



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise de sistemas de monitorização de componentes revestidos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Autor

Andreia Filipa Trindade Tavares

Orientadores

Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Ricardo Barbosa Ribeiro

Júri

Presidente Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.

Coimbra, Junho 2015

Agradecimentos

Aqui deixo o meu agradecimento a todas as pessoas que tornaram possível a realização desta dissertação.

À Professora Ana Amaro, pela disponibilidade e orientação durante os meses de realização do estágio.

Ao Engenheiro Alcântara Gonçalves, administrador da empresa TEandM, Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A., pela oportunidade de realizar o estágio curricular na empresa.

Ao Engenheiro Ricardo Ribeiro, orientador na empresa, pela sua disponibilidade e transmissão de conhecimentos ao longo do estágio.

A todos os colaboradores da empresa por todo o conhecimento transmitido e todas as dúvidas esclarecidas.

À minha família pelo apoio, paciência e confiança depositada em mim durante este longo caminho, não teria conseguido chegar até aqui sem eles.

Resumo

O objetivo deste trabalho é a análise de sistemas de monitorização em tempo real, da temperatura e da espessura das peças ao longo do processo de revestimento com recurso à tecnologia HVOF, na empresa TEandM (Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A).

A análise destes sistemas tem como objetivo aumentar os ganhos de produção e, consequentemente, diminuir tempos de paragens e fissuras que ocorrem ao longo do processo de revestimento. Para alcançar o proposto, recolheram-se dados da produção para avaliação do que ocorre ao longo do processo, foram selecionados e contactados três fornecedores e avaliadas as possibilidades de implementação dos sistemas, realizaram-se testes com um dos equipamentos de monitorização de temperatura e foram ainda analisados alguns ganhos que poderão advir da aquisição dos sistemas.

Palavras-chave: Espessura, Ganhos de produção, HVOF, Sistemas de monitorização em tempo real, Temperatura.

Abstract

The main objective of the work is the analysis of monitoring systems in real time of the temperature and the thickness of the pieces along the coating process using HVOF technology, at TEandM (Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A).

The analysis of these systems aims to increase production gains and hence to reduce time of stops and cracks occurring along the coating process. To reach the proposed, was collected data for evaluation of production that occurs during the process, were selected and contacted three suppliers and evaluated the possibilities of implementation of the systems, tests were conducted with the temperature monitoring equipment and were also analyzed some gains that may result from the acquisition of systems.

Keywords Gains of production, HVOF, Monitoring systems in real time, Temperature, Thickness.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização da Tese	1
1.2. Estrutura da Dissertação	2
2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	3
2.1. Processos Aplicados	4
2.2. Projeção Térmica	7
2.2.1. <i>High Velocity Oxy-Fuel</i>	9
2.2.2. <i>Atmospheric Plasma Spraying</i>	11
2.2.3. <i>Electric Arc Wire Spray</i>	12
2.2.4. Comparação dos processos de PT	13
2.2.5. <i>Physical Vapour Deposition</i>	13
2.2.6. <i>Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition</i>	14
3. SELEÇÃO DE FORNECEDORES	17
3.1. Dados recolhidos da produção	17
3.2. Câmaras Termográficas	21
3.3. Sistema de Arrefecimento	25
3.4. Sistema de Visão Artificial	28
3.5. Questionários para a Obtenção de Ganhos Concretos	30
4. RESULTADOS DOS TESTES COM UMA CÂMARA TERMOGRÁFICA	35
5. CONCLUSÕES	37
5.1. Trabalho futuro	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Instalações TEandM (Adaptado TEandM).....	3
Figura 2.2 - Várias técnicas de PT (Adaptado de CTCV).....	7
Figura 2.3 - Esquema de tocha HVOF (Adaptado Responsive Coating Technology).....	10
Figura 2.4 - Esquema de tocha APS (Adaptado Responsive Coating Technology).....	11
Figura 2.5 - Esquema da tocha EAWS (adaptado The United States Patent and Trademark Office).	12
Figura 2.6 - Comparação dos três processos de PT (Adaptado MDPI - Open Access Publishing).....	13
Figura 2.7 - Máquina de revestimento PVD (Adaptado PVD Coatings).	14
Figura 3.1 - Haste em aço inox.....	18
Figura 3.2 - Relação do nº de passagens com a temperatura numa haste 1.....	18
Figura 3.3 - Relação do nº de passagens com a temperatura haste 2.....	19
Figura 3.4 - Placas em metal duro.	20
Figura 3.5 - Relação do nº de passagens com a temperatura nas placas.	21
Figura 3.6 - Do prisma de Newton à tecnologia moderna de medição por infravermelhos (Adaptado Academia Testo).....	22
Figura 3.7 - Pirómetro ótico (Adaptado FFonseca).....	23
Figura 3.8 - Sistema de refrigeração (Adaptado Carburos Metálicos).....	25
Figura 3.9 - Tecnologias de Visão Artificial (Adaptado MRA Instrumentação).....	28
Figura 3.10 - Câmara 3D (Adaptado MRA Instrumentação).....	29
Figura 3.11 - Lateral revestida do veio triangular.	30
Figura 3.12 - Lateral do veio triangular.....	30
Figura 3.13 - Haste em aço inox revestida.	33
Figura 3.14 - Parte revestida da haste.....	33
Figura 4.1 - Teste com câmara termográfica.....	35

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre Projeção Térmica e <i>Physical Vapour Deposition</i> (Adaptado Grainger, 1989).	6
Tabela 2.2 - Comparação entre os três processos de PT (Adaptado CTCV).....	9

SIGLAS

APS – *Atmospheric Plasma Spraying*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro

CVD – *Chemical Vapour Deposition*

DAR - *Deutscher Akkreditierungs Rat*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EAWS – *Electric Arc Wire Spray*

ENAC – Entidade Nacional de Acreditação

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

HVOF – *High Velocity Oxy-Fuel*

PACVD – *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*

PT – *Projeção Térmica*

PVD – *Physical Vapour Deposition*

TEandM – Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização da Tese

A presente dissertação surge do estágio curricular realizado pela autora no âmbito da cadeira Dissertação do plano curricular do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial.

O referido estágio foi realizado na empresa Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A., TEandM, localizada no Parque Industrial de Taveiro, Coimbra. A empresa efetua tratamentos nas superfícies de diversos componentes mecânicos, preparação, revestimentos através de projeção térmica e deposição iónica, e retificação.

Durante os processos de tratamento atrás referidos há uma grande dificuldade do operador em fazer o controlo e monitorização da temperatura e espessura, pelo que a necessidade de arranjar um sistema que inclua câmaras termográficas, sistemas de arrefecimento e sistemas de visão artificial, prende-se não só com os ganhos de produção que poderão ser alcançados, mas também com o facto de existirem muitos tempos de paragem para arrefecimento, para medição de peças e controlo de temperaturas. Uma outra razão para esta necessidade está relacionada com as fissuras que aparecem nos revestimentos após arrefecimento das peças. A razão deste fenómeno prende-se com a dilatação térmica dos materiais, isto é, ao aumento do volume de um corpo ocasionado pelo aumento de sua temperatura. O valor desta dilatação é definido por um coeficiente designado coeficiente de dilatação térmica, α . É pelo facto de os coeficientes de dilatação do material que constituem a peça e do revestimento serem distintos, que quando há elevadas temperaturas e, conseqüentemente se observa a dilatação de ambos os materiais, o revestimento não suporta a dilatação, porque o coeficiente de dilatação do revestimento é normalmente menor do que o do substrato, originando fissuras. O que se pretende é então conseguir manter a temperatura sempre estável ao longo do processo evitando oscilações. Assim, pretende-se diminuir os tempos de paragem, aumentar a produtividade, diminuir os gastos e diminuir as fissuras, que levam à diminuição do tempo de vida da peça.

A principal motivação para escolher um tema fora do ambiente académico diz respeito ao facto de se ter uma proximidade com o meio empresarial, isto é, compreender as maiores diferenças entre a teoria e a prática. O tema era apelativo porque permitiria perceber como funcionam os requisitos com os fornecedores.

Os objetivos fundamentais desta dissertação são: selecionar fornecedores de câmaras termográficas e sistemas de visão artificial para medição de espessuras nas peças, verificar a implementação de cada um deles e fornecimento de dados para avaliar os ganhos do sistema de arrefecimento.

1.2. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, sendo este o primeiro.

Neste capítulo enquadra-se o tema, as motivações e os principais objetivos.

No segundo capítulo é feita uma apresentação e descrição geral da empresa, o seu objetivo, missão e visão e por fim, citam-se os processos aplicados e descreve-se cada um deles.

O capítulo seguinte diz respeito à seleção dos fornecedores, referem-se aqueles com que houve contacto, é feita uma abordagem relativa a cada um dos sistemas que se pretende estudar e relata-se o essencial das reuniões realizadas. Este capítulo encontra-se dividido em quatro subtemas: recolha de dados da produção; câmaras termográficas; sistemas de visão artificial e por fim sistema de arrefecimento.

O quarto capítulo está relacionado com os testes realizados com uma das empresas apresentando-se os resultados obtidos.

No quinto e último capítulo são retiradas conclusões no que diz respeito aos sistemas que se pretende que venham a ser implementados e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A empresa TEandM, Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A. é uma empresa inovadora, criada em 2000, pelo CTCV, Centro Tecnológico da Cerâmica e dos Vidro, e Durit – Metalurgia Portuguesa do Tungsténio, Lda. As suas instalações industriais, representadas na Figura 2.1, localizam-se no Parque Industrial de Taveiro (Coimbra), com uma área coberta de cerca de 5000 m².



Figura 2.1 - Instalações TEandM (Adaptado TEandM).

Segundo o site da empresa TEandM, “a principal atividade da empresa está focalizada na produção de revestimentos técnicos de componentes para aplicações industriais, usando tecnologias de projeção térmica de alta velocidade (*Atmospheric Plasma Spraying, APS, High Velocity Oxy-Fuel, HVOF, Electric Arc Wire Spray, EAWS*), e revestimentos físicos em estado de vapor (*Physical Vapour Deposition, PVD e Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition, PACVD*).

A empresa, numa primeira fase de investimento, instalou tecnologias para realizar revestimentos técnicos para a indústria, com a finalidade de melhorar as propriedades das superfícies das peças e componentes por forma a melhor se adaptarem às solicitações a que vão estar sujeitas, tais como:

desgaste na forma de abrasão, erosão e atrito;

corrosão e oxidação;

isolamento ou condução elétrica;

condução electromagnética ou térmica;

ópticas;

biocompatibilidade.

A empresa tem como missão assumir-se como líder na disponibilização a todo o mercado global de aplicações de materiais avançados, de filmes espessos (Projeção Térmica) e de filmes finos (Deposição Física de Vapor). Tem como objetivo ser uma empresa reconhecida internacionalmente pela capacidade de desenvolver soluções inovadoras recorrendo a aplicações de materiais avançados, tecnologias de revestimentos e de componentes de geometria complexa. Os seus valores passam por desenvolver soluções inovadoras para empresas clientes com recurso a novos materiais e tecnologias de revestimento, estabelecer acordos e parcerias com empresas /instituições nacionais e internacionais de investigação e desenvolvimento, cujo conhecimento se integra na ciência e engenharia de materiais, nomeadamente com o CTCV, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra e Departamento de Materiais da Universidade de Aveiro, melhoria contínua do saber e do saber fazer, lealdade para com os seus clientes e parceiros e a promoção do espírito empreendedor dos colaboradores”.

Segundo Pereira, 2013, a TEandM é “certificada pela Bureau Veritas Certification nas normas de gestão da qualidade de acordo com a norma NP EN ISO 9001, sem exclusões, no âmbito “Preparação, revestimento e retificação de peças e componentes mecânicos”. Pela Bureau Veritas Certification UK nas normas de aeronáutica de acordo com a norma BS EN ISO 9001, EN 9100 e AS 9100 Rev. B, sem exclusões, no âmbito “Preparação, revestimentos e retificação de peças e componentes mecânicos para aplicações aeronáuticas, médicas e outras indústrias”. Mais recentemente certificou-se pela norma IDI, Investigação, Desenvolvimento e Inovação, NP 4457, no âmbito “Inovação e desenvolvimento de novos produtos, processos e soluções tecnológicas de revestimentos e componentes industriais, bem como inovação em organização e marketing”. Estas normas também são reconhecidas em Espanha pela ENAC, Entidade Nacional de Acreditação, Entidade Nacional de Acreditação, e na Alemanha pela DAR, Deutscher Akkreditierungs Rat, dois mercados onde a empresa se encontra neste momento.”

2.1. Processos Aplicados

A TEandM, com a realização dos revestimentos, tem como objetivo proporcionar melhores características às superfícies das peças ou componentes, de acordo

com as solicitações às quais vão estar sujeitos, podendo ser peças novas ou usadas. Estes revestimentos vão não só melhorar os componentes em relação às suas solicitações, como também aumentar o seu tempo de vida útil, a produtividade e a qualidade do produto final.

A TEandM aplica métodos de projeção térmica, PT, através de APS, HVOF e EAWS e PVD.

Embora seja feita uma descrição de todos os processos aplicados na empresa, apenas foi tido contacto com a tecnologia HVOF.

Na Tabela 2.1 pode ver-se a comparação entre os dois grupos de processos aplicados na empresa.

Tabela 2.1 - Comparação entre Projeção Térmica e *Physical Vapour Deposition* (Adaptado Grainger, 1989).

	Projeção Térmica	PVD
Espessura, mm	0,1-1,0	0,001-0,2
Geometria dos componentes	Acesso às superfícies internas controladas pelo tamanho da tocha	Variável
Tamanho dos componentes	Ilimitado	Limitado por causa do tamanho da câmara
Material do substrato	Quase ilimitado	Quase ilimitado
Temperatura do substrato, °C	200	30-1000
Pré-tratamento	Limpar e decapar	Bombardeamento iónico
Pós-tratamento	Nenhum	Nenhum/Alívio de tensões
Porosidade do revestimento, %	1-15	Nenhum a % pequenas
Resistência à tração, MPa	20-140	Alta
Ligação	Mecânica	Atómica, força de superfície
Controlo da espessura depositada	Muito bom	Bom
Distorção do substrato	Baixa	Baixa

2.2. Projeção Térmica

As tecnologias de PT, Projeção Térmica, são altamente versáteis, permitindo a engenharia de um número quase ilimitado de revestimentos para uma ampla gama de aplicações.

Hoje em dia a projeção térmica inclui todos os processos onde o revestimento é total ou parcialmente fundido, dentro ou fora da tocha de projeção. As partículas líquidas ou sólidas são depositadas sobre a superfície, onde as partículas que chegam formam o revestimento. É então um termo genérico para um grupo de processos que utiliza uma fonte de calor para fundir o material. O material fundido ou semi-fundido é impulsionado em direção a um substrato anteriormente preparado de forma a criar uma nova superfície, o revestimento, expandindo gases de processo. O conseqüente impacto das partículas cria o revestimento. O processo de PT inclui os passos que se encontram ilustrados na Figura 2.2.

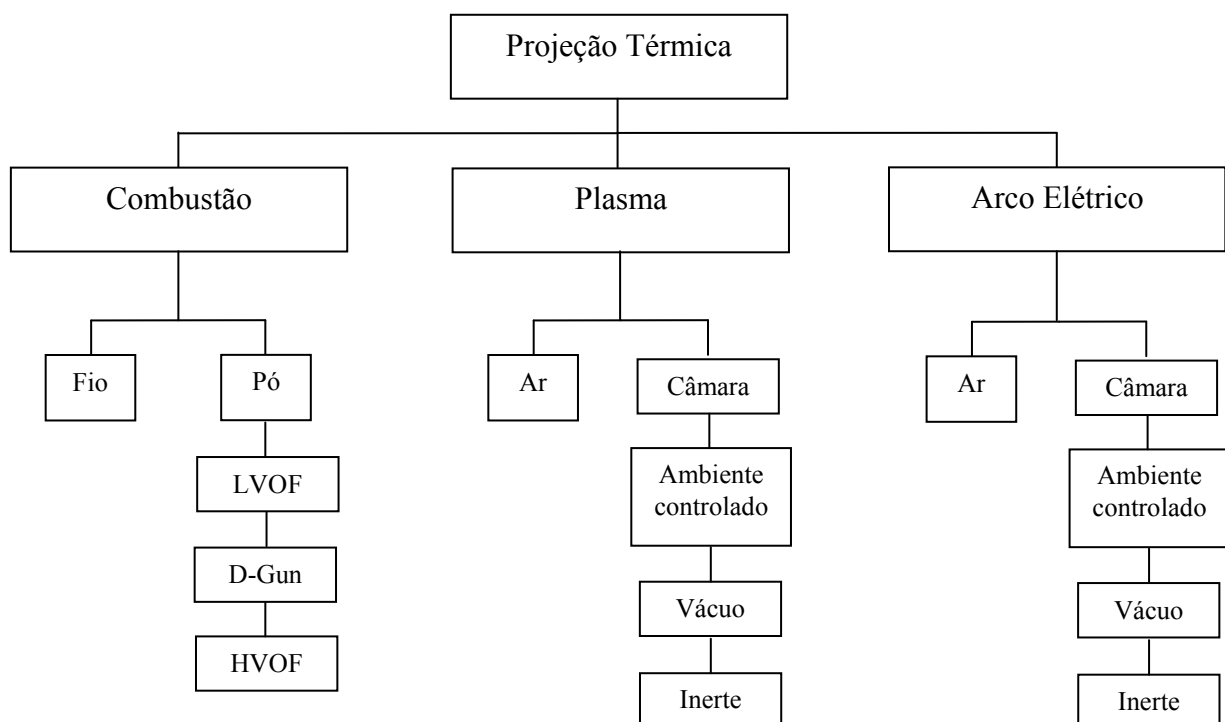


Figura 2.2 - Várias técnicas de PT (Adaptado de CTCV).

Recorrendo a estas técnicas, os materiais que podem ser projetados, na forma de pó, arame ou vareta, são:

- metais (níquel/cromo, *stellite*, cobre);

- cerâmicos (alumina, óxido de cromo);
- cermets (carboneto de tungstênio/níquel, carboneto de cromo/níquel cromo).

Segundo Pereira, 2013 *“o mesmo material pode ter várias características (nível de porosidade, dureza, adesão) dependendo dos parâmetros de projeção e da tecnologia aplicada. Os parâmetros de projeção que podem ser alterados são: distância e ângulo de projeção e, ainda, a taxa de deposição. Pode-se dar como exemplo o facto de a distância influenciar a rugosidade, a densidade, a coesão e a velocidade no momento do impacto na superfície do substrato. Caso as distâncias sejam elevadas, as partículas podem solidificar parcialmente, no entanto, se forem menores o material pode não ter tempo de se fundir.*

Uma unidade de PT é composta por uma tocha, um armário de regulação e controlo de parâmetros, um alimentador de pó, uma central de gases e uma unidade de refrigeração da tocha.”

Uma das vantagens da projeção térmica é o facto de as partículas fundidas serem depositadas sobre o substrato sem o fundir, uma vez que apenas ocorre um ligeiro aquecimento do mesmo.

Na Tabela 2.2 encontra-se uma comparação dos três processos de PT.

Tabela 2.2 - Comparação entre os três processos de PT (Adaptado CTCV).

	APS	HVOF	EAWS
Revestimentos	Cerâmicos Cermetos Metálicos	Cermetos Metálicos	Cermetos Metálicos
Forma da matéria-prima	Pó	Pó	Arame
Caudal típico de matéria-prima, kg/h	2,5 a 3,5	2,5 a 3	10 a 20
Velocidade das partículas, m/s	200	300	100
Temperatura da fonte energética, °C	10000 a 20000	3000	5500
Tensões de adesão, MPa	20 a 50	>80	15 a 40
Porosidade, %	5 a 10	0,5 a 1	3
Espessura dos revestimentos, µm	200 a 1000	100 a 500	200 a 300

Como se pode verificar todas as propriedades diferem nos diferentes processos sendo que o que existe em comum é a forma da matéria-prima no processo APS e HVOF.

2.2.1. High Velocity Oxy-Fuel

A tecnologia HVOF, *High Velocity Oxy-Fuel*, é uma técnica recente e apenas aplicada na indústria nos últimos anos. Foi desenvolvida para produzir revestimentos de alta qualidade. Esta técnica é utilizada na projeção de carbonetos, permitindo elevadas tensões de adesão com uma porosidade mínima.

Segundo o site da empresa TEandM, a tecnologia HVOF baseia-se “na combustão contínua de Oxigénio com um combustível (Hidrogénio, Propano). Os gases entram em combustão numa câmara de altas temperaturas gerando um jato de saída a alta velocidade, Figura 2.3. A matéria-prima, na forma de pó, que se encontra no alimentador de pó, é injetada axialmente no fluxo através de um gás inerte, geralmente azoto. O bocal e a câmara de combustão têm de ser constantemente arrefecidos com água devido às elevadas temperaturas atingidas pela chama.

As elevadas pressões dos gases promovem a aceleração dos mesmos, permitindo que o material de revestimento atinja velocidades na ordem dos 300m/s com uma velocidade dos gases de 2140m/s, dependendo da densidade, forma e do tamanho do “material de alimentação”. A temperatura da chama neste processo é de aproximadamente 3000°C.

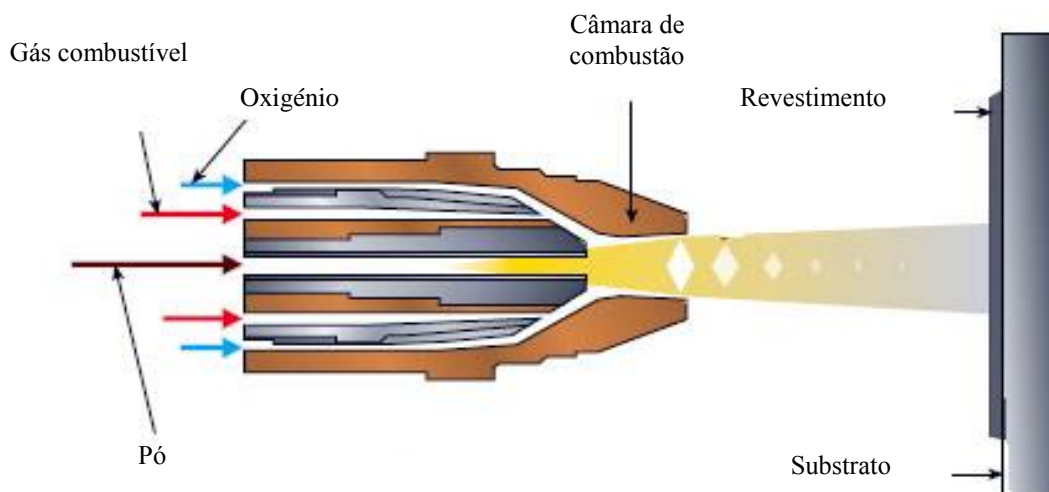


Figura 2.3 - Esquema de tocha HVOF (Adaptado Responsive Coating Technology).

Esta tecnologia destina-se essencialmente à execução de revestimentos antidesgaste de elevada qualidade, caracterizados por alta dureza (na ordem dos 1200HV), baixa porosidade (0.5-1%) e alto índice de adesão ao substrato (>80MPa). As espessuras típicas destas aplicações variam entre 100 e 500 µm.”

Esta tecnologia é normalmente aplicada na indústria aeronáutica, aeroespacial e petroquímica, sendo WC (carboneto de tungsténio) em matriz metálica, um dos materiais aplicados.

2.2.2. Atmospheric Plasma Spraying

Segundo o site da empresa TEandM, a tecnologia APS, *Atmospheric Plasma Spraying*, consiste “em introduzir a matéria-prima na forma de partículas no seio de um jato de plasma, onde a temperatura atinge 9726 °C, de forma a acelerá-las e fundi-las, antes de chocarem com o substrato onde formam um depósito com uma estrutura lamelar, Figura 2.4. O processo é baseado na formação de um ambiente plasmogéneo, a partir da dissociação e ionização de gases por um arco elétrico de alta potência (na ordem de 80kW) entre um cátodo e um ânodo tubular.”

Esta técnica é fundamentalmente utilizada na projeção de materiais de alto ponto de fusão, como os cerâmicos e outros materiais refratários. Os gases que normalmente se usam na tecnologia APS são o Árgon, o Hidrogénio, o Azoto, o Hélio ou uma mistura destes.

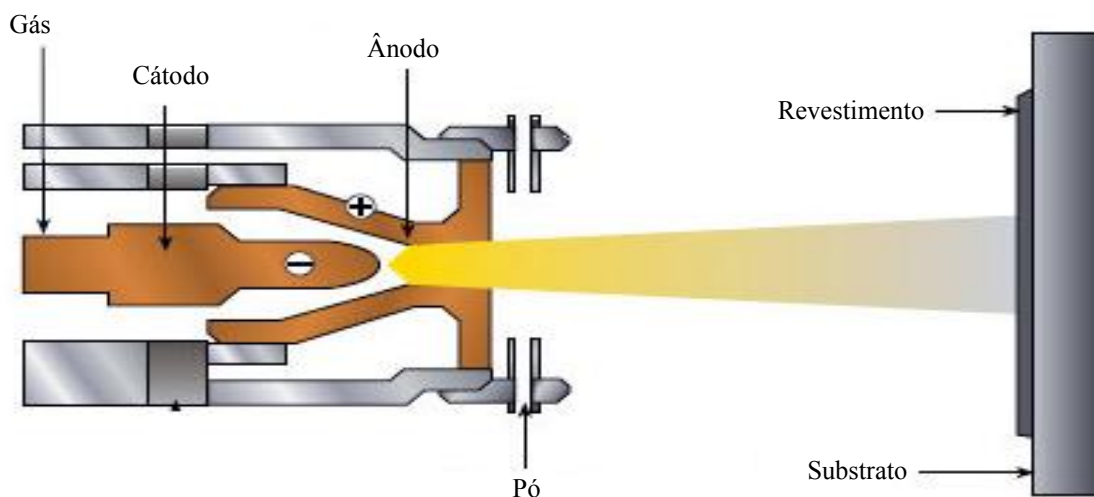


Figura 2.4 - Esquema de tocha APS (Adaptado Responsive Coating Technology).

A qualidade de revestimento é influenciada por diferentes parâmetros tais como: o material a ser depositado; a composição do gás de plasma; a taxa de fluxo; a entrada de energia; a distância da tocha ao substrato e a temperatura do substrato.

A tecnologia APS tem como vantagens a possibilidade de projetar materiais cerâmicos devido às altas temperaturas atingidas na projeção e à boa adesão que proporciona entre o material e o substrato.

Esta tecnologia é aplicada em deposições refratárias, nos componentes dos motores dos aviões, componentes dos equipamentos da indústria têxtil e gráfica, sendo o CR_2O_3 (óxido de crómio (III)), um dos materiais aplicados.

2.2.3. *Electric Arc Wire Spray*

A técnica EAWS, *Electric Arc Wire Spray*, é utilizada para projetar materiais de natureza metálica e compósitos metálicos, sendo que a matéria-prima se apresenta na forma de um arame condutor elétrico, tal como o nome indica, diferenciando-se das outras técnicas em que a matéria-prima é em pó.

Neste processo é estabelecido um arco elétrico através do toque entre dois arames introduzidos na tocha. Os arames que estão ligados aos pólos elétricos quando se tocam fundem-se no meio de um jato de ar, Figura 2.5. O ar flui, a alta pressão, ao longo da zona do arco elétrico e transporta o metal fundido sob a forma de partículas atomizadas e no estado de fusão, projetando-as contra o substrato.

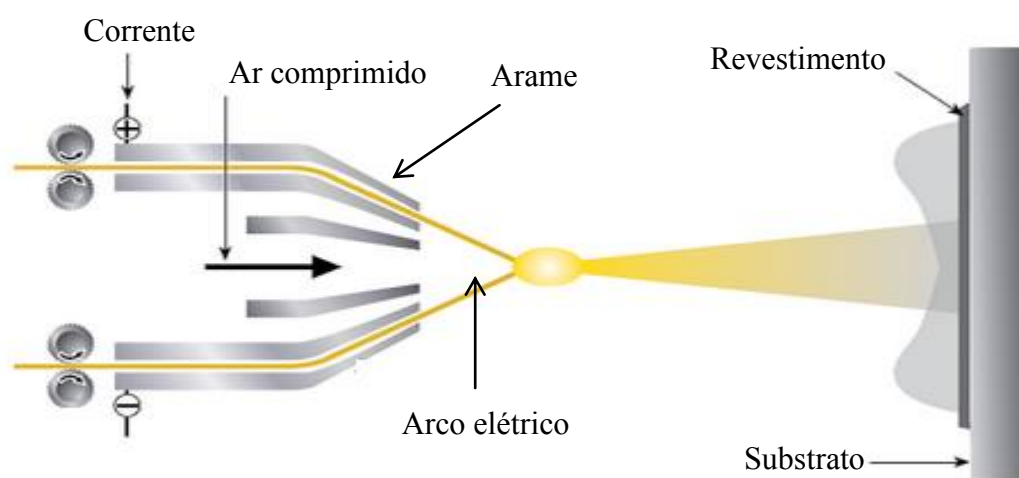


Figura 2.5 - Esquema da tocha EAWS (adaptado The United States Patent and Trademark Office).

Com a utilização deste processo, obtêm-se tipicamente revestimentos com porosidade intrínseca na ordem dos 3% e níveis de adesão de 40MPa. A espessura típica dos revestimentos produzidos com esta tecnologia varia entre 200 μ m e 300 μ m.

Com esta tecnologia conseguem-se, por exemplo, elevadas taxas de projeção devido ao facto de, conforme já referido, ser possível usar dois arames diferentes, sendo esta uma grande vantagem do processo.

A tecnologia EAWS é a mais adequada para revestimentos de grandes componentes.

2.2.4. Comparação dos processos de PT

Na Figura 2.6 é feita uma comparação entre os três processos de PT, atrás descritos: HVOF; APS e EAWS.

No que diz respeito à temperatura da chama:

- Temperatura mais elevada: APS;
- Temperatura mais baixa: HVOF.

Relativamente à velocidade das partículas:

- Velocidade mais elevada: HVOF;
- Velocidade mais baixa: EAWS.

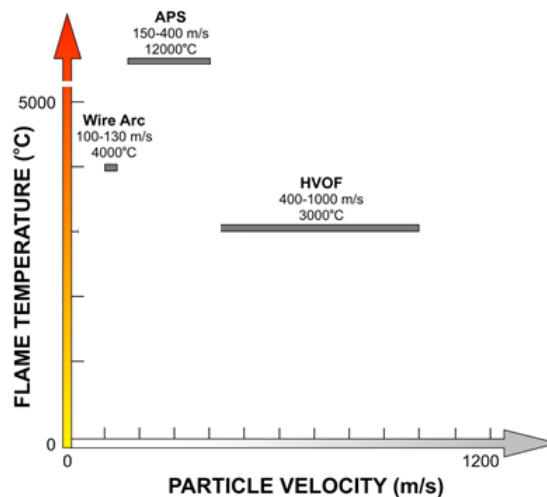


Figura 2.6 - Comparação dos três processos de PT (Adaptado MDPI - Open Access Publishing).

2.2.5. Physical Vapour Deposition

O PVD, *Physical Vapour Deposition*, é um processo de revestimento de deposição em vácuo.

Conforme o site da empresa TEandM a técnica utilizada é o “*magnetron não balanceado que permite depositar filmes finos pela condensação de uma forma vaporizada do material sobre vários tipos de superfícies.*”

O método de revestimento envolve processos puramente físicos tais como uma evaporação por bombardeamento iónico de plasma (o que torna a deposição num processo à escala atómica) envolvendo uma reação química na superfície a ser revestida.

Este processo permite o aumento da vida útil das peças, diminuição de paragens de máquinas, diminuição de custos de manutenção, ganhos de produtividade, melhor acabamento e a diminuição/eliminação da lubrificação.”

Caracteriza-se pela injeção de átomos ou moléculas de um alvo, sendo o alvo a fonte de material para produzir o revestimento, quando este é submetido a um bombardeamento de partículas.

Na Figura 2.7 encontra-se uma máquina de revestimento de PVD em vácuo.



**Figura 2.7 - Máquina de revestimento PVD
(Adaptado PVD Coatings).**

2.2.6. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition

De acordo com o site da empresa TEandM, “*CVD, Chemical Vapour Deposition, define-se como a formação de um filme fino sólido pela deposição atómica ou molecular, numa superfície aquecida, sendo que o sólido provém de uma reação química onde os precursores estão na fase de vapor. São depositados átomos ou moléculas, ou então a sua combinação.*”

O processo PACVD, Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition, ocorre a temperaturas mais baixas que o processo CVD tradicional, uma vez que é utilizado o plasma e não a energia térmica para desencadear a reação.

No processo CVD todos os materiais que originam o filme se encontram na fase gasosa, no PVD, Physical Vapour Deposition, pelo menos um deles está na fase sólida (geralmente um metal).”

3. SELEÇÃO DE FORNECEDORES

No âmbito deste trabalho foi necessária a procura de fornecedores de câmaras termográficas, de sistemas de visão artificial e de sistemas de arrefecimento. Foram ainda recolhidos dados da produção no que diz respeito ao número de passagens e temperaturas ao longo do processo.

Houve contacto com quatro empresas cuja atividade envolvia os três tópicos acima referenciados.

No que diz respeito às câmaras e também ao sistema de visão artificial, as empresas foram: SISTCentro, MRA Instrumentação e Enermeter, no caso do sistema de arrefecimento foi contactada a empresa Carburos Metálicos.

Realizaram-se reuniões com todas as empresas de forma a verificar a possibilidade de implementação das câmaras e do sistema de visão artificial. No caso do sistema de arrefecimento realizou-se uma reunião de apresentação da proposta.

3.1. Dados recolhidos da produção

Numa fase inicial, antes da procura de fornecedores, foram recolhidos dados ao longo da execução de alguns revestimentos de peças, com a tecnologia HVOF, que permitem obter uma melhor perceção da necessidade de controlar a temperatura. Foram reunidos dados relativos a temperaturas atingidas ao longo do processo, número de passagens em cada peça e espessuras. Seguiu-se a compilação dos dados de cada peça num gráfico.

Apresentam-se agora algumas figuras de peças e dados recolhidos na produção.

Na Figura 3.1 encontra-se uma haste em aço inox, após revestimento, cujas dimensões iniciais nos pontos assinalados eram: 1 – 78,38 mm, 2 – 78,34 mm, 3 – 78,33 mm. As dimensões finais são referidas aquando da análise do gráfico.

Na Figura 3.2 encontram-se todas as temperaturas e passagens ao longo do processo de revestimento nos pontos referidos na Figura 3.1.

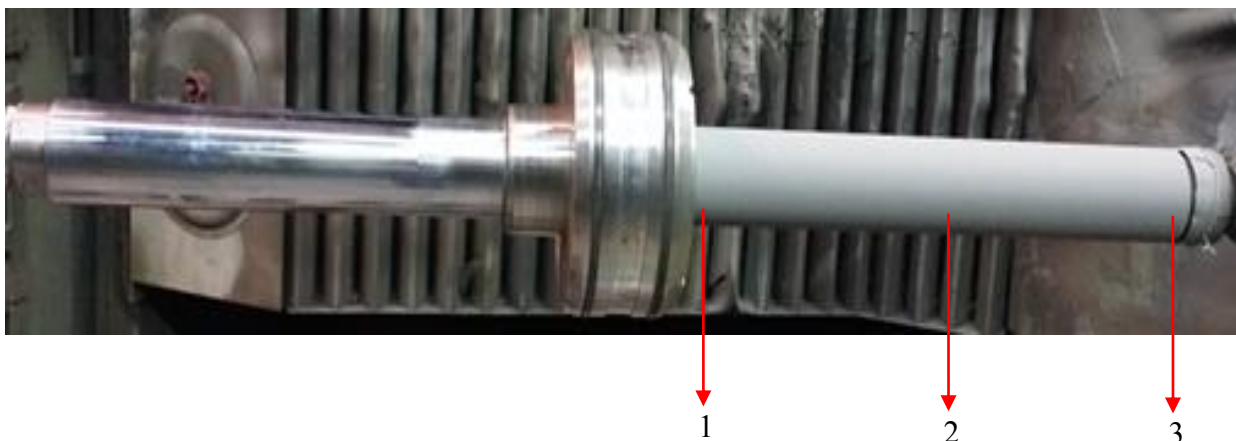


Figura 3.1 - Haste em aço inox.

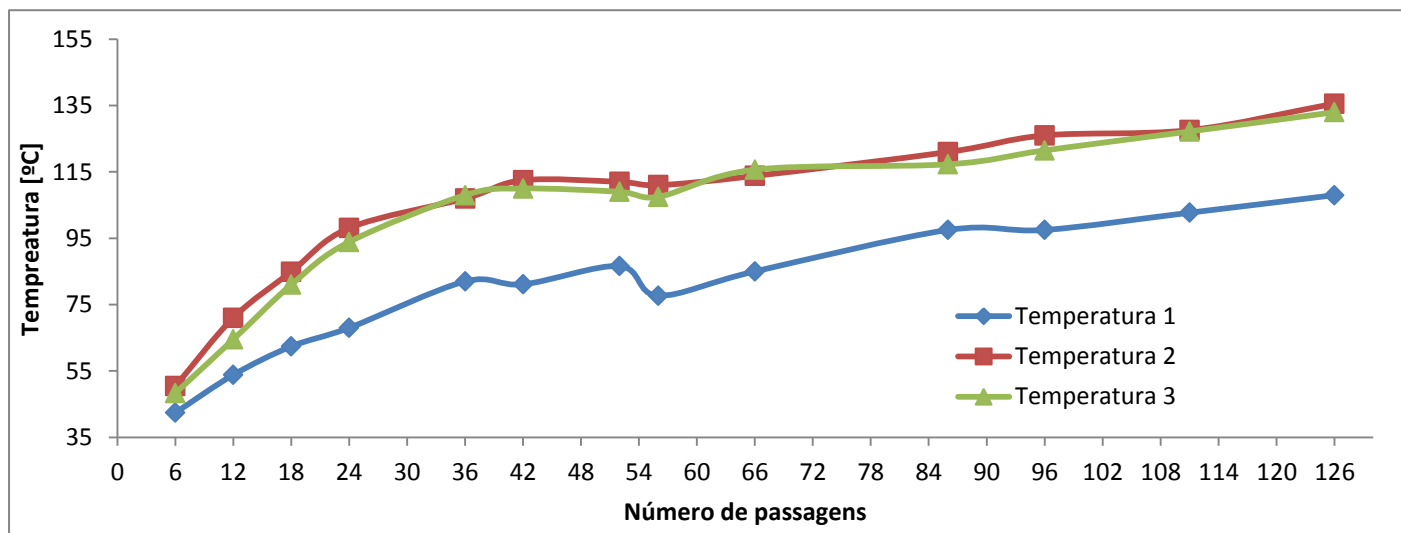


Figura 3.2 - Relação do nº de passagens com a temperatura numa haste 1.

Analisando a Figura 3.2, verifica-se que foram necessárias 126 passagens de revestimento para obter uma espessura de revestimento de 2,14 mm no ponto 1, 2,1 mm no ponto 2 e 2,23 mm no ponto 3. Conclui-se, ainda, que o revestimento não cresce de igual forma ao longo da zona a revestir. Verifica-se também a partir do gráfico que as temperaturas mais elevadas são atingidas no ponto 2 e 3, sendo a temperatura máxima atingida de 135,6°C.

A Figura 3.3 mostra a relação entre o número de passagens e a temperatura atingida ao longo do processo de revestimento numa haste igual à da Figura 3.1. Esta tinha como dimensões iniciais, ponto 1 – 77,45 mm, ponto 2 – 77,38 mm, ponto 3 – 77,12 mm.

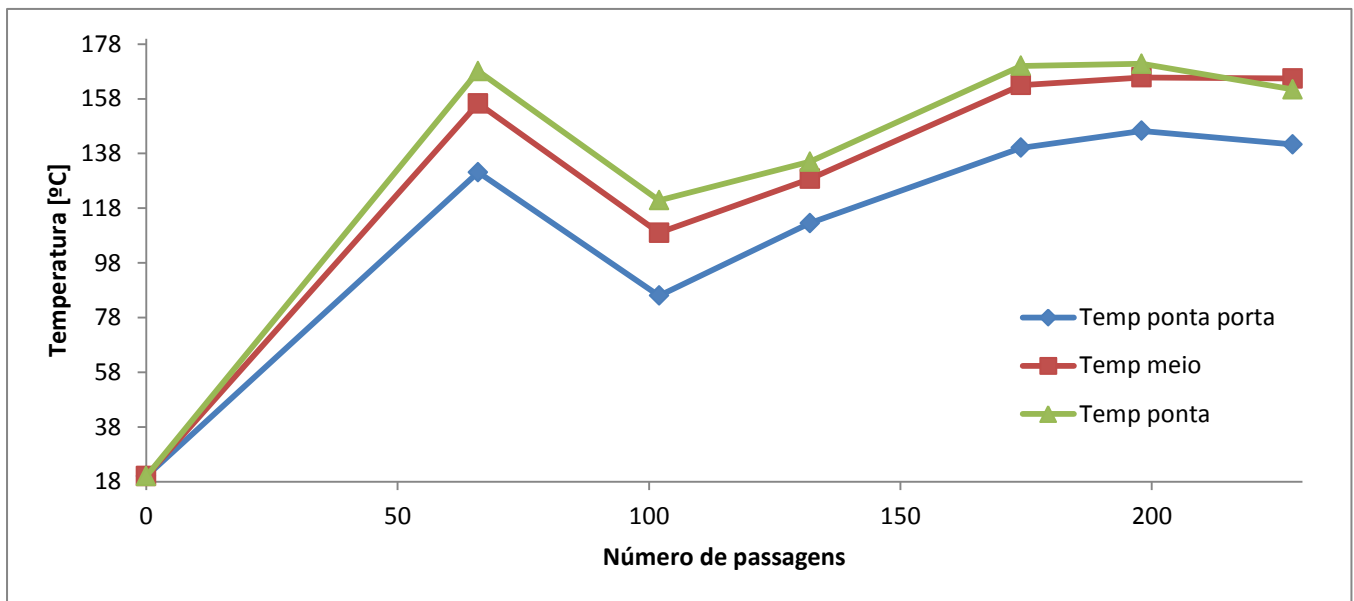


Figura 3.3 - Relação do nº de passagens com a temperatura haste 2.

Fazendo uma comparação em relação aos dados recolhidos da primeira haste, verifica-se que, nesta para uma espessura de revestimento no ponto 1 – 3,16 mm, ponto 2 – 3,25 mm, ponto 3 – 3,52 mm, foram necessárias 228 passagens de revestimento, mais 102 passagens do que na primeira, no que respeita à temperatura, aqui a máxima atingida foi de 170,8°C, ao passo que no primeiro exemplo esta foi de 135,6°C. De referir que em cada ciclo de revestimento, há uma passagem de arrefecimento na peça, isto é, realiza-se uma passagem com o mesmo programa de revestimento, mas apenas com ar a sair do bocal da tocha.

Verifica-se então, desta comparação, que apesar das hastes serem do mesmo material e muito idênticas, do programa do robô ser o mesmo para as duas, como o revestimento não cresce sempre da mesma forma, as variações no número de passagens, das temperaturas atingidas e do tempo de projeção diferem de peça para peça.

Na Figura 3.4 encontram-se duas peças em Aço Carbono, cujas diferenças residem no número de furos, uma tem quatro, a outra tem apenas dois e nas dimensões da

peça. Foram executadas ao mesmo tempo dentro da cabine de projeção, no entanto, apresentam comportamentos diferentes no que diz respeito à temperatura.

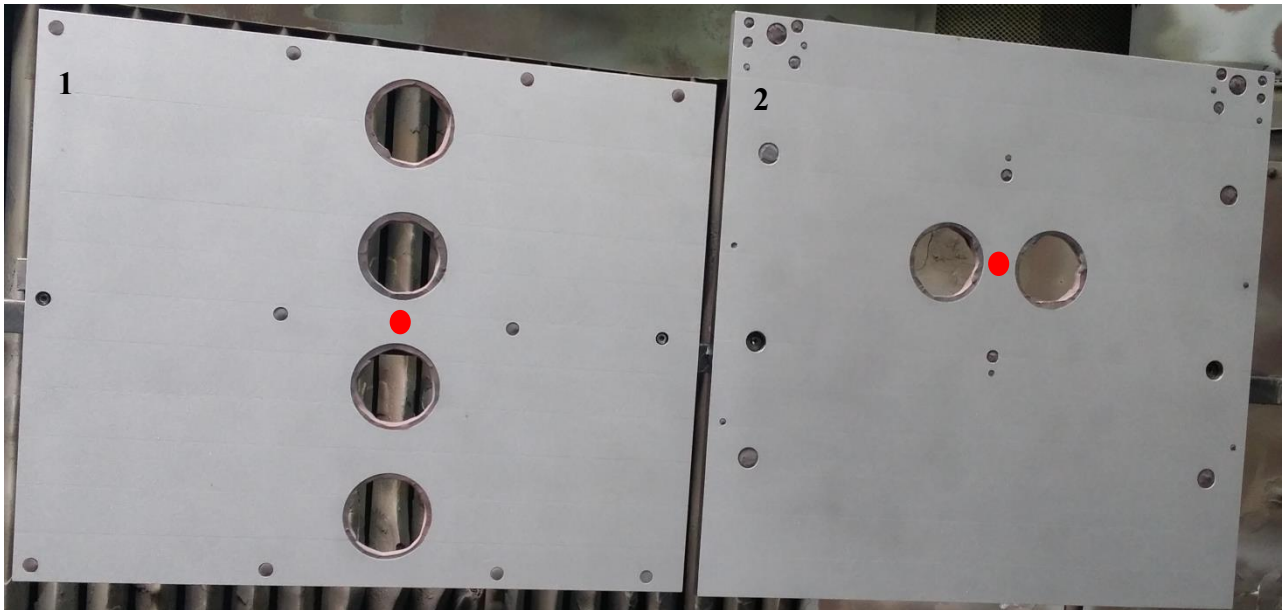


Figura 3.4 - Placas em metal duro.

A espessura inicial nos pontos representados a vermelho na Figura 3.4, ou seja, antes do revestimento, era de 13,84 mm para a peça 1 e de 13,81 mm para a peça 2.

Como se pode verificar na Figura 3.5, o número de passagens para as duas peças foi o mesmo, sendo a espessura final das placas a mesma, 14,4 mm. Contudo, se se observar a temperatura, verifica-se que é na placa com dois furos que esta é mais elevada, atingindo um máximo de 116,3°C, ao passo que na peça com quatro furos a temperatura máxima se situa nos 108,3°C. Esta diferença de 8°C pode ser significativa em função do material que se está a depositar e do seu coeficiente de dilatação.

De realçar que as temperaturas foram medidas nos pontos assinalados a vermelho na Figura 3.4. A espessura mediu-se no canto superior direito de ambas as placas.

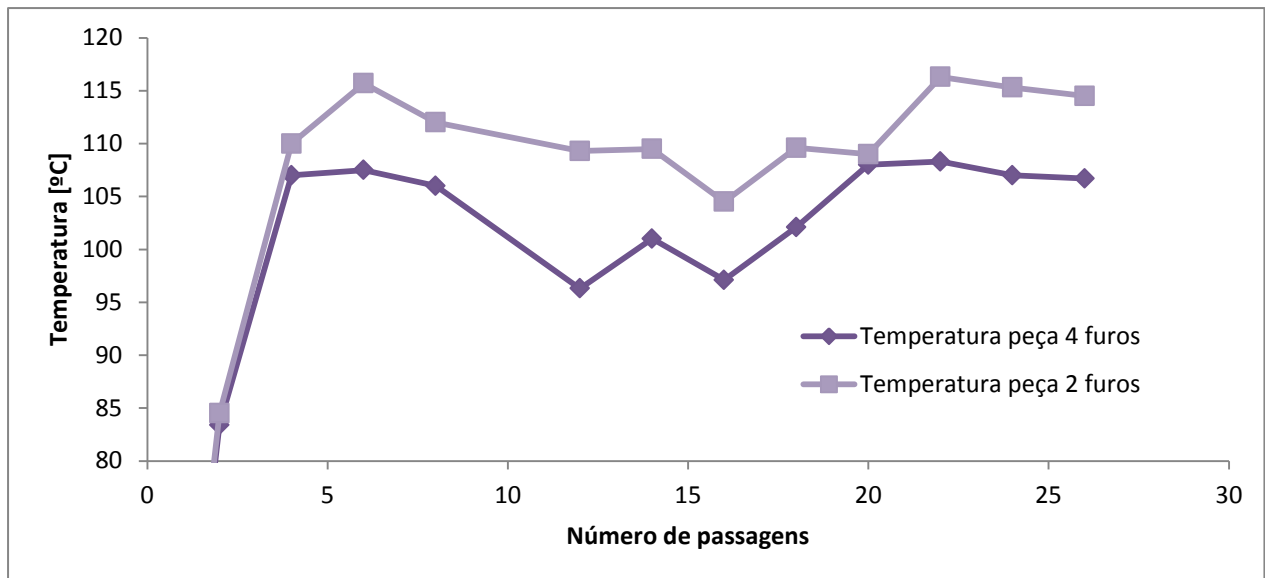


Figura 3.5 - Relação do nº de passagens com a temperatura nas placas.

Analisando os exemplos acima, verifica-se que as temperaturas ao longo do processo de revestimento não são constantes, isto é, não se consegue manter um valor fixo de temperatura durante todo o processo. Observa-se nos diferentes gráficos das figuras apresentadas que há picos de temperaturas. Por esta razão, é necessário um sistema de controlo real da temperatura e também um sistema de arrefecimento, de forma a manter as temperaturas dentro de valores aceitáveis e estáveis. No que respeita às espessuras também se verifica, em ambos os casos, que esta não é uniforme nas peças, cada revestimento cresce de forma distinta. Por esta razão é também necessária a monitorização da espessura, durante o processo através dos sistemas que a seguir vão ser explicados.

Em nenhum dos exemplos acima referidos, foram visíveis fissuras no revestimento.

3.2. Câmaras Termográficas

Depois de Herschel descobrir a radiação infravermelha no século XIX, as primeiras realizações técnicas por volta de 1920 possibilitaram a medida desta radiação, através da realização das primeiras imagens utilizando o sistema infravermelho por meio da técnica evaporográfica, isto é, a evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono.

Durante a Segunda Guerra Mundial as propriedades da radiação infravermelha foram utilizadas, principalmente, para temas militares com a invenção dos mísseis guiados por infravermelhos. Foi utilizado o Sistema de Visão Noturna em tanques alemães para a invasão da Rússia. Foi então desenvolvido e elaborado a FLIR – Forward Looking Infra Red (Visão dianteira por infravermelhos) e utilizado pelo exército americano.

Depois da guerra, o desenvolvimento avançou rapidamente. A empresa sueca AGA lançou no mercado a primeira câmara termográfica para efeitos civis e comerciais em 1960.

As primeiras câmaras eram pesadas, grandes e pouco manuseáveis. Ainda antes dos anos 80 começaram a aparecer as primeiras câmaras termográficas cómodas e manuseáveis, como a da Figura 3.6.

Muitos avanços técnicos, um progresso importante no campo da tecnologia informática e a chegada da era digital nos anos 90 provocaram a rápida evolução das câmaras.

A possibilidade de se adquirir instrumentos de alto desempenho a um preço cada vez mais acessível permitiu à termografia aceder a um amplo leque de aplicações civis (J. Eng. Manut), (Academia online).

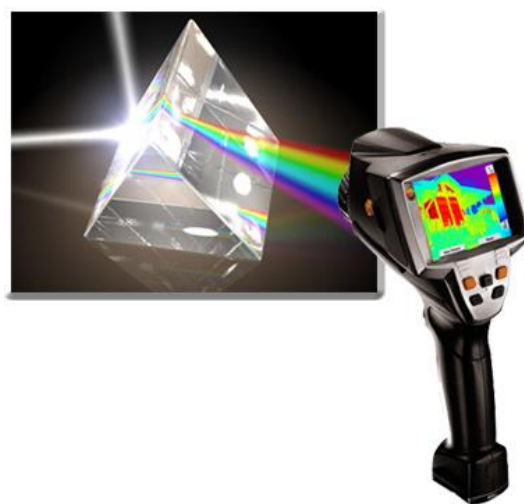


Figura 3.6 - Do prisma de Newton à tecnologia moderna de medição por infravermelhos (Adaptado Academia Testo).

Na reunião com a empresa SISTCentro e com um representante da *LUMA SENSE TECHNOLOGIES*, foi feita uma visita à cabine de projeção e depois de uma

explicação do objetivo da implementação da câmara e apresentação de alguns dados referentes à produção, tais como temperaturas máximas atingidas, tipo de materiais utilizados e temperatura da chama, o representante da *LUMA SENSE TECHNOLOGIES* concluiu que a tecnologia mais adequada seria um pirómetro, como o que se pode ver na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Pirómetro ótico (Adaptado Ffonseca).

Os pirómetros são sensores de temperatura que utilizam como informação a radiação eletromagnética emitida pelo objeto a medir, operam pelo princípio da radiação infravermelha, isto é, detetam a radiação infravermelha dos objetos para determinar a sua temperatura. Ao contrário dos termopares não precisam de estar em contacto direto com o objeto cuja temperatura se pretende medir.

A energia irradiada por um corpo depende da emissividade e da sua superfície. Esta emissividade é máxima para um corpo negro pois este absorve toda a energia radiante que incide sobre ele ($e=1$). Então, os pirómetros são calibrados em relação a um corpo negro com emissividade diferente. Para isso deve-se conhecer a emissividade da superfície que se pretende medir (Ffonseca - Processo, Instrumentação e Ambiente).

Na situação em questão, a emissividade não seria um problema uma vez que a maioria das superfícies que se pretendem medir não têm brilho. Então, a sua emissividade estará sempre perto de 1. Haveria problemas caso as superfícies a revestir fossem brilhantes.

As câmaras termográficas convertem a radiação infravermelha em sinais elétricos tornando as imagens visíveis.

Depois de explicada a diferença entre a câmara e o pirómetro, uma câmara termográfica não seria uma boa opção uma vez que, para além da diferença de preços ser bastante significativa, a termografia não é tão rigorosa e exata quanto a tecnologia baseada no pirómetro. A menor rigorosidade deve-se ao facto de a câmara termográfica fornecer uma distribuição das temperaturas dos objetos e apanhar a radiação da chama transmitindo valores da temperatura do objeto bastante superiores aos reais, sendo que esse erro poderia variar em bastantes graus e prejudicar a avaliação por parte do operador.

Além do pouco rigor que a câmara poderia trazer e do elevado custo associado, seria obrigatório um *software* adequado, para o qual seria necessário um individuo com formação a fim de interpretar e avaliar os dados fornecidos pelo computador. Este seria mais um obstáculo à escolha.

No que respeita aos pirómetros, quando se fala em precisão maior, deve-se ao facto de estes ignorarem a temperatura da chama e de medirem desde um ponto pequeno até uma área na peça.

Um problema comum aos dois equipamentos seriam as poeiras existentes na câmara de projecção. No entanto, para o contornar colocar-se-ia uma carcaça de forma a proteger a ótica, isto porque, no caso dos pirómetros, com o aumento das poeiras a sua capacidade de medir a temperatura da superfície seria reduzida, uma vez que passaria a medir a temperatura das pequenas poeiras que se iriam instalar na ótica.

Da reunião com a empresa Enermeter, que tem uma base tecnológica que se dedica ao desenvolvimento de soluções inovadoras e à medida do pretendido pelo cliente, (Enermeter - Seeing in first), não surgiu qualquer ideia nem proposta de um sistema a implementar no caso em questão, uma vez que, o representante não se mostrou à-vontade com o tema em questão nem com os processos utilizados. Esta é uma empresa mais voltada para produção em série. Ficou então de realizar um estudo do processo HVOF para entender melhor o seu funcionamento e, posteriormente, apresentar uma proposta.

O último fornecedor contactado foi a empresa MRA Instrumentação que é uma empresa líder em soluções para medição e ensaios em Portugal (Grupo Alava Ingenieros).

No decorrer da reunião, e após explicação do pretendido e feita a visita às instalações, chegou-se à conclusão de que seria perfeitamente possível a implementação de uma câmara termográfica. No entanto, foi sugerida a realização de testes experimentais nas instalações com uma câmara, de forma a confirmar a viabilidade da solução, devido às

poeiras que se encontram dentro da câmara de projeção e ainda verificar se o intervalo das temperaturas é correto ou se a diferença entre as temperaturas reais e o que a câmara mede apresenta alguma discrepância. Os resultados dos testes realizados são apresentados no Capítulo 4.

3.3. Sistema de Arrefecimento

Segundo o site da empresa Carburos Metálicos, *“a tecnologia de refrigeração para projeção térmica utiliza vapor de azoto criogénico e o aerossol do azoto procedente da sua evaporação (-195°C) para obter revestimentos de elevada qualidade por projeção térmica, incluindo o carboneto de tungsténio e o cobalto.*

Através desta técnica haverá uma maior rapidez e um menor custo comparativamente com os sistemas de arrefecimento tradicionais. Para além disto, este sistema poderá manter a temperatura da peça num intervalo de +/-10°C. O resultado é um menor custo, visto que não é necessário interromper o processo entre passagens, redução de perdas de pó e gases e uma melhor utilização do equipamento de projeção térmica. Mais adiante é explicado de melhor forma como funciona o sistema e os ganhos previsíveis para a empresa TEandM.

Neste sistema o bocal de refrigeração encontra-se montado de forma estática no braço do robô, como se pode ver na Figura 3.8, para que siga o trajeto da tocha e refrigere a peça durante o processo de revestimento.

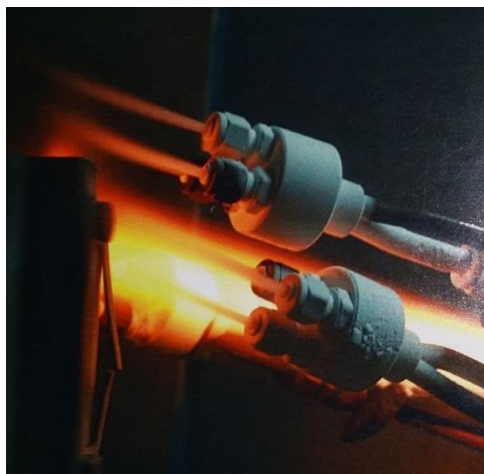


Figura 3.8 - Sistema de refrigeração (Adaptado Carburos Metálicos).

Este sistema pode ter incluída uma câmara termográfica para monitorização e controlo das temperaturas.

O sistema avançado de refrigeração oferece:

- *Intensidade de refrigeração variável em função das temperaturas reais e os valores especificados pelo utilizador;*
- *Visualização em tempo real da temperatura;*
- *Armazenamento de dados e imagens.”*

Os contactos com a empresa Carburos Metálicos realizaram-se via internet, uma vez que já tinha existido um contacto anterior por parte da empresa. Seria agora necessário o envio de alguns dados retirados da produção por forma a fazer uma avaliação mais concreta das vantagens e ganhos que um sistema de refrigeração traria. Realizaram-se dois documentos com duas peças distintas com a resposta a algumas perguntas que foram colocadas, ponto 3.5.

Realizou-se uma reunião presencial com a empresa Carburos Metálicos de forma a fazer uma apresentação dos ganhos que seriam obtidos com a implementação do sistema e também uma apresentação mais detalhada de como o mesmo funciona. Explica-se agora em detalhe o seu funcionamento. É utilizado um mix de azoto líquido e gasoso, uma vez que é necessária uma temperatura constante ao longo do revestimento. Uma outra razão para existir um gás e um líquido prende-se com o facto de que se apenas fosse azoto líquido, quando este fosse lançado, haveria um grande choque térmico. Este sistema em modo automático faz a gestão do mix do gás e do líquido de forma alternada, de forma a não ultrapassar a temperatura máxima que o processo poderá atingir. Assim, inicia-se com fluxo gasoso, uma vez que a temperatura nas passagens iniciais não é elevada, apenas se começa a misturar azoto líquido ao azoto gasoso quando a temperatura fica perto da que é previamente definida como sendo a temperatura máxima que o processo pode atingir para determinada peça.

É possível definir-se uma temperatura máxima e a partir daí o sistema gere a alternância entre fluxo gasoso e líquido.

Com o sistema de arrefecimento apresentado, é viável a instalação de no máximo 5 bocais, podendo-se definir temperaturas diferentes ou iguais para cada um dos deles, isto porque em modo automático o sistema é capaz de gerir os fluxos gasosos e líquidos para cada um dos bocais instalados. Assim, há a possibilidade de ter bocais

parados caso exista algum ponto em que não seja importante o arrefecimento. Como foi referido acima, esta tecnologia tem incorporada uma câmara termográfica ou um pirómetro. No entanto, neste caso o mais recomendado seria uma câmara, com a qual é possível tirar fotografias e fazer a compilação de todos os dados obtidos ao longo do revestimento da peça, obtendo-se um ficheiro pequeno.

Para além dos ganhos que seriam alcançados no caso em questão e das vantagens referidas acima, foram ainda apresentadas mais vantagens que o sistema traz:

- Menor quantidade de pó, maior qualidade em menos tempo;
- Menor a diminuição da dureza do revestimento, isto porque a dureza do revestimento diminui com o arrefecimento;
- Programações online, ou seja, podem programar-se todos os detalhes pretendidos enquanto o robô funciona;
- O operador apenas tem de fazer a programação dos detalhes pretendidos.

Após explicação do funcionamento do sistema foram apresentados então os ganhos e benefícios reais que serão alcançados, tendo por base os ficheiros enviados, pela autora da presente tese, que se encontram em anexo. Esses benefícios são:

- Controlo preciso da temperatura do substrato e do revestimento;
- Ganhos até 62% em relação ao consumo de pó;
- Ganhos até 68% em relação aos gases de processo;
- Ganhos até 62% na utilização da cabine, ou seja, aumento até 62% da produtividade da cabine de projecção;
- Melhoria da qualidade do produto devido à atmosfera inerte;
- Aumento da eficiência de deposição devido à menor oxidação do revestimento;
- Aquisição de dados de temperatura de revestimento;
- Imagens térmicas da peça revestida ao longo do processo;
- Instalação fácil e flexível do sistema.

Não se apresentam os ganhos reais em termos económicos por uma questão de confidencialidade.

Este sistema inclui equipamentos standard que compõem o sistema básico de arrefecimento. No entanto, iriam ser apresentadas outras opções de escolha de forma a

personalizá-lo mais às necessidades da empresa. Essa escolha poderá ser realizada num trabalho futuro.

3.4. Sistema de Visão Artificial

De acordo com o site da Orizon Vision “a Visão Artificial tem tido grandes avanços ao longo dos últimos anos, levando ao desenvolvimento de aplicações para todos os grandes setores. Para os setores onde a qualidade e a precisão são valores imprescindíveis, a Visão Artificial presta um serviço insubstituível analisando 100% da produção com uma precisão e cadência muito grandes.”

O sistema de visão artificial é um processo automatizado de captura, digitalização e análise de imagem, que obtém resultados para uma tomada de decisões posteriores em muitas aplicações e mercados.

A Visão Artificial tem tido cada vez mais aderência por parte das empresas para novas aplicações de forma a aumentar a produtividade e a competitividade. Alguns exemplos são: inspeção de componentes eletrônicos e semicondutores, indústria alimentar e controlo de qualidade de qualquer processo industrial.

As tecnologias ilustradas na Figura 3.9 são utilizadas para implementar sistemas de visão artificial.



Figura 3.9 - Tecnologias de Visão Artificial (Adaptado MRA Instrumentação).

Pretende-se com a implementação de um sistema de visão artificial, um laser ou uma câmara que passe sobre a peça e faça a medição inicial das peças antes de começar a revestir (um sistema idêntico ao que aparece na Figura 3.10) de modo a que à medida que é colocado revestimento, seja feita uma comparação com a peça inicial e, assim, fazer um cálculo da quantidade de revestimento já colocado.

Com a aquisição deste sistema pretende-se um aumento da produtividade, associada à diminuição das paragens para medição de espessura e ainda poupanças ao nível do pó uma vez que se controla a cada passagem a espessura da peça. As paragens para medição são feitas visto que o operador pretende que a peça tenha aproximadamente as cotas pretendidas de revestimento. Se deixa passar muito para além das cotas há um desperdício de pó. Com este sistema pretende-se também diminuir este desperdício.

Às duas empresas, Enermeter e MRA Instrumentação, foi colocada a possibilidade de implementação de um sistema de visão artificial que conseguisse medir a espessura de qualquer peça durante o revestimento.

A primeira após ser explicado o pretendido, não teve qualquer proposta a apresentar. A segunda, no que diz respeito a esta matéria, não garantiu que tal se conseguisse uma vez que a maioria das vezes as peças se encontram em rotação e não centradas.

Uma solução passaria por um laser que efetuasse uma comparação entre a parte superior e a parte inferior da peça. Este funcionaria apenas se a peça a revestir tivesse a mesma dimensão inicial, ou seja, uniforme, e apenas a parte inferior ou superior fosse revestida. Assim, à medida que fosse colocado revestimento, o laser faria a comparação com a diferença entre a parte superior e inferior, sendo possível monitorizar a espessura. No entanto, uma vez que na empresa as peças nunca são iguais esta não seria uma opção viável. Uma outra solução passaria por uma câmara 3D, como a que se vê na Figura 3.10, que seria viável apenas quando as peças estão estáticas e não se aplicaria a todas as situações.



Figura 3.10 - Câmera 3D (Adaptado MRA Instrumentação).

3.5. Questionários para a Obtenção de Ganhos Concretos

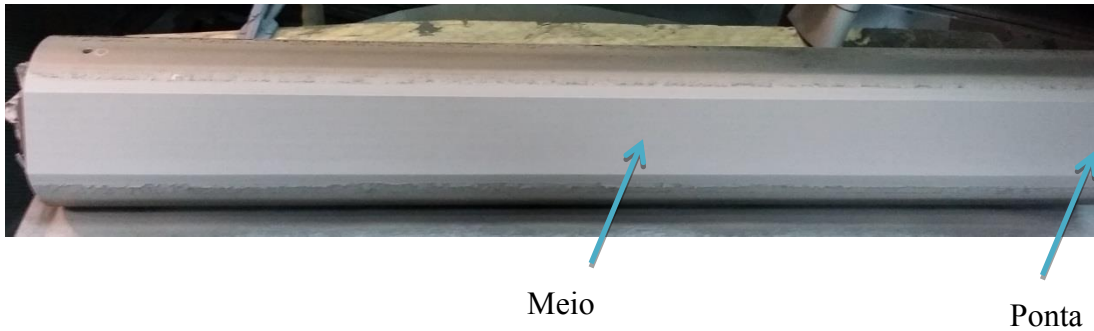


Figura 3.11 - Lateral revestida do veio triangular.



Figura 3.12 - Lateral do veio triangular.

Dimensões

Veio com 3 faces de 70 (diâmetro interno)x860 [mm]

1) Qual o sistema HVOF (tocha) existente?

DJ 2700

2) De que forma é normalmente medida a temperatura do revestimento/substrato?

Utilizando um termopar de contacto.

3) Quantas partes diferentes estão a revestir?

Neste caso três partes.

4) Quantas passagens estão a fazer para obter a espessura de revestimento em cada parte?

Na 1ª parte foram necessárias 14 passagens, na 2ª - 17 e na 3ª - 21 passagens.

5) Qual a espessura de revestimento pretendida para cada parte?

1ª parte (revestida) – inicial – 14,52mm → final – 14,84 mm

2ª parte (revestida) – inicial – 14,47 mm → final – 14,9 mm

3ª parte (revestida) – inicial – 14,4mm → final – 14,83 mm

6) Qual o tempo total de revestimento para cada parte?

1ª e 2ª partes – 1 hora

3ª parte – cerca de 1h10

Estes tempos incluem paragens para medição de temperatura e da espessura do revestimento. Neste caso não foram efetuadas passagens de arrefecimento, isto é, o robô não tem programada uma passagem apenas de ar.

7) Quantas são e quanto tempo duram as passagens de arrefecimento em cada parte?

Neste caso não houve passagens de arrefecimento.

8) Qual a temperatura da superfície do substrato e do revestimento durante o processo de revestimento em cada parte?

Na 1ª parte revestida, a temperatura do revestimento na ponta variou entre 86°C e 114,7°C, no meio esta situou-se entre os 94°C e os 115,7°C.

Na 2ª parte revestida a temperatura na ponta variou entre os 111,2°C e os 134,2°C, no meio esta esteve entre os 116,1°C e os 146,3°C.

Na 3ª e última parte revestida a temperatura variou entre 115°C e 129°C, já no meio esta esteve entre os 131°C e os 142°C.

9) Qual a capacidade de carga máxima do robô?

O robô pode transportar um máximo de 30kg.

10) Qual é o trajeto padrão do robô/tocha no processo de revestimento em cada parte?

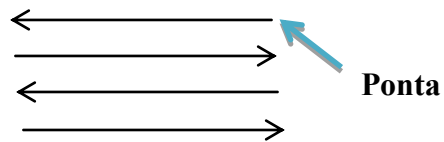




Figura 3.13 - Haste em aço inox revestida.

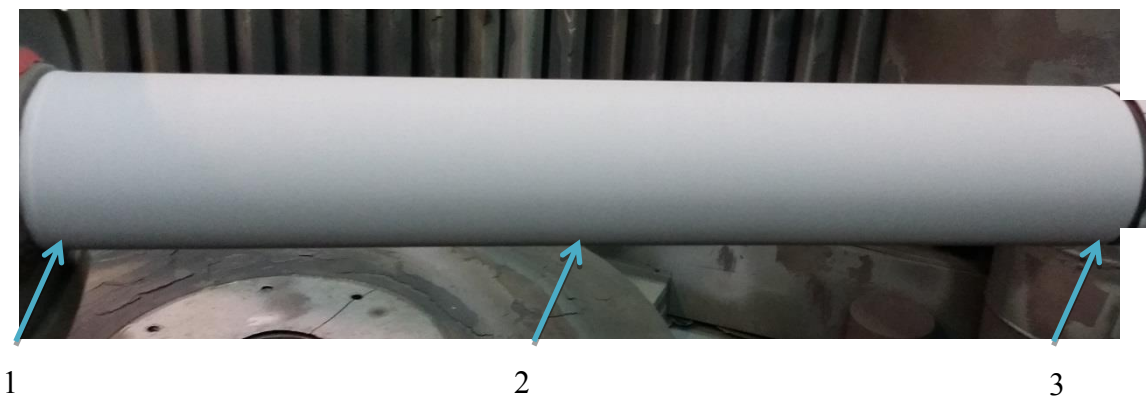


Figura 3.14 - Parte revestida da haste.

Dimensões

Ø 80x700 [mm]

1) Qual o sistema HVOF (tocha) existente?

DJ 2700

2) De que forma é normalmente medida a temperatura do revestimento/substrato?

Utilizando um termopar de contacto.

3) Quantas partes diferentes estão a revestir?

Neste caso apenas uma parte.

4) Quantas passagens estão a fazer para obter a espessura de revestimento em cada parte?

Para obter a espessura de revestimento pretendida foram necessárias 228 passagens.

5) Qual a espessura de revestimento pretendida para cada parte?

1 – inicial – 77,41mm → final – 80,61mm

2 – inicial – 77,38mm → final – 80,63mm

3 – inicial – 77,12mm → final – 80,64 mm

6) Qual o tempo total de revestimento para cada parte?

Para revestir esta peça foram necessárias 2 horas.

Neste caso no final de cada ciclo, houve uma passagem de arrefecimento, por isso este tempo inclui paragens para medição de temperatura e espessura e também as passagens de arrefecimento no final de cada seis ciclos de revestimento.

7) Quantas são e quanto tempo duram as passagens de arrefecimento em cada parte?

Foram realizadas 29 passagens de arrefecimento com uma duração de 12s.

8) Qual a temperatura da superfície do substrato e do revestimento durante o processo de revestimento em cada parte?

1 – variou entre os 20°C e os 146,3°C.

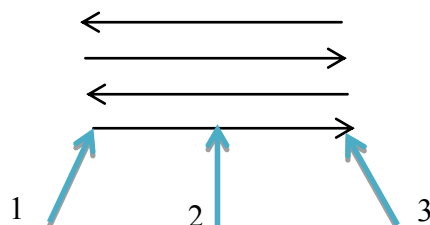
2 – variou entre os 20°C e os 165,8°C

3 – variou entre os 20°C e os 170,8°C

9) Qual a capacidade de carga máxima do robô?

O robô pode transportar um máximo de 30kg.

10) Qual é o trajeto padrão do robô/tocha no processo de revestimento em cada parte?



Pontos relativos à Figura 3.14.

4. RESULTADOS DOS TESTES COM UMA CÂMARA TERMOGRÁFICA

Na Figura 4.1, pode ver-se uma imagem termográfica de uma esfera de grandes dimensões durante o processo de revestimento retirada do vídeo realizado com o *software* utilizado aquando da realização de testes com a empresa MRA Instrumentação, com o auxílio de uma câmara termográfica.

De seguida, explicam-se os elementos que aparecem na imagem e o que significa cada um deles.

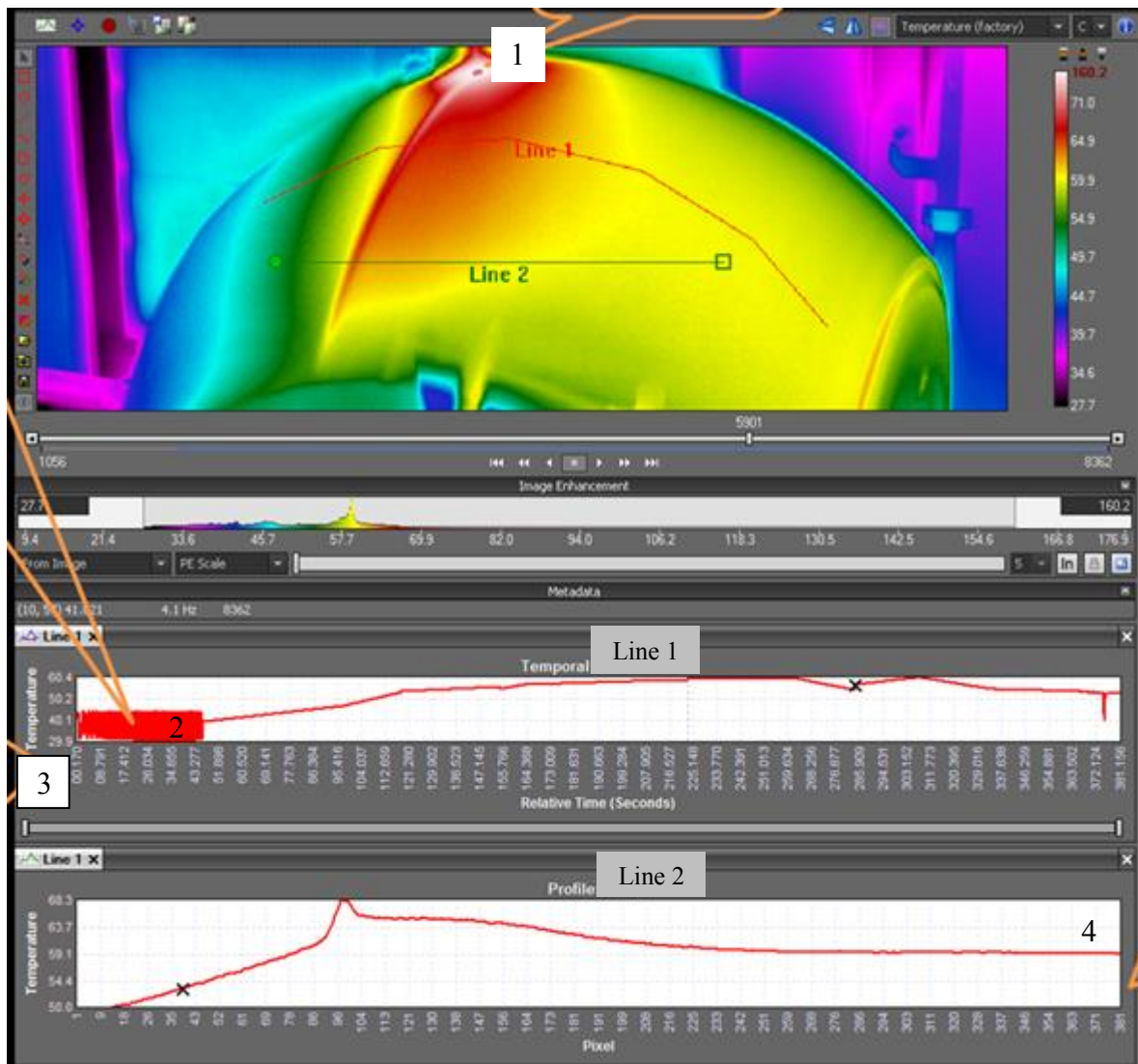


Figura 4.1 - Teste com câmara termográfica.

De referir que o movimento da tocha foi realizado da direita para a esquerda.

No ponto assinalado com o número 1 na Figura 4.1, a zona a vermelho diz respeito à chama produzida pela tocha HVOF.

A parte da curva assinalada com o ponto 2, diz respeito à transição entre o momento em que a esfera começa a rodar até atingir a sua velocidade de processamento. A variação da temperatura deve-se à baixa velocidade de rotação e permite ver a superfície do elemento e a parte central (oca).

O ponto 3 diz respeito a um gráfico temporal da temperatura média na linha 1 (vermelha na Figura 4.1). Pode observar-se como a temperatura aumenta ao longo do tempo até chegar a uma estabilidade, no final do processo.

O quarto e último ponto representa um gráfico do perfil na linha 2 de temperatura ao longo da superfície. Como se observa, no ponto de aplicação da chama, a temperatura é mais elevada, vê-se ainda como a temperatura aumenta após a passagem da tocha.

De notar que apenas foi realizada uma passagem de revestimento para o referido teste, pelo que a temperatura somente se elevou desde 40°C até 60°C, Contudo, antes do início dos testes, houve uma passagem de pré-aquecimento da peça que não foi filmada. Após esta passagem foi medida a temperatura da esfera de forma a verificar se esta correspondia ao que a câmara tinha lido durante o processo, tendo-se verificado que a diferença entre as temperaturas variava apenas em um ou dois graus.

Pode então concluir-se que a temperatura da chama afeta a temperatura real da esfera. Contudo, após a passagem da tocha, a câmara volta a calcular a temperatura e fornece os valores corretos ao operador Assim, este pode ser um método possível para o controlo da temperatura.

5. CONCLUSÕES

Os principais objetivos inicialmente propostos para o presente trabalho foram cumpridos.

Através da recolha de dados da produção, percebe-se de melhor forma a dificuldade que existe na monitorização e controlo das temperaturas ao longo do processo de revestimento com a tecnologia HVOF, única que foi avaliada neste estudo. Verifica-se que as temperaturas não se mantêm estáveis, existindo picos de temperatura durante o processo, e que de peça para peça os valores diferem. O facto de não haver estabilidade de temperaturas e dos coeficientes de dilatação térmica dos materiais da peça e do revestimento serem distintos, pode levar à formação de fissuras, podendo estas conduzir à repetição do processo de revestimento na peça. Segundo o representante da empresa Carburos Metálicos, o ideal seria fixar um valor constante de temperatura da peça, entre os 90°C e os 100°C.

No que respeita aos de fornecedores foi realizada uma seleção de três que possuíam os dois equipamentos pretendidos, isto é, câmaras termográficas e sistemas de visão artificial. Com estes foi possível verificar a possibilidade de implementação de cada um dos sistemas. No caso do sistema de arrefecimento, o contacto com o fornecedor já havia sido feito, foram então enviados dados pela autora, para as conclusões concretas dos ganhos.

De acordo com o referido no capítulo três, em relação a um sistema de visão artificial para a medição das espessuras, este não é de fácil implementação na medida em que as peças realizadas na empresa não são standard nem uniformes e, a maioria das vezes, não se encontram centradas.

O representante da *LUMA SENSE TECHNOLOGIES* e a empresa MRA Instrumentação têm uma visão diferente em relação às câmaras. Para o representante *LUMA SENSE TECHNOLOGIES*, à primeira vista, uma câmara não seria viável devido à temperatura da chama da tocha que iria afetar os resultados que a câmara iria fornecer. Para esta empresa a melhor escolha recairia então num pirómetro, uma vez que este é mais rigoroso e também mais económico. Para a segunda empresa a câmara termográfica seria uma escolha acertada, porque o erro que seria devolvido após a passagem da chama não

seria significativo para os interesses da empresa. Esta explicação mostrou-se pertinente quando foram realizados os testes com uma câmara termográfica na câmara de projeção durante o processo de revestimento. Apesar de a câmara devolver a temperatura da chama quando esta passa por cima do objeto, verificou-se que após esta passagem a câmara volta a fornecer dados corretos da temperatura do objeto sem a influência da chama. Daqui pode então concluir-se que a câmara termográfica seria uma boa opção para monitorizar a temperatura durante o processo de revestimento.

O sistema de arrefecimento mostrou ser uma medida que traria ganhos elevados, tanto a nível técnico como económico. No que diz respeito ao aspeto económico não são revelados valores concretos de poupança por uma questão de confidencialidade. Estes lucros dizem respeito a ganhos na ordem dos 62% no consumo de pó, 68% nos gases de processo, 62% no tempo de utilização da cabine de projeção, ou seja, um aumento de 62% de produtividade. Ao nível técnico os ganhos referem-se à melhoria da qualidade do produto, aumento da eficiência de deposição e um controlo preciso da temperatura do substrato e do revestimento. Analisando os ganhos que poderão vir a ser obtidos com este sistema, embora não se esteja a ter em conta o custo da instalação do sistema, pode concluir-se que este seria muito benéfico para a empresa tornando-a mais competitiva e evitando problemas com as fissuras e com a manutenção da temperatura em valores constantes decorrentes do sistema HVOF.

5.1. Trabalho futuro

O trabalho futuro, dando continuidade ao já realizado, passa por analisar as propostas apresentadas. Verificar qual dos sistemas é mais viável economicamente, fazendo o balanço dos ganhos e o preço de cada um.

Outra atividade que poderá ser realizada no futuro prende-se com o contacto com outros fornecedores de sistemas de visão artificial, de forma a encontrar um sistema que seja capaz de monitorizar as espessuras em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A Termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios. (2013). *Jornadas de Engenharia de Manutenção*, 23.

Academia online. (s.d.). Obtido em Abril de 2015, de <http://www.academiatesto.com.ar>

Carburos Metálicos. (s.d.). Obtido em Abril de 2015, de www.carburos.com.

Enermeter - Seeing in first. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2015, de www.enermeter.pt

Engineered Coating Solutions. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de <http://www.tstcoatings.com>

FFonseca - Processo, Instrumentação e Ambiente. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de www.ffonseca.com

Grainger, S. (1989). *Engineering Coatings - design and application*. Abington, Cambridge: Abington Publishing.

Grupo Alava Ingenieros. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2015, de www.mra.pt

Handbook of Hard Coatings. (2001). USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing, LLC.

OrizonVision - Making Vision Happen. (s.d.). Obtido em Março de 2015, de www.orizon-vision.com

Pereira, C. d. (2013). *Melhoria dos Procedimentos da Manutenção e Metalografia na TEandM*.

Responsive Coating Technology. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2015, de <http://www.thermalspray.com/>

Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A. (s.d.). Obtido em Fevereiro de 2015, de www.teandm.pt