



**Rafael Palhotas Pacheco**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Correlação entre macro e  
nanopartículas emitidas em fumos de  
soldadura MAG de aços inoxidáveis  
com diferentes gases de protecção**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Co-orientador: Professor Doutor João Fernando Pereira Gomes

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira  
Arguente: Prof. Doutora Maria Luisa Coutinho Gomes de Almeida  
Vogais: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda  
Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2015



## **COPYRIGHT**

Correlação entre macro e nanopartículas emitidas em fumos de soldadura MAG de aços inoxidáveis com diferentes gases de protecção

Copyright©Rafael Palhotas Pacheco, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2015

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



“The only source of knowledge is experience. “

Albert Einstein



## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer em primeiro lugar à minha orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, e ao meu co-orientador Professor Doutor João Gomes, por toda a dedicação a esta dissertação e pela disponibilidade sempre demonstrada.

Aos Senhores António Campos e Paulo Magalhães, um especial agradecimento pela assistência técnica prestada ao longo deste trabalho, e pela paciência demonstrada durante todo o processo de realização desta dissertação.

À Professora Luisa Coutinho do Instituto Superior Técnico pela cedência do equipamento utilizado nos ensaios desta dissertação.

Ao Luis Marques, da empresa Marques & Andrade, o meu agradecimento pelo material de base cedido a este trabalho.

Um obrigado a todos os amigos, mais ou menos próximos, colegas do curso de Engenharia Mecânica e de Engenharia de Soldadura, professores, que contribuíram para a realização deste trabalho, com sugestões, discussões, conversas informais, pelo enriquecimento que me trouxeram e pelo o apoio que sempre me demonstraram.

Um agradecimento especial à minha família, aos meus pais e irmãos que sempre me acompanharam durante o percurso académico.



## RESUMO

A soldadura é o processo mais utilizado na ligação de materiais. Os efeitos na saúde dos trabalhadores expostos a fumos de soldadura estão normalmente associados a danos pulmonares agudos e crónicos, mas também a outras condições médicas e doenças. O principal objectivo deste estudo foi correlacionar as emissões de macro e nanopartículas libertadas durante o processo de soldadura MIG/MAG de aços inoxidáveis com diferentes gases de protecção.

Usando diferentes misturas gasosas utilizadas industrialmente com diferentes entregas térmicas, determinaram-se taxas de formação de fumos e áreas superficiais de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

Verificou-se como os diferentes modos de transferências e tipos de protecção gasosa, em particular, a percentagem de elementos activos na composição química do gás, afectam a quantidade de fumos gerados bem como a existência de nanopartículas com uma elevada capacidade de deposição alveolar. O modo de transferência por *spray* apresenta sempre valores superiores de área de superfície das partículas por volume pulmonar, ao contrário da taxa de formação de fumos. A mistura 82% Ar + 18%  $CO_2$  gera maiores emissões de nanopartículas bem como de fumos formados.

A extracção na fonte e a regeneração do ar ambiente são a solução mais segura e eficiente de controlo das emissões de macro e nanopartículas em soldadura.

## PALAVRAS-CHAVE

- Soldadura por fusão
- *Metal Inert Gas / Metal Active Gas* (MIG/MAG)
- Fumos de soldadura
- Nanopartículas
- Gases de soldadura
- Modos de transferência



## ABSTRACT

Welding is the most commonly used process in material's joining. The effects on the health of workers exposed to welding fumes are normally associated with acute and chronic lung damage, but also to other medical conditions and diseases.

The primary objective of this study was to correlate the emission macro and nanoparticles released during the process of MIG / MAG of stainless steel with different gas mixtures. Using different gas mixtures with different heat inputs, it was possible to determine fume formation rates and surface areas of nanoparticles with alveolar lung deposition capacity.

It was found how the various transfer modes and the type of gas protection, in particular, the percentage of active elements in the chemical composition of the gas, affect the amount of fumes generated and the existence of nanoparticles with a high capacity cellular deposition. The spray transfer mode always shows higher values of nanoparticles surface area per lung volume, unlike the fume formation rates. The mixture 82% Ar + 18%  $CO_2$  generates higher emissions of nanoparticles as well as fume formation rates.

Extractions at source and air regeneration are the safest and most efficient solutions for the control of macro and nanoparticles emissions in welding.

## KEY-WORDS

- Fusion welding
- *Metal Inert Gas / Metal Active Gas (MIG/MAG)*
- Welding fumes
- Nanoparticles
- Shielding gases
- Transfer modes



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
NOMENCLATURA.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	1
1.3 Objectivos.....	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	2
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Arco Eléctrico.....	3
2.2 Tipos de corrente e polaridade.....	7
2.3 Transferência do metal.....	7
2.3.1 Modos de transferência.....	8
2.4 Processo de soldadura MIG/MAG.....	10
2.4.1 Princípio de funcionamento do processo MIG/MAG.....	10
2.4.2 Equipamento e fontes de energia.....	11
2.4.3 Gases de protecção.....	11
2.5 Perigo dos fumos de soldadura para a saúde dos trabalhadores .....	12
2.5.1 Modos de exposição.....	12
2.5.2 Valores Limite de Exposição – VLE.....	14
2.6 Formação de fumos em soldadura.....	15
2.6.1 Mecanismos da formação de fumos.....	15
2.6.2 Caracterização dos fumos.....	18
2.7 Conclusão.....	21
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	23
3.1 Introdução.....	23
3.2 Materiais utilizados.....	23
3.3 Realização das soldaduras.....	26
3.3.1 Equipamento utilizado.....	26
3.3.2 Realização das soldaduras.....	28
3.3.3 Parâmetros operatórios.....	29
3.3.4 Entregas térmicas.....	30

3.4	Medição da Taxa de Formação de Fumos.....	31
3.4.1	Equipamento utilizado.....	31
3.4.2	Procedimento do ensaio .....	34
3.5	Medição da área superficial das nanopartículas.....	35
3.5.1	Equipamento utilizado.....	36
3.5.2	Procedimento do ensaio.....	39
3.6	Conclusão.....	39
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	41
4.1	Introdução.....	41
4.2	Cálculo das Taxas de Formação de Fumos.....	41
4.2.1	Ensaio com o gás Argon.....	42
4.2.2	Ensaio com a mistura gasosa 82% Ar + 18% $CO_2$ – Atal 5.....	43
4.2.3	Ensaio com a mistura gasosa 81% Ar + 18% He + 1% $CO_2$ - Arcal 121.....	44
4.2.4	Ensaio com a mistura gasosa 91% Ar + 5% He + 2% $CO_2$ + 2% $N_2$ – Arcal 129.....	45
4.2.5	Discussão dos valores das TFF .....	46
4.3	Resultados da monitorização de nanopartículas.....	47
4.3.1	Ensaio com o gás Argon .....	47
4.3.2	Ensaio com a mistura gasosa 82% Ar + 18% $CO_2$ – Atal 5.....	48
4.3.3	Ensaio com a mistura gasosa 81% Ar + 18% He + 1% $CO_2$ - Arcal 121.....	50
4.3.4	Ensaio com a mistura gasosa 91% Ar + 5% He + 2% $CO_2$ + 2% $N_2$ – Arcal 129.....	51
4.3.5	Discussão dos resultados obtidos no NSAM.....	52
4.4	Correlação entre macro e nanopartículas.....	53
5.	CONCLUSÕES.....	57
6.	BIBLIOGRAFIA.....	61
7.	ANEXOS.....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática dos fenómenos do arco: as três zonas e as suas características essenciais.....	4
Figura 2.2 – Forças a actuar no destacamento duma gota de metal fundido na posição ao baixo.....	8
Figura 2.3 – Modos de transferência segundo o IIW.....	9
Figura 2.4 – Esquema dum equipamento de soldadura MIG/MAG.....	11
Figura 2.5 – Consequências da inalação de fumos para o organismo [15].....	12
Figura 2.6 – Elementos do processo de soldadura e de transferência de metal que geram fumos (20).....	15
Figura 2.7 - Variação da TFF na soldadura de aço carbono com protecção Ar+2%CO <sub>2</sub> [21].....	16
Figura 2.8 – Quantidade de fumos gerados em diferentes processos de soldadura.....	16
Figura 2.9 - Mecanismos de formação de fumos, adaptado.....	17
Figura 2.10 - Modelo das diversas regiões do pulmão humano [22].....	18
Figura 2.11 - Curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão [22].....	20
Figura 3.1 – Máquina de soldadura Kemppi ProMig 501 .....	26
Figura 3.2 – Painel da Kemppi ProMig 501.....	27
Figura 3.3 – Mesa rotativa da ESAB.....	28
Figura 3.4 – Campânula descrita na norma ANSI/AWS F1.2-98 [18].....	31

Figura 3.5 – Ligação placa de acrílico-mangueira.....	32
Figura 3.6 - Ligação placa de acrílico-campânula.....	32
Figura 3.7 – Campânula dos ensaios de TFF com as adaptações necessárias.....	34
Figura 3.8 – NSAM, modelo 3550 do fabricante TSI.....	36
Figura 3.9 – Esquema de funcionamento do NSAM (22).....	37
Figura 3.10 – Montagem do ensaio de determinação de nanopartículas.....	38
Figura 3.11 – suporte da sonda do NSAM.....	38
Figura 3.12 – NSAM e aquisição de dados.....	38
Figura 4.1 – Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para o gás Argon.....	47
Figura 4.2 - Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para a mistura Atal 5.....	48
Figura 4.3 - Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para a mistura Arcal 121.....	50
Figura 4.4 - Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para a mistura Arcal 129.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Efeitos na saúde dos elementos libertados através dos fumos de soldadura [16].....	13
Tabela 2.2 - Valores Limite de Exposição para substâncias comuns em meio industrial.....	14
Tabela 3.1 – Composição química do aço INOX austenítico AISI 304.....	23
Tabela 3.2 - Composição química do fio ISO 14343-B – SS308LSi.....	24
Tabela 3.3 – Descrição das misturas gasosas usadas durante o estudo, adaptado.....	25
Tabela 3.4 – Parâmetros eléctricos para cada mistura gasosa.....	29
Tabela 3.5 – Entregas térmicas em cada ensaio.....	30
Tabela 4.1 – Resultados da TFF para o gás Argon.....	42
Tabela 4.2 - Resultados da TFF para a mistura Atal 5.....	43
Tabela 4.3 - Resultados da TFF para a mistura Arcal 121.....	44
Tabela 4.4 - Resultados da TFF para a mistura Arcal 129.....	45
Tabela 4.5 – TFF em cada ensaio.....	46
Tabela 4.6 – Picos de concentração de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ] em cada ensaio.....	52
Tabela 4.7 – Correlação entre macro e nanopartículas.....	53

# NOMENCLATURA

## Nomenclatura Romana

a	Região alveolar
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i> (Conferência dos Higienistas Governamentais Industriais Americanos)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldadura)
ANSI	American National Standards Institute
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EDS	<i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i> (Espectrometria de dispersão de energia de raios-X)
ER	Eléctrodo revestido
FCT UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Fem	Força electromagnética
Fg	Força da gravidade
Fs	Força de arrastamento do plasma
F $\gamma$	Tensão superficial
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i> (Alta eficiência para partículas no ar)
IIW	<i>International Institute of Welding</i> (Instituto Internacional de Soldadura)
IST	Instituto Superior Técnico
LPT	Laboratório de Processos Térmicos
LCM	Laboratório de Caracterização de Materiais
MAG	<i>Metal active gas</i> (Metal gás activo)
MIG	<i>Metal inert gas</i> (Metal gás inerte)
NAS	<i>Nanometer Aerosol Sampler</i> (Amostrador de aerossóis nanométricos)
NSAM	<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i> (Monitor de área de superfície de nanopartículas)
SER	Soldadura por Eléctrodos Revestidos
TB	Região traqueobrônquial
TEM	<i>Transmission electron microscopy</i> (Microscópio electrónico de transmissão)

TFF	Taxa de Formação de Fumos
TIG	Tungsten Inert Gas
TSI	TSI- <i>TrustScience Innovation</i> , Inc.

### **Nomenclatura Grega**

$\eta$	Rendimento do processo
--------	------------------------



Esta página foi intencionalmente deixada em branco.



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 Enquadramento**

O sector metalúrgico gera 970 mil milhões de euros por ano, representando cerca de 8% do volume de negócios da União Europeia. A soldadura é o processo mais utilizado na ligação de materiais. Existem cerca de 730 000 soldadores a tempo inteiro e cerca de 5,5 milhões de trabalhadores que efectuem trabalhos relacionados com soldadura [1]. Apesar da sua ampla utilização, tem associados inúmeros perigos para a saúde dos soldadores. Actualmente, 1-2% dos trabalhadores de diversas profissões são expostos a fumos de soldadura e outros gases potencialmente nocivos. Em espaços fechados, este efeito é especialmente pernicioso. Sem a ventilação adequada, o efeito dos fumos e gases resultantes dos processos de soldadura (especialmente soldadura por fusão) podem ser muito mais intensos e acima dos valores limite de exposição para substâncias tóxicas. Nestas situações a soldadura pode ser letal [2].

A crescente preocupação com a saúde dos soldadores e a crescente legislação no que toca à restrição da exposição dos soldadores aos fumos gerados em soldadura leva a um aumento do estudo dos fenómenos que regem o processo bem como a criação de novas tecnologias que permitem controlar este problema. Apesar do aumento do número de novos processos de soldadura e de novos consumíveis, bem como o aumento de novas tecnologias automáticas ou mecanizadas, o número de soldadores expostos a fumos de soldadura é crescente. Simultaneamente, o número de publicações de estudos epidemiológicos em revistas da especialidade neste assunto também está a aumentar [2].

## **1.2 Motivação**

Existem diversos mecanismos pelos quais os fumos de soldadura podem ser originados. Mais de 90% das partículas presentes nos fumos são originadas pela vaporização do metal de adição [3]. Os efeitos na saúde dos trabalhadores expostos a fumos de soldadura estão normalmente associados a danos pulmonares agudos e crónicos, mas também a outras condições médicas e doenças. O contacto com determinados gases e partículas metálicas é inerente a doenças específicas (crómio hexavalente e o cancro dos pulmões por exemplo), contudo, o efeito sanitário de outros elementos e partículas também está bem documentado [3]. O estudo da formação de fumos de soldadura e seus efeitos está relacionado com a profundidade a que as partículas podem viajar no tracto respiratório, sendo que as principais variáveis são o tamanho das partículas e a sua área superficial.

A área superficial é um parâmetro de grande interesse já que condiciona a profundidade do tracto respiratório a que as partículas se irão depositar, sendo que, das possíveis regiões de deposição, as que mais interesse suscitam são o nariz, devido à possibilidade de transferência

de nanopartículas para o cérebro e para as regiões traqueobrônquial e alveolar [4]. No entanto é ainda necessário perceber se existe alguma relação directa entre a emissão de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar e a quantidade de fumos libertada durante o processo de soldadura. Assim, têm de ser realizados diferentes tipos de análise para estudar as diferentes partículas:

- análises físicas, como massa, número, peso e taxa de formação de fumos
- análises químicas, como a composição química dos fumos e a estrutura cristalina das partículas.

### **1.3 Objectivos**

Este trabalho teve como objectivos avaliar e correlacionar a taxa de formação de fumos e a emissão de nanopartículas em função do tipo de protecção gasosa e do modo de transferência, em condições experimentais idênticas às encontradas na indústria, utilizando o processo de soldadura MAG em aços inoxidáveis.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos:

- Introdução: onde são descritos o enquadramento, a motivação, os objectivos e a estrutura da dissertação
- Estado da Arte: descrição breve do arco eléctrico, dos tipos de corrente e modos de transferência de metal, do processo de soldadura MIG/MAG, da emissão de fumos e de nanopartículas
- Procedimento experimental: onde se descrevem os materiais, equipamentos, métodos experimentais, parâmetros de soldadura e condições operatórias adoptadas durante a experimentação
- Análise e discussão dos resultados: onde se apresentam e se discutem os resultados obtidos durante os ensaios
- Conclusões: neste capítulo apresentam-se as conclusões deste estudo bem como sugestões para novos estudos nesta temática
- Bibliografia

## **2 . ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Arco Eléctrico**

Um arco eléctrico pode ser definido como um condutor gasoso em que se transforma energia eléctrica em energia calorífica. Este arco eléctrico é estabelecido através de uma descarga eléctrica entre dois eléctrodos que se mantêm devido ao desenvolvimento de um meio gasoso condutor. Os eléctrodos, através dos quais se estabelece o circuito eléctrico, em soldadura, são geralmente metálicos. O eléctrodo negativo, de onde são emitidos os electrões que passam através do gás, é chamado cátodo. O eléctrodo positivo é conhecido como ânodo. O deslocamento dos electrões do cátodo para o ânodo é consequência da diferença de potencial entre os dois eléctrodos [5]. Podem identificar-se três tipos de partículas:

- Os electrões que partem do cátodo e vão bombardear o ânodo.
- Os iões positivos que retornam na direcção do cátodo.
- Os iões negativos, tais como os de oxigénio, que caminham na direcção oposta.

Sendo a mobilidade dos electrões muito maior (aproximadamente 100 m/s) que a dos iões (aproximadamente 1 m/s), a maior parte da corrente eléctrica é transportada pelos electrões [5].

Existem diversos meios de investigação usados no estudo do arco eléctrico, os quais permitiram o traçado de curvas de repartição longitudinal da tensão entre o ânodo e o cátodo. Estes estudos evidenciaram três regiões distintas (coluna de arco, mancha catódica e mancha anódica), possuindo cada uma delas características específicas, como mostra a Fig. 2.1 [5].

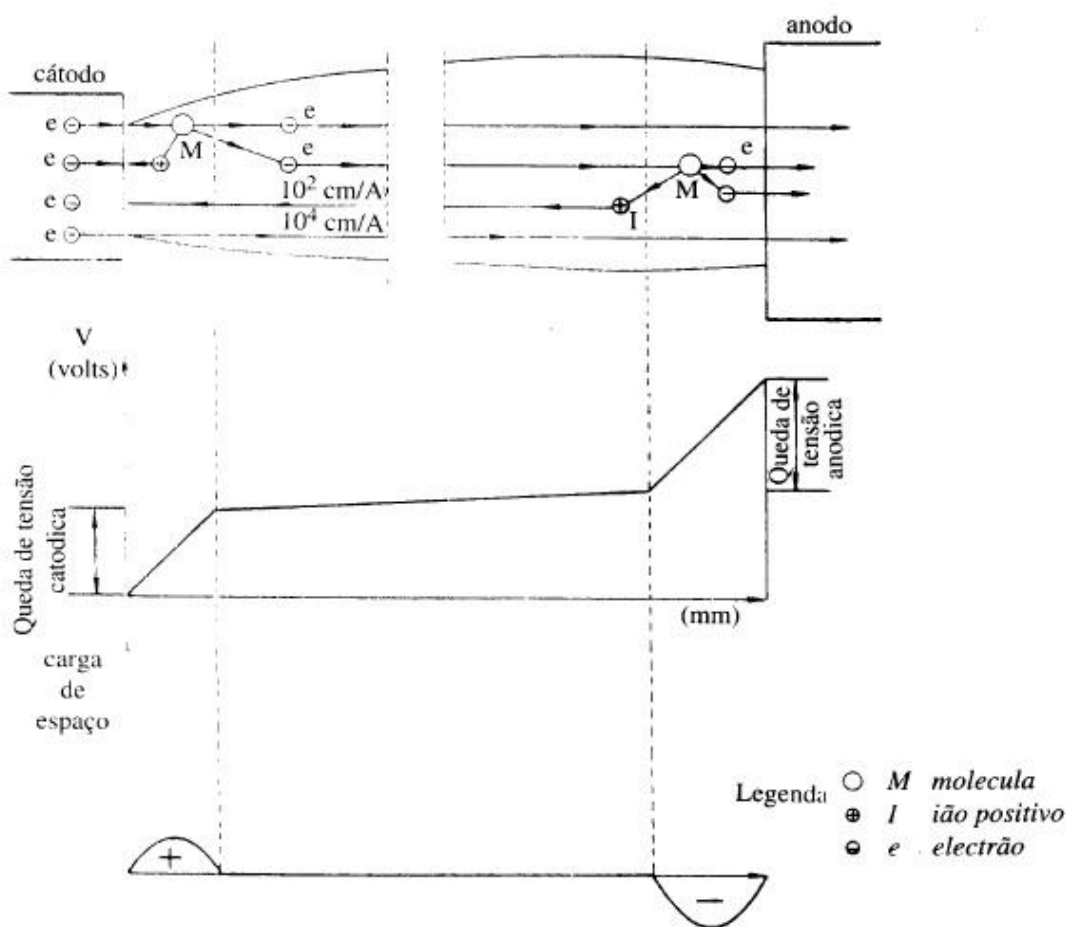


Figura 2.1 - Representação esquemática dos fenómenos do arco: as três zonas e as suas características essenciais

Existem quedas de tensão bruscas ao nível do cátodo e do ânodo, enquanto ao longo da coluna do arco verifica-se uma variação linear, como num condutor metálico. As zonas de transição catódica e anódica são da ordem de  $10^{-5}$  e  $10^{-2}$  cm, respectivamente. Estas zonas são locais de elevada libertação calorífica onde ocorrem grandes quedas de tensão que representam uma parcela importante da queda de tensão total. No entanto, a coluna de arco é electricamente neutra, o que significa que a quantidade de cargas negativas e positivas é semelhante [5]. O arco eléctrico de soldadura conduz, na sua coluna, um meio gasoso de alta temperatura, denominado plasma. O plasma permite transportar correntes elevadas, muitas vezes de várias centenas ou milhares de Ampère, com uma queda de tensão, na sua extensão, de apenas algumas dezenas de Volt.

Em soldadura, de um modo geral, um dos eléctrodos tem a forma de um fio enquanto o outro é uma chapa. Por outro lado, os tipos de consumíveis utilizados nos diferentes processos de soldadura influenciam o comportamento do arco eléctrico. Por exemplo, em soldadura por eléctrodo revestido, a estabilidade e direcionalidade do arco são influenciadas pela composição do revestimento, e em soldadura Metal Inert Gas / Metal Active Gas (MIG/MAG) pelo gás de

protecção utilizado pelo modo de transferência do metal líquido do fio consumível para o banho de fusão, etc. Assim, no arco eléctrico é possível distinguir três zonas:

- Zona de queda de tensão catódica – ZQC
- Zona de coluna de arco – ZCA
- Zona de queda de tensão anódica – ZQA

### **Zona de queda de tensão catódica**

A ligação eléctrica entre o cátodo e a coluna de arco é uma região onde ocorre uma significativa queda de potencial, da ordem de 4,5 a 5,3 V [6]. A zona de queda de tensão catódica tem importância em soldadura, porque é nela que os electrões, que fluem através do plasma de arco, são produzidos e a facilidade e estabilidade desta geração de electrões determina em larga medida a estabilidade do arco eléctrico [5]. Têm sido sugeridas várias teorias para explicar os fenómenos que ocorrem nesta zona. Uma das teorias com maior aceitação [7] sugere três tipos de mecanismos alternativos para explicar a zona de queda de tensão catódica baseada no comportamento experimental em três casos extremos. Na prática podem ocorrer dois destes mecanismos, em simultâneo, ou alterações do tipo do mecanismo, durante a execução do cordão de soldadura. Os três mecanismos identificados são:

- emissão térmica
- emissão plasmogénica
- emissão de campo

A emissão térmica caracteriza-se por uma não ocorrência de uma mancha catódica bem definida e por uma densidade de corrente baixa ( $103 \text{ A/cm}^2$ ), ocorre nos eléctrodos não consumíveis de tungsténio.

A emissão plasmogénica é caracterizada por uma mancha catódica estacionária e uma contracção marcada na zona da coluna de arco imediatamente adjacente ao cátodo. Este mecanismo ocorre em arcos de baixa corrente e elevada pressão (processo de soldadura por plasma).

A emissão catódica indica que a mancha catódica é bem definida mas não estacionária e móvel. Este tipo de mecanismo é o que predomina em soldadura com eléctrodos consumíveis [7].

### **Zona de coluna de arco**

A zona central do arco eléctrico, composta por electrões, iões positivos e partículas neutras, é caracterizada por dois aspectos:

- Elevada temperatura (de forma a que o gás esteja suficientemente ionizado para que se torne condutor).
- Fluxo de elevada velocidade (do eléctrodo para a peça).

A temperatura mantém-se desde que haja geração de energia suficiente para que se compensem as perdas por condução, convecção e radiação. A distribuição da temperatura e a quantidade de gás que flui através do arco determinam a transferência de calor e massa da coluna de arco para o metal em fusão. Estes factores, estão por sua vez relacionados com a quantidade de energia eléctrica convertida em calor na coluna de arco. A energia dissipada é dada pelo produto tensão entre os eléctrodos (V) pela intensidade de corrente (I) em Watt por unidade de comprimento. Esta energia é transferida às zonas adjacentes através dos vários processos de transferência de calor [5].

A estabilidade da coluna de arco está relacionada com a condutibilidade eléctrica. Os arcos mais estáveis estão associados a uma baixa energia de ionização e a temperatura elevada. Quanto mais baixa for a condutibilidade térmica, para um dado valor de corrente de arco e de energia de ionização, mais elevada é a temperatura do arco [5].

### **Zona de queda de tensão anódica**

Na zona próxima do ânodo a temperatura desce do elevado valor que caracteriza a coluna de arco para um valor mais baixo que caracteriza o ânodo. Devido a este facto dá-se uma desestabilização da continuidade do fluxo de iões, a concentração de iões positivos decresce dando origem a uma zona de carga negativa a qual é responsável pela queda de tensão [5]. Embora se tenham realizado vários estudos com o objectivo de explicar a zona de queda de tensão anódica a teoria está ainda incompleta. No entanto há três fenómenos que devem ocorrer [5]:

- A temperatura deverá descer do valor da coluna de arco para o valor da do ânodo.
- Deve ser produzida uma determinada quantidade de iões para fluírem para a coluna de arco.
- Os iões produzidos devem ser acelerados e a sua temperatura deve aumentar até ao valor da temperatura da coluna de arco.

O balanço energético no ânodo é muito importante em soldadura já que influencia a fusão do metal que vai formar o banho de fusão quando se utiliza polaridade directa (eléctrodo ligado ao pólo negativo) e a taxa de fusão do eléctrodo em polaridade inversa (eléctrodo ligado ao pólo positivo) [5].

## **2.2 Tipos de corrente e polaridade**

Nos processos de soldadura por arco eléctrico utilizam-se dois tipos de corrente:

- Corrente alterna
- Corrente continua

Em corrente contínua é importante seleccionar adequadamente o pólo a ligar ao eléctrodo e à peça, denominando-se polaridade directa quando o eléctrodo é ligado ao pólo negativo e polaridade inversa quando o eléctrodo é ligado ao pólo positivo [5]. A selecção do tipo de corrente e polaridade, depende principalmente do processo de soldadura e do tipo de eléctrodo, da protecção gasosa, da potência do arco e do material a soldar [5]. A utilização de corrente contínua em relação à corrente alterna, traz algumas vantagens entre as quais se podem referir:

- 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 mais fácil e regular transferência de metal através do arco.

Por outro lado. A utilização de corrente alterna evita problemas de sopro magnético e permite a utilização de equipamentos mais baratos que os utilizados em corrente contínua [5].

## **2.3 Transferência do metal**

O destacamento das gotas deve-se ao balanço das forças actuantes no processo de transferência. Quando as forças de destacamento da gota de metal fundido excedem as forças de retenção, ocorre o destacamento [8].

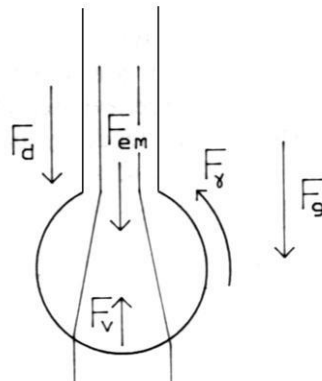


Figura 2.2 – Forças a actuar no desprendimento duma gota de metal fundido na posição ao baixo

As forças actuantes mais relevantes são:

- Força da gravidade -  $F_g$
- Força de arrastamento do plasma -  $F_d$
- Força electromagnética -  $F_{em}$
- Tensão superficial -  $F_\gamma$
- Força de vaporização -  $F_v$

Uma gota destaca-se, na posição ao baixo, quando:

$$F_d + F_g + F_{em} > F_\gamma + F_v$$

No entanto, este balanço de forças não é suficiente para explicar a transferência do metal nem os diferentes modos de transferência que podem ocorrer. Este balanço de forças não tem em conta, por exemplo, o aquecimento do eléctrodo por efeito de Joule, o *stick out*, o tipo de gás de protecção ou a polaridade.

### 2.3.1 Modos de transferência

O fluxo de massa é um aspecto importante na maior parte dos processos de soldadura e torna-se particularmente relevante naqueles em que se utiliza um eléctrodo fusível o qual actua simultaneamente como uma fonte de calor e uma fonte de metal de adição. O modo como o metal líquido se transfere do eléctrodo para a peça tem sido objecto de muitos trabalhos de investigação [10]. Variando os parâmetros eléctricos e o tipo de gás, o comportamento do arco irá alterar-se assim como o modo em que o metal é transferido do eléctrodo para a peça. Isto é de elevada importância já que a qualidade e morfologia do cordão de soldadura dependem destas condições.

Assim, em 1977 o Instituto Internacional de Soldadura (IIW) distinguiu diferentes modos de transferência [10]:

- Curto-circuito
- Globular
- Repelida
- Pulverização axial
- Chuveiro
- Rotacional
- Explosiva
- Guiada por parede de fluxo

Na figura 2.3, ilustram-se os modos de transferência mais significativos segundo o IIW [10]:

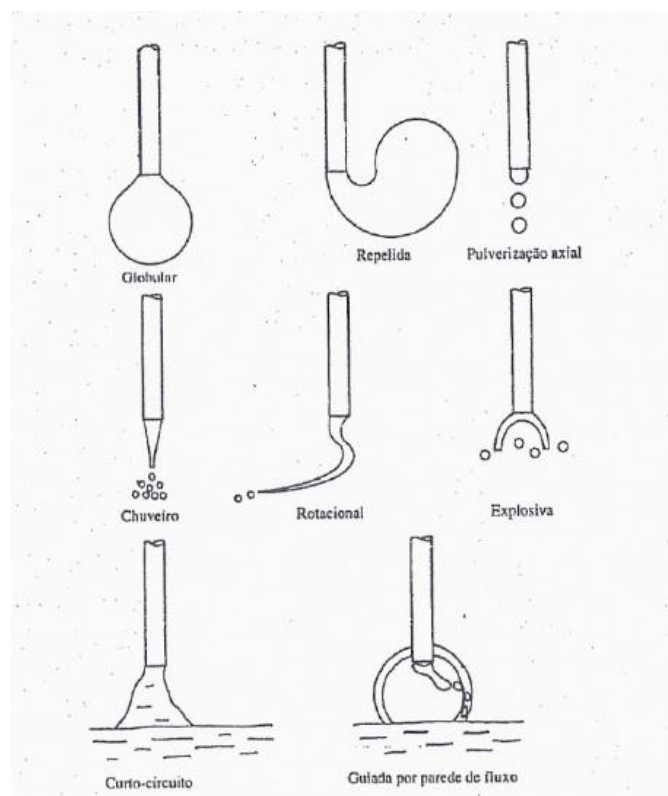


Figura 2.3 – Modos de transferência segundo o IIW

## 2.4 Processo de soldadura MIG/MAG

### 2.4.1 Princípio de funcionamento do processo MIG/MAG

A soldadura **MIG/MAG** é um processo de soldadura por arco eléctrico onde se utiliza um fio eléctrodo consumível de alimentação contínua, na ponta do qual se estabelece o arco eléctrico, e uma protecção gasosa que envolve o eléctrodo, o arco eléctrico e o cordão de soldadura. O eléctrodo, o arco, a zona fundida e a peça a soldar são protegidos da contaminação atmosférica por um fluxo de gás activo ou inerte que passa através dum bocal na tocha da soldadura. Este processo permite a obtenção de elevada densidade de energia devido ao pequeno diâmetro do fio eléctrodo consumível o que também ocasiona uma elevada taxa de fusão do fio. O processo de soldadura MIG/MAG usa corrente contínua no eléctrodo ao positivo, conhecida por polaridade inversa (DC(+)/DCEP) ou corrente alterna (AC). Quase nunca se usa polaridade directa devido às irregularidades e instabilidade da transferência do metal do eléctrodo para a peça.

Apresenta as seguintes vantagens:

- Solda todos os metais
- Bom controlo de penetração
- Solda em todas as posições
- Taxas de depósito entre 1,5 a 2,5 kg/h
- Factor de marcha cerca de 60%
- Automatização
- Eléctrodo contínuo
- Baixos níveis de hidrogénio
- Sem escória, excepto com  $CO_2$

Os parâmetros do processo são:

- Corrente de soldadura / velocidade de alimentação de fio
- Tensão do arco eléctrico / altura do arco
- Velocidade de soldadura
- Tipo de eléctrodo e seu diâmetro
- Tipo de protecção e caudal
- Extensão livre de eléctrodo
- Indutância

## 2.4.2 Equipamento e fontes de energia

Os equipamentos MIG/MAG usam fontes de potência de dois tipos: tensão constante; intensidade constante. As fontes de potência com característica estática de tensão constante são as mais amplamente utilizadas. Devido à alimentação automática de fio, estas fontes garantem a estabilidade do arco por via do Efeito de Auto-Regulação. As fontes de potência com característica estática de corrente constante são menos utilizadas. A estabilidade do arco é obtida por Controlo da Tensão do Arco. Nestes equipamentos o alimentador tem velocidade variável.

Efeito de Auto-Regulação – pequenas alterações na altura/tensão do arco fazem variar significativamente a intensidade de corrente, alterando a velocidade de fusão do fio para que o comprimento original do arco seja repostos.

Controlo da Tensão do Arco – sistema com um alimentador de fio de velocidade variável que é comandada por um controlador que lê a tensão de arco num determinado momento, compara-a com um valor padrão e regula a velocidade do fio em conformidade para que a altura de arco se mantenha constante.

Na figura 2.4 encontra-se um esquema do equipamento básico para o processo de soldadura MIG/MAG [9].

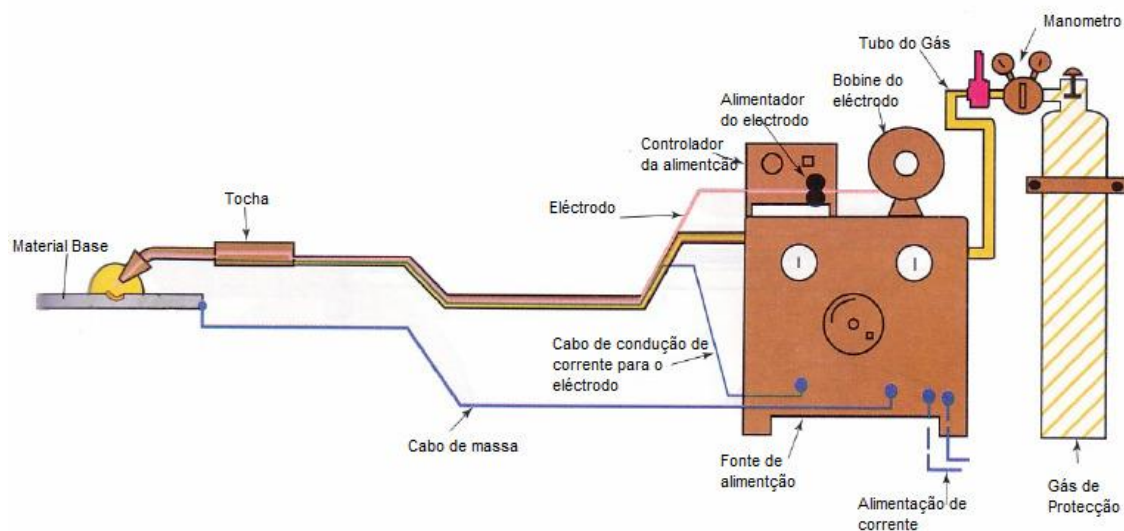


Figura 2.4 – Esquema dum equipamento de soldadura MIG/MAG

## 2.4.3 Gases de protecção

Os gases utilizados podem ser activos ou inertes. Em MIG o gás inerte mais usado é o Árgon, em MAG normalmente é utilizado dióxido de carbono ou misturas de árgon com dióxido de carbono, árgon com oxigénio ou ainda misturas ternárias de árgon, dióxido de carbono e oxigénio. As percentagens de cada gás presentes na mistura dependem muito da aplicação e

dos materiais utilizados. O tipo de protecção gasosa influencia principalmente, a morfologia do cordão, a estabilidade do arco eléctrico, a quantidade de salpicos e a ocorrência de reacções químicas de oxidação-redução. As características principais que definem um gás de protecção em soldadura são:

- Energia de ionização
- Energia de dissociação
- Condutividade térmica
- Densidade
- Presença de elementos activos

## 2.5 Perigo dos fumos de soldadura para a saúde dos trabalhadores

### 2.5.1 Modos de exposição

Os trabalhadores metalúrgicos em particular os soldadores, estão expostos a alguns riscos durante a sua actividade profissional. Os soldadores podem entrar em contacto com os fumos por diferentes vias: inalação, ingestão ou contacto com a pele ou membranas mucosas. Todos eles têm importância no que toca às consequências médicas da exposição. A via principal é a inalação [3].

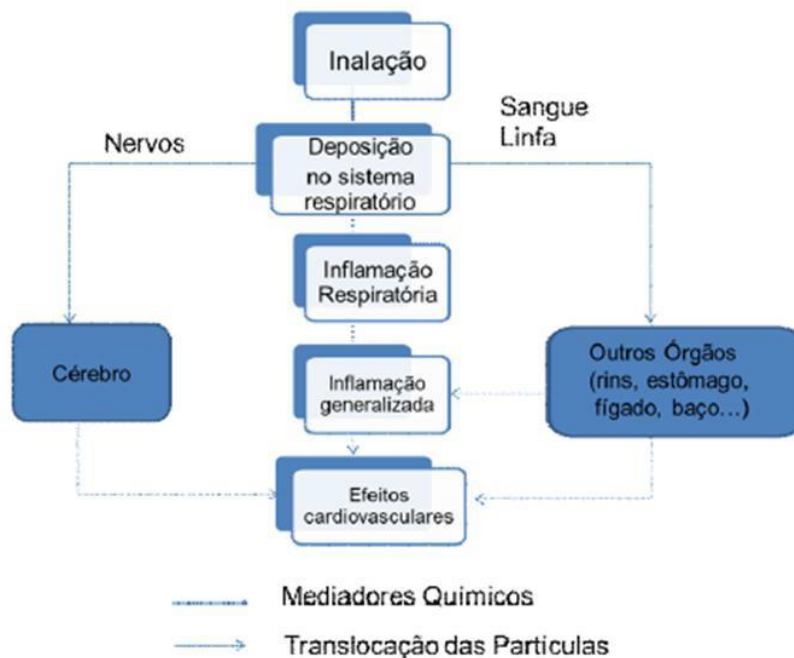


Figura 2.5 – Consequências da inalação de fumos para o organismo [15]

Usualmente, a exposição mede-se no interior da máscara do soldador para obter resultados mais próximos da exposição real, já que o soldador ora está a soldar, ora levanta a máscara. No entanto, nem toda a massa de partículas recolhidas é devida ao processo de soldadura. Cerca de 45-75% é devido a salpicos de soldadura e a metal maquinado [11]. A ingestão e o contacto com a pele ou membranas mucosas também têm de ser considerados em situações de ingestão de produtos contaminados por metais pesados ou nocivos.

Podem distinguir-se efeitos agudos e crónicos na saúde dos trabalhadores expostos. Os primeiros resultam da exposição de curta duração e são do tipo: falta de ar; irritação dos olhos, nariz e garganta; febre de fumos metálicos; asma (*welding related asthma*). Os segundos resultam duma exposição prolongada dos trabalhadores e são do tipo: bronquite crónica; cancro dos pulmões; susceptibilidade a infecções [12]; doença pulmonar do tipo sarcoidose [13]. Também os diferentes elementos de liga têm diferentes consequências ao nível da saúde e os mais preocupantes são: Mn, Be, Cd, Cr, Ni, Al, Pb.

Tabela 2.1 – Efeitos na saúde dos elementos libertados através dos fumos de soldadura (adaptado) [16]

Elementos	Efeitos na saúde
Crómio (Cr)	Causa irritação das membranas mucosas, febre de fumos metálicos, afecta as vias respiratórias e os pulmões. Aumenta também o risco de se contrair cancro nos pulmões.
Cobre (Cu)	É proveniente do material de base, pode provocar febre de fumos metálicos.
Ferro (Fe)	Na soldadura dos metais ferrosos, os fumos de soldadura libertam óxidos de ferro. A exposição prolongada ao óxido de ferro pode conduzir a uma doença denominada siderose (dificuldades respiratórias, pneumonias e bronquites).
Níquel (Ni)	Pode causar febre de fumos metálicos, é também um elemento cancerígeno.
Manganês (Mn)	Este elemento pode causar irritação das mucosas, tremores, rigidez nos músculos, fraqueza e perturbações das capacidades mentais. O sistema nervoso e respiratório podem também ser afectados.

## 2.5.2 Valores Limite de Exposição – VLE

Os valores limite de exposição, ou pelo acrónimo inglês, *Threshold Limit Values (TLV)*, apresentam-se numa tabela publicada pela ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists que serve de referência para os níveis máximos de exposição para uma substância química. São o valor limite, expresso em concentração média diária para um dia de trabalho de 8 horas e uma semana de 40 horas, ponderada em função do tempo, de exposição a uma substância química de um humano sem que apareçam efeitos irreversíveis na sua saúde. A tabela seguinte mostra os TLVs para algumas substâncias comuns em meio industrial, mais especificamente, em soldadura [3].

Tabela 2.2 - Valores Limite de Exposição para substâncias comuns em meio industrial

<b>Substância</b>	<b>Valor Limite de Exposição – média ponderada de 8 horas</b>
Alumínio e compostos insolúveis	1 mg/m <sup>3</sup>
Antimónio e compostos	0,5 mg/m <sup>3</sup>
Arsénico e compostos inorgânicos de arsénico	0,01 mg/m <sup>3</sup> (A1)
Berílio e compostos	0,00005 mg/m <sup>3</sup> (A1)
Cádmio	0,01 mg/m <sup>3</sup> (A2)
Compostos de cádmio	0,002 mg/m <sup>3</sup> (A2)
Crómio e compostos Cr III	0,5 mg/m <sup>3</sup> (A4)
Compostos Cr VI solúveis em água	0,05 mg/m <sup>3</sup> (A1)
Compostos Cr VI insolúveis	0,01 mg/m <sup>3</sup> (A1)
Cobalto e compostos inorgânicos	0,02 mg/m <sup>3</sup> (A3)
Óxido de ferro	5 mg/m <sup>3</sup> (A4)
Chumbo e compostos inorgânicos	0,05 mg/m <sup>3</sup> (A3)
Manganês e compostos inorgânicos	0,2 mg/m <sup>3</sup>
Níquel	1,5 mg/m <sup>3</sup> (A5)
Compostos inorgânicos de níquel solúveis	0,1 mg/m <sup>3</sup> (A4)
Compostos inorgânicos de níquel insolúveis	0,2 mg/m <sup>3</sup> (A1)
Óxido de zinco	2 mg/m <sup>3</sup>

Legenda:

- A1 – Confirmado carcinogénico humano
- A2 - Suspeito carcinogénico humano
- A3 – Carcinogénico animal, influência humana desconhecida
- A4 - Não confirmado carcinogénico humano
- A5 – Não suspeito como carcinogénico humano

## 2.6 Formação de fumos em soldadura

Os fumos de soldadura são principalmente gerados nos processos de soldadura por fusão, tal como a soldadura por arco-eléctrico, e são resultantes da fusão e vaporização do eléctrodo consumível na presença de grandes fontes de calor (coluna de arco).

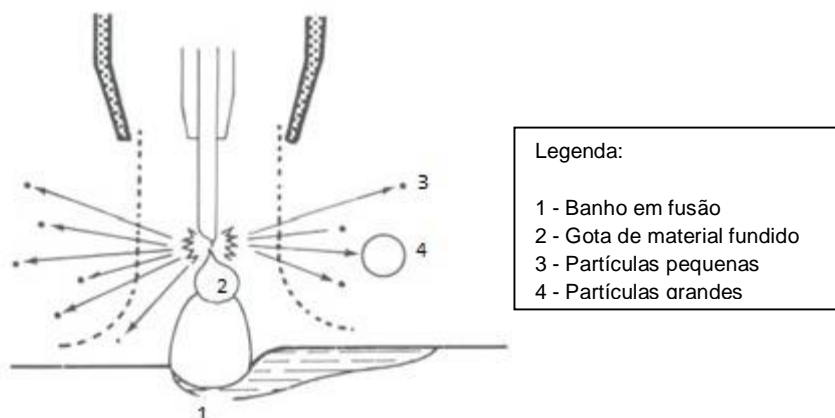


Figura 2.6 – Elementos do processo de soldadura e de transferência de metal que geram fumos [20]

Assim, a combinação do metal de adição e material base com os gases de protecção (gases e/ou revestimento queimados) gera reacções químicas que alteram a composição final dos fumos (3).

### 2.6.1 Mecanismos da formação de fumos

Os fumos de soldadura originam-se por mecanismos diferentes, usualmente a decorrerem em paralelo. Os factores que governam a Taxa de Formação de Fumos (TFF) e a emissão de nanopartículas estão amplamente estudados e são a chave para a sua diminuição na fonte, mas a principal dificuldade é o facto de que a maior parte destes factores estarem intimamente relacionados, e é muito difícil atribuir a cada fenómeno apenas um parâmetro de soldadura que o governe. Os principais factores que influenciam a TFF e a emissão de nanopartículas são:

- Tamanho da gota de metal transferido
- Temperatura da gota
- Modo de transferência do metal
- Quantidade de salpicos
- Gás de protecção (termoemissividade, potencial de ionização, condutividade térmica)
- Revestimento do eléctrodo
- Composição do metal base

- Composição do metal de adição
- Parâmetros eléctricos do processo (corrente, tensão, impedância)
- Estabilidade do arco

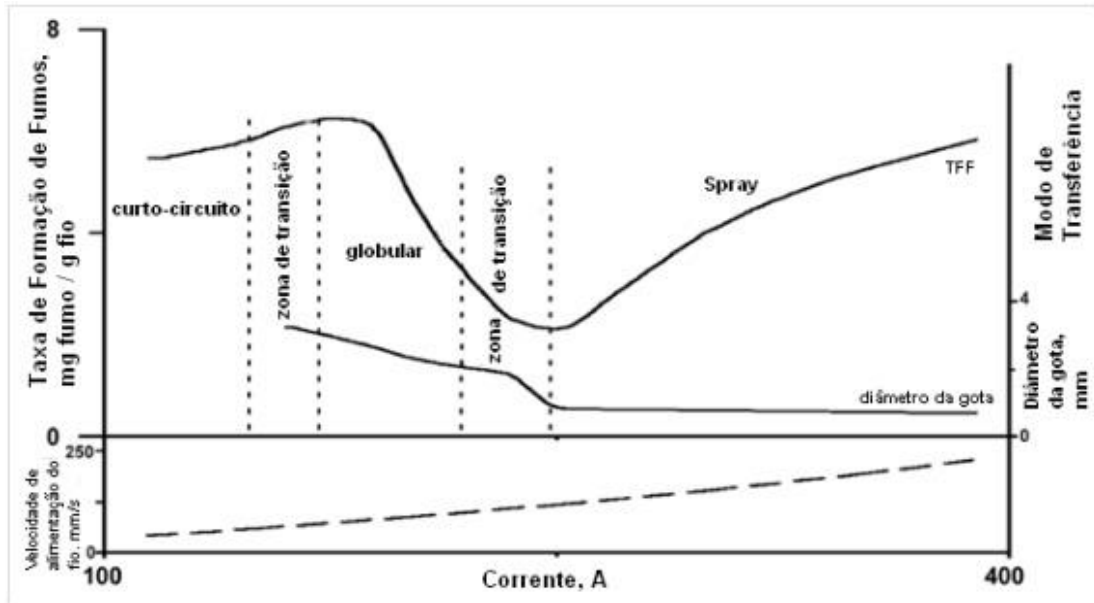


Figura 2.7 – Variação da TFF na soldadura de aço carbono com protecção Ar+2%CO2 [21]

Assim, dependendo do processo de soldadura e dos parâmetros operatórios, as quantidades de fumos gerados serão diferentes.

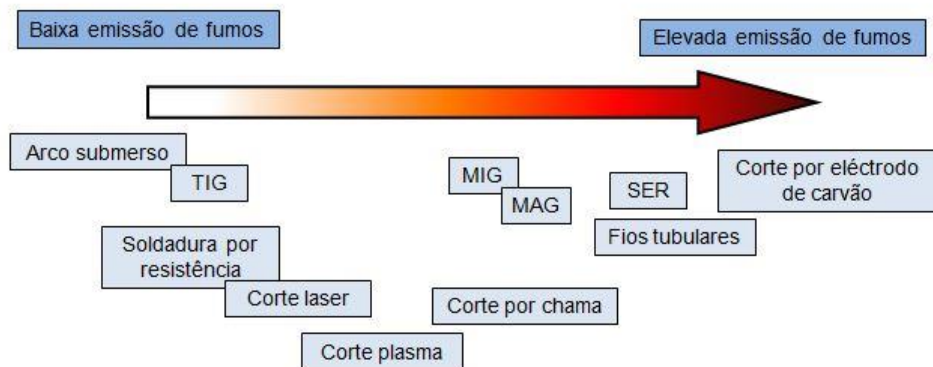


Figura 2.8 - Quantidade de fumos gerados em diferentes processos de soldadura

O metal proveniente da gota de metal de adição pode estar na forma de gota metálica de diferentes tamanhos, de vapor metálico, de óxidos metálicos primários, de elementos metálicos volatilizados e de óxidos metálicos volatilizados [3].

As principais fases na formação das partículas metálicas durante o processo de soldadura listam-se abaixo [3]:

- Expulsão da gota metálica do eléctrodo
- Vaporização da gota
- Condensação do vapor metálico
- Oxidação
- Aglomeração

Existem diferentes mecanismos de formação de fumos. O esquema seguinte ilustra estes mecanismos [14].

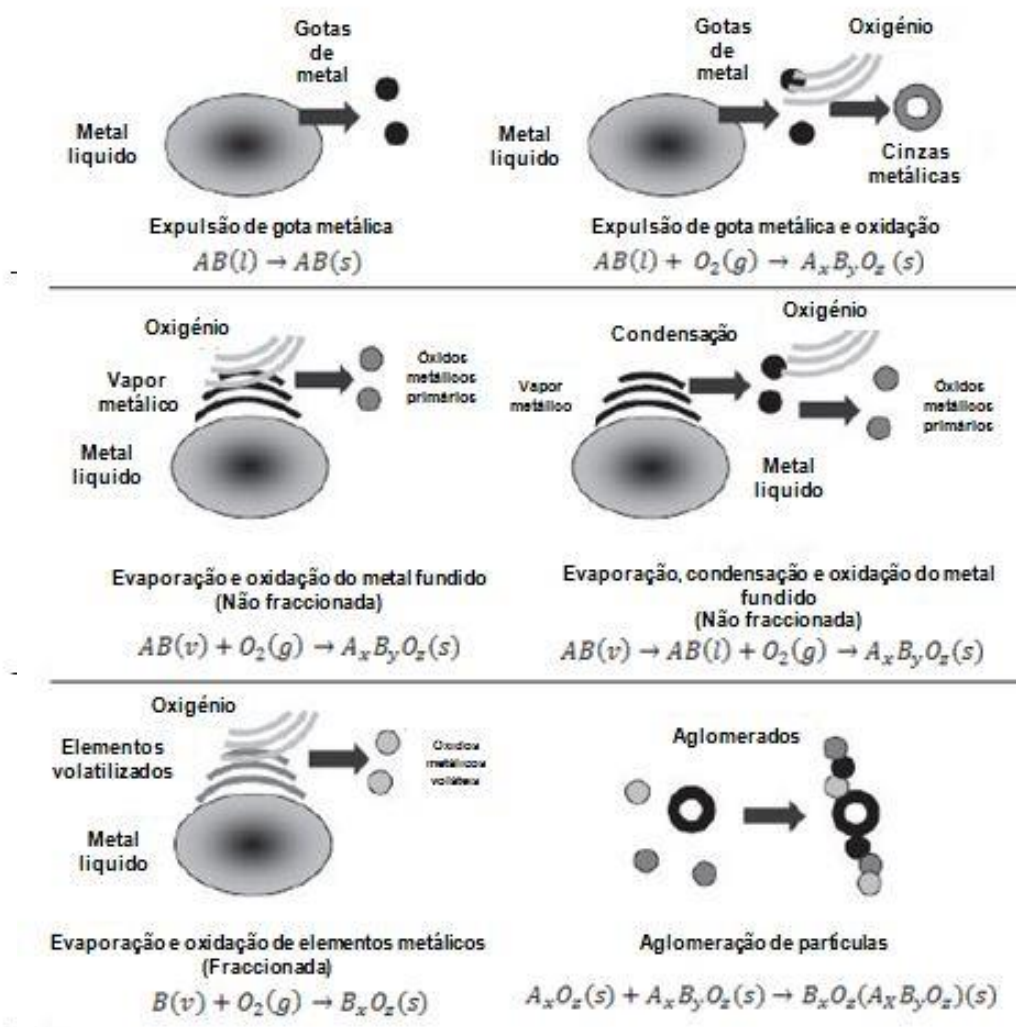


Figura 2.9 - Mecanismos de formação de fumos, adaptado [14]

## 2.6.2 Caracterização dos fumos

A dimensão das diferentes partículas tem uma influência muito grande no modo como elas afectam a saúde do soldador. Partículas de menor dimensão podem chegar a zonas mais profundas do tracto respiratório enquanto partículas de maior dimensão podem ficar retidas nas zonas iniciais ou até cair por acção do campo gravítico e nem chegarem a ser inaladas. Como ambos os tipos de partículas podem ser nocivas, diferentes caracterizações são necessárias para estudar o problema em pleno, já que são necessários diversos ensaios para definir completamente as emissões de gases do processo.

Diferentes estudos indicam que, uma vez no corpo, os nano-objects podem deslocar-se para órgãos ou tecidos distantes da zona de entrada. São biopersistentes e biocumulativos no organismo, em especial nos órgãos como os pulmões, o cérebro e o fígado. A migração de nanopartículas no organismo humano poderá desempenhar um papel importante no desenvolvimento de determinadas patologias cardiovasculares, respiratórias e do sistema nervoso central [15].

Os efeitos na saúde estão dependentes das regiões de deposição. Sabe-se que a deposição pulmonar é o meio mais eficiente para partículas que se encontram em suspensão entrarem no corpo humano, e produzirem risco para a saúde [16].

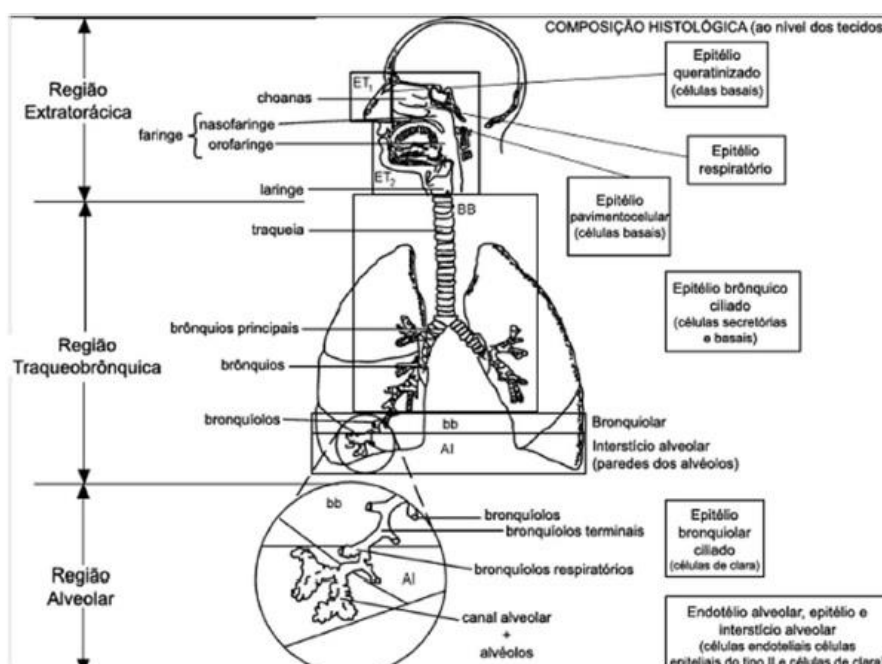


Figura 2.10 - Modelo das diversas regiões do pulmão humano [22]

As propriedades mais importantes das nanopartículas que contribuem para os seus efeitos adversos são: solubilidade, morfologia das partículas, tamanho das partículas,

composição e a área superficial, sendo a última a mais importante na análise da toxicidade das nanopartículas. O potencial de risco é directamente proporcional à área superficial [4].

Em 1996 a *International Commission of Radiological Protection (ICRP)* desenvolveu um modelo de deposição pulmonar para aerossóis. Para este modelo é necessário considerar vários parâmetros: taxa de respiração, o volume do pulmão, a actividade respiratória nariz/boca. As curvas obtidas para este modelo variam de acordo com os parâmetros anteriormente referidos [16].

A *American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH)* desenvolveu os parâmetros para um trabalhador de referência de modo a ser possível obter as curvas de deposição [4].

1) Parâmetros fisiológicos

- Tipo de trabalhador: homem adulto
- Capacidade funcional residual: 2200 cm<sup>3</sup>
- Espaço morto extratorácico: 50 cm<sup>3</sup>
- Espaço morto bronquial: 49 cm<sup>3</sup>
- Altura: 175 cm
- Diâmetro da traqueia: 1,65 cm
- Diâmetro do primeiro brônquio: 0,165 cm

2) Parâmetros relacionados com a actividade

- Nível de actividade: exercício leve
- Tipo de actividade: respiração apenas pelo nariz
- Taxa de ventilação: 1,3 m<sup>3</sup>/h
- Frequência de respiração: 15 inalações por minuto
- Volume de inalação: 1450 cm<sup>3</sup>
- Fração inalada através do nariz: 1,0

3) Parâmetros do aerossol

- Diâmetro médio aerodinâmico: 0,001 µm – 0,5 µm
- Desvio padrão geométrico: 1,0
- Densidade: 1,0 g/cm<sup>3</sup>
- Factor de forma: 1,0

A figura ilustra as curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão de acordo com o ICRP e a ACGIH.

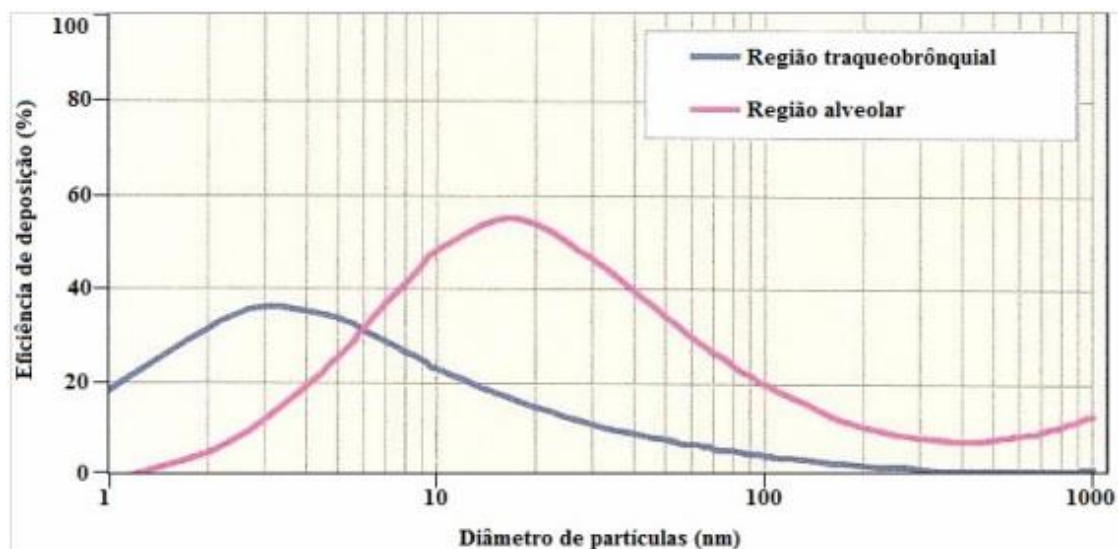


Figura 2.11 - Curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão [22]

Podem-se distinguir macro e nanopartículas libertadas nos processos de soldadura por fusão. Uma diferença entre elas é que as macropartículas têm uma dimensão maior que as nanopartículas e têm massa mensurável, sendo afectadas pelo campo gravítico. As nanopartículas, em oposição às macro são muito pequenas e virtualmente não têm massa, encontrando-se em suspensão no ar. A principal característica distintiva entre as nanopartículas e as macropartículas é o elevado valor de área superficial das primeiras. As nanopartículas podem ser tóxicas dependendo da sua forma e potencial de penetração no interior do sistema respiratório [17].

### Caracterização física

O objectivo é caracterizar grandezas como a massa, quantidade e morfologia das diferentes partículas. Na experimentação far-se-á uma análise principalmente física, com o objectivo de recolher dados relativos à Taxa de Formação de Fumos (TFF) e à quantidade/morfologia das nanopartículas. Para aferir qual a morfologia das partículas, terá de se proceder à sua recolha para posteriormente poderem ser analisadas por microscopia electrónica de transmissão (TEM). No que diz respeito à Taxa de Formação de Fumos, será usada a norma ANSI/AWS F1.2-98.

### Caracterização química

Para caracterizar quimicamente as partículas recolhidas será necessário recorrer a uma análise EDS - Espectroscopia de raios X por dispersão em energia. É uma técnica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra. A caracterização é devida em grande parte ao princípio fundamental de que cada elemento tem uma estrutura atómica única, de modo que os raios X emitidos são característicos desta estrutura, e identificam o elemento.

## **2.7 Conclusão**

Este trabalho incide no fenómeno da emissão de fumos e nos efeitos na saúde dos trabalhadores daí subsequentes. Neste capítulo evidenciaram-se os principais perigos que os fumos de soldadura trazem aos trabalhadores, bem como os mecanismos responsáveis pela emissão de macro e nanopartículas e os meios necessários à sua análise.



### 3 . PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introdução

O processo de soldadura MIG/MAG foi automatizado o que permitiu controlar os parâmetros da soldadura com maior precisão e garantir a repetibilidade dos ensaios durante a experimentação. Neste capítulo descreve-se o trabalho experimental realizado nomeadamente:

- Materiais de base e consumíveis de soldadura.
- Realização das soldaduras.
- Descrição dos processos, metodologias e equipamentos utilizados.

#### 3.2 Materiais utilizados

Para este estudo seleccionou-se um aço inoxidável que, de acordo com o código ASME, tem a designação AISI 304. É um aço inoxidável austenítico (não tem alotropia) amplamente utilizado na indústria química e alimentar, principalmente por apresentar excelentes propriedades de resistência à corrosão e ao ataque por agentes químicos exteriores. A composição química deste aço está descrita na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Composição química do aço INOX austenítico AISI 304

Composição	C (%max)	Mn (%max)	P (%max)	S (%max)	Si (%max)	Ni (%)	Cr (%)	N (%max)
AISI 304	0,08	2,0	0,045	0,030	0,75	8,0- 10,5	18,0- 20,0	0,10

Para os ensaios de medição de fumos e de nanopartículas usou-se um disco de 300mm de diâmetro e 5mm de espessura. A geometria utilizada foi imperativa na experimentação.

O material de adição utilizado para a deposição de cordões de soldadura foi o fio sólido com a designação, ISO 14343-B – SS308LSi de acordo com a Norma ISO, com um diâmetro de 1,0 mm. A Tabela 3.2 indica a composição química do material de adição.

Tabela 3.2 - Composição química do fio ISO 14343-B – SS308LSi

Composição	C (%)	Cr (%)	Mo (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
ISO 14343-B – SS308LSi	0,3 max	19,5-22,0	9,0-11,0	0,75 max	0,65-1,0	0,03 max	0,03 max	0,75 max

Seleccionaram-se 3 misturas gasosas do fabricante Air Liquide Welding e o gás inerte Árgon, para a realização de cordões de soldadura. A escolha destas misturas prendeu-se com o facto de, para além de serem bastante usadas na indústria, terem diferentes composições químicas e diferentes potenciais de ionização, permitindo a avaliação da influência desses parâmetros na emissão de macro e nanopartículas.

As misturas gasosas são:

- Árgon
- 82% Ar + 18%  $CO_2$  - Atal (designação comercial)
- 81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$  – Arcal 121 (designação comercial)
- 91% Ar + 5% He + 2%  $CO_2$  + 2%  $N_2$  – Arcal 129 (designação comercial)

Na tabela 3.3 estão descritas as principais características e aplicações das misturas gasosas usadas neste estudo.

Tabela 3.3 – Descrição das misturas gasosas usadas durante o estudo (adaptado) [16]

Árgon	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gás de características inertes</li><li>• Fácil escorvamento e manutenção da estabilidade do arco</li><li>• Eficiente protecção gasosa, pouco sensível às correntes de ar</li><li>• Cordão de tendência convexa e penetração em “dedo”, ideal para baixas espessuras, menor ET</li><li>• Em MIG/MAG baixo nível de salpicos, mais fácil a transferência por <i>spray</i></li></ul>
82% Ar + 18% $CO_2$ - Atal	<ul style="list-style-type: none"><li>• É uma mistura composta por 82% de árgon com 18% de dióxido de carbono, destinada à soldadura de aços ao carbono.</li><li>• Com esta mistura é possível utilizar todos os modos de transferência.</li><li>• É aplicada para todas as posições de soldadura e pode ser aplicada em soldadura manual ou automatizada.</li><li>• O seu teor de dióxido de carbono permite-lhe obter boas penetrações</li></ul>
81% Ar + 18% He + 1% $CO_2$ - Arcal 121	<ul style="list-style-type: none"><li>• É uma mistura gasosa composta por 81% árgon, 18% hélio e 1% de dióxido de carbono.</li><li>• Esta mistura gasosa distingue-se por apresentar emissões reduzidas de fumos e baixo nível de projecções, excelente molhagem e penetração.</li></ul>
91% Ar + 5% He + 2% $CO_2$ + 2% $N_2$ - Arcal 129	<ul style="list-style-type: none"><li>• Esta mistura gasosa é composta por 91% árgon, 5% hélio, 2% dióxido de carbono e 2% de azoto.</li><li>• 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.</li></ul>

### 3.3 Realização das soldaduras

#### 3.3.1 Equipamento utilizado

##### **Máquina de soldar ProMig 501 do fabricante Kemppi**

A máquina de soldadura utilizada neste trabalho foi uma Kemppi ProMig 501. É uma fonte inversora de tecnologia electrónica, multifunções (SER, TIG, MIG/MAG), em que existe a possibilidade de soldar no modo convencional, no modo sinérgico ou no modo pulsado.



Figura 3.1 – Máquina de soldadura Kemppi ProMig 501

O modo utilizado durante a experimentação foi o MIG/MAG sinérgico em que os parâmetros são otimizados de acordo com o material a soldar e com o diâmetro do fio utilizado. A tensão de soldadura é ajustada automaticamente pelo equipamento de acordo com a altura do arco-eléctrico.



Figura 3.2 – Painel da Kemppi ProMig 501

A fonte de alimentação Pro3200 Evolution é baseada na tecnologia de inversor (*inverter*), que, ao longo do tempo tem ganhado espaço no mundo da soldadura, pois apresenta as seguintes vantagens [16]:

- Facilidade na regulação de parâmetros de soldadura
- Capacidade de comutar a característica estática externa possibilitando a sua utilização em vários processos de soldadura
- Características dinâmicas muito superiores à dos equipamentos convencionais, que permitem reagir mais rapidamente às flutuações do arco eléctrico
- Capacidade de funcionar com corrente pulsada e em modo sinérgico

### **Mesa rotativa**

Utilizou-se uma mesa rotativa da ESAB, modelo 75 SK, que apresentou diversas vantagens, nomeadamente:

- Realização de soldaduras contínuas
- Manutenção da posição de soldadura
- Regulação da velocidade de soldadura
- Adaptação para o ensaio da TFF e da medição de nanopartículas



Figura 3.3 – Mesa rotativa da ESAB

### **Mesa de suporte**

Para o acoplamento da mesa rotativa com o restante equipamento foi necessário proceder à construção de uma mesa de suporte, feita no Laboratório de Processos Térmicos do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

Esta mesa serviu dois objectivos:

- Suportar a estrutura metálica dos ensaios de determinação da Taxa de Formação de Fumos
- Suportar e localizar a sonda para recolha de partículas para análise no NSAM

### 3.3.2 Realização das soldaduras

Definiu-se previamente a realização de pelo menos 3 ensaios por mistura gasosa e por modo de transferência. Como o modo de utilização da fonte inversora (Kemppi ProMig 501) foi o MIG/MAG Sinérgico, seleccionando o tipo de material, o diâmetro do fio e a velocidade de alimentação de fio, a fonte ajusta a intensidade e a tensão do arco eléctrico para otimizar o processo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processos Térmicos do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Todos os ensaios de soldadura foram realizados, com o sistema de extracção de fumos ligado.

### 3.3.3 Parâmetros operatórios

No modo MIG/MAG Sinérgico, isto passa por uma correcta escolha da velocidade de alimentação de fio para obter os modos de transferência pretendidos, que foram os modos de transferência por Curto-Circuito e por *Spray*. Em todos os ensaios usaram-se débitos de gás de 12 l/min e depositaram-se cordões contínuos durante 30 segundos (usando um cronómetro, para velocidades de rotação da mesa da ESAB constantes de ensaio para ensaio, velocidade de soldadura de 0,3 m/min). Para além disto, a mesa rotativa da ESAB tinha acoplado um sistema de fixação para a tocha de soldadura MIG/MAG. Isto é muito vantajoso, pois permite manter constante a posição da tocha e a altura de arco de ensaio para ensaio durante a experimentação.

Tabela 3.4 – Parâmetros eléctricos para cada mistura gasosa

Árgon		
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5	9
Modo de transferência	Curto-Circuito	<i>Spray</i>
82% Ar + 18% CO <sub>2</sub> – Atal 5 (designação comercial)		
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5	9,3
Modo de transferência	Curto-Circuito	<i>Spray</i>
81% Ar + 18% He + 1% CO <sub>2</sub> – Arcal 121 (designação comercial)		
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5	9
Modo de transferência	Curto-Circuito	<i>Spray</i>
91% Ar + 5% He + 2% CO <sub>2</sub> + 2% N <sub>2</sub> – Arcal 129 (designação comercial)		
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5	9
Modo de transferência	Curto-Circuito	<i>Spray</i>

### 3.3.4 Entregas térmicas

Para se obterem os modos de transferência por Curto-Circuito e por *Spray*, fixou-se a velocidade de soldadura e registaram-se os valores médios da intensidade de corrente e da tensão do arco. Calcularam-se as entregas térmicas para cada mistura gasosa e para modo de transferência através da seguinte expressão:

$$ET = \frac{I \times V}{v} \times \eta \left[ \frac{J}{mm} \right]$$

Em que as variáveis são:

- $I$  é a intensidade de corrente utilizada em cada ensaio, em Ampére
- $V$  é a tensão do arco-eléctrico de cada ensaio, em Volt
- $v$  é a velocidade de soldadura (constante em todos os ensaios), em milímetros por minuto
- $\eta$  é o rendimento do processo MIG/MAG, 80% de acordo com a norma DIN 1011-1 [19]

Tabela 3.5 – Entregas térmicas em cada ensaio

Entrega Térmica $\left[ \frac{J}{mm} \right]$	T. Curto-circuito	T. <i>Spray</i>
Árgon	2 614	10 672
81% Ar + 18% He + 1% $CO_2$ – Arcal 121 (designação comercial)	4 669	14 175
91% Ar + 5% He + 2% $CO_2$ + 2% $N_2$ - Arcal 129 (designação comercial)	4 142	13 784
82% Ar + 18% $CO_2$ – Atal 5 (designação comercial)	4 032	13 344

### 3.4 Medição da Taxa de Formação de Fumos

A Taxa de Formação de Fumos permite quantificar os fumos libertados durante o processo de soldadura. Para a sua determinação usou-se uma câmara de soldadura onde os fumos foram gerados, retidos e extraídos após passarem por filtros. É um ensaio gravimétrico em que se pesam os filtros secos antes e depois da soldadura para quantificar a massa das partículas geradas, e que podem ser retidas pelos filtros, durante o processo. Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma de ensaio ANSI/AWS F1.2-98 [18].

#### 3.4.1 Equipamento utilizado

Esta norma define a campânula de retenção de fumos constituída por uma chaminé conectada a uma *hotte* de extracção de fumos.

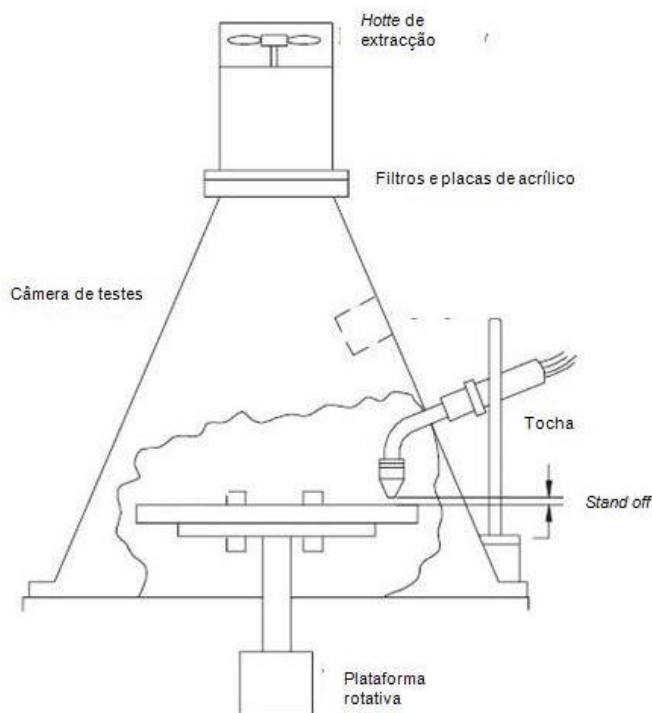


Figura 3.4 – Campânula descrita na norma ANSI/AWS F1.2-98 [18]

Assim, procedeu-se à adaptação duma campânula construída pelo Instituto Superior Técnico para este efeito, da *hotte* existente no laboratório, bem como das restantes restrições do Laboratório de Processos Térmicos (LPT) - DEMI onde foram realizados os ensaios. As adaptações realizadas foram:

- Ligação da *hotte* à chaminé da campânula
- Placas em acrílico para suportar os filtros
- Recorte de filtros circulares pequenos possíveis de adaptar nas placas
- Mesa de suporte da campânula



Figura 3.5 – Ligação placa de acrílico-mangueira



Figura 3.6 - Ligação placa de acrílico-campânula

Na montagem descrita, e durante a concepção das diferentes adaptações necessárias, respeitou-se e teve-se em atenção todas as recomendações da ANSI/AWS F1.2-98, nomeadamente no que diz respeito:

- Tipo de filtros utilizados
- Poder de sucção e caudal requerido
- Tempo de soldadura
- Tempo e temperaturas de secagem dos filtros
- Precisão da balança
- Isolamentos da campânula
- Posição dos filtros e variações do perfil de velocidades ao longo da chaminé

**Tipo de filtros utilizados** – filtros de micro fibra de vidro, gama GFA do fabricante Whatman, as características deste modelo enquadram-se nas exigidas pela norma.

**Poder de sucção e caudal requerido** – Verificaram-se as velocidades do escoamento na mangueira flexível. A velocidade média é de cerca de 5 m/s. Sabendo que a mangueira tem uma secção de 160 mm de diâmetro é possível calcular o caudal de extracção:

$$D_{secção} = 160 \text{ mm} = 0,16 \text{ m} \rightarrow A_s = \pi \times 0,08^2 = 0,02 \text{ m}^2$$
$$v = 5 \text{ m/s} = 300 \text{ m/min}$$

$$Q_v = A_s \times v = 0,02 \text{ m}^2 \times 300 \text{ m/min} = 6 \text{ m}^3/\text{min} = \mathbf{6000 \text{ l/min}}$$

A norma ANSI/AWS F1.2-98 requer o mínimo de 1000 l/min.

**Tempo de soldadura** – Procedeu-se à realização de cordões de soldadura durante 30s (soldadura contínua), correspondente ao mínimo requerido pela norma para a libertação de fumos suficientes para este ensaio. Durante os ensaios usou-se um cronómetro digital comum para respeitar este período de tempo.

**Tempo e temperatura de secagem dos filtros** – Antes de cada ensaio, a norma recomenda a secagem dos filtros com uma duração mínima de 1h a cerca de 100° C. Foi usado um forno eléctrico, modelo KR-62-14 do fabricante Selectline, para o efeito.

**Precisão da balança** – Depois de devidamente secos, os filtros foram pesados antes e depois das soldaduras. A balança usada no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) – DEMI, modelo GR-200 do fabricante AND, tem uma precisão de 0,1 mg, superior à requerida pela ANSI/AWS F1.2-98. Durante a utilização da balança de precisão teve-se o cuidado de fechar sempre a porta da balança, bem como, posicionar os 4 filtros sempre empilhados e no centro do prato da balança para evitar erros associados à posição.

**Isolamentos da campânula** – Para garantir a segurança do operador e, ao mesmo, tempo garantir que os fumos não se escapavam pela base da campânula, foi necessário proceder a um isolamento da mesma. Junto à base da campânula, entre esta e a mesa de suporte, usou-se fita de alumínio para garantir o isolamento. Usou-se também esta fita para isolar a zona lateral da campânula onde a tocha de soldadura foi colocada. Na zona da chaminé, entre a mesma e as placas de acrílico usou-se folha de cortiça para evitar que houvesse saída de fumos.

**Posição dos filtros e variações do perfil de velocidades ao longo da chaminé** – Procedeu-se à medição das velocidades de escoamento ao longo da secção da chaminé. Para isto usou-se um anemómetro analógico. O objectivo desta medição era perceber se a posição dos furos na placa de acrílico que suporta os filtros era ou não relevante na quantidade de partículas que lá eram retidas. Após as medições verificou-se que a velocidade ao longo da secção da chaminé era praticamente constante, cerca de 5 m/s. Assim, a posição relativa dos furos, aquando da concepção, foi irrelevante. Na mesma, optou-se por fazer um furo central e 3 furos equidistantes do centro.

Estas adaptações foram concebidas e realizadas considerando o material disponível no laboratório, os equipamentos de medição existentes e o tempo requerido para a montagem dos componentes e equipamentos. A figura 3.7 ilustra a montagem final usada na realização das soldaduras.



Figura 3.7 – Campânula dos ensaios de TFF com as adaptações necessárias

### 3.4.2 Procedimento do ensaio

Foi elaborado o seguinte procedimento tendo em conta as recomendações da norma ANSI/AWS F1.2-92 para um método laboratorial de medição da taxa de formação de fumos e emissão de gases em soldadura e processos similares. Este procedimento foi adaptado para as condições laboratoriais e equipamentos existentes no LPT/LCM – DEMI – FCT – UNL.

1. Ter prontos os equipamentos: câmara de soldadura, máquina de soldadura (parâmetros eléctricos e débitos de gás), material base (desengordurado e sem interferências na câmara), filtros, forno, balança, pinça, caixas para filtros, folha de dados Excel
2. Iniciar o ensaio por cortar os filtros à medida da matriz de acrílico (diam. 37 mm)
3. De seguida ligar o forno eléctrico a 100 °C
4. Utilizando a pinça colocar os filtros no forno na base apropriada e esperar cerca de 1h
5. Após este tempo, colocar os filtros na caixa e desligar o forno
6. Fazer o zero da balança
7. Utilizando a pinça colocar os filtros na balança
8. Registar na folha de registo
9. Utilizando a pinça, cuidadosamente colocar os filtros na matriz de acrílico do lado da mangueira extractora (aderência por efeito de Venturi)
10. Imediatamente depois ligar a extracção de gases
11. Fixar as 2 matrizes com os parafusos
12. Ajustar a posição da tocha em relação à chapa, fechar a janela, verificar o isolamento da câmara e colocar o vidro protector de radiação
13. Verificar os parâmetros eléctricos e a velocidade de rotação da mesa
14. Preparar o cronómetro e iniciar a soldadura
15. Soldar durante 30 segundos e interromper o processo após este período
16. Esperar mais 30 minutos com a bomba extractora ligada
17. Após este tempo desligar a bomba e desapertar as matrizes
18. Com cuidado colocar os filtros já com a amostra dentro da caixa e fechar
19. Pesar os filtros de imediato
20. Registar na folha de registo
21. Caso se repitam ensaios voltar ao ponto 1, caso se terminem os ensaios desligar bomba extractora, máquina de soldadura, mesa rotativa e fechar o manoreductor do gás

### **3.5 Medição da área superficial das nanopartículas**

Neste estudo pretende-se correlacionar a emissão de macropartículas com a emissão de nanopartículas para uma condição de soldadura pré estabelecida. Contudo, as macropartículas podem ser analisadas por ensaios gravimétricos visto terem massa mensurável, o que não acontece com as nanopartículas que por serem muito pequenas não conseguem ser atraídas pelo campo gravítico.

Assim, para avaliar as emissões de nanopartículas, usou-se um outro parâmetro que caracteriza as partículas: a sua área superficial, que é habitualmente utilizado em estudos deste tipo, uma vez que a elevada área superficial das nanopartículas torna-as especialmente perigosas por terem elevada capacidade de deposição nas zonas mais profundas do pulmão humano.

### 3.5.1 Equipamento utilizado

O equipamento utilizado na avaliação da exposição de nanopartículas foi um monitor de área superficial de nanopartículas – NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor), Modelo 3550 do fabricante TSI. Este equipamento mede a área superficial de nanopartículas depositadas no pulmão humano, expressa em micrómetros quadrados por centímetro cúbico ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ) de ar. Permite fazer esta medição em duas zonas diferentes do aparelho respiratório, na região traqueobrônquial (TB), ou alveolar (a) [16]. O equipamento está ilustrado na figura seguinte.



Figura 3.8 – NSAM, modelo 3550 do fabricante TSI

O equipamento utiliza o fenómeno de difusão de cargas electrostáticas nas partículas da amostra de ar que está a ser recolhida, fazendo-se depois uma detecção das partículas carregadas através de um electrómetro.

Com o auxílio de uma bomba, uma amostra das partículas é arrastada para o equipamento através de um ciclone que retém as partículas com dimensões superiores a  $1\mu\text{m}$ . Após esta fase o fluxo é dividido em dois, um dos fluxos com um caudal de 1 l/min que passa por um filtro de carbono, um filtro HEPA e por um ionizador, que numa câmara de mistura vai introduzir iões positivos nas partículas presentes no fluxo de ar. O restante fluxo, com um caudal de 1,5 l/min, passa directamente para a câmara de mistura, onde se mistura com o fluxo ionizado, e o fluxo de partículas é carregado por difusão. Através de um sistema de aprisionamento de iões, os iões em excesso presentes no fluxo são removidos. Por fim, o fluxo de partículas carregadas move-se para o electrómetro onde vai ser medida a carga, através de um amplificador muito sensível [4].

A carga medida pelo electrómetro é directamente proporcional à área de superfície das partículas que passam pelo electrómetro. Assim que é feito o processamento da informação, são obtidos os valores apresentados em área de superfície por volume de pulmão. Os valores são depois tratados por computador, através de um *software* fornecido pela TSI [16]. A tensão do

sistema de aprisionamento de iões pode ser alterada, para o modo traqueobrônquial ou para o modo alveolar [16].

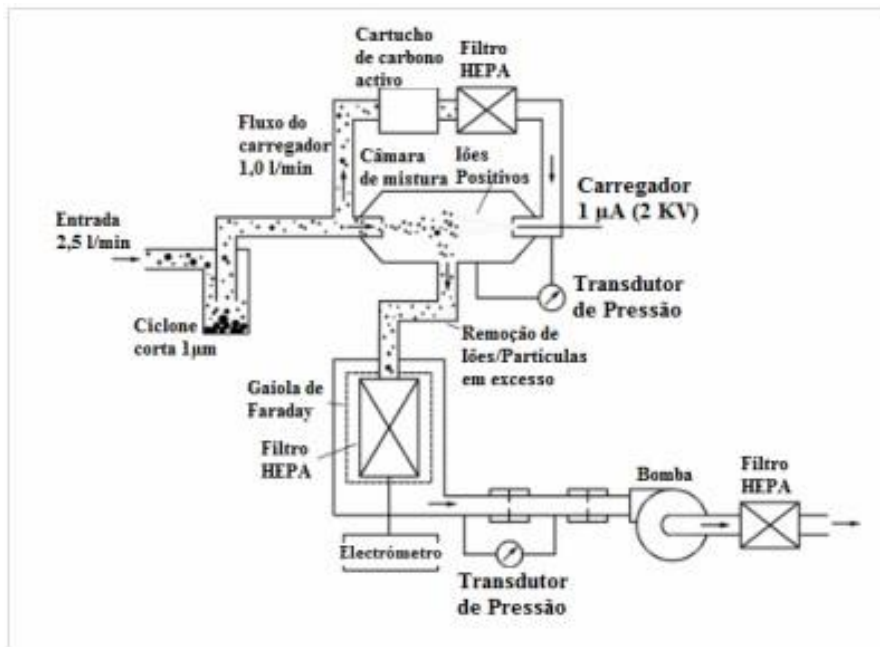


Figura 3.9 – Esquema de funcionamento do NSAM [22]

Durante os ensaios de medição da área superficial das nanopartículas, utilizaram-se os mesmos parâmetros operatórios que foram utilizados nos ensaios da Taxa de Formação de Fumos. Para além disto realizaram-se os ensaios das nanopartículas também com o auxílio da mesa rotativa da ESAB e com a fixação da tocha MIG/MAG. Isto permitiu manter as mesmas condições em todos os ensaios deste estudo.

A guia para a sonda do NSAM foi colocada em cima da mesa de suporte construída do LPT e a sua posição manteve-se fixa em todos os ensaios. O ponto de recolha encontrava-se a 100 mm da frente de soldadura (medida no plano da mesa) e a cerca de 270 mm de altura.

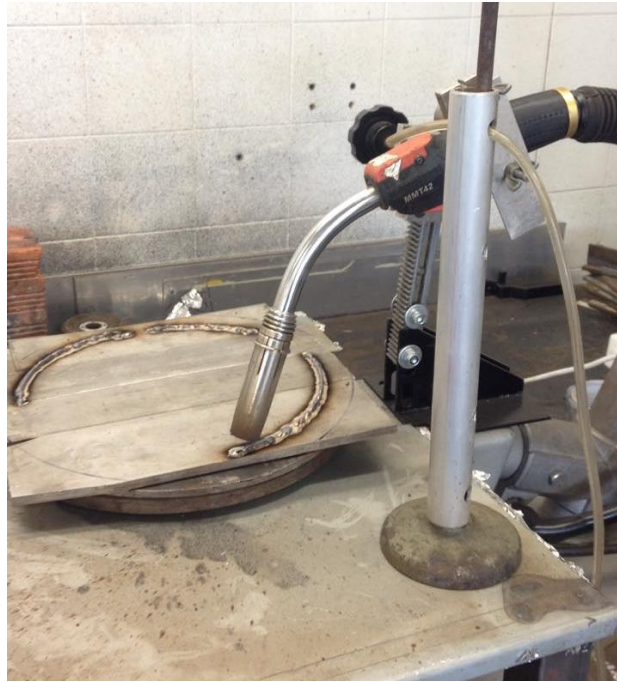


Figura 3.10 – Montagem do ensaio de determinação de nanopartículas



Figura 3.11 – suporte da sonda do NSAM

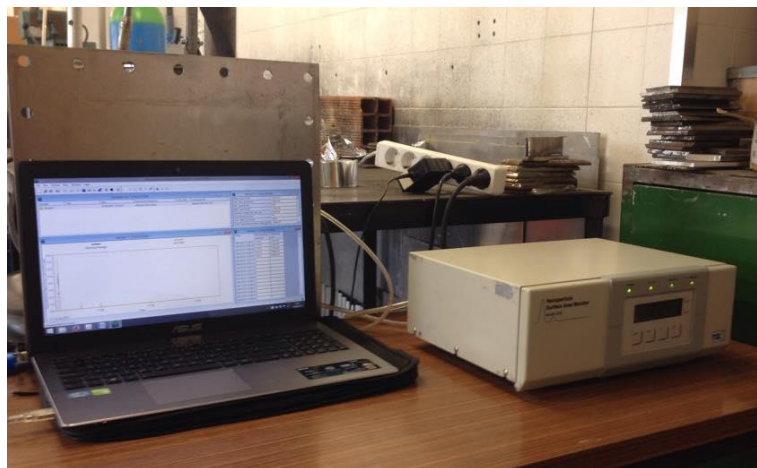


Figura 3.12 – NSAM e aquisição de dados

Os parâmetros de aquisição do equipamento foram regulados para que se avaliasse a capacidade das nanopartículas se depositarem na região alveolar (a), bem como, para que a aquisição se desse em intervalos de 10 seg. Após cada ensaio esperou-se um tempo suficiente para que a concentração de nanopartículas no ar ambiente retomasse a linha de base inicial, não influenciando os ensaios seguintes.

### 3.5.2 Procedimento do ensaio

O procedimento foi elaborado tendo em conta as recomendações de J.F.Gomes, et al., “Determination of airborne nanoparticles from welding operations”, Journal of Toxicology and Environmental Health, 2012, 75, 747-755. Este procedimento está adaptado para as condições laboratoriais e equipamentos existentes no LPT/LCM – DEMI – FCT – UNL.

1. Ter prontos os equipamentos: máquina de soldadura (parâmetros eléctricos e débitos de gás), NSAM – Nanoparticle Surface Area Monitor, computador com sistema de aquisição de dados, acessórios (tubos de sucção, suporte do tubo)
2. Ligar o NSAM e conectá-lo ao computador
3. Verificar se o sistema de aquisição de dados está pronto a iniciar
4. Ligar a máquina de soldadura e abrir o gás, ligar o sistema de extracção de fumos
5. Posicionar o suporte da sonda junto à frente de soldadura
6. Iniciar a recolha de dados para obter uma linha de base estável
7. Iniciar a soldadura (30 seg.)
8. Depois de interromper a soldadura deixa o equipamento retornar à linha de base
9. Se houver mais ensaios voltar ao item 1, caso se terminem os ensaios desligar a bomba extractora, máquina de soldadura, mesa rotativa, NSAM e fechar o manoredutor do gás

## 3.6 Conclusão

Neste capítulo descreveram-se os materiais e os procedimentos necessários à realização da experimentação, onde se recolheram dados referentes à Taxa de Formação de Fumos e à emissão de nanopartículas na soldadura MIG/MAG de aços INOX, para diferentes gases de protecção e diferentes parâmetros eléctricos.



## **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante a experimentação. Fez-se o cálculo das Taxas de Formação de Fumos e apresentam-se os resultados obtidos no NSAM. Durante o capítulo analisaram-se continuamente os resultados. Encontram-se abaixo discutidos os efeitos das diferentes entregas térmicas na emissão de fumos para cada protecção gasosa.

Como referido no capítulo anterior, variou-se a entrega térmica de modo a provocar diferentes modos de transferência. As entregas térmicas obtidas são tanto maiores quanto maiores os parâmetros eléctricos, assim, a transferência por *spray* corresponde a entregas térmicas maiores que a transferência por curto-circuito (para as mesmas velocidades de soldadura e independentemente do gás de protecção). O modo de transferência globular é mais difícil de obter pelo que não é referido.

A mistura 81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$  – Arcal 121 (designação comercial) gerou maiores entregas térmicas que as restantes protecções quer na transferência por curto-circuito, quer na transferência por *spray*. Esta mistura tem a particularidade de ter uma grande percentagem de He, assim, por ter baixa condutividade e por ter elevada energia de ionização, tem maior penetração e a tensão de arco a que o processo opera é maior (para as mesmas intensidades de corrente utilizadas noutros gases), daí a entrega térmica superior às outras protecções gasosas.

A menor entrega térmica ocorreu com a protecção de 100% Ar. Isto verificou-se pois este gás tem baixa energia de ionização e baixa condutividade térmica (em relação às restantes misturas).

A mistura Atal 5, constituída por 82% Ar + 18%  $CO_2$ , deveria ter um potencial de ionização e uma condutividade térmica parecida com a protecção de 100% Ar e assim as entregas térmicas também deveriam ser próximas. Contudo, pelo facto de o  $CO_2$  dificultar a transferência por *spray* (por oposição ao Ar), foi necessário aumentar os parâmetros eléctricos para atingir este modo de transferência. Mas em curto-circuito, apresentou uma entrega térmica bastante maior que a mistura 100% Ar.

### **4.2 Cálculo das Taxas de Formação de Fumos**

A Taxa de Formação de Fumos permite quantificar os fumos libertados durante o processo de soldadura. O ensaio é gravimétrico, portanto, baseia-se na pesagem dos filtros antes e depois do ensaio, podendo ser calculado por:

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} [mg/min]$$

Em que as variáveis são:

- $m_f$  é a massa final dos filtros, em mg
- $m_i$  é a massa inicial dos filtros, em mg
- $t$  é o tempo de soldadura, em minutos

Para cada gás de protecção fizeram-se 3 ensaios para cada modo de transferência. Isto permitiu perceber se a repetibilidade entre ensaios se verificava e permitiu estabelecer o quão grande foi o desvio padrão entre ensaios.

#### 4.2.1 Ensaio com o gás Árgon

Tabela 4.1 – Resultados da TFF para o gás Argon

Ensaio	Gás	T. soldadura (seg.)	T. extracção (min)	Vel. Fio (m/min)	mi (mg)	mf (mg)	Ganho (mg)	Média
1	100% Árgon	30	30	5	582,2	589,8	7,6	7,3
2					543,4	550,3	6,9	
3					551,1	558,6	7,5	
4				9	588,9	591,8	2,9	3,3
5					581,3	584,4	3,1	
6					591,9	595,7	3,8	

##### Transferência por curto-circuito

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{7,3}{0,5} = 14,6 [mg/min]$$

##### Transferência por spray

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{3,3}{0,5} = 6,6 [mg/min]$$

A TFF é baixa e é menor no início do *spray* e maior em curto-circuito, o que é facilmente explicado, não pelo elevado número de salpicos em curto-circuito e pela sua quase inexistência na transferência por *spray*, mas sim pela combinação dos seguintes efeitos: muito alta corrente durante o curto-circuito eléctrico, grande diâmetro da gota aquando do destacamento e maior altura e tempo de arco-eléctrico [20], como seria de esperar para este gás de protecção.

#### 4.2.2 Ensaio com a mistura gasosa 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub> – Atal 5

Tabela 4.2 - Resultados da TFF para a mistura Atal 5

Ensaio	Gás	T. soldadura (seg.)	T. extracção (min)	Vel. Fio (m/min)	m <sub>i</sub> (mg)	m <sub>f</sub> (mg)	Ganho (mg)	Média
1	Atal 5	30	30	5	581,3	594,0	12,7	12,9
2					605,5	618,4	12,9	
3					596,4	609,1	13	
4				9,3	581,9	604,5	22,6	24,2
5					575,6	600,1	24,5	
6					587,4	613,0	25,6	

#### Transferência por curto-circuito

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{12,9}{0,5} = 25,8 \text{ [mg/min]}$$

#### Transferência por *spray*

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{24,2}{0,5} = 48,4 \text{ [mg/min]}$$

A TFF obtida com esta mistura gasosa é a maior de todas. O Atal 5 tem uma elevada percentagem de CO<sub>2</sub> (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>) e devido a isto tem, para os mesmos parâmetros eléctricos, maior libertação de fumos. Contudo, apresentou um comportamento algo inesperado: na transferência por *spray*, a TFF foi maior do que na transferência por curto-circuito. Este resultado explica-se pelo facto de, mesmo durante a transferência por *spray*, aparecerem alguns salpicos de grande dimensão que se escaparam da coluna de arco, em conjunto com o ligeiro

aumento dos parâmetros eléctricos para a obtenção deste modo de transferência neste gás, devido a esses efeitos potenciou-se a libertação de uma maior quantidade de fumos (em oposição aos outros gases que na transferência por *spray* baixaram a TFF). Mesmo em transferência por *spray*, verificou-se haver alguma instabilidade do arco-eléctrico. Não obstante, a tendência de maiores TFF com protecção da mistura Atal 5 em relação às outras protecções gasosas manteve-se, como seria de esperar.

#### 4.2.3 Ensaio com a mistura gasosa 81% Ar + 18% He + 1% CO<sub>2</sub> - Arcal 121

Tabela 4.3 - Resultados da TFF para a mistura Arcal 121

Ensaio	Gás	T. soldadura (seg.)	T. extracção (min)	Vel. Fio (m/min)	mi (mg)	mf (mg)	Ganho (mg)	Média
1	Arcal 121	30	30	5	618,2	626,3	8,1	8,0
2					624,4	632,6	8,2	
3					605,6	613,4	7,8	
4				9	621,3	626,4	5,1	4,7
5					625,1	629,4	4,3	
6					617,8	622,5	4,7	

#### Transferência por curto-circuito

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{8,0}{0,5} = 16,0 \text{ [mg/min]}$$

#### Transferência por *spray*

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{4,7}{0,5} = 9,4 \text{ [mg/min]}$$

No ensaio com a mistura Arcal 121 (81% Ar + 18% He + 1% CO<sub>2</sub>) a TFF foi maior que com o gás Ar quer em curto-circuito, quer em *spray*. Apesar de a percentagem de CO<sub>2</sub> ser muito baixa, a presença do He tem influência na formação de fumos durante o processo. Uma maior percentagem de He, significa que a protecção gasosa tem uma energia de ionização maior e

consequentemente a tensão de arco a que o processo opera é também maior e o calor gerado no arco eléctrico aumenta. Devido a este fenómeno a libertação de fumos aumenta bastante em relação à soldadura com o gás Ar, não pelo efeito do  $CO_2$  mas pela presença do He.

4.2.4 Ensaio com a mistura gasosa 91% Ar + 5% He + 2%  $CO_2$  + 2%  $N_2$  - Arcal 129

Tabela 4.4 - Resultados da TFF para a mistura Arcal 129

Ensaio	Gás	T. soldadura (seg.)	T. extracção (min)	Vel. Fio (m/min)	$m_i$ (mg)	$m_f$ (mg)	Ganho (mg)	Média
1	Arcal 129	30	30	5	558,9	568,4	9,5	10
2					553,5	563,8	10,3	
3					555,4	565,6	10,2	
4				9	537,7	543,1	5,4	6
5					585,3	591,0	5,7	
6					585,9	592,8	6,9	

**Transferência por curto-circuito**

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{10}{0,5} = 20 \text{ [mg/min]}$$

**Transferência por spray**

$$TFF = \frac{m_f - m_i}{t} = \frac{6}{0,5} = 12 \text{ [mg/min]}$$

No ensaio com a mistura 91% Ar + 5% He + 2%  $CO_2$  + 2%  $N_2$  - Arcal 129, a TFF nos modos de transferência por curto-circuito e por *spray* é menor que na mistura Atal 5 (mais oxidante), mas é maior que no gás Ar e na mistura Arcal 121. Este resultado era pouco espectável já que a mistura 91% Ar + 5% He + 2%  $CO_2$  + 2%  $N_2$  tem muito Ar e relativamente pouca percentagem de  $CO_2$  e de He. No entanto, a presença de  $N_2$  também influi na TFF. O gás  $N_2$  é normalmente adicionado ao Ar para melhorar a estabilidade do arco-eléctrico, mas ao mesmo tempo, por ser uma molécula diatómica, antes do escorvamento do arco-eléctrico é necessário

uma tensão de arco adicional para dissociar a molécula de  $N_2$  para, só depois, ionizar o azoto monoatómico. Assim, devido ao facto de a tensão de arco ter de ser incrementada, o calor do arco aumenta, e consequentemente, aumenta também a quantidade de fumos produzida durante o processo de soldadura.

A tabela 4.5 resume os cálculos anteriores.

Tabela 4.5 – TFF em cada ensaio

TFF [ $mg/min$ ]	T. Curto-circuito	T. <i>Spray</i>
Árgon	14,6	6,6
81% Ar + 18% He + 1% $CO_2$ - Arcal 121	16,0	9,4
91% Ar + 5% He + 2% $CO_2$ + 2% $N_2$ - Arcal 129	20,0	12,0
82% Ar + 18% $CO_2$ – Atal 5	25,8	48,4

#### 4.2.5 Discussão dos valores das taxas de formação de fumos

Os valores obtidos de TFF para os diferentes gases foram analisados. Os resultados foram espectáveis. Como se observa nas tabelas anteriores, os ensaios para cada gás e modo de transferência foram repetidos três vezes, verificando-se que o desvio padrão em relação ao valor médio é relativamente baixo, garantindo assim a repetibilidade e confiança nos resultados obtidos. Verificou-se que:

- As maiores taxas de formação de fumos foram obtidas com a mistura 82% Ar + 18%  $CO_2$  – Atal 5
- A menor taxa de formação de fumos ocorreu para a protecção 100% Ar
- O início do modo de transferência por *spray* gera menores taxas de formação de fumos do que a transferência por curto-circuito, com a excepção da mistura 82% Ar + 18%  $CO_2$  – Atal 5 pelos motivos já enumerados

- As taxas de formação de fumo cresceram sempre com o aumento da percentagem de  $CO_2$  na mistura
- Na gama de parâmetros estudada, instabilidade do arco e as características do modo de transferência têm maior influência na emissão de fumos do que os parâmetros eléctricos *per si*.

### 4.3 Resultados da monitorização das nanopartículas

Os resultados obtidos durante as medições com o NSAM, para cada uma das misturas gasosas utilizadas nos ensaios, estão representados graficamente. Para cada mistura gasosa utilizada, englobam-se no mesmo gráfico, os modos de transferência estudados durante o procedimento, para que haja uma melhor visualização da sua influência nos valores medidos. Com os valores obtidos, traçaram-se gráficos da área superficial das partículas por unidade de volume pulmonar em função do tempo decorrido.

#### 4.3.1 Ensaio com o gás Árgon

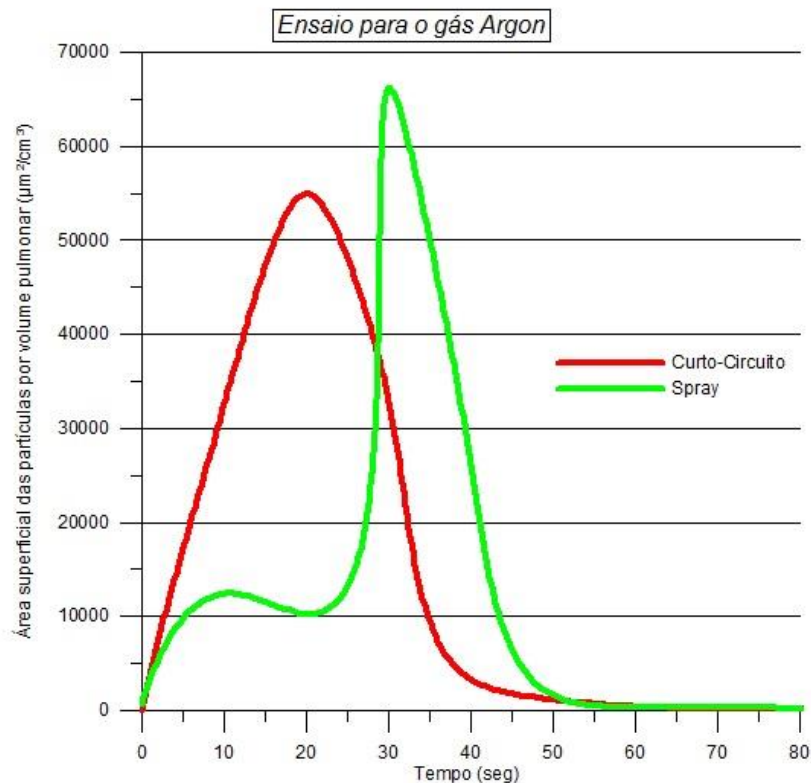


Figura 4.1 – Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para o gás Argon

Optou-se em primeiro lugar pela escolha deste gás por se pretender ter valores de referência que possam servir de comparação a todos os outros ensaios. Esta premissa é válida quer para os ensaios de concentração de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar, quer para os ensaios da taxa de formação de fumos. Assim, nos dois tipos de ensaios realizados, a protecção gasosa primeiramente usada foi 100% Ar.

No gráfico da página anterior, onde se apresentam os resultados do ensaio de concentração de nanopartículas, representam-se as variáveis área superficial de nanopartículas por volume pulmonar (eixo das ordenadas) em função do tempo (eixo das abcissas). Os resultados obtidos neste ensaio mostram que, durante a transferência por *spray*, a área superficial de nanopartículas por volume pulmonar com capacidade de deposição alveolar é superior à transferência por curto-circuito. O pico de concentrações ocorreu a  $54\,971\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  durante a transferência por curto-circuito e a  $66\,183\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  durante a transferência por *spray*. A diferença entre os picos de concentrações é baixa, cerca de  $11\,000\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ . O perfil da concentração de partículas durante a transferência por *spray* foi um pouco irregular enquanto em curto-circuito foi mais uniforme.

#### 4.3.2 Ensaio com a mistura gasosa 82% Ar + 18% $\text{CO}_2$ – Atal 5

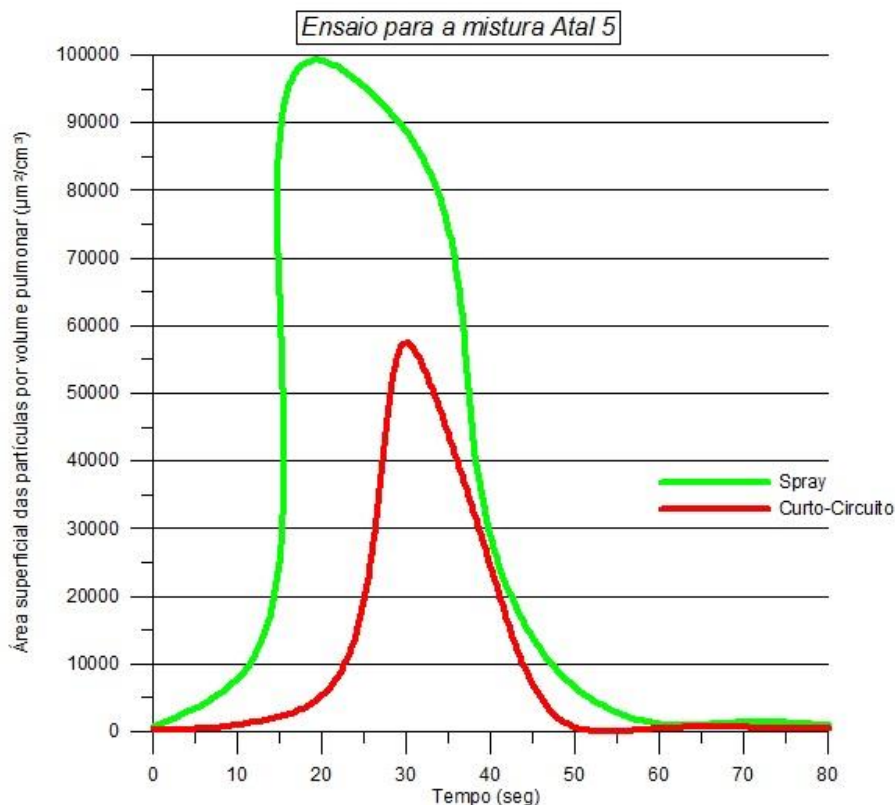


Figura 4.2 - Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para a mistura Atal 5

Os resultados obtidos nestes ensaios mostram que, durante a transferência por *spray*, a área superficial de nanopartículas por volume pulmonar com capacidade de deposição alveolar é muito superior à transferência por curto-circuito. O pico de concentrações ocorreu a  $57\,478\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  durante a transferência por curto-circuito e a  $99\,140\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  durante a transferência por *spray*. O pico de concentrações durante a transferência por *spray* correspondeu à saturação do analisador. A diferença entre os picos de concentrações é muito elevada, cerca de  $41\,500\ \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ . O perfil da concentração de partículas foi uniforme nos dois modos de transferência, contudo, durante a transferência por *spray* o aumento de concentração de partículas foi muito acentuado e ocorreu cerca de 10 segundos antes do pico obtido no modo de transferência por curto-circuito.

Com a protecção gasosa 82% Ar + 18%  $\text{CO}_2$  – Atal 5, era espectável que o fenómeno de emissão de nanopartículas fosse mais pernicioso. As entregas térmicas nos dois modos de transferência foram bastante elevadas, pelos motivos anteriormente descritos. Para além disto, a taxa de formação de fumos com esta mistura gasosa, também nos dois modos de transferência, foi muito maior que nas restantes misturas estudadas.

Geralmente, as misturas gasosas aquando de adições de elementos oxidantes geram maior penetração e melhores molhagens. Para além deste efeito, as adições de elementos oxidantes induzem a formação de óxidos na ponta do eléctrodo e sobre o banho em fusão que baixam a tensão superficial (em sinergia com a promoção de reacções de oxi-redução exotérmicas, que aumentam a temperatura e também baixam a tensão superficial) e melhoram a estabilidade do arco eléctrico. Em particular a estabilidade do arco-eléctrico deveria ter um efeito positivo nas emissões de gases. Contudo, a presença de  $\text{CO}_2$  faz aumentar grandemente a corrente de transição entre os modos de transferência globular e por *spray*, daí a necessidade de ter de aumentar os parâmetros eléctricos para a obtenção da transferência por *spray*. Isto explica o facto de apesar de o Atal 5 não gerar a maior entrega térmica é a mistura gasosa que gera maiores taxas de formação de fumos e maiores áreas superficiais de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.

#### 4.3.3 Ensaio com a mistura gasosa 81% Ar + 18% He + 1% CO<sub>2</sub> - Arcal 121

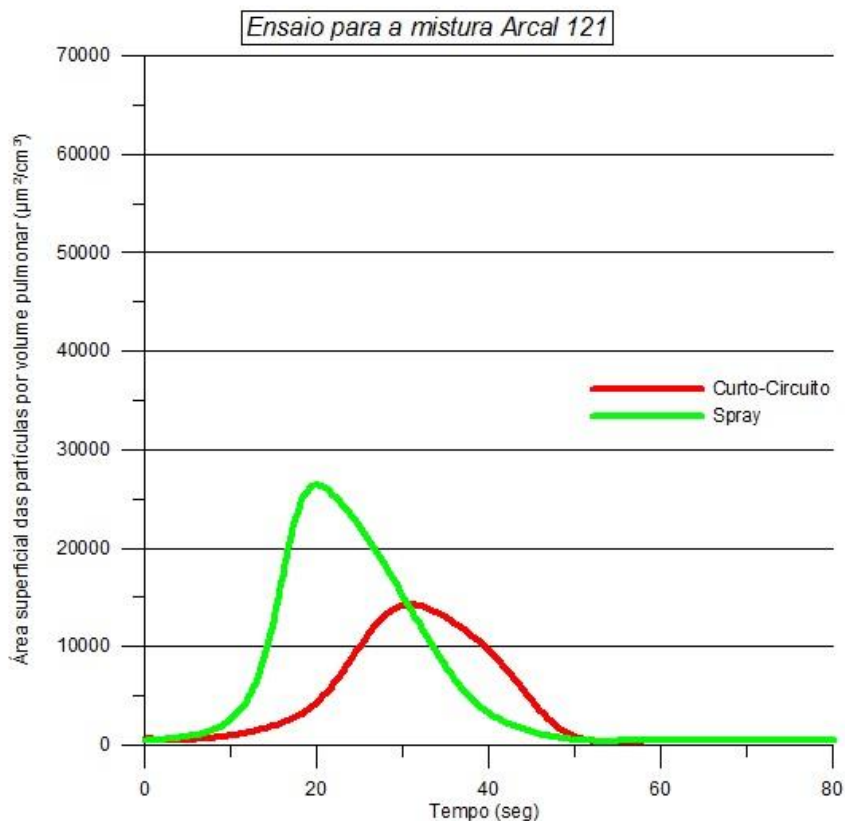


Figura 4.3 - Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para a mistura Arcal 121

Os resultados obtidos neste ensaio mostram que, durante a transferência por *spray*, a área superficial de nanopartículas por volume pulmonar com capacidade de deposição alveolar é superior à transferência por curto-circuito. O pico de concentrações ocorreu a 14 169 µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> durante a transferência por curto-circuito e a 26 389 µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> durante a transferência por *spray*. A diferença entre os picos de concentrações é baixa, cerca de 12 200 µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>. O perfil da concentração de partículas foi uniforme nos dois modos de transferência, contudo, durante a transferência por *spray* o aumento da concentração de partículas foi mais acentuado e ocorreu cerca de 10 segundos antes do pico obtido no modo de transferência por curto-circuito, tal como na mistura Atal 5.

Os resultados obtidos nos ensaios para esta protecção gasosa foram muito inesperados. A mistura 81% Ar + 18% He + 1% CO<sub>2</sub> - Arcal 121 tem uma elevada percentagem de He, significa que a protecção gasosa tem uma energia de ionização maior e consequentemente a tensão de arco a que o processo opera é maior e o calor gerado no arco eléctrico também aumenta em relação às outras misturas. Para além disto, esta mistura foi a que apresentou maiores entregas térmicas nos dois modos de transferência. Todos estes factores fariam prever que neste ensaio, a concentração de nanopartículas fosse muito mais elevada do que os valores obtidos e mais elevadas do que nos outros gases, principalmente pelas propriedades físicas do gás He.

#### 4.3.4 Ensaio com a mistura gasosa 91% Ar + 5% He + 2% CO<sub>2</sub> + 2% N<sub>2</sub> - Arcal 129

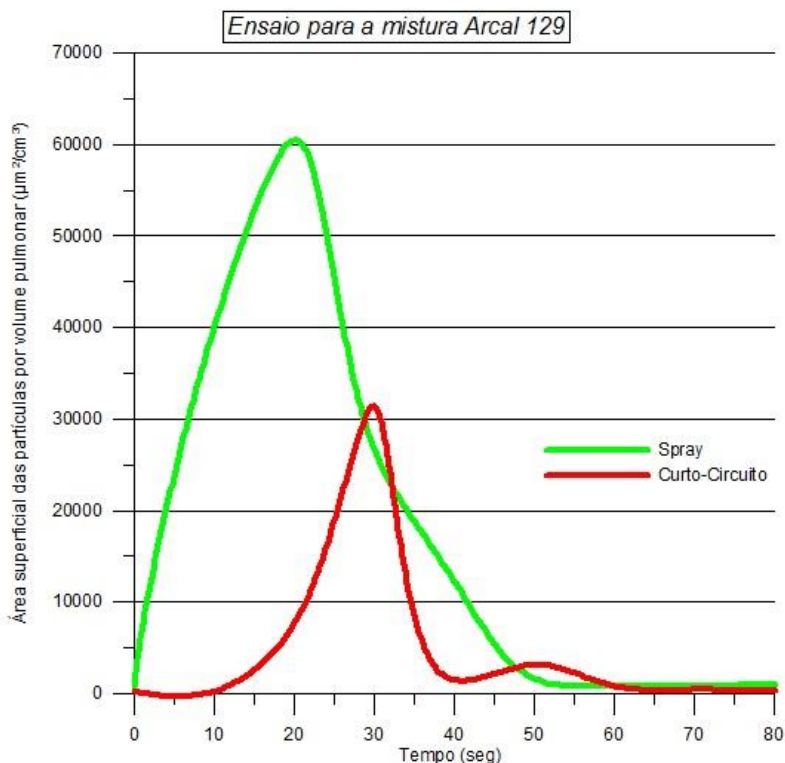


Figura 4.4 - Ensaio da área superficial de nanopartículas por volume pulmonar para a mistura Arcal 129

Os resultados obtidos neste ensaio mostram que, durante a transferência por *spray*, a área superficial de nanopartículas por volume pulmonar com capacidade de deposição alveolar é superior à observada na transferência por curto-circuito. O pico de concentração ocorreu a 31 405  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  durante a transferência por curto-circuito e a 60 492  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  durante a transferência por *spray*. A diferença entre os picos de concentrações é baixa, cerca de 29 100  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ . O perfil da concentração de partículas foi uniforme nos dois modos de transferência, contudo, durante a transferência por *spray* o aumento de concentração de partículas foi mais acentuado e ocorreu cerca de 10 segundos antes do pico obtido no modo de transferência por curto-circuito, tal como na mistura Atal 5 e Arcal 121. A mistura Arcal 129 (91% Ar + 5% He + 2% CO<sub>2</sub> + 2% N<sub>2</sub>) apresentou valores de concentração de nanopartículas numa gama entre as misturas Arcal 121 e Atal 5, tal como ocorreu nos ensaios da taxa de formação de fumos e tal como ocorreu nas entregas térmicas calculadas. No entanto, ao analisar as misturas Arcal 121, Arcal 129 e Atal 5, verificou-se que apesar da menor entrega térmica obtida com o gás Atal 5, é a mistura que apresenta as maiores TFF e concentrações de nanopartículas. Por outro lado, o Arcal 121 tem a maior entrega térmica e os menores valores de TFF e de concentração de nanopartículas. A mistura Arcal 129 apresenta resultados intermédios.

A tabela 4.6 resume os cálculos anteriores.

Tabela 4.6 – Picos de concentração de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ] em cada ensaio

Picos de concentração de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ]	T. Curto-circuito	T. Spray
Árgon	54 971	66 183
81% Ar + 18% He + 1% $\text{CO}_2$ - Arcal 121	14 169	26 389
91% Ar + 5% He + 2% $\text{CO}_2$ + 2% $\text{N}_2$ - Arcal 129	31 405	60 492
82% Ar + 18% $\text{CO}_2$ – Atal 5	57 478	99 140

#### 4.3.5 Discussão dos resultados da monitorização de nanopartículas

Os valores obtidos de concentração de nanopartículas para as diferentes misturas gasosas foram analisados. Nem todos os resultados foram espectáveis. Ao contrário do que se verificou com os ensaios gravimétricos da taxa de formação de fumos, onde o procedimento experimental foi muito bem afinado e onde foi clara a repetibilidade dos resultados, nos ensaios das nanopartículas isso não aconteceu. Mesmo garantindo que todas as condições experimentais se mantinham de ensaio para ensaio a repetibilidade não foi muito clara. As amostras utilizadas nos gráficos foram as mais representativas e usadas para análise.

Verificou-se que:

- Os maiores picos de concentração de nanopartículas foram obtidos com a mistura 82% Ar + 18%  $\text{CO}_2$  – Atal 5
- A menor concentração de nanopartículas ocorreu para a protecção 81% Ar + 18% He + 1%  $\text{CO}_2$  - Arcal 121, este resultado foi inesperado
- A concentração de nanopartículas cresceu sempre com o aumento dos parâmetros eléctricos

#### 4.4 Correlação entre macro e nanopartículas

A tabela seguinte resume os resultados obtidos nos ensaios da taxa de formação de fumos e da monitorização de nanopartículas.

Tabela 4.7 – Correlação entre macro e nanopartículas

Correlação entre macro e nanopartículas		Transferência por Curto-circuito	Transferência por Spray
Árgon	TFF [mg/min]	14,6	6,6
	Pico de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ]	54 971	66 183
81% Ar + 18% He + 1% $\text{CO}_2$ - Arcal 121	TFF [mg/min]	16,0	9,4
	Pico de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ]	14 169	26 389
91% Ar + 5% He + 2% $\text{CO}_2$ + 2% $\text{N}_2$ - Arcal 129	TFF [mg/min]	20,0	12,0
	Pico de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ]	31 405	60 492
82% Ar + 18% $\text{CO}_2$ – Atal 5	TFF [mg/min]	25,8	48,4
	Pico de nanopartículas [ $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ]	57 478	99 140

Atendendo aos resultados obtidos, verificou-se que quer a emissão de macropartículas, quer a emissão de nanopartículas, ambas aumentam com o aumento dos parâmetros eléctricos de soldadura.

Na transferência por curto-circuito verificou-se que a TFF é maior do que na transferência por *spray*, o que está de acordo com o esperado, como anteriormente descrito. A excepção ocorreu para a mistura Atal 5, tendo o oposto ocorrido com a emissão de nanopartículas, onde na transferência por *spray* a quantidade de partículas foi maior. Este resultado sugere que, na gama de parâmetros estudada, no fenómeno de emissão de nanopartículas a intensidade de corrente tem maior influência. Na emissão de macropartículas existem outros factores com maior preponderância como a estabilidade do arco eléctrico e as

características da transferência por curto-circuito, que são a muito alta corrente durante o curto-circuito eléctrico, o grande diâmetro da gota aquando do destacamento e maior altura e tempo de arco-eléctrico.

Quanto maiores os parâmetros eléctricos de soldadura, maiores as emissões de macro e nanopartículas. Contudo, a composição química do gás de protecção também é relevante, nomeadamente a percentagem de elementos activos. O  $CO_2$  aumenta a corrente de transição entre a transferência globular-*spray* o que dificulta a transferência por *spray*. Por outro lado, aumenta a temperatura do banho em fusão por promover reacções químicas exotérmicas de oxidação-redução.

No modo de transferência por *spray* formam-se sempre mais nanopartículas do que em curto-circuito, devido ao aumento dos parâmetros eléctricos, independentemente do gás de protecção.

As protecções Arcal 121 e Arcal 129 são as que permitem obter menores concentrações de nanopartículas independentemente do modo de transferência.

Quanto menos oxidante for a mistura menor a quantidade de nanopartículas emitidas, bem como de fumos formados. Este resultado é muito útil pois, em ambientes confinados, este efeito é muito perigoso senão existirem sistemas de extracção de fumos devidamente capazes de o fazer. Assim, torna-se menos adequada a utilização de misturas gasosas altamente oxidantes, como por exemplo o  $CO_2$  ou misturas com elevada percentagem de  $CO_2$ , em soldaduras em locais confinados. A protecção gasosa Atal 5 não deverá ser usada em espaços confinados e/ou pouco arejados. Deverá optar-se por uma solução em que seja usada uma protecção que gere menor quantidade de fumos (macro e nanopartículas) como 100% Árgon ou a mistura Arcal 121.

A mistura quaternária Arcal 129 emitiu mais nanopartículas que a mistura Arcal 121 devido à percentagem de  $N_2$ , que, sendo uma molécula diatómica requer uma maior energia para a dissociação da molécula e conseqüentemente para a ionização do N monoatómico, bem como, o incremento de 1% de  $CO_2$ , e os efeitos daí subsequentes, em relação ao Arcal 121.

Os gases de protecção He e  $CO_2$  contribuem no mesmo sentido para o aumento das emissões de nanopartículas e de fumos formados, mas fazem-no por mecanismos distintos. O He tem elevada energia de ionização e por isso opera a tensões de arco maiores, que geram maiores temperaturas no arco e no banho, resultando em maior quantidade de elementos volatilizados. O  $CO_2$  actua no aumento das emissões por aumentar a corrente de transição globular-*spray*, obrigando a um aumento dos parâmetros para obtenção da transferência por *spray*, e pela sua natureza activa, promove reacções exotérmicas de oxidação-redução entre o gás e o metal liquido que também fazem aumentar a temperatura do banho em fusão e propiciam uma maior emissão de partículas.

Uma vez no corpo, os nano-objectos podem deslocar-se para órgãos ou tecidos distantes da zona de entrada. São biopersistentes e biocumulativos no organismo, em particular em órgãos como os pulmões, o cérebro e o fígado. Por isso, é muito importante especificarem-se os procedimentos de soldadura para que a emissão de nanopartículas seja minimizada. Actuando

nos parâmetros eléctricos, deve optar-se sempre pela sua redução, já que conduzem a arcos mais frios e a menor volatilização de elementos e emissões de nanopartículas. Dos gases de protecção estudados dever-se-ia optar pelo Arcal 121 em transferência por curto-circuito.

Existem alguns problemas de saúde agudos que estão relacionados com a exposição de curta duração a macropartículas, nomeadamente nas zonas da faringe, laringe e traqueia. Nestas situações, deve-se optar por aumentar a entrega térmica até atingir a transferência por *spray*, utilizando protecções fracamente oxidantes. Dos gases de protecção estudados dever-se-ia optar pelo gás 100% Árgon em transferência por *spray* (início do *spray*, fig. 2.7).

No entanto, nas diversas aplicações de soldadura e nos diferentes materiais metálicos utilizados na indústria, nem sempre é possível variar a entrega térmica com o objectivo de minimizar a emissão de fumos, sob pena de comprometer as propriedades da ligação. Por isso, a solução mais eficiente e segura passa pela implementação de sistemas de extracção de fumos na fonte, quer sistemas de extractores de grandes dimensões utilizados em naves industriais para regeneração do ar, quer sistemas individuais instalados nos diversos postos de soldadura ou integrados directamente nas tochas de soldadura.



## 5 . CONCLUSÕES

Deste estudo retiram-se as seguintes conclusões:

- A transferência por *spray* gera entregas térmicas maiores que a transferência por curto-circuito (independentemente do gás de protecção).
- Nos dois modos de transferência, a maior entrega térmica ocorreu sempre para a mistura 81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$  - Arcal 121. Esta mistura tem uma grande percentagem de He, assim, por ter baixa condutividade térmica e por ter elevada energia de ionização, tem maior penetração e a tensão de arco a que o processo opera é maior. Logo, maiores temperaturas do arco-eléctrico e maior volatilização de elementos.
- A menor entrega térmica ocorreu para a protecção de 100% Ar. Este gás tem baixa energia de ionização e baixa condutividade térmica (em relação às restantes misturas), o escorvamento é fácil (baixa tensão de arco) e assim a entrega térmica foi menor.
- A menor TFF ocorreu para a protecção 100% Ar.
- A TFF é menor no início do *spray* e maior em curto-circuito, em todas as misturas gasosas. A excepção com a mistura 82% Ar + 18%  $CO_2$  – Atal 5 ocorreu devido ao aparecimento de alguns salpicos de grande dimensão durante o *spray* que se escaparam da coluna de arco, em conjunto com o ligeiro aumento dos parâmetros eléctricos, potenciaram a libertação de uma maior quantidade de fumos.
- No ensaio com a mistura Arcal 121 (81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$ ) a TFF foi maior que com o gás Ar quer em curto-circuito, quer em *spray*. Apesar de a percentagem de  $CO_2$  ser muito baixa, a presença do He tem influência na formação de fumos durante o processo.
- Com a mistura 91% Ar + 5% He + 2%  $CO_2$  + 2%  $N_2$  - Arcal 129, a TFF nos modos de transferência por curto-circuito e por *spray* é menor que a mistura Atal 5 (mais oxidante), mas é maior que o gás Ar e que a mistura 81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$  - Arcal 121. Este resultado era pouco espectável já que a mistura tem muito Ar e relativamente pouca percentagem de  $CO_2$  e de He. Contudo, o facto de o azoto ser uma molécula diatómica pode explicar este resultado.

- Os valores obtidos de TFF para os diferentes gases foram analisados. A maior parte dos resultados foram espectáveis. Os resultados tiveram alta repetibilidade.
- O modo de transferência por *spray* apresenta sempre valores superiores de área de superfície das partículas por volume pulmonar, ao contrário da TFF.
- No modo de transferência por curto-circuito os valores da intensidade de corrente e da tensão são baixos, conduzindo a menores entregas térmicas e a menor volatilização de elementos, apresentando por isso menores áreas superficiais de nanopartículas por volume pulmonar.
- Os picos de concentrações das áreas superficiais das nanopartículas na transferência por *spray* ocorrem mais cedo do que na transferência por curto-circuito, na utilização de misturas gasosas. Com a protecção 100% Ar ocorreu o oposto.
- Nas misturas 82% Ar + 18%  $CO_2$  – Atal 5 e 91% Ar + 5% He + 2%  $CO_2$  + 2%  $N_2$  - Arcal 129, a diferença entre os picos de concentrações de nanopartículas, da transferência por curto-circuito para a transferência por *spray*, é muito grande. Nas protecções 100% Ar e 81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$  - Arcal 121 a diferença entre picos é pequena. Este resultado sugere que em misturas mais oxidantes, um aumento dos parâmetros gera um aumento de emissões de nanopartículas maior do que em misturas menos oxidantes.
- A presença de  $CO_2$  faz aumentar grandemente a corrente de transição entre os modos de transferência de globular e *spray*, bem como aumentar a temperatura do banho devido a reacções de oxi-redução exotérmicas, apesar de aumentar a estabilidade do arco-eléctrico. Isto explica o facto de apesar de o 82% Ar + 18%  $CO_2$  – Atal 5 não gerar a maior entrega térmica é a mistura gasosa que gera maiores taxas de formação de fumos e maiores áreas superficiais de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar por volume pulmonar.
- A mistura Arcal 121 (81% Ar + 18% He + 1%  $CO_2$ ) tem uma elevada percentagem de He e o calor gerado no arco eléctrico também aumenta em relação às outras misturas. Para além disto, esta mistura foi a que gerou maiores entregas térmicas em ambos os modos de transferência. Todos estes factores fariam prever que a concentração de nanopartículas fosse muito maior que a obtida.

- As variáveis em causa: intensidade de corrente, tensão do arco, tipo de protecção e suas características, materiais de base e de adição, velocidade de soldadura, entregas térmicas, modos de transferência, instabilidade do arco, entre outros. Todos afectam ambos os processos de diferentes maneiras.
- A extracção na fonte e a regeneração do ar ambiente são a solução mais segura e eficiente de controlo das emissões de macro e nanopartículas em soldadura.

Em futuros trabalhos sobre este tema, seria interessante fazer um estudo mais detalhado sobre os efeitos da alteração do diâmetro do fio eléctrodo na emissão de partículas. A medição da temperatura do arco eléctrico também seria muito pertinente para avaliar a influência da temperatura *per si* na emissão de macro ou nanopartículas.



## **6. BIBLIOGRAFIA**

1. S.Escala, M.Nooij, L.Quintino . Economically welding in a healthy way. 1st IIW South-East European Welding Congress : s.n., 2006.
2. I. Pires, L. Quintino, R. M. Miranda, J. F. P. Gomes. Fume emissions during gas metal arc welding. July–Sept. 2006, Toxicological & Environmental Chemistry, pp. 88(3): 385–394.
3. Matthew Gonser and Theodore Hogan (2011). Arc Welding Health Effects, Fume Formation Mechanisms, and Characterization Methods, Arc Welding, Prof. Wladislav Sudnik (Ed.), ISBN: 978-953-307-642-3, InTech.
4. J.F.Gomes, et al, "Determination of airborne nanoparticles from welding operations", Journal of Toxicology and Environmental Health, 2012, 75, 747-755.
5. Física do Arco Eléctrico. ISQ, ed. 2015.
6. W. Spragen e B.A. Lengyel, "Physics of the arc and the transfer of metal in arc welding" - Welding Journal, Vol 22, 1943.
7. Inkelburg - Handbuch der Physik Vol 22, 1956.
8. P.J.Modenesi. Introdução à física do arco eléctrico e sua aplicação na soldagem dos metais. 2007.
9. Miller, "Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)", Disponível em [http://www.millerwelds.com/pdf/mig\\_handbook.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf), Acedido a 08 de Junho de 2012.
10. J. F. O. Santos and L. Quintino, Processos de Soldadura: ISQ, 1999.
11. Linden, G. & Surakka, J., "A Headset-Mounted Mini Sampler for Measuring Exposure to Welding Aerosol in the Breathing Zone" , Annals of Occupational Hygiene, 2009, Vol.53, No.2, pp. 99-106.
12. Palmer, K.T.; Cullinan, P., Rice, S., Brown, T. & Coggon, D., "Mortality from infectious pneumonia in metal workers: a comparison with deaths from asthma in occupations exposed to respiratory sensitisers.", Thorax, 2009, Vol.64. No.11. pp. 983-6.

13. Kelleher, P.; Pacheco, K. & Newman, LS., "Inorganic Dust Pneumonias: The Metal-Related Parenchymal Disorders.", *Environ Health Perspect.* 2000;108 Suppl 4:685-96.
14. Gray, C.N., Hewitt, P.J., Dare, P.R.M., "New approach would help control weld fumes at source Part two: MIG Fumes.", *Welding and Metal Fabrication*, 1982,10, 393-397.
15. L.Matos, P.Santos and F.Barbosa, "As nanopartículas em ambientes ocupacionais", *Revista Segurança*; 2012, Vol.202, pp.10-14.
16. Bento, Miguel de Abreu. Avaliação de emissões de nanopartículas resultantes do processo de soldadura MAG; Dissertação de Mestrado; FCT-UNL. 2013.
17. J. F. P. Gomes; Nanopartículas no ar ambiente e em atmosferas de trabalho: Abordagem toxicológica; Apresentação de J. F. P. Gomes; Forum ISEL; Maio de 2014.
18. American Welding Society. ANSI/AWS F1.2. Laboratory method for measuring fume generation rates and total fume emission of welding and allied processes. Miami, Florida; 1992.
19. E. A. C. Souza, "Consumíveis de soldagem," ed: Lincoln Electric Brasil.
20. Valter Alves de Meneses, João Fernando Pereira Gomes, Américo Scotti. The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 1388–1397, 2014.
21. AGA, Facts about fume and gases: Linde Group.
22. N.T.Jenkins, P.F.Mendez and T.W.Eager, "Effect of arc welding electrode temperature on vapor and fume composition", presented at the International Conference on Trend in Welding Research, 2005.
23. 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.

## **7. ANEXOS**

1. Procedimento do ensaio da Taxa de Formação de Fumos
2. Procedimento do ensaio de concentração de nanopartículas



## 1. Procedimento do ensaio da Taxa de Formação de Fumos

O seguinte procedimento foi elaborado tendo em conta as recomendações da norma ANSI/AWS F1.2-92 para um método laboratorial de medição da taxa de formação de fumos e emissão de gases em soldadura e processos similares. Este procedimento está adaptado para as condições laboratoriais e equipamentos existentes no LPT/LCM – DEMI – FCT – UNL.

1. Ter prontos os equipamentos: câmara de soldadura, máquina de soldadura (pâmetros eléctricos e débitos de gás), material base (desengordurado e sem interferências na câmara), filtros, forno, balança, pinça, caixas para filtros, folha de dados excel
2. Iniciar o ensaio por cortar os filtros à medida da matriz de acrílico (diam. 37 mm)
3. De seguida ligar o forno eléctrico a 100 °C
4. Utilizando a pinça colocar os filtros no forno na base apropriada e esperar cerca de 1h
5. Após este tempo, colocar os filtros na caixa e desligar o forno
6. Fazer o zero da balança
7. Utilizando a pinça colocar os filtros na balança
8. Registar na folha de registo
9. Utilizando a pinça, cuidadosamente colocar os filtros na matriz de acrílico do lado da mangueira extractora (aderência por efeito de Venturi)
10. Imediatamente depois ligar a extracção de gases
11. Fixar as 2 matrizes com os parafusos
12. Ajustar a posição da tocha em relação à chapa, fechar a janela, verificar o isolamento da câmara e colocar o vidro protector de radiação
13. Verificar os pâmetros eléctricos e a velocidade de rotação da mesa
14. Preparar o cronómetro e iniciar a soldadura
15. Soldar durante 30 segundos e interromper o processo após este período
16. Esperar mais 30 minutos com a bomba extractora ligada
17. Após este tempo desligar a bomba e desapertar as matrizes
18. Com cuidado colocar os filtros já com a amostra dentro da caixa e fechar
19. Peser os filtros de imediato
20. Registar na folha de registo
21. Caso se repitam ensaios voltar ao ponto 1, caso se terminem os ensaios desligar bomba extractora, máquina de soldadura, mesa rotativa e fechar o manoredutor do gás



## 2. Procedimento do ensaio de concentração de nanopartículas

O seguinte procedimento foi elaborado tendo em conta as recomendações de J.F.Gomes, et al, "Determination of airborne nanoparticles from welding operations", Journal of Toxicology and Environmental Health, 2012, 75, 747-755. Este procedimento está adaptado para as condições laboratoriais e equipamentos existentes no LPT/LCM – DEMI – FCT – UNL.

1. Ter prontos os equipamentos: máquina de soldadura (pâmetros eléctricos e débitos de gás), NSAM – Nanoparticle Surface Area Monitor, computador com sistema de aquisição de dados, acessórios (tubos de sucção, suporte do tubo)
2. Ligar o NSAM e conectá-lo ao computador
3. Verificar se o sistema de aquisição de dados está pronto a iniciar
4. Ligar a máquina de soldadura e abrir o gás, ligar o sistema de extracção de fumos
5. Posicionar o suporte da sonda junto à frente de soldadura
6. Iniciar a recolha de dados para obter uma linha de base estável
7. Iniciar a soldura (30 seg)
8. Depois de interromper a soldadura deixa o equipamento retornar à linha de base
9. Se houver mais ensaios voltar ao item 1, caso se terminem os ensaios desligar bomba extractora, máquina de soldadura, mesa rotativa, NSAM e fechar o manoredutor do gás



Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

