collected samples shows progress in the cleaning of the molten bath, as a result of the reactions in terms of the composition of inclusions of oxides and sulphides.

Finally, the automation and the design of the optimized equipment was performed.

Keywords: Bath degassing, gas and powders injection, metallostatic pressure, metallurgical lance, suction and pressurization.

Índice

Lista de Figuras.....	viii
------------------------------	-------------

Lista de Tabelas	xv
-------------------------------	-----------

1. Introdução	1
1.1. Motivação e enquadramento do projeto na empresa	2
1.1.1. A Empresa	2
1.2. Definição de objetivos	3
1.3. Estrutura do projeto	4
1.4. Pertinência do tema e contributo científico	4
2. Estado da Arte	6
2.1. Mecanismos e técnicas utilizadas em fundições e siderurgias	6
2.1.1. Processos sob vácuo	6
2.1.2. Processos à pressão atmosférica.....	8
2.1.2.1. Método de tampão de argon com lança injetora	9
2.1.2.2. Método Convencional	10
2.1.2.3. Adição por fio	10
2.1.2.4. Método de injeção de pós.....	11
2.1.2.5. Método de adição veiculado de alumínio.....	12
2.1.2.6. Método de adição por diversos tipos de lança	13
2.2. Tipos de soluções existentes	14
2.2.1. Ambiente de aplicação	15
2.2.2. Gás inerte e partículas sólidas	16
2.2.3. Metodologia de insuflação: forma de atuação do argon	18
2.2.3.1. Mecanismo de formação das bolhas	19
2.2.3.2. Relação entre a pressão de insuflação e as bolhas formadas	20
2.2.3.3. Localização da lança de insuflação.....	20
2.2.3.4. Relação entre a insuflação e as perdas de temperatura do banho ..	20
2.2.4. Relações de velocidade de insuflação: Venturi vs Laval	21
2.2.5. Aplicabilidade dos métodos existentes no projeto: limpeza e refinação	22
2.2.6. Tipologias de lanças: vantagens e desvantagens	23
2.2.7. Patentes de equipamentos metalúrgicos: lanças.....	24
2.2.7.1. Lança de múltiplo fluxo	24
2.2.7.2. Lança para injeção de partículas no interior do metal líquido	26
2.2.7.3. Lança para injetar substâncias sob a forma de pós ou de partículas	27
2.2.7.4. Dispositivo para a injeção de material sólido em partículas	29
2.2.7.5. Lança de Injeção	30
2.2.7.6. Lança metalúrgica	32
2.2.7.7. Método de injeção de gás	33

2.2.7.8.	Injeção de fio pela lança.....	34
2.2.7.9.	Lança de injeção de forma controlada.....	36
2.2.8.	Equipamentos metalúrgicos: aplicação no projeto.....	38
3.	Projeto Concetual	40
3.1.	Ambiente de aplicação: especificações e requisitos	40
3.1.1.	Descrição do processo de fundição.....	41
3.1.1.1.	Modo Atual.....	41
3.1.1.2.	Modo otimizado	42
3.2.	Material a insuflar.....	42
3.3.	Conceção física da lança	44
3.3.1.	Refratário.....	46
3.3.2.	Depósito de alimentação.....	48
3.3.3.	Circuito de Insuflação	50
3.3.3.1.	Testes de Insuflação	53
4.	Projeto de Detalhe	60
4.1.	Evolução do Refratário	62
4.2.	Evolução do Depósito	70
4.3.	Evolução do Sistema de Insuflação.....	75
4.3.1.	Testes de sucção.....	80
4.3.1.1.	Procedimento.....	81
4.4.	Protótipo do equipamento de insuflação de gases e pós	84
5.	Trabalho Experimental.....	86
5.1.	Cálculo da pressão de insuflação.....	86
5.2.	Testes experimentais	89
5.3.	Simulação dos testes experimentais	104
6.	Discussão de Resultados	106
6.1.	Análise da composição química.....	107
7.	Trabalho Futuro	109
7.1.	Melhorias a introduzir no protótipo atual.....	109
7.2.	Sistema Automatizado.....	110
7.2.1.	Ciclo Operativo	110
7.2.2.	Controlo do sistema	111
7.3.	Modelação do sistema automatizado	113
8.	Conclusão	117
	Referências Bibliográficas	119

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 – Modelo de tampa hermética	7
Figura 2.2 – Modelo de câmara de vácuo	7
Figura 2.3 – Esquema VOD	7
Figura 2.4 – Lança injetora de árgon ..	9
Figura 2.5 – Tijolo poroso de injeção de árgon	9
Figura 2.6 – Adições na panela pelo método convencional	10
Figura 2.7 – Método de tratamento de aço, por adição de fio	11
Figura 2.8 – Adições na panela, injeção de projéteis de Al	12
Figura 2.9 – Adição veiculada de alumínio	12
Figura 2.10 – Dessulfurizador Thyssen-Niederrhein	13
Figura 2.11 – Lanças para a insuflação de gases e injeção de pós	13
Figura 2.12 – Comportamento da temperatura do banho na presença/ausência de insuflação	14
Figura 2.13 – Variação da pressão de insuflação de Ar ao longo do tempo	20
Figura 2.14 – Temperatura de vazamento em função da presença/ausência de insuflação	21
Figura 2.15 – Esquema teórico de venturi	22
Figura 2.16 – Constituição do bocal injetor.....	25
Figura 2.17 – Fluxo injetado	25
Figura 2.18 – Alçado lateral, em corte, da lança de injeção de gás e pós	27
Figura 2.19 – Vista axial, em corte, da lança de injeção de pós e partículas	28
Figura 2.20 – Pormenor da geometria troncocónica	28
Figura 2.21 – Secção longitudinal da lança, em corte	29

Figura 2.22 – Estrutura da lança	31
Figura 2.23 – Pormenor do corpo da lança	31
Figura 2.24 – Extremidade da lança	31
Figura 2.25 – Vista, em corte, do bocal injetor	31
Figura 2.26 – Lança metalúrgica	33
Figura 2.27 – Pormenor do bico de injeção	33
Figura 2.28 – Configuração do bocal injetor	34
Figura 2.29 – Configuração das condutas	34
Figura 2.30 – Revestimento da lança	35
Figura 2.31 – Extremidade da lança	36
Figura 2.32 – Corte transversal da lança	36
Figura 2.33 – Corpo da lança	37
Figura 2.34 – Corte pormenorizado do injetor.....	37

Capítulo 3

Figura 3.1 – Forno Original	41
Figura 3.2 – Forma criada pela Ferespe	41
Figura 3.3 – Esboço da Lança de injeção de pós/gases	45
Figura 3.4 – Esboço do protótipo para testes de insuflação	45
Figura 3.5 – Invólucro refratário.....	47
Figura 3.6 – Estrutura de ancoragem	47
Figura 3.7 – Estrutura granular do refratário	47
Figura 3.8 – Estrutura homogénea do refratário	48
Figura 3.9 – Protótipo de testes de sucção	48
Figura 3.10 – Pesca de aspiração.....	49

Figura 3.11 – Base preliminar	49
Figura 3.12 – Base desfavorável ao efeito de gravidade.....	49
Figura 3.13 – Convergência de saída	50
Figura 3.14 – Entrada de gás e pós	50
Figura 3.15 – Disposição da estrutura tubular	51
Figura 3.16 – União de ferro fundido	51
Figura 3.17 – Tubo de aço	52
Figura 3.18 – Pormenor do tubo	52
Figura 3.19 – Tubo de injeção	52
Figura 3.20 – Tubo interno / entrada do pó.....	52
Figura 3.21 – Manómetro Redutor.....	53
Figura 3.22 – Modelo de Escoamento do Sistema de Venturi	54
Figura 3.23 – Tubo de “pesca”.....	54
Figura 3.24 – Vista em pormenor do sistema de sucção	55
Figura 3.25 – Tubos de injeção.....	55
Figura 3.26 – Tubos de injeção aprimorados	56
Figura 3.27 – Tê a 45.....	57
Figura 3.28 – Orifícios de sucção do Tê a 90° e a 45°	57
Figura 3.29 – Composição do Modelo de Venturi.....	58

Capítulo 4

Figura 4.1 – Protótipo estrutural da lança	61
Figura 4.2 – Sistema de medição de pressão	62
Figura 4.3 – Ajuste da peça ao molde	63
Figura 4.4 – Peças para centrar a conduta no interior do invólucro.....	63

Figura 4.5 – Lança após o cozimento e ensaio no forno	63
Figura 4.6 – Refratário com conduta oca	64
Figura 4.7 – Tubo conexo à conduta	64
Figura 4.8 – Hastes de suporte	65
Figura 4.9 – Esquema de montagem da extremidade da lança	65
Figura 4.10 – Bocal de injeção obstruído	66
Figura 4.11 – Reduzida espessura de refratário	66
Figura 4.12 – Fendas no refratário	67
Figura 4.13 – Ciclo de secagem do refratário	67
Figura 4.14 – Processo de cozimento das lanças no forno de tratamentos térmicos ..	68
Figura 4.15 – Extremidade, compacta, das lanças no fim da etapa de secagem.....	69
Figura 4.16 – Lança após a cozedura.....	70
Figura 4.17 – Lança após o ensaio no forno	70
Figura 4.18 – Entradas e saída do depósito.....	71
Figura 4.19 – Cone defletor	72
Figura 4.20 – Descentramento do vértice do defletor	72
Figura 4.21 – Tubo injetor e o respetivo esboço simplificativo	72
Figura 4.22 – Localização do tubo gerador de turbulência	73
Figura 4.23 – Depósito com alterações estruturais.....	73
Figura 4.24 – União do tubo na entrada de gás	74
Figura 4.25 – Concentricidade entre o tubo injetor e a saída.....	74
Figura 4.26 – Saída vertical.....	74
Figura 4.27 – Evolução do depósito	75
Figura 4.28 – Conduta principal	76
Figura 4.29 – Circuito Secundário	76

Figura 4.30 – Posicionamento da válvula antirretorno	76
Figura 4.31 – Entrada de gás no depósito	77
Figura 4.32 – Sistema de sucção	78
Figura 4.33 – Tubo de injeção/saída do depósito	78
Figura 4.34 – Bifurcação otimizada	79
Figura 4.35 – Elemento filtrante.....	80
Figura 4.36 – Sistema de Insuflação	80
Figura 4.37 – Sistema de injeção	81
Figura 4.38 – Tubo para medir depressão.....	81
Figura 4.39 – Variabilidade da geometria das condutas	82
Figura 4.40 – Pressão na conduta 1.....	82
Figura 4.41 – Pressão na conduta 2.....	83
Figura 4.42 – Queda de pressão na conduta 1.....	84
Figura 4.43 – Segmentação do protótipo final.....	85

Capítulo 5

Figura 5.1 – Projeções do banho	90
Figura 5.2 – Danos provocados durante o ensaio	90
Figura 5.3 – Conduta intacta	90
Figura 5.4 – Conduta obstruída	92
Figura 5.5 – Amplitude da incrustação.....	92
Figura 5.6 – Bocal de saída	93
Figura 5.7 – Bocal obstruído.....	94
Figura 5.8 – Conduta ainda obstruída após ação do eletrodo	94
Figura 5.9 – Estrutura do invólucro refratário.....	95

Figura 5.10 – Lança danificada	96
Figura 5.11 – Incrustação no interior da estrutura de vergas de aço danificadas	96
Figura 5.12 – Conduta desobstruída	97
Figura 5.13 – Incrustação de metal fundido.....	97
Figura 5.14 – Solidez do refratário da lança.....	98
Figura 5.15 – Fração de metal fundido.....	98
Figura 5.16 – Fissura exterior na lança.....	98
Figura 5.17 – Banho fundido projetado para o exterior do forno	99
Figura 5.18 – Invólucro refratário após teste no forno.....	99
Figura 5.19 – Fragmentação do invólucro refratário	100
Figura 5.20 – Bocal injetor albergando a incrustação	100
Figura 5.21 – Dimensão da incrustação responsável pela obstrução da lança.....	101
Figura 5.22 – Medição da profundidade máxima de insuflação	102
Figura 5.23 – Incrustação no interior do bocal injetor.....	102
Figura 5.24 – Simulação da posição de insuflação	103
Figura 5.25 – Modelo de teste em areia de sílica.....	105

Capítulo 6

Figura 6.1 – Amostras para análise da composição química	108
Figura 6.2 – Exemplo de amostras recolhidas para posterior análise no microscópio	108

Capítulo 7

Figura 7.1 – Grafcet de controlo do sistema	112
Figura 7.2 – Grafcet de Segurança.....	113
Figura 7.3 – Modelação do Protótipo Final	114
Figura 7.4 – Vista em pormenor dos componentes da lança.....	114

Figura 7.5 – Protótipo Final com uma estrutura de suporte.....	115
Figura 7.6 – Representação do enquadramento do equipamento na fusão	116

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Efeitos dos elementos de liga nas propriedades dos aços	18
--	----

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Características do forno	40
---	----

Tabela 3.2 – Dimensões geométricas dos modelos de Venturi	58
---	----

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Pressões da conduta 1	82
--	----

Tabela 4.2 – Pressões na conduta 2	83
--	----

Tabela 4.3 – Pressões na conduta 3	83
--	----

Tabela 4.4 – Diferentes elementos que compõem a lança	85
---	----

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Gama de pressões teórica e real, em profundidade	88
---	----

Capítulo 7

Tabela 7.1 – Etapas de comando do Grafcet.....	112
--	-----

1. Introdução

O projeto aqui desenvolvido, ao longo do ano letivo 2014/2015, surge no âmbito de uma Dissertação de Mestrado do curso Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. A natureza deste trabalho assenta na vertente técnica suportada por importantes bases de investigação.

Em pleno século XXI é crucial para as empresas a presença na linha da frente relativamente aos recursos, ferramentas e métodos que o mercado tem para oferecer. Sendo a metalomecânica, mais concretamente as fundições e siderurgias, uma área que ainda tem presente muitas das suas origens, é necessário não descurar os seus princípios básicos mesmo quando se pretende introduzir inovação assente em reengenharia. O que se pretende é aplicar recursos provenientes das mais diversas áreas, conjugando-os com as bases da fundição, para o resultado ir de encontro às necessidades dos clientes, de forma proficiente para o aparelho produtivo.

Com o intuito de dotar a área da fundição, numa linha progressista, estabelece-se uma importante cooperação entre o ambiente universitário e laboral. Onde os conceitos teóricos aliados à prática e técnica das empresas culminam numa mais-valia para a indústria e conseqüentemente para o país. Resultando isto no presente projeto, envolvendo o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho e a empresa Ferespe – Fundição de Ferro e Aço, Lda.

Este projeto enquadra portanto as áreas da metalomecânica, materiais, fluídos e mecatrónica, visando solucionar o objetivo proposto – conceção de uma lança que permita a injeção de pós e gases no banho de metal líquido. No sentido de responder a esta necessidade da empresa, foi conveniente realizar uma abordagem do geral para o particular.

Em primeiro lugar, a integração no ciclo produtivo e o recorrente estado da arte assumiram-se como essenciais para o início do trabalho. Esperando-se com o decorrer deste, uma aproximação ao particular, passando para a parte de projeto, onde foram integradas subsoluções correspondentes às requeridas subfunções, com o intuito primordial de solucionar o problema.

No final, a desejada solução contemplou a validação das subfunções do referido equipamento havendo sempre espaço para as necessárias melhorias como trabalho futuro.

1.1. Motivação e enquadramento do projeto na empresa

A necessidade de desenvolvimento de um equipamento útil à empresa conjuntamente com a possibilidade de desenvolver capacidades tanto pessoais como laborais, junto de uma equipa experiente da empresa, com o necessário suporte técnico do corpo docente da Universidade, foram fundamentais para desenvolver o projeto em questão.

A área da fundição, sendo cada vez mais potenciadora de valor para a economia do País, congrega em si, para além dos necessários conhecimentos da composição, microestrutura e ciclos térmicos dos materiais, valências técnicas como a termodinâmica, gestão de recursos, engenharia do produto, projeto mecânico, entre outros. Havendo ainda necessidade de conciliar a mecatrónica neste projeto para automatizar o equipamento, tudo isto, para responder às cada vez mais exigentes particularidades das peças a produzir.

Com o intuito de corresponder a essas necessidades, a empresa – Ferespe, Fundação de Ferro e Aço, Lda. – teve a necessária visão empreendedora para se capacitar a este nível, manifestando interesse nesta colaboração através desta dissertação sobre o tema.

A lança pretendida que se quer integrar no processo produtivo da empresa, poderá permitir poupanças energéticas ao longo do ciclo produtivo, durante a fundição de aços e ferros, assim como o incremento de melhorias ao nível da qualidade dos produtos obtidos. Este equipamento terá influência direta no foco de atividade da Ferespe, atuando no ponto crucial, a composição química das ligas aqui produzidas, homogeneizando a composição do banho. Além de promover objetivamente a limpeza do banho fundido, atuando ao nível da composição das inclusões de óxidos e sulfuretos, permitirá auxiliar os colaboradores neste processo com a decantação das inclusões até à camada de escória, impurezas e gases, que têm um comportamento nefasto para a composição do produto final.

Através da lança de injeção de pós e gases no banho de metal líquido será possível adicionar valor acrescentado à qualidade do produto final, reduzindo os custos nos processos subsequentes de tratamentos térmicos e ações corretivas dos defeitos presentes.

1.1.1. A Empresa

A empresa Ferespe, sediada no concelho de V.N. Famalicão, começou a sua atividade em 1981, tendo uma equipa de 78 colaboradores. O objetivo inicial passava pela produção de Ferros de Alta Liga. No decorrer dos anos ampliou a sua gama de produtos de fundição com o intuito de maximizar a sua equipa, passando a produzir Aços de Alta, Média e Baixa Liga, com especial enfoque nos aços inoxidáveis super-duplex e super-austeníticos.

Ao longo da sua história foram ultrapassadas fronteiras, exportando na atualidade 95% da sua capacidade de produção de peças fundidas ferrosas, de um total de 1,100 Ton/ano. Tendo na sua carteira clientes de diversos países, desde USA, UK, Alemanha, Israel, Índia entre outros.

O espaço de trabalho em que a Ferespe se insere está enquadrado num nicho de mercado caracterizado pela produção em pequenas e médias séries, com a exigência de pequenos prazos de entrega e necessariamente padrões de qualidade extremamente elevados, sem nunca descuidar o respeito pelo ambiente. Tendo um papel ativo perante o mercado, onde espera ser líder no seu nicho e respeitada por todos os seus parceiros de negócio [1].

1.2. Definição de objetivos

O propósito do presente trabalho assenta no estudo e conceção de um protótipo físico para testes e posterior validação do mesmo. Para depois culminar na construção de um equipamento final, dotado de atributos capazes de corresponder às exigências da aplicação.

O objetivo primordial passa pela insuflação de gás e pós para a desgaseificação do banho e modificação da morfologia das inclusões de óxidos e de sulfuretos, como tal terão de ser seguidas premissas que no seu conjunto respondem a este propósito.

Objetivamente as premissas deste projeto assentam na:

1. Conceção de um modelo de testes para estudar o comportamento do fluxo tanto de gás como de transporte de pós no sistema;
2. Otimização das características do fluxo de gás e pós de forma independente;
3. Correlação das propriedades externas e internas ao banho, com o intuito de culminar na construção da lança;
4. Dimensionamento eficaz do sistema de injeção tendo em consideração as condições adversas inerentes ao processo;
5. Conceção de uma estrutura de proteção capaz de proteger as propriedades operativas da lança;
6. Conjugação das características do banho com elementos a adicionar para teste;
7. Validação de todos os subsistemas afetos ao equipamento;
8. Modelação e definição do equipamento final anteriormente validado;
9. Automatização do sistema, com a definição da componente de interface homem-máquina;

1.3. Estrutura do projeto

Para o desenvolvimento do referido equipamento é de todo útil fracionar o trabalho a desenvolver em diferentes fases, correspondendo estas aos objetivos anteriormente definidos. Tudo isto estruturado numa lógica de projeto, onde se integram diversas áreas de conhecimento com o objetivo de responder ao problema inicial, injetar gases e pós no banho de metal líquido.

Primeiramente efetuar-se-á um enquadramento no contexto tanto do ciclo operativo da empresa como na atual realidade do equipamento proposto. Com isto pretende-se uma total integração nos assuntos relativos à fundição e partindo desses pressupostos entender melhor o estado de arte das lanças metalúrgicas e de processos com um objetivo final semelhante. Na sumarização de tudo isto, flurirão inúmeras subsoluções capazes de responder às subfunções que vão surgindo ao longo do processo.

O grupo de subfunções a seguir apresentado representa a base estrutural do projeto, com a divisão pelas principais áreas de enfoque.

Seguidamente, por cada subfunção:

- Depósito de pós;
- Refratário de proteção;
- Circuito de injeção;
- Sistema automatizado,

realizar-se-ão testes que servirão para validar todos os sistemas que depois serão conjugados, personificando o equipamento final.

1.4. Pertinência do tema e contributo científico

O desenvolvimento da lança apresenta utilidade para o meio em que se insere, processamento de ligas ferrosas por fundição. Embora seja um equipamento relativamente recente na área da fundição, nas siderurgias é comumente aplicado das mais diversas formas, com vários modelos e sistemas patenteados.

Sistemas com uma ampla gama de geometrias dos fornos e dos caudais de gás têm sido estudados, assim como os respetivos dispositivos de injeção de gás, recorrendo-se geralmente a lanças e pedras porosas.

As aplicações na siderurgia serviram como impulso à inicialização do projeto, vendo interesse de atuação nesta área pois é uma lacuna ainda existente ao nível das fundições e paralelamente um exemplo a seguir do nível macroscópico. Logo foi possível retirar ilações e começar a prototipagem numa linha semelhante aos equipamentos já desenvolvidos siderurgicamente.

A influência das variáveis operacionais (como taxa de injeção de gás, geometria do forno e localização do bocal de injeção de gás) na hidrodinâmica do banho e nos processos associados ao transporte têm sido extensivamente estudados e a influência que estas variáveis exercem sob condições práticas de refinação no forno. Desse modo, existe hoje uma ampla modelação matemática dos fenómenos associados ao fluxo fluido de transporte, como a mistura bifásica, as reações e a constituição da escória e a transferência de massa líquido/sólido.

Olhando para o progresso já existente na escala siderúrgica, foi possível identificar as funções normalmente desempenhadas por este equipamento, podendo sempre divergir momentaneamente nas suas aplicações e em alguns atributos específicos de cada aplicação. Mas de modo generalista estão presentes as mesmas funções básicas que importam para este projeto.

Portanto, partindo de uma base sólida, existiram meios e conhecimentos que permitiram adaptar este equipamento para poder ser implementado futuramente nas fundições com as respetivas necessidades da fundição. O foco da sua atuação será a melhoria das condições de homogeneização do banho, auxiliando a sua limpeza com a atuação ao nível da composição das inclusões de óxidos e sulfuretos, e contribuindo para a evolução do modo como se adicionam os produtos de acerto, tornando esta adição mais eficiente e procurando-se obter melhores resultados finais.

2. Estado da Arte

Na fase inicial de execução do projeto, para além da importante integração no terreno, acompanhamento dos ciclos de fundição, foi essencial visitar o passado e o presente. Desta forma, entendendo o que de importante se faz a nível siderúrgico, relativamente a equipamentos de injeção, conjuntamente com as técnicas e mecanismos contemporâneos de fundição, será mais claramente compreendido o objetivo proposto e o seu âmbito. Para tal, neste capítulo, far-se-á um estudo aos mecanismos e técnicas utilizadas, assim como o tipo de soluções já exploradas.

2.1. Mecanismos e técnicas utilizadas em fundições e siderurgias

No âmbito do ambiente metalúrgico importa compreender o enquadramento e importância que as siderurgias têm e como influenciam as técnicas utilizadas nas fundições. Para tal, são apresentados seguidamente diversos processos onde se aplicam diferentes mecanismos, dependendo das pretensões, que podem ser correlacionados entre as siderurgias e fundições, retirando-se as respetivas ilações e paralelismos de aplicação.

2.1.1. Processos sob vácuo

Na fundição de aço e ferro existem inúmeros processos, assim como escalas de produção, diversificando assim as variáveis associadas ao processo.

Os processos de desgaseificação a vácuo e os respetivos aparelhos que têm sido desenvolvidos dependem da injeção de quantidades relativamente pequenas de gás abaixo da superfície do metal a ser tratado para provocar o transporte ou a agitação do metal fundido de modo que os gases deletérios dissolvidos no banho de metal possam ser removidos pelo sistema de vácuo. Em tais processos a agitação é efetuada com recurso a uma insuflação de gás proveniente de uma conduta que conduz a partir de uma fonte de alta pressão. Na maioria dos casos, o gás escolhido é não oxidante, de preferência um gás inerte, como o argon.

O tratamento de desgaseificação normalmente aplica-se devido à presença de agentes gasosos nocivos que têm de ser removidos. Para a eliminação destes elementos dissolvidos, realiza-se o processo de fusão sobre vácuo, adotando-se três técnicas de desgaseificação tidas como principais:

- Por fluxo fundido: consiste na introdução do recipiente que contem o banho fundido no interior de uma câmara de vácuo, sobre o qual se ajusta a câmara. Consegue-se o fracionamento do fluxo de metal em gotas, através do efeito do vácuo, o que é extremamente benéfico para a eliminação dos gases;

- Pelo aço na panela: através do posicionamento prévio da panela numa câmara de vácuo, onde se promove a desgaseificação com induções eletromagnéticas ou com um fluxo de gás inerte;
- Por recirculação: assenta na repetida recirculação do metal por um recipiente adotado como camara de vácuo.

Com base nestas técnicas, descreve-se a seguir a sua aplicação concreta em alguns processos sob vácuo.

Um dos processos mais implementados é a desgaseificação por arco de vácuo, VAD (Vacuum Arc Degassing). Em que a panela ou forno de fundição se encontra totalmente isolado em vácuo, existindo uma tampa hermética com elétrodos móveis, sendo possível dispor de uma lança de injeção, como mostra a figura 2.1. Ou por outro lado existe uma câmara de vácuo, que isola todo o ambiente envolvente à panela, figura 2.2.

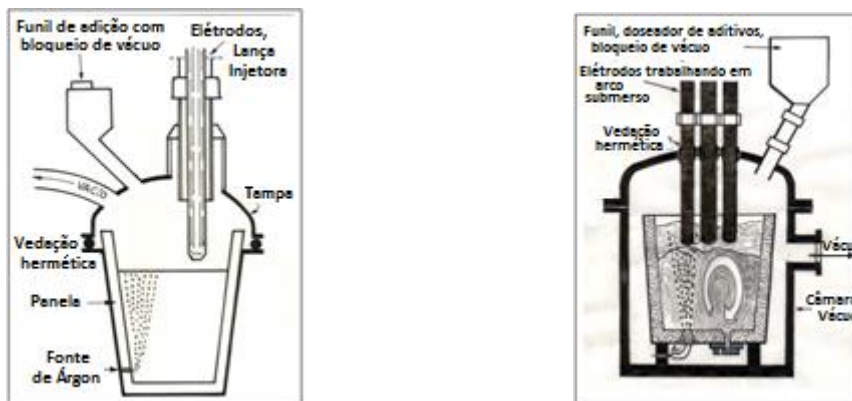


Figura 2.1 – Modelo de tampa hermética. Adaptado de [2] Figura 2.2 – Modelo de câmara de vácuo. Adaptado de [2]

Uma outra variante deste tipo de processo, com a introdução de ligeiras alterações é a descarbonização por oxigénio em vácuo, VOD (Vacuum Oxygen Decarburization), presente na figura 2.3. Tendo como principal objetivo a produção de aços com baixos teores de carbono e enxofre.

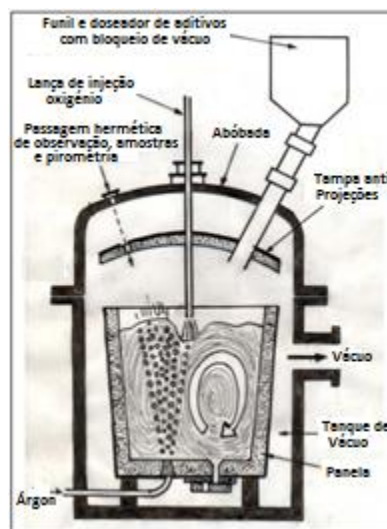


Figura 2.3 – Esquema VOD. Adaptado de [2]

Com a introdução de carbono, obtém-se uma outra alternativa a este processo, VCD (Vaccum Carbon Deoxidation). No tratamento do aço por vácuo, há a dissolução de carbono que reagirá com o oxigénio presente no banho, originando CO e possibilitando assim a eliminação do oxigénio sem deixar resíduos, como por exemplo inclusões. Seguidamente o CO é eliminado pelo sistema de vácuo, extinguindo-se praticamente o oxigénio do banho. Este tratamento também beneficia a eliminação do hidrogénio, pois é arrastado com a libertação das bolhas de CO.

Os métodos apresentados e as suas variantes diferenciam-se na escala de produção, nas pressões de oxigénio e no nível de vácuo utilizado. No entanto os resultados proporcionados são similares, assentando em:

- Controlo de temperaturas;
- Controlo da escória e a sua manipulação;
- Possibilidade de doseadores automáticos de ferro-ligas a pressão atmosférica e escorificante;
- Equipamento de controlo manual e automático do processo;
- Agitação do banho e conseqüente desgaseificação e eliminação de inclusões através da escória;

Embora os resultados apresentados por estes métodos sejam claramente positivos, dando origem a produções direcionadas para padrões estritos de qualidade, não se efetuará o seu estudo específico pois têm a si associados um elevado custo, assim como modificações estruturais. No entanto fornecem contribuições interessantes para o posterior desenrolar do projeto.

2.1.2. Processos à pressão atmosférica

De seguida são apresentados processos de metalurgia dita secundária, sem contribuição de entrada térmica, sendo realizados à pressão atmosférica. Deste modo os seus objetivos são necessariamente menos ambiciosos comparativamente aos métodos que recorrem a vácuo. No entanto os seus custos são inferiores, não implicando alterações estruturais de relevo e na própria metodologia de operação, não comprometendo a versatilidade das produções.

De forma generalista, todos estes processos se caracterizam por:

- Realizam-se a pressão atmosférica;
- Todas as operações são efetuadas num mesmo recipiente, panela;
- Comportam injeção de pós e agitação por argon ou outro gás inerte.

Sendo o objetivo primordial a desoxidação eficiente, ponto considerado crítico na metalurgia na panela, pode-se alcançar com a aplicação de técnicas de adição de ligas adequadas, a correta agitação do banho através de insuflação de gás inerte, fazendo

emergir as inclusões, com a introdução de purgas de gás no fundo do forno e/ou lanças e com o controlo adequado das escórias.

A desoxidação pode ser obtida através de dois métodos: por eliminação com vácuo ou pela sua combinação com compostos estáveis, como referido anteriormente.

As principais técnicas de desoxidação do aço são:

- Precipitação desoxidante ou desoxidação em massa;
- Difusão desoxidante;
- Tratamento com escórias sintéticas, associado à adição de desoxidantes;
- Tratamento a vácuo.

Dependendo das necessidades e objetivos da empresa, implementam-se diferentes processos e metodologias, sem no entanto incrementar profundas alterações estruturais ou no processo.

2.1.2.1. Método de tampão de argon com lança injetora

Um sistema simplista e consideravelmente económico consiste na agitação do banho com argon. Na figura 2.4 a insuflação efetua-se mediante uma lança, protegida com refratário, que é introduzida no banho ou com um tampão, pedra porosa, no fundo da panela, mediante o esquema da figura 2.5.

A agitação do banho com recurso ao argon é fundamental para homogeneizar os desoxidantes no aço e forçar a eliminação das inclusões, seja a insuflação feita por lança ou através de tijolo poroso. Assim, deve-se manter o caudal insuflado relativamente elevado para garantir a homogeneização, posteriormente deve ser diminuído aquando da flutuação das inclusões.

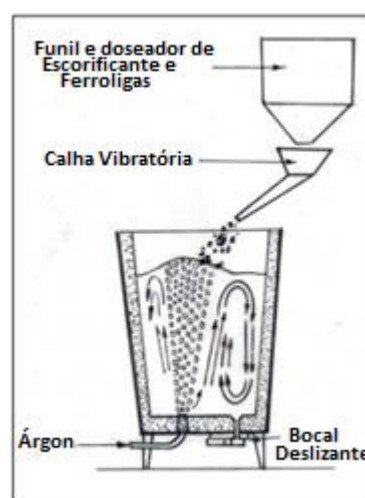
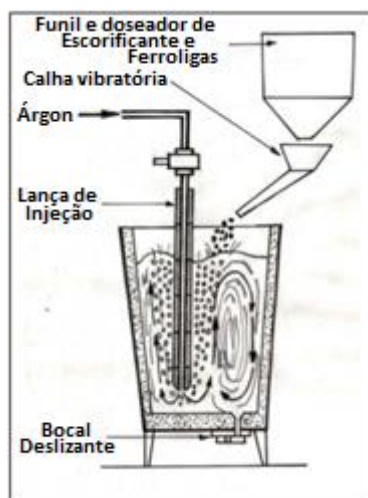


Figura 2.4 – Lança injetora de argon. Adaptado de [2] Figura 2.5 – Tijolo poroso de injeção de argon. Adaptado de [2]

Através da insuflação do argón consegue-se reduzir eficientemente o teor de gases nefastos no banho, controlando-se a sua composição química e temperatura, como se verá mais à frente. Atingido este objetivo, adicionam-se as ferro-ligas previamente estudadas para terminar a limpeza do banho metálico.

2.1.2.2. Método Convencional

Sendo um processo bastante simples, como mostra a figura 2.6, insufla-se gás inerte no fundo do forno através de uma lança protegida com um tampão poroso (tijolo poroso). Esta injeção de gás tem um duplo efeito: por um lado a área da superfície do banho, onde o jato de gás inerte emerge, faz com que a escória se afaste para outras áreas da superfície do banho. Sobre esta zona são colocadas as ferro-ligas e o escorificante. Por outro lado, como igualmente ocorrem noutros processos, as bolhas de argón arrastam para a superfície os gases e inclusões que decantam no aço líquido.

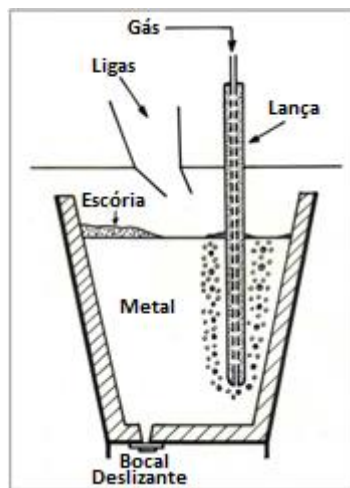


Figura 2.6 – Adições na panela pelo método convencional. Adaptado de [2]

2.1.2.3. Adição por fio

A introdução de elementos de liga pode ser realizada por meio da adição de um fio, cuja composição é selecionada, adicionando-se geralmente cálcio. O fio é introduzido a grande velocidade, consoante o mecanismo existente para o efeito, simultaneamente o banho é agitado por argón introduzido das formas anteriormente mencionadas.

Na figura 2.7 está representado um sistema de alimentação de fio, montado numa plataforma giratória, com um sistema ascendente e descente que permite a introdução, neste caso da lança de injeção de gás, no banho fundido. Apresentando este método em particular, subfunções que poderão encarnar futuras subsoluções do equipamento pretendido.

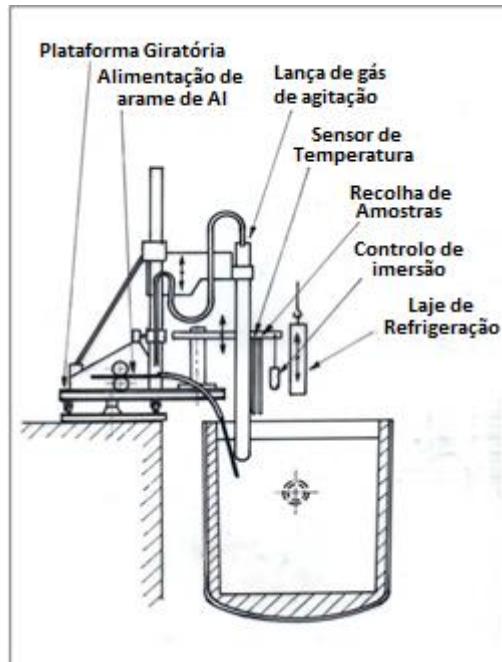


Figura 2.7 – Método de tratamento de aço, por adição de fio. Adaptado de [2]

2.1.2.4. Método de injeção de pós

Na injeção de pós, estes tem de ser projetados a uma velocidade controlada para que alcancem o fundo do forno, por meio de um aparelho que funciona como uma pistola de ar comprimido, como se visualiza na figura 2.8. Aqui também está presente um método de agitação e homogeneização do banho anteriormente referido, através de uma lança protegida com refratário.

Os pós adicionados normalmente são escórias sintéticas, alumínio, cálcio, entre outros. Dada a diminuta densidade destes elementos, de modo a introduzir a energia necessária para que cheguem ao fundo do forno antes de fundirem é necessário incrementar-lhes uma grande velocidade de projeção.

$$\text{Penetração no banho} = \text{Energia do Projétil} = \frac{1}{2} (\text{massa}) \times (\text{velocidade})^2$$

Eq. 1

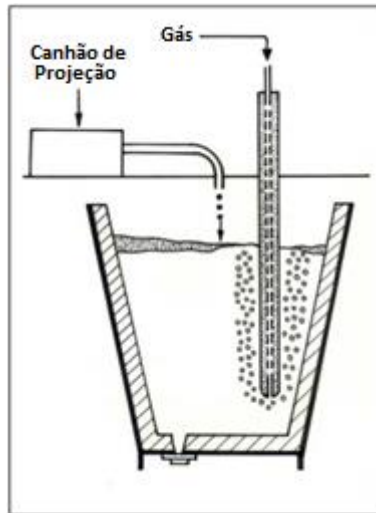


Figura 2.8 – Adições na panela, injeção de projéteis de Al. Adaptado de [2]

2.1.2.5. Método de adição veiculado de alumínio

Como referido no método convencional, na superfície de incidência do jato de gás inerte há um afastamento da escória envolvente, havendo como que uma abertura na película de escória, permitindo a adição neste local das ferro ligas pretendidas. Neste método existe um procedimento semelhante, através da introdução de uma espécie de barreira refratária, no banho de metal, que surte o mesmo efeito de separação da escória. No interior desta barreira é possível insuflar gás por meio de uma lança e com recurso a um tubo injeta-se o alumínio num caudal de azoto, como se percebe pela figura 2.9.

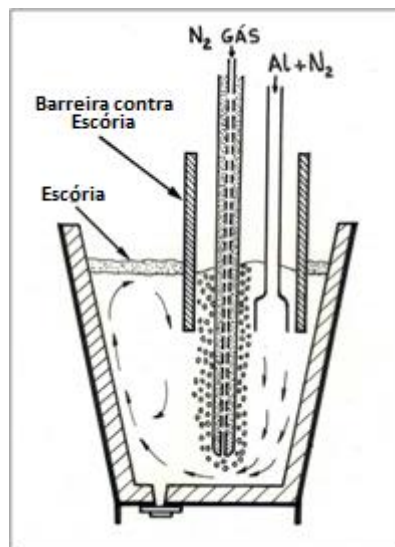


Figura 2.9 – Adição veiculada de alumínio. Adaptado de [2]

2.1.2.6. Método de adição por diversos tipos de lança

Relativamente à injeção de ferro ligas para melhorar eficientemente a qualidade do aço e ferro, recorre-se a lanças para a insuflação dos diferentes tipos de pós por meio de um gás inerte, como por exemplo o argón. Na injeção da figura 2.10 promove-se a agitação do banho de metal, com conseqüentes efeitos positivos ao nível da homogeneização da composição e temperatura do banho, conjuntamente com a limpeza deste.

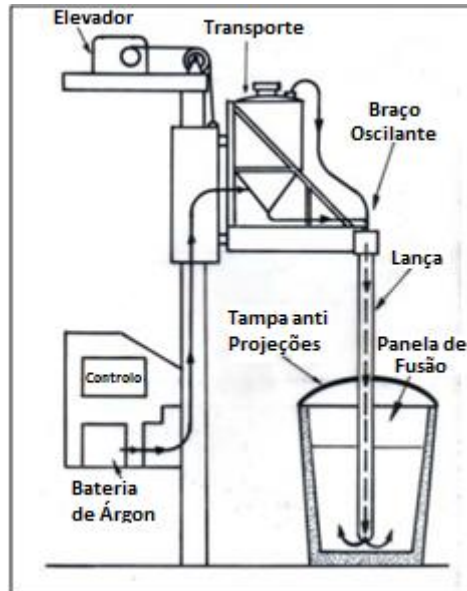


Figura 2.10 – Dessulfurizador Thyssen-Niederrhein. Adaptado de [2]

Na insuflação dos elementos de adição existe uma ampla gama de lanças revestidas com refratário protetor, identificadas na figura 2.11, que poderão cumprir os requisitos pretendidos, sendo apresentadas e descritas posteriormente.

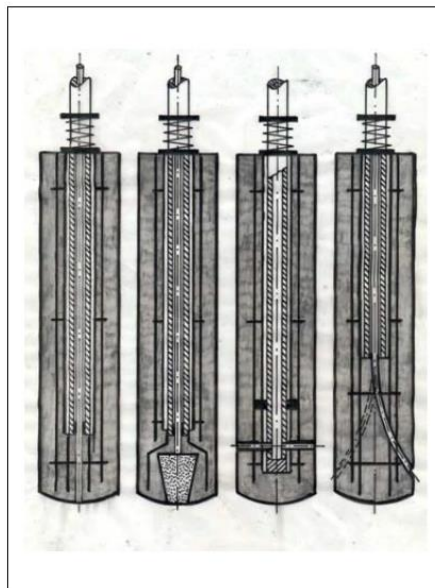


Figura 2.11 – Lanças para a insuflação de gases e injeção de pós. Extraído de [2]

Apesar dos aspetos positivos da agitação do banho através da insuflação, deve-se ter em atenção o seu intervalo de tempo decorrido de modo a evitar o arrefecimento do banho de metal, embora durante a insuflação o forno permaneça ativo. Sendo por vezes necessário que os elétrodos ou no caso das bobinas, induzam novamente correntes que servirão para o reaquecimento.

O aumento da temperatura de vazamento pode originar problemas como por exemplo o maior desgaste do refratário, maiores consumos energéticos e dos elétrodos no forno de arco e maior duração do processo de fundição.

Como referido anteriormente, existe um decaimento da temperatura do banho com a insuflação de árgon, devido ao gradiente de temperaturas ser elevado, havendo necessidade de absorção de calor para igualar a temperatura do banho. No entanto este fenómeno aparentemente negativo é favoravelmente compensado quando se alcança a homogeneização de temperaturas no banho de metal fundido, verificando-se na figura 2.12 este efeito quando comparado com as variações de temperatura do banho sem insuflação aquando da solidificação.

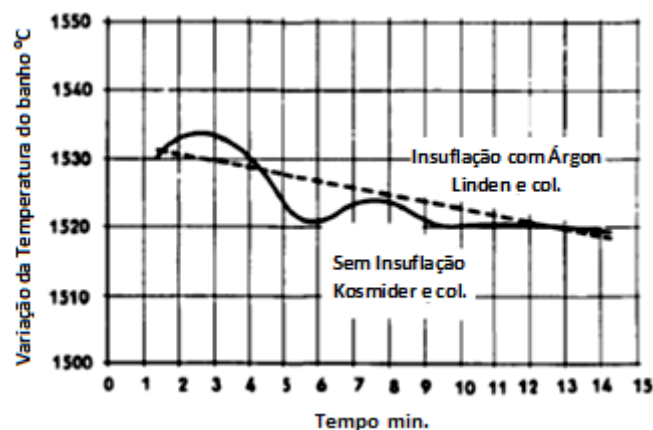


Figura 2.12 – Comportamento da temperatura do banho na presença/ausência de insuflação. Adaptado de [3]

Apesar da descida de temperaturas, no gráfico da figura 2.12 verifica-se maior estabilidade neste declínio controlado comparativamente às constantes oscilações na descida de temperatura aquando da não insuflação de árgon. Da mesma maneira, esta redução de temperaturas contribui de forma positiva para o prolongar da vida útil do refratário. [2]

2.2. Tipos de soluções existentes

Após uma breve ambientação aos processos presentes e passados aplicados nas fundições e siderurgias, importa agora elucidar as particularidades associadas ao processo em si. Desde o ambiente onde é aplicado, à natureza das suas insuflações.

2.2.1. Ambiente de aplicação

A fundição, particularmente o seu processo de fusão, está envolto em diversos detalhes. Desde do ciclo de aquecimento do forno, passando pelo tratamento e remoção da escória, adição e a forma como são adicionados os produtos de acertos, as suas características, manutenção das temperaturas, até às lanças e os objetivos da sua utilização.

O objetivo primordial do projeto tem origem na contaminação, de algum modo, do banho. Este problema é o responsável pelos defeitos que posteriormente se farão sentir nas peças após o seu arrefecimento. Para melhor se entender quais as fontes potenciadores de macro inclusões nas peças, passa-se à sua enumeração, sendo estas:

- Gases deletérios;
- Atmosfera envolvente;
- Escória;
- Degradação do refratário.

Para proceder à sua eliminação, como já referido, através de diferentes processos, incorporam-se elementos no banho que promovem a sua limpeza.

No entanto, a adição destes elementos externos, quer na sua forma de aplicação quer na interação com o banho, suscita algumas dúvidas que serão dissipadas ao longo do trabalho. Iniciando pelo modelo de injeção responsável pela introdução de gases e pós. No caso da opção pela lança, existem diversas variáveis associadas como:

- Distância de Injeção: podendo esta ser colocada no interior do banho, sendo obrigatório existir sempre pressão positiva, superior à pressão metalostática¹, para evitar a obstrução da lança; ou por outro lado pode não contactar com o banho, sendo colocada a uma distância segura, de prevenção contra os efeitos dos salpicos de metal fundido. Neste caso será necessário um fluxo secundário protetor do fluxo principal a injetar, de modo a proteger este último da atmosfera envolvente e conseqüente arrastamento de gases indesejados;
- No comportamento do refratário, questões se levantam relativamente ao seu grau de molhabilidade² e a respetiva interação deste com o banho fundido. No caso da sua degradação deve identificar-se a influência na contaminação do banho;
- A adição deverá ser efetuada à temperatura ambiente ou será necessário um prévio aquecimento dos elementos a insuflar, de modo a minimizar os efeitos do diferencial de temperaturas e conseqüentes perdas energéticas;

¹Pressão exercida pela altura da coluna de metal líquido, medida a partir da sua base. O fluxo injetado terá de vencer esta pressão sob pena de ser obstruído o seu bocal de saída. [2]

²Capacidade de um líquido desenvolver contacto com uma superfície sólida (aderência), devido às interações intermoleculares entre os dois. [4]

- O fluxo injetado terá necessariamente densidade diferente e inferior à do banho, o que atribui extrema importância ao comportamento de interface entre estes dois elementos, banho e fluxo bifásico;
- Na adição, o tamanho das partículas é essencial no processo de formação de bolhas no interior do banho, como se verá a seguir. Para esta dimensão contribui a velocidade e a pressão de injeção pois podem promover a desfragmentação das partículas, caso seja necessário, durante o percurso de insuflação; outro modo de atuação baseia-se em técnicas que funcionam como filtros redutores desta granulometria, como por exemplo ao nível do bocal de injeção, manipulando a geometria do seu bico.

Além dos elementos já referidos, ter-se-á em atenção determinadas variáveis que apresentam carácter de risco, como:

- A gama de temperaturas envolvida no processo;
- A reatividade do banho com gás e pós adicionados;
- Variabilidade da densidade do gás com a temperatura e consequente afetação da pressão de injeção;
- Desconhecimento das pressões finais de injeção, após o percurso de insuflação, na extremidade deste;
- Necessidade de presença de circuito de refrigeração e cuidados a ter na sua presença;
- Seleção de materiais para as respetivas funções, relativamente à sua interação com as temperaturas vigentes e o seu contacto ou com o banho ou com o caudal bifásico a injetar.

Devido à complexidade dos elementos presentes no ambiente de aplicação, existem diversas variáveis de comportamento desconhecido que podem influenciar todo o processo, tanto a nível operacional como de segurança. Na impossibilidade de controlar todos estes parâmetros, tentar-se-á conjugar o máximo conhecimento teórico com as validações práticas para concretizar o equipamento requerido.

2.2.2. Gás inerte e partículas sólidas

Como este trabalho incide diretamente na injeção de gases ou partículas sólidas veiculadas por gases, importa então referir quais elementos se encontram no mercado que apresentam maior eficiência quando comparados com a viabilidade económica da sua aplicação.

Ao nível do gás, pela bibliografia já exposta, o indicado passa por um gás inerte, cuja interação com outros elementos não incrementa dificuldades acrescidas ao processo. Pois caso seja necessário injetar diferentes composições por ciclo, obrigatoriamente não podem existir complicações associadas às diferentes reações do gás com as diferentes composições a adicionar. Sendo necessário ter bem definido o comportamento do gás.

Neste enquadramento, os gases inertes além de não serem reativos, também não provocam desequilíbrios químicos. Tendo como exemplos destes, gases industriais:

- Hélio
- Azoto
- Árgon

Relativamente ao hélio, apresenta-se como um gás monoatômico, incolor, indolor e insípido, fazendo parte da família dos gases nobres. Logo apresenta uma reatividade extremamente baixa, não se combinando com outros elementos. Além de que não apresenta características de combustibilidade ou de explosão. Para a sua obtenção recorre-se a poços de gases naturais.

Enquanto o azoto apresenta características de gás incolor, inodoro e insípido. Além de estar presente em elevada percentagem na atmosfera, não é inflamável nem combustível. Normalmente é armazenado na forma de líquido refrigerado, não devendo ser exposto a fontes de inflamação. Este gás pode reagir violentamente com o lítio, titânio e magnésio formando nitretos.

Por fim o árgon, gás monoatômico, também é incolor, inodoro e insípido. Conjuntamente com o hélio, faz parte da família dos gases nobres, possuindo então uma tendência extremamente baixa para a reação com outros compostos. Sendo um gás relativamente acessível e obtido como o azoto, através da destilação do ar, resultando a sua separação dos restantes gases no seu estado de armazenamento, líquido. Relativamente aos cuidados a ter, deve-se ter atenção ao seu armazenamento.

Os cuidados a ter na utilização destes três elementos cingem-se essencialmente a viseiras, ou óculos de proteção de produtos químicos no caso do hélio, e luvas. Devendo-se controlar a sua percentagem na atmosfera prevenindo possíveis asfixias. As fichas de segurança dos respetivos elementos encontram-se no Anexo A.

Embora estes gases sejam inertes e apresentem à primeira vista características que permitam a sua utilização, há a necessidade de optar pelo mais eficiente, económico e seguro. No caso do azoto a sua propensão para reação com determinados elementos surge como fator de exclusão à sua utilização. Enquanto o hélio tem de certa forma limitada a sua gama de aplicação devido à escassez na sua forma de obtenção e consequente custo. Portanto o árgon surge como escolha mais óbvia visto o seu histórico de utilização em siderurgias e fundições, usando-se particularmente quando se tem presente uma atmosfera à base de azoto e se trabalha com metais sensíveis à nitruração. [5]

No âmbito das partículas sólidas, a aplicação destas tem dois objetivos. A sua utilização enquanto elementos de limpeza do banho ou funcionando como produtos de acerto da composição química deste.

Ao nível da limpeza do banho geralmente são utilizadas escórias sintéticas e cal. Enquanto para os produtos de acerto, dependendo das pretensões das peças produzidas, existem uma grande variabilidade de elementos a adicionar.

Na tabela 2.1 estão presentes os elementos de liga comumente utilizados com afetação das propriedades, mecânicas e por vezes magnéticas, dos aços.

Tabela 2.1 – Efeitos dos elementos de liga nas propriedades dos aços. Adaptado de [6]

Elementos de Liga	Propriedades Mecânicas													Propriedades Magnéticas					
	Dureza	Resistência à Tração	Limite de escoamento	Alongamento	Estricção	Resistência ao Impacto	Elasticidade	Resist. Mecânica a quente	Temperabilidade	Soldabilidade	Formação de Carbonetos	Resistência ao Desgaste	Forjabilidade	Maquinabilidade	Oxidação Superficial	Nitretabilidade	Resistência à Corrosão	Histerese	Permeabilidade
Silício	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑
Manganês em aços Peritéticos	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Manganês em aços Austeníticos	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	Não Magnético
Crômio	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Níquel em aços Peritéticos	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Níquel em aços Austeníticos	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	Não Magnético
Alumínio	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Tungstênio	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Vanádio	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Cobalto	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Molibdênio	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Cobre	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Enxofre	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Fósforo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	

Aumenta ↑ Diminui ↓ Constante - Não Característico ou Desconhecido --

Elementos como alumínio, manganês, níquel, silício e crômio são exemplos com grande gama de aplicação. Os quais têm interesse de aplicabilidade através da lança.

Relativamente ao alumínio, este não é utilizado para correção da composição química do banho mas como elemento regulador do comportamento do banho. Enquanto por exemplo o manganês fomenta a resistência à tração e à elongação. Ao passo que o silício é requerido para utilizações que envolvam elasticidade. Quando se recorre ao crômio procura-se aumentar a dureza, resistência à tração e limite de escoamento.

Ao longo deste trabalho, na injeção de gás ou usando-o como veículo para a injeção dos pós, estes serão os elementos tratados. Partindo do gás inerte, argon, para a limpeza e homogeneização do banho, até ao seu uso para transportar as partículas sólidas, para o tratamento das inclusões.

2.2.3. Metodologia de insuflação: forma de atuação do argon

Como será ilustrado posteriormente, recorre-se à insuflação de argon tanto para a agitação e homogeneização, servindo também como fluxo de transporte para a injeção de pós no banho de metal.

Portanto é de todo o interesse enunciar as ações benéficas do argon aquando da sua injeção num forno panela de aço fundido, baseando-se em três propriedades principais:

- Uma ação meramente física baseada na diferença de pressões parciais das bolhas de argon, ascendentes no interior do banho de metal, e os gases prejudiciais nele dissolvidos, sendo estes absorvidos e transportados para a superfície desse modo;
- Uma reação química: o O₂ é extraído na forma de CO por um processo de oxidação química do carbono, libertando-se em forma de bolhas. Assim, o argon implementa benefícios neste processo, funcionando como um catalisador, ao aumentar a velocidade de reação entre o carbono e o oxigénio, por via da diluição do CO e conseqüente redução da sua pressão parcial. Deste modo, caracteriza-se como absorvente das bolhas de CO, permitindo ainda uma ascensão mais rápida até à superfície do forno;
- Uma última ação ocorre quando nas bolhas ascendentes se acumulam partículas em suspensão no interior do banho, que serão transportadas até à escória superficial, fornecendo uma ação de limpeza adicional do banho.

Relativamente ao papel que estas propriedades têm no banho: a conjugação das duas primeiras revela o papel de desgaseificação do argon, enquanto a terceira propriedade elucida o papel de remoção de inclusões.

2.2.3.1. *Mecanismo de formação das bolhas*

A ação de desgaseificação do argon é substancialmente melhorada com a diminuição do diâmetro das suas bolhas e conseqüentemente o aumento do tempo de permanência destas dentro do forno. Relacionando-se com a fórmula de Navier Stokes (Eq. 2), em que para uma temperatura constante, a velocidade das bolhas no forno é proporcional ao quadrado do raio da bolha. Assim as bolhas de menor dimensão permanecem necessariamente mais tempo no interior do banho.

$$v = 2gr_i^2\Delta\rho/9\eta$$

Eq. 2

No entanto, a etapa de remoção das inclusões é determinada pela velocidade de transporte, função do tamanho das partículas, onde as partículas de maior dimensão flutuam com maior velocidade, agregando partículas menores durante a ascensão, seja por coalescência no caso das inclusões líquidas ou por aglomeração no caso das inclusões sólidas. Promovendo assim o aumento da velocidade de flutuação pelo aumento do tamanho das partículas, o que acompanhado da agitação do banho pelo seu fluxo natural fomenta a movimentação das inclusões para a camada de escória superficial. [3][7]

2.2.3.2. *Relação entre a pressão de insuflação e as bolhas formadas*

Outra forma de atuação sobre o tamanho das bolhas é através da função da pressão, pois além da ação fracionária que a pressão provoca nas bolhas, esta também tem um valor mínimo necessário para vencer a pressão metalostática no fundo do forno. Sendo regulada entre este valor mínimo e um valor máximo admissível, correspondente a um borbulhar seguro. Regra geral, aplica-se uma maior pressão inicial com o intuito de se atingir um borbulhar fino, favorecendo a eliminação de inclusões e partículas de escória, posteriormente poder-se-á diminuir a pressão de insuflação, aquando da entrada na zona de simples limpeza, permitindo uma melhor gestão do árgon como evidenciado na figura 2.13.

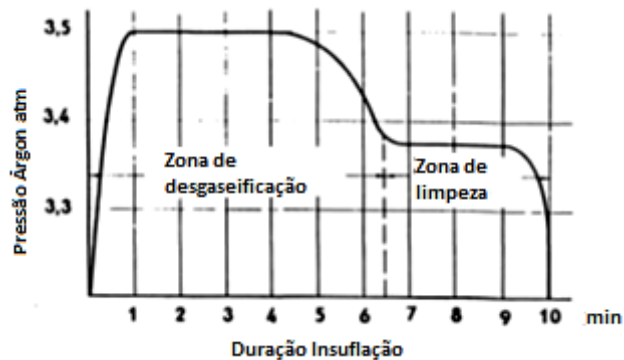


Figura 2.13 – Variação da pressão de insuflação de Ar ao longo do tempo. Adaptado de [3]

De referir ainda, com a insuflação do árgon existe uma relação direta de diminuição do conteúdo de oxigénio, hidrogénio e azoto no banho de metal fundido, atuando assim sobre a fluidez do banho e a sua limpeza.

2.2.3.3. *Localização da lança de insuflação*

Tendo por base os estudos realizados para a localização do tijolo poroso no fundo do forno, sendo este aplicado a 90° na metade do raio do fundo, gerando correntes mais favoráveis, retiram-se algumas conclusões para a colocação da lança neste trabalho. Sendo alvo de testes posteriores, pensa-se que a sua localização no centro do forno, com bocais de insuflação dispostos diagonalmente de forma a alcançar uma maior área de dispersão das bolhas, seja a mais eficiente.

2.2.3.4. *Relação entre a insuflação e as perdas de temperatura do banho*

A insuflação de árgon tem ação direta sobre a temperatura no forno, existindo uma diminuição desta aquando da absorção do calor por parte do árgon introduzido. No entanto apesar deste senão, a queda de temperatura é compensada com o efeito benéfico sobre a homogeneização das temperaturas obtidas no forno, o que contribuirá para a diminuição das segregações produzidas aquando da solidificação. Devido há existência de duas zonas de diferentes temperaturas no forno, uma zona de maior e

outra de menor temperatura, existem constantes subidas e descidas de temperatura que promovem a formação das referidas segregações. Assim, evidencia-se o importante papel do argon na estabilização de temperaturas o que, como será referido posteriormente, permite uma diminuição das temperaturas de vazamento, como visualizado na figura 2.14, com vários benefícios associados.

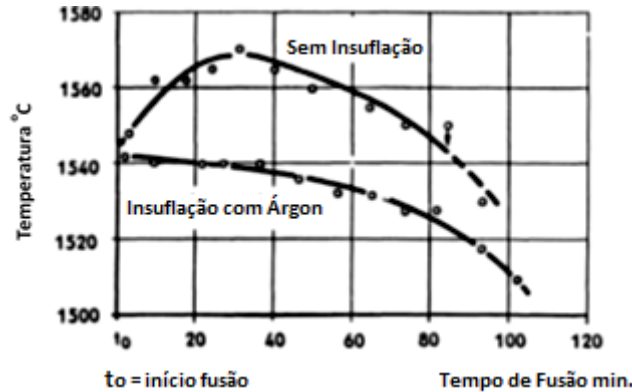


Figura 2.14 – Temperatura de vazamento em função da presença/ausência de insuflação. Adaptado de [3]

Seguidamente são enunciadas as vantagens introduzidas com a insuflação de argon, como:

- Estabilização das temperaturas no forno e homogeneização destas, assim como do referido banho de metal fundido;
- Melhoria da limpeza do aço, promovendo a ascensão das impurezas para a camada de escória, inibindo também a formação de segregações com a sua natureza reguladora de temperaturas;
- Desgaseificação dos gases anteriormente referidos, azoto, oxigénio e hidrogénio;
- Maximiza o rendimento dos elementos adicionados, como por exemplo o alumínio, servindo também para veicular elementos sólidos em pó através das lanças de injeção;
- Além da já referida contribuição para a agitação e homogeneização do banho de metal fundido e promoção da sua fluidez, auxiliando sistemas de desgaseificação como o VOD e VAD, que foram anteriormente referidos. [3]

2.2.4. Relações de velocidade de insuflação: Venturi vs Laval

Nos diversos equipamentos relacionados com o âmbito deste projeto são habitualmente utilizados dois termos relativos às velocidades de insuflação: Sistemas de *Venturi* e Bicos de *Laval*. Importa portanto fazer a distinção entre os dois perfis de velocidade e clarificar a relação que estabelecem.

Quando um gás passa através de um constricção numa tubagem, a sua pressão diminui enquanto a sua velocidade aumenta. Ao passo que quando o tubo se expande, a pressão aumenta e a velocidade diminui. Este é o conhecido efeito de *Venturi*.

$$\frac{dv}{v} = \left(\frac{1}{M^2 - 1} \right) \frac{dA}{A}$$

Eq. 3

Onde $\frac{dv}{v}$ é a variação da velocidade do gás, M é a velocidade do gás como uma fração da velocidade do som (ou seja, o número de Mach do gás) e $\frac{dA}{A}$ é a variação da área através da qual o gás flui.

Existe um limite para o efeito de *Venturi*, que é quando o fluido atinge a velocidade (local) do som, como acontece durante caudal de indutância. Neste ponto, o efeito de *Venturi* é invertido: em vez de o gás abrandar quando o bocal se expande, a sua velocidade aumenta (pois o termo $\frac{1}{M^2-1}$, torna-se positivo em vez de negativo). [8][9]

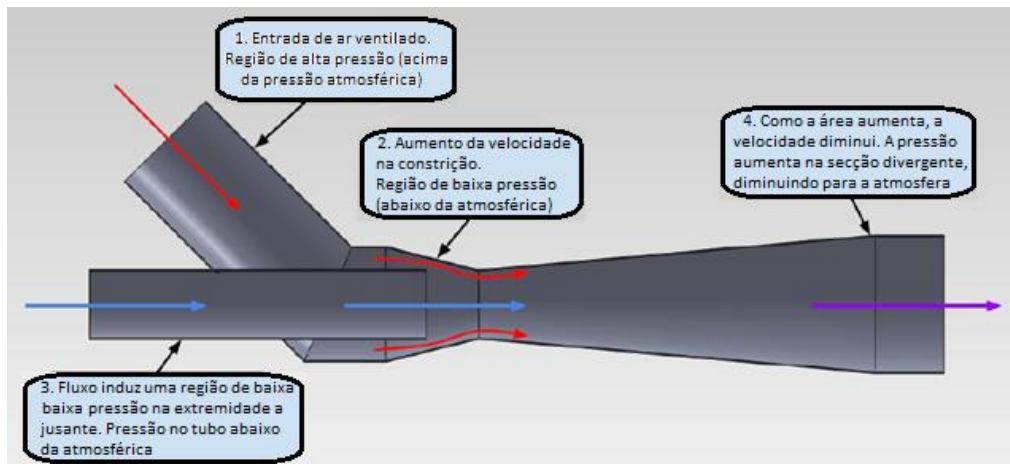


Figura 2.15 – Esquema teórico de venturi. Adaptado de [10]

Um bico de *Laval* é concebido com uma geometria que permite acelerar o primeiro gás (por estreitamento) para velocidades sónicas na garganta, como se verifica na figura 2.15, em seguida, porque o efeito de *Venturi* foi invertido, acelera ainda mais o gás (através da expansão) para velocidades supersónicas. Quanto mais rápida a saída do gás de escape, maior será o impulso que vai ser produzido.

2.2.5. Aplicabilidade dos métodos existentes no projeto: limpeza e refinação

Na metalurgia moderna tem sido também possível reduzir, para níveis exíguos, o teor de inclusões de óxidos. Tradicionalmente, a maior parte do oxigénio no aço é removido por desoxidação utilizando um agente oxidante adequado, como o alumínio, silício ou manganês, embora possam ser utilizados outros elementos desde o cálcio e seus derivados ao magnésio.

Na busca de aços de melhor qualidade, os requisitos impõem um teor de oxigénio extremamente baixo, no limite 2 ppm de oxigénio dissolvido no aço líquido após o tratamento de injeção. O objetivo dos reduzidos teores de oxigénio é diminuir a quantidade total de inclusões de óxidos no aço, principalmente inclusões do tipo Al_2O_3 , sendo assim possível baixar consideravelmente o número de pontos iniciadores de rutura, aspeto relevante para as propriedades mecânicas dos aços. Com isto, o

polimento do aço pode também ser melhorado, o que em muitos casos é uma propriedade desejável para o aço de ferramentas e aços inoxidáveis.

O baixo teor de oxigénio também tem vantagens do ponto de vista do processo metalúrgico, porque um baixo teor de inclusões de óxidos melhora a viscosidade do aço e reduz o risco de obstrução de tuberias durante a fusão e vazamento do aço. Além disso, um baixo teor de oxigénio é um pré-requisito se se pretende teores igualmente baixos de enxofre, pois a operação de dessulfuração exige baixos teores de oxigénio dissolvido.

O objetivo é proporcionar um método para ser executado com recurso a um equipamento, económico e com elevada reprodutibilidade, de refinação do aço fundido, em primeiro lugar, podendo também ser adaptado à produção de ferro fundido. Sendo o teor de oxigénio extremamente baixo, de preferência não mais do que 2 ppm dissolvidos no caso do aço.

Durante a operação, quando a lança de insuflação de gás inerte está imersa no banho metálico, o gás inerte é fornecido a pressão superior à atmosférica. Deve também ser mencionado que, antes da injeção do composto reativo, o banho de metal fundido deve ser desoxidado e coberto por uma escória não oxidante. Os agentes desoxidantes convencionais, tais como o alumínio, o silício ou o manganês podem ser utilizados para a desoxidação.

O método de refinação do metal fundido para a produção de aço ou ferro, em especial aço inoxidável, com um teor de oxigénio que se deseja extremamente baixo, caracteriza-se pelo facto do composto pretendido ser injetado por meio de um gás de transporte, não oxidante, no banho de metal líquido, previamente bem desoxidado. Ocorrendo a oxidação do metal pelo oxigénio dissolvido no banho, formando-se pequenas partículas que ascenderão para a camada de escória, enquanto a parte restante do metal permanece no interior do material fundido numa configuração elementar ou combinada na forma de partículas de óxido de metal em solução coloidal. Em seguida, aquando da injeção do composto pretendido, as maiores partículas de óxido funcionarão como agentes de nucleação para a reação continuada entre os metais alcalino-terrosos dissolvidos na massa fundida e o oxigénio, atuando ao nível das inclusões de óxidos e sulfuretos, e também para a separação da restante escória de inclusões menores existentes no material fundido. [11]

2.2.6. Tipologias de lanças: vantagens e desvantagens

Na injeção de gases e pós poderiam ser referidos diversos propósitos que justificam a sua aplicação, como:

- Proporcionar um fornecimento de energia que facilite a fusão;

- Ativar o processo de oxidação e influenciar favoravelmente a desfosforação e dessulfuração do metal líquido, realizando também a decarbonização, e ao mesmo tempo controlar a temperatura de vazamento;
- Promover a formação de escória;
- Induzir agitação no banho, diminuindo o tempo necessário para a realização das reações químicas associadas ao processo e facilitando a decantação das inclusões.

Ao longo do processo de investigação, no estado da arte, verifica-se a existência de duas soluções principais para a insuflação de gases no interior do banho metálico através de uma lança, sendo através de lanças arrefecidas a água, as quais estão equipadas com um bico injetor nas extremidade ou lanças do tipo consumível.

Relativamente às primeiras, são elucidadas algumas desvantagens:

- Necessitam de manutenção;
- Devido à distância ao banho, o jato gasoso perde energia, sendo por vezes impossível a penetração no banho;
- Necessidade de um elevado caudal de arrefecimento de forma a prevenir a destruição do bocal de injeção e da extremidade da lança devido ao calor e às tensões mecânicas;
- No caso de existência de uma fuga de água podem ocorrer explosões;
- Elevado risco de erosão consoante a proximidade da lança ao banho;
- Carecem de outros dispositivos para injetar material sólido em forma de pó;

Em relação às lanças consumíveis, as suas desvantagens situam-se ao nível do:

- Alto custo das peças a serem consumidas;
- Dificuldade na determinação do posicionamento exato da ponta da lança;
- Ineficiência na distribuição do ponto de impacto do jato;
- Com o sobreaquecimento a lança pode curvar induzindo em erro a direção de injeção.
- Necessidade de adição dos novos segmentos da lança, em substituição dos anteriormente consumidos, o que requer a utilização de equipamento e manipuladores apropriados, podendo ser dispendiosos;

2.2.7. Patentes de equipamentos metalúrgicos: lanças

Seguidamente são apresentadas várias lanças anteriormente patenteadas e as respetivas características, como a sua constituição, tipo de refrigeração, tipo de injeção, entre outros.

2.2.7.1. Lança de múltiplo fluxo

No presente dispositivo são referidos alguns proveitos operacionais em resultado da sua aplicação, como por exemplo a redução de força de trabalho necessária, maior

segurança para os colaboradores e conseqüentemente melhora das condições de trabalho assim como um maior controlo sobre todo o processo.

Descrição do processo

Sendo o objetivo primordial do jato supersónico produzir uma depressão no banho de metal, possibilitando a desgaseificação conjuntamente com a agitação do banho, o que será favorável à homogeneização e uniformidade do banho. O presente efeito também se manifesta ao nível da camada de escória sobrejacente.

Assim consoante o disposto na figura 2.16, a presente lança (23) possui um bocal duplo com um fluxo primário e um secundário em dois canais distintos. Um canal interior (13) que contempla um “bico de Laval”¹, convergente (13a) – divergente (13b) que possui a forma de um gargalo (20), emitindo uma mistura de oxigénio e gás natural de forma supersónica. Enquanto um canal exterior (14) coaxial com o primeiro, que tem uma configuração convergente em direção ao seu eixo central (17), responsável pelo transporte das partículas sólidas, como pó de carvão ou cal, veiculadas por um gás inerte. Estes dois bocais encontram-se no interior de um invólucro refratário (15) que contém canais internos (16) para a circulação de água para arrefecimento.

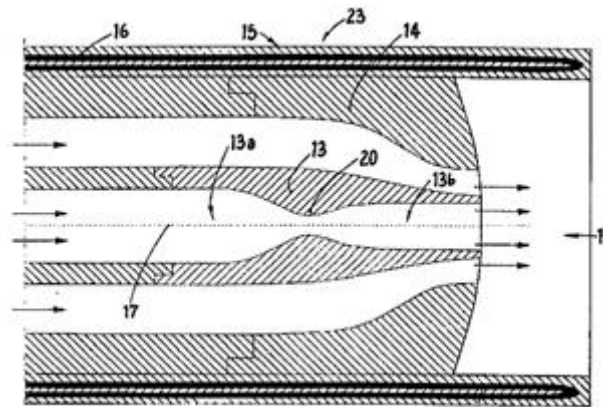


Figura 2.16 – Constituição do bocal injetor. Adaptado de [12]

O objetivo final é a mistura dos dois fluxos à saída, como evidenciado no bocal de injeção (11) da figura 2.17, para que a chama produzida seja uniforme e com velocidade suficiente para uma injeção a uma distância ótima, minimizando os efeitos nefastos sobre a lança. Não havendo lugar à formação de um fluxo exterior protetor.

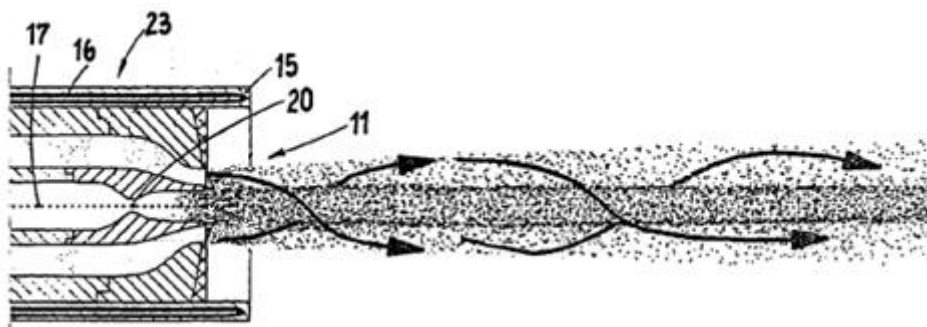


Figura 2.17 – Fluxo injetado. Adaptado de [12]

O presente dispositivo é aplicado e fixado de forma axial na parede do forno, com inclinação ajustável de modo a evitar o avolumar do nível do banho e os respetivos salpicos. Sendo replicável no mesmo forno, reduzindo assim as pressões fornecidas por cada lança. De referir ainda a passagem do regime de funcionamento de velocidades subsónicas para supersónicas, garantindo a energização necessária à injeção em profundidade no banho.

Em relação ao processo, recorrendo ao dispositivo apresentando, são sugeridas pelo autor (Stefano, Milorad et al. 2000) melhorias como:

- Redução do tempo de vazamento e com isso a maximização da vida do refratário;
- Redução da energia elétrica consumida;
- Redução do consumo do eletrodo, caso esteja presente;
- Profundidade de injeção no banho metálico melhorada;
- Redução da concentração de oxigénio no banho e, portanto, melhor qualidade do aço ou ferro;
- Maior produtividade e com a acentuada turbulência no banho, maior é a intensidade da fusão e a uniformização das temperaturas;
- Melhoria na qualidade da espuma de escória obtida. [12]

2.2.7.2. Lança para injeção de partículas no interior do metal líquido

A lança (2) indicada na figura 2.18 evidencia alguma simplicidade no seu processo de fabrico, sendo constituída por tubagens de aço inoxidável, possui também dois fluxos, principal e secundário.

Descrição do Processo

Ao longo do canal (4) é injetado o material particulado, proveniente da entrada (16), que se pretende adicionar ao banho. Ao passo que pelo canal (18) provém o fluxo de gás principal de oxigénio enquanto o canal (28) é percorrido por um gás oxidante, normalmente oxigénio que alimentará a combustão de um gás combustível proveniente do canal (10), tratando-se habitualmente de gás natural.

De forma simplista ligam-se os bicos de Laval (38) (42) à lança através de soldaduras adequadas para o efeito. Devendo-se a estes a alteração do regime de velocidades vigente, atingindo-se velocidades supersónicas através da passagem pelos bocais convergente-divergente, onde o fluxo de gás principal e o fluxo envolvente estão providos de velocidades na gama de Mach de 1,5 a 4.

Quanto ao posicionamento da lança, esta é tipicamente posicionada com o seu eixo vertical coincidente com a posição vertical, a uma distância acima da superfície do banho, de forma a injetar o material particulado no seu interior. Esta distância permite uma introdução eficiente, com uma velocidade supersónica. Desta forma, é capaz de penetrar profundamente no líquido, facilitando assim a sua reação química ou metalúrgica com o banho fundido.

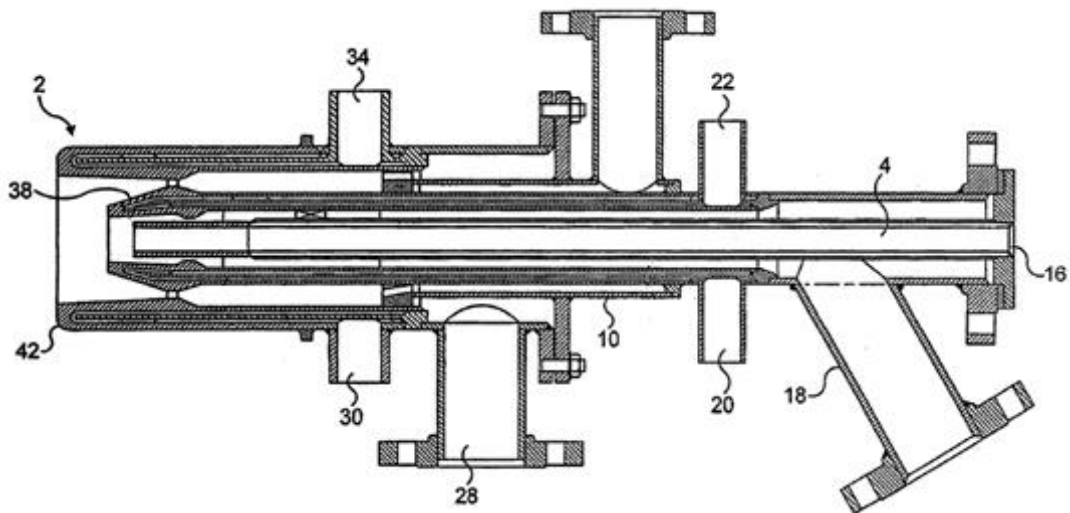


Figura 2.18 – Alçado lateral, em corte, da lança de injeção de gás e pó. Adaptado de [13]

A fundamental refrigeração do sistema é conseguida com base no circuito (20) (22) e (30) (34), entradas e saídas do fluido de arrefecimento, respetivamente. [13]

2.2.7.3. Lança para injetar substâncias sob a forma de pó ou de partículas

Com recurso a uma lança de injeção de substâncias na forma de pó ou partículas, em fornos elétricos de produção de aço, pretende-se que esta assegure um impulso suficiente às substâncias injetadas para atingirem corretamente o banho de metal, superando a resistência da camada de escória. Encontrando-se a lança disposta verticalmente relativamente ao banho ou integrada nas paredes do forno.

Além dos objetivos mencionados, esta tem como finalidade proporcionar uma pluralidade de funções, permitindo a injeção de diferentes substâncias em diferentes etapas, mantendo o compromisso de ser estruturalmente simples e fabricada com preços competitivos.

Com a necessidade de adição de produtos necessários às diferentes etapas, em particular durante o processo de fusão, a fim de pré-aquecer a sucata de aço introduzida no forno, auxiliando a ação dos eletrodos na fusão, revela-se útil a introdução de oxigênio e combustível com o intuito de induzir o aquecimento do metal. Através da injeção de carbono no banho de metal, há uma redução dos custos de produção em virtude do aumento da eficiência da injeção de carbono, uma vez que com esta lança, uma elevada percentagem do referido carbono atinge o banho de metal líquido.

Descrição do Processo

O dispositivo (1) na figura 2.19 opera segundo um fluido propulsor adaptado para acelerar e impulsionar, que entra pela porta de alimentação (7), fluindo até à extremidade (5) através do estrangulamento tronco cónico (6), onde é acelerado,

arrastando uma substância sob a forma de pó ou de partículas, que tenha sido introduzida na primeira conduta pela porta (13) (16), caso se pretenda injetar outras substâncias no interior do forno.

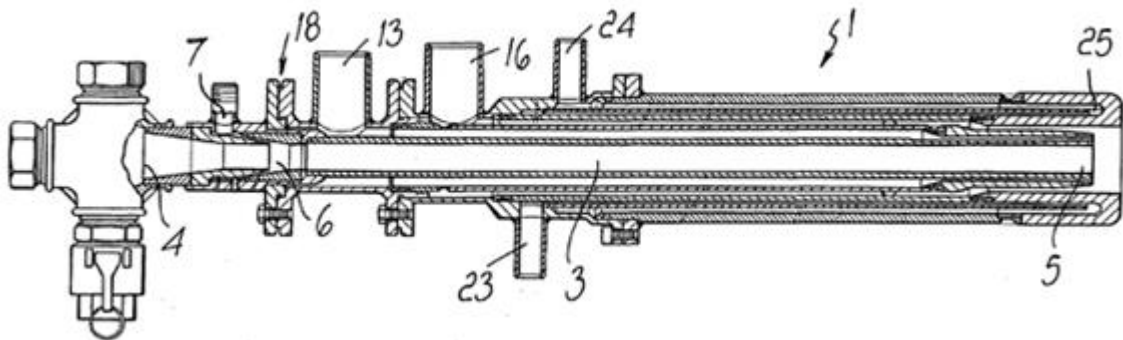


Figura 2.19 – Vista axial, em corte, da lança de injeção de pós e partículas. Adaptado de [14]

O aumento de velocidade gerado pela geometria tronco cônica (6) presente na figura 2.20, induz um efeito de sucção sobre as substâncias presentes no depósito de alimentação (4), transportando-as de forma constante num fluxo bifásico, com o fluido propulsor, ao longo da conduta (3). A transição entre a secção convergente e o canal seguinte é possível devido à flange de acoplamento (18) que liga as diferentes peças que compõem a lança.

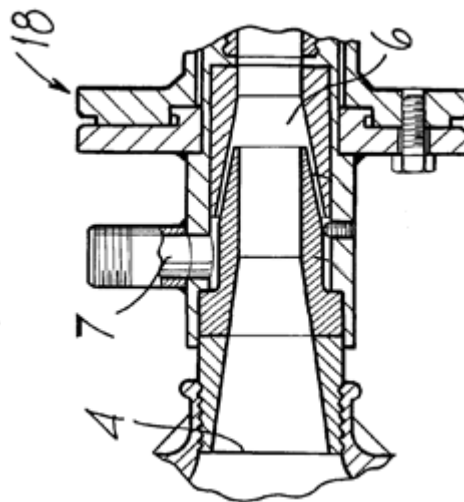


Figura 2.20 – Pormenor da geometria troncocônica. Adaptado de [14]

Desta forma, a lança projetada pode ser inserida na parede do forno elétrico, pois em virtude do vigoroso impulso aplicado, os pós ou partículas presentes no jato, incidirão no interior do banho metálico.

De referir que durante o processo de fusão a lança pode funcionar como fonte potenciadora de fusão, utilizando-se a porta (4) para fornecimento de pó de grafite ou carvão enquanto o orifício (13) funciona como fonte de alimentação de combustível, como por exemplo metano, ao passo que o orifício (16) é uma fonte de oxigénio. Isto

proporciona um jato de elevada temperatura que propicia uma fusão mais rápida da sucata. Logo, o consumo de energia elétrica do forno será reduzido assim como os tempos de fusão. Também é possível reduzir os tempos de fusão através da gestão da pressão de ar introduzida através da porta (7). Relativamente à refrigeração do equipamento, pela porta (23) há a entrada do fluido que após percorrer todo o seu circuito até à extremidade da lança (25) sai pela porta de saída (24). [14]

2.2.7.4. Dispositivo para a injeção de material sólido em partículas

O dispositivo aqui apresentado proporciona a injeção de material sólido em partículas no banho. Sendo constituído por um tubo central para a passagem do material sólido particulado, uma camisa de arrefecimento anelar em torno do tubo central, ao longo de uma parte substancial do seu comprimento, provido de passagens internas de fluxo de água para arrefecimento. Também compreende uma passagem para o escoamento de gás, formada entre o tubo central e a camisa de arrefecimento anelar, conforme o disposto na figura 2.21. Relativamente ao revestimento de arrefecimento anelar, este possui um invólucro de material refratário que protege toda a sua face exterior das condições extremas a que é exposto durante o ciclo de funcionamento.

Descrição do Processo

Na lança da figura 2.21 o tubo central (31) é formado por uma tubagem (33) de aço de baixo carbono ao longo do seu comprimento, até à sua extremidade dianteira que está equipada com uma extensão de tubo ou bocal substituível (34). O alinhamento deste tubo no interior do revestimento de arrefecimento é conseguido com recurso às estruturas anelares (83).

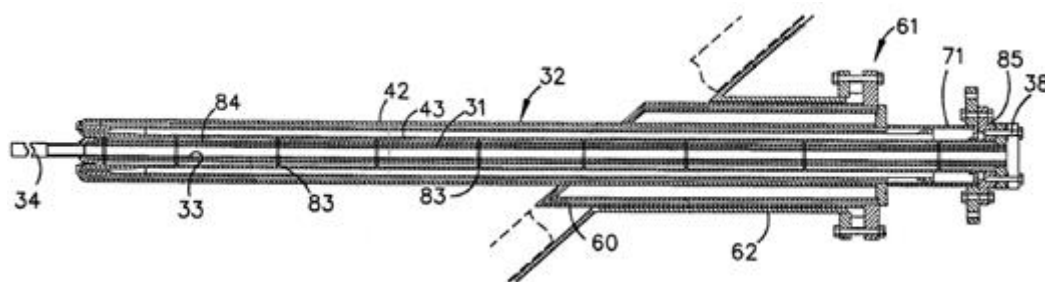


Figura 2.21 – Secção longitudinal da lança, em corte. Adaptado de [15]

Entre (52) e (53) circula a água de refrigeração, que tem entrada em (71), passando pela camisa anelar de arrefecimento (32). Enquanto o circuito de gás inicia-se na entrada (85) e flui ao longo da passagem de escoamento (84).

A extremidade traseira do tubo central (31) encontra-se ligada a um sistema de fornecimento de carvão particulado, através do acoplamento (38), que é veiculado num fluxo pressurizado, por exemplo de azoto.

Esta lança pode ter tipicamente 5 metros de comprimento com um raio exterior da camisa de refrigeração (32) de 100 a 150 mm. Para se acoplar às paredes do forno

recorre-se à estrutura (61) de parede dupla, sobrepondo-se à camisa de arrefecimento (32). A parede circular (60) encaixa num suporte tubular (62) para a lança que será soldado ao invólucro existente nas paredes do recipiente metalúrgico.

Neste dispositivo defende-se uma melhoria da acomodação do diferencial de movimentos de expansão entre o tubo central e o revestimento exterior, evitando assim a formação de fissuras. Também evita que a extremidade da lança em contacto com o banho, fique bloqueada com escória, sendo fácil a remoção do tubo central, assim como a remoção da lança do forno. [15]

2.2.7.5. Lança de Injeção

A presente invenção tem com objetivos a injeção de gás e pós no banho de metal fundido. Esta é constituída por um tubo central, canal de circulação do fluxo a insuflar, sendo envolvida por um invólucro refratário cujo principal papel é a manutenção das condições operacionais relativamente às circunstâncias adversas existentes.

Descrição do Processo

O tubo central (30) é concebido num metal ou liga metálica adequada para o efeito, como por exemplo aço. Ao longo do seu comprimento encontra-se fracionado em diversos módulos que são acoplados pelas uniões (42), presentes na figura 2.22, o que incute na lança uma maior versatilidade e facilidade de substituição dos elementos desgastados, sem necessidade da total substituição de todo o equipamento.

De salientar a presença de elementos que servem como âncoras (50) ao longo de toda a estrutura tubular central, dispostos transversalmente relativamente ao eixo longitudinal do tubo (30). Estes elementos, estruturas de arame dobradas em “V” (52) e posteriormente soldadas ao tubo, têm como intuito facilitarem a ligação estrutural entre o tubo de injeção e o invólucro refratário (60). Desta forma consegue-se o total aprisionamento da estrutura em questão.

Relativamente ao acoplamento, a estrutura tubular central, tem os diferentes módulos unidos por meio de uma extremidade com um macho roscado (40) que aperta na respetiva fêmea do módulo seguinte (44), como se visualiza na figura 2.23. Enquanto a união do invólucro refratário aqui presente é realizada recorrendo à extremidade macho (70) e fêmea (80), através das suas geometrias cónicas, com as superfícies coincidentes, que permitem o acoplamento.

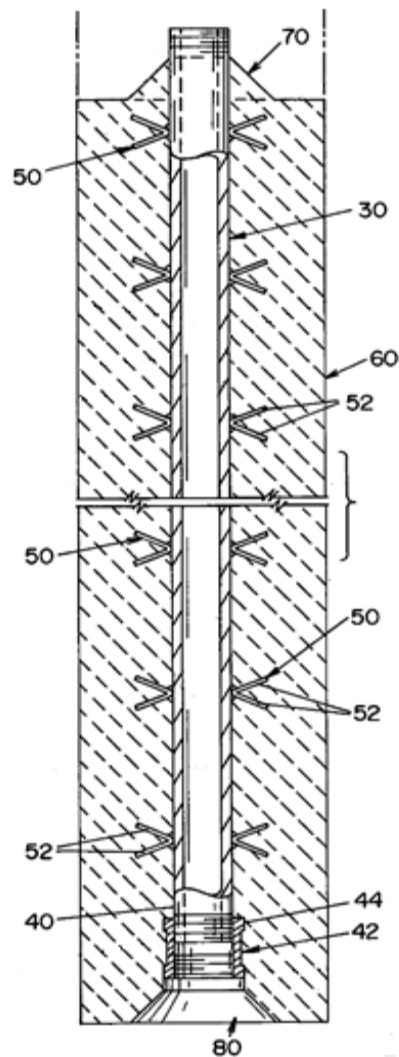
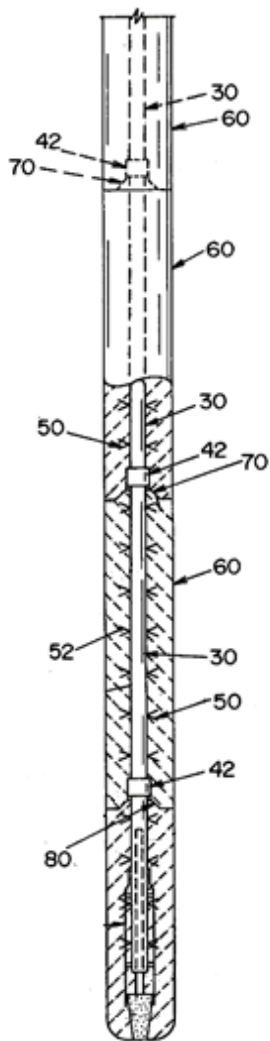


Figura 2.22 – Estrutura da lança. Adaptado de [16] Figura 2.23 – Pormenor do corpo da lança. Adaptado de [16]

Numa das formas de realização da referida lança, introduz-se no bocal de injeção (180) da figura 2.24 um tijolo poroso (182) realizado em material refratário, permitindo a passagem do gás e não possibilitando a ascensão de metal para o interior da lança. Sendo a injeção do material particulado efetuada pelo orifício central (190), indicado na figura 2.25, com ligação à conduta central, atravessando o tijolo poroso.

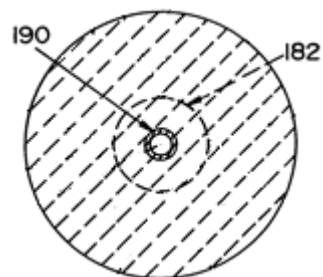
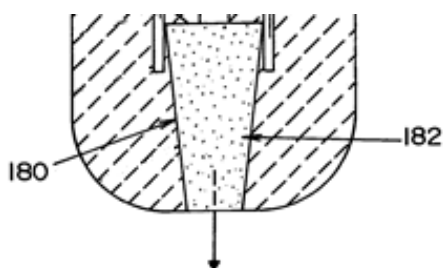


Figura 2.24 – Extremidade da lança. Adaptado de [16] Figura 2.25 – Vista, em corte, do bocal injetor. Adaptado de [16]

Na referida lança, as melhorias proclamadas relativamente ao estado da arte situam-se ao nível da constituição do seu refratário. De acordo com a invenção, a composição refratária é constituída por:

- Maioritariamente, material refratário do grupo: alumina, óxido de magnésio, sílica, óxido de zircónio e combinações destes;
- Alguma percentagem de carbono, ou suas combinações;
- Uma pequena percentagem de antioxidante e um ligante de resina, sendo preferencialmente utilizada uma resina fenólica.

Da combinação dos referidos elementos provém a mistura granular refratária. Sendo que outros aditivos podem ser adicionados de forma a conferir melhores características de resistência ao choque térmico e/ou à corrosão. [16]

2.2.7.6. Lança metalúrgica

A lança aqui apresentada foi projetada com o intuito de resistir num ambiente oxidante e agressivo. Para suprir estes requisitos, a cabeça da lança é normalmente realizada em cobre, o que auxilia o arrefecimento desta devido à elevada condutividade térmica que este metal possui.

Geralmente a cabeça da lança possui quatro orifícios de saída para a injeção de oxigénio no metal fundido. Sendo o oxigénio normalmente fornecido à lança, por canais de alimentação, a uma pressão máxima de 15 bar, podendo assim alcançar-se um regime de velocidades supersónicas na saída, superior a 2 Mach. Para tal, cada orifício de saída está estruturado com a geometria de *Venturi*.

Descrição do Processo

A extremidade da lança identificada na figura 2.26 possuiu passagens internas, para circulação de fluido de arrefecimento que percorre um circuito (4) (14) ao longo desta. Apesar da refrigeração a água e da elevada condutividade térmica na extremidade injetora da lança (12), esta apresenta um período de vida útil relativamente curto, cerca de 350-450 ciclos de aquecimento.

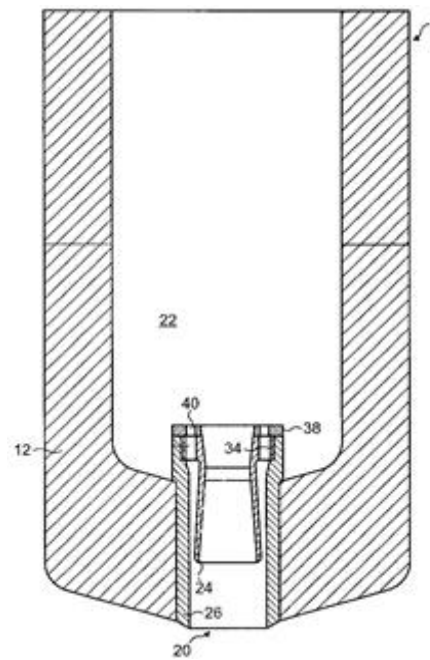
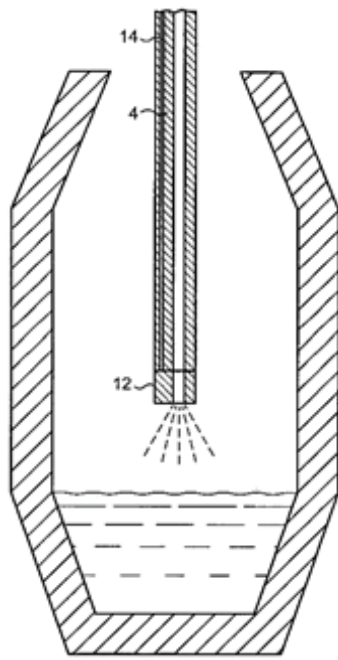


Figura 2.26 – Lança metalúrgica. Adaptado de [17] Figura 2.27 – Pormenor do bico de injeção. Adaptado de [17]

Na figura 2.27, o bico de Laval (24) possui duas saliências que permitem o engate na parede da lança, definindo restrições para a passagem do gás envolvente. Este bocal está localizado ligeiramente a cima da extremidade do ejetor, minimizando assim possíveis danos para o bico de Laval, devidos a salpicos do metal fundido. O bico de Laval apresentado é coaxial com o ejetor (20) e com o eixo longitudinal da lança (4). Sendo envolvidos por uma manga (26), que define o circuito de passagem de gás. Assim como a flange (34) acoplada por atrito, mas estanque aos gases do circuito externo. A manga (26) está ligada a uma placa anelar (38) que possui orifícios (40) com variabilidade no seu número e nas dimensões, proporcionando com isto diferentes quantidades de gás proveniente da câmara (22). [17]

2.2.7.7. Método de injeção de gás

A patente aqui apresentada, destinada à injeção de oxigénio no banho de metal para a eliminação do carbono presente, também contempla um sistema de *Laval* responsável pela alteração do perfil de velocidades.

Descrição do Processo

Assim, o oxigénio injetado pelo bocal da lança, com diâmetro de saída de 20,5 mm, situado 710 mm acima da superfície do banho e fazendo um ângulo de 40° em relação à horizontal, percorre cerca de 1090 mm, atingindo o interior do banho.

Também nesta invenção existe um fluxo secundário, funcionando como um invólucro de chamas, envolvendo um principal de oxigénio a partir da ponta da lança, como disposto nas figuras 2.28 e 2.29, sendo projetado com grande velocidade o que lhe permite atingir a superfície do banho a 488 m/s. Aqui, cerca de 85% do oxigénio ejetado

pela lança após a entrada no banho permanece disponível para reagir com constituintes do metal fundido.

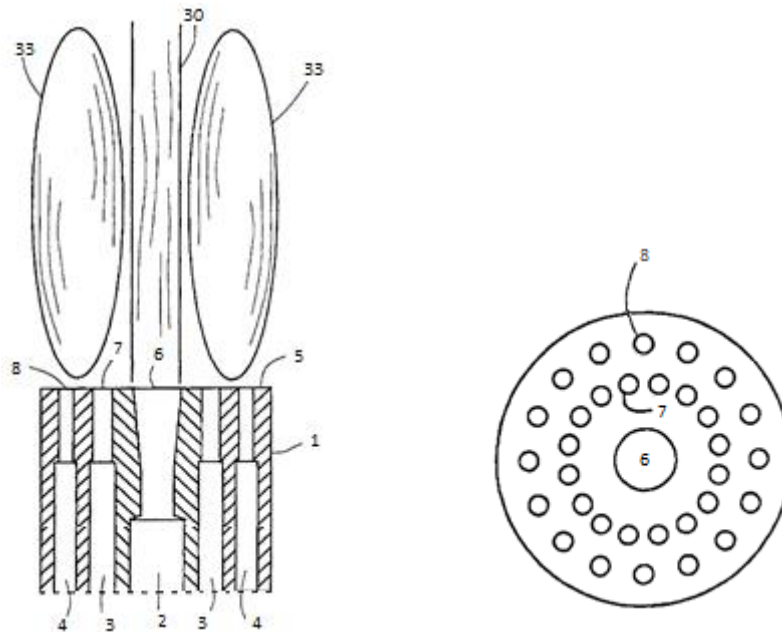


Figura 2.28 - Configuração do bocal injetor. Adaptado de [18] Figura 2.29 - Configuração das condutas. Adaptado de [18]

Como elucidam as figuras 2.28 e 2.29, representado com os números (2) (6) (30), temos o jato de oxigênio em diferentes fases com diferentes velocidades mediante a geometria percorrida. Enquanto em (3) (4) (7) (8) (33) é apresentado o fluxo protetor secundário com diferentes perfis de velocidade dependendo também da geometria percorrida. [18]

2.2.7.8. Injeção de fio pela lança

A invenção aqui apresentada refere-se a um dispositivo para injetar sólidos no banho de metal fundido por meio de um fio, neste caso cálcio. No entanto, surgem complicações devido à baixa densidade deste elemento quando comparado com o aço, tornando-se volátil o que dificulta a sua adição no banho de metal fundido.

Quando o cálcio funde a pressões metalostáticas inferiores à sua pressão de vapor, originam-se grandes bolhas de gás, transportando cálcio gasoso, que ascendem rapidamente à superfície do metal fundido. Na adição coadjuvada por um fluxo de argon, após sair da lança, o cálcio tende a ascender rapidamente até à superfície, apenas em torno da lança. O que significa um tempo de residência, no interior do metal fundido, relativamente baixo e como consequência um tratamento menos eficaz.

Como tal, é importante que a maior parte do cálcio adicionado que não reagiu permaneça no interior do banho fundido.

Constituição da lança injetora

De acordo com esta patente, a lança injetora pode ser produzida com um material estabilizado, contendo óxido de zircónio, grafite e resina. Como o bocal de injeção esta

imerso no metal fundido durante longos períodos de tempo enquanto o metal fundido está a ser refinado, a extremidade da lança está exposta às condições adversas impostas pelo banho. A referida composição do material que constitui a lança, garante melhores capacidades de resistência à temperatura e corrosão comparativamente ao carbono puro, referenciado em lanças similares e melhorando também a durabilidade do bocal inserido neste ambiente hostil. Estas alterações traduzem-se numa maior durabilidade operacional.

Descrição do Processo

O revestimento refratário da lança injetora pode ser formado por duas partes, uma parte principal e uma outra parte composta pela ponta da lança injetora, sendo que a parte principal contém uma porção da conduta principal de alimentação (86) e o bico injetor da lança alberga a outra porção da conduta (80). Os dois segmentos da lança foram configurados e adaptados de forma a acoplarem-se (74), como se visualiza na figura 2.30, sendo posteriormente removíveis quando se revelar economicamente viável. Isso permitiria que a ponta da lança injetora fosse substituída por uma nova aquando de um elevado desgaste deste componente ou mesmo de forma a evitar o desgaste mecânico do arame aditivo que passa através do bocal inserido na lança.

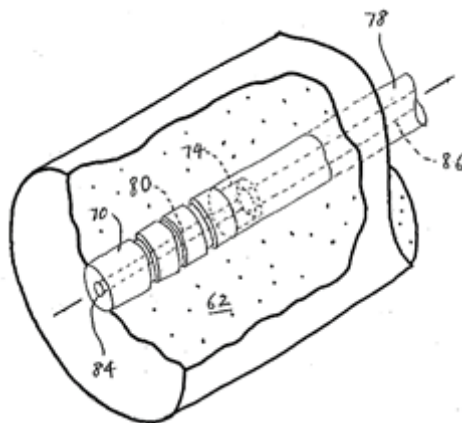


Figura 2.30 – Revestimento da lança. Adaptado de [19]

Assim a lança é concretizada com um invólucro de refratário cerâmico (62) em torno de uma conduta (78). O invólucro refratário pode ser constituído por alumina refratária de sílica, aplicando-se outro material refratário adequado, como por exemplo o usado para a construção do forno, consoante as condições de operação.

Na parte principal da lança, existe uma passagem interna (86) ao longo da conduta (78) através da qual o fio (20) é transportado. Enquanto a parte da ponta da lança (70), figura 2.31, contém uma passagem interna (80) que se prolonga longitudinalmente ao longo do seu comprimento. Através da qual é transportado o fio (20), a introduzir no banho de metal fundido pela extremidade de saída (84) do canal interno (80).

No lado oposto da lança (70), existe um encaixe de menor diâmetro (74) que está configurado para acoplar na conduta (78), ajustando-se e apertando na reentrância (77) de maior diâmetro interno, como mostra a figura 2.32. De referir que na zona de

acoplamento, a continuidade para passagem interna (80) sofre uma alteração geométrica, com uma passagem afunilada (83), permitindo que o fio “flua” da conduta superior (86) para a inferior (80) sem qualquer bloqueio. [19] [20]

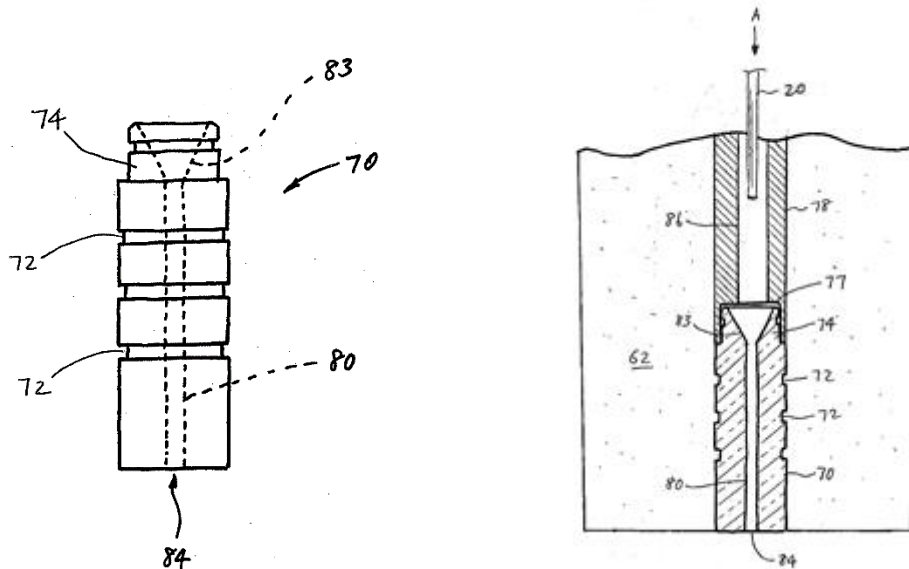


Figura 2.31 – Extremidade da lança. Adaptado de [19] Figura 2.32 – Corte transversal da lança. Adaptado de [19]

2.2.7.9. Lança de injeção de forma controlada

Uma outra conceção deste tipo de equipamento é apresentada nesta nova patente, onde é referido que as dimensões ótimas dos bicos injetores dependem sempre da quantidade de pressão aplicada para injetar o volume de partículas pretendido. E consoante o tamanho dos sólidos a injetar maior será a quantidade de gás de transporte para velocidades de injeção mais eficazes. Sendo determinantes as pressões praticadas na alimentação dos combustíveis com o intuito de gerar a propulsão adequada à injeção do conteúdo presente na câmara de combustão. Caso contrário efetuam-se alterações nas dimensões dos bicos de alimentação.

Descrição do Processo

A presente invenção possui entradas de combustível (16), de alimentação de gás oxidante (14) e de alimentação de partículas sólidas (17), fluindo pelas respetivas tubagens (13) (15) que conduzem a uma câmara de combustão. Relativamente ao arrefecimento da lança, é efetuado com água desde a sua entrada (18) percorrendo um circuito interno ao longo das paredes das condutas (11) (12), até à saída do circuito (19), como identificado na figura 2.33.

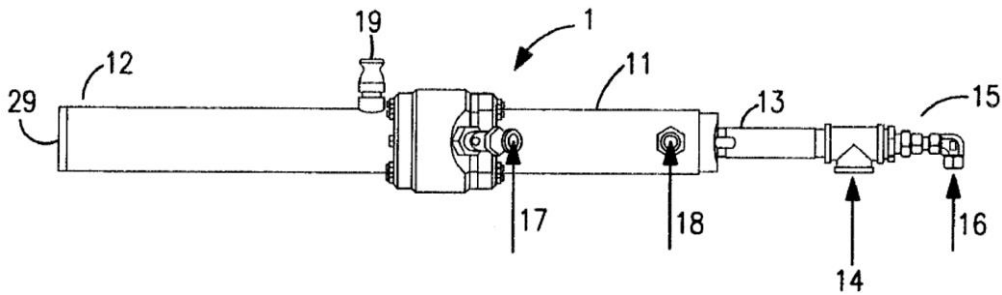


Figura 2.33 – Corpo da lança. Adaptado de [21]

Na câmara de combustão (11) existe um queimador (23) que é ativado por uma faísca que provoca a ignição (24), figura 2.34. A combustão praticada ao longo da conduta (11) atravessa um bocal (26) convergente-divergente ou por vezes apenas convergente que serve para aumentar a velocidade do fluxo. Este caudal converge na entrada do bocal (27), saindo por uma zona divergente (28), onde prossegue o seu percurso ao longo da conduta (12) até ao bocal de injeção (29). Nesta câmara (12) ocorre a adição e transporte do material particulado através da saída das partículas solidas (30).

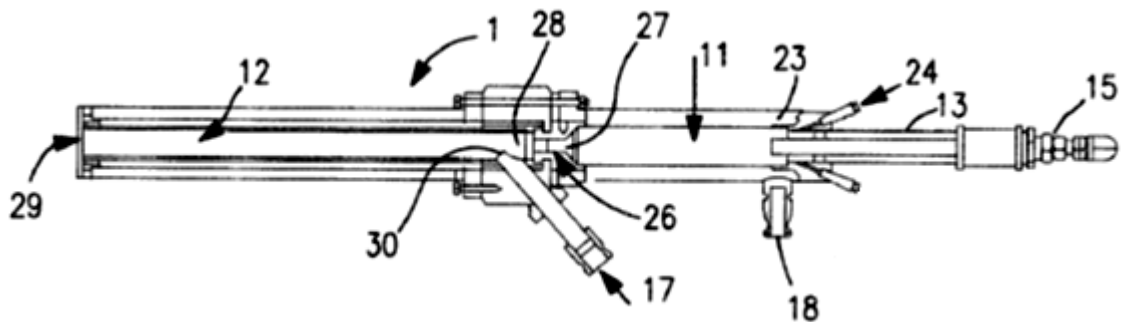


Figura 2.34 – Corte pormenorizado do injetor. Adaptado de [21]

A conduta de alimentação do combustível (15) é realizada em aço inoxidável com 19,05 mm diâmetro, enquanto a conduta de alimentação gás (13) é realizada num tuno SCH 40 também em aço inoxidável possui 38,1 mm. A concentricidade entre estes dois elementos é conseguida com recurso a aranhas. Todos estes elementos que compõem o queimador (23) são acoplados à extremidade da câmara (11) por meio de uma peça em bronze, continuamente refrigerada pelo circuito de água. Nesta zona é aplicada uma liga de Inconel 60 para melhorar a resistência à oxidação devido às elevadas temperaturas do processo.

Na lança, a alimentação dos pós pode ser realizada com recurso a rotor alimentador, onde a velocidade de alimentação do injetor está na gama dos 22 l/min a 136 l/min. A contribuição da pressão negativa também é essencial, estando dependente da taxa de combustão, pois esta depressão contribui para a sucção do fluxo de pós para o interior da conduta (12), funcionando ao mesmo tempo como segurança, pois impede o fluxo de retorno dos gases quentes para o interior do bocal alimentador de partículas sólidas.

Este equipamento revela-se eficaz ao nível da aceleração das partículas, dependendo o seu desempenho do comprimento das condutas, onde ocorre a interação entre os pós e o gás de insuflação. Ou seja, o tempo de coabitação do regime bifásico é essencial para

a propulsão do fluxo a injetar. Não obstante, condutas demasiado longas induzem maiores tempos de permanência deste contacto, o que nem sempre é benéfico porque existe um comprimento limite ideal onde se atinge a equidade de velocidades entre os componentes bifásico. Não se justificando maior tempo de permanência no interior da tubagem para a aceleração da corrente de transporte.

As vantagens do uso deste equipamento situam-se ao nível do transporte das partículas maiores, com o aumento das suas velocidades, o que propicia maiores capacidades de penetração, minimizando-se assim os efeitos aerodinâmicos opostos. Com isto, conseguem-se introduzir melhorias na trajetória de “voo” e reduzem-se tempos de injeção. [21]

2.2.8. Equipamentos metalúrgicos: aplicação no projeto

Em suma, depois de estudadas várias das patentes registadas e, de algum modo, relacionadas com o presente trabalho, retém-se vários fundamentos importantes para este projeto que serão agora sintetizados.

A necessidade de insuflação exige por vezes dois fluxos, um fluxo primário com o gás oxidante e um combustível e um secundário para o transporte das partículas a injetar. A presença de dois fluxos funciona como isolamento em relação à atmosfera exterior, impedindo o arrastamento de elementos nefastos para o fluxo interno.

Estes fluxos proporcionam jatos de elevada temperatura que são utilizados para promover uma fusão mais rápida da sucata e com isto aumentar a eficiência do ciclo produtivo e minimizar o desgaste tanto dos fornos, panelas e eléctrodos.

Em vários equipamentos o regime de velocidades é crucial, desde as geometrias que possibilitam a sua aplicação até aos seus efeitos sobre os elementos a injetar e a forma como interagem com o banho. As geometrias especiais das condutas proporcionam o aumento da velocidade do fluxo, com transições do regime subsónico para supersónico, devido à sua passagem por elementos troncocónicos similares aos, vulgarmente utilizados, sistemas de *Venturi* e Bicos de *Laval*. Caracterizando-se estes elementos pela sua geometria convergente-divergente que faz aumentar o perfil de velocidades e com isto incrementa uma aceleração do fluxo, por vezes bifásico.

O interesse de propulsionar o fluxo a injetar tem vantagens quando se pretende evitar o contacto do equipamento com o banho, para alcançar maior profundidade de insuflação e com isto reações prolongadas no interior do banho, proporcionando também a introdução do efeito de sucção sobre os elementos a insuflar que serão posteriormente transportados neste fluxo. Onde as maiores velocidades geram maior eficiência na homogeneização do fluxo bifásico ao longo da conduta.

No entanto, durante a aceleração das partículas deve-se ter em atenção a influência do comprimento das condutas no desempenho da mistura. Embora o tempo de coabitação do regime bifásico seja essencial, existe uma relação ótima entre o tempo de

permanência deste contacto e o tamanho das condutas, de modo a evitar desperdícios tanto na propulsão como nos custos das condutas.

A velocidade de injeção está também intimamente relacionada com a geometria dos bocais de ejeção que permitem gerir os volumes e as pressões de insuflação, tendo elevada responsabilidade no momento de impedir a ascensão banho para o interior da lança. Neste sentido são aplicados tijolos porosos nos bicos injetores que permitem a passagem do gás, impossibilitando a ascensão de metal líquido.

A gestão da vida útil dos equipamentos durante o ciclo de funcionamento é outro fator comum a todos os casos estudados, pelo que, nesse sentido, há a necessidade de introduzir uma camada protetora nas diferentes lanças. Os invólucros refratários aplicados diferem nos métodos de construção e na sua composição consoante as aplicações. Maioritariamente são constituídos por alumina, óxido de zircónio, sílica e diversos aditivos que conferem melhores características de resistência ao choque térmico e/ou à corrosão.

Relativamente às tubagens internas, normalmente são constituídas por aços inoxidáveis com baixo teor de carbono. Havendo algumas situações em que se aplica cobre, na extremidade da lança, devido à sua elevada condutividade térmica. Esta aplicação visa auxiliar o arrefecimento da extremidade de injeção. De forma geral este objetivo é conseguido por meio de circuitos internos de refrigeração, que percorrem todo o equipamento, onde circula habitualmente água para o arrefecimento dos órgãos sujeitos a condições adversas.

Apesar da presença dos circuitos de arrefecimento, todos os órgãos tem uma vida útil predeterminada, ao fim da qual terão de ser substituídos. Por esse motivo os equipamentos são dotados de estruturas versáteis e modularizadas que são acopladas por diversas uniões, facilitando a substituição dos elementos desgastados e ao mesmo tempo evitam-se custos avultados com substituição de todo o equipamento.

Um outro ponto relevante é união entre o refratário e as condutas internas, em alguns dos equipamentos estudados esta ligação é conseguida com a introdução elementos que funcionam como âncoras, promovendo a compactação do conjunto, invólucro refratário órgãos funcionais. A eficiência deste aprisionamento é vital para garantir a segurança e operacionalidade do equipamento.

Por fim, a forma de posicionamento da lança injetora e os métodos de adição. Esta pode ser afixada nas paredes do forno permitindo a insuflação à distância e precavendo os salpicos de escória para o bocal injetor. Uma outra forma de injeção, comumente utilizada, passa pela introdução da lança no interior do banho fundido, sujeitando-se o equipamento às severas condições do banho. Por vezes recorre-se à injeção por fio para injetar determinados materiais sólidos. Um outro modo de alimentação, recorrente nas fundições de alumínio, é realizado com recurso a um rotor alimentador que é inserido no interior do banho.

5. Trabalho Experimental

Após os estudos efetuados anteriormente conjuntamente com o primeiro modelo de protótipo construído tiveram início os testes no forno. Contudo é de salientar que a primeira fase de ensaios não corresponde à finalização do protótipo apresentado no capítulo anterior pois estes evoluíram em paralelo. Mediante os testes realizados e a verificação de alguns passos efetuavam-se ações corretivas no equipamento para o melhor desempenho no ensaio seguinte.

As pressões de injeção de argon dependem da profundidade a que a lança injeta, variando assim a já referida pressão metalostática, como tal, antes de se realizarem os testes foi necessário proceder ao seu cálculo teórico de modo a fornecer uma melhor aproximação à realidade.

5.1. Cálculo da pressão de insuflação

O teor de carbono dos diferentes aços e ferros fundidos é um elemento necessário para os cálculos da pressão metalostática. Então para estes cálculos utiliza-se o conteúdo de carbono de um aço tipicamente produzido, por exemplo o aço ao carbono “531”. Na sua constituição possui um intervalo percentual de carbono compreendido entre [0,17; 0,23], segundo a norma EN 10293 para aços.

A densidade [g/cm^3] das ligas de ferro-aço líquido é obtida em função da temperatura [K] e do conteúdo de carbono [%C]. Pela seguinte equação obtém-se o valor da densidade para o aço previamente definido. [23]

$$\rho[g/cm^3] = [7,10 - 0,0732(\%C)] - [8,28 - 0,874(\%C)] \times 10^{-4}(T - 1923) \quad \text{Eq. 5}$$

Substituindo-se na fórmula os valores os valores indicados para este aço, obtém-se:

$$\begin{aligned} \rho[\text{aço 531}] &= [7,10 - 0,0732(0,20)] - [8,28 - 0,874(0,20)] \times 10^{-4}(1903 - 1923) \\ &\Leftrightarrow \rho[\text{aço 531}] = 7,1016 \text{ g/cm}^3 = 7101,6 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad \text{Eq. 6}$$

Aqui foram calculadas as pressões metalostáticas para as profundidades dos dois fornos referidos neste trabalho, Forno 1 com $h = 940 \text{ mm}$ e Forno 2 com $h = 540 \text{ mm}$. Apesar das profundidades indicadas equivalerem à profundidade útil do forno, as profundidades necessárias para a insuflação são ligeiramente inferiores, porém recorreu-se às primeiras de forma a sobredimensionar teoricamente a pressão necessária para vencer a pressão metalostática. Apresentando-se a seguir os cálculos para as respetivas pressões metalostáticas máximas nos dois fornos.

Forno 1

Agora pela fórmula presente na equação 7, determina-se a pressão:

$$p[Pa] = \rho gh$$

Eq. 7

$$p = 7101,6 \times 9,8 \times 0,94 = 65419 Pa = 0,6456 atm$$

Com a aplicação da equação 8 determina-se a pressão metalostática:

$$p_m[atm] = p_0 + \rho gh$$

Eq. 8

$$p = 1 + 0,6456 = 1,6456 atm = 1,6674 bar$$

Forno 2

Agora pela fórmula 9 determina-se a pressão:

$$p[Pa] = \rho gh$$

Eq. 9

$$p = 7101,6 \times 9,8 \times 0,54 = 37581,51 Pa = 0,3709 atm$$

Com a aplicação da equação 10 determina-se a pressão metalostática:

$$p_m[atm] = p_0 + \rho gh$$

Eq. 10

$$p = 1 + 0,3709 = 1,3709 atm = 1,3890 bar$$

Como a $p_{inj} > p_m$ então:

- $p_{inj} > 1,67 bar$, no caso do Forno 1;
- $p_{inj} > 1,39 bar$, no caso do Forno 2.

Assim sendo, adotou-se a pressão de 1,8 bar no primeiro caso e 1,5 bar no segundo caso, no seguimento do sobredimensionamento efetuado no sistema para com cálculos teóricos fazer face às implementações práticas e evitar eficazmente a obstrução do bocal de injeção.

De referir que os valores teóricos das pressões de injeção para uma gama de aços com menor percentagem de carbono, como por exemplo os aços inoxidáveis da classe "600" em que se atingem resultados em torno de 0,07% C, são ligeiramente superiores aos anteriormente calculados, segundo a norma EN 10293 para aços. Cifrando-se nos 1,6685 bar para o Forno 1 e 1,3897 bar no Forno 2, o que indica uma ínfima variabilidade, quase impercetível, nas pressões de injeção.

6. Discussão de Resultados

Na sequência de todo o trabalho experimental realizado, importa agora fazer uma reflexão sobre os objetivos inicialmente propostos equiparando-os com os resultados obtidos.

A base do trabalho passava pela concepção e construção de um equipamento que possibilitasse a homogeneização do banho com a atuação direta ao nível da composição das inclusões de óxidos e sulfuretos, promovendo assim a limpeza do banho fundido através da decantação das inclusões, impurezas e gases, com comportamento nefasto para a composição do produto final, até à camada de escória. Numa fase mais avançada era pretendido o acerto da composição química das ligas produzidas.

Relativamente ao objetivo primordial do projeto, como se identifica no capítulo 4.4., este foi concluído com sucesso. Ao longo do processo de concepção foram estudadas diversas subsoluções para as diferentes subfunções, sempre com o importante suplemento bibliográfico. Posteriormente na parte de construção do equipamento, percorreram-se inúmeras etapas evolutivas que serviram para validar os sistemas definidos inicialmente.

Ao nível do refratário, obtiveram-se conclusões satisfatórias relativamente ao seu comportamento operativo, protegendo eficientemente toda a conduta interna responsável pela insuflação do caudal bifásico. Simultaneamente efetuou um importante trabalho de barreira térmica, que garantiu o correto funcionamento dos restantes elementos assim como a segurança dos colaboradores durante o manuseamento da lança.

O depósito, onde serão introduzidos futuros elementos a adicionar ao banho, foi testado com a utilização de cal. O seu princípio de funcionamento foi alvo de vários testes que confluíram para o sistema apresentado, baseando-se em fatores como a gravidade, a sucção e, principalmente, a pressurização. Este elemento trabalha em conjunto com o sistema de insuflação, advindo deste a capacidade de sucção que neste projeto não assumiu especial preponderância pois nos respetivos testes interferiu de certo modo com a estabilidade do banho, alterando o perfil de velocidades do fluxo insuflado. Embora exista poder de sucção por parte do circuito principal sobre o secundário, este não se apresenta como principal princípio de funcionamento. A pressurização foi o fator responsável pela transição dos pós para o fluxo a insuflar, sendo o depósito pressurizado com 1 bar de modo a não interferir no perfil de velocidades do circuito principal. A insuflação de cal foi alcançada com relativo sucesso, pois aproximadamente metade da quantidade inserida no depósito, cerca de 2 kg/ton, foi transportada num caudal bifásico. No entanto devido à reação deste pó com a humidade, formaram-se inúmeras pequenas bolhas que obstruíram a saída do depósito e com isto prejudicaram a

insuflação da totalidade da cal. No futuro, em caso de utilização de cal, deve-se garantir a sua presença apenas na forma de pó.

O sistema de insuflação que trabalha em conjunto com os anteriores, também foi alvo de inúmeros testes na tentativa de aumentar a sua eficiência. Apesar de existir um controlo direto das pressões no circuito principal e secundário, tornando-os independentes, relativamente à manipulação do caudal debitado houve um controlo pouco eficaz, através do regulador presente na fonte de fornecimento de argon. Por esta dificuldade, a determinação da estabilidade do banho foi um processo moroso e com alguma complexidade, motivando as várias alterações no sistema, anteriormente descritas, sem no entanto se obter resultados práticos concretos que solucionassem este problema, que ao contrário do espectável não estava relacionado com as características intrínsecas deste subsistema mas sim com o fator externo de regulação do caudal na garrafa de argon, na ausência de um medidor direto.

O equipamento final obtido personifica a conjugação de todos os subsistemas tratados, os quais foram alvos dos inúmeros testes descritos que serviram para validá-los. Assim foi possível realizar vários ensaios no forno, durante o processo de fusão, que permitiram fazer constantes ajustes aos subsistemas que constituem a lança, no sentido de melhorar o desempenho das suas funções. Apesar das dificuldades presentes resultantes instabilidade do banho que em muito dificultou o progresso do trabalho, o protótipo obtido teve um desempenho funcional, sendo capaz de insuflar argon e pós, de forma segura, sem introduzir consequências prejudiciais ao processo implementado pela empresa. No entanto em trabalhos futuros espera-se reduzir a massa total do sistema sem interferir nas suas características operacionais.

A insuflação de argon e cal vai de encontro aos objetivos inicialmente propostos, porém, primeiramente serão analisadas as repercussões desta injeção sobre o forno e o processo de fundição.

A agitação e o comportamento turbulento do banho aquando das insuflações suscitaram dúvidas relativamente aos seus efeitos sobre o ciclo de vida do refratário que constitui o forno. Na ausência de uma análise concreta, à primeira vista, com base na experiência dos colaboradores afetos ao processo, não se verifica qualquer consequência nefasta sobre forno, mantendo o seu normal ciclo de vida. O mesmo se conclui acerca dos efeitos do argon nas paredes refratárias.

6.1. Análise da composição química

Relativamente aos objetivos propostos, como já referido, durante os testes experimentais foram retiradas amostras antes e depois da insuflação, para análise posterior no espectrómetro.

Nas duas amostras recolhidas durante o processo de insuflação de árgon, visualizadas na figura 6.1, não se verificam alterações relevantes na composição química. Do árgon, elemento inerte, não seriam de esperar efeitos sobre a composição química do banho mas alterações ao nível das inclusões visualizadas na análise à estrutura física. Assim embora haja algumas diferenças nos elementos presentes da primeira para a segunda amostra, devido ao tempo de duração da insuflação, não existiu prejuízo para o banho.

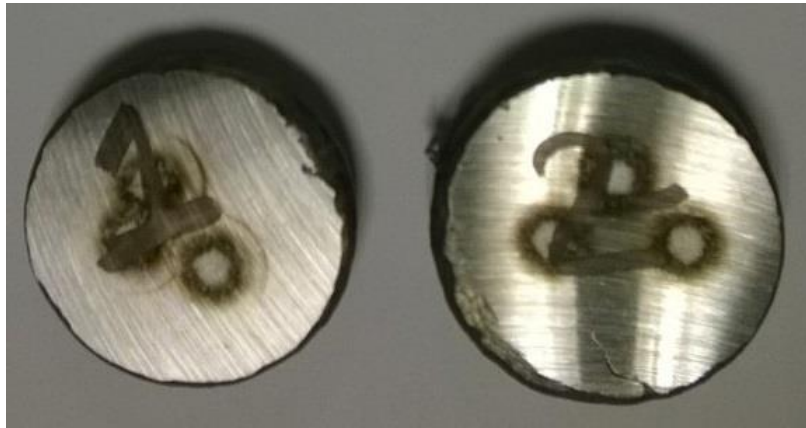


Figura 6.1 – Amostras para análise da composição química: a) 1ª amostra; b) 2ª amostra

A análise à estrutura física do metal fundido exige o mesmo procedimento de recolha. Para tal, durante os testes de insuflação de árgon e cal serão recolhidas duas amostras, as quais serão preparadas como evidencia a figura 6.2, para posterior análise no microscópio eletrónico.



Figura 6.2 – Exemplo de amostras recolhidas para posterior análise no microscópio

O estudo dos efeitos da insuflação deste caudal bifásico sobre o banho, relativamente à parte metalúrgica, é de todo útil para compreender a utilidade deste projeto na área da fusão de aços e ferros. Deste modo, as análises microscópicas deverão ser objeto de estudo em trabalhos futuros.

7. Trabalho Futuro

A evolução conseguida ao longo de todo o projeto tem ainda muita margem de progressão, nesse sentido são apresentados neste capítulo os pontos-chave para a continuidade desta evolução, com o intuito de validar o equipamento de injeção de gás e pós na sua totalidade. Note-se que estas melhorias visam em primeiro lugar validar a componente física e funcional do equipamento para futuramente se atuar ao nível das reações registadas no banho de metal fundido.

7.1. Melhorias a introduzir no protótipo atual

O projeto desenvolvido possui um enorme potencial de otimização, a exploração dos seus subconjuntos permitirá solucionar problemas identificados na atualidade. Tendo em consideração a diversidade de soluções presentes nos equipamentos estudados ao longo do estado de arte, tenta-se aqui reduzir o âmbito de otimizações essencialmente aos conjuntos de subsoluções aplicados atualmente.

Iniciando pela segurança do equipamento, a presença de uma válvula antirretorno é essencial para garantir o correto funcionamento do equipamento, evitando a acumulação de pressão devido ao fluxo de retorno em casos de obstrução do sistema. Apesar de esta incrementar as desvantagens referidas devido à sua geometria, um sistema alternativo deve ser implementado.

Ainda neste capítulo, a insuflação de pós não pode incrementar um aumento de pressão de injeção pois causaria turbulência no banho. A otimização da relação entre o depósito de pós e o circuito principal requer um estudo teórico aprofundado, recorrendo-se a *software* de simulação adequados que auxiliem os testes práticos, de maneira a juntar a sucção com a pressurização do depósito e assim maximizar o caudal bifásico. Este estudo terá naturalmente consequências benéficas ao nível da granulometria das bolhas que compõem o fluxo insuflado, pois com a melhoria dos tempos e pressões de coabitação do regime bifásico necessariamente serão formadas bolhas de menor diâmetro, o que significa maior tempo de permanência no interior do banho.

Um outro ponto de estudo será necessariamente as geometrias das condutas, da forma referida acima, estas possuem potencial de otimização. Embora também se prevejam modificações decorrentes da automatização do sistema, com a eliminação o eixo horizontal presente no atual protótipo, para facilitar o manuseamento da lança em segurança por parte dos operadores, e a projeção do equipamento apenas no eixo vertical, como se verá na modelação do sistema automatizado.

Relativamente aos materiais utilizados, de forma geral coadunam-se bem às suas aplicações embora se exijam estudos ao seus ciclos de vida em operações para se verificar a sua viabilidade ou a opção por outros elementos, o que pode encarecer o sistema.

No seguimento dos materiais aplicados surge o refratário utilizado e a sua harmonia com a conduta interna. Devido ao grande diferencial dos coeficientes de expansão térmica entre os dois elementos existirá sempre uma fonte de potencial fissuração. A solução passa pela eliminação da conduta do interior do refratário, exigindo-se a presença de uma rede no seu interior que servirá como estrutura de suporte e alicerce à sua rigidez ou por outro lado deve-se estudar os coeficientes de expansão térmica dos materiais em questão e minimizar o seu diferencial com um elemento de transição entre os dois materiais.

O refratário apresenta-se como elemento chave no processo, carecendo de estudos que melhorem a sua composição consoante o objetivo de aplicação e a sua geometria restrita. A introdução de aditivos requer a colaboração com uma equipa especializada, capaz de um aconselhamento válido.

Por fim, a automatização do equipamento é essencial para aumentar os índices de confiabilidade, repetibilidade, exatidão e segurança do processo, como se verá a seguir.

7.2. Sistema Automatizado

No seguimento das otimizações, a realizar no futuro, ao atual protótipo há lugar para a automatização do processo. A introdução de uma sequência lógica programada, além de incrementar repetibilidade no procedimento de trabalho também auxilia a função dos colaboradores da empresa, dotando-os de um método funcional, atualizado e acima de tudo seguro.

Quando importa cada vez mais a eficiência dos ciclos produtivos com poupanças de tempo e de energia, interessa reduzir a aleatoriedade do processo e estabelecer rotinas bem definidas que promovam a repetibilidade e com isso a exatidão dos resultados obtidos. Como tal deverá ser criado um ciclo de injeção de comando semiautomático contemplando uma importante interface homem-máquina. O seu objetivo passa pela diminuição de custos do processo e, mais importante, permitir ao operador em qualquer circunstância ou na presença de imprevistos interromper o ciclo ou mesmo terminá-lo, sempre auxiliado por um modo de segurança através de um ciclo implementado para o efeito.

7.2.1. Ciclo Operativo

O ciclo operativo passa por três etapas essenciais que são descritas em seguida:

1. Inicialização

Aqui há uma verificação, por parte do operador, de todos os elementos de modo a iniciar o processo, como:

- A pressão inicial;

- A pressão introduzida na fonte de alimentação;
- A quantidade de carga de elementos a insuflar presentes no depósito, assim como garantir que este se encontra totalmente fechado.

2. Ciclo de Funcionamento

O ciclo de operação automatizado é agora descrito:

1. Abrir o circuito principal de insuflação de argon, na pressão inicial previamente calculada;
2. Iniciar descida da lança, com aumento progressivo da pressão;
3. Confirmar a finalização do ciclo de descida, com a profundidade de 900 mm e pressão de 1,8 bar;
4. Abrir o circuito de pós durante 2 minutos, existindo neste intervalo de tempo uma margem de segurança para a total ejeção do conteúdo presente no depósito;
5. Paralelamente ao ponto anterior, verificar a estabilidade do banho e atuar se necessário ao nível da pressão;
6. Fechar o circuito de pós;
7. Iniciar subida da lança, com redução lenta da pressão de modo a evitar a sua obstrução;
8. Fechar circuito principal.

Durante o ponto 4 deve-se ter em atenção os valores indicados nos manómetros dos reguladores de pressão, na presença de qualquer anomalia terá de ser ativado um ciclo de segurança.

Após a finalização destas etapas será concluído o ciclo de injeção.

3. Verificação

Neste momento, após a conclusão do ciclo de funcionamento, será necessário verificar a integridade de todos os elementos, como o desgaste da lança, a ausência de obstrução e o correto funcionamento dos circuitos de pressão, dando-se por concluído o ciclo operativo.

7.2.2. Controlo do sistema

Este ciclo será implementado com a ajuda da metodologia de *Grafcet*, através da qual se elaborou o processo sequencial de controlo do sistema, anteriormente descrito.

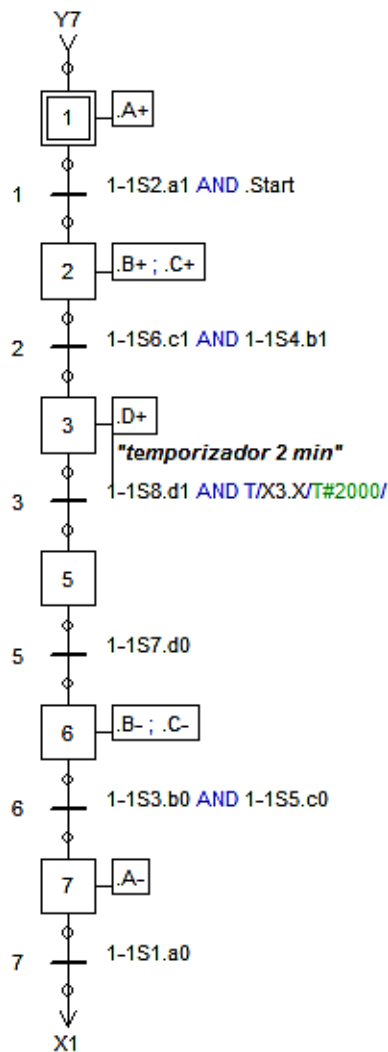


Figura 7.1 – Grafcet de controlo do sistema

Este *Grafcet* da figura 7.1 é composto pelas etapas da tabela 7.1:

Tabela 7.1 – Etapas de comando do *Grafcet*

Etapas	Descrição das etapas	Atuadores
A +	Abertura do circuito principal	Cilindro Biestável
A -	Fecho do circuito principal	
B +	Descer lança	Cilindro Biestável
B -	Subir lança	
C +	Aumento gradual da pressão	Cilindro Biestável
C -	Redução lenta da pressão	
D +	Abertura do circuito de pós	Cilindro Monostável

Como referido anteriormente, o ciclo aqui descrito é complementado com um outro que garante a segurança do sistema em caso de acontecimentos inesperados. Para tal, a interface com o utilizador terá que permitir que caso ocorra alguma anomalia, ao nível da turbulência do banho ou nos níveis exagerados de pressão nos manómetros, seja pressionado um botão que neste caso origine a redução da pressão, como indica o *Grafcet* de segurança presente na figura 7.2.

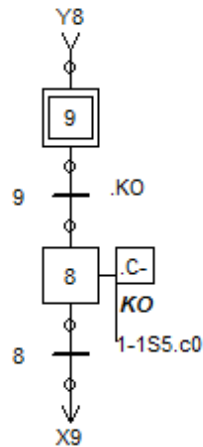


Figura 7.2 – Grafcet de Segurança

Um outro botão para situações de emergência também terá de ser previsto, caso seja pressionado, B – é atuado e a insuflação é imediatamente suspensa.

De referir que apesar de se indicar que a pressão é regulada por um atuador de forma gradual, por motivos de viabilidade económica, este controlo será realizado por estratificação, ou seja, são definidos 3 níveis aos quais correspondem diferentes intervalos de valores de profundidade e consoante a deslocação numa gama desses valores é atuada a válvula de pressão correspondente. Desta forma são implementados um nível de pressão inicial, um segundo nível de pressão de transição e o terceiro nível correspondente à pressão de insuflação na profundidade máxima admissível. Mediante a descida da lança há a abertura e fecho das válvulas correspondentes aos diferentes níveis, o mesmo acontece na subida da lança. Com isto consegue-se reduções de custos com a implementação da automatização do sistema e ao mesmo tempo são utilizadas pressões de trabalho adequadas.

A metodologia aplicada após ser validada será implementada num autómato programável adequado para realizar o controlo de todo o sistema.

7.3. Modelação do sistema automatizado

O sistema automatizado sofrerá naturalmente alterações relativamente ao atual protótipo. Essas alterações baseiam-se nas melhorias referidas acima e com o intuito de tornar o equipamento versátil e facilmente aplicado aos fornos presentes na empresa Ferespe. Em seguida é apresentada a modelação do futuro equipamento.

Na figura 7.3 está representado o futuro equipamento, assim como o seu avançamento funcional.

dos ensaios, num modo preventivo, revelou-se insuficiente para sustentar a ascensão de metal fundido no interior do bocal injetor. No entanto a perigosidade presente nas projeções de metal fundido acompanhava as alterações promovidas no equipamento. A origem dos vários problemas, ao contrário do previamente assumido, estava num fator externo ao equipamento, regulação do caudal debitado, sobre o qual não se possuía controlo direto durante os testes, devido à ausência de um elemento de medição direta que possibilitasse a correta relação das variáveis envolvidas. Com a resolução desta dificuldade identificou-se que as pressões de trabalho inicialmente calculadas eram afinal uma referência a utilizar, acompanhadas do devido sobredimensionamento, para evitar obstruções.

Apesar das dificuldades sentidas, o objetivo primordial de desenvolvimento e conceção de uma lança de insuflação de gás e pós reativos foi concretizado com sucesso, alcançando-se um processo de insuflação estável, no qual os colaboradores sentiam segurança. A hipótese de análise de efeitos desta aplicação sobre o processo e os resultados metalúrgicos por si originados, que primeiramente não estavam equacionados no âmbito deste projeto, foi iniciada devido à fluidez da parte final do trabalho, permitindo afirmar que a insuflação não provocou qualquer consequência nefasta sobre o banho. Os testes do ponto de vista metalúrgico assim como a efetivação de um protótipo final englobando todas as subsoluções aqui obtidas devem ser objetivos de um trabalho futuro.

Referências Bibliográficas

- [1] – Ferespe, “Ferespe – materials”.
<http://ferespe.pt/materials>. Acedido em: 15 de Junho de 2015
- [2] – Berciano, J. L. E., & Guerra, E. T. (2007). *Metalurgia Secundaria*. Madrid. Retrieved.
[http://oa.upm.es/1000/1/Berciano Tremps 01.pdf](http://oa.upm.es/1000/1/Berciano_Tremps_01.pdf)
- [3] – Garcia, A. A. (1989). Técnicas de soplado para la metalurgia en cucharas, 28, 395–405. Retrieved.
<http://boletines.secv.es/upload/198928395.pdf>
- [4] – Abdallah, W., Buckley, J. S., Carnegie, A., Edwards, J., Herold, B., Fordham, E., Ziauddin, M. (2007). Fundamentals of Wettability. *Oilfield Review*, 44–61. Retrieved.
https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors07/sum07/p44_61.pdf
- [5] – Linde, “Linde-gas – atmospheric gases”.
http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/gases_atmospheric/index.html
Acedido em: 25 de Junho.
- [6] – Santos, C.A. (2005). Classificação dos aços e elementos de liga. Brasil, Núcleo de Engenharia de Materiais Metálicos.
- [7] – MARTINS, A.A.R. (2002). *Desenvolvimento de Processo para Fabricação de Aços de Elevada Limpeza Interna na Companhia Siderúrgica Nacional*, Metalurgia e Materiais: Materiais, Fusão, Refino e Solidificação de Metais, v. 58, N. 2, ABM N. 520.
- [8] – MrReid.org, “MrReid.org - Throats, nozzles and shock diamonds”.
<http://wordpress.mrreid.org/2014/06/18/throats-nozzles-and-shock-diamonds>
Acedido em: 5 de Maio de 2015.
- [9] – K.S. Raju (2011). Fluid Mechanics, Heat Transfer, and Mass Transfer: Chemical Engineering Practice.

[10] – Baetz, B., Guerieri, P., Krell, T., Roustopoulos, T. Optimization of venturi performance, Phase 4.

<http://sites.udel.edu/meeg401-archive/files/2011/12/21-F2011-REPORT.pdf>

[11] – Tiveliu, B. (1983). Apparatus for treating molten metal and method for refining steel melts, Google Patents.

<http://www.google.com/patents/EP0092652A1?cl=en>

[12] – Stefano, M., et al. (2000). Integrated device to inject technological gases and powdered material and method to use the device for the processing of baths of molten metal, Patentscope.

<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2000028097>

[13] - Cameron, A. M. and C. J. Feldermann (2008). Lance for injecting particulate material into liquid metal, Google Patents.

<https://www.google.com/patents/US7396503?hl=pt-PT&dq=US20050230885>

[14] – Bianchi, R. and F. Macario (2002). Injection lance, particularly for injecting substances in the form of powder or particulate, into electric furnaces for steelmaking, Google Patents.

<http://google.com/patents/EP1170386A2?cl=en&hl=pt-PT>

[15] – Alan, C. B. and W. Trevor (2006). Apparatus for injecting solid particulate material into a vessel, Patentscope.

<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US42996255&recNum=28&maxRec=301&office=&prevFilter=&sortOption=Pub+Date+Desc&queryString=FP%3A%28Trevor+Williams%29&tab=NationalBiblio>

[16] – Barrett, R., Abrino, D., Prior, H., & Perich, R. (2005). Injection lance: Google Patents.

<https://www.google.com/url?paf=&q=https://www.google.com/patents/US20050110202%3Fdq%3Dinjection%2Blance%2Bnozzle%2Bnozzle%2Bfor%2Binjection%2Bpowderous%2Bmaterial%2Blance%2Btip%26hl%3Den%26sa%3DX%26ei%3Djp8BVYGIJ5SAygTxoxoCICw%26ved%3D0CAYQ6AEwAA&usg=AFQjCNGKsxaUyuLRYNv-N8ijFd190MGqRQ>

[17] – Cameron, A.M., & Felderman, C.J. (2004). Metallurgical lance and apparatus: Google Patents.

<https://www.google.com/patents/US6709630>

[18] – Anderson, J.E., Mathur, P.C., & Selines, R.J. (2002). Method using a burner/lance for injecting gas into molten metal: Google Patents.

<https://www.google.com/patents/EP0866139B1?cl=en&dq=injection+lance+nozzle+for+injection+powderous+material+lance+tip&hl=en&sa=X&ei=9LPsVNPTCoqrogTKmYLoDg&ved=0CAoQ6AEwAg>

[19] – Colavito, D.M., Damiano, J., & Vermeulen, Y.C. (2008). Wire injection lance nozzle insert: Google Patents.

https://www.google.com/patents/US20080236778?dq=nozzle+nozzle+for+injection+lance+tip&hl=en&sa=X&ei=erLsVJrAG4aooGTQ_4GADw&ved=0CAwQ6AEwAw

[20] – Vermeulen, Y.C. (2010). Wire injection lance nozzle assembly: Google Patents.

https://www.google.com/patents/WO2010005506A1?cl=en&dq=nozzle+nozzle+for+injection+lance+tip&hl=en&sa=X&ei=erLsVJrAG4aooGTQ_4GADw&ved=0CAYQ6AEwAA

[21] – Halder, S., Mahoney, W.J., Bielec, B., & Churpita, R. (2013). Controllable solids injection: Google Patents.

<http://www.google.com/patents/WO2013096767A1?cl=en&hl=pt-PT>

[22] – Converter Accessory, “Converter Accessory – components.”

<http://www.converteraccessory.com/products/foxtrim/components.shtml> Acedido em: 30 de Abril de 2015.

[23] – Jimbo, I., & Cramb, A. W. (1993). The density of liquid iron-carbon alloys. *Metallurgical Transactions B*, 24(1), 5–10.

<http://doi.org/10.1007/BF02657866>

[24] – Integrated Environmental Management, Inc., “IEM-Inc – Densities.”

<http://www.iem-inc.com/information/tools/densities> Acedido em: 13 de Abril de 2015.

Anexos

Anexo A. Fichas de Segurança – Gases Industriais

Anexo B. Fichas de Segurança – Refratários

Anexo C. Dimensionamento de Tubos de *Venturi*

Anexo D. Desenhos Técnicos – Equipamento Projetado