



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR de ENGENHARIA de LISBOA
ÁREA DEPARTAMENTAL de ENGENHARIA QUÍMICA



Contribuição para a caracterização da emissão de nanopartículas em processos de soldadura e avaliação de riscos decorrentes do processo

CATARINA ALEXANDRA DOS REIS PEREIRA
(Licenciada em Engenharia Química)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química e Biológica – ramo de Processos Químicos

Orientadores:

Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes
Prof. Mestre Paula Cristina da Silva Albuquerque

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Manuel José de Matos

Vogais:

Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Prof. Doutora Ana Maria da Gama Mateus Cabral
Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes
Prof. Mestre Paula Cristina da Silva Albuquerque

Janeiro de 2014

*“Onde estão os Riscos?
no Futuro ... que pode ser duvidoso e nos forçar a mudanças...
nas Mudanças ... que podem ser inúmeras e nos forçam a decisões...
nas Decisões ... que podem não ser as mais corretas...”*

Walter de Abreu Cybis (2003)

Agradecimentos

Agradeço, com grande estima, a ajuda de todas as pessoas com quem colaborei durante a realização deste trabalho, nomeadamente:

- ❖ Ao meu orientador Professor Doutor João Fernando Pereira Gomes pelo ensinamento, acompanhamento, e disponibilidade constante para qualquer esclarecimento na realização deste trabalho;
- ❖ À minha orientadora, Professora Mestre Paula Cristina da Silva Albuquerque, agradeço igualmente a ajuda prestada e o acompanhamento em vários domínios desta dissertação;
- ❖ À Professora Doutora Rosa Miranda da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), pelos esclarecimentos prestados durante a realização da componente prática deste trabalho, bem como pela ajuda prestada em vários domínios desta dissertação;
- ❖ À Professora Doutora Patrícia Carvalho do Microlab do Instituto Superior Técnico (IST), pela disponibilidade e ajuda prestada na análise de *Transmission Electron Microscopy* (TEM) e de *Electron Dispersion Scanning* (EDS).
- ❖ Aos meus colegas Miguel Bento e Tiago Pereira, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, que foram imprescindíveis na realização dos ensaios, e por me ajudarem de forma incansável na realização deste trabalho bem como na discussão de ideias sobre algumas temáticas inseridas nesta dissertação, mais precisamente no que diz respeito aos processos de soldadura em estudo.
- ❖ Aos Senhores António Campos e Paulo Magalhães, pela assistência prestada durante a parte experimental deste trabalho;
- ❖ À minha amiga Joana Fonseca pelo apoio e paciência ao longo de todo este período;
- ❖ Às minhas amigas e colegas de faculdade, Cátia Alves, Marina Soares e Samira Furtado, pelo apoio que sempre mostraram e continuaram a mostrar, antes, durante, e após a realização deste trabalho;
- ❖ À minha família, nomeadamente aos meus pais e irmãs e ao meu cunhado Ricardo, agradeço pelo apoio, paciência, carinho e dedicação, ao longo de todos estes anos;
- ❖ Um agradecimento particular à minha tia Zézita pela colaboração na revisão do texto.

A todos e a todas o meu Muito Obrigada!

Resumo

Os processos de soldadura por fusão são os mais utilizados na indústria metalomecânica e resultam na libertação de fumos (mistura de partículas sólidas e gases tóxicos).

Quanto menor for a dimensão dessas partículas, mais perigosas elas se tornam para a saúde dos trabalhadores. Assim, surge a importância do estudo que envolve a análise da emissão de nanopartículas durante processos de soldadura (MAG, SER e TIG).

Este trabalho surgiu da necessidade do estabelecimento de correlações entre as emissões de nanopartículas libertadas durante estes processos e os seus respetivos parâmetros operacionais. Uma vez detetadas quais as condições de processo mais críticas, definiram-se medidas concretas a tomar para evitar exposição e risco agravado para os trabalhadores expostos. Este é um tema de grande interesse e aplicação industrial concreta, que implica uma quantificação do risco (*Control Banding Nanotool*) e definição de boas práticas para evitar riscos agravados para a saúde dos trabalhadores.

Dos processos de soldadura estudados, no processo MAG, verifica-se uma tendência da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para aumentar com o aumento da intensidade de soldadura. No processo SER verificou-se que a utilização de parâmetros elétricos mais altos originava uma maior libertação de nanopartículas (tendência quase linear). No processo TIG, a área superficial das partículas com capacidade de deposição alveolar não revelou a existência de uma relação linear com o aumento dos parâmetros elétricos, o que poderá estar relacionado com o facto de a potência do arco elétrico em TIG não aumentar de forma linear, como ocorre nos outros processos.

Dos processos estudados o que apresenta maior capacidade de deposição alveolar é o processo SER ($95\ 982\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$), seguido do MAG - Aço inoxidável ($94\ 136\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$).

Após avaliação do risco de exposição a nanopartículas, as medidas de controlo recomendadas inserem-se no âmbito da melhoria/criação de condições de exaustão ou de ventilação local, bem como de medidas de contenção.

Palavras-chave: Nanopartículas; Soldadura por Fusão; *Metal Active Gas* (MAG); *Tungsten Inert Gas* (TIG); Soldadura por Elérodos Revestidos (SER); Geração de Fumos; Avaliação de Riscos; Boas Práticas em Segurança e Higiene no Trabalho; Medidas Preventivas.

Abstract

The melting welding processes are the most used in the metalworking industry and therefore resulting in the release of fumes (mixture of solid particles and toxic gases).

The smaller dimension those particles have, the more dangerous they became to the workers health. So, the study gains relevance by taking into consideration the analysis of nanoparticles emission during the welding processes (MAG, SER and TIG).

This study meets the need to define correlations between the nanoparticles emissions released during this processes and the concerning operational patterns. Once detected which process conditions are the most critical ones, effective action has been defined in order to avoid exposure and severe damage for the exposed workers. This is an extremely interesting subject and with a practical industrial application, which means a risk quantification (Control Banding Nanotool) and definition of a good plan to protect the worker's health from hazard.

For this purpose I choose the MAG process as one of the welding processes, in which we can observe that the particles surface area tend to increase as long as the solder intensity increases.

In the SER process we have verified that higher electric patterns caused a higher release of nanoparticles (almost linear tendency). In the TIG process, the nanoparticles superficial area with the ability of alveolar deposition didn't reveal a linear relation with the increase of electric patterns, which might be due to the fact that the power of the electric arc hasn't increased in a linear way as it occurred in other processes.

From the before mentioned processes, the SER process is the one that shows more ability for alveolar deposition ($95\ 982\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$), followed by MAG – stainless steel ($94\ 136\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$).

After evaluating the exposure risk to nanoparticles, the recommended control measures fit in the scope of better exhaustion or local ventilation as well as restraining measures.

Key-words: Nanoparticles; Melting Welding; Metal Active Gas (MAG); Tungsten Inert Gas (TIG); Welding by Coated Electrodes (SER) / Manual Metal Arc (MMA); Fumes Generator; Risk Evaluation; Good Practices in Safety at Work Health Care; Preventive Measures.

Índice

Agradecimentos.....	v
Abstract	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xix
Abreviaturas e Siglas	xxi
CAPÍTULO I – Introdução	1
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. Motivação	4
1.3. Objetivos <i>versus</i> Metodologias	5
1.4. Estrutura da Dissertação	6
CAPITULO II – NANOPARTÍCULAS E NANOTECNOLOGIA.....	9
2. Nanopartículas e Nanotecnologia	9
2.1. Definições - Nano-Objetos; Nanomateriais e Nanotecnologias	10
2.2. Aplicação das Nanotecnologia	12
2.2.1. Fontes de Emissão/Exposição Profissional	13
2.2.2. Natureza Química.....	14
2.3. Vias de Exposição e Efeitos para a Saúde	14
2.4. Procedimentos de Recolha, Monitorização/Controlo e de Avaliação de Risco	16
Capítulo III - Casos de Estudo	25
3. Processos de Soldadura	25
3.1. Arco Elétrico	27
3.2. Caracterização do Processo de Soldadura SER	28
3.2.1. Elérodos Revestidos.....	30
3.2.2. Equipamentos de Soldadura Utilizados	33
3.3. Caracterização do Processo de Soldadura MAG	34
3.3.1. Equipamentos Utilizados.....	36
3.3.2. Gases de Proteção do processo de soldadura MAG	37
3.3.3. Classificação dos modos de transferência.....	39

3.4.	Caracterização do Processo de Soldadura TIG.....	42
3.4.1.	Equipamentos Utilizados.....	45
3.4.2.	Tipo de Eléctrodos não Consumíveis	46
3.4.3.	Produtos Consumíveis	47
3.5.	Emissões de Nanopartículas nos Processos de Soldadura	47
3.5.1.	Fumos Resultantes do Processo de Soldadura MIG/MAG.....	52
3.5.2.	Fumos Resultantes do Processo de Soldadura SER	56
3.5.3.	Fumos Resultantes do Processo de Soldadura TIG.....	57
3.5.4.	Principais conclusões retiradas na emissão de fumos dos processos estudados 57	
	Capítulo IV – Procedimento Experimental	59
4.	Procedimento Experimental	59
4.1.	Equipamentos para recolha, medição e análise de nanopartículas	61
4.1.1.	Equipamento NSAM (<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i>), TSI, Modelo 3550 ..	62
4.1.2.	Equipamento NSA (<i>Nanometer Aerosol Sampler</i>), TSI, Modelo 3089	64
4.1.3.	Equipamento TEM (<i>Transmission Electron Microscope</i>), HITACHI, Modelo H- 8100-II	66
4.2.	Equipamentos e Materiais/Consumíveis utilizados nos Processos de Soldadura	67
4.2.1.	Máquina de Soldar <i>ProMig 501</i> da <i>Kemppi</i>	67
4.2.2.	Tochas de Soldadura	68
4.2.3.	Materiais Utilizados	69
4.3.	Condições Operatórias.....	75
4.3.1.	Processo MAG	75
4.3.2.	Processo SER	78
4.3.3.	Processo TIG.....	81
	Capítulo V – Resultados e Discussão	85
5.	Resultados e Discussão	85
5.1.	Processo de Soldadura MAG - Resultados de NSAM	86
5.1.1.	MAG – Aço ao Carbono	86
5.1.2.	MAG – Aço Inox Austenítico	91
5.1.3.	Discussão dos resultados obtidos no NSAM para soldadura MAG	96
5.2.	Processo de Soldadura SER - Resultados de NSAM.....	99

5.2.1.	Eléctrodo E7018 com 4 mm de espessura	99
5.2.2.	Eléctrodo E7018-1 com 2,5 mm de espessura	100
5.2.3.	Eléctrodo E7018-1 com 3,2 mm de espessura	101
5.2.4.	Eléctrodo E7018-1 com 4 mm de espessura	102
5.2.5.	Eléctrodo E6013 com 2,5 mm de espessura	103
5.2.6.	Eléctrodo E6010 com 3,2 mm de espessura	104
5.3.	Processo de Soldadura TIG - Resultados de NSAM	104
5.3.1.	Material de adição - ER 70S-3	105
5.3.2.	Material de adição - ER 304LSi.....	105
5.3.3.	Sem material de adição para aço ao carbono	106
5.3.4.	Sem material de adição para aço inox austenítico	107
5.4.	Resultados da análise por Microscopia Eletrónica	108
5.4.1.	Resultados da análise química do processo de soldadura MAG	108
5.4.2.	Resultados da análise morfológica do processo de soldadura MAG	110
5.4.3.	Resultados da análise química do processo de soldadura SER	112
5.4.4.	Resultados da análise morfológica do processo de soldadura SER	113
5.4.5.	Resultados da análise química do processo de soldadura TIG.....	113
5.4.6.	Resultados da análise morfológica do processo de soldadura TIG.....	115
Capítulo VI – Avaliação de Riscos		119
6.	Avaliação de Riscos	119
6.1.	Aspetos relevantes a considerar na Avaliação de Riscos	120
6.1.1.	Definições [1].....	120
6.1.2.	Avaliação da Exposição	122
6.2.	Método de Avaliação de Riscos	125
6.2.1.	<i>Control Banding Nanotool</i>	126
6.3.	Resultados da Avaliação de Riscos	130
6.3.1.	MAG – Aço Carbono (para o gás de proteção 100% CO ₂).....	131
6.3.2.	MAG – Aço Inox Austenítico [para o gás de proteção Arcal 12 (95% Ar e 5% CO ₂)]	133
6.3.3.	SER – Aço ao Carbono (Eléctrodo E7018).....	135
6.3.4.	TIG – Aço ao Carbono (com material de adição - ER 70S-3).....	136

6.4. Definição de Boas Práticas para evitar riscos acrescidos sobre a saúde dos soldadores expostos	137
6.4.1. Ventilação dos locais de trabalho e extração localizada/contenção dos locais onde se verifica exposição	138
6.4.2. Utilização dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs)	146
6.4.3. Análise/escolha de materiais/processos/parâmetros que possam conduzir a menores libertações de fumos	147
6.4.4. Considerações Finais	148
CAPÍTULO VII – Conclusões	151
7. Conclusões	151
Referências Bibliográficas	157
Anexos	161
Anexo I – Exemplo da Ferramenta (<i>Control Banding Nanotool</i>) utilizada na Avaliação de Riscos [53].....	161

Índice de Figuras

Figura 1 - Escala dos nanomateriais (nm). Figura adaptada de [22].	11
Figura 2 - Vias de exposição humana às nanopartículas. Figura adaptada de [25].	15
Figura 3 - Efeitos potenciais sobre o organismo [24].	16
Figura 4 - Modelo das diversas regiões do pulmão humano [20].	19
Figura 5 - Curvas de deposição na região traqueobrônquial e alveolar do pulmão [20].	19
Figura 6 - Princípio de funcionamento SER [27].	30
Figura 7 - Equipamento SER [27].	33
Figura 8 - Princípio de funcionamento MAG. Figura adaptada de [29].	35
Figura 9 - Esquema do equipamento básico para o processo de soldadura MAG [26].	37
Figura 10 - Modo de transferência por Curto-Circuito [26].	40
Figura 11 - Gráfico referente à transferência do metal por curto-circuito (outro modo de ilustração do modo de transferência por curto-circuito) [6 e 28].	40
Figura 12 - Modo de transferência globular [26].	41
Figura 13 - Modo de transferência por <i>Spray</i> [32].	42
Figura 14 - Processo de soldadura TIG [10].	43
Figura 15 - Representação esquemática de uma instalação para soldadura TIG com unidade de alta frequência [10].	45
Figura 16 - Representação esquemática de uma instalação de soldadura para o processo TIG (Por Pontos) [27].	46
Figura 17 - Gama de tamanhos que os fumos e poeiras podem, sendo de origem natural ou industrial (a); pulmões (b). Figura adaptada de [28].	52
Figura 18 - (a) Processo MIG/MAG. (b) Processo TIG. Figura adaptada de [37,38].	53
Figura 19 - Fatores responsáveis pela formação de fumos: 1) evaporação na ponta do eletrodo ou da gota; 2) salpicos incandescentes e também de alguma evaporação resultante da explosão do fio. Figura adaptada de [28].	54
Figura 20 - Representação da taxa de formação de fumos, para os diferentes modos de transferência utilizando como gás de proteção a mistura de Ar + 4% de O ₂ em aço carbono [26].	55
Figura 21 - Espaço onde foram realizados os ensaios de soldadura e sistema de extração de fumos.	59
Figura 22 - Mesa de soldadura desenvolvida no DEMI, FCT/ UNL [26].	60
Figura 23 - NSAM, monitor de área de superfície de nanopartículas [42].	62
Figura 24 - Esquema de funcionamento do NSAM [20].	63
Figura 25 - Esquema demonstrativo dos pontos de recolha para os diferentes processos de soldadura.	64
Figura 26 - Amostrador de aerossóis nanométrico (<i>Nanometer Aerosol Sampler Model 3089</i>) [43].	64
Figura 27 - Princípio de funcionamento do NAS [20].	65
Figura 28 - Grelha de cobre no NAS.	66

Figura 29 - Esquema demonstrativo do ponto de recolha das nanopartículas libertadas.....	66
Figura 30 - Microscópio eletrónico de transmissão Hitachi H-8100 II [45].	67
Figura 31 - Máquina de soldar <i>ProMig 501</i> (painel de funções do equipamento/parâmetros de controlo de operação). Imagem adaptada de [46].	68
Figura 32 - Tocha MIG/MAG MMT42 [26].....	69
Figura 33 - Tocha utilizada para soldadura TIG.....	69
Figura 34 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 21 (90% Ar e 10% CO ₂).	87
Figura 35 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 21(90% Ar e 10% CO ₂). 87	
Figura 36 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Atal 5(82% Ar e 18% CO ₂).	88
Figura 37 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Atal 5(82% Ar e 18% CO ₂).....	89
Figura 38 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o 100% CO ₂	90
Figura 39 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção 100% CO ₂	90
Figura 40 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO ₂ e 2% N).	92
Figura 41 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO ₂ e 2% N).....	92
Figura 42 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO ₂).	94
Figura 43 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 121(81% Ar; 18% He e 1% CO ₂).....	94
Figura 44 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 12 (95% Ar e 5% CO ₂).	95
Figura 45 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 12 (95% Ar e 5% CO ₂)..	96
Figura 46 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, com o elétrodo E7018 com 4 mm de espessura.	100
Figura 47 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio com o elétrodo E7018-1 com 2,5 mm de espessura.	101
Figura 48 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, com o elétrodo E7018-1 com 3,2 mm de espessura.	102
Figura 49 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio com o elétrodo E7018-1 com 4 mm de espessura.	103

Figura 50 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio com o elétrodo E6013 com 2,5 mm de espessura.....	104
Figura 51 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.	105
Figura 52 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG com o consumível ER 304LSI em aço inox austenítico. .	106
Figura 53 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG sem material de adição em aço ao carbono.....	107
Figura 54 - valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG sem material de adição em aço inox austenítico.....	108
Figura 55 - Análise EDS de soldadura MAG – aço ao carbono com a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO ₂).	109
Figura 56 - Análise EDS de soldadura MAG – Aço inox austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO ₂ e 2% N).....	110
Figura 57 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG – aço ao carbono com a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO ₂).....	111
Figura 58 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG – aço inox austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO ₂ e 2% N).	111
Figura 59 - Análise EDS, Eléttodos básicos (E7018-1).	112
Figura 60 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura SER com Eléttodos básicos.	113
Figura 61 - Análise EDS TIG com o material de adição - ER 70S-3.	114
Figura 62 - Análise EDS TIG com o material de adição - ER 304LSI.....	115
Figura 63 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.	116
Figura 64 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura TIG com o consumível ER 304LSI em aço inoxidável.	117
Figura 65 - Modelo para utilização na avaliação de exposição. Imagem adaptada de [53].	123
Figura 66 - Posicionamento correto do bocal de sucção durante um processo de soldadura manual [54]......	141
Figura 67 - Posicionamento do bocal de sucção por cima da área de emissão das partículas [54]......	141
Figura 68 - Extração eficaz de fumos de soldadura com posicionamento correto do bocal de sucção durante a soldadura de estruturas de grandes dimensões [54].	142
Figura 69 - <i>Welding workstation</i> ERGO-STW (mesa de trabalho totalmente ventilada) [54]. ..	142
Figura 70 – (a) Braço de extração no interior de um de ventilação flexível ligado a uma única área de trabalho. (b) Braço de extração rotativo suspenso de modo a cobrir uma grande área de uma zona de trabalhos não estacionária [54].	143

Figura 71 - Soldador realizando trabalhos com um suporte com extração dos poluentes. Equipamento fabricado pela Aspirmig, projetado durante o projeto europeu ECONWELD [5,54].	143
Figura 72 - Filtração portátil constituída por uma unidade de ventilação e um bocal de aspiração que permite a remoção de poluentes na fonte [54]......	144
Figura 73 – Filtração mecânica transportável e respetiva unidade de ventilação [54].	144
Figura 74 - Oficina de soldadura equipada com um sistema de extração local [54].	145
Figura 75 - Unidade de filtração ligada a mesa de corte de chapa de aço para o processo de soldadura TIG [54]......	145
Figura 76 - Exemplo de uma tocha de soldadura com sistema de extração de fumos [28].	146
Figura 77 - Características típicas do arco elétrico para diferentes processos de soldadura [10].	153

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Sectores de aplicação das nanotecnologias [24].	12
Tabela 2 - Processos e potenciais fontes de emissão de nanopartículas [24].	13
Tabela 3 - Recomendações preliminares para a recolha e análise de dados [20].	21
Tabela 4 - Recomendações preliminares para relatar os resultados de microscopia eletrónica.	22
Tabela 5 - Recomendações preliminares sobre a informação essencial a fornecer.	23
Tabela 6 - Elementos constituintes dos fumos de soldadura e efeitos na saúde humana [26,34,35].	49
Tabela 7 - Elementos constituintes dos fumos de soldadura e efeitos na saúde humana (continuação) [26,34,35].	50
Tabela 8 - Elementos constituintes dos fumos de soldadura e efeitos na saúde humana (continuação) [26,34,35].	51
Tabela 9 - Composição química das chapas utilizadas.	70
Tabela 10 - Eléctrodo (ER 70S-6) - para soldar aço ao carbono [47].	71
Tabela 11 - Eléctrodo (ER 316 LSI) para soldar o aço inoxidável austenítico [48].	71
Tabela 12 - Gases de protecção utilizados no processo MAG para soldar aço ao carbono.	72
Tabela 13 - Gases de protecção utilizados no processo MAG para soldar aço inoxidável austenítico.	73
Tabela 14 - Composição química do material depositado pelos eléctrodos usados no processo de soldadura ser [48].	74
Tabela 15 - Composição química do material depositado na soldadura de aço ao carbono com o consumível ER 70S-3.	75
Tabela 16 - Parâmetros de soldadura utilizados para o Aço ao Carbono.	77
Tabela 17 - Parâmetros de soldadura utilizados para o Aço Inox Austenítico.	78
Tabela 18 - Parâmetros de soldadura utilizados para o eléctrodo E7018.	79
Tabela 19 - Parâmetros de soldadura utilizados para o eléctrodo E7018-1.	80
Tabela 20 - Parâmetros de soldadura utilizados para o eléctrodo E6013.	81
Tabela 21 - Parâmetros de soldadura utilizados para o processo TIG com aço ao carbono.	82
Tabela 22 - Parâmetros de soldadura utilizados para o processo TIG com aço inox austenítico.	83
Tabela 23 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO ₂).	86
Tabela 24 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Atal 5(82% Ar e 18% CO ₂).	88
Tabela 25 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa 100 % CO ₂ .	90
Tabela 26 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO ₂ e 2% N).	91

Tabela 27 - parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO ₂).	93
Tabela 28 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 12 (95% Ar e 5% CO ₂).	95
Tabela 29 - Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios para o material de base aço ao carbono.	97
Tabela 30 - Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios utilizando o material de base aço inoxidável austenítico.	98
Tabela 31 - Estado da arte para avaliação <i>versus</i> exposição. Tabela adaptada de [51].	124
Tabela 32 - Fases de um processo de gestão de risco profissional [1].	126
Tabela 33 - Matriz de relação entre Severidade e Probabilidade para determinar níveis de risco (NR). Figura adaptada de [53].	130
Tabela 34 - Características base para a realização da avaliação de riscos: MAG – Aço ao Carbono (100% CO ₂).	132
Tabela 35 - Determinação do Nível de Risco – MAG – Aço ao Carbono (100% CO ₂).	133
Tabela 36 - Determinação do Nível de Risco – MAG – Aço Inox Austenítico [Arcal 12 (90% Ar e 10% CO ₂)].	134
Tabela 37 - Determinação do Nível de Risco – SER (elétrodo E7018).	135
Tabela 38 - Determinação do Nível de Risco - TIG – Aço ao Carbono(Consumível – ER70S-3).	136
Tabela 39 – Folha de entrada para a determinação da avaliação de riscos para o processo MAG – Aço ao Carbono para o gás de proteção 100% de CO ₂	161
Tabela 40 – Resultados obtidos da Avaliação de Riscos – MAG – Aço ao Carbono (100% CO ₂).	162
Tabela 41- Lista de opções a ter em consideração das quais se selecionaram as referentes à atividade e consumíveis a serem avaliados.	163

Abreviaturas e Siglas

A	Região Alveolar
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente alterna)
ACGIH	<i>American Conference of Government Industrial Hygienists</i> (Conferência dos Higienistas Governamentais Industriais Americanos)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldadura)
CN	Nanotubos de Carbono
C	Comprimento do Cordão
CC -	Polaridade Direta
CC +	Polaridade Inversa
CAS	<i>Chemical Abstract Service</i>
CEN	Comité Europeu Normalização
CDS/NIOSH	<i>General safe Practices for working with Engineered Nanomaterials in research laboratories, 2012</i>
CB	<i>Control Banding</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DC	Corrente Contínua
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EDS	<i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i> (Espectrometria de dispersão de energia)
EPIs	Equipamentos de Proteção Individual

EN	Norma Europeia
ENMs	Engineered Nanomaterials
ESTESL	Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa
EUA	Estados Unidos da América
ET	Entrega Térmica
FastRoost	Processo de soldadura por curto-circuito
FCT UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa
GTA	<i>Gas Tungsten Arc</i>
GMA	<i>Gas Metal Arc</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
H	<i>Hazard</i>
I	Inertes
ICEM	Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais
I&D	Investigação e Desenvolvimento
ICRP	<i>International Commission of Radiological Protection</i> (Comissão Internacional de Proteção Radiológica)
IPCS	<i>International Programme of Chemical Safety</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
IST	Instituto Superior Técnico
IV	Infra Vermelhos
LT	Local de Trabalho
MAG	<i>Metal Active Gas</i> (Metal gás ativo)
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> (Metal gás inerte)
MMA	<i>Manual Metal Arc</i>
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NM	Nanomateriais
N P	Norma Portuguesa
NP	Nanopartículas

NSAM	<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i> (Monitor de área de superfície de nanopartículas)
NAS	<i>Nanometer Aerosol Sampler</i> (Amostrador de aerossóis nanométricos)
OEL	<i>Occupational Exposure Limits</i> (Limites de Exposição Ocupacional)
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
P	Prudência/Perigo
PME	Pequenas e Médias Empresas
PTFE	Politetrafluoretileno
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>
RTECS	<i>Registry of Toxic Effects of Chemical Substances</i>
SAS	Soldadura por Arco Submerso
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SHST	Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho
SER	Soldadura por Eléttodos Revestidos
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
T	Tempo de Soldadura
TB	Traqueobrônquial
TEM	<i>Transmission Eléctron Microscope</i> (Microscópio eletrónico de transmissão)
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (Tungsténio gás inerte)
TSI	<i>Trust Science Innovation</i>
UE	União Europeia (<i>European Union</i>)
UV	Ultravioleta
USEPA	Agência Federal Americana de Proteção Animal
V	Velocidade de soldadura
VLE	Valor Limite de Exposição

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1. Introdução

Até meados do século XX as condições de trabalho não foram suficientemente levadas em conta, sendo somente importante a produtividade, mesmo que tal implicasse riscos de doença ou até a morte de trabalhadores. Para tal contribuíam dois fatores: uma mentalidade em que o valor da vida humana era pouco mais que desprezível e uma total ausência por parte dos Estados de Leis de proteção do trabalhador.

Apenas a partir da década de 50/60 surgem as primeiras tentativas sérias de integrar os trabalhadores em atividades devidamente adequadas às suas capacidades.

Atualmente, em Portugal, existe legislação que possibilita uma proteção eficaz a quem integra atividades industriais, ou outras, devendo a sua aplicação ser entendida como o melhor meio de beneficiar simultaneamente as Empresas e os Trabalhadores na salvaguarda dos aspetos relacionados com as condições ambientais e de segurança de cada posto de trabalho.

A Higiene e a Segurança são duas atividades que estão intimamente relacionadas, com o objetivo primordial de garantir condições de trabalho capazes de manter qualidade ao nível da saúde e bem-estar dos colaboradores de uma Empresa.

A higiene do trabalho propõe analisar, dum ponto de vista não médico, as doenças profissionais, identificando os fatores que podem afetar o ambiente do trabalho e o trabalhador, visando eliminar ou reduzir os riscos profissionais (condições de trabalho que podem afetar a saúde, segurança e bem estar do trabalhador).

A segurança do trabalho propõe combater, também dum ponto de vista não médico, os acidentes de trabalho, quer eliminando as condições inseguras do ambiente, quer educando os trabalhadores na utilização de medidas preventivas [1].

Apesar de a higiene e segurança do trabalho ser um direito que assiste a todos, nunca é demais reforçar o conceito de prevenção, a sua essência na sociedade, ou seja, este direito à Segurança e Saúde do Trabalho confere, à Avaliação de Risco um lugar central nas abordagens preventivas.

Face ao exposto, e a toda a conjuntura do trabalho atual, marcada pela globalização e forte competitividade dos mercados, os serviços de Segurança, Higiene e Saúde do Trabalho tornam-se um imperativo indispensável à sobrevivência das organizações, independentemente do setor de atividade em que se inserem, e cujo objetivo primordial assenta na prevenção dos riscos profissionais. No entanto, não nos podemos esquecer que “no nosso quotidiano e enquanto indivíduos, todos temos atitudes diferentes perante os riscos que enfrentamos” (WBCSD, 2004).

A permanente evolução do conhecimento científico, apoiada num sistema de divulgação rápido e acessível a todos, leva a que haja uma maior perceção pública para os novos riscos,

particularmente dos profissionais que lidam direta ou indiretamente com as áreas da Segurança e Saúde Ocupacionais.

As novas tecnologias associadas a questões sociais, demográficas e económicas originam mudanças constantes nos ambientes ocupacionais, emergindo assim novos riscos para a segurança e saúde dos trabalhadores. A exposição ocupacional a nanopartículas é um risco simultaneamente novo e com tendência para aumentar, o que o classifica como um risco emergente. As nanopartículas entram no corpo humano por diversas vias, desconhecendo-se ainda a total dimensão dos danos que podem vir a causar em termos de saúde ao trabalhador exposto. Embora a informação sobre a exposição dos trabalhadores, e respetivos efeitos na saúde, seja muito limitada devem ser desde já implementados os princípios básicos de prevenção [2].

O presente trabalho tem como base ensaios experimentais realizados para diferentes processos de soldadura de modo a relacionar os parâmetros de operação dos processos com os seus níveis de emissão. Estes processos geram fumos que contêm nanopartículas. No entanto, as consequências na saúde dos operadores e indivíduos que se encontram expostos às nanopartículas libertadas por estes processos industriais são ainda desconhecidas [3,4].

Uma vez detetadas as condições operacionais mais críticas, definiram-se quais as medidas concretas a tomar para evitar exposição e risco agravado para os trabalhadores expostos.

1.1. Enquadramento

Numa indústria cada vez mais competitiva existe sempre uma constante procura de novas soluções, em que o balanço entre produtividade, qualidade, custos e segurança esteja presente.

O sector metalúrgico representa 8% do volume de negócios total da União Europeia (UE). A soldadura é uma das técnicas mais importantes utilizadas neste sector. Na Europa existem cerca de 730.000 soldadores a tempo inteiro e aproximadamente 5,5 milhões de trabalhos relacionados com a soldadura [5].

A Soldadura pode ser definida, de um modo geral, como a técnica/operação que permite ligar dois ou mais elementos metálicos, quer por aquecimento quer por pressão, ou em simultâneo, com ou sem adição de material complementar (também denominado de material de adição) [6].

O uso dos processos de soldadura está hoje generalizado. É empregue em muitos produtos, em praticamente todo o tipo de indústrias.

A Soldadura tem também um grande impacto sobre a saúde, pois é uma atividade fisicamente muito exigente levando a uma elevada percentagem de baixas médicas (anualmente cerca de 160 horas de trabalho por soldador). Esses elevados custos de baixas

por doença ameaçam a posição financeira das Pequenas e Médias Empresas (PME), colocando em risco a sua competitividade [5].

A atividade de soldadura acarreta diversos riscos, pelo que os profissionais desta atividade devem estar bem cientes da natureza dos seus principais processos, de forma a conseguir avaliá-los corretamente.

Riscos tais como:

- ✓ Choques elétricos: estão relacionados com a utilização do material elétrico envolvido no processo de soldadura;
- ✓ Incêndios e Explosões: poderão ocorrer devido às temperaturas elevadas geradas nos processos de soldadura ou devido ao emprego de materiais potencialmente explosivos, especialmente gases;
- ✓ Queimaduras e exposição a várias gamas de radiação: devem-se às altas temperaturas produzidas pelo equipamento e pelos salpicos de material incandescente. O processo de soldadura pode também produzir a emissão de radiações não ionizantes (em especial ultravioleta (UV) e infravermelho (IV));
- ✓ Exposição/Inalação de gases e fumos: relacionadas com as emanações perigosas de substâncias tóxicas produzidas por certos gases, que, quando inaladas, causam danos aos indivíduos expostos;
- ✓ Ruído: em alguns processos de soldadura, as emissões de ruído ultrapassam os valores-limite recomendados, especialmente na soldadura por arco e por plasma.

É também importante referir que esta operação está abrangida pela Legislação Portuguesa, mais propriamente segundo as alíneas f), g), i) e j), do art.º 79 da Lei n.º 102/2009, de 10 de Setembro (Regulamenta o regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho), e está inserida em atividades que são consideradas de risco elevado, tais como:

- ✓ Atividades de indústria siderúrgica e construção naval;
- ✓ Atividades que envolvam contacto com correntes elétricas de média e alta tensão;
- ✓ Atividades que impliquem a exposição a radiações ionizantes;
- ✓ Atividades que impliquem a exposição a agentes cancerígenos, mutagénicos ou tóxicos para a reprodução [7].

Este trabalho vai focar-se, essencialmente, nos riscos associados aos níveis de emissão resultantes dos processos de soldadura utilizados nos ensaios realizados. Assim como, na caracterização das nanopartículas emitidas.

Os processos de soldadura utilizados como base neste estudo são: soldadura por eletrodos revestidos (SER), soldadura por fio sólido com proteção gasosa ativa (MAG) e o processo de soldadura realizado através de um arco elétrico numa atmosfera de gás inerte (TIG).

A soldadura por fusão é o principal processo de ligação utilizado na indústria [8]. De entre os processos de soldadura por fusão existentes, os mais comuns são os processos de

soldadura por arco elétrico [9], dos quais se destacam o processo de soldadura por elérodos revestidos (SER) e o processo de soldadura por fio sólido com proteção gasosa ativa (MAG).

Tanto o processo de soldadura SER como o processo de soldadura MAG caracterizam-se por serem processos em que a fusão do material de adição e do material base é obtida através do calor desenvolvido por um arco elétrico. Em ambos os processos existe uma proteção gasosa para o banho de soldadura. No processo de soldadura SER esta proteção é obtida pela decomposição do revestimento do eléetrodo, enquanto que, no processo de soldadura MAG, se utiliza uma mistura gasosa. Outra característica que distingue estes dois processos é o material de adição, que no processo de soldadura SER é o próprio eléetrodo que serve de material de adição, passo que, no processo de soldadura MAG, o material de adição é um fio sólido que é alimentado automaticamente.

Relativamente ao processo de soldadura TIG (*Tungesten Inert Gas*) ou GTA (*Gas Tungesten Arc*), trata-se de um processo de soldadura por arco elétrico, só que neste processo em que o arco elétrico é estabelecido através de um eléetrodo não consumível de tungsténio e a peça metálica, no seio de uma atmosfera de proteção de gás inerte (Árgon ou Hélio). Em soldadura TIG a principal função do arco elétrico é fornecer calor para criar o banho de fusão e fundir o material de adição. Tal como nos processos anteriores, se necessário, este é adicionado separadamente através de uma vareta. A adição é realizada através da alimentação de “fio nu”, manual ou mecanicamente, lateralmente ao banho de fusão. Uma segunda função do arco é a limpeza da superfície do banho de fusão e do metal de base adjacente, de óxidos superficiais, não sendo portanto necessária a utilização de fluxo. O gás de proteção deve ser inerte para que não haja contaminação do eléetrodo de tungsténio [10].

1.2. Motivação

Em estudos anteriormente realizados, apenas era possível determinar a massa de nanopartículas, a sua concentração e estabelecer relações para avaliar a sua capacidade de deposição nos pulmões [11] em situações industriais e laboratoriais. No entanto, estudos posteriores [12] têm demonstrado que a concentração e a massa das nanopartículas podem não ter correlação direta com os seus efeitos na saúde. De acordo com estes estudos, a área superficial das nanopartículas é a característica mais relevante no impacto da saúde, na medida em que, é a área de superfície das partículas que vai condicionar onde estas se vão depositar. Neste sentido, as regiões de deposição que mais interesse suscitam são: o nariz (devido à possibilidade de transferência de nanopartículas para o cérebro) e as regiões traqueobrônquial e alveolar [12,13].

As novas tecnologias de análise, agora disponíveis, permitem a obtenção de novos dados, sobre os quais já existem alguns estudos [12] que permitem concluir que existem emissões de partículas de dimensões nanométricas diretamente originadas pelos diferentes processos de soldadura. Estas emissões contêm partículas com capacidade de deposição alveolar

(dimensões inferiores a 100 nm). Este facto evidencia um risco para a saúde dos operadores aquando da execução do processo. No entanto, seria interessante, após constatação destes aspetos, aprofundar o estudo sobre o efeito dos parâmetros de soldadura na concentração das partículas para diferentes processos de soldadura. Assim, será interessante dispor de um elevado nível de recolha de nanopartículas para análise morfológica e química, realização de soldaduras de longa duração (com variação de diferentes parâmetros operacionais), de modo a poder vir a definir um valor (limite) de referência para os valores de área de superfície de partículas, depositadas na zona alveolar. Posteriormente, uma vez detetadas quais as condições de processo mais críticas, será possível definir medidas concretas a tomar para evitar a exposição e o risco agravado para os trabalhadores expostos.

1.3. Objetivos *versus* Metodologias

O presente trabalho surgiu da necessidade de estabelecimento de correlação entre as emissões de nanopartículas libertadas durante diferentes processos de soldadura e os respetivos parâmetros operacionais desses processos. Uma vez detetadas quais as condições de processo mais críticas, será importante definir quais as medidas concretas a tomar para evitar exposição e risco agravado para os trabalhadores expostos, constituindo estes aspeto o corolário desta temática. Este é um tema de grande interesse e aplicação industrial concreta, que implica uma quantificação do risco e definição de boas práticas para evitar riscos agravados para a saúde dos trabalhadores.

Sendo assim, o presente trabalho teve como principais objetivos:

- ✓ Monitorizar as partículas libertadas durante estes processos, nomeadamente nanopartículas;
- ✓ Caracterizar as partículas em função da sua concentração e composição;
- ✓ Correlacionar estas características com as condições operatórias para os processos de soldadura em questão (SER, MAG e TIG);
- ✓ Quantificar o Risco através da utilização de uma ferramenta de avaliação de risco (*Control Banding Nanotool*);
- ✓ Definir boas práticas direcionadas para evitar riscos acrescidos para a saúde dos soldadores expostos (aproximando-as às condições existentes no meio industrial).

Para o cumprimento destes objetivos delinearam-se as seguintes metodologias:

- ✓ Efetuaram-se medições das nanopartículas durante ensaios de soldadura, segundo processos atrás referidos, que tiveram lugar no Laboratório de Soldadura do Departamento de Eng^a Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT da UNL;
- ✓ Recolheram-se as nanopartículas através do seguinte processo:
 - I. Utilizou-se um equipamento *Nano Surface Analyser Monitor* (NSAM), que tem por funcionalidade medir as áreas superficiais depositadas, sendo esta uma

“concentração” expressa em $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ de ar. Este equipamento colocou-se interligado à máscara do soldador dentro e fora da mesma e realizaram-se diferentes medições. O analisador foi ligado a um sistema de aquisição de dados, que apresenta, graficamente, a variação das concentrações ao longo do tempo.

- II. Para cada tipo de material e de processo, realizou-se a colheita das nanopartículas através de um equipamento *Nanoparticles Air Sampler* (NAS), que se destina a recolher nanopartículas para posterior observação microscópica. Estas colheitas foram analisadas num microscópio eletrónico de transmissão (TEM), existente no IST, que permite observar a forma das partículas (geralmente agregados), e, assim, obter uma ideia das dimensões das mesmas, permitindo ainda analisar a sua composição química elementar por *Electron Dispersion Scanning* (EDS).
- ✓ Procedeu-se à quantificação do risco através da utilização de uma ferramenta de avaliação de risco (*Control Banding Nanotool*) tendo por base as fichas de procedimento dos elementos utilizados nos ensaios experimentais;
 - ✓ Após quantificação do risco procurou-se definir boas práticas, direcionadas no sentido de evitar riscos acrescidos na saúde dos soldadores expostos. Estas boas práticas foram de várias ordens: ventilação dos locais de trabalho e extração localizada, utilização dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), contenção dos locais onde se verifica exposição e análise/escolha de materiais/processos/parâmetros que possam conduzir a menores libertações de fumos.

1.4. Estrutura da Dissertação

Este trabalho encontra-se organizado em sete capítulos: na Introdução é apresentado o enquadramento do tema, motivação, objetivos e estrutura da dissertação. No segundo e terceiro capítulo introduzem-se os assuntos em estudo (através da determinação do estado-da-arte) e as variáveis em análise. Assim, no segundo capítulo são desenvolvidos conceitos, perspetivas e teorias ligadas às nanopartículas (NP), a sua evolução, sobre os aspetos que contribuíram para o crescimento e aperfeiçoamento dos conceitos sobre este tema. No terceiro capítulo “Casos de Estudo” caracterizam-se os processos de soldadura em estudo e os parâmetros operatórios e efetua-se uma análise dos trabalhos realizados e técnicas utilizadas noutros estudos para a avaliação de emissões de nanopartículas.

No quarto e quinto capítulo apresenta-se: a parte experimental, o tratamento e discussão de resultados (em que se descrevem os parâmetros e as condições de soldadura adotadas), a metodologia de recolha de fumos, e as análises efetuadas. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos sob a forma de gráficos e tabelas, efetuando-se uma análise e discussão dos mesmos, relacionando-os com os parâmetros operatórios usados.

No sexto capítulo efetua-se a “Avaliação do Risco” destes processos aproximando-a às condições existentes no meio industrial, e abordando-se o estado-da-arte relativo às Boas Práticas e métodos de avaliação de risco. Também se pretende quantificar o risco e implementar medidas adequadas de modo a poder minimizá-lo, reforçando-se o papel da proteção coletiva complementada pela utilização pontual de medidas de proteção individual e procedimentos organizacionais.

Por último, este trabalho encerra-se com o sétimo capítulo no qual se apresentam as principais conclusões, onde são sintetizadas as considerações fulcrais obtidas com este trabalho e se apresenta uma perspetiva de futuros desenvolvimentos que se considerem importantes, de modo a aprofundar o conhecimento sobre o assunto em estudo.

CAPITULO II – NANOPARTÍCULAS E NANOTECNOLOGIA

2. Nanopartículas e Nanotecnologia

Antes de procurar relacionar as emissões de nanopartículas com os casos de estudo em questão considerou-se importante introduzir alguns conceitos sobre as mesmas, através de uma breve abordagem introdutória neste capítulo.

Refere-se, assim, o aparecimento do conceito, as suas aplicações, a sua interação com a saúde humana, entre outros aspetos e temáticas consideradas relevantes para este trabalho.

O conceito de nanotecnologia foi atribuído a Richard Feynman, que apresentou um famoso discurso em 1959 intitulado “*There’s plenty room at the bottom*”, em que demonstra a importância da visão na realização de qualquer tarefa [14]. É um texto premonitório - a cristalização de que tudo é possível e que o Homem realizará todos os seus sonhos e a tecnologia apenas lhe dá a oportunidade de os materializar. A ideia visionária lança a semente para um novo tilintar de ideias e associações que, no momento certo, originam marcos de descoberta. A tecnologia de nanopartículas está próxima do sonho alquímico - transformar metais em ouro e permitir mudar as propriedades dos materiais, pela organização nano, ao nível quase atómico [15].

Neste início de século colhemos os frutos de um passado marcado por inúmeras descobertas e criações. A emergência de novas formas de organização do trabalho e a procura de novas fibras e materiais são uma constante. Os cientistas e académicos não podem esquecer os valores éticos; e a indústria deve seguir boas práticas rigorosas para lidar com este futuro promissor apesar de este ser ainda confuso e desconhecido [15].

Face às abordagens já estabelecidas, e existentes nos domínios da investigação, educação, propriedade industrial e regulamentação, a Nanotecnologia integra aspetos fortemente inovadores em diferentes áreas. Através de novos produtos, serviços e métodos de produção que determinarão, num futuro próximo, o desenvolvimento e a procura de novos empregos assentes em competências inovadoras. Um objetivo específico das ações da Comissão Europeia no domínio das Nanotecnologias é melhorar a competitividade da indústria europeia, através de programas de incentivo, para a participação da Indústria e das pequenas e médias empresas nos projetos de Investigação e Desenvolvimento (I&D) em colaboração na área das Nanotecnologias [16-17].

A nanotecnologia apresenta a possibilidade de revolucionar muitos aspetos das nossas vidas.

Contudo, a atual compreensão dos aspetos ocupacional, de saúde e segurança dos *Engineered Nanomaterials* (ENMs) ainda está em fase de formação/desenvolvimento. Assim,

este constitui um enorme e premente desafio, assistindo-se atualmente ao emergir dum grande esforço de investigação, sendo o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) dos Estados Unidos da América (EUA) uma referência, que tem vindo a trabalhar no sentido de se obterem as respostas que são críticas para a manutenção da competitividade no crescimento e na dinâmica das nanotecnologias [17-18].

2.1. Definições - Nano-Objetos; Nanomateriais e Nanotecnologias

Nano é um prefixo derivado da palavra grega para “anão”. De acordo com a norma ISO/TS:2008 [19], é definido como nano-objeto um material de uma, duas, ou três dimensões externas com uma gama de tamanho de, aproximadamente, 1 a 100 nm (nanómetros - em que um nanómetro equivale a 10^{-9} do metro, ou seja a milionésima parte do metro).

A nanoescala (Figura 1) refere-se à matéria que ocupa um espaço igual a dez biliões do metro. Um glóbulo vermelho tem aproximadamente 7000 nanómetros (nm) em diâmetro e um cabelo humano 50 a 80 000 nm. Um nm é equivalente ao diâmetro de 3 a 4 átomos [15].

Existem três categorias de nano-objetos: nanotubos, nanofibras e nanopartículas. As nanopartículas e as partículas ultrafinas são partículas tridimensionais com diâmetro nominal inferior a 100 nm. Sendo as duas terminologias consideradas equivalentes, o termo nanopartícula é aplicado à partícula produzida intencionalmente e destinada a uso industrial, enquanto que o termo “partículas ultrafinas” se aplica às partículas que resultam de um processo de produção aparecendo como um subproduto ou resíduo. Muitos processos industriais produzem partículas que possuem dimensões de uma nanopartícula, mas, efetivamente trata-se de partículas ultrafinas [12,16,20].

As nanopartículas podem apresentar-se em diversas formas, podendo ser utilizadas como tal ou para produzir novos materiais, denominados nanomateriais. Os nanomateriais são materiais constituídos, total ou parcialmente, por nano-objetos que lhes conferem propriedades melhoradas e específicas da dimensão nanométrica [22].

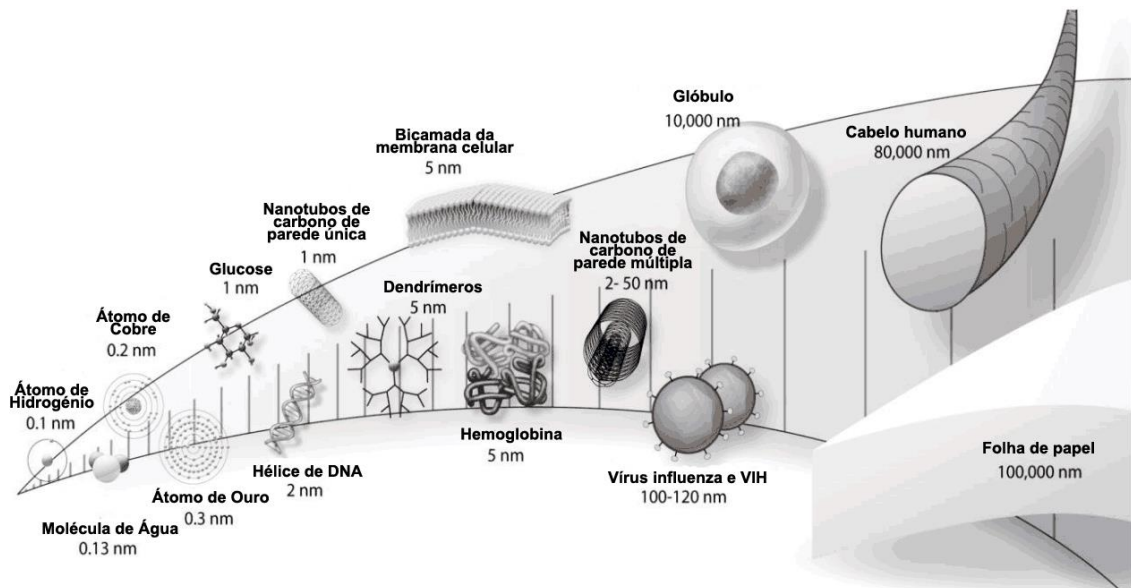


Figura 1 - Escala dos nanomateriais (nm). Figura adaptada de [22].

O termo “nanotecnologia” refere-se à utilização de tecnologias que envolvem a criação e manipulação de materiais à escala atômica e molecular, para o desenvolvimento de novos materiais e processos de tamanho nanométrico de modo a explorar novas características muitas vezes mais eficientes.

Na área da nanotecnologia, podem definir-se três vetores principais:

- Nanoelectrónica;
- Nanobiotecnologia;
- Nanomateriais.

No desenvolvimento da nanotecnologia, podem ser seguidas duas estratégias: *top-down* e *bottom-up*. A estratégia *top-down* envolve a ultraminiaturização a partir de materiais de maiores dimensões ao passo que a estratégia *bottom-up* envolve a aglomeração de unidades mais pequenas (átomos e moléculas) para a obtenção de uma estrutura maior [16,20,21]. A nanotecnologia é um termo abrangente que inclui as nanociências, engenharias e tecnologias.

As nanotecnologias têm aplicações em muitas áreas, de modo que se prevê que, até 2020, aproximadamente, 20% de todos os produtos fabricados no mundo usarão nanotecnologias.

Estamos perante uma tecnologia emergente em que os riscos associados ao fabrico e à utilização de nanomateriais são ainda pouco conhecidos, desconhecendo-se, em particular, o impacto destes novos materiais sobre a saúde e o ambiente. É provável que, em qualquer caso, os trabalhadores estejam entre os primeiros a sofrer exposição [23].

Esta preocupação tem a ver com uma maior área superficial das nanopartículas o que aumenta significativamente a sua probabilidade de penetração nas células, embora, para que tal aconteça, seja necessário que ocorra o contacto dos indivíduos com as partículas [16,20].

No que se refere aos riscos ambientais, associados à utilização de nanotecnologias e nanopartículas, ainda não existem elementos disponíveis que permitam avaliar a extensão total do seu impacto.

Assim, as nanotecnologias devem ser desenvolvidas de uma forma segura e responsável. Os princípios éticos devem ser respeitados e os riscos potenciais para a saúde, a segurança ou o ambiente devem ser estudados cientificamente de uma forma sistemática. É ainda necessário que o desenvolvimento das nanotecnologias seja acompanhado de perto pelo conhecimento do seu impacto na Segurança e na Saúde [16,21,23].

2.2. Aplicação das Nanotecnologia

Como já referido no capítulo anterior, as nanotecnologias permitem inovar, de forma surpreendente, em várias áreas/domínios, tais como, a saúde, a produção de energia não poluente, indústria agroalimentar, comunicação e informação, entre outros.

Na tabela seguinte apresentam-se alguns exemplos de aplicações.

Tabela 1 - Sectores de aplicação das nanotecnologias [24].

Sector de Atividade	Exemplos de aplicações atuais e potenciais
Automóvel, Aeronáutica e Espacial	Materiais reforçados e mais leves; Pinturas exteriores com efeitos de cor mais brilhantes, anticorrosivas, anti riscos e anti sujidade; Detetores de gelo nas asas dos aviões; Aditivos para diesel permitindo uma combustão mais eficiente; Pneumáticos mais duradouros e recicláveis.
Químico e Construção	Pigmentos, pós cerâmicos, inibidores de corrosão; Catalisadores multifuncionais; Vidros anti riscos e auto laváveis; Têxteis e revestimentos antibacterianos e ultra resistentes, isolamentos térmicos.
Energético	Células fotovoltaicas de nova geração; Novos tipos de baterias; Janelas inteligentes; Materiais isolantes mais eficazes; Fotossíntese artificial; Armazenamento de hidrogénio.
Saúde e Cuidados médicos	Aparelhos e meio diagnóstico com nanodeteção; Terapia genética; Análise de ADN, nano-implantes e próteses.
Agroalimentar	Nanocápsulas de ómega 3 (adicionadas ao pão).
Cosmética	Cremes solares transparentes, pastas dentífricas mais abrasivas.

2.2.1. Fontes de Emissão/Exposição Profissional

Podem-se considerar dois tipos de fontes de emissão ou de produção de nanopartículas: as de origem natural (erupções vulcânicas, incêndios florestais, poluição marinha), e as de origem antropogénica não intencional (poluição industrial, emissões de gasóleo, diversos tipos de combustão, poluição no interior dos edifícios) ou intencional (NP manufaturadas na escala industrial ou na escala laboratorial, relacionada com atividades de I&D).

A exposição profissional a nanopartículas pode ser de dois tipos: a exposição relacionada com a produção e utilização de nano-objetos e nanomateriais; e a exposição em processos, tendo como consequência a libertação de nanopartículas. Relativamente à exposição profissional a partículas ultrafinas, esta pode ocorrer em vários cenários e contextos sendo um deles o industrial, como se refere na tabela seguinte.

Tabela 2 - Processos e potenciais fontes de emissão de nanopartículas [24].

Tipo de processos	Exemplos de fontes de emissão
Térmicos	Soldadura de Metais Fundição de metais Corte de metais Tratamentos térmicos de superfícies Aplicação de Resinas e Ceras
Mecânicos	Maquinação Perfuração Polimento
Combustão	Emissões de motores Centrais de incineração, térmicas e crematórios Aquecimento a gás

A natureza das nanopartículas, os métodos de produção, as quantidades utilizadas, a duração, a frequência das tarefas, a capacidade dos produtos permanecerem no ar ou nas superfícies de trabalho e os meios de proteção existentes, constituem os principais parâmetros que influenciam o grau de exposição [4].

2.2.2. Natureza Química

As partículas atmosféricas são emitidas por uma grande variedade de fontes naturais e antropogénicas. A natureza da fonte influencia tanto as propriedades físicas (massa, dimensões, densidade, etc.) como a composição química das partículas.

As partículas podem ser classificadas como primárias ou secundárias, dependendo do seu mecanismo de formação. As partículas primárias são emitidas diretamente para a atmosfera, por sua vez as secundárias são as que se formam na própria atmosfera, geralmente através de reações químicas de gases precursores.

A natureza química das nanopartículas (NP) pode ser mais ou menos complexa: de origem mineral (grafite, hematite, sílica), metálica (SiO_2 , TiO_2) ou orgânica - compostos de carbono - fulerenos, nanotubos de carbono (CN) de parede simples (SWCNT) ou de parede múltipla (MWCNT); polímeros, nylon, dextrano, poliestireno etc. As NP podem constituir misturas mais ou menos complexas relacionadas com o processo de geração (aquecimento de politetrafluoretileno – PTFE ou teflon), fumos de soldadura, ter origem na combustão de um hidrocarboneto ou de um polímero). As NP podem ainda ser compostas de um NM que serve de núcleo, ao qual são adsorvidos poluentes (metais de transição, hidrocarbonetos, ou substâncias biológicas) [15].

2.3. Vias de Exposição e Efeitos para a Saúde

Os riscos de exposição a nano-objetos e a nanomateriais estão ligados às três vias de exposição potencial: inalação, ingestão e contacto dérmico.

Alguns estudos demonstram que as nanopartículas são capazes de penetrar no organismo humano através de diversas vias de entrada, sendo a mais provável de ocorrer, aquando do manuseamento de nanomateriais tanto em processos de uso, de produção ou de fabrico, a via respiratória. Atingindo os pulmões, as nanopartículas poderão rapidamente entrar na corrente sanguínea, afetando possivelmente órgãos vitais do corpo humano [20].

De facto, estes três órgãos têm uma histologia das partes em contacto com o ambiente muito diferente umas das outras. O facto de a pele constituir uma verdadeira barreira à penetração de agentes no organismo faz com que os pulmões e o trato intestinal (em que há transporte ativo e passivo de nutrientes, água, etc.) constituam barreiras mais suscetíveis de serem violadas, sendo os órgãos mais prováveis de servirem de via de entrada de nanopartículas para o organismo.

Neste sentido, torna-se importante referir que a penetração por contacto dérmico dos nano-objetos é uma hipótese, atualmente, ainda em estudo. As propriedades superficiais e de elasticidade dos nano-objetos, bem como o sebo natural da pele, o suor, o tipo de poros, as irritações da pele, são, no entanto, fatores que podem favorecer a sua penetração percutânea [15,16].

Para compreender o potencial risco da nanotecnologia (nanomateriais) é essencial considerar as defesas e barreiras que o corpo humano utiliza em caso de ameaça e as propriedades que as nanopartículas têm para as ultrapassar. Essas barreiras e defesas são as mesmas, quer para microrganismos, quer para partículas, que entrando no organismo (após superarem essas defesas e barreiras) produzem efeitos tóxicos [20]. Assim, existem informações relativas à exposição a quatro elementos que poderão ser úteis na compreensão do potencial risco para a saúde. São eles [21]:

- Quartzo;
- Amianto;
- Poluição do ar;
- Aplicações médicas com nanopartículas (fármacos).

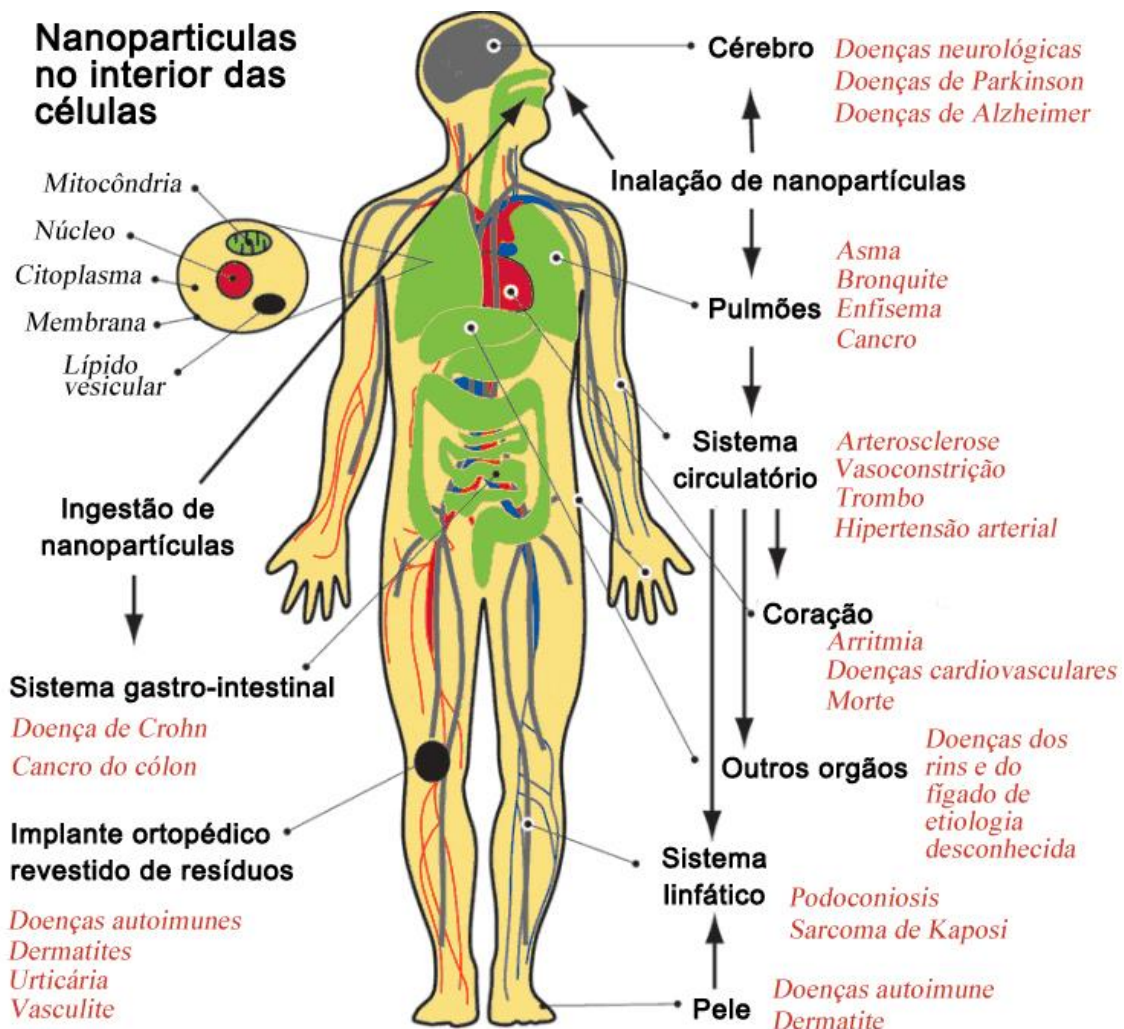


Figura 2 - Vias de exposição humana às nanopartículas. Figura adaptada de [25].

Os conhecimentos atuais dos riscos toxicológicos e efeitos na saúde provêm de estudos, geralmente de alcance limitado, uma vez que são realizados em células ou animais e consequentemente de difícil extrapolação para o Homem. No entanto, já se encontra demonstrado [24] que as partículas ultrafinas, relacionadas com a poluição atmosférica, emitidas por unidades industriais e motores diesel, apresentam características tóxicas suscetíveis de provocar efeitos nefastos na saúde humana, tais como, patologias respiratórias (asma, bronquite, rinite) e cardiovasculares. A translocação de nanopartículas no organismo humano poderá desempenhar um papel importante no desenvolvimento de determinadas patologias cardiovasculares, respiratórias e do sistema nervoso central, como se encontra expresso na figura seguinte [24].

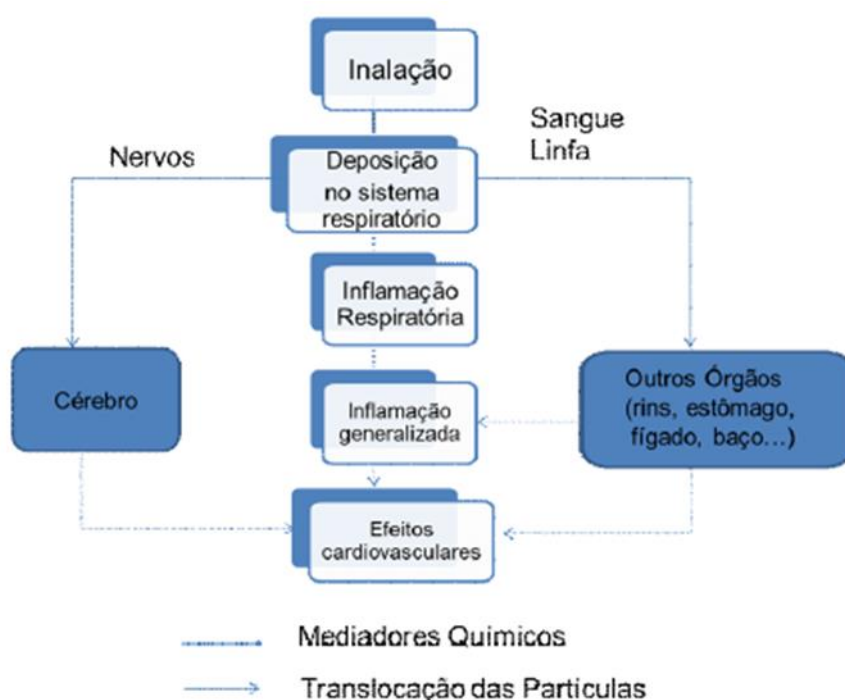


Figura 3 - Efeitos potenciais sobre o organismo [24].

É importante realçar que a toxicidade de uma partícula corresponde às suas características e propriedades físico-químicas, ao passo que o risco de exposição está sempre relacionado com a concentração inalada que irá atingir o órgão.

2.4. Procedimentos de Recolha, Monitorização/Controlo e de Avaliação de Risco

O principal objetivo para a Indústria na área das nanotecnologias deve ser, sempre, a minimização do risco e a prevenção de acidentes e incidentes, em primeiro lugar; bem como, a

realização de medições da exposição dos trabalhadores e, a realização de testes toxicológicos que devem estar a par dos desenvolvimentos que ocorram nesta área.

Uma avaliação completa dos riscos inclui a avaliação da exposição (isto é, a concentração de uma substância no meio e a duração do contacto), a dose (a quantidade de uma substância), o perigo (o potencial para causar danos) e o conseqüente risco (a probabilidade da ocorrência de danos em função do perigo e da dose de uma substância, assim como a exposição a essa mesma substância).

Como já referido, os métodos de amostragem tradicionais para recolha de nanopartículas têm-se mostrado insuficientes. Em estudos recentes [24] foram aplicadas metodologias como a colocação de amostradores estáticos nas áreas de trabalho, a utilização de bombas de amostragem pessoal, com filtros colocados na zona de respiração do operador ou a colocação de equipamentos de leitura em tempo real (que podem ser estáticos ou pessoais). Com estes métodos, os parâmetros que podem ser determinados são: o tamanho, a massa, a concentração e a composição química das nanopartículas. Nas metodologias aplicadas em estudos já realizados [24] não foi possível obter o parâmetro da área de superfície de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar, que é o parâmetro mais relevante para avaliação da exposição a nanopartículas.

Independentemente do tipo de exposição profissional às nanopartículas, a metodologia de recolha (quer on-line, quer remota) deve ter em consideração o campo gravítico que permite a recolha de (macro) partículas com uma massa mensurável, (por exemplo, utilizando uma balança analítica), que não é suficientemente forte para permitir a captação de nanopartículas com massa e dimensões extraordinariamente reduzidas. Contudo, outros campos eletromagnéticos mais fortes, como é o caso do campo electroestático, já o permitem fazer.

Assim, os equipamentos atualmente utilizados para recolha de nanopartículas utilizam um campo electroestático, que é o meio de “precipitação” dessas mesmas nanopartículas, estimando-se a deposição das mesmas em regiões específicas do aparelho respiratório humano.

Foi definida uma representação das várias regiões do aparelho respiratório pela *International Commission of Radiological Protection* (ICRP) e pela Agência Federal Americana de Proteção Ambiental (USEPA), apresentada na Figura 4. Estas são as regiões onde é possível haver deposição de nanopartículas. Foi também desenvolvido pelo ICRP um modelo de deposição de partículas no pulmão humano para aerossóis. Para a construção deste modelo é necessário considerar vários parâmetros, como sejam a taxa de respiração, o volume do pulmão, o nível de atividade e o tipo de respiração (pelo nariz ou pela boca), entre outras características do sistema respiratório. É possível obter curvas de deposição, tanto para a deposição traqueobrônquial como alveolar, dependente dos parâmetros já referidos. Sendo que as aplicações de higiene industrial são as que mais interesse suscitam, foram desenvolvidos, pela Conferência dos Higienistas Oficiais Americanos (ACGIH), parâmetros

para um trabalhador de referência de modo a ser possível obterem-se essas curvas de deposição:

a) Parâmetros fisiológicos:

- Tipo de trabalhador: homem adulto;
- Capacidade residual funcional: 2200 cm^3 ;
- Espaço morto extratorácico: 50 cm^3 ;
- Espaço morto bronquial: 49 cm^3 ;
- Espaço morto bronquiolar: 47 cm^3 ;
- Altura: 175 cm;
- Diâmetro da traqueia: 1,65 cm;
- Diâmetro do brônquio: 0,165 cm.

b) Parâmetros relacionados com a atividade:

- Nível de atividade: exercício leve;
- Tipo de atividade: respiração apenas pelo nariz;
- Taxa de ventilação: $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Frequência de respiração: 15,0 inalações/minuto;
- Volume de inalação: 1450 cm^3 ;
- Fração inalada através do nariz: 1,0;

c) Parâmetros do aerossol:

- Diâmetro médio aerodinâmico: $0,001 \mu\text{m} - 0,5 \mu\text{m}$;
- Desvio padrão geométrico: 1,0;
- Densidade: $1,0 \text{ g/cm}^3$;
- Fator de forma: 1,0.

Na Figura 5 encontram-se representadas as curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão baseadas nestes parâmetros e no modelo ICRP. Na curva de deposição traqueobrônquial representa-se a fração de aerossol que se vai depositar na região traqueobrônquial do pulmão, e, por sua vez na curva de deposição alveolar encontra-se representada a fração de aerossol que se deposita na região alveolar do pulmão. Em relação às nanopartículas, sabe-se que os efeitos na saúde vão ocorrer nas regiões mais

profundas do aparelho respiratório [20]. Deste modo, a fração respirável do aerossol na região alveolar é a medida de maior relevância, dadas as pequeníssimas dimensões das nanopartículas [20].

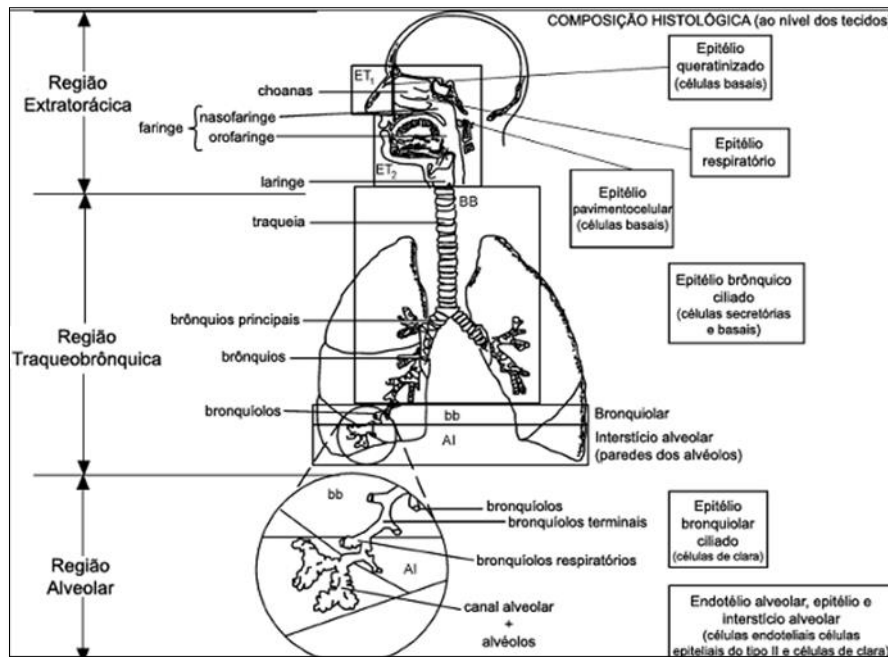


Figura 4 - Modelo das diversas regiões do pulmão humano [20].

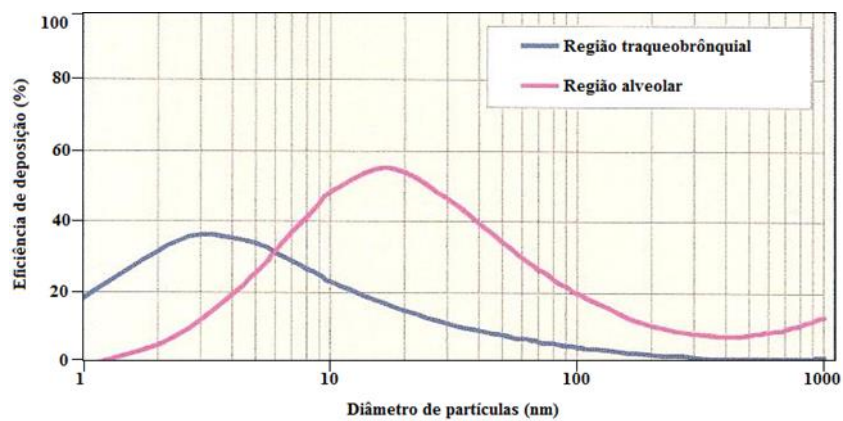


Figura 5 - Curvas de deposição na região traqueobrônquica e alveolar do pulmão [20].

Estas curvas podem ser obtidas através de uma parametrização para o modelo de deposição de partículas no pulmão humano do ICRP. Para cada região pulmonar foram obtidas equações que dão a eficiência de deposição como um rácio da concentração total de partículas suspensas.

A eficiência de deposição de partículas na região do nariz (cabeça) de acordo com o modelo criado pelo ICRP, em que “d” representa o diâmetro da partícula em μm e “I” representa a fração de partículas inaláveis, é dada pela equação seguinte:

$$D_{HA} = I(d) \left(\frac{1}{1 + 934d^{1.183}} + \frac{1}{1 + 934d^{1.183}} \right) \quad (1)$$

A fração de partículas suspensas que são inaladas é dada pela seguinte equação:

$$I(d) = 1 - 0,5 \left(1 - \frac{1}{1 + 0,00076d^{2.86}} \right) \quad (2)$$

A eficiência de deposição na região traqueobrônquial é dada pela seguinte equação:

$$D_{TB} = 0, \frac{0,0352}{d} \exp(-0,0243 \ln d + 340^2) + 63,9 \exp(-0,819(\ln d - 161)^2) \quad (3)$$

A eficiência de deposição na região alveolar resulta da seguinte equação:

$$D_a = \frac{0,0155}{d} (\exp(-0,416(\ln d + 284)^2) + 19,11 \exp(-0,482(\ln d - 1,362)^2)) \quad (4)$$

A eficiência total de deposição das partículas em todas as regiões resulta apenas da soma das eficiências de cada região. A capacidade de deposição em cada região do sistema respiratório consiste em dois modelos, um que corresponde à parte depositada por difusão e outro que corresponde à parte depositada aerodinamicamente. Estes dois modelos correspondem aos primeiros e segundos termos, respetivamente, das equações 1, 3 e 4 [20].

Devido aos avanços recentes, nas estratégias de monitorização de emissões para objetos nano fabricados, foram identificados os parâmetros e metodologias recomendados para caracterizar emissões de nanopartículas. Estes parâmetros têm por base: recomendações preliminares para a recolha e análise de dados, recomendações referentes à recolha e análise de nanopartículas relativas à microscopia eletrónica e, por último, informações essenciais para caracterizar a tarefa para a qual a emissão de nanopartículas vai ser medida [3,21]. De notar

que estas recomendações também poderão ser aplicadas para a monitorização de partículas ultrafinas.

Nas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, constam algumas das recomendações que se deverão ter em conta aquando da monitorização das nanopartículas (temática aprofundada no capítulo IV):

Tabela 3 - Recomendações preliminares para a recolha e análise de dados [20].

Tema	Recomendações
Conjunto de dados mínimos	Concentração com um valor estatisticamente representativo e distribuição de tamanho de partículas, ou concentração de partículas com informações sobre a área de superfície ou concentração do número de partículas por pelo menos dois intervalos de tamanho (<100 e >100 nm).
Amostra	Medição em tempo real baseada em tarefas, registo de valores máximos e registo do tempo por tarefa. Medições em tempo real com cálculo da média ao longo de um turno.
Diferenciação da envolvente	A abordagem para a distinção de nanopartículas em suspensão de segundo plano devem ser claramente descritas e documentadas. Descrever a presença de outras fontes de nanopartículas. Contrastar as distribuições de tamanho estatisticamente representativos devido às emissões de fundo de outros processos.
Processamento e análise de dados	Verificar se os dados têm uma distribuição log-normal. Verificar a auto correlação e estacionaridade (parcial) (por exemplo modelo autorregressivo integrado de média móvel). Calcular média aritmética ou média geométrica, desvio padrão geométrico e outras estatísticas de resumo.

Tabela 4 - Recomendações preliminares para relatar os resultados de microscopia eletrónica.

Tema	Recomendações
Equipamentos de recolha	Relatar uso de instrumentos especializados como precipitadores electroestáticos ou térmicos ou (de grelhas TEM anexado a) filtros. Referir a uniformidade de deposição.
Substrato de recolha	Especificar filtro (revestimento) e tamanho da grelha TEM.
Seleção do filtro/rede para análise e ampliação	Relatar localização e método de seleção. Relatar níveis de ampliação diferentes, para fornecer informações sobre o carregamento, a uniformidade, a representatividade das imagens, etc. Relatar número de campos, número de partículas por campo, número mínimo de partículas contadas por secção, a seleção de campos (aleatório). Relatar categorias de morfologia (livre, aglomerados e as categorias de formas).
Controlo de qualidade para grelhas TEM	Analisar grelhas de fundo, como referência. Discutir questões de controlo de qualidade.
Outros	Analisar as amostras por energia dispersiva de raios X. Se possível, reconstruir a distribuição de tamanho a partir das imagens TEM para validar os instrumentos de análise em tempo real.

Tabela 5 - Recomendações preliminares sobre a informação essencial a fornecer.

A entidade que recolhe as amostras.

O edifício em que as amostras forem recolhidas.

A localização (dentro do edifício) em que as amostras são recolhidas.

O trabalhador que está a operar o equipamento ou que está presente durante a medição.

Os equipamentos de amostragem e posicionamento.

Uma descrição adequada do processo e das instalações.

A atividade que é realizada durante a medição (com referencia para possíveis alterações nas emissões devido a outros fatores).

Referir equipamentos para redução da exposição dos operadores por exemplo, escape de ventilação, equipamentos de proteção pessoal e outras medidas de controlo que estão em vigor durante a medição.

As condições climáticas durante a medição, por exemplo, temperatura e humidade relativa.

O produto (com ingrediente ativo nanométrico) que é utilizado durante a atividade.

Os resultados da medição que são derivados a partir do dispositivo de medição.

No presente trabalho irá ser aprofundada, nos capítulos seguintes, esta temática direcionada para os casos de estudo em questão, delineando também procedimentos de controlo de exposição, bem como os meios de equipamento para monitorização das nanopartículas mais precisamente as NP presentes nos fumos de soldadura.

CAPÍTULO III - CASOS DE ESTUDO

3. Processos de Soldadura

Neste capítulo efetua-se uma revisão do estado-da-arte na área de investigação em foco. Desta maneira, para uma melhor compreensão dos fatores passíveis de gerar emissões de nanopartículas nos diferentes processos de soldadura, é fundamental a compreensão dos diferentes processos e dos fenómenos que os caracterizam, bem como dos parâmetros inerentes a cada processo em estudo e, conseqüentemente, os efeitos/influência dos mesmos. É também importante avaliar os estudos já existentes referentes às emissões de nanopartículas em soldadura, de modo a enquadrar o presente estudo e avaliar as melhores técnicas a utilizar. Devido à existência de várias técnicas e metodologias para a avaliação de emissões de nanopartículas, é indispensável efetuar uma revisão das mesmas de modo a adotar a metodologia mais correta e, posteriormente tentar implementar melhorias nos processos, bem como medidas preventivas, no sentido de minimizar as emissões.

Até ao século XIX, o único processo de soldadura existente era o utilizado pelos ferreiros, o qual concentrava calor na zona que se queria ligar provocando a sua fusão ou deformação. A soldadura por fusão só se tornou uma realidade após a invenção do arco elétrico. Na atualidade, a soldadura por fusão é uma tecnologia na qual se utilizam fontes de calor capazes de elevar a temperatura do metal localmente, a um valor adequado à soldadura. É um método de ligação de metais de elevada eficiência, económico e flexível, que permite novas possibilidades na utilização de materiais [6,8].

Desde a invenção do arco elétrico, a soldadura sofreu uma grande evolução. Esta começou pela utilização do calor gerado por um arco estabelecido entre um elétrodo de carvão e a peça. Alguns anos mais tarde o elétrodo de carvão foi substituído por um fio metálico e o processo de aquecimento passou a ser acompanhado da deposição da peça de metal fundido proveniente do fio [6].

A experiência adquirida com os processos de soldadura utilizando o elétrodo de carvão e o “elétrodo nu” indicou que a utilização de arcos elétricos de elevado comprimento originava a fragilização do metal fundido. Na altura pensou-se que este facto seria resultado da reação do metal em fusão com o oxigénio e o azoto da atmosfera. No entanto, a razão para o surgimento dos elérodos com revestimento está relacionada com fatores de ordem elétrica e teve como objetivo melhorar o rendimento do processo. Uma vantagem adicional, que só se veio a perceber mais tarde, é que estes revestimentos permitem uma proteção contra a contaminação atmosférica. Estes elérodos foram utilizados até aos anos 30. Nos anos 30, o conceito de arco elétrico estava bem estabelecido, tendo surgido assim o conceito de “soldadura por elétrodo revestido” para distinguir este processo do anterior (“elétrodo nu” – sem revestimento). De notar também que, até meados dos anos 30, a soldadura era realizada manualmente, utilizando um elétrodo colocado num alicate que o soldador manuseava. A etapa seguinte foi a automatização do processo, através da utilização de um alimentador automático. Resultando

assim duas vantagens: a primeira derivada do facto do processo poder ser contínuo e a segunda do facto de ser possível a utilização de fio consumível de maior diâmetro, permitindo a utilização de correntes de soldadura mais elevadas e conseqüentemente velocidades de soldadura superiores. Foram então desenvolvidos vários métodos de proteção do arco elétrico, constituindo o mais importante na alimentação de um fluxo através de um tubo posicionado à frente do fio consumível. O arco trabalha satisfatoriamente sob a camada de fluxo. Denominando-se assim este processo de “soldadura por arco submerso”.

Também nos anos 30 foram iniciadas experiências no sentido de proteger o arco elétrico da contaminação atmosférica utilizando um gás inerte. O primeiro processo de soldadura com proteção gasosa utilizava um eletrodo não consumível de tungsténio e uma proteção de gás inerte. Este processo é conhecido como o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTA (*Gas Tungsten Arc*). Uns anos mais tarde foi desenvolvido um novo processo de soldadura com proteção gasosa, no qual o eletrodo de tungsténio foi substituído por um eletrodo de alimentação contínua, em que se utilizava uma proteção gasosa de argón ou hélio para a soldadura de alumínio e outras ligas não ferrosas. Trata-se do processo MIG (*Metal Inert Gas*) ou GMA (*Gas Metal Arc*). A utilização deste processo no aço só ocorreu, no entanto, aquando do desenvolvimento dos fios de eletrodo especiais com baixo teor em carbono e adições de elementos desintoxicantes, para evitar a ocorrência de porosidade na soldadura. O desenvolvimento que se seguiu consistiu na utilização de um gás mais corrente que o argón e o hélio. A escolha incidiu sobre o dióxido de carbono, mas existiam, à partida, dificuldades que necessitavam de ser ultrapassadas. Em primeiro lugar, a transferência do metal no fio eletrodo para o banho de fusão através do arco era instável, e, em segundo lugar, o cordão de soldadura apresentava porosidade resultante da reação do carbono com o oxigénio dissociado no banho de fusão.

Estes problemas foram largamente ultrapassados com a descoberta da transferência por curto-circuito, que consiste na utilização de um arco curto com o eletrodo consumível, o qual deposita o material fundido através de curtos-circuitos, durante os quais o arco se extingue. Para se conseguir este tipo de transferência foi necessário um desenvolvimento significativo das máquinas de soldar. Sendo assim, as máquinas de soldadura vieram a evoluir, ainda por muitos anos, com o objetivo de melhorar as características do processo. Mais recentemente, com a introdução da eletrónica e dos microprocessadores nos equipamentos, é possível a utilização de vários modos de transferência. A solução para o problema da porosidade foi a utilização de fios consumíveis com adições significativas de silício, manganês e de outros desoxidantes como o alumínio, o titânio e o zircónio.

Com a utilização do dióxido de carbono, como gás de proteção, tornou-se usual a soldadura de CO₂ e a designação MAG (*Metal Active Gas*) como modificação do termo MIG. Enquanto se desenvolvia a soldadura de CO₂, ocorria, paralelamente, a evolução da soldadura MIG para os metais não ferrosos com a proteção de argón. Os produtores de gás foram encorajados a produzir argón nas fábricas de oxigénio o que resultou num significativo

desenvolvimento da disponibilidade deste gás. Atualmente o argon é utilizado com adição de dióxido de carbono, ou oxigênio, em determinadas percentagens para soldar diferentes tipos de aço. A adição de argon ou hélio na proteção origina um arco suave e reduz os salpicos, aspetos, estes que são particularmente importantes em soldadura robotizada [6,8].

Em suma, existem, atualmente, cerca de quarenta processos de soldadura dos quais os mais importantes são:

- ✓ Soldadura por arco elétrico;
- ✓ Soldadura por resistência;
- ✓ Soldadura a gás.

Os processos de soldadura, analisados neste trabalho, utilizam soldadura por arco elétrico.

3.1. Arco Elétrico

Uma grande diversidade de processos de soldadura por fusão, com larga aplicação industrial, utiliza como fonte de calor o arco elétrico gerado pela passagem da corrente elétrica através de um condutor gasoso no qual se transforma energia elétrica em energia calorífica [8].

Através de uma descarga elétrica estabelece-se um arco elétrico que é mantido por um condutor gasoso. Os eléctrodos, através dos quais é estabelecido o circuito elétrico, são em carvão ou metal. O eléctrodo negativo, a partir do qual são emitidos eletrões que passam através do gás, é designado por cátodo e o eléctrodo positivo por ânodo. O deslocamento dos eletrões do cátodo para o ânodo é o resultado da diferença de potencial [8,26].

No arco elétrico designam-se as diferentes zonas por:

- ✓ Zona de queda de tensão catódica, junto ao cátodo;
- ✓ Zona de queda de tensão anódica, junto ao ânodo;
- ✓ Coluna de arco ou plasma de arco, zona central do arco.

As partículas, num arco, elétrico, possuem movimentos distintos: os eletrões partem do cátodo e vão bombardear o ânodo, os iões positivos movem-se na direção do cátodo e os iões negativos, como os de oxigênio, movimentam-se na direção do ânodo.

A coluna de arco é eletricamente neutra, pois a carga dos eletrões e iões positivos, por unidade de volume, é aproximadamente igual por os eletrões se dirigirem para o ânodo enquanto os iões positivos se dirigem para o cátodo [6,10].

Na queda de tensão catódica identificam-se os seguintes mecanismos:

1. Emissão térmica

2. Emissão plasmogénica

3. Emissão de campo

A emissão térmica é caracterizada pela ocorrência de uma mancha catódica mal definida e por uma densidade de corrente baixa que ocorre nos elétrodos não consumíveis de tungsténio.

O segundo mecanismo é associado a valores de densidade de corrente de 104 a 107 A/cm² e é caracterizada por uma mancha catódica estacionária e uma contração marcada na zona da coluna de arco imediatamente adjacente ao cátodo. Este mecanismo ocorre em arcos de baixa corrente e elevada pressão como no processo de soldadura por plasma.

A emissão de campo indica que a mancha catódica é bem definida, mas não estacionária, movendo-se com velocidades da ordem de 104 cm/s. A densidade de corrente varia entre os 105 e 108 A/cm². Este tipo de mecanismo predomina em soldadura com elétrodos consumíveis [6].

Nos processos de soldadura por fusão utilizam-se dois tipos de corrente: alterna e contínua. A utilização de corrente contínua em relação à corrente alterna tem algumas vantagens como: a ocorrência de um arco mais estável devido à ausência do problema do reescorvamento do arco todos os meios ciclos, uma vez que a polaridade é constante; uma transferência de metal mais fácil e regular através do arco. Por outro lado, a corrente alterna evita problemas de sopro magnético e permite a utilização de equipamentos mais baratos.

A soldadura com polaridade inversa é utilizada, por exemplo, no processo MIG/MAG e é caracterizada, em relação à polaridade direta, por permitir uma transferência de metal através do arco mais uniforme, de maior frequência e melhor dirigida; originar um efeito de limpeza da camada superficial de óxidos da peça devido à mesa funcionar como cátodo e originar uma densidade de energia mais reduzida [6,10].

3.2. Caracterização do Processo de Soldadura SER

A soldadura por elétrodos revestidos (SER) cuja designação anglo-saxónica é “*Shielded Metal Arc Welding*” (SMAW), foi, até há alguns anos o processo de soldadura mais utilizado, tendo sido responsável por uma verdadeira revolução da construção metálica na primeira metade do século XX. Hoje em dia, embora ainda com um vasto campo de aplicação, a sua utilização nos países mais industrializados tem vindo a decrescer, não sendo já o processo de soldadura mais utilizado, e tendo vindo a ser progressivamente substituído por processos de maior produtividade e, portanto, capazes de produzir soldaduras a baixo custo [10].

O processo de soldadura por elétrodos revestidos é um processo em que a ligação dos materiais é realizada pela fusão do material base e do eletrodo. A transferência do material fundido do eletrodo é realizada através do arco elétrico em pequenas gotas de metal que se destacam depositando-se no material base. Este arco elétrico é deslocado manualmente ao longo da junta a soldar com uma velocidade que se pretende constante e um comprimento de

arco o mais estável possível, tentando assim, reduzir as projeções de metal e fumos libertados [6,10].

O processo SER poder ser aplicado em todo o tipo de construção soldada e em quase todo o tipo de materiais soldáveis tais como [27]:

- ✓ Estruturas;
- ✓ Reservatórios de Pressão;
- ✓ Tubagens;
- ✓ Equipamentos ferroviários, rodoviários, agrícolas;
- ✓ Indústria química, petroquímica, de refinação e construção naval, etc.

Este processo tem como por principais vantagens [27]:

- ✓ A capacidade de soldar a maioria dos metais;
- ✓ A utilização de equipamentos simples e económicos;
- ✓ O uso de corrente alternada (AC) e corrente contínua (DC);
- ✓ Permitir soldar em todas as posições;
- ✓ Boa acessibilidade e mobilidade.

Apesar de ser aplicado a uma vasta gama de materiais, apresenta as seguintes desvantagens:

- ✓ Comprimento fixo dos elétrodos (230 a 460 mm);
- ✓ Limitação de capacidade de corrente máxima;
- ✓ Baixo rendimento (≤ 1 Kg/h);
- ✓ Fator de marcha ($\leq 30\%$);
- ✓ Limitado a espessura de 200 mm;
- ✓ Ligas leves (Al e Cu) e material reativo (Ti);
- ✓ Existência de escória;
- ✓ Não automatizável.

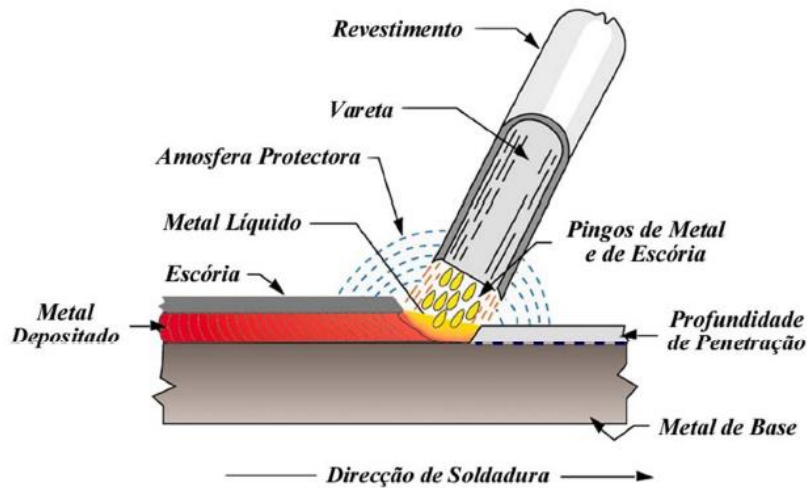


Figura 6 - Princípio de funcionamento SER [27].

Aquando da utilização do processo de soldadura SER é necessário ter em consideração os parâmetros operatórios do processo, pois estes influenciam o desempenho do processo, quer em termos de rendimento quer na emissão de partículas.

Os principais parâmetros operatórios do Processo SER são:

- ✓ Diâmetro e tipo de Eléctrodo;
- ✓ Intensidade da corrente de soldadura;
- ✓ Tensão;
- ✓ Velocidade de Soldadura.

3.2.1. Eléctrodos Revestidos

Como referido anteriormente, os eléctrodos revestidos constituem um elemento essencial para o escorvamento do arco eléctrico, e são, simultaneamente, material de adição, o qual após ser depositado, vai constituir, juntamente com o metal base, o cordão de soldadura. O eléctrodo é, em grande medida, responsável pelas características mecânicas e físicas do cordão de soldadura, sendo assim um elemento fundamental deste processo de soldadura [10].

O eléctrodo revestido é constituído por dois elementos (Figura 6): uma vareta que constitui a alma metálica e um revestimento constituído por materiais minerais ou orgânicos (silicatos de sódio ou potássio), que tem por principal função a condução da corrente eléctrica e o fornecimento de material à junta. Os revestimentos são, assim, produtos complexos, que podem ser diferentemente classificados tendo funções

múltiplas que se podem dividir em três grandes categorias: função elétrica, física/mecânica e metalúrgica [10].

As principais funções do revestimento do eletrodo podem então ser definidas do seguinte modo:

- ✓ **Formação de escória:** a escória tem como principais funções: fornecer uma proteção adicional ao banho de soldadura, da atmosfera e absorver as impurezas que se encontram na superfície (função metalúrgica). Uma outra característica da escória é aumentar o tempo de arrefecimento do metal fundido.
- ✓ **Proteção da alma do eletrodo:** O revestimento isola a alma do eletrodo prevenindo assim a ocorrência de curto-circuito durante a soldadura. Este revestimento serve ainda de proteção para o operador caso este toque no eletrodo (função elétrica, física e mecânica) [6].

Quanto à classificação, tem-se que existe no mercado uma enorme variedade de eletrodos, que apresentam entre si diferentes características operatórias, características mecânicas do material depositado, etc.

De modo a obter-se uma maior racionalização dos produtos existentes, os eletrodos revestidos são classificados de acordo com sistemas propostos por diferentes entidades como a *American Welding Society* (AWS), (mais utilizada internacionalmente), Comité Europeu de Normalização (CEN), *International Organization for Standardization* (ISO), Norma Portuguesa (NP), etc. A criação do mercado interno europeu tem naturalmente reflexos importantes nas diferentes classificações, fazendo com que cada vez mais se utilizem normas europeias em detrimento das normas nacionais como consequência do próprio processo de integração económica [6].

No entanto, os eletrodos podem também ser classificados, independentemente de uma dada especificação, em função da composição química do seu revestimento. Assim, uma forma de classificação será agrupá-los de acordo com o tipo de revestimento. Segundo esta classificação, os eletrodos podem ter os seguintes revestimentos [6,10,27]:

- ✓ **Rutílico:** estes eletrodos são muito utilizados por terem uma grande versatilidade. O revestimento é constituído principalmente por óxido de titânio, produzindo uma escória abundante, densa e de fácil remoção. Estes eletrodos podem ser utilizados tanto com corrente contínua como corrente alternada, exceto quando contêm uma quantidade elevada de pó de ferro. O material depositado tem uma fraca resistência à fissuração a quente, produzem cordões de bom aspeto e com uma penetração média. Exemplo: todo o tipo de aplicações.

- ✓ **Ácido:** hoje em dia não é muito utilizado, no entanto, é um tipo de eletrodo que confere boas características mecânicas ao material depositado, tendo uma baixa resistência à fissuração a quente. É constituído, principalmente, por óxido de ferro, manganês e sílica. A escória produzida é abundante, porosa e de fácil remoção. Este eletrodo pode ser utilizado tanto em corrente alterna como contínua, proporcionando uma penetração média e uma taxa de fusão elevada. Exemplo: eletrodos de alto rendimento, construção naval.

- ✓ **Básico:** são indicados para aplicações de elevada responsabilidade, no entanto, são altamente higroscópicos o que implica cuidados especiais como a secagem antes de serem utilizados. Estes eletrodos contêm quantidades elevadas de carbonatos de cálcio, entre outros, como fluorite. Geram uma escória de características básicas que, juntamente com o anidrido carbónico, protege a soldadura da atmosfera. A possibilidade de ocorrer fissuração a frio com a utilização destes eletrodos é mínima, e quando corretamente utilizados originam soldaduras de baixo teor de hidrogénio. A penetração é média com um cordão com boas propriedades mecânicas. Exemplo: aplicações onde exista exigência de impacto/tenacidade, esforços de fadiga e controlo de H₂.

- ✓ **Celulósico:** estes eletrodos são muito utilizados na soldadura de tubagens e, embora não sejam muito utilizados para a realização de passes de enchimento, são indicados para esse efeito visto terem uma elevada penetração. O revestimento é, em grande parte, composto por materiais orgânicos, nomeadamente celulose, materiais que, quando se decompõem no arco elétrico, geram grandes quantidades de gases que protegem o metal líquido da atmosfera. O arco elétrico gera muitos salpicos e fumos e produz pouca escória, originando um cordão com mau aspeto e com boas características mecânicas, mas frágil devido ao hidrogénio. Exemplo: Tubagens.

- ✓ **Oxidante:** eletrodos pouco utilizados, com propriedades inadequadas para aplicações de elevada responsabilidade. O seu revestimento é constituído principalmente por óxido de ferro e manganês, produzindo uma escória oxidante, abundante e de fácil remoção. Estes eletrodos podem ser utilizados tanto em corrente alternada como contínua e apresentam em geral uma baixa penetração. Exemplo: trabalhos de escultura, não usados em construção soldada.

3.2.2. Equipamentos de Soldadura Utilizados

Uma instalação de soldadura com eléctros revestidos compreende, em geral, uma fonte de energia (máquina de soldadura), os cabos de soldadura com as respectivas fichas de ligação, o porta eléctros e pinça de massa [10].

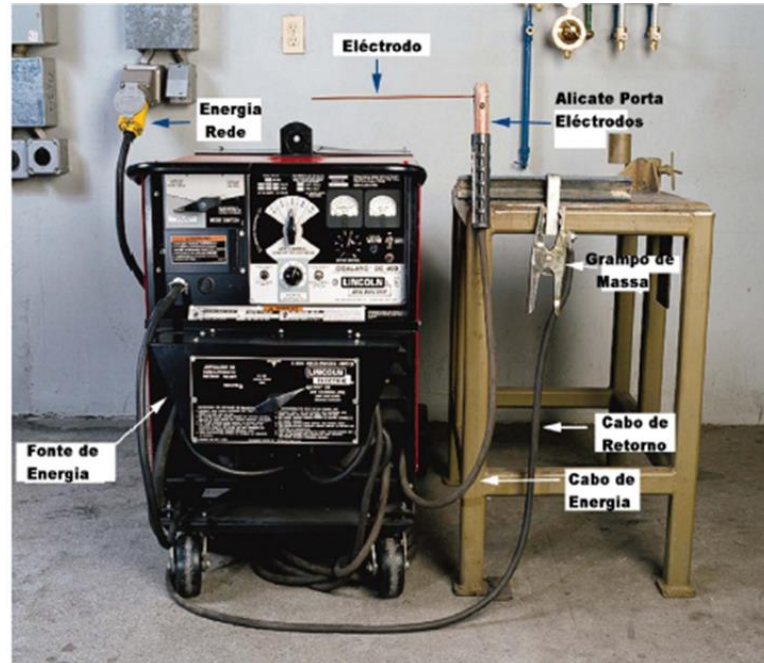


Figura 7 - Equipamento SER [27].

- ✓ **Porta eléctros:** liga o cabo de soldadura à máquina de soldar e conduz a corrente até ao eléctrodo.
- ✓ **Pinça de massa:** faz a ligação do cabo terra ao material base. Esta ligação pode ser feita diretamente ao material ou à bancada fazendo assim parte do circuito de soldadura.
- ✓ **Cabos de soldadura:** cabos de soldadura, ou seja, o cabo terra e o cabo de ligação ao porta eléctros. São muito importantes pois estes podem afetar as correntes e tensões que estão a passar para o eléctrodo. Estes devem ser flexíveis e ter um bom isolamento e um diâmetro que permita a condução de corrente com uma queda de tensão mínima. Quanto maior for o comprimento do cabo maior deverá ser o seu diâmetro.
- ✓ **Fontes de energia:** as fontes de energia dos equipamentos de soldadura SER tanto podem ser de corrente contínua como alterna, no entanto, a corrente normalmente utilizada é a contínua, daí a utilização de fontes com retificadores que transformam a corrente alterna em contínua. Muitas vezes é também necessário inverter a polaridade da corrente contínua e para isso usam-se

inversores. Estes, para além de converterem a corrente alterna para contínua, também podem inverter a polaridade da corrente contínua.

3.3. Caracterização do Processo de Soldadura MAG

O conceito inicial do processo de soldadura MIG/MAG remota aos anos 20, no entanto, a sua implementação em termos industriais só acontece no final dos anos 40 [10], em que se usou pela primeira vez uma alimentação contínua de um eléctrodo de alumínio protegido por um gás constituído por 100% de árgon. Só em 1951 foi possível soldar aços com a introdução de oxigénio misturado com árgon e, posteriormente, com a introdução de CO₂ puro ou em mistura [6]. Mas foi há cerca de 20 anos que este processo começou a dominar a indústria da soldadura [28].

Desde a sua aparição, até aos dias de hoje, este processo tem sofrido melhorias constantes com o objetivo do aumento da produtividade do processo e a segurança do soldador. Estas melhorias constantes levaram a que este processo seja, hoje em dia, o que apresenta maior flexibilidade, permitindo soldar uma vasta gama de materiais e espessuras.

O processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), também designado como *Metal Inert Gas* ou *Metal Active Gas* (MIG/MAG), sigla derivada dos gases de proteção utilizados neste processo (respetivamente gás inerte ou gás ativo), é um processo de soldura de metais, onde, através de um arco elétrico, estes são aquecidos até ao ponto de fusão e unidos.

Como já referido, o processo de soldadura MAG é um processo de soldadura com gases de proteção gasosa à base de CO₂ ou misturas com outros gases como Ar ou He. A transferência do material fundido, do eléctrodo, pode ser realizada de vários modos. No entanto, os modos principais são: transferência globular, curto-circuito e *spray*. Este processo tem uma alimentação contínua de um fio sólido e de um gás de proteção pela tocha de soldadura. A velocidade de alimentação pode ser regulada no equipamento tal como o caudal de gás. Existe um componente na tocha tipo “gatilho” com que o soldador controla a alimentação do eléctrodo. Neste tipo de situação a soldadura é semiautomática [10]. A figura seguinte representa o princípio de funcionamento deste processo, o qual se encontra ilustrado pelos principais componentes intervenientes na soldadura MIG/MAG.

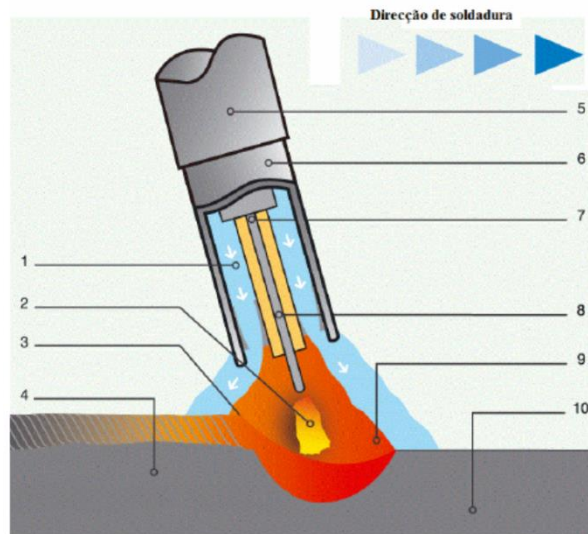


Figura 8 - Princípio de funcionamento MAG. Figura adaptada de [29].

1) Fluxo de gás de protecção, **2)** Arco eléctrico, **3)** Banho de Soldadura, **4)** Metal solidificado, **5)** Tocha de soldadura, **6)** Bocal de gás, **7)** Tubo de contacto, **8)** Fio de eléctrodo, **9)** Atmosfera de protecção, **10)** Material base.

Aquando da utilização do processo de soldadura MAG é necessário ter em consideração os parâmetros operatórios do processo, pois estes influenciam o desempenho do processo, quer em termos de rendimento quer na emissão de partículas.

Principais parâmetros operatórios do Processo MAG [10, 27]:

- ✓ **Intensidade de corrente:** tem influência na taxa de depósito, na profundidade de penetração e no volume de metal fundido;
- ✓ **Tensão do arco** (comprimento do arco): tem influência na largura do cordão, na sua convexidade e melhora a resistência à porosidade (óleos e humidade);
- ✓ **Velocidade de soldadura:** influencia a morfologia do cordão;
- ✓ **Extensão do eléctrodo:** tem influência no cordão e na taxa de depósito;
- ✓ **Consumíveis:** relativamente a este parâmetro consideram-se os gases de protecção e o fio sólido, a escolha do tipo de consumível depende do material a soldar e da espessura a soldar;
- ✓ **Diâmetro do eléctrodo:** quando se aumenta o diâmetro do fio, diminui-se a densidade de energia no arco eléctrico, o que diminui a profundidade de penetração, aumenta a largura do cordão e diminui a taxa de depósito. Quando se diminui o diâmetro do fio origina os efeitos opostos, aos referidos anteriormente.

Este processo tem por principais vantagens [27]:

- ✓ Soldar todos os metais;
- ✓ Controlo da Penetração Razoável;
- ✓ Usar DC (+) /AC;
- ✓ Soldar em Todas as Posições;
- ✓ Fator de Marcha de 60%;
- ✓ Taxa de Depósito entre 1,2 a 1,5 kg/h;
- ✓ Automatização, Eléctrodo Contínuo;
- ✓ Baixos Níveis de Hidrogénio;
- ✓ Sem escória, exceto com CO₂.

A soldadura MIG / MAG, apesar de ser um dos processos mais utilizados pelas indústrias de fabricação modernas, apresenta algumas desvantagens [27]:

- ✓ Acessibilidade e Mobilidade;
- ✓ Faltas de Fusão/Colagens;
- ✓ Limitado a espessuras até 50 mm (devido às colagens);
- ✓ Risco de Inclusões com CO₂;
- ✓ Boas Competências do Soldador;
- ✓ Grande sensibilidade às correntes de ar;
- ✓ Custos dos Gases de Protecção.

3.3.1. Equipamentos Utilizados

Na Figura 9 apresentam-se um esquema representativo do equipamento tipo para o processo de soldadura MAG:

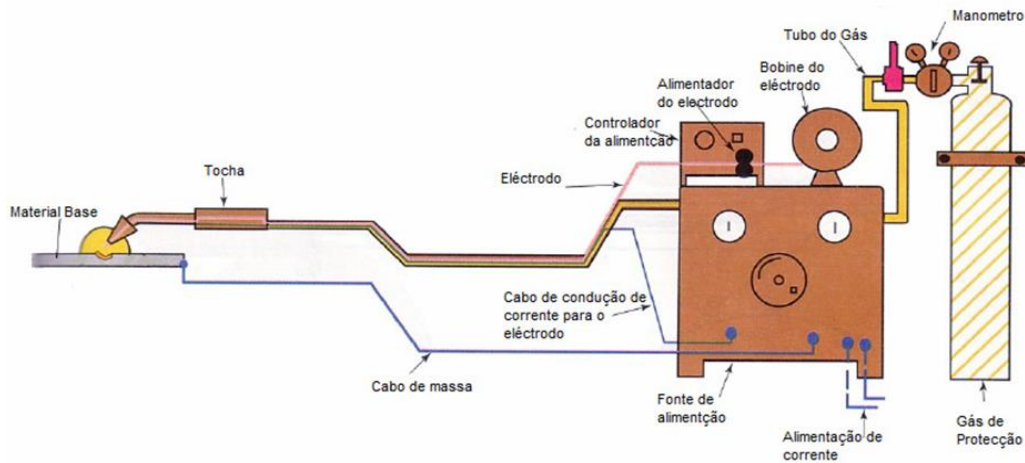


Figura 9 - Esquema do equipamento básico para o processo de soldadura MAG [26].

Dos elementos ilustrados na Figura 9 é importante destacar:

- ✓ A fonte de alimentação é, como em muitos outros equipamentos de soldadura por arco eléctrico, uma fonte retificadora/inversora que possibilita a utilização de corrente contínua ou alternada.
- ✓ O alimentador do eléctrodo, que pode ser de velocidade constante ou variável com a tensão. O alimentador a velocidade constante funciona com uma fonte de alimentação que fornece tensão constante e a velocidade é previamente seleccionada no equipamento. O segundo é alimentado, directamente pela tensão do arco eléctrico, e adapta a velocidade de acordo com as mudanças de tensão.
- ✓ A tocha de soldadura por onde é alimentado o fio consumível e o gás de protecção [6].

3.3.2. Gases de Protecção do processo de soldadura MAG

Os gases utilizados são gases ativos, usualmente misturas gasosas de árgon e dióxido de carbono, árgon e oxigénio ou misturas ternárias de árgon, dióxido de carbono e oxigénio. As percentagens, de cada constituinte, variam conforme o poder de oxidação pretendido, no entanto, na grande maioria das misturas, o elemento árgon é o que está presente em maior quantidade [26].

Os gases de protecção utilizados neste processo são classificados de acordo com a norma EN ISO 14175 [27]:

- ✓ I – Inertes: Não Ferrosos, Reativos e Inox;
- ✓ M1; M2; M3 e C – Misturas Ativas e só Ativa ($\text{CO}_2+\text{O}_2+\text{Ar}$ / O_2+Ar ; CO_2+Ar / $\text{CO}_2+\text{H}_2+\text{Ar}$; C – CO_2 ou CO_2+O_2): Ferrosos e Inox;

- ✓ Chapa fina: $\text{CO}_2+\text{O}_2+\text{Ar}$ ou $\text{CO}_2+\text{H}_2+\text{Ar}$;
- ✓ Inox: CO_2+Ar ou O_2+Ar .

A principal função dos gases é a de evitar o contacto do ar atmosférico com o banho de fusão. Tal é necessário porque, a maior parte dos metais em estado líquido, quando em contacto com o ar, tem uma grande tendência para formar óxidos. A escolha dos gases de proteção depende das matérias e dos processos envolvidos. Para além de proteger o eletrodo e o banho de fusão, os gases de proteção também influenciam importantes características do processo MIG/MAG: características do arco, modo de transferência do metal, penetração e perfil de soldadura.

Tal como referido anteriormente, os principais gases utilizados neste processo são: argon, hélio, oxigénio e o dióxido de carbono [30].

- **Árgon**

É o gás de proteção mais utilizado na soldadura MIG/MAG devido a vários fatores: baixa energia de ionização que promove uma voltagem de arco baixa, facilitando o escorvamento e a estabilidade do arco, gerando, por isso, um arco com uma energia de sinal positivo, o que resulta numa menor energia transferida para o banho de fusão, e o seu preço reduzido quando comparado com outros gases de proteção.

O argon, como é um gás inerte quando no estado puro, tem uma utilização limitada à soldadura de metais não ferrosos, tais como o alumínio e ligas de titânio que apresentam um comportamento reativo devido à camada de óxidos refratários existentes na superfície do metal. Já para a soldadura de aços de carbono deve juntar-se ao argon um gás oxidante (O_2 ou CO_2), o que torna o arco mais estável reduzindo os salpicos. O arco elétrico criado por este gás faz com que a zona exterior diminua a densidade energética em relação ao centro do arco, o que vai provocar uma soldadura com uma penetração em forma de “dedo”. Este tipo de penetração nem sempre é desejável, pois, para casos em que o alinhamento seja mais crítico (juntas em “T”), poderá ocorrer porosidade e falta de fusão na origem do cordão.

- **Hélio**

Têm uma energia de ionização alta, resultando numa maior voltagem do arco e também numa maior entrega térmica. Esta maior entrega térmica resulta numa maior penetração, mais uniforme, quando comparada com o argon. Por este gás ser relativamente mais caro é utilizado preferencialmente em percentagens mais pequenas, em misturas com argon, em que este é dominante.

- **Oxigênio**

É usado como componente secundário, juntamente com o argon, por causa do seu efeito estabilizador no arco. Ao fornecer propriedades oxidantes ao argon, este promove a formação de óxidos sobre o banho de fusão e na ponta do eletrodo, o que vai diminuir a tensão superficial e, deste modo, facilitar a transferência do metal.

- **Dióxido de Carbono**

Na soldadura por arco elétrico o dióxido de carbono vai-se dissociar em monóxido de carbono e oxigênio livre. Durante o arco elétrico o oxigênio livre gerado é insuficiente para que se possa formar um plasma, sendo por isso muito difícil obter transferência por spray. O que leva à formação de elevadas emissões de salpicos, devido à instabilidade na transferência de metal.

A natureza oxidante deste gás permite lidar com superfícies contaminadas com tinta ou ferrugem. A sua elevada entrega térmica produz um perfil de soldadura mais uniforme [30].

3.3.3. Classificação dos modos de transferência

Relativamente ao processo de soldadura MAG existem vários modos de transferência que reconhecidos e classificados em diferentes categorias pelo Instituto Internacional de Soldadura (IIW). O modo de transferência que é utilizado é de grande importância, pois vai ter um impacto muito importante na qualidade do cordão, na estabilidade do arco elétrico e nos fumos libertados. Os modos de transferência mais utilizados são: o curto-circuito, globular e *spray*.

3.3.3.1. Transferência por Curto-Circuito

Um modo de funcionamento muito comum deste processo é a transferência por curto-circuito.

O modo de transferência por curto-circuito inicia-se criando, mesmo, um curto-circuito, ou seja, o fio eletrodo é alimentando em direção à peça a soldar a uma velocidade que excede a taxa de fusão. Este desequilíbrio é o responsável pelo facto do arco elétrico não manter um comprimento constante [10].

Na Figura 10 pode-se observar o que acontece durante o modo de transferência por curto-circuito. De um modo resumido, procede-se da seguinte maneira: na posição A o eletrodo está em curto-circuito com o material base, não existe arco elétrico nem fluxo de corrente. Na posição B vai ocorrer um aumento da resistência provocando também um aumento da temperatura e o início da fusão. Na posição C inicia-se o arco elétrico e há

fusão de material do elétrodo que se vai depositar no banho de soldadura. Na posição D o arco elétrico atinge o seu comprimento máximo, o calor do arco torna o banho de soldadura mais fluido e aumenta o diâmetro da ponta do elétrodo. Na posição E a velocidade de alimentação do elétrodo ultrapassa o calor do arco elétrico e aproxima-se novamente de material base. Na posição F inicia-se um novo ciclo [26,31].

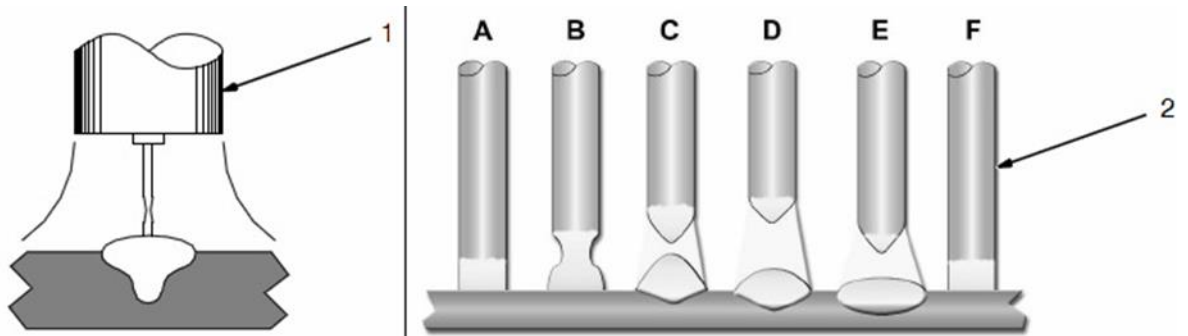


Figura 10 - Modo de transferência por Curto-Circuito [26].

1) Transferência por curto-circuito. **2)** Descrição do modo de transferência. **A)** Contacto do elétrodo com base. **B)** Aumento de resistência. **C)** Início de arco elétrico. **D)** Comprimento máximo do arco. **E)** Reaproximação do elétrodo à base. **F)** Início do novo ciclo.

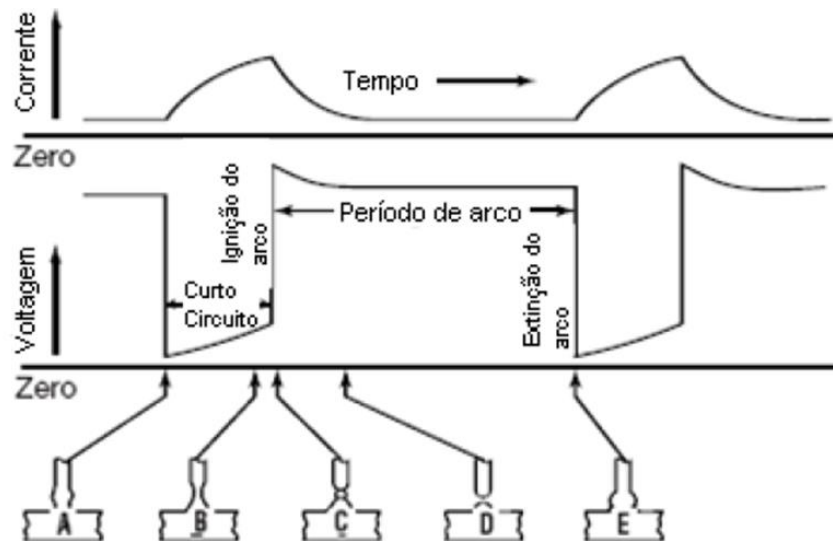


Figura 11 - Gráfico referente à transferência do metal por curto-circuito (outro modo de ilustração do modo de transferência por curto-circuito) [6 e 28].

Com este modo de transferência, a velocidade de alimentação do elétrodo, a tensão e a taxa de deposição são normalmente baixas comparativamente a outros modos de transferência. Isto faz com que este modo seja muito versátil possibilitando a soldadura de

chapas grossas ou finas e em qualquer posição. Este modo tem também algumas limitações como a falta de fusão em materiais mais espessos, uma fraca taxa de deposição e grande quantidade de salpicos. A falta de fusão do material deve-se ao comportamento aleatório do curto-circuito que pode resultar na instabilidade do processo, cuja combinação com a baixa entrega térmica pode causar defeitos como a falta de fusão do material [8].

3.3.3.2. Transferência Globular

O modo de transferência globular é um modo que se encontra entre os modos de transferência por curto-circuito e *spray* é, em todo, semelhante ao pingar de uma torneira. Neste modo de transferência ocorre a separação de material do elétrodo em dimensões maiores do que nos outros modos. Este modo de transferência tem lugar quando os parâmetros de soldadura como a tensão, intensidade e velocidade de alimentação são superiores aos parâmetros do modo de transferência por curto-circuito. As maiores limitações deste modo são a presença de salpicos, uma aparência não tão boa como a que se obtém por *spray* e a soldadura está limitada a materiais com o mínimo de 3 mm de espessura [6]. Na Figura 12 representa-se esquematicamente este modo de transferência.

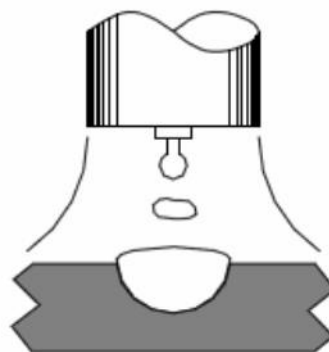


Figura 12 - Modo de transferência globular [26].

3.3.3.3. Transferência por Spray

O modo de transferência por *spray* é um modo onde a transferência do material fundido do elétrodo, para o material base, é feito por pequenas gotas que são transportadas ao longo do arco elétrico. Comparativamente com os outros modos de transferência, a transferência por *spray* utiliza valores de tensão, velocidade de alimentação e intensidade superiores. Este modo de transferência apresenta altas taxas de deposição, uma boa fusão e penetração, boa aparência do cordão, capacidade de utilizar elétrodos de diâmetros maiores e verifica-se uma baixa emissão de salpicos.

As principais limitações deste modo de transferência são, apenas, permitir soldar materiais com uma espessura mínima de 3 mm e a necessidade de preparar, com cuidado extra, a soldadura. Este modo de transferência tende a ficar limitado com o aumento da temperatura e com o aumento do elemento ativo da mistura gasosa [10, 28].

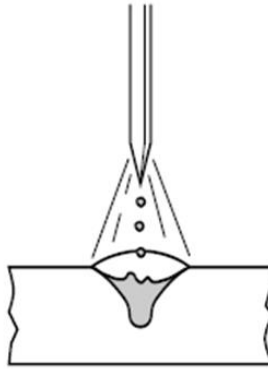


Figura 13 - Modo de transferência por *Spray* [32].

3.4. Caracterização do Processo de Soldadura TIG

A ideia de utilizar um meio gasoso para proteger, ao mesmo tempo, o arco elétrico e o banho de fusão é quase tão antiga como o próprio eletrodo revestido. Em 1930 surgiu um maior interesse pelos gases inertes, mas só em 1940, nos EUA, se iniciaram experiências utilizando estes gases para proteger conjuntamente, em soldadura, o arco elétrico e o banho de fusão. Em 1942 foi realizada a primeira aplicação industrial deste processo, para soldar o magnésio, tendo-se utilizado o hélio como gás protetor.

O TIG (ou GTA ou GTAW) é um processo de soldadura por arco elétrico no qual este é estabelecido através de um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça, no seio de uma atmosfera de proteção de gás inerte (Árgon ou Hélio).

Em soldadura TIG a função principal do arco elétrico é o fornecimento de calor para criar o banho de fusão e fundir o material de adição, o qual, se necessário, é adicionado separadamente através de uma vareta. Esta adição é realizada através da alimentação de “fio nu”, manualmente ou mecanicamente, lateralmente ao banho de fusão.

Uma outra função do arco é a limpeza do banho de fusão e do metal base adjacente, de óxidos superficiais, não sendo, portanto, necessário a utilização de fluxo. O gás de proteção deve ser inerte para que não haja contaminação do eletrodo de tungstênio [10].

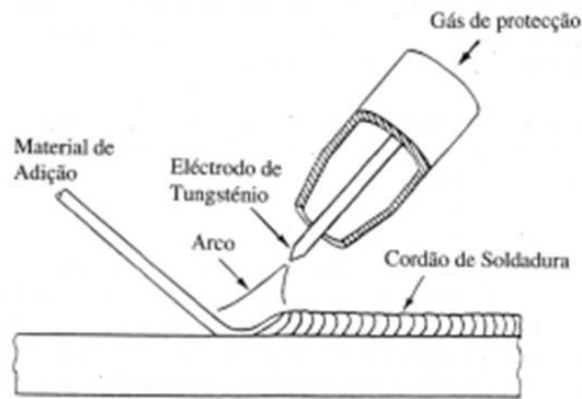


Figura 14 - Processo de soldadura TIG [10].

A soldadura TIG apresenta vantagens significativas para uma larga diversidade de aplicações industriais, que vão desde a elevada qualidade requerida na indústria aeroespacial e nuclear, à elevada velocidade necessária na fabricação de tubos e chapas, até à flexibilidade que a soldadura TIG apresenta para trabalhos de reparação.

Este processo tem como principais objetivos:

- ✓ Automatização;
- ✓ Processo mais “tolerante”;
- ✓ Maior facilidade de execução;
- ✓ Maior rapidez de execução.

Tipos de Corrente:

- ✓ Corrente Contínua;
- ✓ Corrente Alterna.

É importante referir que, apesar de ser possível a utilização de dois tipos de corrente, o tipo de corrente e a polaridade mais utilizada para este processo é a corrente contínua em polaridade direta (CC). É, no entanto, possível a utilização de corrente alternada e de corrente contínua em polaridade inversa (CC +), as quais são adequadas a alguns casos particulares.

A utilização da corrente contínua em polaridade direta (CC-) origina uma maior penetração e, conseqüentemente permite velocidades de soldadura mais elevadas, em chapas de maior espessura. No entanto, em soldadura de alumínio e magnésio terá ser utilizada polaridade inversa, porque devido à emissão de eletrões do cátodo (agora ligado á peça), resulta a quebra de uma película superficial de óxidos refratários que dificultam ou impossibilitam mesmo a operação. Só assim é possível a realização do cordão de soldadura. Destes dois materiais

destaca-se o alumínio que se encontra, por vezes, oxidado superficialmente com uma película (alumina) que se caracteriza por um elevado ponto de fusão e por uma baixa densidade.

Este processo tem como principais vantagens [27]:

- ✓ Nível de precisão dos parâmetros mais elevado;
- ✓ Banho de soldadura menos turbulento;
- ✓ Maior velocidade de soldadura;
- ✓ Menores níveis de deformação e empeno;
- ✓ Melhor controlo do banho de fusão;
- ✓ Melhor estabilidade do arco, nomeadamente em chapa fina;
- ✓ Permitir um controlo preciso da Entrega Térmica;
- ✓ Soldadura em posição mais facilitada.

Principais desvantagens do processo TIG:

- ✓ Custo do Equipamento, fontes eletrónicas (podem ser mais elevados do que com outros processos);
- ✓ Treino dos soldadores;
- ✓ Maior dificuldade na regulação dos parâmetros;
- ✓ Requer maior investigação preliminar na definição dos parâmetros;
- ✓ A radiação UV emitida é mais intensa do que nos outros processos;
- ✓ As concentrações de gás de proteção podem acumular-se e deslocar o oxigénio durante o processo para áreas confinadas, o que obriga a ventilar a área e/ou usar ventilação forçada no arco para eliminar os fumos e gases. Se a ventilação for insuficiente, deve utilizar-se um respirador com fornecimento de ar.

O processo TIG pode apresentar diversas variantes relacionadas com o tipo de execução/manuseamento da pistola, tipo de elétrodo, níveis de corrente, etc., podendo, assim, ter diferentes designações:

- ✓ TIG – Pulsado;
- ✓ TIG – Automatizado (Orbital);
- ✓ TIG – Fio Quente (*Hot Wire*);
- ✓ TIG – Por Pontos;
- ✓ TIG – Multi-Elérodos;
- ✓ TIG – Chanfro Apertado (*Narrow-Gap*);

- ✓ TIG – *Key-Hole*;
- ✓ TIG – Com fluxo (*Flux*).

3.4.1. Equipamentos Utilizados

Como referido anteriormente, a soldadura TIG é utilizada tanto com corrente contínua como com corrente alterna. Durante muitos anos as máquinas de soldadura de corrente alterna apresentavam uma onda de corrente sinusoidal, o que tornava necessária a realização de reescorvamento do arco elétrico cada vez que a corrente invertia o sentido. Hoje em dia, ainda se utilizam algumas máquinas deste tipo, nas quais existe um circuito aberto de fornecimento de alta tensão, de cerca de 100 V, ou fornecimento de alta frequência e alta tensão, conforme se indica na Figura 15.

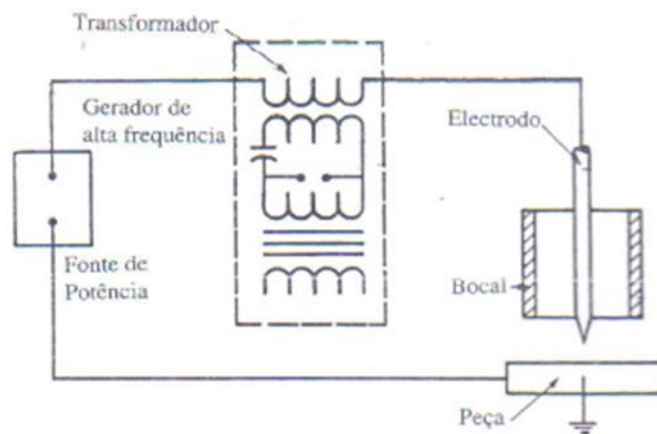


Figura 15 - Representação esquemática de uma instalação para soldadura TIG com unidade de alta frequência [10].

Nas máquinas mais recentes, a unidade de alta frequência continua a ser necessária, mas unicamente, para o escorvamento inicial do arco elétrico, uma vez que a passagem de uma corrente de alta frequência e alta tensão através do eléctrodo de tungsténio facilita a emissividade de electrões, que, como se sabe, é necessário para o estabelecimento do arco elétrico.

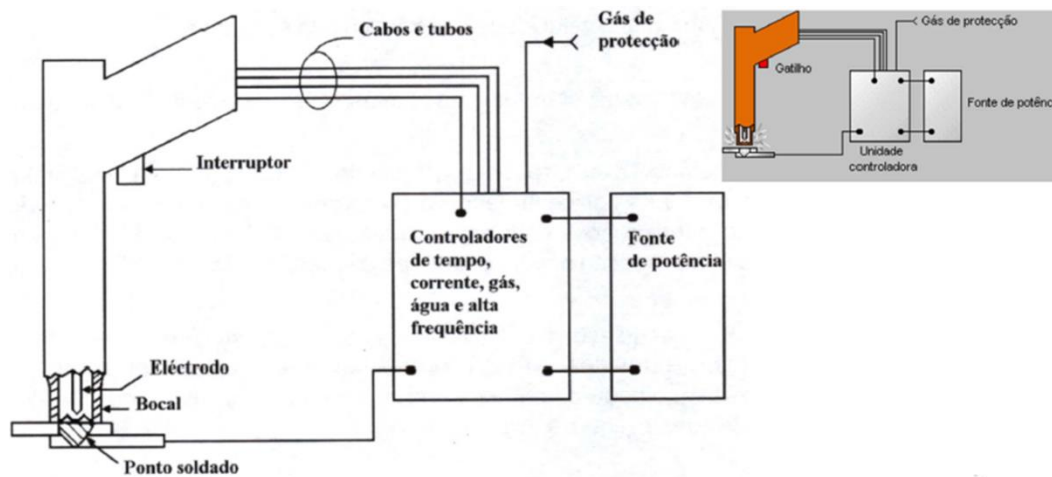


Figura 16 – Representação esquemática de uma instalação de soldadura para o processo TIG (Por Pontos) [27].

Uma instalação de soldadura TIG compreende, essencialmente, os seguintes elementos:

- ✓ Uma tocha de soldadura;
- ✓ Uma fonte de alimentação elétrica da tocha: a máquina de soldadura;
- ✓ Uma fonte de alimentação em gás de proteção e, eventualmente, em fluido de arrefecimento (água).

3.4.2. Tipo de Elérodos não Consumíveis

Em soldadura TIG podem-se utilizar vários tipos de eléctrodos [10]:

- ✓ Elérodos de tungsténio;
- ✓ Eléctrodo de tungsténio com adição de tório ou zircónio e óxido de cério.

A escolha do eléctrodo de tungsténio é devida ao seu elevado ponto de fusão e á sua elevada emissividade. A primeira característica permite a redução de desgaste do eléctrodo, enquanto que a segunda facilita a ionização e, por consequência, o estabelecimento do arco e sua manutenção.

Em relação aos eléctrodos com adição de tório ou zircónio, os eléctrodos de tungsténio têm como função fundamental facilitar o poder emissivo destes, aumentando assim a estabilidade do arco. Contudo as adições de tório baixam o ponto de fusão dos eléctrodos pelo que não é aconselhável a sua utilização em polaridade inversa.

3.4.3. Produtos Consumíveis

Neste processo de soldadura os produtos consumíveis utilizados são o gás de proteção e o material de adição.

3.4.3.1. Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado em soldadura TIG é, em geral, o argon, o qual é adequado a todos os tipos de metais e ligas. Em determinados países (EUA) utiliza-se preferencialmente hélio ou misturas de argon e hélio. O argon promove um arco mais estável e uma melhor ação de limpeza, ao passo que o hélio possibilita uma melhor penetração e maior velocidade de soldadura [10].

Qualquer que seja o gás ou mistura utilizada este deverá ser o mais puro possível e isento de humidade. Normalmente utiliza-se gás com uma pureza de cerca de 99,99%.

Contudo, a adição de hidrogénio ou argon ou hélio, revelou haver vantagens em alguns casos, tais como a soldadura de aço inoxidável e de ligas de níquel. No caso de se utilizar este gás é preciso ter em consideração o risco de explosão que poderá advir da sua utilização [6,10].

3.4.3.2. Material de Adição

De um modo geral, utilizam-se varetas ou fios de material de adição com uma composição semelhante ao do metal de base, uma vez que há poucas perdas de elementos de liga no arco elétrico. Para minimizar a oxidação devida à existência de óxidos superficiais ou de mistura de ar no gás de proteção adicionam-se elementos desoxidantes ao material de adição.

3.5. Emissões de Nanopartículas nos Processos de Soldadura

Como já referido ao longo deste trabalho, a soldadura, por si só, é um processo com diferentes implicações, e variados riscos para a saúde humana. Uma delas, que irá ser aprofundada neste ponto é a emissão de nanopartículas nos processos de soldadura em estudo. Uma das principais fontes de emissões de nanopartículas na soldadura é através da emissão de fumos durante a execução das soldaduras.

A Soldadura é um processo que é realizado tanto em ambientes interiores como exteriores. No entanto, este fator não limita as emissões de fumos de soldadura para o ambiente aquando da realização de trabalhos no exterior. Sempre que se executam processos de soldadura, há emissão de partículas sobre a forma de pó, como fumos em que são libertados gases

poluentes para o ambiente no meio envolvente ao processo, que são potencialmente perigosos para a saúde do trabalhador [33].

Atualmente, 1 a 2% dos trabalhadores de diferentes áreas profissionais (cerca de 3 milhões de pessoas) são submetidos à ação dos fumos emitidos pelos diferentes processos de soldadura. Em espaços confinados, a soldadura pode ser mortal, dado que, sem ventilação adequada os fumos e gases tóxicos podem ser de muito maior intensidade, podendo superar mesmo os respetivos limites impostos para determinadas substâncias tóxicas [8].

Sabe-se ainda que um único soldador produz 10 a 40 g de fumos de soldadura por hora [26], que têm, obviamente, impacto na saúde dos soldadores. A composição química dos fumos é, naturalmente, um fator importante e é influenciado diretamente pelos parâmetros de soldadura e pelos materiais.

Sendo assim, aquando do estudo dos fumos de soldadura, é importante ter em consideração três fatores:

- a) O volume de emissão;
- b) A composição;
- c) As dimensões das partículas.

Relativamente à quantidade de gases emitidos na soldadura esta é normalmente pequena e a sua composição é, por norma, não tóxica (com algumas exceções), mas a gama de tamanhos de partículas respiráveis é caracterizada por conter partículas muito pequenas, que tem propriedades que influenciam a permanência dessas no ar por longos períodos de tempo [33].

Os fumos são constituídos por diversos metais (alguns dos quais sob a forma de óxidos), que, em excesso, são prejudiciais para a saúde humana. Como exemplos desses metais apontam-se: alumínio, berílio, cádmio, crómio, cobre, ferro, magnésio, manganês, níquel, chumbo e zinco.

O estudo dos fumos resultantes dos processos de soldadura é crucial para o futuro da soldadura, pois para além de melhorar as condições de trabalho dos soldadores, que é primordial, poderá ainda reduzir os custos associados ao processo.

A influência dos fumos de soldadura no corpo humano tem efeitos diferentes, dependendo da sua composição. Algumas dessas composições têm efeitos a curto prazo, tais como a febre de soldadura. Contudo, os fumos de soldadura podem provocar efeitos de longo prazo tais como, por exemplo, a presença de manganês pode originar o desenvolvimento da doença de Parkinson [8].

Nas tabelas 6,7 e 8 indicam-se alguns dos efeitos que os componentes dos fumos de soldadura têm na saúde humana. Estes efeitos são conhecidos e identificados como provenientes de fumos de soldadura [26,34,35].

Tabela 6 - Elementos constituintes dos fumos de soldadura e efeitos na saúde humana [26,34,35].

Elementos de fumos de soldadura, gases e os seus efeitos		
Elementos	Fontes	Efeitos na Saúde
Crómio (VI)	Processos de soldadura de aço inoxidável, fabricação de pigmentos de crómio, eléctrodos.	Irritação da pele, irritação do trato respiratório, efeitos no nariz e orelhas; efeitos crónicos incluem cancro do pulmão, danos nos rins e fígado.
Óxidos de ferro	Processos de soldadura em todos os aços ou metais.	Irritação do nariz e pulmões; siderose (deposição de pós metálicos nos pulmões).
Ferro	Processos vários.	Pode causar coroidite, conjuntivite e retinite, se permanecer nos tecidos oculares.
Manganês	Processos de soldadura, aços de tensão de rutura elevada.	Pneumonite química; efeitos crónicos incluem distúrbios do sistema nervoso.
Níquel	Processos de soldadura: aço inoxidável, galvanização.	Efeitos dermatológicos, doenças pulmonares do tipo asmáticas, efeitos crónicos incluem cancro (nariz, laringe, pulmão), irritação do trato respiratório, disfunção renal. Irritação dos olhos, nariz e garganta.

Tabela 7 - Elementos constituintes dos fumos de soldadura e efeitos na saúde humana
(continuação) [26,34,35].

Elementos de fumos de soldadura, gases e os seus efeitos		
Elementos	Fontes	Efeitos na Saúde
Fluoretos	Revestimento de elérodos, gás de proteção.	Sintomas gastrointestinais; efeitos crónicos incluem problemas de ossos e articulações, líquido nos pulmões e disfunções dos rins.
Ozono	Formado no arco eléctrico	Efeitos agudos incluem líquido nos pulmões e hemorragias; efeitos crónicos incluem alterações nas funções pulmonares.
Óxidos de nitrogénio	Formados no arco eléctrico	Pneumonite, edema pulmonar, bronquite crónica, enfisema e fibrose pulmonar.
Monóxido de carbono	Gases de proteção com dióxido de carbono e revestimentos de elérodos	Dores de cabeça, náuseas, tonturas, desmaios, morte, efeitos crónicos e cardiovasculares.
Alumínio	Ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear.	Danos no sistema nervoso central, demência; perda de memória, apatia, tremores graves, fibroses pulmonares e danos pulmonares, este efeito, conhecido como doença de Shaver, é agravado com a inalação de óxidos de ferro e silício.

Tabela 8 - Elementos constituintes dos fumos de soldadura e efeitos na saúde humana
(continuação) [26,34,35].

Elementos de fumos de soldadura, gases e os seus efeitos		
Elementos	Fontes	Efeitos na Saúde
Silício	Consumíveis/material de adição, ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear.	Não é considerado perigoso para a saúde, mas o dióxido de silício é considerado como um perigo elevado podendo provocar irritações nos pulmões e nas membranas mucosas, irritações nos olhos e pele. Foi também relatado um aumento de doenças tais como escleromas, artrite reumatoide, lúpus eritematoso sistémico, sarcoidose e problemas renais.
Magnésio	Consumíveis/material de adição, ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear.	Irritação nas membranas mucosas e no trato respiratório superior, e lesões oculares.
Cobre	Consumíveis/material de adição, ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear.	Febre dos fumos metálicos com mudanças atróficas na mucosa nasal. Envenenamento crónico por cobre origina a doença de Wilson.
Zinco	Consumíveis/material de adição, ligas de alumínio e ferramentas de soldadura por fricção linear.	Cólicas estomacais, irritações da pele, náuseas, vômitos e anemia. Níveis muito elevados de zinco podem danificar o pâncreas e perturbam o metabolismo de proteínas, e causar arteriosclerose. A exposição continuada a cloreto de zinco pode causar doenças respiratórias.

Como já referido neste trabalho, as partículas que constituem os fumos de soldadura têm uma vasta gama de tamanhos, como se apresenta na Figura 17. O tamanho é uma propriedade importante, pois determina a profundidade a que as partículas vão penetrar no sistema respiratório: existem aquelas que entram nos pulmões e que depois saem novamente; outras que nem sequer chegam a entrar porque são grandes demais e são retidas antes de entrarem nos pulmões, e, ainda, aquelas que entram nos pulmões mas não saem, ficando depositadas no sistema respiratório com os perigos/efeitos daí inerentes. A gama de dimensões típicas dessas partículas pode ser observada na figura seguinte na faixa realçada a azul [28].

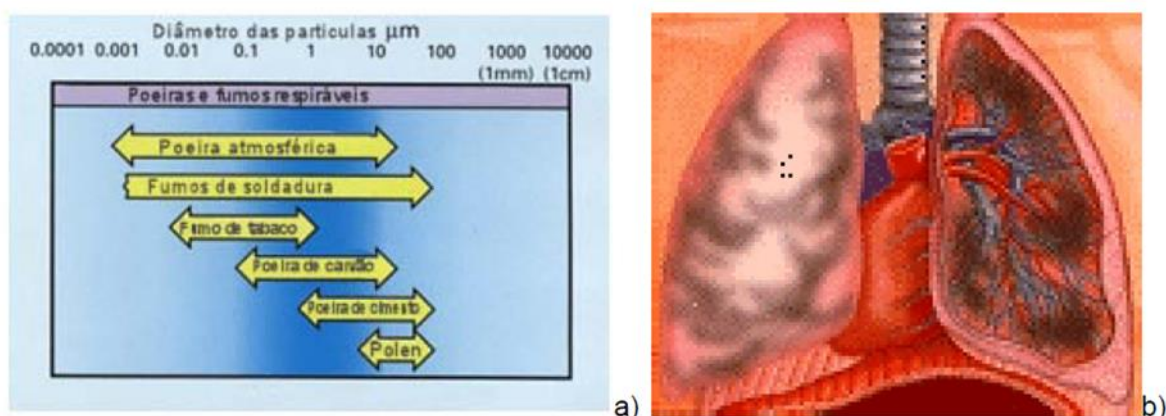


Figura 17 - Gama de tamanhos que os fumos e poeiras podem, sendo de origem natural ou industrial (a); pulmões (b). Figura adaptada de [28].

É importante referir que uma correta manipulação dos parâmetros de soldadura permite, por si só, um controlo da quantidade de fumos gerados. No entanto, libertam-se sempre fumos e partículas que podem atingir dimensões inferiores a 100 nm. Para as nanopartículas é ainda desconhecida uma relação direta entre os parâmetros operacionais de soldadura e a libertação destas [26].

Nos pontos seguintes referem-se alguns critérios já estudados de modo a compreender e interpretar melhor a natureza dos fumos resultantes dos diferentes processos de soldadura em estudo, por forma a poder correlacioná-los com as nanopartículas, com a finalidade de poder vir a minimizar a sua emissão através de medidas de prevenção.

3.5.1. Fumos Resultantes do Processo de Soldadura MIG/MAG

Os fumos resultantes do processo MIG/MAG têm sido alvo de estudos desde 1975, nomeadamente sobre a sua natureza e os fatores que controlam a sua taxa de formação, assim como soluções para a sua resolução [28,34].

Dos estudos existentes para processos de proteção gasosa, conclui-se que os fumos resultantes da soldadura são formados, principalmente, a partir de gotas de soldadura [28,36]. Chegou-se a esta conclusão através da comparação entre os diferentes processos de soldadura existentes. Por exemplo, comparando dois processos TIG e MIG/MAG, verifica-se, claramente, que o processo MIG/MAG forma uma quantidade maior de fumos. Como o processo MIG/MAG [Figura 18(a)] forma gotas de material em fusão com o modo de transferência e o TIG [Figura 18 (b)] não, conclui-se que o principal responsável da formação de fumos é a formação de gotas.

A emissão de fumos está relacionada com a ocorrência de salpicos que resultam da instabilidade do arco elétrico, nomeadamente quando se dá a sua ignição e extinção. Na Figura 18, apresenta-se a grande quantidade de salpicos e fumos que, tipicamente, resultam destas operações de soldadura.



Figura 18 - (a) Processo MIG/MAG. **(b)** Processo TIG. Figura adaptada de [37,38].

Os fumos são formados por dois mecanismos: a partir da gota do material de fusão, e dos salpicos incandescentes que resultam do processo de soldadura.

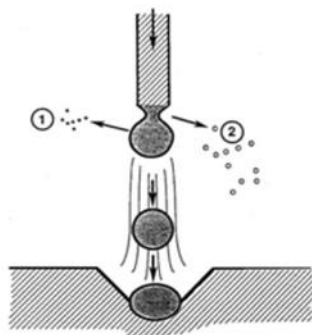


Figura 19 - Fatores responsáveis pela formação de fumos: 1) evaporação na ponta do eletrodo ou da gota; 2) salpicos incandescentes e também de alguma evaporação resultante da explosão do fio. Figura adaptada de [28].

Assim, dos estudos realizados até ao momento, pode concluir-se que, no processo de soldadura MAG, a taxa de formação de fumos aumenta com o aumento da temperatura e instabilidade do arco elétrico, com o componente ativo da mistura gasosa, com a condutividade térmica da mistura gasosa e com o aumento do volume das gotas de material. A quantidade de fumos libertada durante a soldadura é maior para misturas com dióxido de carbono comparativamente com misturas com oxigénio que tenham a mesma capacidade de oxidação [8,31].

Este tipo de características depende / varia consoante o modo de transferência de metal utilizado.

Tendo em consideração os modos de transferência do processo MIG/MAG foram criados modelos de previsão de formação de fumos tendo como ponto de partida as características da gota de soldadura, temperatura da superfície e a sua geometria [28].

Consoante o modo de transferência utilizado, o tamanho da gota vai variar (Figura 20). Variação essa que vai influenciar a taxa de formação de fumos [31], como se pode observar na figura seguinte.

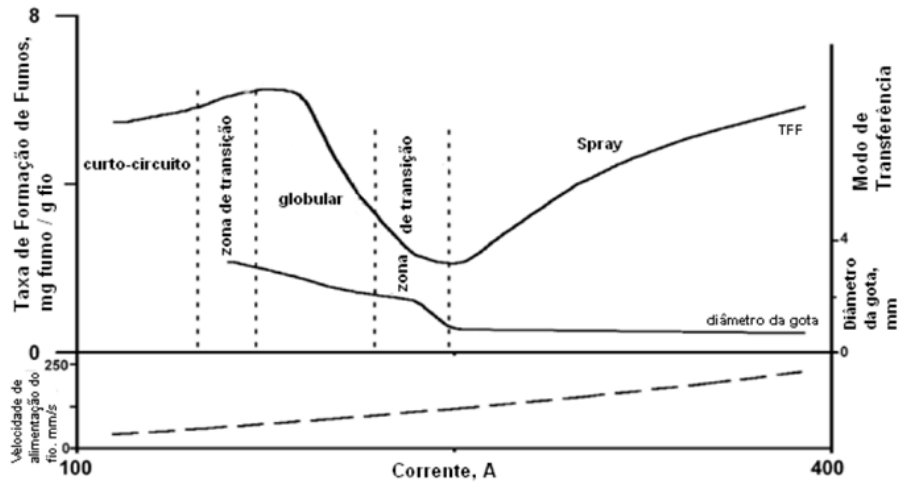


Figura 20 - Representação da taxa de formação de fumos, para os diferentes modos de transferência utilizando como gás de proteção a mistura de Ar + 4% de O₂ em aço carbono [26].

Como se pode observar na Figura 20, a taxa de variação de fumos aumenta até atingir o modo de transferência globular, devido ao aumento do diâmetro da gota e também ao aumento do calor transferido, já que estas estão menos tempo em contato com o elétrodo, tendo por isso menos tempo para crescer. Este facto leva a crer que a gota que tem uma maior temperatura vai transferir uma menor quantidade de calor. A gota vai ter uma menor temperatura, pois esta vai ter menos tempo de contato com o arco elétrico (menor calor transferido). Isto, porque devido às maiores correntes a atuar, as forças que “deslocam” a gota também vão ser maiores. Além disso, com um menor diâmetro da gota, a superfície de contacto com o elétrodo também vai ser menor e, assim, a transferência de calor é menor. Logo, a temperatura da gota é menor do que na transferência globular. Por fim observa-se um aumento da geração de fumos o que acontece devido a uma maior intensidade de soldadura. Como se pode ver observar no gráfico, assim que se atinge o modo de transferência por *spray*, o diâmetro da gota mantêm-se aproximadamente constante, e como a intensidade está a aumentar (maior taxa de depósito), o número de gotas têm que aumentar também, o que leva a um conseqüente aumento da emissão de fumos [39].

3.5.1.1. Formas de reduzir a emissão de fumos/Principais conclusões

No processo MIG/MAG uma forma de redução dos fumos, na fonte, pode ser controlar os fatores que influenciam a formação de fumos referidos anteriormente, a saber:

- ✓ Temperatura da gota;
- ✓ Composição do elétrodo;

- ✓ Composição do gás de proteção.

Assim, para que haja uma redução da gota na taxa de formação de fumos, a dimensão da gota e a sua temperatura terão que diminuir. Tais condições só aparecem no modo de transferência por *spray* ou numa zona de transição para *spray*. Contudo, na maioria dos casos tal não é possível, pois este tipo de transferência apresenta uma grande entrega térmica e nem todas as ligações requerem tais condições de soldadura [31]. Uma solução para melhorar a situação anterior será explorar outro tipo diferente de corrente, como por exemplo a corrente pulsada [28]. Quando não é possível a redução de fumos na fonte, há que apostar em sistemas alternativos para reduzir a quantidade de fumos no local de trabalho, como, por exemplo, a utilização de sistemas de extração de fumos entre outras medidas que serão referidas no capítulo VI.

De um modo geral, outras conclusões possíveis de tirar dos estudos efetuados, até ao momento, para a minimização dos fumos de soldadura pelo processo MIG/MAG são as seguintes [31]:

- ✓ Quanto maior for a estabilidade de transferência por curto-circuito, maior a penetração, e melhor acabamento dos grânulos, menor será a emissão de salpicos. Ou seja, uma maior estabilidade de transferência resulta numa menor quantidade de fumos libertados;
- ✓ Aquando da realização do processo é importante manter fixos os seguintes fatores: velocidade de alimentação do fio, a velocidade de soldadura e a tensão do fio;
- ✓ A taxa de formação de fumos e o tamanho das partículas neles presentes são dominadas pelo modo de transferência do metal, enquanto que a composição química das partículas depende da composição do arame, e não se altera significativamente, com a alteração do modo de transferência do metal;
- ✓ É conhecido que o Manganês está presente, em níveis detetáveis, quer neste processo como na maior parte dos processos de soldadura, o que se revela problemático devido às doenças de longa duração que provoca aquando da sua exposição.

3.5.2. Fumos Resultantes do Processo de Soldadura SER

Relativamente aos fumos de soldadura resultantes do processo SER, não existem tantos estudos como os relativos ao processo de soldadura MIG/MAG, embora se possam comparar com este, uma vez que ambos resultam em fumos emitidos por fusão. No entanto, em relação à geração de fumos na soldadura SER sabe-se que quanto maior for a intensidade de corrente e o arco elétrico, maior vai ser a geração de fumos, assim como que a escolha de eléctrodos vai ter um impacto direto na geração de fumos [10,26].

3.5.3. Fumos Resultantes do Processo de Soldadura TIG

Tomando como referência o processo MIG/MAG, e tratando-se também de um processo de fusão, conclui-se que o processo TIG comparado com este no que diz respeito à emissão de fumos, é o que forma uma menor quantidade. No entanto, é importante efetuar o seu estudo pormenorizado, em termos da sua composição química, bem como em função da utilização dos gases de proteção.

Em estudos realizados para os fumos emitidos pelos processos de soldadura TIG, em comparação com outros, pode-se concluir-se que, neste caso, são consideravelmente baixas as concentrações dos elementos constituintes dos fumos, mesmo para tempos de amostragem relativamente longos. Isto resultou numa redução dos limites de deteção absolutos dos diferentes elementos dos fumos de soldadura TIG, em especial quando a solubilidade dos metais em diferentes meios foi examinada. Os elementos dominantes dos fumos de soldadura para o processo TIG são o Fe, Mn, Cr, Ni e Si [39].

Apesar da taxa de emissão de fumos neste processo ser a mais baixa dos casos em estudo, é importante considerá-la, já que o objetivo deste trabalho é a implementação de medidas de melhoria para este processo.

3.5.4. Principais conclusões retiradas na emissão de fumos dos processos estudados

Os processos de soldadura MIG/MAG e SER são utilizados em cerca de 70 % dos trabalhos de soldadura e, nestes processos, a redução dos fumos pode ser obtida através da redução da temperatura do arco elétrico e da utilização de gases de proteção com a capacidade de condensar os fumos libertados, reduzindo, assim, a sua capacidade de dispersão e impedindo que estes se libertem do arco elétrico.

Para os processos de soldadura em estudo (MAG, SER e TIG) a ventilação e extração é, cada vez, mais uma forma eficaz de remoção de fumos. No entanto, a aplicação destes sistemas de ventilação nem sempre é fácil, o que acaba por tornar estes sistemas algo ineficientes. Muitas vezes os trabalhos de soldadura não são realizados em postos de trabalho fixos o que implica que os braços de recolha de fumos necessitam de ser flexíveis de modo a poderem ser reposicionados. O desconforto e a forma pouco prática de colocar estes extratores de fumos nos locais de trabalho fazem com que, muitas vezes, eles não sejam utilizados.

Existem equipamentos pessoais de proteção de fumos como sejam máscaras com alimentação de ar e filtros para fumos. No entanto, estes equipamentos ainda não possuem capacidade de filtrar as nanopartículas que são libertadas nos processos de soldadura [10,26,31].

Após exposição dos casos de estudo, e perante os trabalhos já realizados sobre a libertação de fumos e de nanopartículas, torna-se óbvia a necessidade de aprofundar estudos, de modo a permitir vir a dispor de um maior conhecimento sobre a relação entre os parâmetros operacionais dos processos de soldadura MAG, SER e TIG, e a quantidade, morfologia e composição química das nanopartículas libertadas.

Neste trabalho foram realizados ensaios experimentais, sobre estes processos, fazendo variar determinados parâmetros e fatores que ainda não haviam sido suficientemente estudados anteriormente. Na posse das conclusões retiradas dos mesmos, e após a realização de uma avaliação de risco, tem-se, como objetivo final, procurar encontrar medidas para ultrapassar as dificuldades atualmente existentes nestes processos, a este nível.

Os aspetos referidos neste parágrafo serão apresentados nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO IV – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4. Procedimento Experimental

Neste capítulo são apresentadas as técnicas e metodologias utilizadas para a avaliação das emissões de nanopartículas nos processos de soldadura em estudo (MAG, SER e TIG), bem como uma descrição dos equipamentos utilizados para recolha e análise de nanopartículas, o equipamento, as ferramentas utilizadas, as condições operatórias e os diferentes consumíveis que foram utilizados durante os ensaios relativos aos processos de soldadura em questão, de modo a procurar atingir os objetivos propostos.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT UNL. Todos os ensaios de soldadura foram realizados, com o sistema de extração de fumos (apresentado na Figura 21) em funcionamento. De notar que, por sua vez, encontravam-se a decorrer, no mesmo laboratório, outros trabalhos paralelos aos ensaios de soldadura aqui descritos, situação esta que é normal num laboratório de tecnologia mecânica e, igualmente, numa oficina de soldadura em ambiente de trabalho fabril.



Figura 21 - Espaço onde foram realizados os ensaios de soldadura e sistema de extração de fumos.

É importante referir que o processo de soldadura MIG/MAG tem a possibilidade de ser automatizado permitindo assim controlar os parâmetros da soldadura com maior precisão. Para tal, existem inúmeros sistemas de automatização deste processo, no entanto, os que podem ser encontrados no mercado comportam custos muito elevados. Assim, para os primeiros ensaios realizados segundo este processo foi utilizada uma mesa de soldadura (Figura 22) concebida no Laboratório de Soldadura do DEMI da FCT/UNL e também já utilizada num

trabalho anterior sobre a mesma temática (Guerreiro, Carlos Leonel Farinha, “Avaliação da emissão de nanopartículas de processo de soldadura por fusão”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, FCT-UNL, Caparica, 2012) [26], mas com condições operatórias distintas.

Esta é composta por uma estrutura metálica de tubos quadrados como perfil. Numa das partes superiores da estrutura metálica, existe uma guia linear com uma correia, cujo movimento é acionado por um motor passo a passo Astrosyn MY23 HS1-5 [26].

Para proteger a guia linear dos salpicos, a mesa possui uma manta contrafogo. Através de alterações efetuadas na máquina de soldadura, o acionamento da tocha é realizado por computador. O circuito elétrico é fechado por um relé elétrico, que é controlado através do computador, acionando assim a tocha através deste comando.

Todo o controlo da mesa de soldadura é efetuado por uma ferramenta informática o Labview, com o auxílio de controladores e módulos eletrónicos [26].



Figura 22 - Mesa de soldadura desenvolvida no DEMI, FCT/ UNL [26].

Esta mesa de soldadura só foi utilizada nos ensaios de soldadura MAG com aço ao carbono (onde os parâmetros eram de fácil ajuste e concordantes), e nos restantes ensaios optou-se pela realização de soldadura manual para o processo MAG, bem como para os outros dois processos em estudo (SER e TIG). Esta opção permitiu-nos obter um melhor controlo dos parâmetros operatórios, bem como, a realização da recolha das nanopartículas no interior da máscara do soldador, no que diz respeito a uma aproximação da realidade (ambiente profissional) relativamente à emissão *versus* exposição às nanopartículas emitidas nos diferentes processos, conseguindo-se deste modo uma análise quantitativa das emissões com maior precisão.

Face ao exposto, o procedimento experimental executado pretende atingir os seguintes objetivos:

- ✓ Realização de ensaios de soldadura por fusão segundo os processos de soldadura MAG, SER e TIG com diferentes condições operatórias;
- ✓ Recolha e caracterização de partículas, nomeadamente nanopartículas, resultantes de diversas condições processuais em soldadura por fusão de aços.

4.1. Equipamentos para recolha, medição e análise de nanopartículas

Havendo um crescente desenvolvimento comercial de materiais em nanoescala, existem estruturas e dispositivos que aproveitam ao máximo as suas propriedades únicas quer sejam físicas, químicas, biológicas e comportamentais. Como já referido neste trabalho, os riscos de saúde ocupacional associados com a fabricação e utilização de nanopartículas ainda não são claramente entendidos. Os trabalhadores podem ficar expostos a nanopartículas através de inalação, em níveis que podem exceder, em muito, as concentrações ambientais [41].

A determinação dos limites de exposição no local de trabalho tem-se baseado na massa das partículas, mas um número crescente de especialistas considera que a área de superfície, em vez da massa, deve ser a considerada para avaliação da exposição de nanopartículas e da sua dosagem. Uma vez que, as nanopartículas têm muito mais área de superfície do que massa equivalente de partículas, vê-se muito aumentada a probabilidade de elas poderem reagir com o corpo humano (*Shanbhag et al*, 1994; *Oberdörster*, 1996; *Donaldson et al*, 1998). Como resultado, a avaliação das condições de trabalho, e da exposição individual, baseada na área superficial, têm vindo a ter um interesse e um desenvolvimento crescente. [41].

Tendo como objetivo uma caracterização completa dos processos e das nanopartículas emitidas, foram selecionados dois equipamentos distintos: um para medição em tempo real (1 segundo de tempo de resposta) da deposição na zona alveolar ou traqueobrônquial e outro para recolha de partículas para posterior análise microscópica.

Estes dois equipamentos têm a seguinte designação:

- ✓ Equipamento NSAM (*Nanoparticle Surface Area Monitor*) - TSI, Modelo 3550;
- ✓ Equipamento NSA (*Nanometer Aerosol Sampler*), TSI, Modelo 3089.

Posteriormente utilizou-se um microscópio eletrónico de transmissão (TEM – Modelo Hitachi H-8100 II) para a análise da morfologia e composição das nanopartículas recolhidas nos ensaios.

De seguida, apresenta-se uma breve explicação do funcionamento de cada um destes equipamentos.

4.1.1. Equipamento NSAM (*Nanoparticle Surface Area Monitor*), TSI, Modelo 3550

“The Nanoparticle Surface Area Monitor reports the surface area of inhaled particles deposited in the lung” [41].

O equipamento utilizado na avaliação da exposição a nanopartículas, foi um medidor NSAM (*Nanoparticle Surface Area Monitor*) TSI, Modelo 3550. Este equipamento indica a área superficial de partículas depositadas no pulmão humano expressas como micrómetros quadrados por centímetro cúbico de ar ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), correspondendo às regiões traqueobrônquial (TB) ou alveolar (A) do pulmão. O funcionamento do equipamento baseia-se na difusão de cargas eletrostáticas depositadas no aerossol de partículas que é carregado, seguindo-se a sua deteção por um eletrómetro. A amostra é colhida através de uma bomba após passagem num ciclone que retém as partículas com dimensões superiores a 1 μm . Após estas fases o fluxo é dividido em dois fluxos: um com um caudal de 1 l/min passa por um filtro de carbono, um filtro HEPA, um ionizador que induz cargas positivas nos iões e que por fim vai para uma câmara de mistura. O outro fluxo com um caudal de 1.5 l/min segue logo para a câmara de mistura onde se mistura com o fluxo ionizado, onde os iões em excesso são removidos por um sistema de aprisionamento de iões. A voltagem do sistema de aprisionamento de iões pode ser alterada de modo a poder-se optar entre o modo traqueobrônquial e a alveolar.

Para avaliação da exposição a nanopartículas, o equipamento é operado no modo “A”, correspondendo à deposição de partículas na região alveolar do pulmão de um trabalhador de referência de acordo com os modelos da ICRP e da ACGIH, referidos anteriormente [20,41].

O sistema é automatizado e a análise dos dados é feita por computador com um *software* específico da TSI.

Na Figura 23 e na Figura 24 apresenta-se uma fotografia do monitor e o esquema de funcionamento do equipamento, respetivamente.



Figura 23 - NSAM, monitor de área de superfície de nanopartículas [42].

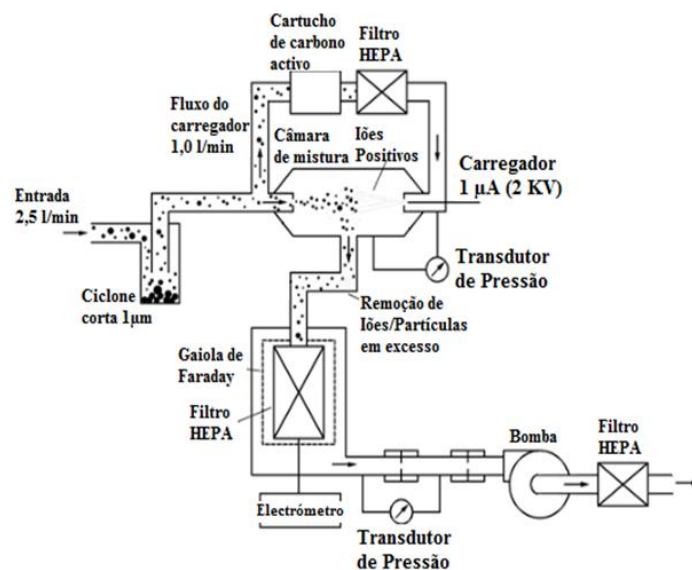


Figura 24 - Esquema de funcionamento do NSAM [20].

Com recurso ao aparelho NSAM, diretamente ligado ao sistema de aquisição de dados, foi possível obter as áreas de superfície das nanopartículas com capacidade para se depositarem nos pulmões. O aparelho foi colocado no modo (A), isto é, o modo que avalia a capacidade das nanopartículas se depositarem na zona alveolar.

O NSAM é então ligado ao computador, e através do *software* fornecido pela TSI, procedeu-se a calibração do aparelho e verificou-se se não havia erros na mesma. Após esta verificação não tem sido detetado nenhum erro, o aparelho está pronto para funcionar corretamente.

Foram definidas medições de 12 em 12 segundos, de modo a evitar possíveis saturações no aparelho. À medida que os cordões de soldadura eram realizados, efetuavam-se as leituras com o NSAM, sendo depois registadas e gravadas através do sistema de aquisição de dados.

Entre soldaduras, esperou-se um determinado tempo, até que o aparelho atingisse a linha de base, de maneira a não influenciar os resultados dos ensaios seguintes.

É importante referir que o analisador de NSAM neste trabalho, para os três processos, estava ligado a um tubo de colheita colocado no interior da máscara do trabalhador excetuando o caso dos ensaios para o processo MAG – aço carbono (em que foi colocado na tocha de soldadura) como já referido anteriormente, e como se representa esquematicamente na Figura 25.

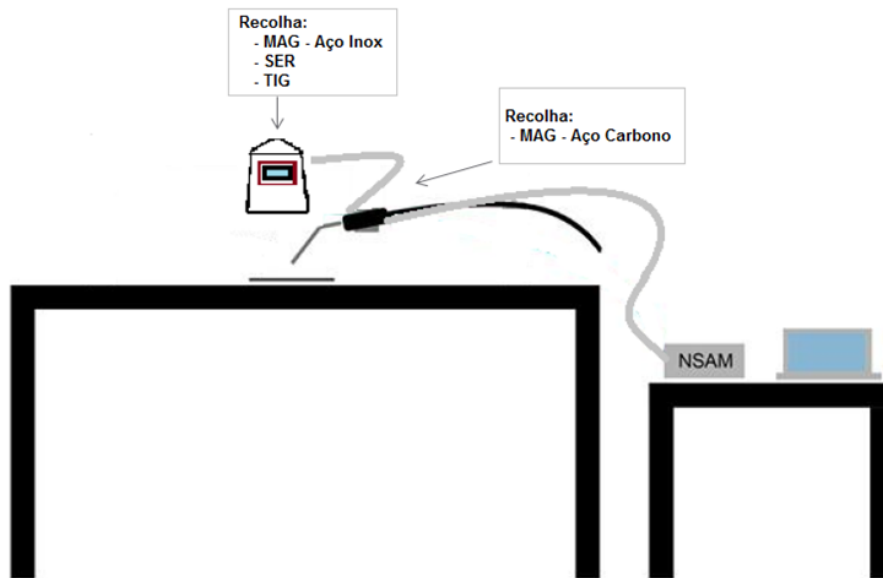


Figura 25 - Esquema demonstrativo dos pontos de recolha para os diferentes processos de soldadura.

4.1.2. Equipamento NSA (*Nanometer Aerosol Sampler*), TSI, Modelo 3089 (Para Colheita de Nanopartículas em Grelhas Metálicas)

Para uma posterior análise das nanopartículas em suspensão utilizou-se um equipamento de recolha de amostras de nanopartículas NAS, modelo 3089 da TSI (Figura 26), que capta as partículas (com dimensões entre 2 e 100 nm) através de um fluxo de ar para uma grelha fixada a um precipitador electrostático. Neste estudo as grelhas utilizadas foram grelhas de cobre fixadas ao precipitador por uma fita de carbono, específicos para análise TEM, substratos para AFM, ou lamelas de vidro.



Figura 26 - Amostrador de aerossóis nanométrico (*Nanometer Aerosol Sampler Model 3089*) [43].

As partículas em suspensão no ar são recolhidas através de uma bomba localizada no interior do equipamento, em que as partículas são atraídas através de um eléctrodo para o local onde se encontra o substrato de recolha, e o ar aspirado é, de seguida, bombeado para o exterior.

Para facilitar a preparação das amostras optou-se pela utilização de grelhas de cobre, as quais são consideradas mais adequadas para este tipo de recolha e análise, e não requerem uma posterior preparação. As grelhas utilizadas são grelhas de cobre com 3 mm de diâmetro revestidas a TEDLAR [43,44].

Na Figura 27 apresenta-se um esquema do princípio de funcionamento do equipamento NAS.

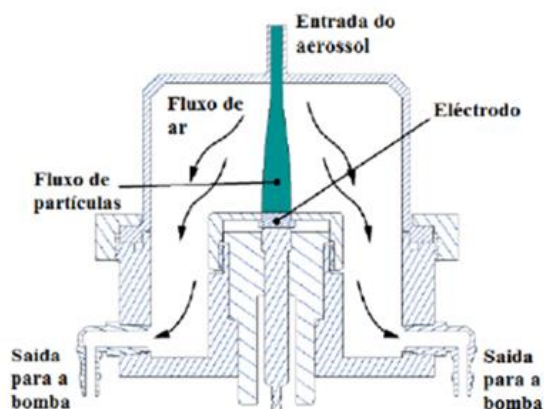


Figura 27 - Princípio de funcionamento do NAS [20].

Para o trabalho experimental em questão o equipamento de recolha de partículas, NAS, foi colocado a uma distância constante durante todos os ensaios, mudando-se apenas a grelha de recolha quando se mudavam os consumíveis e o processo de soldadura, por forma a poder analisar-se a influência das misturas gasosas bem como a influência da natureza dos consumíveis na composição e na morfologia das partículas libertadas, consoante o processo de soldadura em estudo.

No NAS os parâmetros que podem ser controlados são o fluxo, com que o equipamento recolhe as partículas suspensas no ar, e a voltagem aplicada no precipitador electrostático. Os parâmetros utilizados foram os mesmos em todos os ensaios, sendo a tensão de 5,5 V e o fluxo de 2 l/min.

Na Figura 28 pode observar-se como a grelha é colocada no NAS, assim como a fita de carbono que fixa a grelha ao precipitador electrostático. O ponto de recolha situava-se na parte esquerda da bancada onde se executaram os processos de soldadura, no sentido/direção do soldador (Figura 29).



Figura 28 - Grelha de cobre no NAS.

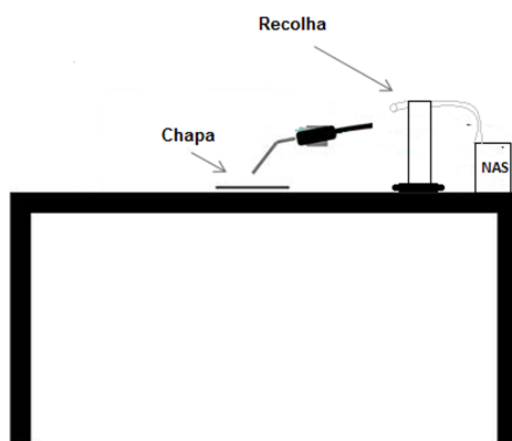


Figura 29 - Esquema demonstrativo do ponto de recolha das nanopartículas libertadas.

As amostras recolhidas foram posteriormente analisadas por microscopia eletrónica de transmissão (TEM), conforme se descreve seguidamente.

4.1.3. Equipamento TEM (*Transmission Electron Microscope*), HITACHI, Modelo H-8100-II

O microscópio eletrónico de transmissão TEM utilizado foi um Hitachi, modelo H-8100 II de 200kV, disponível no IST - *MicroLab, Electron Microscopy Laboratory* (ICEM/IST). Este equipamento foi utilizado na observação da morfologia das nanopartículas, conjuntamente com um sistema EDS (*Energy Dispersion X-Ray Spectrometry*) para a determinação da composição química elementar das nanopartículas das amostras recolhidas.

Este equipamento é constituído por um canhão de eletrões de emissão térmica, equipado com um sistema de microanálise por espectrometria de dispersão de energia de

raios-X (EDS), com detetor de elementos leves, e com aquisição digital de imagem através de uma câmara [45].

Na figura seguinte apresentam-se imagens do microscópio eletrônico de transmissão, com sistema de EDS acoplado, que foi utilizado no presente trabalho.



Figura 30 - Microscópio eletrônico de transmissão Hitachi H-8100 II [45].

4.2. Equipamentos e Materiais/Consumíveis utilizados nos Processos de Soldadura

4.2.1. Máquina de Soldar *ProMig 501* da *Kemppi*

O equipamento utilizado para este trabalho foi uma máquina de soldadura *ProMig 501* da *Kemppi*, juntamente com uma fonte de alimentação *Pro3200 Evolution* também da mesma marca.

Este equipamento foi utilizado para efetuar soldaduras segundo os três processos em estudo: MAG, SER e TIG. Em soldadura convencional, escolheram-se os parâmetros de soldadura através da seleção da velocidade de alimentação de fio. Em MAG sinérgico os parâmetros são otimizados em função do material a soldar e do diâmetro do fio sólido utilizado. A tensão de soldadura é ajustada automaticamente pelo equipamento de acordo com a altura de arco elétrico [46].



Figura 31 - Máquina de soldar *ProMig 501* (painel de funções do equipamento/parâmetros de controlo de operação). Imagem adaptada de [46].

A fonte de alimentação *Pro3200 Evolution* é baseada na tecnologia de inversor (*inverter*), tecnologia que, ao longo do tempo tem vindo a ganhar espaço no mundo da soldadura, pois apresenta as seguintes vantagens [46]:

- ✓ Características dinâmicas muito superiores à dos equipamentos convencionais, que lhes permite reagirem mais rapidamente às diferentes situações do arco elétrico;
- ✓ Facilidade na regulação de parâmetros de soldadura;
- ✓ Capacidade de comutar a característica externa estática possibilitando a sua utilização em vários processo de soldadura;
- ✓ Capacidade de funcionar com correntes pulsadas e em modo sinérgico.

4.2.2. Tochas de Soldadura

A tocha existente no equipamento de soldar do laboratório é uma tocha manual da *Kemppi MMT42* como se ilustra na Figura 32, que foi utilizada no processo de soldadura MAG.

O acionamento da tocha de soldar é feito através de um gatilho que, ao ser pressionado, fecha um circuito elétrico e aciona a libertação do gás de proteção e o alimentador do fio do eletrodo. A solução encontrada para o acionamento da tocha foi realizar o fecho desse circuito elétrico diretamente na máquina através de um relé elétrico que, ao ser ativado por um controlador ligado a um computador, aciona a tocha. Foi necessário colocar um interruptor para se poder optar por soldadura manual ou por soldadura automática. Foi também colocada uma ficha de ligação, para se poder fazer a

ativação do relé colocado na máquina através dos controladores da *National Instruments* [26].



Figura 32 - Tocha MIG/MAG MMT42 [26].

Relativamente ao processo de soldadura SER, não há tocha, sendo apenas utilizado um cabo de massa ligado à corrente.

Por último, no que se refere, ao processo de soldadura TIG, foi utilizada uma tocha simples, adequada á soldadura pelo processo TIG que se apresenta na Figura 33.



Figura 33 - Tocha utilizada para soldadura TIG.

4.2.3. Materiais Utilizados

As chapas utilizadas nos ensaios de soldadura nos três processos (MAG, SER e TIG) tiveram por base dois materiais diferentes: Aço ao Carbono e Aço Inox Austenítico.

As chapas de material de base de aço ao carbono utilizadas, de acordo com a norma EN 10025, designam-se por S235 JR. Este é conhecido por ser um aço estrutural bastante utilizado no sector da construção, obras públicas e construção mecânica.

O aço inoxidável escolhido para este trabalho, segundo o código ASME, designa-se por um AISI 304. É um aço inoxidável austenítico muito utilizado na indústria química e

alimentar, já que este material apresenta excelentes propriedades em termos de resistência à corrosão.

A composição química das chapas utilizadas encontra-se indicada na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química das chapas utilizadas.

Placas	Composição Química do material base (% em peso)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Aço ao Carbono	0,017	-	1,40	0,035	0,035	-	-	-
Aço Inox Austenítico	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	0,030	8,0-10,5	18-20	0,10

Para o processo de soldadura MAG, foram utilizados consumíveis com diferentes finalidades:

- ✓ O material de adição utilizado para a deposição de cordões de soldadura na chapa de aço ao carbono, foi um fio sólido designado por AWS 5.18 ER70S-6 de acordo com o código ASME, com um diâmetro de 1 mm. Este consumível foi desenvolvido, com a finalidade de proporcionar soldaduras de alta qualidade;
- ✓ A escolha do material de adição utilizado para a deposição de cordões de soldadura nas chapas de aço inoxidável austenítico, recaiu no fio sólido com a designação, AWS ER316 LSi de acordo com o código ASME, com um diâmetro de 0,8 mm;
- ✓ Os consumíveis utilizados no processo MAG, são classificados segundo a Norma AWS A5.18-79 - Aços não Ligados, tendo a sua nomenclatura o seguinte significado:

Exemplo (ER 70 S – 6):

- **ER** (Eléctrodo/Fio/Vareta);
- **70** (Tensão de Ruptura x 1.000 psi);
- **S** (Fio Sólido);
- **6** (Gás, Composição Química).

Na Tabela 10 e na Tabela 11, encontram-se indicadas as composições químicas dos materiais de adição referidos anteriormente.

Tabela 10 - Eléctrodo (ER 70S-6) - para soldar aço ao carbono [47].

Elemento Químico	Teor (% em peso)
C	0,06-0,15
Mn	1,4-1,85
Si	0,8-1,15
P	0,025
S	0,035
Ni	0,15
Cr	0,15
Mo	0,15
V	0,3
Cu	0,5

Tabela 11 - Eléctrodo (ER 316 LSI) para soldar o aço inoxidável austenítico [48].

Elemento Químico	Teor (% em peso)
C	0,03 max.
Mn	1,0-2,5
Si	0,65-1,00
P	0,03 max.
S	0,03 max.
Ni	11,0-14,0
Cr	18,0-20,0
Mo	2,0-3,0
N	Não especificado
Cu	0,75 max.

Ainda no que diz respeito, ao processo MAG foram utilizados Gases de Protecção. No total foram seleccionadas, cinco misturas gasosas e um gás composto por 100% de dióxido de carbono, para efetuar a deposição de cordões de soldadura nas chapas disponíveis.

A principal razão que levou à escolha destas misturas, foi a grande utilização das mesmas que se verifica na indústria.

As misturas gasosas utilizadas foram as seguintes:

- Arcal 21 (90% Árgon e 10% CO₂)
- Atal 5 (82% Árgon e 18% CO₂)
- Dióxido de Carbono (100% CO₂)
- Arcal 12 (95% Árgon e 5% CO₂)
- Arcal 121 (81% Árgon; 18% Hélio e 1% CO₂)

- Arcal 129 (91% Árgon; 5% Hélio; 2% CO₂ e 2% Azoto)

As três primeiras foram utilizadas na deposição de cordões de soldadura nas chapas de aço ao carbono, e as três últimas nas chapas de aço inoxidável austenítico.

A composição química destes gases, assim como a sua utilização, encontra-se indicada na Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12 - Gases de proteção utilizados no processo MAG para soldar aço ao carbono.

Gases	Teor (% volume)	Utilização/Características
Arcal 21	90% Árgon e 10% CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - É indicada para soldadura de aços ao carbono, e foi desenvolvida para preencher os requisitos mais exigentes de qualidade em processos de soldadura por MAG; - É possível aplicar em todas as posições de soldadura, pode ser aplicada em soldadura manual, automática e robotizada. Apresenta um arco estável e macio, boa molhagem e baixas emissões de fumos, mesmo em transferência globular.
Atal 5	82% Árgon e 18% CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Destinada à soldadura de aços ao carbono; - Utilizada em todos os modos de transferência; - É aplicada para todas as posições de soldadura e pode ser aplicada em soldadura manual ou automatizada; - O seu teor de dióxido de carbono permite-lhe obter boas penetrações.
CO ₂	100% CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizada em aços não ligados e aços fracamente ligados; - Este gás apresenta uma elevada emissão de fumos e de projeção de metal fundido (salpicos).

Tabela 13 - Gases de proteção utilizados no processo MAG para soldar aço inoxidável austenítico.

Gases	Teor (% volume)	Utilização/Características
Arcal 129	91% Árgon; 5% Hélio; 2% CO ₂ e 2% Azoto	- O controlo rigoroso do teor de azoto, assegura excelentes propriedades de soldadura, devido ao seu teor específico de azoto, origina soldaduras com melhores propriedades mecânicas, quando utilizado na soldadura de aços inoxidáveis austeníticos.
Arcal 121	81% Árgon; 18% Hélio e 1% CO ₂	Esta mistura gasosa distingue-se por apresentar emissões reduzidas de fumos e baixo nível de projeções, excelente molhagem e penetração.
Arcal 12	95% Árgon e 5% CO ₂	- Arco estável e macio, baixo nível de projeções, boa molhagem e bom aspeto superficial do cordão de soldadura; - Sendo uma mistura com uma pequena percentagem de dióxido de carbono, apresenta uma baixa taxa de emissão de fumos.

Relativamente ao processo de soldadura SER, foram utilizados elétrodos de três famílias distintas: básicos, rútilicos e celulósicos, sendo sempre utilizado mais do que um eletrodo básico.

Para as classificações de elétrodos E6010 (celulósico) não existem requisitos de composição química. O eletrodo rútilico E6013, utilizado para aços de médio e baixo teor

de carbono, tem um revestimento composto por silicatos de potássio, com um teor médio de hidrogénio. Os dois elétrodos básicos utilizados, o elétrodo E7018-1 e o elétrodo E7018, têm um revestimento composto por silicatos de potássio e pó de ferro, com um teor de hidrogénio baixo.

Os consumíveis/elétrodos utilizados no processo SER, são classificados segundo a Norma AWS A5.1-96 - Aços não Ligados, tendo a sua nomenclatura o seguinte significado:

Exemplo (E - 70 1 8):

- **E** (Elétrodo);
- **70** (Tensão de Ruptura x 1.000 psi);
- **1** (Posições de Soldadura);
- **8** (Tipo de revestimento, Corrente).

A composição química referente ao material depositado, por estes elétrodos, encontra-se indicada na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição química do material depositado pelos elétrodos usados no processo de soldadura ser [48].

Elementos	Teor em valores máximos (% em peso)	
	E6013	E7018 / E7018-1 ¹
C	0,20	0,15
Mn	1,20	1,60
Si	1,0	0,75
P	Não especificado	0,035
Ni	0,30	0,30
Cr	0,20	0,20
Mo	0,30	0,30
V	0,08	0,08
S	Não especificado	0,035

Por último, para o processo de soldadura TIG, aquando da soldadura de aço inox austenítico foi utilizado como material de adição, uma vareta do tipo ER316LSi. Já, no caso da soldadura de aço ao carbono foi utilizada uma vareta de aço ao carbono, do tipo ER 70S-3 em que a sua composição química se encontra indicada na tabela seguinte:

¹ O sufixo 1 neste elétrodo significa que o conteúdo de manganês se encontra muito próximo do máximo (1,60%).

Tabela 15 - Composição química do material depositado na soldadura de aço ao carbono com o consumível ER 70S-3.

Elemento Químico	Teor (% em peso)
C	0,06-0,15
Mn	0,90-1,40
Si	0,45-0,75
P	0,025
S	0,035
Ni	0,15
Cr	0,15
Mo	0,15
V	0,03
Cu	0,5

A composição química referente ao consumível utilizado na soldadura de aço inox austenítico (ER 316LSi) encontra-se indicada na Tabela 11, sendo idêntica ao que foi utilizado em MAG.

Ainda no que diz respeito ao processo TIG, foi utilizado como gás de proteção o Árgon (100%), da série Arcal, modelo 1, da *Air Liquide*.

4.3. Condições Operatórias

4.3.1. Processo MAG

Realizaram-se cordões de soldadura, para o processo de soldadura MAG, com parâmetros pré-definidos, e outros ajustados às condições pretendidas. Estes ensaios foram realizados para dois tipos de materiais diferentes, o aço ao carbono e aço inox austenítico, como referido anteriormente. A alteração destas condições, possibilitou a realização de diversas recolhas de amostras de nanopartículas emitidas e, posteriormente, a sua análise e caracterização.

O tempo de execução da soldadura foi medido com recurso a um cronómetro, registando-se, assim, os valores obtidos.

Também é importante referir que, para cada processo de soldadura em estudo, foram sempre realizadas uma ou mais repetições (réplicas) por forma a verificar se os dados obtidos eram consistentes.

Para os materiais em questão, foram efetuados três conjuntos de ensaios, de modo a obter-se os modos de transferência pretendidos, variando o gás de proteção.

Foram escolhidas várias velocidades de alimentação de fio para os vários ensaios e, em função da velocidade de alimentação de fio selecionada, a tensão foi ajustada automaticamente pela fonte. Procurou-se escolher velocidades de alimentação de fio semelhantes para cada mistura gasosa, para se poderem estudar as emissões também em função dos gases de soldadura utilizados.

O fluxo do gás e o comprimento do cordão foram fixados, em um débito de gás de 15 l/min e um comprimento de cordão de 210 mm.

Para o processo de soldadura MAG também foram determinados/calculados dois parâmetros operatórios sendo um a entrega térmica (ET), (que depende da tensão, da intensidade e da velocidade de soldadura), e o outro a velocidade de soldadura (que depende do tamanho do cordão em função do tempo de soldadura). Estes parâmetros foram determinados com o objetivo de procurar perceber, se os parâmetros em questão influenciam diretamente a emissão das nanopartículas ou não.

❖ A Velocidade de Soldadura pode ser calculada do seguinte modo:

$$v = \frac{c}{t}$$

em que:

- ✓ v é a Velocidade de Soldadura (mm/min)
- ✓ c é o comprimento do cordão (mm)
- ✓ t é o tempo de Soldadura (s)

❖ A Entrega Térmica pode ser calculada do seguinte modo:

$$ET = \frac{V \times I \times 60}{v \times 1000 \times \eta}$$

em que:

- ✓ ET é a entrega térmica em kJ/mm
- ✓ V é a tensão em Volts (V)
- ✓ I é a intensidade em Amperes (A)
- ✓ v é a Velocidade de Soldadura (mm/min)
- ✓ η é o rendimento(processo MAG - $\eta=0,8$)

De seguida indicam-se os parâmetros de soldadura mais relevantes utilizados para a soldadura do material de base Aço ao Carbono bem como, para a soldadura do material de base Aço Inox Austenítico, para os ensaios selecionados para o tratamento de dados neste trabalho.

A Tabela 16 indica os parâmetros utilizados para os ensaios, no que diz respeito ao material de base aço ao carbono (S235 JR), recorrendo a um fio sólido ER 70S-6 com um diâmetro de 1 mm.

Tabela 16 - Parâmetros de soldadura utilizados para o Aço ao Carbono.

Arcal 21 (90% árgon e 10% CO₂)			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	4,0	6,3	11,2
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Atal 5 (82% árgon e 18% CO₂)			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	4,0	6,3	-
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i> ²
100 % CO₂			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5,0	7,5	-
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i> ²

A Tabela 17 indica os parâmetros de soldadura utilizados na deposição dos cordões sobre o material de base aço inoxidável austenítico (AISI 304) utilizando um fio sólido ER 316 LSi com um diâmetro de 0,8 mm.

² Não foi possível atingir o modo de transferência por *Spray*, dado que, devido à percentagem elevada de dióxido de carbono presente na mistura gasosa, tornou-se muito difícil atingir este modo de transferência, o que se revela mesmo impossível de atingir a partir de mais do que 15 % de dióxido de carbono [6].

Tabela 17 - Parâmetros de soldadura utilizados para o Aço Inox Austenítico.

Arcal 129 (91% árgon; 5% hélio; 2% CO₂ e 2% de azoto)			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	6,0	7,0	9,8
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Arcal 121 (81% árgon; 18% He e 1% CO₂)			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5,0	7,0	9,0
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Arcal 12 (95% árgon e 5% CO₂)			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5,0	7,0	9,0
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	-

4.3.2. Processo SER

Os cordões de soldadura do processo SER foram realizados manualmente segundo parâmetros previamente definidos para a recolha de amostras e posterior análise e caracterização das nanopartículas libertadas.

Os ensaios foram realizados com sistema de extração de fumos a funcionar (Figura 21), tendo sido, por vezes, realizados em simultâneo com outros trabalhos normais que decorrem num laboratório de tecnologia mecânica, o que acontece também num ambiente de trabalho fabril.

Para cada ensaio, utilizou-se um valor de intensidade de corrente constante, que foi inserida no módulo digital da máquina de soldadura. Com o auxílio de uma função aí existente, calculou-se, posteriormente, a tensão de arco média desse ensaio. Ao longo de cada ensaio foi medido o tempo de soldadura com um cronómetro e, por fim, procedeu-se à medição do comprimento do cordão de soldadura.

Para os ensaios SER, foram utilizados 4 tipos de elétrodos, com espessuras diferentes, perfazendo um total de 6 elétrodos, como já referido anteriormente. Cada ensaio teve uma réplica para se obterem dados mais consistentes.

Nas Tabela 18, Tabela 19 e na Tabela 20 apresenta-se a planificação dos ensaios realizados para os diferentes elétrodos revestidos, em que se incluem, também, os diferentes parâmetros associados a cada ensaio.

Tabela 18 - Parâmetros de soldadura utilizados para o elétrodo E7018.

Parâmetros				
Elétrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E7018	1.1	140	4	350
	2.1	160		
	3.1	180		
	1.2	140		
	2.2	160		
	3.2	180		

Tabela 19 - Parâmetros de soldadura utilizados para o eletrodo E7018-1.

Parâmetros				
Eléctrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E7018-1	1.1	70	2,5	350
	2.1	80		
	3.1	90		
	1.2	70		
	2.2	80		
	3.2	90		
	1.1	100	3,2	
	2.1	120		
	3.1	135		
	1.2	100		
	2.2	120		
	3.2	135		
	1.1	140	4,0	
	2.1	160		
	3.1	180		
1.2	140			
2.2	160			
3.2	180			

Tabela 20 - Parâmetros de soldadura utilizados para o elétrodo E6013.

Parâmetros				
Elétrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E6013	1.1	70	4	350
	2.1	80		
	3.1	90		
	1.2	70		
	2.2	80		
	3.2	90		

De notar que a terminação “2”, em cada ensaio, corresponde à segunda réplica efetuada.

4.3.3. Processo TIG

Do mesmo modo que em alguns processos referidos anteriormente, os cordões de soldadura efetuados com o processo TIG foram realizados manualmente com parâmetros previamente definidos para a recolha de amostras e posterior análise e caracterização das nanopartículas libertadas.

Os ensaios foram realizados com sistema de extração de fumos em funcionamento (Figura 21) do mesmo modo que para os processos anteriores. Similarmente foram, por vezes, realizados em simultâneo com outros trabalhos normais num laboratório de tecnologia mecânica, o que acontece também num ambiente de trabalho fabril.

Como referido anteriormente foram realizados ensaios para dois materiais diferentes a soldar: para aço ao carbono e para aço inox austenítico. Para cada ensaio foi estabelecida uma intensidade de corrente constante, fazendo-se o cálculo da tensão na máquina de soldadura, com uma função que efetua uma média aritmética dos valores de tensão utilizados, para cada cordão de soldadura. Estabeleceu-se um tempo fixo para se obterem resultados o mais concordantes possíveis, dado que não existe um limite físico ao comprimento do cordão realizado sem material de adição. Seguidamente, mediu-se o comprimento do cordão. No que diz respeito aos consumíveis foi utilizado como gás de proteção o Árgon, bem como adição de material, ou seja, alguns ensaios foram realizados com material de adição constituído por varetas de aço ao carbono e varetas aço inox

austenítico, tendo-se que esta utilização dependia do material a soldar. Também foram efetuados ensaios para as diferentes chapas sem adição de material.

Nas tabelas seguintes indica-se a planificação dos ensaios realizados para TIG: com aço ao carbono na Tabela 21, e na Tabela 22 os ensaios com aço inoxidável, respetivamente.

Tabela 21 - Parâmetros de soldadura utilizados para o processo TIG com aço ao carbono.

Parâmetros			
Ensaio	Material Base	Material de Adição	Intensidade (A)
1	Aço ao carbono	Aço ao carbono	75
			90
			110
2			75
			90
			110
1	Aço ao carbono	Sem material de adição	75
			90
			110
2			75
			90
			110

Tabela 22 - Parâmetros de soldadura utilizados para o processo TIG com aço inox austenítico.

Parâmetros			
Ensaio	Material Base	Material de Adição	Intensidade (A)
1	Aço inoxidável	Aço inoxidável	75
			90
			110
2			75
			90
			110
1	Aço inoxidável	Sem material de adição	75
			90
			110
2			75
			90
			110

CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se, analisam-se e discutem-se os resultados obtidos. Para além dos parâmetros apresentados no capítulo anterior, é neste capítulo que são descritos os ensaios de quantificação das emissões de nanopartículas, bem como a tentativa de os correlacionar com alguns parâmetros característicos dos processos de soldadura.

Apresentam-se, ainda, os resultados das caracterizações das nanopartículas recolhidas por análise TEM.

Para tal, foram selecionados os ensaios mais representativos, ou seja, apresentam-se os ensaios que resultaram em maiores emissões de nanopartículas, em correlação com outros parâmetros que influenciam a sua emissão de modo a poder simplificar a posterior comparação entre as condições de ensaio e os diferentes processos de soldadura.

Como referido no capítulo anterior, as medições foram realizadas utilizando o analisador NSAM 3550 para cada caso em estudo, tendo o tubo de recolha sido colocado dentro da máscara do soldador, excetuando para as medições realizadas para o aço ao carbono. Este equipamento encontrava-se a efetuar medições em contínuo estando configurado para obter valores com um intervalo de 12 segundos.

Dado ao elevado número de resultados optou-se por fazer uma representação gráfica da área de superfície das partículas por volume pulmonar em função do tempo de soldadura. Para melhor visualização dos dados obtidos, decidiu-se fazer uma integração das curvas obtidas, apresentando-se, assim, a área superficial depositada acumulada, durante o período de integração. Dividindo esta área acumulada pelo tempo de duração da análise, obtêm-se os valores médios para cada ensaio, podendo estes ser comparados mais facilmente com os restantes ensaios.

Com base nos valores obtidos, traçaram-se gráficos da área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade, por forma a permitir estudar a relação entre a emissão de nanopartículas e a intensidade de corrente utilizada.

Estes procedimentos foram estabelecidos, de modo a conseguir perceber quais os processos e quais as condições operacionais mais problemáticas, o que permitirá vir posteriormente a trabalhar no sentido de adotar medidas que possam minimizar a emissão das nanopartículas, ou seja, reduzindo a exposição ocupacional do trabalhador.

Este capítulo apresenta a seguinte informação:

- ✓ Leituras realizadas pelo equipamento NSAM para os processos de soldadura MAG, SER TIG, e eventuais correlações entre eles;
- ✓ Imagens de microscopia eletrónica e análise por EDS das partículas recolhidas pelo NAS para os diferentes processos de soldadura em estudo.

Devido ao elevado número de ensaios realizados, optou-se ainda por apresentar gráficos comparativos entre os parâmetros que foram alterados para os diferentes processos, de modo a permitir uma visualização mais fácil dessas tendências e variações, consoante as opções tomadas em ambiente de trabalho.

5.1. Processo de Soldadura MAG - Resultados de NSAM

5.1.1. MAG – Aço ao Carbono

Como já citado no capítulo anterior, foram realizados ensaios utilizando três gases diferentes [Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂), Atal 5 (82% Ar e 18% CO₂) e 100% CO₂], de modo a estudar a influência dos gases de proteção na emissão de nanopartículas.

É importante referir que estas medições foram as únicas que foram realizadas na tocha de soldadura, por esta parte dos ensaios ter sido automatizada (utilizou-se a mesa de soldar).

Também se teve em consideração, nesta avaliação, que a produtividade do processo MAG, assim como as propriedades mecânicas do material a soldar, são influenciadas pela forma do cordão em que as maiores penetrações resultam numa produtividade melhorada através do uso de velocidades de soldadura mais elevadas.

✓ Gás de proteção – Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂)

De seguida indicam-se os parâmetros obtidos para os ensaios seleccionados (conforme se indica na Tabela 23), e, na Figura 34, os valores instantâneos do pico de emissão das nanopartículas para os respetivos modos transferência. Na Figura 35, o gráfico indica o valor médio da área de superfície acumulada das partículas dividido pelo tempo de análise por volume pulmonar, em função da intensidade para permitir estudar a relação entre a emissão de nanopartículas e a intensidade.

Tabela 23 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂).

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	102	137	194
Tensão (V)	17,8	20	32,4
Tempo de soldadura (s)	59,9	49,47	34,07
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,41	0,52	0,82

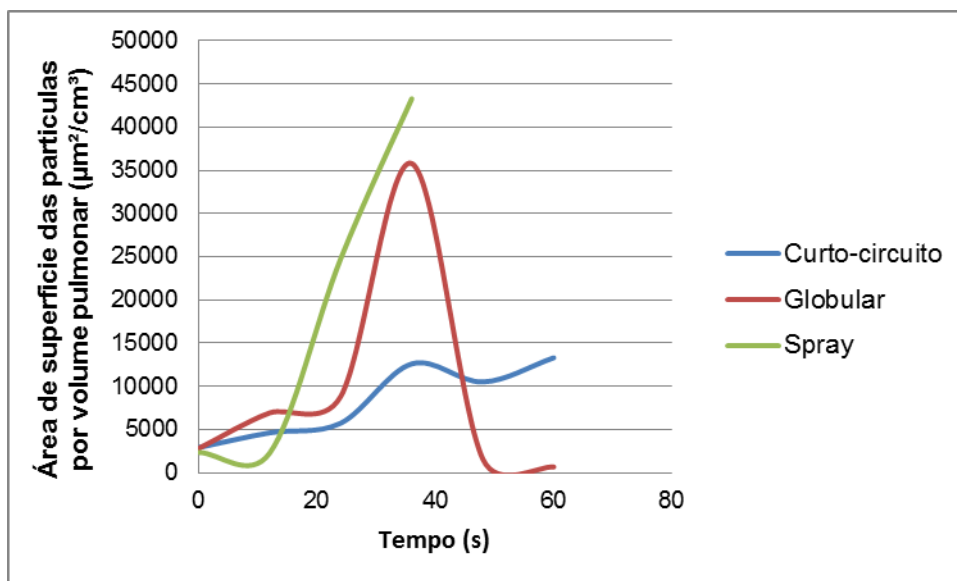


Figura 34 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 21 (90% Ar e 10% CO_2).

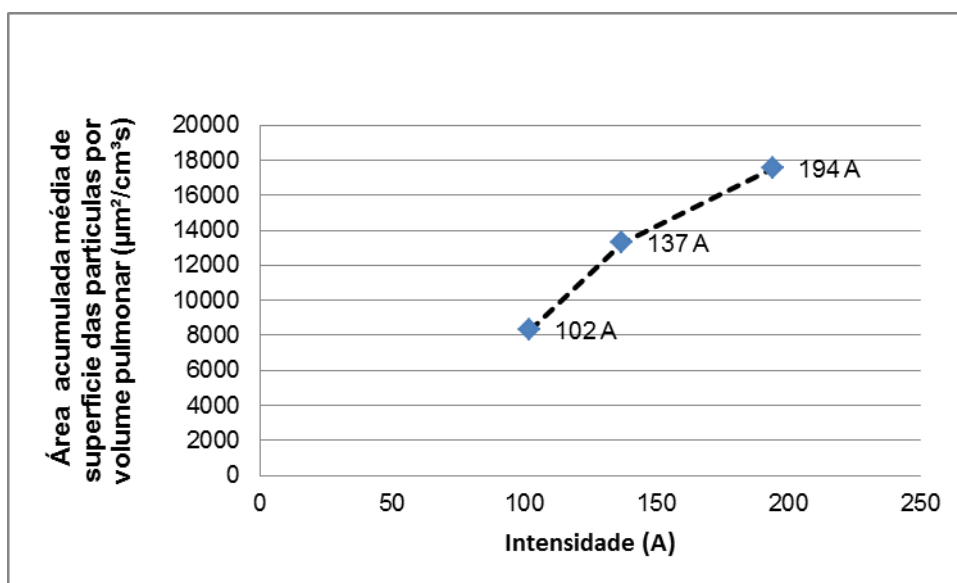


Figura 35 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 21(90% Ar e 10% CO_2).

Como se pode observar na Figura 34, para os parâmetros utilizados, o maior valor de área da superfície das partículas por volume pulmonar com maior capacidade de deposição alveolar, é de $43\,300\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, o que corresponde ao modo de transferência por *spray*.

Conseqüentemente, para o outro estudo realizado, que se apresenta na Figura 35, é possível observar que, à medida que aumenta a intensidade, aumentam também os valores de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar. Ainda é possível afirmar

que este modo de transferência é o que emprega uma maior entrega térmica (0,82 kJ/mm) (Tabela 23).

✓ Gás de Proteção – Atal 5 (82% Ar e 18% CO₂)

De seguida indicam-se os parâmetros obtidos para os ensaios seleccionados (conforme se indica na Tabela 24), e na Figura 36 os valores instantâneos do pico de emissão da nanopartículas para os respetivos modos transferência. Na Figura 37 o gráfico representa o valor médio da área de superfície acumulada das partículas dividido pelo tempo de análise por volume pulmonar, em função da intensidade para permitir estudar a relação da emissão de nanopartículas com a intensidade.

Tabela 24 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Atal 5 (82% Ar e 18% CO₂).

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	92	122	-
Tensão (V)	17,7	19,9	-
Tempo de soldadura (s)	61,41	65,15	-
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,38	0,61	-

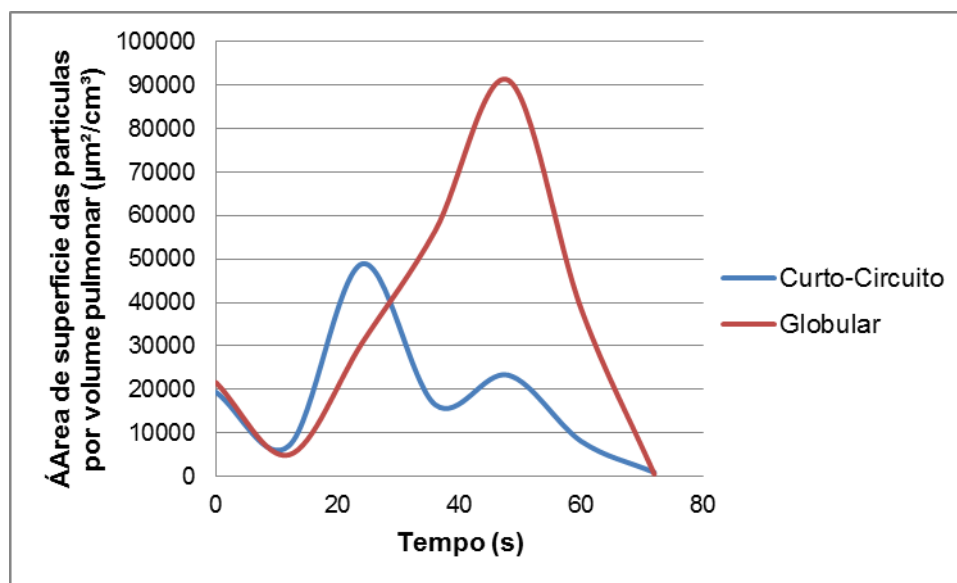


Figura 36 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Atal 5(82% Ar e 18% CO₂).

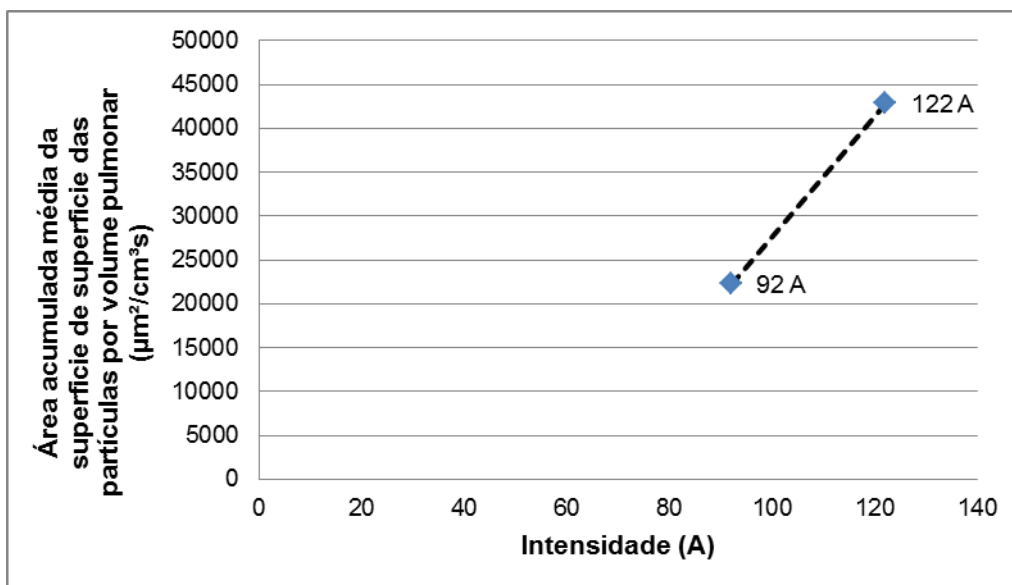


Figura 37 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Atal 5 (82% Ar e 18% CO₂).

Como se pode observar na Figura 36, para os parâmetros utilizados, o maior valor de área da superfície das partículas por volume pulmonar com maior capacidade de deposição alveolar, é de 91 200 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, sendo este valor atingido para o modo de transferência globular. Verifica-se que, em termos de área dos picos obtidos, o modo de transferência globular é muito superior relativamente ao pico obtido com o modo de transferência por curto-circuito. Consequentemente para o outro estudo realizado, conforme se apresenta na Figura 37, é possível observar que, à medida que aumenta a intensidade, aumentam também os valores de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar. Ainda é possível afirmar que este modo de transferência é o que emprega uma maior entrega térmica (0,61 kJ/mm) (Tabela 24).

✓ Gás de Proteção – 100 % CO₂

De seguida indicam-se os parâmetros obtidos para os ensaios selecionados (como se refere na Tabela 25), e na Figura 38 os valores instantâneos do pico de emissão da nanopartículas para os respetivos modos transferência. Na Figura 39 o gráfico representa o valor médio da área de superfície acumulada das partículas dividido pelo tempo de análise por volume pulmonar, em função da intensidade, para permitir estudar a relação da emissão de nanopartículas com a intensidade.

Como referido no capítulo anterior, aquando da utilização deste gás de proteção na soldadura por fusão pelo processo MAG, não foi possível atingir o modo de transferência por *spray*.

Tabela 25 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa 100 % CO₂.

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	64	129	-
Tensão (V)	18,7	21,1	-
Tempo de soldadura (s)	71,13	76,85	-
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,32	0,80	-

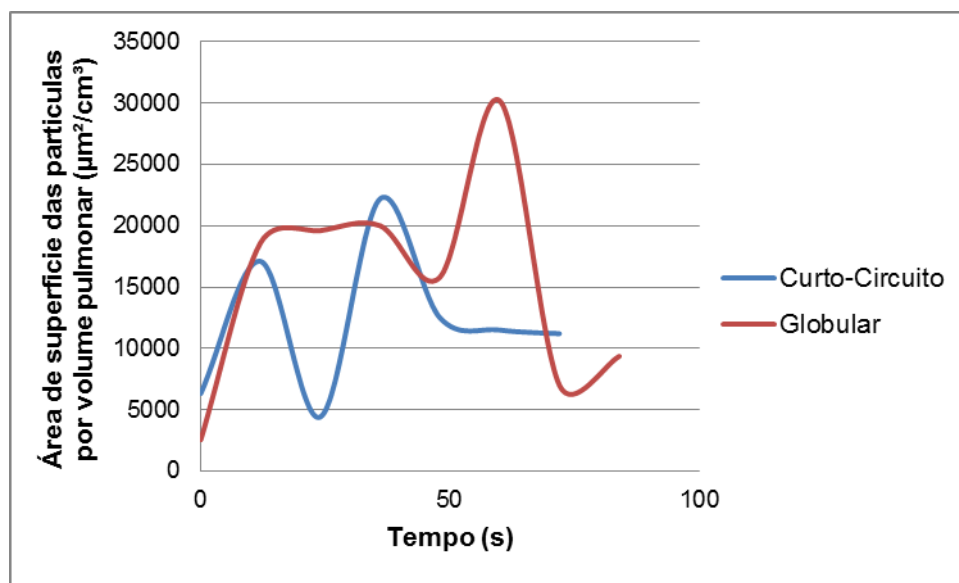


Figura 38 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o 100% CO₂.

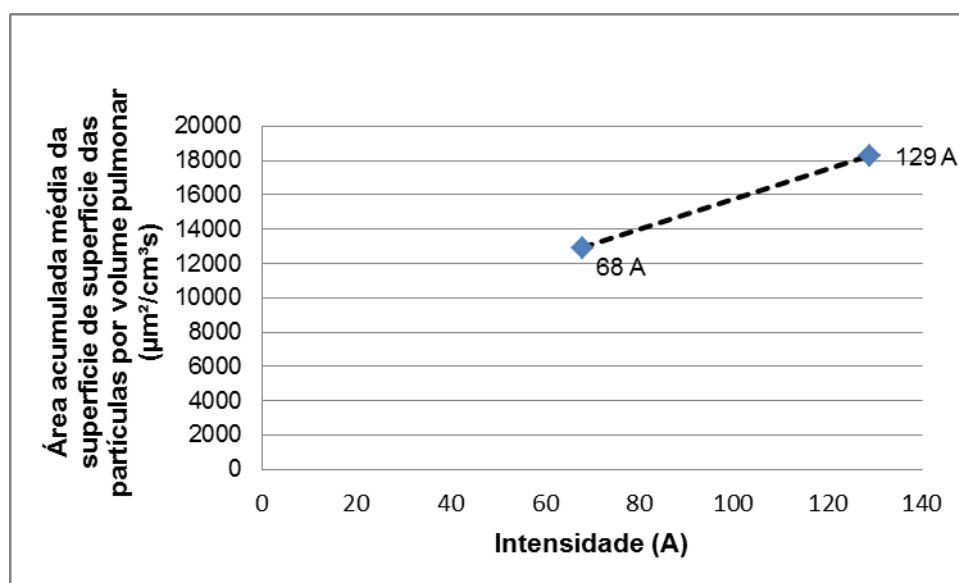


Figura 39 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção 100% CO₂.

Assim como nos casos anteriores, o pico mais alto foi registado no modo de transferência cujos parâmetros são mais elevados. Como se pode observar na Figura 38, este caso acontece no modo de transferência globular, em que o maior valor de área de superfície das partículas por volume pulmonar, com maior capacidade de deposição alveolar, é de $30\ 200\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Consequentemente, para o outro estudo realizado, é possível observar na Figura 39, que à medida que aumenta a intensidade, aumentam também os valores de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar. Ainda é possível afirmar que este modo de transferência é o que emprega uma maior entrega térmica (0,80 kJ/mm) (Tabela 25).

5.1.2. MAG – Aço Inox Austenítico

Tal como assinalado no capítulo anterior, foram realizados ensaios utilizando três gases diferentes [Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N), Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO₂) e Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂)], de modo a estudar a influência dos gases de proteção na emissão de nanopartículas.

Nestes ensaios as medições foram realizadas no interior da máscara do soldador, como explicado no capítulo anterior, tratando-se assim de uma soldadura manual.

✓ Gás de Proteção – Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N)

De seguida indicam-se os parâmetros obtidos para os ensaios selecionados (conforme a Tabela 26), e na Figura 40 os valores instantâneos do pico de emissão da nanopartículas para os respetivos modos transferência. Na Figura 41 o gráfico representa o valor médio da área de superfície acumulada das partículas dividido pelo tempo de análise por volume pulmonar, em função da intensidade para permitir estudar a relação da emissão de nanopartículas com a intensidade.

Tabela 26 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N).

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	109	185	226
Tensão (V)	19,1	25,2	30,8
Tempo de soldadura (s)	79,38	35,57	32,53
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,63	0,63	0,86

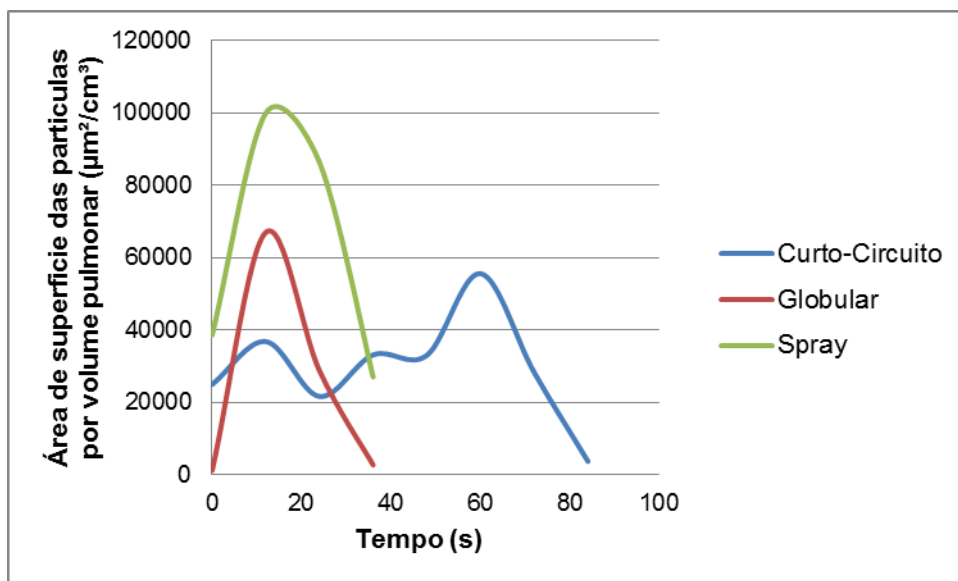


Figura 40 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO_2 e 2% N).

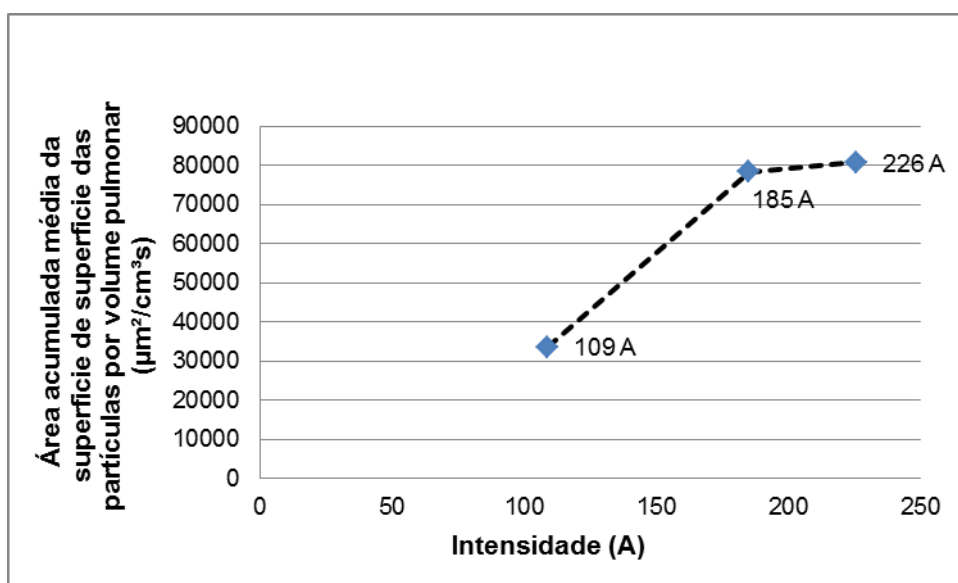


Figura 41 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO_2 e 2% N).

Na Figura 40, apresentam-se os valores instantâneos obtidos neste ensaio para os diferentes modos de transferência. Mais uma vez, verifica-se a tendência (que se tem vindo a constatar nos ensaios para o MAG - aço ao carbono), de que o pico mais alto da área da superfície das partículas por volume pulmonar, ocorre no modo de transferência por *spray*. Neste ensaio, para o modo de transferência por *spray*, o aparelho atingiu o seu limite máximo de saturação de $100\,000\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.

Na Figura 41, representam-se os valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para este ensaio. Verifica-se um aumento da área de superfície por volume pulmonar, à medida que aumentam os valores dos parâmetros de soldadura. Há um aumento acentuado quando se passa do regime de curto-circuito para globular, e um pequeno aumento quando se passa do regime globular para *spray*, sendo os valores médios medidos de $78\,361\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$ para o regime globular e $80\,861\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$, para o regime por *spray*, respetivamente. Ainda é possível afirmar que este modo de transferência é o que emprega uma maior entrega térmica (0,86 kJ/mm) (Tabela 26).

✓ Gás de proteção – Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO₂)

Passam-se a expor os parâmetros obtidos para os ensaios selecionados (conforme se indica na Tabela 27), e na Figura 42 os valores instantâneos do pico de emissão da nanopartículas para os respetivos modos de transferência. Na Figura 43 o gráfico representa o valor médio da área de superfície acumulada das partículas dividido pelo tempo de análise por volume pulmonar, em função da intensidade, para permitir estudar a relação da emissão de nanopartículas com a intensidade.

Tabela 27 - parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO₂).

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	133	171	199
Tensão (V)	18,8	25	29,9
Tempo de soldadura (s)	64,68	41,34	37,62
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,62	0,67	0,85

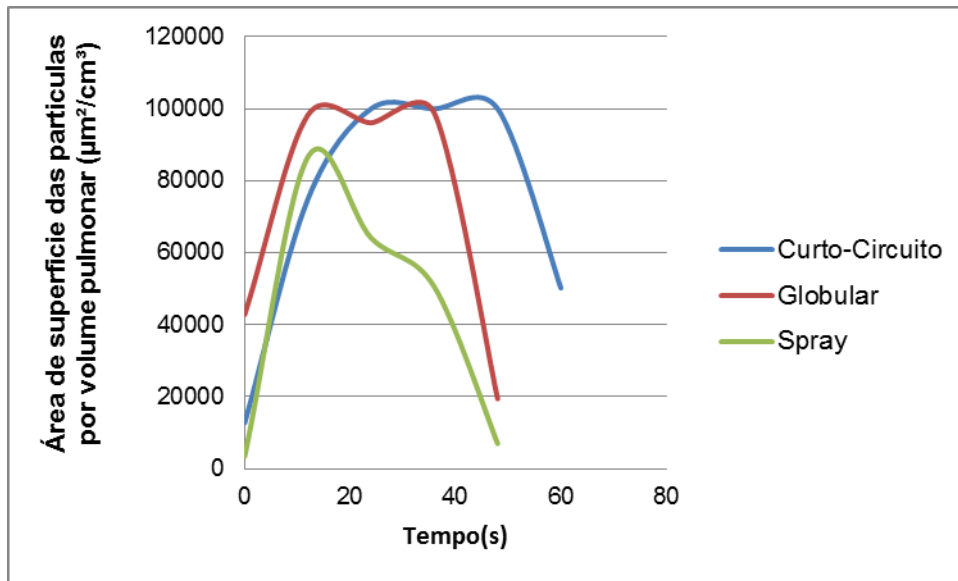


Figura 42 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO_2).

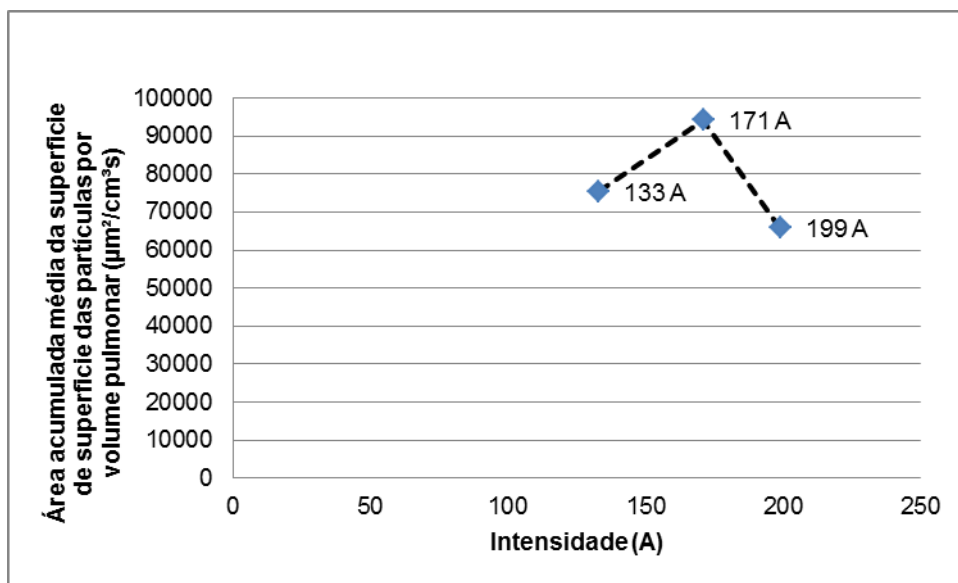


Figura 43 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO_2).

A Figura 42 representa os valores instantâneos obtidos durante os ensaios realizados para esta mistura gasosa. Neste ensaio seria de esperar obter-se o pico mais elevado para o modo de transferência por *spray*. Contudo, tal não aconteceu, pois o pico mais elevado verificou-se no modo de transferência por curto-circuito, registando-se 100 000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (correspondendo à saturação do analisador) em três instantes durante a deposição dos cordões de soldadura.

Como se observa na Figura 43, regista-se um decréscimo dos valores médios obtidos quando se passa do modo de transferência globular para o modo de transferência por *spray*. Este decréscimo não era esperado, uma vez que, à medida que aumentam os valores dos parâmetros de soldadura, maior deverá ser a taxa de formação de fumos. No entanto, verifica-se que o modo de *spray* é o que emprega uma maior entrega térmica (0,85 kJ/mm) (Tabela 27).

✓ Gás de Proteção – Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂)

De seguida indicam-se os parâmetros obtidos para os ensaios seleccionados (conforme a Tabela 28), e na Figura 44, os valores instantâneos do pico de emissão da nanopartículas para os respetivos modos transferência. Na Figura 45 o gráfico representa o valor médio da área de superfície acumulada das partículas dividido pelo tempo de análise por volume pulmonar, em função da intensidade, para permitir estudar a relação da emissão de nanopartículas com a intensidade.

Tabela 28 - Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂).

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Intensidade (A)	92	182	211
Tensão (V)	18,9	25	30,2
Tempo de soldadura (s)	72,96	38,43	35,08
Entrega Térmica (kJ/mm)	0,48	0,67	0,85

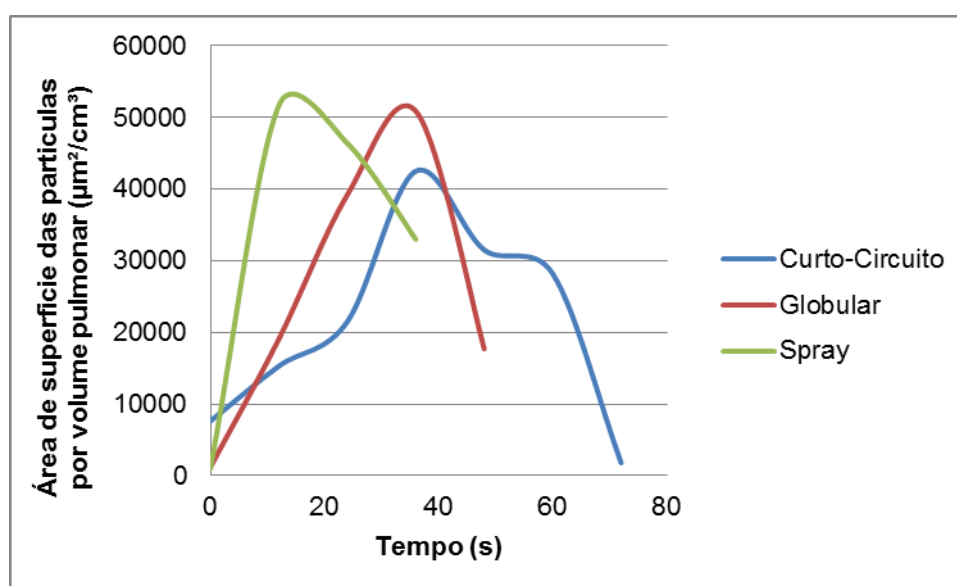


Figura 44 - Medição das nanopartículas para os modos de transferência estudados, durante o tempo de maior emissão para o Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂).

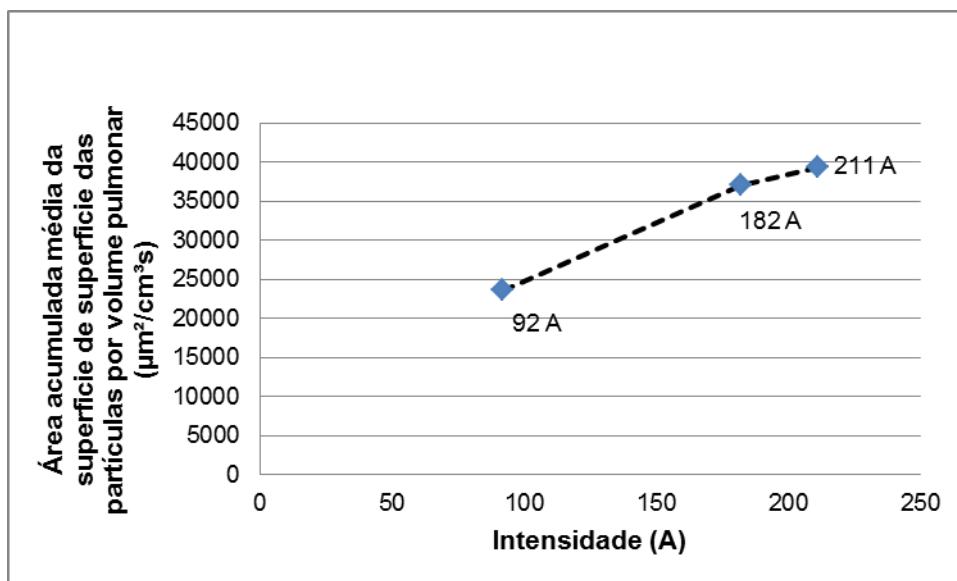


Figura 45 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade – gás de proteção Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂).

Na Figura 44 verifica-se que o modo de transferência por *spray* atinge o pico mais elevado, neste caso de 51 700 µm²/cm³. Os picos obtidos, tanto para o modo de transferência por *spray* e para o globular são bastante semelhantes, sendo que a variação dos valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, como se verifica na Figura 45 não se alteram significativamente, sendo muito próximos.

Como se pode observar na Figura 45, neste ensaio há um aumento da área de superfície das partículas por volume pulmonar. De facto, para uma intensidade de 92 A, o valor médio medido foi de 23 637 µm²/cm³s; e quando se deu um aumento de intensidade para 182 A o valor médio medido passou para 37 054 µm²/cm³. Aumentando ainda mais a intensidade, registou-se um aumento não tanto significativo, obtendo-se, assim, um valor médio de 39 376,28 µm²/cm³, o que corresponde, apenas, a um ligeiro aumento. Ainda é possível afirmar que este modo de transferência é o que emprega uma maior entrega térmica (0,85 kJ/mm) (Tabela 28).

5.1.3. Discussão dos resultados obtidos no NSAM para soldadura MAG

Estes ensaios tiveram como tempo de execução, a duração necessária para obtenção dos cordões de soldadura, variando entre os 30 e os 84 segundos, o que estava dependente do modo de transferência utilizado. Assim, não foi possível realizar todos os ensaios com o mesmo tempo, porque, os diferentes modos de transferência exigem velocidades de soldadura diferentes, e dependia-se, ainda, das dimensões das chapas disponíveis para ensaio.

Nos gráficos que são apresentados neste capítulo, mais especificamente no ponto 5.1., é possível observar os valores de picos obtidos durante a execução do processo de soldadura. Através destes pode-se verificar que os modos de transferência e as misturas gasosas escolhidas para os ensaios realizados influenciam em muito a emissão de nanopartículas durante a fase de soldadura.

Na tabela seguinte, apresenta-se um resumo dos valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para os ensaios realizados com o material de base aço ao carbono de modo a que possa ser efetuada uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

Tabela 29 - Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios para o material de base aço ao carbono.

Modos de Transferência	Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$)		
	Arcal 21 (90% Ar e 10% CO_2)	Atal 5 (82% Ar e 18% CO_2)	100% CO_2
Curto-circuito	8 325	22 266	12 899
Globular	13 306	42 896	18 292
<i>Spray</i>	17 574	-	-

Como se pode constatar por comparação dos resultados, o modo de transferência tem uma grande influência na emissão das nanopartículas. Para a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO_2), o modo de transferência por *spray* é aquele que, em média, apresenta maior área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar. Para este material de base, esta tendência verifica-se, igualmente, nas restantes misturas gasosas utilizadas: à medida que aumentam os valores dos parâmetros de soldadura (intensidade), aumenta também a área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.

Seria de esperar que, em termos de gás de soldadura utilizado, o dióxido de carbono fosse aquele que apresentasse valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar superiores. Tal não aconteceu, pois foi a mistura gasosa Atal 5 (composta por 82% Ar e 18% de CO_2) que apresentou os maiores valores da área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.

É importante realçar também que, a mistura Atal 5 (82% Ar e 18% de CO_2) apresentou valores superiores no modo de transferência por curto-circuito, comparativamente aos outros gases utilizados em regimes de transferência, cuja intensidade é superior.

Através do cálculo da entrega térmica do processo de soldadura para os diferentes gases de proteção, não se consegue chegar a nenhuma conclusão precisa sobre a relação direta entre este parâmetro e a emissão de nanopartículas, de acordo com resultados obtidos. Este facto pode ser devido à (eventual) existência de uma, corrente de transição

para os diferentes modos de transferência e os fatores operacionais inerentes aos mesmos modos. No entanto, verifica-se que os modos de transferência que atingem maior entrega térmica se obtêm quando se utiliza o gás de proteção 100% CO₂ para o modo de transferência globular (0,80 kJ/mm) (Tabela 25) e para *spray* (0,82 kJ/mm) (Tabela 23), respetivamente. Para estes gases é nestes casos que se atinge a maior emissão de nanopartículas (conforme se representa na Figura 34 e na Figura 39).

O facto de se julgar que para o CO₂ se iriam obter maiores entregas térmicas está relacionado como o mecanismo da geração do arco elétrico neste processo de soldadura: o dióxido de carbono, na presença de um arco elétrico de alta energia (plasma), dissocia-se em carbono livre, monóxido de carbono e oxigénio [32], que acontece na região anódica do arco. Na região catódica acontece exatamente o inverso, ou seja, os elementos libertados a partir da molécula de CO₂ são novamente recombinados. Este fenómeno requer energia adicional, levando a que a tensão necessária aumente e, assim obtêm-se, conseqüentemente uma maior entrega térmica [32].

No entanto, é importante reforçar que, como referido anteriormente é a mistura Atal 5 (82% Ar e 18% de CO₂) que apresenta os valores superiores no modo de transferência por curto-circuito, comparativamente aos outros gases utilizados em regimes de transferência, cuja intensidade é superior. Como este gás é o que atinge entregas térmicas mais baixas, este aspeto poderá estar relacionado com o que foi referido no parágrafo anterior.

Em ensaios futuros é importante considerar este fenómeno, perceber como ele poderá ser controlado, ou seja, tentar isolar o máximo possível os diferentes parâmetros operacionais, fazer estudos variando o diâmetro do fio, e, ainda, evitar flutuações nas variáveis de o processo (tipo de material, corrente e voltagem de soldadura) na zona onde as medições são efetuadas.

Na Tabela 30 apresenta-se um resumo dos valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para os ensaios realizados, com o material de base aço inox austenítico, de modo a que possa ser efetuada uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

Tabela 30 - Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios utilizando o material de base aço inoxidável austenítico.

Modos de transferência	Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$)		
	Arcal 12 (95% Ar e 5% CO ₂)	Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO ₂)	Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO ₂ e 2% N)
Curto-circuito	23 637	75 390	33 644
Globular	37 054	94 136	78 361
<i>Spray</i>	39 376	65 829	80 861

Na Tabela 30 é possível observar que, nas três misturas gasosas indicadas, se mantem a tendência da área de superfície das partículas por volume pulmonar aumentar com o aumento da intensidade de soldadura, exceto no caso do Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO₂), o que seria de esperar atendendo a que o modo de transferência por *spray* apresenta valores superiores ao regime globular. Contudo, tal não aconteceu.

Uma das possíveis causas para que este valor tenha descido, no regime de *spray*, prende-se com os valores dos parâmetros de soldadura escolhidos.

Comparando os dois materiais de base utilizados, pode concluir-se que, quando se utiliza aço inox austenítico, os valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar atingem valores muito superiores do que na soldadura de aço ao carbono, conforme se indica na Tabela 29 e na Tabela 30. O valor máximo para o aço carbono é de 42 896 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$, enquanto que, para o aço inox austenítico, é de 94 136 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$. Este facto poderá estar relacionado com a composição química do material. Não existem muitos estudos sobre estes aspetos, embora, as análises em TEM e EDS (que se referem em seguida) permitam vir a ter uma ideia se este aspeto é realmente relevante. Note-se que este efeito poderá também estar relacionado com o arco elétrico, já que se verifica que, para este tipo de soldadura, se atingem maiores intensidades.

5.2. Processo de Soldadura SER - Resultados de NSAM

Na descrição do procedimento experimental referiu-se que a recolha de partículas foi efetuada mediante a execução de dois ensaios distintos para cada elétrodo revestido. As medições realizadas com o analisador NSAM apresentam-se em gráficos que representam a variação das áreas de superfície das partículas por volume pulmonar por segundo.

5.2.1. Elétrodo E7018 com 4 mm de espessura

Para este ensaio utilizaram-se as seguintes intensidades de corrente: 140, 160 e 180 A.

Na Figura 46 apresentam-se os valores médios dos dois ensaios efetuados para as diferentes intensidades.

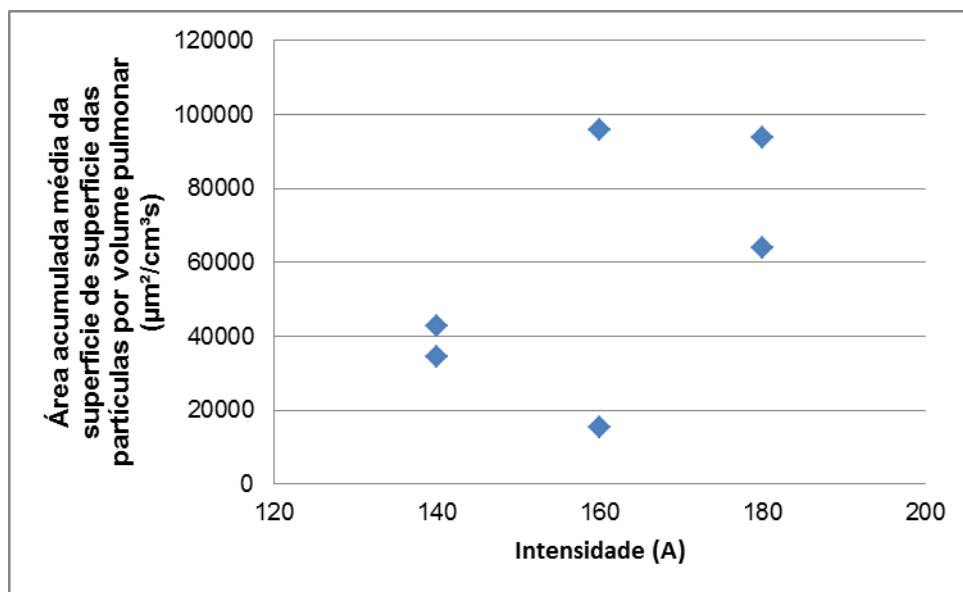


Figura 46 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, com o elétrodo E7018 com 4 mm de espessura.

Como se pode observar na Figura 46 para o elétrodo E7018, para os parâmetros já indicados, verifica-se haver uma grande dispersão de valores relativamente à intensidade de 160 A, embora seja possível prever uma tendência crescente em função dos parâmetros de processo. O valor máximo da área superficial de partículas com capacidade de deposição alveolar é de 95 982 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

5.2.2. Elétrodo E7018-1 com 2,5 mm de espessura

Para este ensaio utilizaram-se as seguintes intensidades de corrente: 70, 80 e 90 A.

A Figura 47 apresenta os valores médios obtidos nos dois ensaios efetuados para as diferentes intensidades.

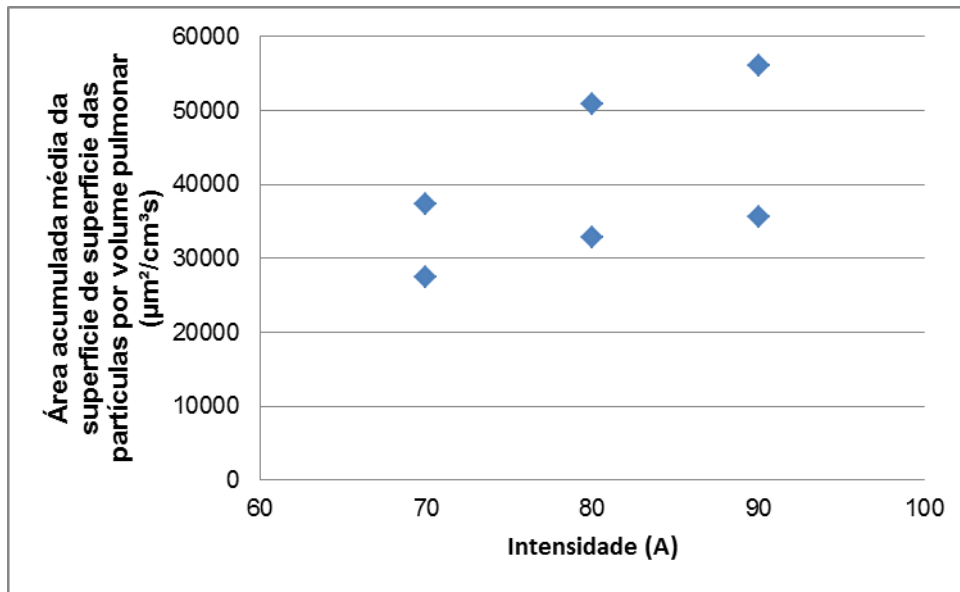


Figura 47 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio com o elétrodo E7018-1 com 2,5 mm de espessura.

Como se pode observar na Figura 47 os valores obtidos apontam para uma tendência crescente da libertação de nanopartículas com o aumento da intensidade, embora se observe ainda que a dispersão de valores também tende a aumentar com o aumento dos parâmetros elétricos. O valor máximo foi de 56 143 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \text{ s}$.

5.2.3. Elétrodo E7018-1 com 3,2 mm de espessura

Neste ensaio utilizaram-se as seguintes intensidades de corrente: 100, 120, 135 A. A Figura 48, apresenta os valores médios dos dois ensaios efetuados para as diferentes intensidades.

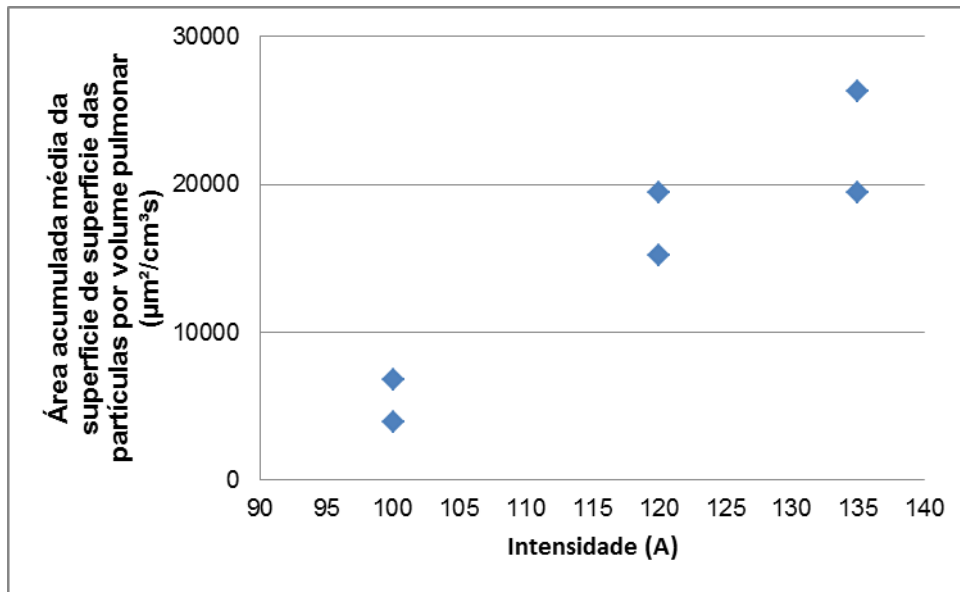


Figura 48 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, com o elétrodo E7018-1 com 3,2 mm de espessura.

Como se pode observar na Figura 48 e, por comparação com os resultados apresentados na Figura 47 constata-se a existência de uma tendência crescente em função da intensidade e, embora menos significativa do que no ensaio anterior, também se verifica um aumento da dispersão de valores à medida que se verifica o aumento dos parâmetros elétricos. O valor máximo obtido foi de 26 295 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

5.2.4. Elétrodo E7018-1 com 4 mm de espessura

Para este ensaio utilizaram-se as seguintes intensidades de corrente: 140, 160, 180 A. A Figura 49 apresenta os valores médios dos dois ensaios efetuados para as diferentes intensidades.

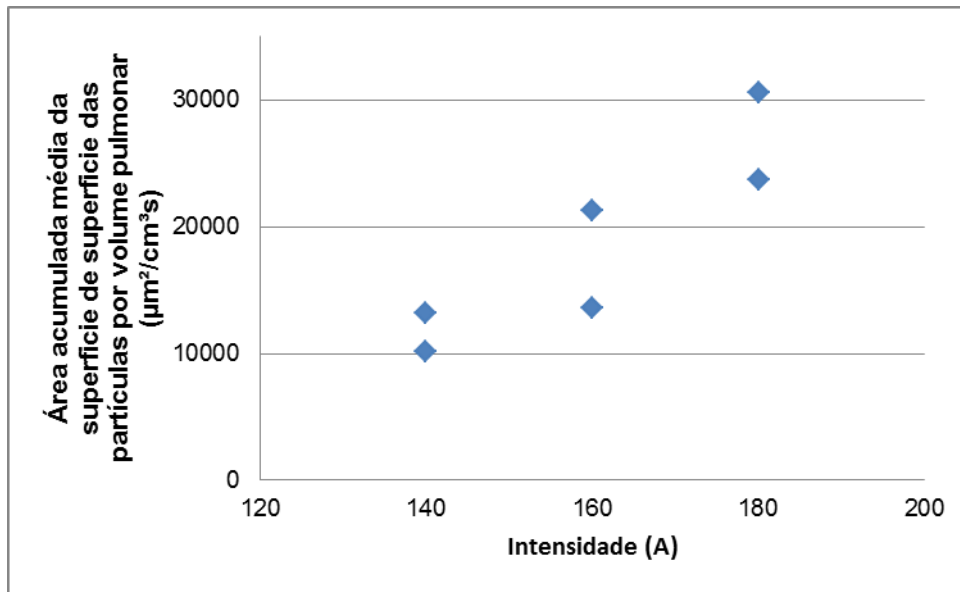


Figura 49 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio com o elétrodo E7018-1 com 4 mm de espessura.

Como se pode observar na Figura 49, para o elétrodo E7018-1 de 4 mm de espessura, e por comparação com as duas últimas análises (Figura 47 e Figura 48), conclui-se que se continua a verificar uma tendência crescente em função da intensidade da corrente, e que se mantém assim como a dispersão entre os valores obtidos. O valor máximo obtido foi de $30\,587 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \text{ s}$.

5.2.5. Elétrodo E6013 com 2,5 mm de espessura

Para este ensaio utilizaram-se as seguintes intensidades de corrente: 70, 80, 90 A. A Figura 50 apresenta os valores médios dos dois ensaios efetuados para as diferentes intensidades.

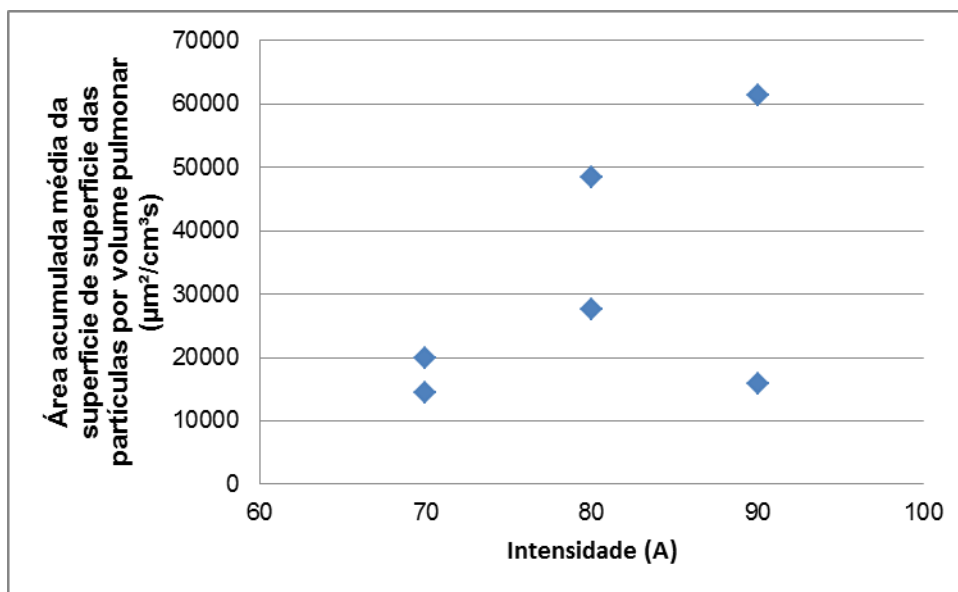


Figura 50 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio com o elétrodo E6013 com 2,5 mm de espessura.

Como se pode observar na Figura 50 tem-se que este elétrodo também exibe uma tendência de evolução crescente, apesar de apresentar uma dispersão muito maior com a intensidade de 90 A, quando comparado com os outros valores. O valor máximo foi de 61 388 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

5.2.6. Elétrodo E6010 com 3,2 mm de espessura

Para este elétrodo não foi possível obter valores de emissão, visto que ao fim do segundo ensaio, o dispositivo NSAM atingiu a saturação devido ao elevado volume de partículas que este elétrodo liberta, o que colocou o aparelho num estado de *charger flow rate high*, impedindo qualquer recolha de nanopartículas.

5.3. Processo de Soldadura TIG - Resultados de NSAM

Como foi descrito no respetivo procedimento experimental, a recolha de partículas foi efetuada em dois ensaios distintos por consumível, e outros dois para cada ensaio sem material de adição, em cada um dos materiais de base. As medições realizadas com o analisador NSAM apresentam-se em gráficos que representam a variação das áreas de superfície das partículas por volume pulmonar por segundo.

5.3.1. Material de adição - ER 70S-3

Para este consumível foram realizados ensaios utilizando 3 intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. Os valores obtidos para a área superficial de partícula com capacidade de deposição alveolar por cm^3 por segundo encontram-se representados na Figura 51.

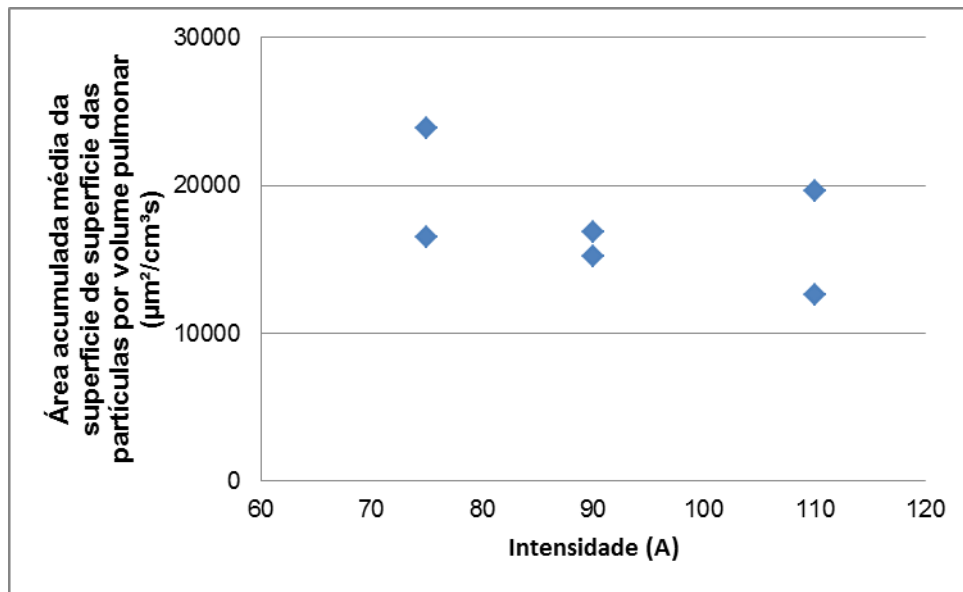


Figura 51 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.

Como se pode observar na Figura 51, Os valores obtidos, apesar de terem uma dispersão de, cerca de, 25% nos ensaios de 75 A, revelam a existência de uma tendência parabólica, onde o valor máximo atingido foi de $23\,857\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

5.3.2. Material de adição - ER 304LSi

Para este consumível foram utilizadas 3 intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. A Figura 52 representa os valores obtidos utilizando este material de adição.

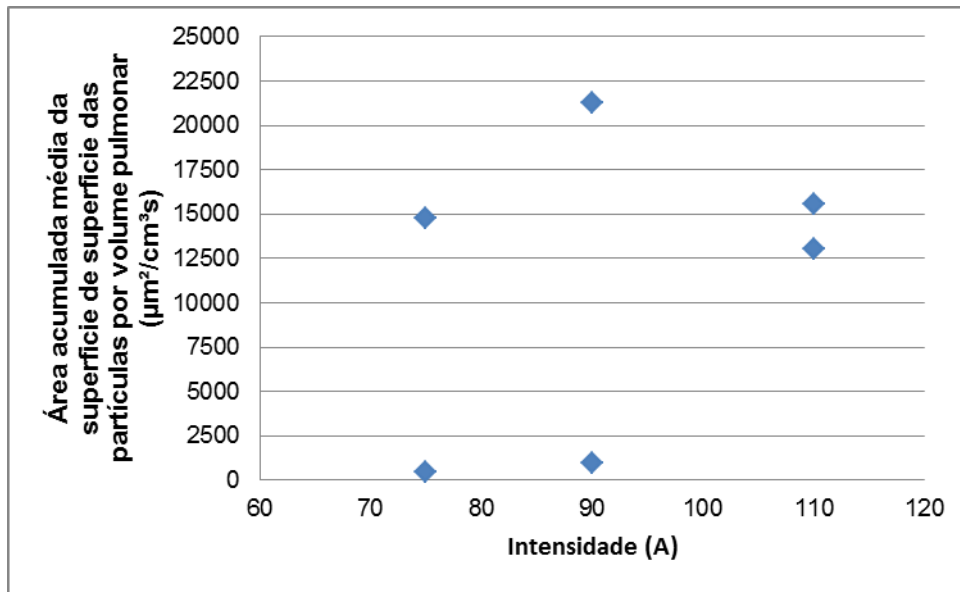


Figura 52 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG com o consumível ER 304LSI em aço inox austenítico.

Como se pode observar na Figura 52, este ensaio não é conclusivo, ou seja, este ensaio não indicou nenhuma espécie de tendência definida, tendo sido obtidos dois valores muito próximos de zero, e uma dispersão superior aos próprios valores. O valor máximo atingido foi de 21 271 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

5.3.3. Sem material de adição para aço ao carbono

Para o ensaio em TIG autogéneo, em aço ao carbono, foram utilizadas as seguintes intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. Na Figura 53 encontram-se representados os valores obtidos para este ensaio.

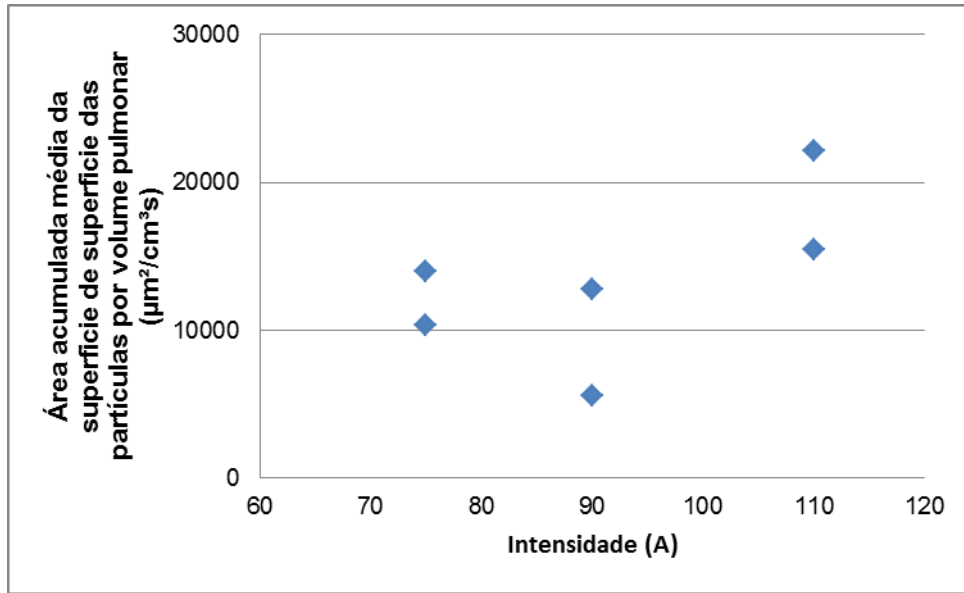


Figura 53 - Valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG sem material de adição em aço ao carbono.

Como se pode observar na Figura 53, os valores obtidos revelam, igualmente, a existência de uma tendência parabólica, e estes também exibem um aumento da dispersão nos valores mais altos. O valor máximo obtido foi de $22\,149\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\ \text{s}$.

5.3.4. Sem material de adição para aço inox austenítico

Para o ensaio em TIG autogéneo, em aço inoxidável, foram utilizadas as seguintes intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. Na Figura 54 encontram-se representados os valores obtidos para este ensaio.

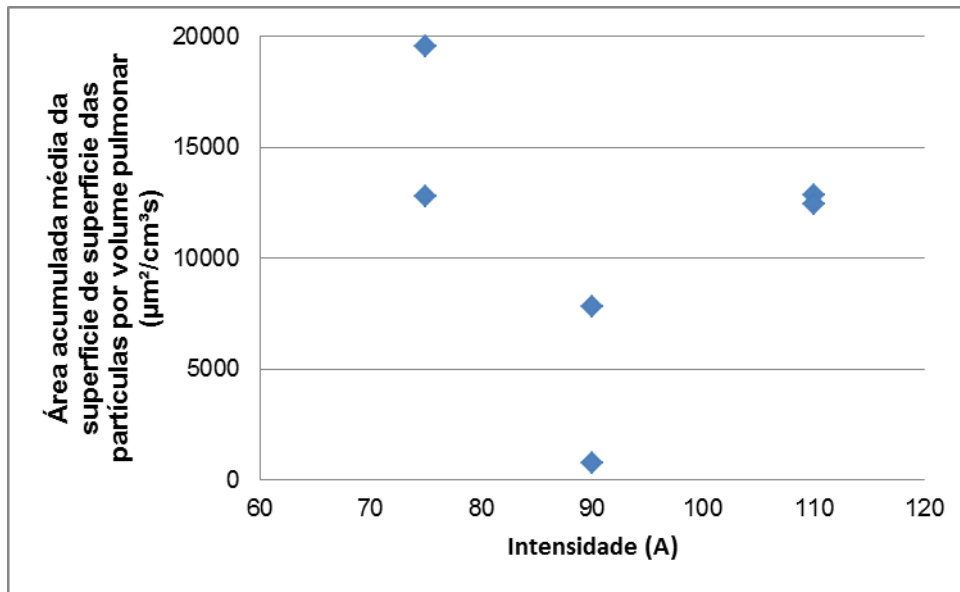


Figura 54 - valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para cada ensaio, no processo TIG sem material de adição em aço inox austenítico.

Como se pode observar na Figura 54, os valores obtidos do ensaio de aço inoxidável em TIG autogêneo apresentam a existência de uma tendência parabólica, apesar dos ensaios de intensidades mais elevadas terem resultado numa dispersão menor do que os de mais baixas intensidades. O valor máximo atingido foi de $19\,562\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\ \text{s}$.

5.4. Resultados da análise por Microscopia Eletrônica

Como já referenciado no capítulo relativo ao procedimento experimental, o equipamento de recolha de amostras NAS, permitiu obter amostras das partículas emitidas durante a execução dos processos de soldadura em estudo, o que tornou possível a sua análise química e morfológica posterior.

5.4.1. Resultados da análise química do processo de soldadura MAG

A análise química para o processo de soldadura MAG, foi realizada para duas amostras diferentes. Para o MAG – Aço ao Carbono utilizando a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO_2) e para o MAG – Aço Inox Austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO_2 e 2% N).

Na Figura 55 pode-se observar-se o resultado de uma microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X (EDS) às partículas resultantes do processo de soldadura MAG – Aço ao Carbono com a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e

10% CO₂), e, na Figura 56 apresenta-se o resultado da microanálise por EDS, para o MAG – Aço Inox Austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N).

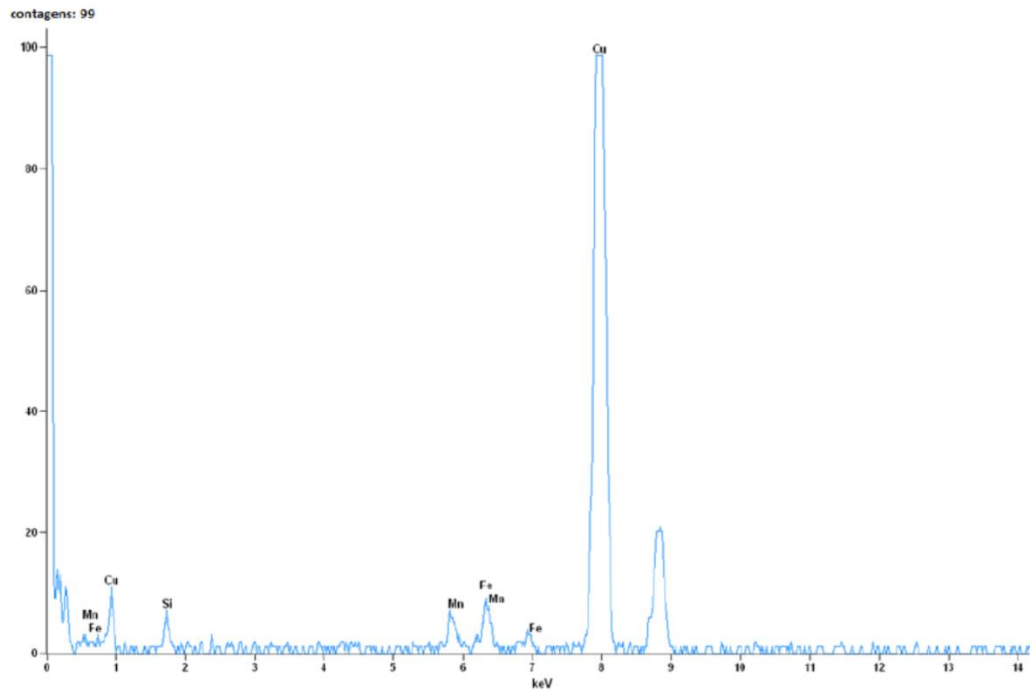


Figura 55 - Análise EDS de soldadura MAG – aço ao carbono com a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂).

Na Figura 55, podem distinguir-se os vários elementos identificados: Ferro (Fe) e Manganês (Mn). Ainda foi identificado o Cobre (Cu) que também está presente em grande quantidade, sendo que este elemento é, apenas, resultado do material da grelha onde as partículas foram recolhidas, não sendo, por isso, significativo. Para além do cobre, ainda se identificou Silício (Si) que, provavelmente, será uma contaminação do processo.

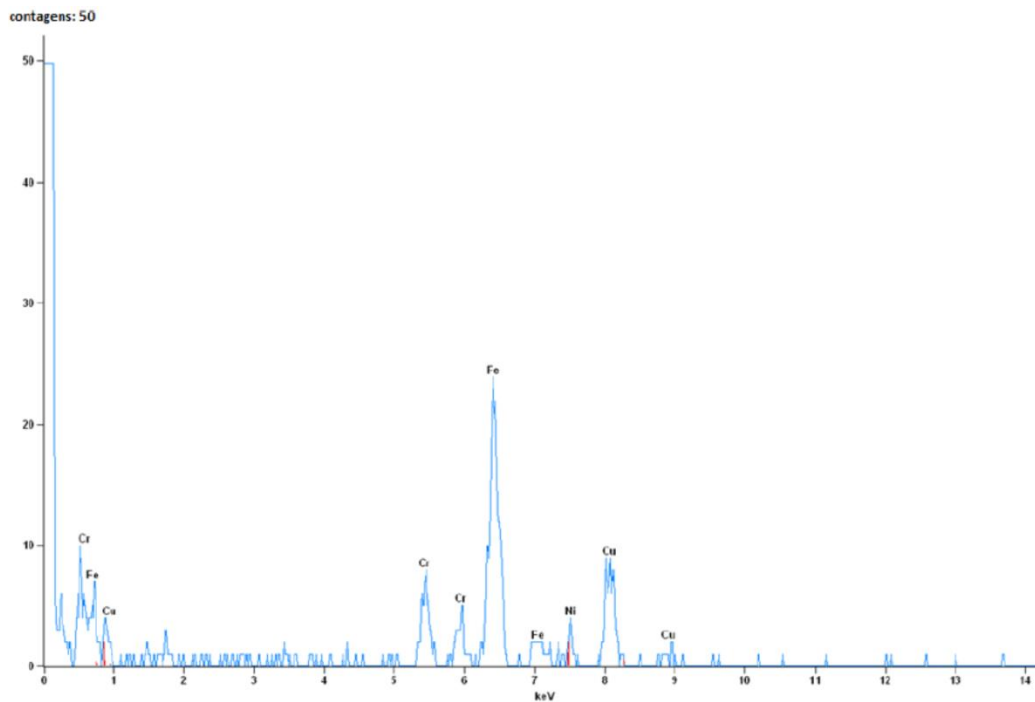


Figura 56 - Análise EDS de soldadura MAG – Aço inox austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N).

Na Figura 56 podem distinguir-se os vários elementos identificados na amostra: Ferro (Fe), Crómio (Cr) e Níquel (Ni). Como anteriormente, identifica-se o Cobre (Cu) que é proveniente da grelha utilizada para recolha das partículas.

Pelas figuras 55 e 56 tem-se que, tanto no processo de soldadura MAG – Aço ao Carbono, como no processo MAG – Aço Inox Austenítico, com a mistura gasosa mais oxidante e mesmo com a menos oxidante, os elementos químicos identificados fazem parte da composição dos fios de soldadura e, também, da composição do material base.

5.4.2. Resultados da análise morfológica do processo de soldadura MAG

Uma das características mais importantes que podem ser avaliadas, nas nanopartículas recolhidas é a sua forma.

Nas figuras 57 e 58 apresentam-se imagens obtidas por microscopia TEM para os processos de soldadura MAG – Aço ao Carbono com a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂) e MAG – Aço Inox Austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N), respetivamente.

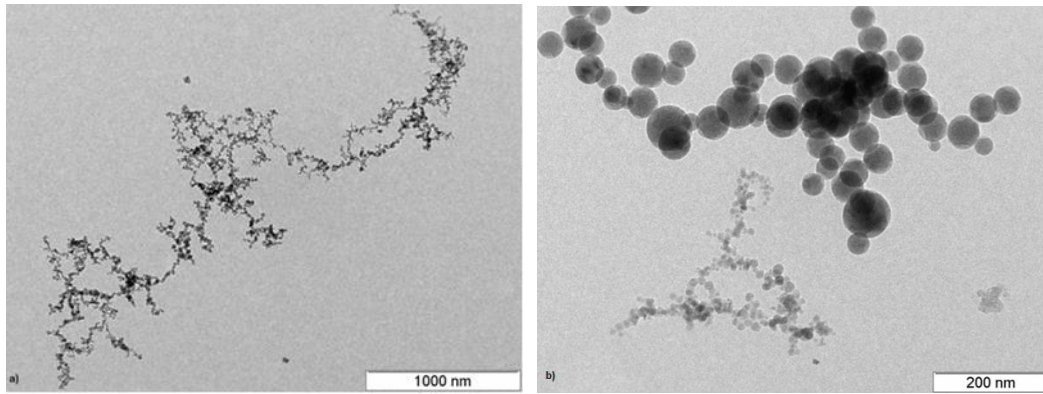


Figura 57 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG – aço ao carbono com a mistura gasosa Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂).

a) Partículas à escala de 1000 nm. **b)** Partículas à escala de 200 nm.

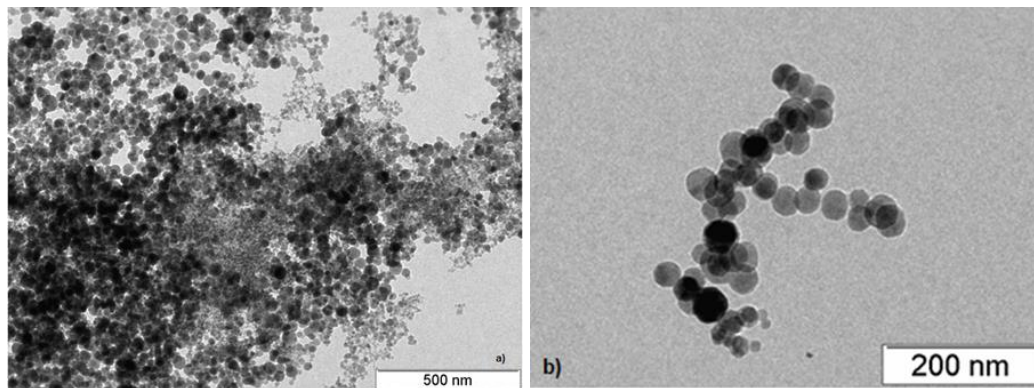


Figura 58 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura MAG – aço inox austenítico com a mistura gasosa Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N).

a) Partículas à escala de 500 nm. **b)** Partículas à escala de 200 nm.

Na Figura 57 verifica-se que as partículas se encontram aglomeradas, mas de uma forma dispersa, sendo maioritariamente partículas amorfas. Tanto na figura 57 a) como na b) é possível observar que as partículas chegam a atingir dimensões mínimas inferiores a 10 nm, e não maiores do que 100 nm. Estas partículas são as que, de acordo com o gráfico da Figura 5, apresentam a maior eficiência de deposição alveolar. As partículas representadas na Figura 58 são semelhantes às partículas obtidas no processo MAG – Aço ao Carbono: partículas amorfas e com dimensões idênticas às anteriores, sendo, por isso partículas com alta eficiência de deposição alveolar. Estas partículas diferem das anteriores no modo de aglomeração, tendo-se que as partículas da Figura 58 se encontram mais aglomeradas e sem fronteiras bem delimitadas em comparação com as da Figura 57.

Outro aspeto que pode ser observado, tanto para a Figura 57 como para a Figura 58, é que estas partículas têm formas esféricas (resultando de condensação na atmosfera), e

que as partículas que se observam com tonalidades mais claras, são as que têm menor massa ou seja, são as que se encontram mais oxidadas.

5.4.3. Resultados da análise química do processo de soldadura SER

A análise química para o processo de soldadura SER, só foi realizada para o elétrodo E7018-1 dado que a composição química dos outros elérodos não diverge significativamente desta.

Na Figura 59 apresenta-se o espectro resultante de uma microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X às partículas recolhidas durante a execução do processo de soldadura SER com elérodos revestidos básicos, mais especificamente para o elétrodo E7018-1.

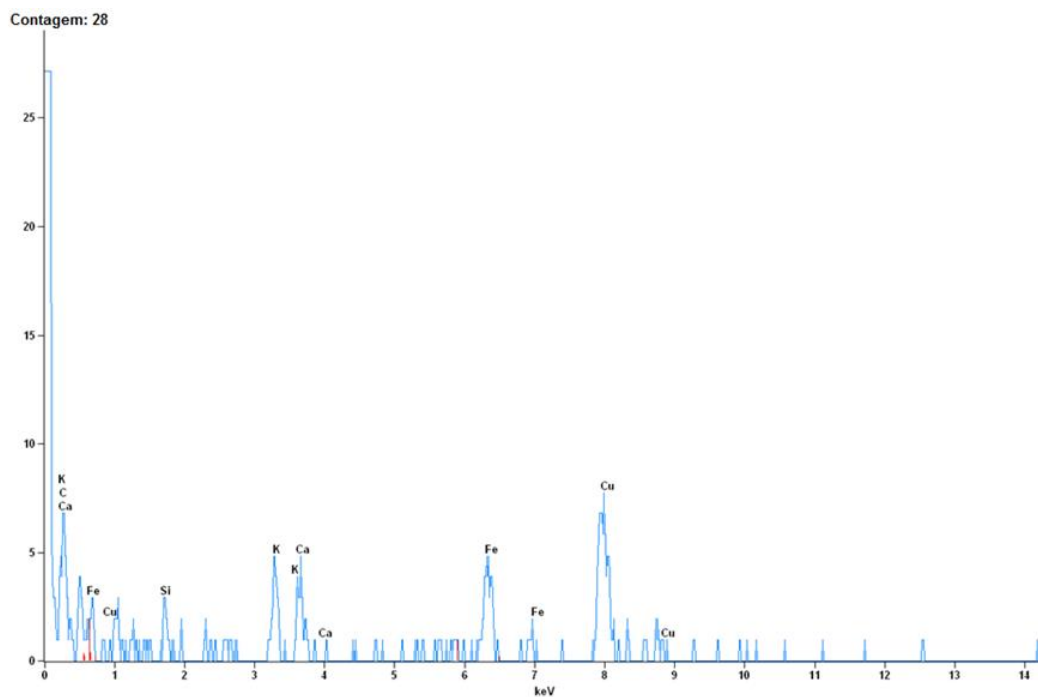


Figura 59 - Análise EDS, Elérodos básicos (E7018-1).

Os elementos identificados foram: cálcio, ferro e potássio, que são elementos que resultam do revestimento do elétrodo. O cobre, como já referido nas análises anteriores, é referente ao material da grelha das amostras e não do processo de soldadura.

5.4.4. Resultados da análise morfológica do processo de soldadura SER

Na Figura 60 apresentam-se três imagens resultantes da análise por microscopia TEM a uma grelha com partículas captadas no processo de soldadura SER com elérodos revestidos básicos (E7018-1).

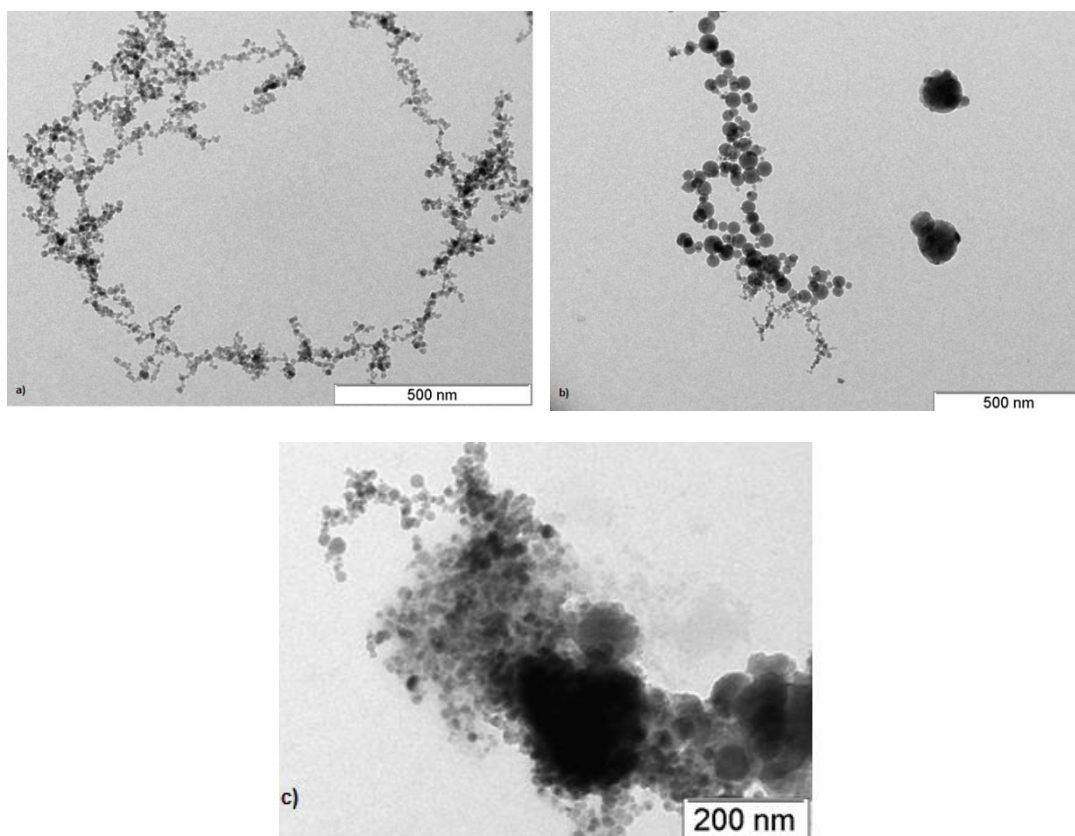


Figura 60 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura SER com Elérodos básicos.

a) e b) Partículas à escala de 500 nm. **c)** Partículas à escala de 200 nm.

As imagens a), b) e c) da Figura 60 são, semelhantes às das partículas recolhidas no processo MAG, sendo amorfas, com formas esféricas e apresentando dimensões que vão desde dimensões inferiores a 10 nm até, aproximadamente, os 100 nm. Estas partículas encontram-se dispersas e são, também, o resultado da fusão do material de revestimento dos elérodos.

5.4.5. Resultados da análise química do processo de soldadura TIG

A análise química para o processo de soldadura TIG foi efetuada relativamente a dois materiais de adição diferentes:

- Material de adição com a especificação ER 70S-3;
- Material de adição com a especificação ER 304LSi.

Na Figura 61 apresenta-se o resultado de uma microanálise por espectrometria de energia de raios-X às partículas da amostra recolhida no processo TIG com material de adição com a especificação ER 70S-3.

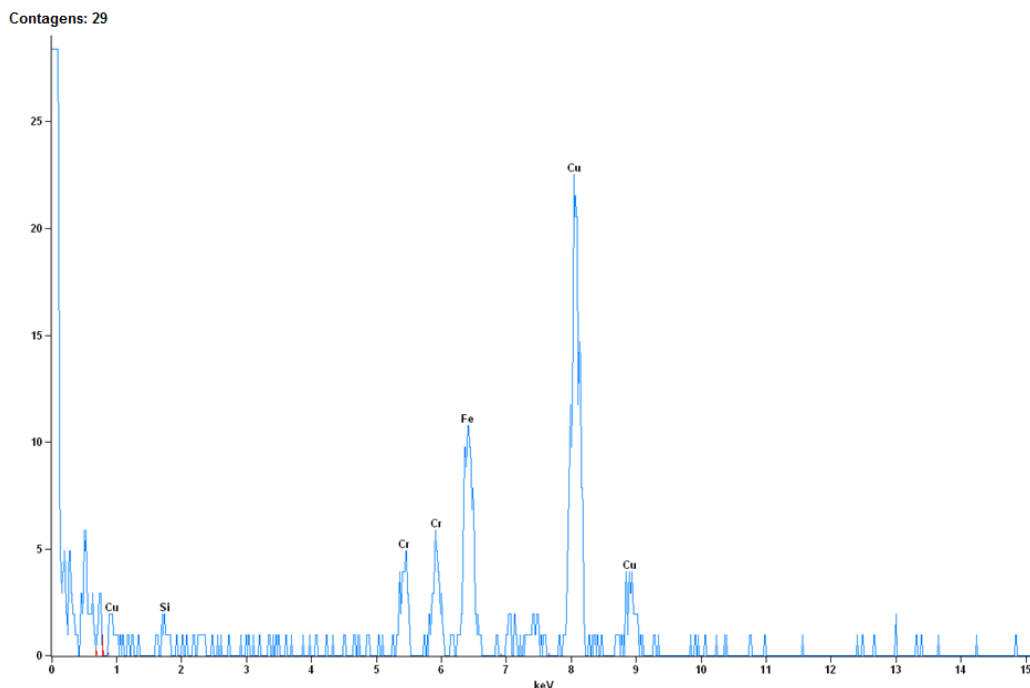


Figura 61 - Análise EDS TIG com o material de adição - ER 70S-3.

Como se pode observar na Figura 61, (que diz respeito a uma amostra de TIG em aço ao carbono), identificam-se dois picos que correspondem a crómio, que, possivelmente, têm origem numa contaminação do ambiente onde as nanopartículas foram recolhidas. O elemento predominante é o ferro, e também se destaca o silício, que se encontra nos materiais de adição com a função de desoxidante.

Na Figura 62 apresenta-se o resultado de uma microanálise por espectrometria de energia de raios-X às partículas da amostra recolhida no processo TIG com material de adição com a especificação ER 304LSi.

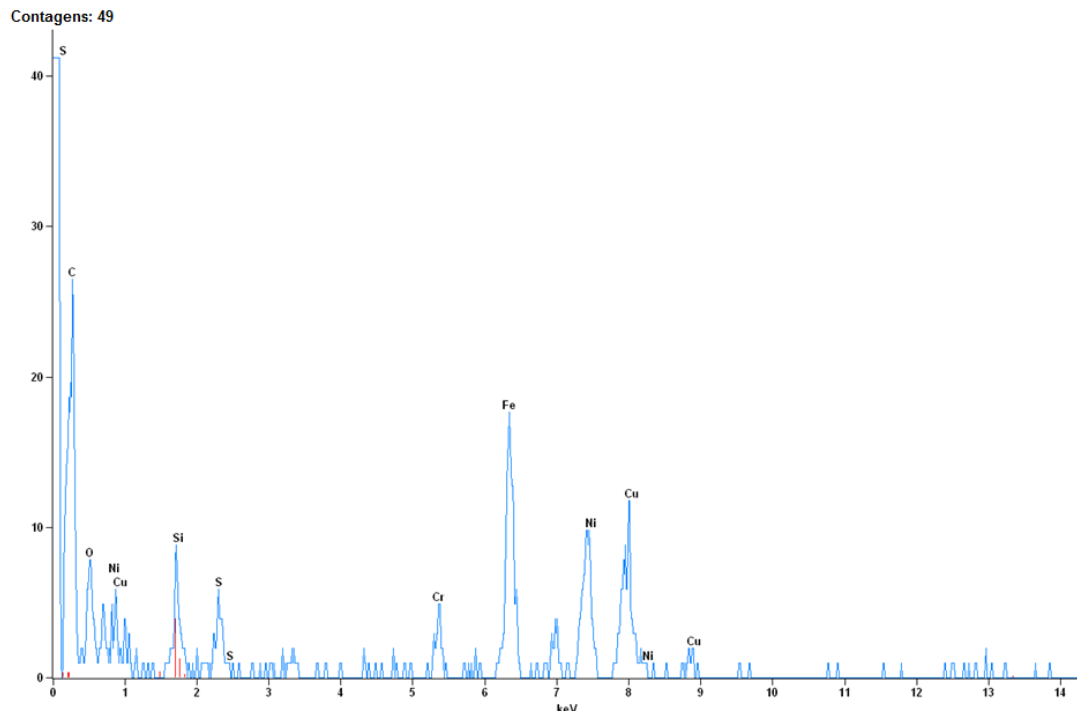


Figura 62 - Análise EDS TIG com o material de adição - ER 304LSI.

Como se pode observar pela Figura 62, identificam-se vários elementos químicos, como o níquel e o cromo, que dão a característica inoxidável a estes materiais; e ainda o silício proveniente, predominantemente, do material de adição. A existência de impurezas, como enxofre, poderá ter origem em contaminações da atmosfera, ou no próprio material de base. O elemento com maior expressão é o ferro.

5.4.6. Resultados da análise morfológica do processo de soldadura TIG

Na Figura 63 apresentam-se três imagens resultantes da análise por microscopia eletrônica de transmissão à amostra recolhida durante o processo de soldadura TIG com consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.

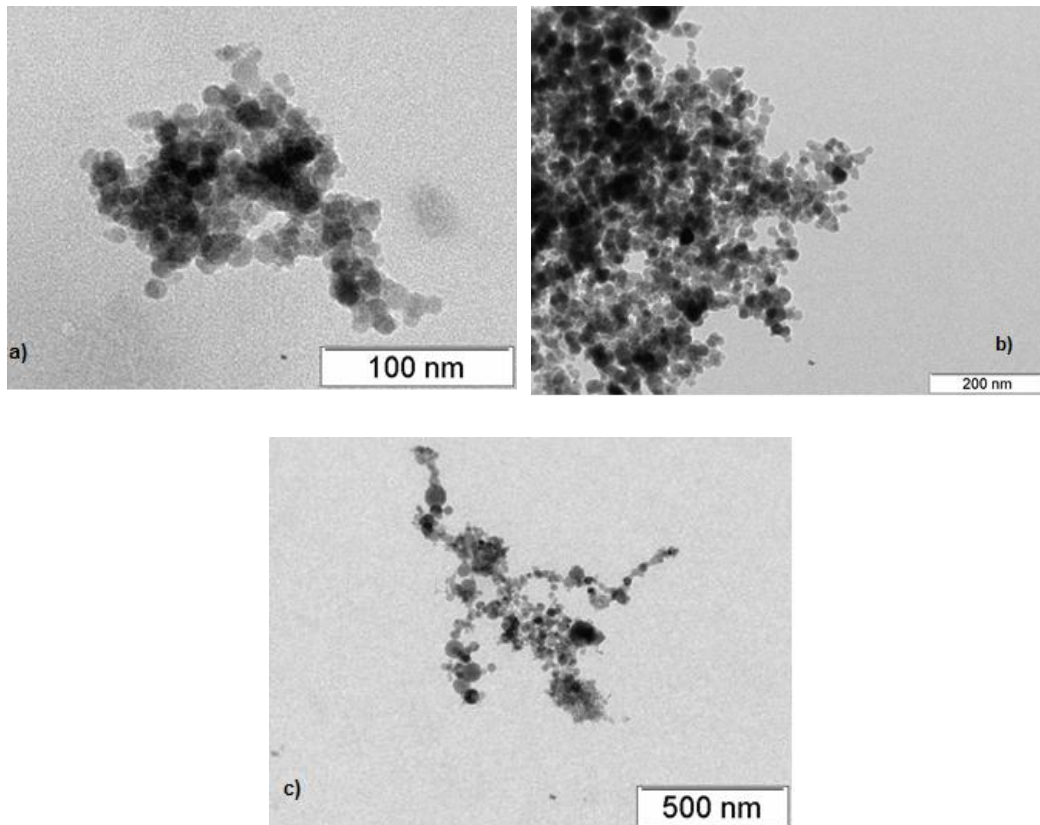


Figura 63 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.

- a)** Partículas à escala de 100 nm. **b)** Partículas à escala de 200 nm e **c)** Partículas à escala de 500 nm.

Estas partículas, analisadas por microscopia eletrónica de transmissão, têm dimensões dentro da gama de 10 a 100 nm, embora sejam menores do que as observadas no processo SER. As partículas encontram-se sob a forma de aglomerados, sem nenhum tipo de estrutura interna ou fronteira bem delimitada, indicando, mais uma vez, que são amorfas.

Na Figura 64, apresentam-se duas imagens resultantes da análise por TEM da amostra recolhida com o amostrador NAS durante soldadura com o processo TIG e consumível ER 304LSi em aço inoxidável.

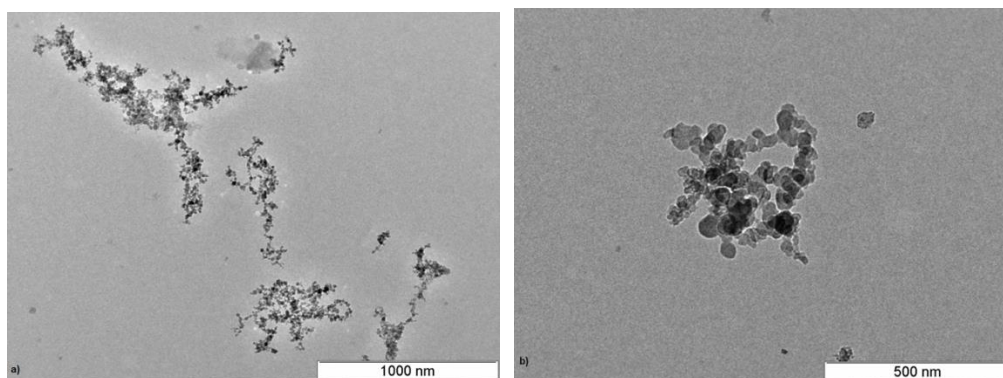


Figura 64 - Imagens TEM de nanopartículas do processo de soldadura TIG com o consumível ER 304LSI em aço inoxidável.

a) Partículas à escala de 1000 nm. **b)** Partículas à escala de 500 nm.

Como se pode observar na Figura 64, as partículas analisadas para o processo TIG com aço inoxidável, à semelhança, das outras amostras analisadas para os outros processos de soldadura em estudo, apresentam uma morfologia idêntica, ou seja, são amorfas, de forma aproximadamente esférica e encontram-se sob a forma de aglomerados.

CAPÍTULO VI – AVALIAÇÃO DE RISCOS

6. Avaliação de Riscos

No presente capítulo, começa-se por fazer uma pequena apresentação do que é a avaliação de risco, passando pelo seu objetivo e definições de importância relevante para esta temática.

De seguida, apresenta-se e define-se o método de avaliação de riscos utilizado, e, apresentam-se os resultados da avaliação usando o método escolhido. Por último propõe-se um plano de boas práticas para o sector avaliado.

A tomada de medidas ambientais, de saúde e de segurança adequadas devem englobar os seguintes passos:

- Identificação do perigo;
- Caracterização do perigo;
- Avaliação da exposição;
- Avaliação do risco;
- Prevenção e controlo dos riscos, e
- Avaliação das medidas de controlo.

A diminuição dos níveis de exposição é, em muitos casos, o único meio de minimizar os riscos associados à utilização de uma substância perigosa, pois tanto o perigo e a dose de uma substância são altamente dependentes das suas propriedades físicas, químicas, e biológicas.

Na área das nanotecnologias, os materiais utilizados têm propriedades únicas, tornando-se difícil ou impossível substituí-los por outros.

Sendo a prevenção entendida como toda a ação para evitar ou diminuir os riscos profissionais, julga-se ser lícito afirmar que a prevenção deve integrar o desenvolvimento sistemático de uma sequência metodológica, capaz de contribuir para as adequadas disposições e medidas a adotar em todas as fases e domínios da atividade em estudo.

Nesta sequência metodológica, a Avaliação de Risco constitui, por sua vez, a etapa chave do processo de prevenção, na medida em que, ao permitir conhecer a existência do risco, bem como a sua natureza, contribui com informação muito importante para o planeamento das intervenções preventivas adequadas. Trata-se de um processo global de estimativa da grandeza do risco e de decisão sobre a sua aceitabilidade.

Assim, começa-se por fazer uma análise do risco, ou seja, primeiro identifica-se e depois estima-se o risco. De um modo geral, faz-se uma gestão do risco.

São várias as metodologias de avaliação de riscos possíveis: avaliação de riscos imposta por legislação específica, avaliação de riscos em que não existe legislação específica, mas

existem normas portuguesas, europeias, internacionais, etc; e avaliação de riscos em que se utilizam métodos específicos.

A Avaliação de Riscos Profissionais funciona como suporte de toda a função de Segurança e Higiene. Partindo do conhecimento dos riscos, determinamos a sua avaliação e enunciamos as medidas de prevenção mais adequadas (planificação de ações preventivas).

Esta avaliação constitui uma obrigação legal que consta no Artigo 15.º da Lei 102/2009. É aplicável a qualquer sector de atividade baseando-se na identificação, estimativa e valorização dos riscos para a segurança e saúde dos trabalhadores.

Partindo deste princípio foi realizada uma avaliação de riscos profissionais, direcionada para as nanopartículas emitidas nos processos de soldadura.

6.1. Aspectos relevantes a considerar na Avaliação de Riscos

Como já referido ao longo deste trabalho, (essencialmente no capítulo II), a utilização de alguns produtos químicos/materiais, designados como «perigosos», podem comportar riscos graves para o Homem e/ou o ambiente. Estes riscos resultam das características físicas, químicas, toxicológicas e ecotoxicológicas das substâncias em causa.

6.1.1. Definições [1]

- a) Perigo: Conjunto de fatores do sistema de trabalho (Homem, máquinas e ambiente de trabalho) com propriedades capazes de causar acidentes ou danos.
- b) Risco (R): Pressupõe a interação pessoa/componente do trabalho e daí, definir-se como a possibilidade de que um trabalhador sofra um dano provocado na execução desse trabalho. Por definição é o produto da probabilidade de uma ocorrência (P) pela severidade, ou seja, $R = P \times S$.
- c) Severidade (S): Consequências provocadas pela ocorrência.
- d) Acidente: O acidente é um acontecimento não planeado que se verifica no local e tempo de trabalho e produz, direta ou indiretamente, lesão corporal, perturbação funcional ou doença de que resulte redução na capacidade de trabalho ou a morte. «NUNCA É FRUTO DO ACASO!»
- e) Dano: Consequência negativa para a saúde e segurança do trabalhador.
- f) Incidente: Acontecimento perigoso que pode dar origem a um acidente ou ter potencial para conduzir a um acidente, mas do qual não resultam danos.
- g) Prevenção: Conjunto de métodos e técnicas que, em conjunto, apresentam como objetivo central: evitar ou reduzir (quando não é possível eliminar), através de um

conjunto de medidas implementadas em todas as fases (concepção/projeto, produção, comercialização, etc.), o número de acidentes e doenças profissionais de uma organização.

- h) Controlar o Risco: Controlar os riscos significa intervir sobre eles, obtendo a minimização dos seus efeitos até a um nível aceitável. A eficácia do controlo depende, assim, em larga medida, de tal ação incidir na sua fonte e ser direcionada no sentido da adaptação do trabalho ao homem.
- i) Risco Aceitável: Risco que foi reduzido a um nível que possa ser aceite pela organização, tomando em atenção as suas obrigações legais e a sua própria política de Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho (SHST).
- j) Não Conformidade: Qualquer desvio às normas de trabalho, das práticas, dos procedimentos, dos regulamentos, do desempenho do sistema de gestão, etc., que possa, direta ou indiretamente conduzir a lesões ou doenças, a danos para a propriedade, a danos para o ambiente do local de trabalho, ou a uma combinação destes.
- k) Ação Preventiva: Ação para eliminar a causa de uma potencial não conformidade ou de uma potencial situação indesejável.
- l) Ação Corretiva: Ação para eliminar a causa de uma não conformidade detetada ou de outra situação indesejável.
- m) Classificação de Perigo: Relativamente aos agentes químicos, os riscos dos produtos químicos perigosos podem referir-se tanto à segurança como à saúde dos trabalhadores, e estão relacionados com o fabrico, utilização, manipulação e presença de substâncias químicas, quer no estado puro, quer sob a forma de misturas.

Os acidentes ou incidentes que têm origem no manuseamento de produtos químicos são frequentes, ocorrendo não só nas atividades ligadas ao sector químico, mas também em variados locais de trabalho, tais como oficinas, lavandarias, indústria têxtil, indústria de calçado e indústria metalomecânica, etc. Também nas atividades domésticas, nomeadamente nos atos de limpeza, e em atividades de lazer, como a pintura e trabalhos de colagem, podem acontecer situações acidentais de exposição a substâncias químicas. O conhecimento das características físico-químicas, toxicológicas e ecotoxicológicas das substâncias é muito importante para a proteção da saúde dos seus utilizadores. Existem variadas fontes de informação nomeadamente do *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH – EUA) que disponibiliza uma base de dados toxicológicos e de informação adicional, designada por *Registry of Toxic Effects of Chemical Substances* (RTECS). Esta base de dados contém elementos de interesse para a indústria e para os técnicos de segurança, higiene e saúde.

Também pode ser obtida informação através do *International Programme on Chemical Safety* (IPCS). Entre as áreas de intervenção do IPCS destacam-se: a avaliação dos riscos químicos para a saúde humana e o ambiente, e a gestão e a prevenção das exposições a substâncias tóxicas.

Também a *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR, US *Department of Health & Human Services* - EUA) dispõe de um conjunto de informação sobre produtos químicos, na forma de fichas toxicológicas de substâncias, que se designam por TOXFAQs.

O processo de classificação consiste em enquadrar a substância numa das classes e categorias de perigo, definidas a partir de testes e critérios do manual de recomendações sobre o transporte de matérias perigosas das Nações Unidas, em atribuir-lhe frase (s) indicadora (s) de perigo e de precaução, assim como o pictograma que a qualifique. De acordo com o atual regulamento CE nº 1272/2008 de 16 de dezembro, as frases indicadoras de perigo (Hazard), representadas por uma série de números precedida pela letra H, indicam a natureza dos riscos específicos de cada substância. As recomendações de prudência (ou frases de segurança) são representadas por uma série de números precedida pela letra P, indicando as precauções recomendadas em relação a uma determinada substância. As classes e categorias de perigo estão divididas em três áreas diferentes, nomeadamente: perigos físicos, perigos para a saúde e perigos para o ambiente. Cada uma dessas áreas engloba várias classes e respetivas categorias de perigo. Para perceber melhor que agentes químicos estão englobados em cada classe e categoria de perigo pode ser consultado o anexo I (parte 2) do regulamento CE nº1272/2008.

6.1.2. Avaliação da Exposição

A avaliação da exposição profissional a NP assenta na metodologia e pressupostos da avaliação profissional a substâncias químicas no local de trabalho [49].

De forma semelhante à preocupação com a formulação química relativa aos riscos potenciais, permanece o desafio de fornecer a proteção adequada aos trabalhadores tendo em conta o tamanho, superfície e propriedades relacionadas com a composição do NM e da sua capacidade de interagir com o sistema biológico do indivíduo exposto [15].

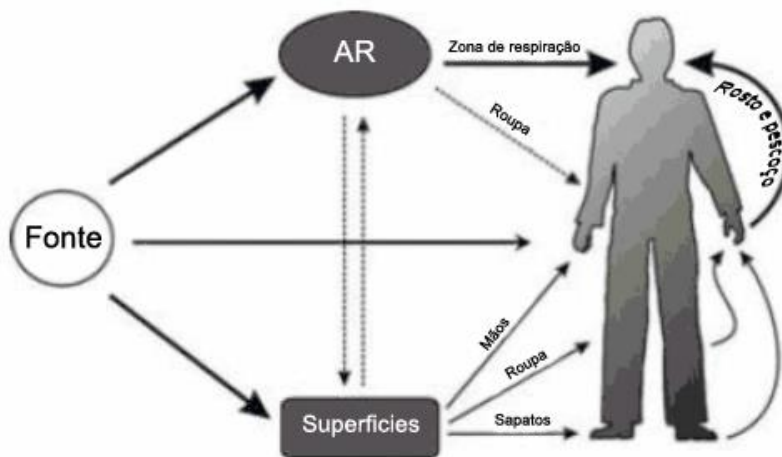


Figura 65 - Modelo para utilização na avaliação de exposição. Imagem adaptada de [53].

Como tal, questionámo-nos sobre quais as medições e que aspetos da exposição devem ser considerados. Por isso, é urgente e necessário que toda a comunidade científica consiga fornecer respostas às seguintes questões: quais os NM de risco; quais as taxas de dano; qual a fração respirável ou o valor limite de exposição; que partículas são relevantes para investigação futura; quais os passos nos processos de I&D e de fabrico, bem como quais as regras claras a seguir no tocante à manipulação, tempo de exposição e potenciais cenários de risco (NIOSH,2012). Esta informação requer a avaliação de muitos locais e diferentes processos de fabrico. Naturalmente, nem tudo poderá ser medido, nem será possível medir sempre tudo. Uma abordagem sistemática à exposição profissional poderá vir a reduzir riscos futuros dos locais de trabalho (LT) e ambientes, e ainda permitir uma rápida aprendizagem e disseminação da informação (através das - agências e autoridades de saúde nacionais) com um mínimo de riscos para os trabalhadores e população eventualmente expostos [15].

Tabela 31 - Estado da arte para avaliação *versus* exposição. Tabela adaptada de [51].

Perigo	Exposição	Risco	Gestão do risco	
Dados de toxicidade	Dados da exposição: - Trabalho/tarefa; - Sector; - Tipo de NP; - Métricas; - Características dos equipamentos;	Avaliação Quantitativa	Banda de perigos	<i>Control banding Nanotool</i>
Características das NP		Avaliação Qualitativa	VLE específicos	VLE categóricos
Dados da vigilância dos perigos		Características dos modelos animais	Comunicação do risco Química verde	Guia do Controlo
Dados da investigação em segurança: - Explosividade; - Inflamabilidade.	Matrizes Trabalho/exposição	Dados da investigação epidemiologia	Guia de vigilância Médica	Dados de vigilância Médica
	Dados dos registos de exposição	Dados Incertos	Controlo dos dados de investigação	Complacência com a informação de investigação

É importante referir que, para além dos meios de proteção individual, existem escassas recomendações relativamente a este tema. Para estabelecer valores limite ambientais de exposição ambiental é necessário que sejam conhecidas as relações entre a exposição e os efeitos sobre a saúde, motivo por que não existam publicados, de momento, valores limites de exposição (VLE) ambiental a NP manufaturadas [52].

A ausência de métodos analíticos seguros e aplicáveis em análises de rotina para caracterizar a exposição, detetar e quantificar a concentração de nanopartículas com potencial de exposição quer para os trabalhadores quer no meio ambiente, prejudica qualquer avaliação da exposição.

De acordo com o normativo - *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* - REACH, os requisitos para as avaliações de segurança são baseados no volume de produção em toneladas por empresa. No momento, atual o volume de produção de NP é ainda muito mais baixo para a maioria dos NM, não sendo atingidos valores superiores a uma tonelada, valor este que obriga ao registo. Por outro lado, há uma grave lacuna de dados toxicológicos e ecotoxicológicos; e nenhum limite de risco e de exposição ocupacional poder ser estabelecido com as metodologias atualmente existentes.

As substâncias químicas são identificadas por um número - *Chemical Abstract Service* (CAS) - e se o NM tem composição química semelhante a um material em maior escala usam-se os VLE da substância-mãe.

Não existem dois NM iguais e ainda não foram identificadas quais as características que potenciam a toxicidade dos NM. A abordagem tradicional de avaliação de risco das substâncias químicas parece poder aplicar-se nos materiais à nanoescala, com a exceção

das nanofibras. Contudo, não podemos estimar o perigo associado a uma nova NP pela atuação da substância química que lhe dá origem, porque se detetam diferenças na dose-resposta de alguns NM. Daí que a utilização de medidas de senso comum tais como a contenção, ventilação e uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) permaneçam válidas para minimizar a exposição até que exista evidência científica que suporte outras medidas, nomeadamente, valores limites de exposição (CDC/NIOSH, *General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories*, 2012) [15].

6.2. Método de Avaliação de Riscos

A Avaliação de Riscos é feita através da aplicação de metodologias apropriadas às diferentes “situações” em estudo.

Em regra, estas metodologias encontram-se definidas em regulamentos jurídicos, em normas técnicas, em códigos de boas práticas, em manuais de procedimento e em metodologias específicas.

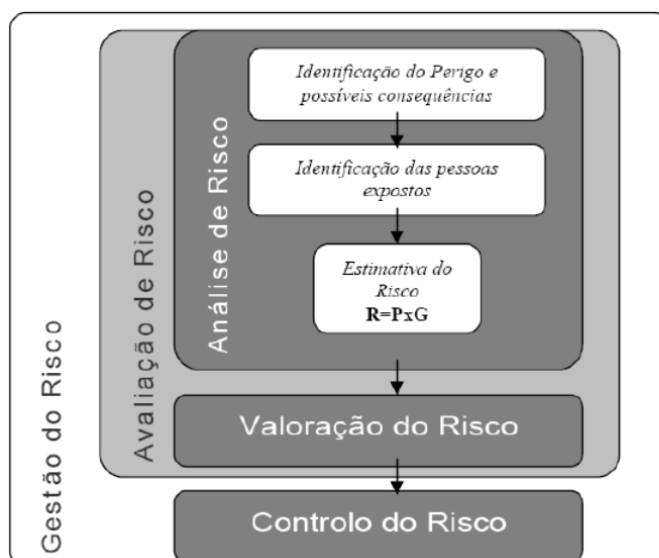
No entanto, não há, de momento, nenhuma lei que especifique a metodologia a adotar nesta identificação e avaliação, o que significa que compete ao Técnico Superior de Segurança e Higiene do Trabalho a escolha do método que considere adequado, face à realidade que pretende avaliar.

Ao longo do tempo, foram sendo criados, desenvolvidos e aperfeiçoados, inúmeros métodos com capacidade para identificar os perigos existentes no local de trabalho, e efetuar a análise racional das consequências dos riscos associados, bem como as possíveis reduções dos danos, mediante a adoção de diferentes medidas de controlo.

Estes métodos podem ser integrados em diferentes categorias, de acordo com as suas características específicas, os objetivos para que foram desenvolvidos, os meios utilizados e os fatores que os relacionam. A título de exemplo, em função da importância relativa de cada uma das suas componentes de “identificação” e de “quantificação” do risco, é habitual distingui-los como métodos qualitativos, métodos quantitativos e métodos semi - quantitativos.

O estudo efetuado, para posterior avaliação de riscos, pode ser apresentado através do seguinte esquema, independentemente do método de avaliação de riscos utilizado:

Tabela 32 - Fases de um processo de gestão de risco profissional [1].



De notar que o método de avaliação de riscos aqui utilizado, se baseia na publicação “*Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures*” de Samuel Y. Paik, David M. Zalk e Paul Swuste” [53].

Trata-se de uma ferramenta qualitativa que permite uma aproximação útil para a avaliação dos níveis de risco inerentes aos métodos de manuseamento e modos de operação com nanomateriais.

Segundo os autores, com base nesta ferramenta de avaliação de riscos, é possível realizar uma aproximação ao controlo da exposição a nanopartículas [20].

6.2.1. **Control Banding Nanotool**

CB são as iniciais de *Control banding*, que podemos traduzir por nivelamento de controlo. Trata-se de uma abordagem ao risco ocupacional em que os perigos e a exposição à substância são ordenados e combinados em bandas de risco semelhante, a que se associam medidas de controlo previamente estandardizadas (CDC/NIOSH, 2009).

Esta ferramenta tem por base o modelo do nível de biossegurança «*bio safety level- NIOSH/CDC*» desenvolvido na indústria farmacêutica nos anos 80. Esta tentativa de abordagem ao risco foi a resposta possível ao desafio levantado pela investigação de novas drogas, com produtos cada vez mais ativos e para os quais não existiam, ainda, valores limites de exposição. Iniciou-se na indústria farmacêutica para dar resposta à proteção e segurança dos colaboradores na manipulação de produtos ativos, ainda não totalmente investigados e para os quais não existia *Occupational Exposure Limits* (OEL).

O CB é, assim, uma abordagem administrativa e qualitativa que define risco (risco=probabilidade x gravidade) e estabelece controlos adequados.

De um modo geral, esta ferramenta de avaliação de riscos, pode ser descrita através dos seguintes critérios [53]:

- ❖ **Pontuação para SEVERIDADE** - Soma de todos os fatores de severidade. A pontuação máxima é 100. Dos 100 pontos, 70 são baseados em características do nanomaterial e 30 são baseados em características do material similar.

0-25: Severidade baixa; 26-50: Severidade média; 51-75: Severidade alta; 76-100: Severidade muito alta.

- 1. Reatividade da superfície** - A química da superfície é um fator de influência chave na toxicidade das partículas inaladas. A atividade de radicais livres da superfície da partícula é o fator primário que influencia a reatividade da superfície. Os pontos são atribuídos considerando uma classificação da reatividade de superfície como “alta”, “média” ou “baixa”. Quando disponíveis, devem ser consultados os estudos que tenham sido efetuados a este respeito.

Alta: 10; Média: 5; Baixa: 0; Desconhecido: 7,5.

- 2. Forma da partícula** – Alguns estudos demonstram que a exposição a partículas fibrosas, como é o caso do amianto (asbesto), tem sido associada ao risco de contrair cancro ou fibrose pulmonar. As estruturas tubulares, tais como nanotubos de carbono, também têm sido indicados como causa de inflamação e lesões nos pulmões de ratos. Considerando esta informação como base, a pontuação mais alta para severidade corresponde às partículas fibrosas ou de forma tubular. A pontuação média é atribuída a partículas com formas irregulares, dado que estas apresentam, normalmente, uma maior área de superfície relativamente a partículas esféricas.

Tubulares ou fibrosas: 10; Irregulares: 5; Compactas ou esféricas: 0; Desconhecido: 7,5.

- 3. Diâmetro da partícula** – Partículas de 1 a 10 nm de diâmetro têm uma possibilidade superior a 80% de se depositarem nos pulmões. Partículas de 10 a 40 nm possuem uma possibilidade superior a 50%, e as de 41-100 nm têm uma possibilidade superior a 20% de se depositarem nos pulmões. Tendo como base esta capacidade de deposição nos pulmões, e o facto de partículas menores terem maior área de superfície comparativamente a partículas de dimensões superiores para uma dada concentração mássica, a pontuação é atribuída da seguinte forma:

1-10nm: 10; 11-40nm: 5; <41-100 nm: 0; Desconhecido: 7,5.

4. **Solubilidade** – Diversos estudos demonstram que as nanopartículas pouco solúveis podem causar stress oxidativo, levando a inflamação, fibrose pulmonar ou cancro. Uma vez que algumas nanopartículas solúveis podem causar efeitos adversos, através de dissolução no sangue, a pontuação de severidade também é atribuída a nanopartículas solúveis, embora em menor grau do que às insolúveis.

Insolúveis: 10; Solúveis: 5; Desconhecido: 7,5.

5. **Carcinogenicidade** - A pontuação é atribuída tendo em conta se o material é, ou não, considerado carcinogénico.

Sim: 6; Não: 0; Desconhecido: 4,5.

6. **Toxicidade Reprodutiva** – é atribuída caso o material apresente perigo de toxicidade reprodutiva, ou não.

Sim: 6; Não: 0; Desconhecido: 4,5.

7. **Mutagenicidade** - A pontuação é atribuída caso o material seja mutagénico, ou não.

Sim: 6; Não: 0; Desconhecido: 4,5.

8. **Toxicidade dérmica** – a pontuação é atribuída caso o material apresente perigo de toxicidade dérmica, ou não.

Sim: 6; Não: 0; Desconhecido: 4,5.

9. **Desenvolvimento de sintomas de asma:** a pontuação é atribuída caso o material desenvolva sintomas de asma ou não.

Sim: 6; Não: 0; Desconhecido: 4,5.

10. **Toxicidade do material de origem** – A matéria-prima de algumas nanopartículas tem valores limite de exposição definidos. Como referido anteriormente, a toxicidade das nanopartículas pode diferir significativamente do mesmo material em dimensões superiores. Contudo, este é um bom ponto de partida para compreender a toxicidade do material. A pontuação é atribuída tendo em conta o VLE (Valor Limite de Exposição) do material.

0-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: 10; 2-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: 5; 11-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: 2,5; Desconhecido: 7,5.

11. **Carcinogenicidade do material de origem** - A pontuação é atribuída se o material da partícula é carcinogénico, ou não.

Sim: 4; Não: 0; Desconhecido: 3.

12. **Toxicidade reprodutiva do material de origem** - A pontuação é atribuída se o material da partícula é tóxico para reprodução, ou não.

Sim: 4; Não: 0; Desconhecido: 3.

13. Mutagenicidade do material de origem: A pontuação é atribuída se o material da partícula é mutagénico, ou não.

Sim: 4; Não: 0; Desconhecido: 3.

14. Perigo para a pele do material de origem: A pontuação é atribuída se o material da partícula apresenta risco para a pele, ou não.

Sim: 4; Não: 0; Desconhecido: 3.

15. Desenvolvimento de sintomas de asma do material de origem: A pontuação é atribuída se o material de origem apresenta riscos que englobam desenvolvimento de sintomas de asma.

Sim: 4; Não: 0; Desconhecido: 3.

❖ **Pontuação para PROBABILIDADE** - É a soma de todos os fatores de exposição. A pontuação máxima é 100. Estes fatores determinam a amplitude à qual os trabalhadores estão potencialmente expostos a materiais nanométricos, primariamente através da inalação, mas também através do contacto dérmico.

0-25: Praticamente impossível; 26-50: Menos possível; 51-75: Possível; 76-100: Provável.

1. Quantidade estimada de produto químico utilizado durante tarefa.

>100 mg: 25; 11-100 mg: 12,5; 0-10 mg: 6,25; Desconhecido: 18,75.

2. Pulverulência e nebulosidade: A pontuação é atribuída de acordo com estes fatores. Até que exista uma melhor orientação quanto à quantificação de níveis de pós, a pontuação deve ser atribuída tendo em conta uma estimativa. Quando é escolhido “Nulo” para este nível, tem-se que a probabilidade geral será “Praticamente impossível”, independentemente dos outros fatores de probabilidade.

Alto: 30; Médio: 15; Baixo: 7,5; Nulo: 0; Desconhecido: 22,5.

3. Número de trabalhadores com exposição semelhante: A pontuação é atribuída tendo em conta o número de trabalhadores autorizados para a atividade.

>15: 15; 11-15: 10; 6-10: 5; 1-5: 0; Desconhecido: 11,25.

4. Frequência da operação: A pontuação é atribuída tendo em conta a frequência da operação.

Diária: 15; Semanal: 10; Mensal: 5; Menor que mensal: 0; Desconhecido: 11,25.

5. Duração da operação: A pontuação é atribuída tendo em conta a duração da operação.

>4 horas: 15; 1-4 horas: 10; 30-60 min: 5; Menos de 30 min: 0; Desconhecido: 11,25.

Tabela 33 - Matriz de relação entre Severidade e Probabilidade para determinar níveis de risco (NR). Figura adaptada de [53].

		PROBABILIDADE			
		Praticamente Impossível (0-25)	Menos Possível (26-50)	Possível (51-75)	Provável (76-100)
SEVERIDADE	Muito Alta (76-100)	NR3	NR3	NR4	NR4
	Alta (51-75)	NR2	NR2	NR3	NR4
	Média (26-50)	NR1	NR1	NR2	NR3
	Baixa (0-25)	NR1	NR1	NR1	NR2

Medidas gerais a adotar:

- **NR 1** – Ventilação geral
- **NR 2** – Ventilação com exaustão localizada / “hottes”
- **NR 3** – Confinamento
- **NR4** – Procurar aconselhamento por especialista

6.3. Resultados da Avaliação de Riscos

A avaliação de riscos foi efetuada para os processos de soldadura em estudo, tendo em consideração, os materiais base utilizados na soldadura, bem como os parâmetros associados a cada processo de soldadura (referidos ao longo deste trabalho, mais concretamente, nos capítulos IV e V).

Sendo assim, a metodologia/ferramenta (*Control Banding Nanotool*), atrás descrita, foi aplicada e validada no seguimento dos casos em estudo, como a seguir se indica:

- ✓ MAG – Aço ao Carbono [realizados ensaios utilizando três gases de proteção diferentes: Arcal 21 (90% Ar e 10% CO₂), Atal 5 (82% Ar e 18% CO₂) e 100% CO₂];

- ✓ MAG – Aço Inox Austenítico [ensaios realizados utilizando três gases diferentes: Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂), Arcal 121 (81% Ar; 18% He e 1% CO₂) e Arcal 129 (91% Ar; 5% He; 2% CO₂ e 2% N)];
- ✓ SER utilizando dois eletrodos básicos (E7018, E7018-1) e um eletrodo rutilico (E 6013);
- ✓ TIG - Aço ao Carbono com material de adição (ER 70S-3) e sem material de adição;
- ✓ TIG – Aço Inox Austenítico com material de adição (ER 304LSi) e sem material de adição.

De seguida, indicam-se os resultados obtidos, para a avaliação de riscos. De notar que só serão apresentados quatro exemplos, para a matriz de relação entre severidade e probabilidade para determinar níveis de risco, isto porque, os resultados das matrizes foram idênticos nos diversos casos em estudo. Assim, optou-se por demonstrar apenas uma para cada processo de soldadura, os dados respetivos em relação à matriz.

No entanto no Anexo I encontrasse exemplificada a ferramenta de avaliação de riscos, para um dos casos em estudo.

Outro aspeto relevante para esta avaliação de riscos, é que esta foi baseada, essencialmente, em três critérios:

- ✓ Natureza do material de adição/consumível (eletrodos no processo SER e material de adição para os processos MAG e TIG);
- ✓ A proteção do banho em fusão, das gotas de material de adição e cordão de soldadura que foi obtida através de a utilização de proteção gasosa (MAG e TIG);
- ✓ Natureza do material base a soldar (Aço ao Carbono e Aço Inoxidável Austenítico).

A descrição/classificação de cada “material “ (CAS de cada elemento; classificação da atividade, etc.) foi baseada nas fichas de procedimento de segurança para cada “material” constituinte do processo de soldadura.

6.3.1. MAG – Aço Carbono (para o gás de proteção 100% CO₂)

Na Tabela 34, encontra-se um exemplo das principais características, retiradas das fichas de procedimento de segurança, em que foi baseada a avaliação de riscos para o processo MAG – Aço ao Carbono (100% CO₂).

Tabela 34 - Características base para a realização da avaliação de riscos: MAG – Aço ao Carbono (100% CO₂).

Número da Atividade	Descrição	Nome ou descrição do nanomaterial	CAS#	Classificação da atividade	Engenharia de Controle (atual)
1	Material de Adição obtido através da utilização de um consumível do tipo Fio Sólido Contínuo. "Lincoln ER70S-6"	Nanopartículas metálicas (C, Mn, S, Si, P, Cu, Ni, Mo, V, Cr),	Ni: 7440-02-0 Cu: 7440-50-8 Mn: 7439-96-5 Mo: 7439-98-7 Cr: 740-47-3 S: 7404-34-9 Si: 90337-93-2 V: 7440-62-2 P: 7723-14-0 C: 7440-44-0	Geração de nanopartículas na fase gasosa.	Exaustor ou ventilação local
2	MAG (Processo de Soldadura por fusão) - A Proteção do banho em fusão, das gotas de material de adição e cordão de soldadura é obtida através de uma proteção gasosa ativa (Arcal 21- (100%CO ₂)).	Gases (CO ₂)	CO ₂ : 124-38-9	Geração de nanopartículas na fase gasosa	Exaustor ou ventilação local
3	Material base a Soldar - Aço Carbono: ligas metálicas de Fe (cerca de 0,05%) e C (≤1,5%) e pequenas quantidades de outros compostos.	Nanopartículas metálicas (Libertação de partículas de aço carbono)	Mn: 7439-96-5 S: 7404-34-9 Si: 90337-93-2 P: 7723-14-0 C: 7440-44-0 Fe: 7439-89-6	Perfuração ou outras perturbações mecânicas de materiais contendo nanopartículas.	Exaustor ou ventilação local.

Com base nestes critérios, e seguindo os parâmetros descritos no capítulo VI - 6.2.1, utilizando a ferramenta *Control Banding Nanotool*, obteve-se a matriz de relação entre severidade e probabilidade de modo a determinar o nível de risco para o processo em estudo, que se apresenta na Tabela 35.

Tabela 35 - Determinação do Nível de Risco – MAG – Aço ao Carbono (100% CO₂).

Número da Atividade	Severidade	Probabilidade	Total	Medidas de Controle
1 (Material de adição - Lincoln ER70S-6)	Média (35)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
2 (Proteção Gasosa)	Média (30,5)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
3 (Material base - Aço ao Carbono)	Alta (62,5)	Possível (55)	NR3 (150)	Contenção

Como se pode observar pela Tabela 35, a natureza do material base a soldar é o que apresenta um maior nível de risco, aquando da seleção das medidas de controlo a tomar, e o que mais influencia a implementação de medidas preventivas.

Retira-se que, para os outros dois gases utilizados para o processo MAG – Aço ao Carbono, os resultados não são aqui apresentados uma vez que obteve-se exatamente, o mesmo nível de risco para os três parâmetros. Isto acontece porque a composição química do material base e do material de adição é a mesma, só havendo variações no tipo de gás utilizado, e na, realidade este aspeto não tem grande influência sobre os resultados desta avaliação.

6.3.2. MAG – Aço Inox Austenítico [para o gás de proteção Arcal 12 (95% Ar e 5% CO₂)]

Com base em critérios idênticos aos definidos para o processos MAG - aço carbono, e seguindo os parâmetros descritos no capítulo 6.2.1, utilizando a ferramenta *Control Banding Nanotool*, obteve-se a matriz de relação entre severidade e probabilidade de modo a determinar o nível de risco para o processo em estudo que se apresenta na Tabela 36.

Tabela 36 - Determinação do Nível de Risco – MAG – Aço Inox Austenítico [Arcal 12 (90% Ar e 10% CO₂)].

Número da Atividade	Severidade	Probabilidade	Total	Medidas de Controlo
1 (Material de adição - ER 316 LSi)	Média (35)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
2 (Proteção Gasosa)	Média (30,5)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
3 (Material base - Aço Inox Austenítico)	Alta (62,5)	Possível (55)	NR3 (150)	Contenção

Como se pode observar na Tabela 36, a natureza do material base a soldar é o que apresenta um maior nível de risco, aquando da seleção das medidas de controlo a tomar, é também o que mais influencia a implementação de medidas preventivas. Do mesmo modo, retira-se que, para os outros dois gases utilizados para o processo MAG – aço inox austenítico, os resultados referentes ao nível de risco, não serão aqui apresentados, já que se obteve, exatamente, o mesmo nível de risco para os três parâmetros. Isto acontece porque a composição química do material base e do material de adição é a mesma, só variando o tipo de gás, o que não tem grande influência para esta avaliação.

Note-se ainda, que o nível de risco para o processo MAG - aço inox austenítico é idêntico ao do aço ao carbono, o que acontece pelo facto do material base/consumíveis variar muito pouco em termos da sua composição, além de que se tratar de uma análise qualitativa.

6.3.3. SER – Aço ao Carbono (Eléctrodo E7018)

Com base em critérios idênticos aos definidos para o processo MAG - aço carbono, e seguindo os parâmetros descritos no capítulo VI - 6.2.1, utilizando a ferramenta *Control Banding Nanotool*, obteve-se a matriz de relação entre severidade e probabilidade de modo a determinar o nível de risco para o processo em estudo que se apresenta na Tabela 37.

De notar que, para o caso do processo SER, só vai ser apresentado o nível de risco para o eléctrodo revestido E7018, pelo facto de as matrizes para os outros eléctrodos terem tido resultados idênticos a este eléctrodo.

Tabela 37 - Determinação do Nível de Risco – SER (eléctrodo E7018).

Número da Atividade	Severidade	Probabilidade	Total	Medidas de Controlo
1 Eléctrodo 7018- (Eléctrodos com revestimento com base carbonatos de cálcio e de magnésio, elementos desoxidantes).	Média (35)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
2 (Material base - Aço ao Carbono)	Alta (62,5)	Possível (55)	NR3 (150)	Contenção

Como se pode observar na Tabela 37, a natureza do material base a soldar é o que apresenta um maior nível de risco, aquando da seleção das medidas de controlo a tomar, sendo o que mais influencia a implementação de medidas preventivas, como já tinha constatado nos casos anteriormente apresentados.

Do mesmo modo, tem-se que o nível de risco para o processo SER – E7018 é idêntico ao dos outros eléctrodos, o que acontece, mais uma vez, pelo facto do material base ser o mesmo e a composição química dos eléctrodos só variar sensivelmente num ou noutro elemento químico, além de se tratar de uma análise qualitativa.

6.3.4. TIG – Aço ao Carbono (com material de adição - ER 70S-3)

Com base em critérios idênticos aos definidos para o processo MAG - aço carbono, e seguindo os parâmetros descritos no capítulo VI - 6.2.1, utilizando a ferramenta *Control Banding Nanotool*, obteve-se a matriz de relação entre severidade e probabilidade de modo a determinar o nível de risco para o processo em estudo que se apresenta na Tabela 38.

Tabela 38 - Determinação do Nível de Risco - TIG – Aço ao Carbono(Consumível – ER70S-3).

Número da Atividade	Severidade	Probabilidade	Total	Medidas de Controlo
1 (Material de adição - ER 70S-3)	Média (35)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
2 (Proteção Gasosa – 100 % Árgon)	Média (30,5)	Possível (57,5)	NR2 (125)	Exaustão ou ventilação local
3 (Material base - Aço Inox Austenítico)	Alta (62,5)	Possível (55)	NR3 (150)	Contenção

Como se pode observar, na Tabela 38, o material base a soldar é o que apresenta um maior nível de risco, aquando da seleção das medidas de controlo a tomar, sendo o que mais influência a implementação de medidas preventivas, como já tinha sido constatado nos casos anteriores.

Como anteriormente, o processo TIG – aço ao carbono sem material de adição, bem como, para o processo TIG – aço inoxidável austenítico com ou sem material de adição, estes não serão aqui apresentados demonstrados, já que se obteve exatamente, o mesmo nível de risco para os parâmetros em análise isto porque a composição química do material

base e do material de adição, apesar de não ser a mesma, não interfere significativamente nesta avaliação, além de que trata de uma análise qualitativa.

No entanto, pela análise da emissão das nanopartículas efetuada no capítulo V, constata-se que, com a adição de consumível a emissão de nanopartículas é superior, o que não é visível nesta análise qualitativa. Como tal, é importante evidenciar que para um controlo eficaz das nanopartículas nos processos de soldadura em estudo (MAG, SER e TIG), as medidas de controlo serão no âmbito da melhoria ou criação de condições de boa exaustão ou ventilação local, bem como a adoção de medidas de contenção.

Estas medidas de controlo, bem como as boas práticas a ter em consideração aquando da execução dos processos de soldadura, serão apresentadas e aprofundadas no ponto seguinte.

6.4. Definição de Boas Práticas para evitar riscos acrescidos sobre a saúde dos soldadores expostos

As boas práticas, devem ser definidas, tendo em atenção, os principais gerais da prevenção dos riscos (art.º 15 da Lei n.º 102/2009, de 10 de Setembro (Regulamenta o regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho) [7]:

- ✓ Identificação dos riscos;
- ✓ Avaliar os riscos não evitados;
- ✓ Combater os riscos na origem;
- ✓ Dar atenção permanente para a adaptação do trabalho ao Homem;
- ✓ Atender ao estado da evolução da técnica;
- ✓ Substituir o que é perigoso pelo menos perigoso ou isento de perigo;
- ✓ Integrar a prevenção num todo coerente;
- ✓ Dar prioridade à proteção coletiva face à individual;
- ✓ Efetuar a atualização da informação e a formação dos colaboradores.

Após quantificação do risco procuraram-se definir/encontrar boas práticas, direcionadas no sentido de evitar riscos acrescidos sobre a saúde dos soldadores expostos. Estas boas práticas serão do seguinte tipo:

- ✓ Ventilação dos locais de trabalho e extração localizada;
- ✓ Contenção dos locais onde se verifica exposição;
- ✓ Utilização dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs);

- ✓ Analise/escolha de materiais/processos/parâmetros que possam conduzir a menores libertações de fumos.

De notar que as boas práticas associadas aos tópicos referidos têm em consideração os rótulos indicadores de precaução inseridos na ISO/TC 44/SC Proposal TO ISO/TC 44 – “*Welding and safety – Wordless precautionary labels for arc-welding and cutting products*”.

6.4.1. Ventilação dos locais de trabalho e extração localizada/contenção dos locais onde se verifica exposição

A necessidade de melhorar as condições de trabalho, associadas aos processos de soldadura, é um objetivo primordial nos dias de hoje. Atualmente estas atividades têm sido objeto de investigação por diversas instituições científicas, e esta tem sido uma temática de interesse por parte de várias empresas cuja atividade está focada em modos e meios de proteção nos locais de trabalho.

De seguida indicam-se as principais formas de eliminar as emissões de poeiras e gases no ambiente de trabalho, que estão diretamente associadas à emissão de partículas em processos de soldadura, através da utilização eficaz de sistemas de ventilação.

Antes de qualquer implementação, é necessário ter em consideração os princípios gerais do sistema de ventilação [54]:

- ✓ Quando o tempo total de soldadura e de permanência, durante o dia é superior a 2 horas, o local deverá estar equipado com um sistema permanente de ventilação, sendo a renovação do ar diretamente ligada às funções das instalações, tais como: o equilíbrio de calor e, humidade, bem como o controlo de emissão das poeiras e gases.
- ✓ Os dispositivos ou componentes, de operação que podem estar diretamente relacionados com as emissões de gases nocivos, vapores ou pós, devem ser hermeticamente isolados.
- ✓ Quando não é possível a implementação de sistemas de ventilação permanentes, devem ser implementados sistemas de extração locais, sendo que o objetivo de um sistema de ventilação é criar as condições previstas para o conforto térmico e pureza do ar, na área de trabalho, de modo a fornecer a quantidade necessária de ar fresco e garantir condições adequadas para a realização dos processos tecnológicos. A ventilação local extrai vapor, aerossóis, poeiras e ar quente diretamente na fonte - não permitindo assim que estes agentes se espalhem pelo meio envolvente ao processo.

- ✓ O ar deve ser extraído, o mais próximo possível, da zona contaminada e tão perto quanto possível da área onde os poluentes são gerados (de maneira a que não retornem para a área de trabalho).
- ✓ O conforto térmico do trabalhador é uma das prioridades que devem ser consideradas na escolha de um sistema de ventilação industrial.
- ✓ A ventilação por extração local, permite uma proteção mais eficaz e económica contra as emissões de poluentes do ar, para o ambiente, e evita a sua propagação no meio envolvente.
- ✓ Os melhores resultados, para a extração local de fumos, são obtidos, até ao momento, quando a extração pertence diretamente/faz parte das máquinas ou equipamentos tecnológicos utilizados no processo.
- ✓ Existem vários tipos de extratores que evitam a emissão de partículas para o meio envolvente, tais como: extratores externos, extratores parciais e extratores totais.
- ✓ No entanto, os mais eficazes, são os extratores totais, como os “bocais de sucção” que são colocados num local favorável, ou seja, próximo das fontes de emissão de poluentes: na parte lateral, abaixo ou acima deles (apresentam então uma solução semelhante aos chamados “capuzes”).
- ✓ A forma e disposição dos bocais de aspiração dependem do tipo de processo tecnológico e do tipo e dos parâmetros associados aos poluentes. Em princípio, os injetores de sucção devem ser colocados na direção do movimento natural dos poluentes. Estes podem ser ligados a instalações fixas, locais de extração ou filtração e unidades de ventilação. O volume de fluxo de ar extraído, através de sucção, é determinado com base nos dados apresentados na literatura técnica ou através dos dados fornecidos pelos fabricantes do equipamento de ventilação com base:
 - Na velocidade de arrastamento;
 - Em dados experimentais, tendo em conta os parâmetros das fontes de emissão, o tipo, os parâmetros dos poluentes e os valores máximos da velocidade do ar que ocorrem na área de operação dos bocais de sucção.
- ✓ A extração, aquando da duração do arco elétrico na soldadura de metais, é de utilização fundamental pelo facto de as partículas, antes de se dispersarem pelo ambiente de trabalho, têm tendência quando misturados com o ar, a temperaturas elevadas, “subir”, e atingir a zona de respiração dos soldadores. Sendo assim, os soldadores inalam o pó e mistura de gases, apesar de terem o rosto protegido pelo capacete ou escudo protetor, e estes podem penetrar nas secções inferiores do sistema respiratório, e virem alojar-se na superfície dos pulmões (pois estas partículas atingem dimensões nanométricas).

- ✓ Assim, ao selecionar-se o sistema de ventilação mais adequado devem ter-se em consideração os fatores associados à determinação das taxas de emissão e composição química dos gases de soldadura através de fatores como:
 - Tipo de processo de soldadura;
 - Tipo e diâmetro de consumível ou eletrodo;
 - Composição química e espessura do revestimento dos eletrodos de soldadura;
 - Operação - de soldadura e revestimento;
 - Condições de soldadura tecnológicas (o comprimento do arco, a velocidade de alimentação do fio e da velocidade de soldadura da corrente de tensão);
 - Natureza dos gases de proteção;
 - Natureza do material base;
 - Aplicação de revestimentos protetores e sua composição (revestimentos metálicos: Zn, Al/Si, Al/Zn, Zn/Al/Mg; ou revestimentos orgânicos);
 - Contaminação do material soldado (sujidade, gordura, solventes e poeiras).

Cada secção/zona de soldadura deve estar equipada com ventilação local de extração, como meio de proteção coletiva dos trabalhadores contra a poluição do ar ambiente. Os fumos devem ser extraídos diretamente a partir da área a soldar (Figura 66), sendo que a seleção dos elementos de sucção tem de ser adaptada ao tipo de soldadura específica bem como às condições, forma, dimensões e peso dos componentes soldados. A organização das operações, de modo a otimizar eficiência de extração de poluentes, deve reforçar a configuração de componentes soldados num local específico, por exemplo, usando manipuladores, instrumentos, e posicionadores. Isto proporciona, não só uma localização fixa da peça de trabalho (o que é essencial do ponto de vista da eficiência da extração de poluentes) em relação aos elementos de sucção (caixas, bicos de sucção), mas também torna o trabalho mais fácil para o soldador, melhorando assim a qualidade da soldadura e, conseqüentemente, um aumento da produtividade.



Figura 66 - Posicionamento correto do bocal de sucção durante um processo de soldadura manual [54].

A colocação de materiais a soldar, num instrumento ou posicionador, elimina ainda a necessidade de os direcionar de cada vez que se solda.

Devido à temperatura do fluxo de poluentes, os fumos de soldadura devem, ser extraídos da zona de soldadura, de maneira a afastar o fluxo de poluentes para longe da zona de respiração do soldador através de ventilação localizada (Figura 67 e Figura 68).



Figura 67 - Posicionamento do bocal de sucção por cima da área de emissão das partículas [54].



Figura 68 - Extração eficaz de fumos de soldadura com posicionamento correto do bocal de sucção durante a soldadura de estruturas de grandes dimensões [54].

Nas figuras seguintes apresentam-se outros exemplos de sistemas de extração de fumos – fixos, portáteis, flexíveis, etc.:



Figura 69 - *Welding workstation* ERGO-STW (mesa de trabalho totalmente ventilada) [54].

As “mesas de soldadura” só podem ser utilizadas para a soldadura de peças pequenas, para soldadura de peças ligeiramente maiores, utilizam-se “mesas” com bocais de sucção suspensos sobre estruturas de suporte (*Welding Workstation*) (Figura 69) ou “mesas” adaptadas com meios de extração de fumos através de uma grelha inferior, ou por um bocal de sucção colocado por cima. Para ambos os sistemas de soldadura de arco estacionários e não estacionários, os bocais de sucção mais vulgarmente utilizados são suspensos, por exemplo, através de estruturas de suporte (Figura 70). Eles podem ser

ligados a instalações de ventilação ou de filtração e as unidades de ventilação através de condutas de ventilação, rígidas ou flexíveis, com um diâmetro de cerca de 150-200 mm.



(a)



(b)

Figura 70 – (a) Braço de extração no interior de um de ventilação flexível ligado a uma única área de trabalho. **(b)** Braço de extração rotativo suspenso de modo a cobrir uma grande área de uma zona de trabalhos não estacionária [54].

Na figura seguinte, pode observar-se um processo de soldadura semiautomático, uma das vantagens deste processo com este sistema de extração é que o fluxo de ar aspirado é arrefecido.

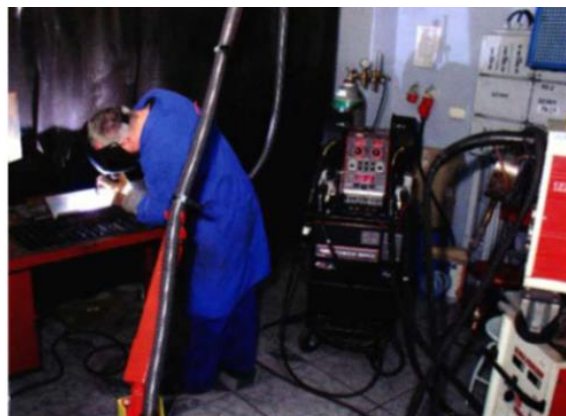


Figura 71 - Soldador realizando trabalhos com um suporte com extração dos poluentes. Equipamento fabricado pela Aspirmig, projetado durante o projeto europeu ECONWELD [5,54].

Um outro sistema de ventilação existente é o sistema de ventilação local, que pode ser utilizado para soldadura de materiais de menores dimensões. Este permite a extração de poluentes na fonte e o exemplificado na Figura 72, ainda têm por vantagem ser portátil.



Figura 72 - Filtração portátil constituída por uma unidade de ventilação e um bocal de aspiração que permite a remoção de poluentes na fonte [54].

As unidades de filtração e ventilação são normalmente concebidas para uma ou várias “estações/locais” de trabalho (Figura 73). Para operações contínuas em todas as estações de soldadura, os sistemas de ventilação são concebidos com vários bocais de sucção sobre estruturas de suporte, ligados a um ventilador e a um separador de poeiras (Figura 74).



Figura 73 – Filtração mecânica transportável e respetiva unidade de ventilação [54].



Figura 74 - Oficina de soldadura equipada com um sistema de extração local [54].

Por exemplo, para um processo de soldadura, durante o corte do aço também se verifica a emissão de grandes quantidades de poeiras nocivas e poluentes gasosos para o ambiente de trabalho. Limitar a emissão de fumos em estações de trabalho de corte também é absolutamente necessário e prioritário. Para tal, uma das possíveis implementações é a colocação de uma unidade de filtração ligada à mesa de corte (Figura 75).



Figura 75 - Unidade de filtração ligada a mesa de corte de chapa de aço para o processo de soldadura TIG [54].

É importante referir que, a eficácia da ventilação dependerá, sempre das condições de fabrico dos sistemas de ventilação que deverão ser adequadamente concebidos e seleccionados adequadamente.

Garantir condições adequadas de trabalho e cumprimento das normas sanitárias durante os processos de soldadura através da ventilação, por si só, é geralmente muito difícil, já que esta exige a cooperação de especialistas em sistemas de ventilação, e, até, dos próprios soldadores.

A mecanização e automação dos processos de soldadura, permite o “afastamento” dos trabalhadores das fontes de emissões, o que se torna muito benéfico. No entanto, tal depende da natureza e escala de produção [54].

6.4.2. Utilização dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs)

Têm vindo a ser desenvolvidos novos sistemas de extração de fumos que estão diretamente ligados à tocha de soldadura (como se indica na Figura 76), e capacetes para os soldadores com sistema de ventilação incorporado [28]. Foi recentemente desenvolvido um protótipo de um capacete de soldadura (no âmbito do projeto de investigação europeu (ECONWELD) equipado com um sistema de ventilação inovador, capaz de aumentar a eficiência do fluxo de ar, reduzindo assim o desconforto do soldador [5], o que é importante para garantir a sua mobilidade, e também para a realização de soldadura em espaços confinados.



Figura 76 - Exemplo de uma tocha de soldadura com sistema de extração de fumos [28].

Ainda no âmbito do projeto ECONWELD foi desenvolvido um maçarico de soldadura inovador, com a capacidade para captar mais de 80% dos gases emitidos durante o processo de soldadura [5].

Estes novos tipos de tochas e capacetes permitem aumentar muito a mobilidade dos processos de soldadura, uma vez que não se está dependente de um sistema de extração de fumos difícil de transportar.

6.4.3. Análise/escolha de materiais/processos/parâmetros que possam conduzir a menores libertações de fumos

Como já referido no capítulo III, uma forma de redução de fumos é na fonte, ou seja, controlar os fatores de que depende a formação de partículas, como sejam:

- ✓ Temperatura da gota;
- ✓ Composição do eletrodo;
- ✓ Composição do gás de proteção.

Para o caso do processo MAG, por exemplo, para que haja uma redução na taxa de formação de fumos a dimensão da gota e a sua temperatura têm de diminuir. Estas considerações só se aplicam para o modo de transferência por *spray* ou numa zona de transição para *spray*. Na maior parte dos casos, tal não é possível de efetuar, pois este tipo de transferência têm uma grande entrega térmica e nem todas as ligações suportam tais condições de soldadura [28].

Uma possível solução para obviar a situação anterior será utilizar um tipo diferente de corrente, como seja a corrente pulsada. Na verdade, o uso deste tipo de corrente reduz o diâmetro da gota e, conseqüentemente, reduz de modo significativo a taxa de formação de fumos [28]. Isto acontece porque, à medida que se aumenta a frequência, a gota vai estar menos tempo ligada ao eletrodo, não sendo possível crescer e transferir uma grande quantidade de calor.

Existem também diferentes processos de soldadura que, em determinadas situações, podem substituir a soldadura MIG/MAG convencional. Estes processos são o *Surface Tension Transfer* (STT), *FastRoot* e o *Cold Metal Transfer* (CMT), que, através do controlo ativo do arco elétrico e transferência de metal por curto-circuito, podem reduzir muito a quantidade de fumos produzida.

Utilizando gases de proteção com percentagens baixas de gases ativos (reduzindo, deste modo, o potencial oxidante) também se pode reduzir muito a taxa de formação de fumos. Esta solução é apenas possível para os casos em que seja possível efetuar, a redução dos gases ativos. De um modo geral, para minimizar a emissão de partículas, durante um processo de soldadura MAG, os parâmetros intensidade da corrente, tensão do arco, bem como, a composição da mistura gasosa do gás de proteção devem ser tomados em consideração.

Sempre que possível, devem usar-se menores intensidades de corrente. No entanto, quando tal não for possível (devido às restrições de produtividade do processo), os soldadores devem usar correntes mais elevadas, mas com misturas gasosas que conduzem a menores emissões de fumos [54].

No que diz respeito ao processo SER pode concluir-se que a utilização de valores mais baixos dos parâmetros elétricos resulta numa menor libertação de nanopartículas.

Neste trabalho não se conseguiu estabelecer uma relação quantitativa entre a geração de nanopartículas e os diferentes tipos de revestimentos ou espessuras de elétrodos. No entanto, tem-se que se deve evitar o uso de elétrodos com uma grande quantidade de compostos orgânicos, pois estes consumíveis originam consideráveis emissões de nanopartículas.

Para o processo TIG, verificou-se que a utilização de intensidades de correntes intermédias reduzia a emissão de nanopartículas para a atmosfera.

Refira-se ainda que, no âmbito do projeto ECONWELD, referenciando anteriormente neste capítulo), foram desenvolvidos dois *softwares* de apoio que tem interesse no âmbito desta temática:

- a) VIRTWELD - Para auxiliar no processo de tomada de decisão sobre a prevenção de fumos de soldadura e sobre questões de ergonomia;
- b) COSTCOMP - Para ajudar no cálculo de custos e comparação entre diferentes processos de soldadura.

A **seleção de um processo de soldadura**, de modo a permitir minimizar significativamente as emissões de partículas é possível, mas, no entanto, rara. Esta depende, principalmente, de fatores técnicos e económicos: a utilidade dos métodos em termos de requisitos técnicos, o seu desempenho e custo de utilização. Por exemplo, a soldadura TIG é caracterizada pelas baixas emissões de poeiras e gases, mas muito raramente pode substituir eficientemente a soldadura MIG/MAG [54]. Pelo exposto, conclui-se que o esforço para reduzir a exposição a substâncias perigosas, atuando “na fonte”, ou seja, influenciando diretamente o processo de soldadura em causa, é difícil. Assim, torna-se mais razoável extrair os poluentes, do local de soldadura, de forma eficaz.

6.4.4. Considerações Finais

A redução da emissão de nanopartículas, nos fumos de soldadura, é necessária para melhorar as condições de trabalho ao nível da indústria de forma a melhorar as condições de trabalho e o bem-estar dos trabalhadores. No entanto, esta redução é um problema complexo que envolve o desenvolvimento de novas tecnologias que considerem esta problemática.

Deve ter-se em consideração que o desenvolvimento de novos métodos, (alguns dos quais referenciados neste trabalho) para reduzir as emissões, pode resultar num aumento do custo de soldadura.

A tendência para o aparecimento de legislação mais restritiva sobre a exposição do soldador aos fumos, pode levar a um maior investimento nesta área, visando o desenvolvimento de sistemas mais baratos, para que as empresas não sejam economicamente penalizadas por cumprirem a legislação em vigor.

De um modo geral, a adoção de boas práticas devem ter, sempre, em consideração a exequibilidade da alteração das condições dos processos de soldadura, fazendo particular atenção nos aspetos tecnológicos, na natureza dos materiais e consumíveis utilizados, e relacionando-os com a promoção do uso de sistemas de ventilação eficazes, oferecendo assim amplas oportunidades para melhorar as condições de trabalho na indústria da soldadura. Isto deve acontecer sempre com o objetivo primordial de proteger a saúde do trabalhador, reduzir a doença ocupacional, aumentar a segurança no trabalho, e desenvolver processos de soldadura, de modo a tornar estas tecnologias cada vez mais limpas e amigas do ambiente.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES

7. Conclusões

O presente trabalho permitiu concluir, que, sendo os processos de soldadura por fusão, dos mais utilizados na indústria metalomecânica, e que estes estão intimamente ligados à emissão de nanopartículas, existe uma correlação entre as emissões de nanopartículas libertadas durante diferentes processos de soldadura e os respetivos parâmetros de operacionais desses processos.

Assim sendo, e como resultados da monitorização e caracterização das nanopartículas libertadas durante estes processos, podem retirar-se as conclusões que se passam a apresentar.

- ✓ Existem grandes concentrações de nanopartículas, com capacidade de deposição alveolar, libertadas nos processos de soldadura por fusão estudados, nomeadamente MAG, SER e TIG. Estas nanopartículas podem provocar problemas respiratórios, potencialmente graves, para os trabalhadores envolvidos na execução de operações de soldadura.
- ✓ Para o processo de soldadura MAG, verifica-se que o modo de transferência tem uma grande influência na emissão das nanopartículas, assim como, a natureza das misturas gasosas utilizadas nos ensaios realizados. De notar que, para a mistura gasosa Arcal 21 (composta por 90% árgon e 10% de dióxido de carbono), o modo de transferência por *spray* é aquele que, em média, apresenta maior área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar. Para o material de base aço ao carbono, esta tendência verifica-se, igualmente, nas restantes misturas gasosas utilizadas: à medida que aumentam os parâmetros de soldadura (intensidade), aumenta também a área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar. Seria de esperar que, em termos do tipo de gás de proteção utilizado, o dióxido de carbono fosse aquele que apresenta-se valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar superiores. Tal não aconteceu, foi a mistura gasosa Atal 5 (composta por 82 % árgon e 18 % de dióxido de carbono) que resultou nos maiores valores da área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar. Este facto pode estar relacionado com a existência de uma “corrente” de transição para os diferentes modos de transferência e os fatores inerentes a esses modos.
- ✓ Ainda relativamente ao processo de soldadura MAG, mas neste caso para o material de base aço inox austenítico verifica-se que, nas três misturas gasosas ensaiadas existe uma tendência da área de superfície das partículas por volume pulmonar aumentar com o aumento da intensidade de soldadura, exceto no caso do Arcal 121 (mistura composta por 81% árgon, 18% hélio e 1% dióxido de carbono), o que seria de

esperar atendendo a que o modo de transferência por *spray* apresenta valores superiores ao regime globular. Contudo, tal não aconteceu, sendo que uma das causas para que este valor tenha descido, (no regime de *spray*), poderá estar relacionada com os valores dos parâmetros de soldadura escolhidos.

- ✓ Comparando os dois materiais base ensaiados para o processo MAG verifica-se que, quando se utiliza como material base o aço inox austenítico os valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar atingem valores muito superiores do que em soldadura com aço ao carbono. O valor máximo para o aço carbono foi de $42\ 896\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$, ao passo que para o aço inox austenítico se obteve $94\ 136\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$. Este facto poderá estar relacionado com a composição química do material ou poderá, também, estar relacionado com o efeito do arco elétrico, pois constata-se que para este tipo de soldadura se atingem maiores intensidades.
- ✓ Para o processo SER verificou-se que a utilização de parâmetros elétricos mais elevados resulta numa maior libertação de nanopartículas, com uma tendência quase linear.
- ✓ Não se conseguiu estabelecer uma relação quantitativa entre a geração de nanopartículas e os diferentes tipos de revestimentos ou espessuras de eléctrodos utilizados no processo SER. No entanto, o eléctrodo celulósico E6010 provou ser o consumível que resulta numa maior libertação de nanopartículas, o que poderá ser devido à presença de uma grande quantidade de compostos orgânicos no seu revestimento. O aumento dos valores dos parâmetros elétricos provocou, na maior parte dos ensaios efetuados, uma maior dispersão entre os valores de cada réplica.
- ✓ Para o processo TIG, a área superficial de partículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar, não resultou numa relação linear com o aumento dos valores dos parâmetros elétricos, o que poderá estar relacionado com a potência do arco elétrico, que, em TIG não cresce de forma linear como com os processos SER ou MIG, nem decresce como o processo SAS, como se pode observar na figura seguinte:

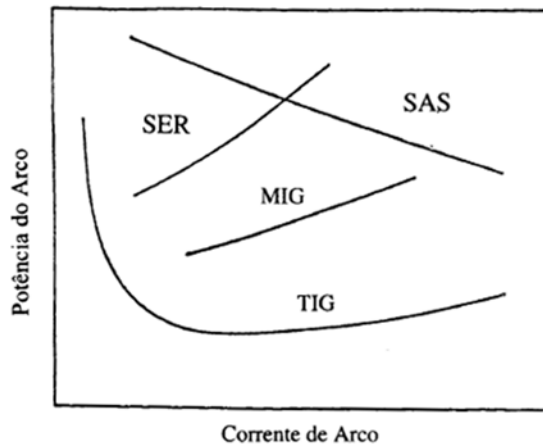


Figura 77 - Características típicas do arco elétrico para diferentes processos de soldadura [10].

- ✓ Ainda para o processo TIG, os ensaios demonstraram, praticamente todos, que as intensidades de correntes intermédias reduziam a emissão de nanopartículas para a atmosfera.
- ✓ Não se conseguiu estabelecer uma relação entre a quantidade de nanopartículas emitidas e os diferentes materiais de base utilizados no processo TIG, observando-se valores máximos na ordem dos $20\ 000\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\ \text{s}$.
- ✓ Aquando da utilização de soldadura manual verificou-se que a tensão de arco é um valor muito inconstante, visto que é controlada pela sua altura, e o aumento ou diminuição desta poderá levar a uma grande dispersão nos valores obtidos.
- ✓ Da análise do processo TIG, reconhecido na indústria como um processo “limpo”, este revelou a existência de valores significativos de emissão de nanopartículas. Em alguns ensaios, verificou-se que os valores obtidos foram superiores aos obtidos em alguns ensaios em SER. No entanto, os processos que resultaram numa maior emissão de nanopartículas, são o processo SER ($95\ 982\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\ \text{s}$), seguido do MAG-Aço inoxidável ($94\ 136\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\ \text{s}$).
- ✓ Na análise química por EDS, para o processo MAG, verifica-se que, para o material base aço ao carbono os elementos presentes são o Ferro (Fe) e o Manganês (Mn) e, para o aço inox austenítico, são o Ferro (Fe), Crómio (Cr) e Níquel (Ni). Quer o processo de soldadura MAG – Aço ao Carbono, quer processo MAG – Aço Inox Austenítico, (tanto no caso da mistura gasosa mais oxidante, como na menos oxidante), os elementos químicos identificados são os que constam da composição dos fios de soldadura bem como os da composição do material base.
- ✓ Para o processo SER identificaram-se, por EDS, picos de elevada intensidade para as partículas emitidas que contêm constituintes do revestimento básico, tais, como o cálcio, potássio e o silício, assim como o ferro, que é o elemento principal da alma do eléctrodo. No processo TIG identificaram-se picos dos elementos que são os principais

constituintes de um aço inoxidável austenítico, tais como o crómio, níquel, ferro e silício, assim como um pico intenso de enxofre, que poderá provir de uma zona do material de base com um elevado teor deste elemento. Em aço ao carbono, verificou-se uma contaminação de crómio, possivelmente com origem nos ensaios com aço inoxidável efetuados neste mesmo estudo, visto que os ensaios foram realizados na mesma data. Num ambiente industrial onde se efetuam soldaduras de diferentes materiais de base em simultâneo, os soldadores podem estar sujeitos a nanopartículas libertadas de processos que eles próprios não estão a utilizar, o que pode ser grave do ponto de vista da saúde.

- ✓ Como resultado da análise morfológica verificou-se, para os três processos ensaiados, a presença de partículas com dimensões inferiores a 100 nm, ou seja, com grande eficiência de deposição nos alvéolos pulmonares, que também é outro fator que pode contribuir para deteriorar a saúde do soldador. Verificou-se ainda, que estas partículas têm formas esféricas, e que as partículas que se podem observar em termos de tonalidades como as mais claras, são as que têm menor massa ou seja, são as que se encontram mais oxidadas.

Da quantificação do risco, através da utilização da ferramenta de avaliação de risco (*Control Banding Nanotool*) podemos retirar as seguintes conclusões:

- ✓ Desta análise qualitativa e um pouco generalista, tem-se que para fazer um controlo das emissões de nanopartículas nos processos de soldadura em estudo (MAG, SER e TIG), de um modo geral as medidas de controlo serão, fundamentalmente, do tipo de exaustão ou ventilação local, bem como medidas de contenção.

A fim de melhorar a qualidade do ambiente de trabalho, nos processos de soldadura, é necessário reduzir a quantidade de substâncias perigosas emitidas durante estes processos. A exposição dos trabalhadores a estas substâncias pode ser minimizada de diversos modos, os quais incluem:

- ✓ Sistemas de ventilação geral e local eficazes;
- ✓ Modificações das condições de trabalho, incluindo mecanização e automação dos processos;
- ✓ Seleção dos processos/ métodos de soldadura de modo a eliminar/minimizar a emissão de poluentes;
- ✓ Modificação das condições a nível de materiais, bem como as relacionadas com a tecnologia de trabalho, com o objetivo de reduzir a formação e emissão de substâncias nocivas.

Em trabalhos futuros seria relevante:

- ✓ Efetuar caracterização das emissões de nanopartículas em ambiente industrial, para avaliar a quantidade de partículas que permanece em suspensão ao longo de um período de trabalho mais prolongado;
- ✓ Para o processo MAG, para se fazer uma melhor interpretação da influência dos gases, deveriam realizar-se ensaios em que se isolasse, ao máximo possível, os diferentes parâmetros em estudo, fazendo estudos que incluam a variação do diâmetro do fio, e evitar flutuações nas restantes variáveis do processo (material, corrente e voltagem de soldadura) na zona em que as medições sejam efetuadas;
- ✓ Fazer uma avaliação da concentração de partículas com particular ênfase nos efeitos que variadas combinações de intensidades de corrente e tensões de arco possam causar, medindo estes dois parâmetros com dispositivos e precisão apropriados;
- ✓ Para obterem melhores resultados no processo TIG poderia utilizar-se uma mecanização do processo para se obterem resultados mais consistentes, assim como efetuar soldaduras noutros materiais tais como ligas de níquel e de alumínio;
- ✓ Realizar um maior número de recolhas de nanopartículas para análise morfológica e, essencialmente, para efetuar uma análise química mais pormenorizada procurando outras técnicas para análise mais detalhada da composição química;
- ✓ Quantificação do risco através da utilização de uma ferramenta de avaliação de risco (*Control Banding Nanotool*), aplicada a situações reais, ou seja, em termos industriais;
- ✓ Aprofundamento dos estudos relativos à emissão de nanopartículas, atendendo ao estado da evolução da técnica, de modo a melhorar continuamente os sistemas de ventilação, oferecendo amplas oportunidades para melhorar as condições de trabalho na indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roxo, M., "Segurança e Saúde do Trabalho: Avaliação e Controlo de Riscos", 2ª Edição; Coimbra, Edições Almedina, 2006.
- [2] Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho, "Expert forecast on emerging chemical risks related to occupational safety and health", Bélgica, 2006.
- [3] Brouwer D., "Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces", Toxicology, vol. 269, Março de 2010.
- [4] Zimmer A. T., Baron P. A., and Biswas P., "The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process," Journal of Aerosol Science, vol. 33, pp. 519-531, Março de 2002.
- [5] <http://www.ewf.be/econweld.aspx> , acessado a 1 de Agosto de 2013.
- [6] "Welding Handbook Volume 2: Welding Processes", American Welding Society, 1991.
- [7] Lei nº 102/2009, de 10 de Setembro, "Estabelece o regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho".
- [8] Pires I., Quintino L., Miranda R., and Gomes J. P., "Fume emissions during gas metal arc welding," Toxicological & Environmental Chemistry, vol. 88 (3), pp. 385 - 394, 2006.
- [9] Lee M. H., McClellan W. J., Candela J., Andrews D., and Biswas P., "Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace," Journal of Nanoparticle Research, vol. 9, pp. 127-136, Janeiro de 2007.
- [10] Santos J. F. O. and Quintino L., "Processos de Soldadura", ISQ 1999.
- [11] Brouwer D., "Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces", Toxicology, vol. 269, pp. 120 - 127, Março de 2010.
- [12] Gomes J. F., Albuquerque P. C., Miranda R. M, and Vieira M. T., "Determination of airborne nanoparticles from welding operations", Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues, 75:13-15, vol.; pp. 747-755, 12 de Julho de 2012.
- [13] K. Elihn, P. Berg, and G. Liden, "Correlation between airborne particle concentrations in seven industrial plants and estimated respiratory tract deposition by number, mass and elemental composition", Journal of Aerosol Science, vol. 42, pp. 127-141, Fevereiro de 2011.
- [14] Feynman, R. "There's Plenty of Room at the Bottom", Eng. Sci. Fevereiro 1960.
- [15] Moniz Avelina. M. C. P. B., "Exposição Profissional a Nanopartículas na Indústria Farmacêutica - Estudo Exploratório", Tese de Mestrado em Higiene Segurança do Trabalho – Regime Geral, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa – ESTESL, Novembro de 2012.
- [16] Albuquerque, P., Gomes, J.F.P., "Análise das implicações para a saúde humana do uso das nanotecnologias", Técnica, 3/2013, 21/25, 2013

- [17] Comissão Europeia - Comunicação da Comissão ao Conselho, ao Parlamento Europeu e ao Comité Económico e Social Europeu, “Nanociências e Nanotecnologias: Plano de Acção para a Europa 2005-2009”, Primeiro Relatório de Execução 2005-2007 COM (2007), Bruxelas, 2007.
- [18] CDS/NIOSH (2009) – Strategic Plan for NIOSH Nanotechnology Research and Guidance “Filling the knowledge gaps”, DHHS (NIOSH) Publication N°. 2010-105, Novembro de 2009.
- [19] ISO/TS 27687:2008, “Nanotechnologies -- Terminology and definitions for nano-objects -- Nanoparticle, nanofibre and nanoplate”, 2008
- [20] ACT, “Nanopartículas em Ambientes Interiores e Efeitos na Saúde Humana”, Relatório Final do Projeto N° 035/APJ/09, Maio de 2013.
- [21] Albuquerque, P., Gomes, J.F.P., Reis, M. F., - “Nanopartículas em Ambientes Ocupacionais – Um novo desafio. Comunicação no Seminário Prevenção de Riscos Profissionais “Preservar o Passado, Proteger o Futuro”, Ordem dos Engenheiros - pdf disponibilizado publicamente.
- [22] Yokel R., MacPhail R. “Engineered Nanomaterials: exposures, hazards, and risk prevention” Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 2011.
- [23] OIT - Organização Internacional do Trabalho, “Riscos emergentes e novas formas de prevenção num mundo em mudança”, 2010.
- [24] Matos L., Santos P., e Barbosa F., "As Nanopartículas em Ambientes Ocupacionais," Revista Segurança, vol. 202, pp. 10-14, 2011.
- [25] Paul J., Liroy, Huajun Zhen, Taeown Han, Leonardo Calderon “Webinar Nanomaterial Exposure Webinar_Nazarenko”, The State University of New Jersey – pdf disponibilizado publicamente.
- [26] Guerreiro, Carlos Leonel Farinha, “Avaliação da emissão de nanopartículas de processo de soldadura por fusão”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, FCT-UNL, Caparica, 2012.
- [27] “SER ISQ.pdf”; “MAG ISQ.pdf” e “TIG ISQ.pdf”: <http://www.isq.pt>, acessido a 13 de Agosto de 2013.
- [28] Rosado, Tobias Manuel Vilas - Boas, “Inovação do Processo MIG/MAG - Análise de produtividade e emissão de fumos”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST-UTL, Lisboa, 2008.
- [29] Imagem adaptada de:
<https://www.google.pt/search?hl=pt-PT&site=imghp&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=643&q=principio+de+funcionamento+-+processo+MAG>, acessido a 13 de Agosto de 2013.

- [30] Boehme D., "Welding gases – physical proprieties, the basis for development and optimum application of shielding gases and gas mixtures" IIW document XII- 1197-90, 1990.
- [31] Meneses V. A., Gomes J. P., Scotti, "The Effect of the Metal Transfer Stability (Spattering) on Fume Generation, Morphology and Composition in Short-Circuit MAG Welding", IIW Commission XII - SG 212 IIW Annual Assembly - 11th to 17th, September – Essen - Germany, 2012.
- [32] "GMAW Welding Guide", Lincoln Electric, 2006: <http://www.lincolnelectric.com/en-us/Pages/default.aspx>, acedido a 20 de Junho de 2013.
- [33] Yeo S.H., Neo K.G., "Inclusion of environmental performance for decision making of welding processes", School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University Singapore, Singapore, 1997.
- [34] "Chemical Analysis": <http://www.lenntech.com/periodic/elements/index.htm>, acedido a 23 de Agosto de 2013.
- [35] Eisler Ronald, D. Ph, "Handbook of Chemical Risk Assessment, health hazards to humans, plants, and animals volume I Metals", Lewis Publishers, New York, 2000.
- [36] Jenkins Neils "Welding Fume Formation Literature review 1975-1999", 1999.
- [37] Imagem adaptada de: http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_metal_arc_welding, acedido a 23 de Agosto de 2013.
- [38] Imagem adaptada de: <http://www.esabna.com/products/Tig-welders.cfm>, acedido a 23 de Agosto de 2013.
- [39] Jekings N.T., Mendez P. F., Eagar T. W., "Effect of Arc Welding Electrode Temperature on Vapor and Fume Composition", 7th International Conference on Trends in Welding Research, 2005.
- [40] Berlinger B., Ellingsen D. G., Náray M., Záray G. and Thomassen Y. "A study of the bio-accessibility of welding fumes", Journal of Environmental Monitoring, 2008.
- [41] http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/NSAM-001appnote-RevB-A4-web.pdf, acedido a 20 de Março de 2013.
- [42] <http://www.tsi.com/ProductView.aspx?id=21931>, acedido a 20 de Março de 2013.
- [43] http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3089.pdf, acedido a 21 de Março de 2013.
- [44] Gomes, J.F., PhD, Habilitated Coordinating Professor Albuquerque, P.C.3, MSc, Coordinating Professor Esteves, H. M.4, MSc, Engineer "Description of a Methodology for Monitoring Ultrafine Particles/Nanoparticles in Microenvironments" Instituto Politécnico de Lisboa (ISEL, ESTSEL) and 2IBB – Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia / Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

- [45] Imagens adaptadas de: <http://microlab.ist.utl.pt/>, acessido a 19 de Abril de 2013.
- [46] Imagem adaptada de:
[http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPLWeb/Promig%20501_511_om_EN.pdf/\\$file/Promig%20501_511_om_EN.pdf](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPLWeb/Promig%20501_511_om_EN.pdf/$file/Promig%20501_511_om_EN.pdf), acessido a 20 de Junho de 2013.
- [47] Informação sobre os consumíveis:
[http://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_CutLengthConsumables-Lincoln-LincolnER70S-6\(LincolnElectric\)](http://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_CutLengthConsumables-Lincoln-LincolnER70S-6(LincolnElectric)) , acessido a 2 de Julho de 2013.
- [48] Informação sobre consumíveis:
http://www.lincolnelectric.com/assets/en_us/Products/Consumable_StainlessNickelandHighAlloy-BlueMax-BlueMaxMIG316LSi/c61013.pdf, acessido a 2 de Julho de 2013.
- [49] Monteiro Riviere, & Tran, L., “Nanotoxicology: Characterization, Dosing and Health Effects”, New York: Informa Healthcare USA Inc., 2007.
- [50] Day, G., & Dufresne, A., “Exposure pathway assessment at copper-berilium alloy facility” Ann Occup Hyg,51:67-80, 2007.
- [51] Schulte P, M. V., Schulte, P., Murashov, V., Zumwald, R., Kuempel, E., & Geraci, C., “Occupational Exposure Limits for nanomaterials - state of the art.” J. Nanopart Res,12, 1971-1987, 2010.
- [52] Echegaray, P., “El Trabajo con Nanopartículas y los Servicios de Prevencion”, Universidade de Pompeu Fabra, Barcelona, 2009.
- [53] Paik S., Zalk D., Swinney, P., Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures”, Annals of Occupational Hygiene, 52(6), 419-428, 2008.
- [54] Matusiak J., Gliński M., “Methods of eliminating pollutant emissions from the work environment in welding and related processes”, Welding and Environmental Technology Unit, Welding Institute, Warsaw, Welding International Vol. 26, No. 11, 852-861, Novembro de 2012.

ANEXOS

Anexo I – Exemplo da Ferramenta (*Control Banding Nanotool*) utilizada na Avaliação de Riscos [53]

Tabela 39 – Folha de entrada para a determinação da avaliação de riscos para o processo MAG – Aço ao Carbono para o gás de proteção 100% de CO₂.

Activity Number	Scenario Description (free text)	Name or description of nanomaterial	CAS#	Activity classification	Current Engineering Control	Parent material						Nanoscale material						Severity score	Severity band	Estimated maximum amount of chemical used in one day (mg)	Dustiness	Number of Employees with Similar Exposure	Frequency of Operation (annual)	Operation Duration (per shift)	Probability score	Probability band			
						Lowest OEL (mcg/m3)	carcinogen ?	reproductive hazard?	mutagen?	dermal hazard?	asthmagen ?	Surface reactivity	Particle shape	Particle diameter (nm)	Solubility	carcinogen ?	reproductive hazard?										mutagen?	dermal hazard?	asthmagen ?
1	Material de Adição obtido através da utilização de um consumível do tipo Fio Sólido Contínuo. "Lincon ER70S-6"	Metal nanoparticles (C, Mn, S, Si, P, Cu, Ni, Mo, V, Cr)	Ni: 7440-02-0 Cu: 7440-50-8 Mn: 7439-96-5 Mo: 7439-98-7 Cr: 740-47-3 S: 7404-34-9 Si: 90337-93-2 V: 7440-62-2 P: 7723-14-0 C: 7440-44-0	Generating nanoparticles in the gas phase	Fume hood or local exhaust ventilation	101 to 1000	No	No	No	No	No	Low	Anisotropic	> 40 nm	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	35	Medium	<1	Low	11-15	Weekly	30-60 min	57.5	Likely
2	MAG (Processo de Soldadura por fusão) - A Protecção do banho em fusão, das gotas de material de adição e cordão de soldadura é obtida através de uma protecção gasosa activa (Arcal 21- (100%CO2)).	Gases(CO2)	CO2: 124-38-9	Generating nanoparticles in the gas phase	Fume hood or local exhaust ventilation	101 to 1000	No	No	No	No	No	Low	Anisotropic	> 40 nm	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	No	30.5	Medium	<1	Low	11-15	Weekly	30-60 min	57.5	Likely
3	Material base a Soldar - Aço Carbono: ligas metálicas de Fe (cerca de 0,05%) e C(≤1,5%) e pequenas quantidades de outros compostos.	Metal nanoparticles (Libertação de partículas de aço carbono)	Mn: 7439-96-5 S: 7404-34-9 Si: 90337-93-2 P: 7723-14-0 C: 7440-44-0 Fe: 7439-98-6	Machining, sanding, drilling, or other mechanical disruptions of materials containing nanoparticles	Fume hood or local exhaust ventilation		No	No	No	No	No	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	62.5	High	Unknown	Unknown	Weekly	30-60 min	55	Likely	

Tabela 40 – Resultados obtidos da Avaliação de Riscos – MAG – Aço ao Carbono (100% CO₂).

Activity Number	Scenario Description (free text)	Overall Risk Level Without Controls	Recommended Engineering Control Based on Risk Level	Upgrade Engineering Control?
1	Material de Adição obtido através da utilização de um consumível do tipo Fio Sólido Contínuo. "Lincon ER70S-6"	RL2	Fume hood or local exhaust ventilation	No
2	MAG (Processo de Soldadura por fusão) - A Protecção do banho em fusão, das gotas de material de adição e cordão de soldadura é obtida através de uma protecção gasosa activa (Arcal 21- (100%CO ₂)).	RL2	Fume hood or local exhaust ventilation	No
3	Material base a Soldar - Aço Carbono: ligas metálicas de Fe (cerca de 0,05%) e C(≤1,5%) e pequenas quantidades de outros compostos.	RL3	Containment	Yes

Tabela 41- Lista de opções a ter em consideração das quais se selecionaram as referentes à atividade e consumíveis a serem avaliados.

DNT			Working with nanomaterials in liquid media	Seek specialist advice	≤10 mcg/m3	High	Tubular or fibrous	1-10 nm	Soluble	10 ppm or mg/m3	Yes	Yes	Yes	Yes	76-100=Very High	10-100 mg	High	1-5	Yearly	> 4 hr	76-100=Very High
NIF			Working with nanomaterials in liquid media during pouring or mixing operations or where agitation is involved	Containment	10 to 100 mcg/m3	Medium	Compact or spherical	11-40 nm	Insoluble	10-100 ppm or mg/m3	No	No	No	No	51-75=High	1-10 mg	Medium	6-10	Monthly	1-4 hr	51-75=High
NHI			Generating nanoparticles in the gas phase	Fume hood or local exhaust ventilation	101 to 1000 mcg/m3	Low	Anisotropic	> 40 nm	Unknown	100-5000 ppm or mg/m3	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	26-50=Medium	<1 mg	Low	11-15	Weekly	30-60 min	26-50=Medium
CMLS			Handling nanoparticles in powder form	General ventilation	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown		> 5000 ppm or mg/m3					0-25=Low	Unknown	None	> 15	Daily	< 30 min	0-15=Low
E&ED			Maintaining equipment and processes used to produce or fabricate nanomaterials							Unknown							Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	
PAT			Clean-up of spills or waste material																		
CMLS			Cleaning of dust collection systems used to capture nanoparticles																		
COMP			Machining, sanding, drilling, or other mechanical disruptions of materials containing nanoparticles																		
ENG			Other activities that can result in potential exposure to nanomaterials																		