



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

Optimização de Processo PVD tendo em vista ganhos de produtividade.

Autor: Manuel Fernando Ferreira

Orientador: Professor Doutor Manuel Fernando Vieira

Orientador de campo: Eng. Nuno Costa

Porto. 17 de Abril de 2008

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Candidato: Manuel Fernando Ventura Sá Ferreira

Código: 020508013

Titulo: Optimização de processo PVD tendo em vista ganhos de produtividade.

Data: 17 de Abril de 2008

Local: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C 603 - 15:00h

Júri	Presidente: <i>Professor Doutor José Roberto Tinoco Cavalheiro</i>	DEMM-FEUP
	Arguente: <i>Professor Doutor Maria Teresa Freire Vieira</i>	DEM - FCTUC
	Orientador: <i>Professor Doutor Manuel Fernando Vieira</i>	DEMM_FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira, Director do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por ter aceite ser meu orientador desde Setembro de 2006, altura em que se iniciou a parceria entre o DEMM e a Mahle Componentes de Motores S.A. Agradeço todo o seu envolvimento, empenho e objectividade na forma como me orientou, articulando, com sucesso, os interesses que a empresa imputou ao meu trabalho com as exigências inerentes à sua componente pedagógica. O seu sentido crítico construtivo na apreciação aos avanços dos trabalhos e toda a confiança depositada na minha pessoa contribuíram muito positivamente para o gradual desenrolar de todo o trabalho.

Ao Professor Doutor Luís Filipe Malheiros, Director do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por ter depositado em mim toda a confiança possibilitando a minha integração no meio industrial numa empresa pertencente a um grupo tão conceituado, onde o DEMM não tinha ainda tido a oportunidade de dar a conhecer o seu “produto”.

Ao Sr. Engenheiro João Belo Cardoso, Director do Departamento de Qualidade da Mahle Componentes de Motores S.A. por, desde o início, ter sido a ponte entre a empresa e o DEMM, bem como por todo o interesse demonstrado no acompanhamento dos trabalhos que realizei na empresa desde 21 de Fevereiro de 2007 até à data.

Ao Engenheiro Nuno Costa por todo o conhecimento que me transmitiu e, fundamentalmente pela receptividade a novas ideias, sugestões e disponibilidade demonstrada em assumir o risco, algo que muitas vezes é uma grande barreira ao sucesso de uma parceria Universidade \ Indústria e até mesmo ao desenvolvimento da própria empresa. Seguindo este raciocínio todos os resultados são favoráveis, inclusive os que, no fim de analisados, nos sugerem que se deve seguir um caminho alternativo ou, na melhor das hipóteses, manter o que está a ser feito. Reconheço que todo o trabalho que a seguir se apresenta só foi possível por existir vontade de *experimentar para conhecer*, sentindo-me um privilegiado por ter sido acompanhado pelo Eng.º Nuno Costa.

Ao Viriato Vieira, operador de qualificação elevada do laboratório químico e metalográfico, por todo o apoio, conhecimento e sugestões que me transmitiu ao longo destes meses.

PREFÁCIO

Este trabalho representa o culminar do Mestrado Integrado de Engenharia Metalúrgica e Materiais, vindo no seguimento de dois trabalhos prévios desenvolvidos entre a Mahle, Componentes de Motores S.A. e o Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, o qual muito me orgulho de representar. Aqui, ao longo de 5 anos foi-me atribuído um leque de competências que gradualmente desenvolverei e, estou certo, serão perfeitamente adequadas para superar as necessidades da exigente e cativante envolvente industrial.

O grupo Mahle é um dos 3 maiores fabricantes de componentes e sistemas para aplicação em motores de combustão interna. Tem um universo de 110 unidades fabris distribuídas por 4 continentes (excepto África), 7 centros tecnológicos (Estugarda, Northampton, 2 em Detroit, São Paulo, Tóquio e Xangai). Ao todo são cerca de 47.000 os colaboradores deste grupo de origem alemã fundado em 1920 por dois irmãos Hermann e Ernst Mahle. Ter a oportunidade de realizar o trabalho de mestrado numa das unidades deste grupo, aliado ao facto de ter estudado e lidado com uma tecnologia que poucas empresas possuem em Portugal, é obviamente um enorme privilégio.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 A distribuição de espessuras	2
1.2 Dureza e morfologia dos depósitos	5
2. TRATAMENTO PVD PARA ENDURECIMENTO DE SUPERFÍCIE	7
2.1 Deposição em fase de vapor - Evaporação Catódica	7
2.2 A importância da aplicação de campos magnéticos externos	9
2.3 O equipamento	12
2.4 Fontes de evaporação	13
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	16
3.1 Testes de validação dos parâmetros de corrente das bobines	16
3.2 Implementação de novos parâmetros no processo produtivo	17
3.3 Identificação do ponto crítico	18
3.4 Análise do desgaste das fontes de evaporação por perfilometria	19
3.5 Alteração das correntes do arco eléctrico	21
3.6 Permuta de posição das fontes de evaporação	23
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	24

4.1 Testes de validação dos parâmetros de corrente das bobines	24
4.2 Perda de espessura e trajectórias localizadas	30
4.3 Variação de espessuras	31
4.4 Teste a 140 A (todos os cátodos)	32
4.5 Teste a 170 A (cátodos dos topos)	33
4.6 Perfilometria	37
4.7 Avaliação do refugo	48
4.8 Considerações finais	49
5. CONCLUSÕES	51
6. BIBLIOGRAFIA	53

OBJECTIVOS

É propósito principal deste trabalho a otimização do desempenho de um dos quatro equipamentos PVD de evaporação a arco catódico que a Mahle Componentes de Motores S.A. possui na sua unidade fabril.

Pretende-se otimizar o perfil de erosão experimentado pelas fontes de evaporação e uniformizar a distribuição de espessuras ao longo da vertical da câmara de deposição, variando os parâmetros das bobinas dos cátodos.

Este trabalho pretende igualmente disponibilizar um conjunto de sugestões que sirvam de alternativas viáveis ao incremento da eficiência do processo de evaporação a arco catódico.

RESUMO

O processo de evaporação catódica é utilizado na Mahle Componentes de Motores S.A. para o revestimento de segmentos de motor com nitreto de cromo. No caso particular deste trabalho, a optimização do processo acima mencionado passa pelo estudo focalizado no consumo das fontes de evaporação de cromo, as quais são os cátodos do processo. Cada fonte tem associadas três bobinas: interna; intermédia e externa. Os valores de intensidade de corrente das bobinas dos cátodos foram actualizados para valores progressivamente mais baixos à medida que as fontes eram consumidas, por forma a propiciar um melhor aproveitamento do material constituinte (Cr) e, a partir daí, tentar eliminar o gradiente de espessuras existente ao longo da vertical da câmara de deposição.

Através de medições por perfilometria, verificou-se que a actualização dos parâmetros das bobinas dos cátodos origina melhorias significativas no aproveitamento de material nas zonas mais centrais das fontes de evaporação, e que o arco eléctrico tem uma pronunciada tendência em circular nas zonas mais periféricas das fontes de evaporação. As diferenças nos perfis de erosão entre as fontes de evaporação do meio e dos topos, podem ser contrariadas permutando as posições das fontes quando estas se encontrem a meio de vida de utilização, conseguindo-se um aproveitamento de material suficiente para a execução de um tratamento suplementar.

As alterações na distribuição de espessuras apenas se conseguiram alterando as correntes do arco eléctrico. Aumentando a intensidade de corrente no arco eléctrico que incide nos cátodos dos topos de 155 A para 170 A, consegue-se um aumento das espessuras de camada nas peças tratadas nos extremos das árvores, reduzindo o gradiente de espessuras. Com estes parâmetros de intensidade de corrente de arco eléctrico as taxas de deposição igualam-se em toda a vertical da câmara de deposição - 4 $\mu\text{m}/\text{h}$. A uniformização de espessuras resultante permite a redução do tempo de processo e a idealização de novas metodologias de controlo de peças.

ABSTRACT

Cathodic evaporation is used at Mahle Componentes de Motores S.A. to the deposition of chromium nitride coating on piston rings. In the present work, the process optimization is focused in the consumption of chromium evaporation sources, which are the process cathodes. The values of current applied to the cathode coils were lowered with the aim of improve cathode consumption and reduce the thickness gradient existing along the vertical of the deposition chamber.

Significant improvements were identified in the material consumption by perfilometry measurements. These improvements were more noticeable at the inner areas of the evaporation sources. This is explained by the tendency of the electric arc to travel on the peripheral paths of the evaporation sources. By replacing the positions of the evaporation sources between them it's possible to achieve sufficient improvements in material consumption to carry out a supplementary treatment.

The last goal didn't succeed only with cathode coils parameters variation. Although, by increasing the arc current on the cathodes of the top of the deposition chamber from 155 A to 170 A, it was noticed higher values of coating thicknesses in the pieces treated at the tops of the spindles reducing the thickness gradient. Using these parameters for the arc current, the deposition rate is adjusted to 4 $\mu\text{m/h}$ all over the vertical of the deposition chamber. This allows the reduction of the process time and makes possible the implementation of other methodologies for the control of the piston rings.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho reporta à optimização de um processo PVD, o qual se insere na produção das peças de maior valor acrescentado da Mahle, Componentes de Motores S.A. Os segmentos estudados são em aço inoxidável martensítico (16 a 18% Cr) para aplicação na primeira canaleta de pistões de camião. São por isso designados como segmentos de compressão. À peça em questão é exigida uma durabilidade mínima de um milhão de quilómetros, sob condições de serviço bastante exigentes, nomeadamente a nível de desgaste da superfície por contacto com as paredes da camisa do cilindro onde o pistão tem o seu movimento unidireccional. Torna-se portanto capital prover as faces de trabalho destas peças com elevadas durezas de forma a se reduzirem os coeficientes de atrito e se precaverem falhas catastróficas, no limite a gripagem do motor. Racionalizar o consumo de óleo lubrificante e de combustível, sem esquecer as essenciais competências de vedação entre a câmara de combustão e o cárter do óleo para que o motor não perca rendimento, são outras das prioridades adjacentes ao fabrico destas peças.

O revestimento escolhido para satisfazer os intentos acima descritos é o nitreto de crómio - CrN, o qual é aplicado sobre substratos em aço inoxidável martensítico previamente sujeitos a um tratamento termoquímico de nitruração gasosa. A variante PVD utilizada é a evaporação catódica reactiva. Na figura 1.1 estão representados a peça e os tratamentos a si aplicados.

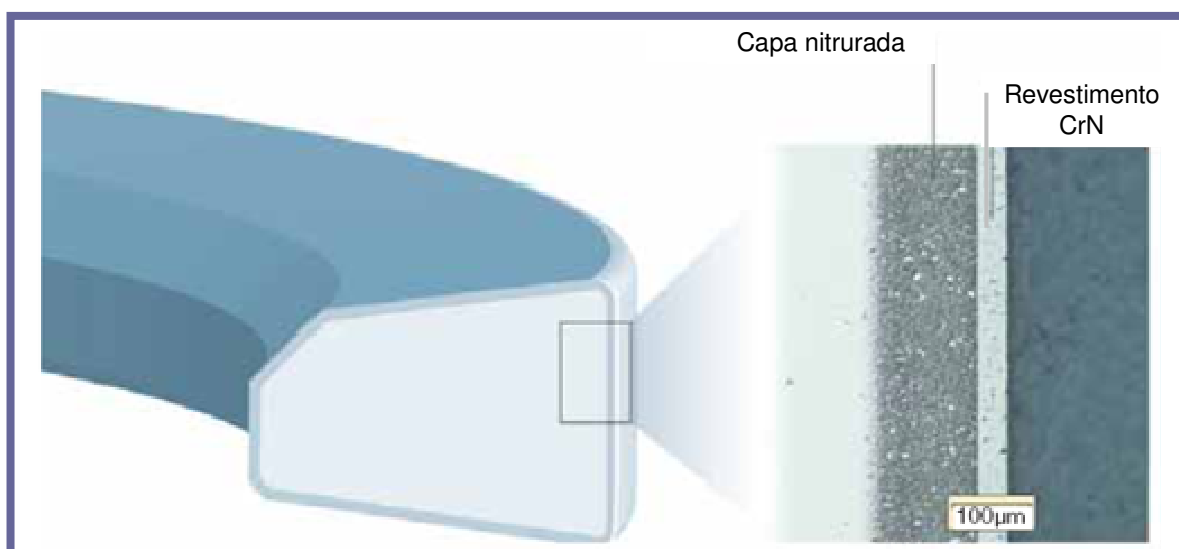


Figura 1.1 - Segmento de aço com tratamento de nitruração e deposição de CrN por PVD, para aplicação em pistão de camião. ^[1]

A designação “reactiva” advém do facto de um dos elementos que forma o revestimento, neste caso o azoto, entrar na câmara de deposição sob a forma de gás. O Cr é previamente evaporado, através de uma descarga de corrente eléctrica transportada sob a forma de um arco eléctrico que incide pontualmente à superfície das fontes de evaporação constituídas pelo supracitado elemento [2]. O tempo de vida de cada conjunto de fontes de evaporação é de 10 tratamentos.

Note-se pelo gráfico 1.1 abaixo que as fontes de evaporação de Cr representam cerca de 76% do custo total dos consumíveis desta técnica, pelo que a possibilidade de se realizar um tratamento suplementar com o mesmo conjunto de fontes de evaporação, ou simplesmente prove-las com perfis de erosão mais favoráveis ao emprego de parâmetros mais exigentes mas que permitam a redução do tempo de processo, tem conseqüências óbvias na redução do custo unitário de cada peça produzida.

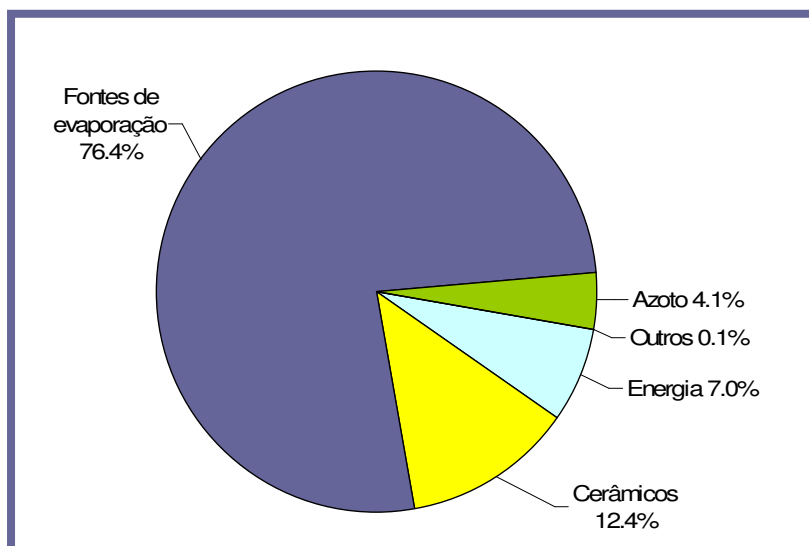


Gráfico 1.1 - Percentagem de custo dos consumíveis do processo PVD de evaporação a arco catódico.

1.1 A distribuição de espessuras

A especificação de espessuras de camada de CrN, após PVD, situa-se entre 26 e 34 μm , sendo que a especificação de produto acabado é, no mínimo 20 μm de camada. Entre as duas etapas de controlo os segmentos passam por duas operações de desgaste abrasivo, cuja remoção de camada não ultrapassa os 3 μm . A remoção de material tem o intuito de prover a superfície das peças com a rugosidade desejada.

É importante que a distribuição das espessuras seja uniforme ao longo da vertical das árvores de forma a garantir que, com o mesmo tempo de tratamento, as peças adquiram espessuras idênticas. As oito fontes de evaporação que o equipamento permite

montar, são distribuídas por 3 paredes da câmara de deposição e colocadas estrategicamente de forma a possibilitar uma distribuição de material tão homogénea quanto possível. A figura 1.2 esquematiza a disposição das fontes de alimentação no equipamento estudado, onde é possível detectar o seu propositado desalinhamento, exactamente para se obter uma distribuição de espessuras tão homogénea quanto possível.

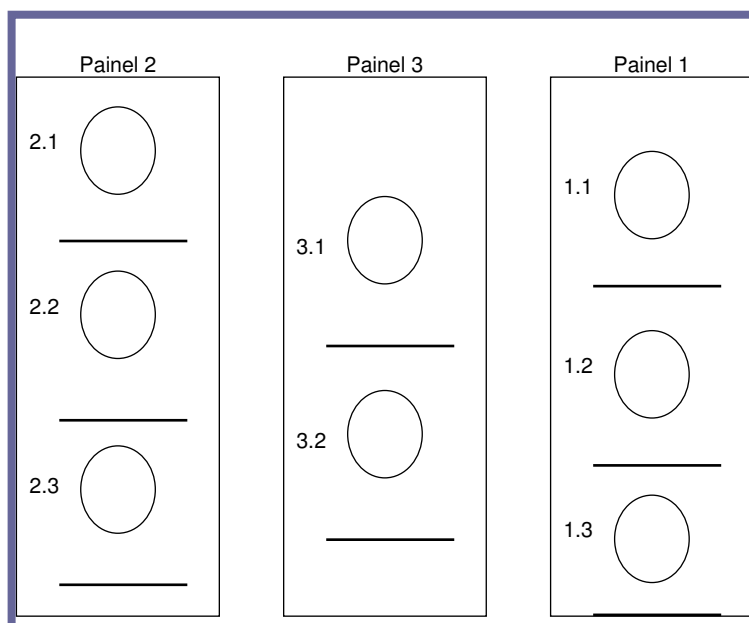


Figura 1.2 - Esquema da disposição das 8 fontes de evaporação de Cr.

Na evaporação catódica o fluxo de material evaporado é tendencialmente linear, o que exige um controlo cuidado à distribuição das espessuras ao longo da vertical da câmara de deposição.^[3] Note-se que, segundo informações recolhidas junto do fornecedor do equipamento aqui analisado, da totalidade de material evaporado das fontes de evaporação localizadas nos topos da câmara de deposição, apenas 1/3 desse material é efectivamente aproveitado para efeitos de deposição. Os restantes 2/3 perdem-se para as paredes do equipamento. Daqui nasce a necessidade de se aplicarem intensidades de corrente ao arco eléctrico superiores nos cátodos dos topos de forma a termos uma densidade de fluxo iónico mais elevada que permita incrementar a taxa de evaporação nestas zonas e conseqüentemente igualar as taxas de deposição verificadas a meio da câmara. ^{[2][3][4][5]}

O histórico das medições de espessura da camada de CrN efectuadas pelo laboratório metalográfico da empresa, permitiu construir a tabela 1.1 onde se constata a existência de um gradiente preferencial de 3 a 4 μm de espessura entre as peças tratadas nos topos das árvores (Anel 1 e Anel 3) e as peças tratadas a meio (Anel 2). Esta diferença

de espessuras, em termos de processo, é o equivalente a cerca de 00h50m de funcionamento do equipamento.

Tabela 1.1 - Distribuição de frequências das diferenças de espessura. As classes representam a diferença de espessura (μm) da camada de CrN entre as peças.

Tabela de Frequências				
Classes	Frequências absolutas		Frequências relativas	
	Anel2 - Anel1	Anel2 - Anel3	Anel2 - Anel1	Anel2 - Anel3
0	1	3	0.28%	0.85%
1	5	3	1.42%	0.85%
2	31	25	8.83%	7.12%
3	154	144	43.87%	41.03%
4	123	140	35.04%	39.89%
5	37	36	10.54%	10.26%
TOTAL	351	351	100%	100%

No gráfico 1.2 estão identificados os limites de especificação estipulados para as camadas de CrN imediatamente após tratamento PVD, bem como as ocorrências dos diferentes valores de espessura adquiridos pelas peças. Note-se o evidente atraso no crescimento de camada verificado para as peças tratadas nos topos das árvores. A espera necessária até que os segmentos dos topos adquiram espessuras no mínimo de 26 μm , implica desperdícios significativos de recursos materiais, nomeadamente desgaste excessivo das fontes de evaporação situadas a meio da câmara de deposição.

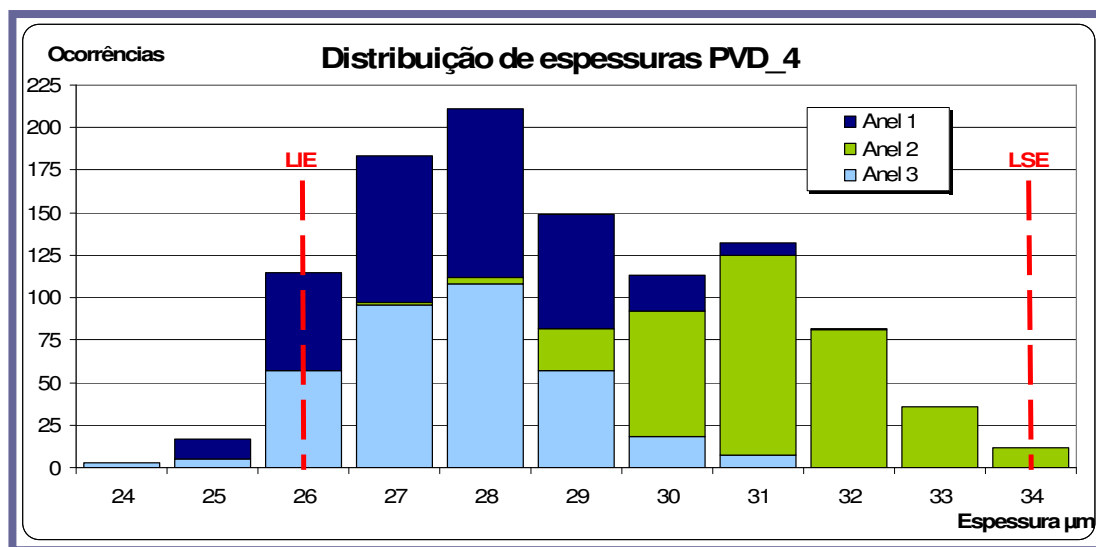


Gráfico 1.2 - Distribuição das espessuras medidas nas peças tratadas na PVD_4.

Recorde-se que apenas cerca de 1/3 do material evaporado dos topos é depositado, logo a maior taxa de evaporação já prevista para estas zonas, devido às maiores intensidades de corrente do arco eléctrico relativamente ao meio, não satisfaz a taxa de deposição desejada. A prova disso mesmo é a existência de um significativo gradiente de espessuras que merece ser eliminado.

1.2 Dureza e morfologia dos depósitos

Os limites de especificação para a dureza situam-se nos 1200 e 1600 HV. A dureza não é dependente da espessura de camada, tal como sugere a comparação entre os gráficos 1.2 e 1.3.

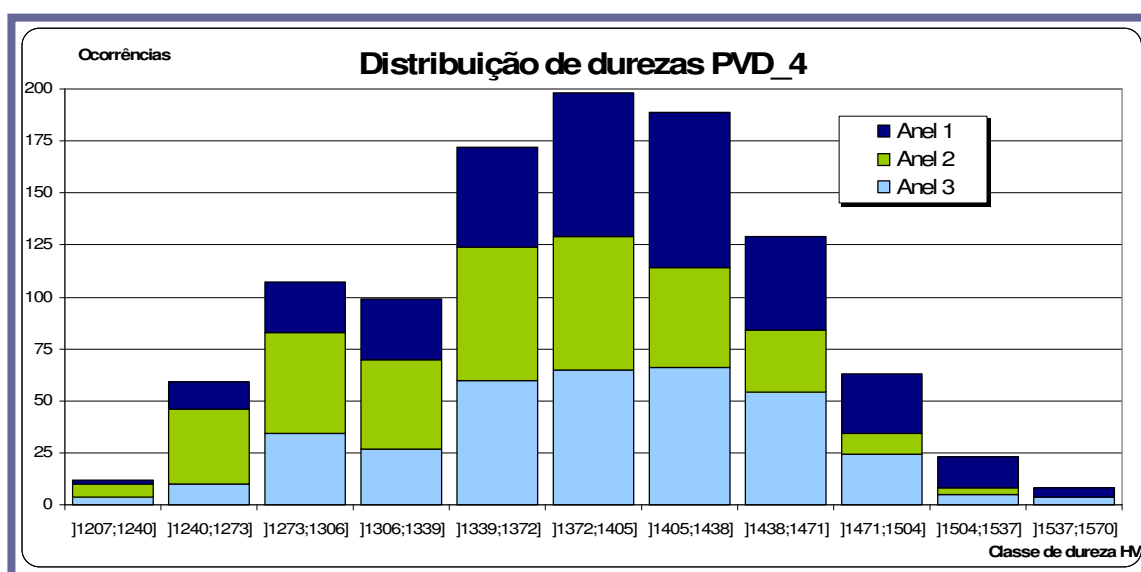


Gráfico 1.3 - Distribuição de durezas na PVD_4.

O revestimento de CrN nestes segmentos tem a si associada alguma porosidade aproveitada como local de armazenamento de óleo lubrificante. Obviamente uma porosidade excessiva deve ser evitada devido ao decréscimo de dureza do revestimento que daí resulta, o que condicionaria a resistência ao desgaste das peças, função principal para a qual são fabricadas. A avaliação do nível de porosidade é efectuada recorrendo-se a três fotos padrão que servem como termo de comparação entre o que é ou não aceitável. Na figura 1.3 está representado o revestimento CrN, efectuado pela empresa, sobre uma capa nitrurada de aço inoxidável martensítico. Atente-se na existência de uma banda de Cr, cuja espessura se pretende compreendida entre 1 e 3 μ m, que tem o duplo propósito de promover uma melhor adesão do revestimento de CrN e servir de barreira à propagação de possíveis fissuras do revestimento. [\[6\]\[7\]](#)

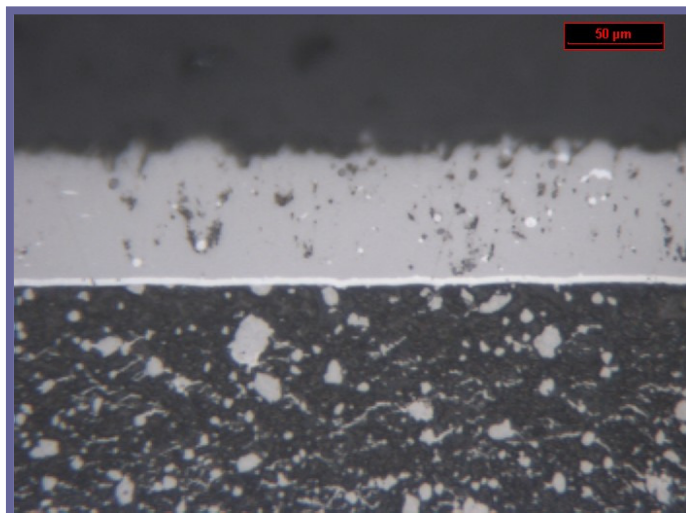


Figura 1.3 - Revestimento de CrN em segmento de aço nitruado.

A figura 1.4 pretende dar uma ideia da forma como a deposição da banda de Cr e a camada de CrN se processa. A intensidade de luz transmitida obriga à utilização de óculos de protecção. Os pontos luminosos são o conjunto de vários pontos de incidência do arco eléctrico num espaço de tempo muito curto. São já visíveis as trajectórias delineadas pelo arco eléctrico à superfície das fontes de evaporação.

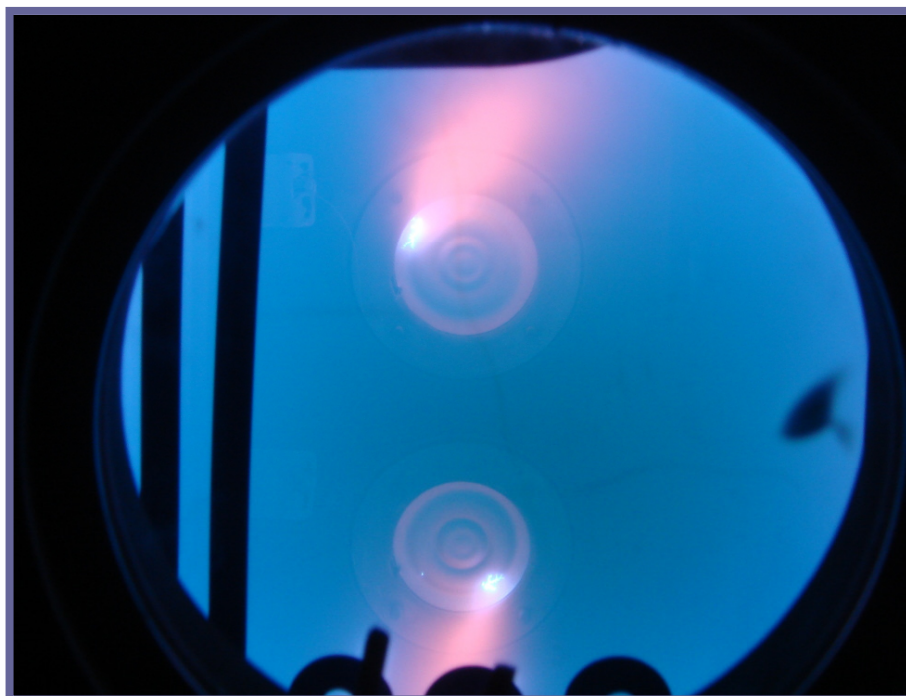


Figura 1.4 - Aspecto da evaporação de Cr de fontes de evaporação em fim de vida.

2. TRATAMENTO PVD PARA ENDURECIMENTO DE SUPERFÍCIE

2.1 Deposição em fase de vapor - Evaporação Catódica

Nas técnicas PVD a deposição de filmes envolve três fases: 1) a ionização; 2) transporte das espécies entre a fonte de material e o substrato, e finalmente 3) a condensação à superfície do substrato e consequente formação do revestimento. A versatilidade das técnicas PVD, permite controlar cada uma destas três fases, esquematizadas na figura 2.1 para o caso particular da evaporação catódica. [\[8\]](#)

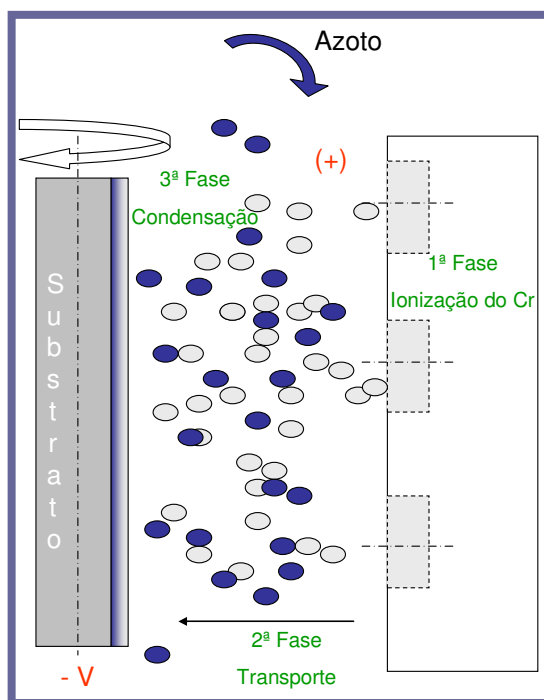


Figura 2.1 - Representação das 3 fases do processo PVD. Deposição de CrN.

No caso desta técnica, a primeira fase é controlada fundamentalmente pela intensidade de corrente transportada pelo arco. Esta permite a obtenção de um plasma denso devido ao elevado grau de ionização das espécies que o constituem. Este deve ser mantido nestas condições através de uma intensa taxa de evaporação do material dos cátodos, a qual permite taxas e energias de deposição elevadas e a obtenção de depósitos espessos e com boa adesão. [\[2\]](#) Caso sejam suficientemente intensos, os campos magnéticos externos aplicados aos cátodos, por alteração da geometria do campo, também podem influenciar o grau de ionização das espécies constituintes do plasma. [\[9\]](#)

A fase de transporte das espécies entre as fontes de evaporação e os substratos pode ser controlada pela polarização aplicada a estes últimos e pela utilização de filtros magnéticos na zona do plasma. A polarização influencia a energia com que as espécies

chegam à superfície dos substratos, notando-se repercussões nomeadamente ao nível da cristalinidade e das tensões dos revestimentos. Estes podem mesmo evoluir para o estado amorfo, com o conseqüente relaxamento das tensões internas, caso os valores de polarização sejam demasiado elevados.^[10]

O transporte das espécies pode ser feito utilizando filtros magnéticos. Nestes casos é habitual que os substratos estejam desalinhados em relação às fontes de evaporação de forma a evitar a deposição de macropartículas. O princípio de funcionamento baseia-se na diferença de massa que as macropartículas têm relativamente às partículas vaporizadas, que por ser significativamente maior as torna menos sensíveis aos campos gerados pelos filtros. A grande desvantagem é a redução da taxa de deposição, no entanto, utilizando filtros como o que se apresenta na figura 2.2, a etapa de transporte atenua desde logo possíveis defeitos no crescimento dos filmes.^{[2],[4]}

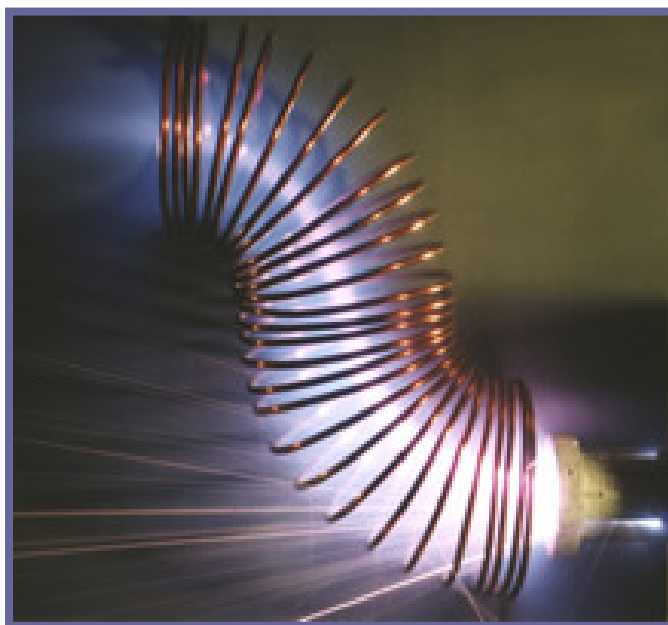


Figura 2.2 - Filtro em forma de S com arquitectura aberta para a saída das macropartículas. Os rastos de luz são as macropartículas de Cr, cuja massa não permite que sigam o percurso das restantes espécies ^[11]

Finalmente a última fase, a condensação. De forma a se criarem depósitos densos e aderentes, é benéfico que as espécies constituintes do plasma cheguem aos substratos com elevada energia e/ou que se lhes forneça parte dessa energia. Esta energia pode ser utilizada para remover os átomos cuja energia de ligação seja inferior à que as partículas mais energéticas transferem com o embate na superfície dos substratos. Se assim for promove-se a ejeção de átomos mal ligados e a criação de uma interface substrato \ revestimento mais aderente. A densificação dos depósitos pode ser promovida aquecendo os substratos. A própria polarização e o embate das partículas energéticas têm o efeito de

umentar a temperatura dos substratos, a qual promove a mobilidade dos adátomos e consequentemente uma maior densificação do depósito.^{[4][12]}

A evaporação a arco catódico permite a criação de depósitos espessos em espaços de tempo relativamente curtos. Isto é conseguido devido às altas intensidades de corrente aplicadas ao arco eléctrico, que para este caso particular permitem uma taxa de deposição próximo dos 4 µm/h. Este valor é significativamente elevado comparativamente a outras técnicas PVD, sendo natural que a rugosidade seja também superior. As atraentes taxas de deposição são também uma consequência do elevado grau de ionização das espécies que constituem o plasma, tornando-o mais denso e hábil em corresponder à polarização negativa aplicada aos substratos, por forma a atrair os iões para a sua superfície.

É uma técnica talhada para o tratamento de peças com geometria simples devido à tendencial linearidade do fluxo iónico. O facto das faces dos segmentos serem planas e isentas de reentrâncias atenua as possibilidades de se desenvolver o denominado “efeito sombra”, no entanto é sempre necessário um cuidadoso alinhamento de todas as peças. A elevada reprodutibilidade permite um custo unitário relativamente baixo se levarmos em conta as excelentes propriedades de cariz tribológico obtidas, as quais possibilitam responder da melhor forma às severas condições de serviço em que os segmentos operam.^[3]

O facto dos tratamentos PVD permitirem a deposição de compostos duros a temperaturas relativamente baixas, às quais não existem transformações de fase e consequentes alterações no volume das peças, é outra das razões que os torna uma alternativa muito apetecível para aplicação industrial. Neste caso particular a temperatura de tratamento ronda os 500 °C. Por se operar com um aço bastante ligado, os ciclos de aquecimento e arrefecimento devem ser lentos de forma a se precaverem empenos nas peças uma vez que os elementos de liga prejudicam a condutibilidade térmica do material.^[13]

2.2 A importância da aplicação de campos magnéticos externos

Neste trabalho estuda-se a influência da variação de parâmetros das bobines, que têm influência nos perfis de erosão das fontes de evaporação.^[14] Os parâmetros são a intensidade de corrente aplicada a bobines geradoras de campos magnéticos à superfície das fontes de evaporação e o tempo que cada bobine está activa, no fundo o tempo durante o qual é gerado o campo magnético que atrai o arco eléctrico para que este siga a trajectória imposta pela bobine. A ausência de campos magnéticos externos possibilitaria ao arco eléctrico seguir a sua tendência natural, localizando-se preferencialmente em

defeitos da superfície o que compreensivelmente gera desde logo consumos irregulares de material. [\[2\]\[4\]](#)

A aplicação de campos magnéticos externos atenua a maior propensão para a ejeção de macropartículas (partículas sólidas não evaporadas do material das fontes) que os arcos aleatórios têm a si associada. Refira-se que as macropartículas são uma particularidade dos revestimentos obtidos por evaporação catódica. A aplicação de campos magnéticos tem também uma pronunciada influência na velocidade do arco. A figura 2.3 ilustra o aspecto do comportamento do arco com influência de campos magnéticos (a) e sem a aplicação de campos magnéticos (b). A aplicação de campos magnéticos condiciona o perfil de erosão que as fontes de evaporação apresentarão no final do seu ciclo de vida. Note-se que campos magnéticos mais intensos impulsionam velocidades mais elevadas do movimento do arco, benéfico para precaver o sobreaquecimento local da superfície, atenuando a probabilidade de ejeção de macropartículas, mas em contrapartida fomentando percursos de erosão muito localizados (pouca aleatoriedade do arco), o que implica uma taxa de aproveitamento do material das fontes de evaporação inferior relativamente a arcos mais aleatórios. Outro motivo pelo qual se aplicam campos magnéticos externos é a prevenção do deslocamento do arco eléctrico para fora da superfície das fontes de evaporação que, para além dos danos provocados no equipamento, contaminaria seriamente os depósitos das peças tratadas pelo material das paredes da câmara que momentaneamente serviria de fonte de evaporação. [\[9\]\[15\]\[16\]](#)

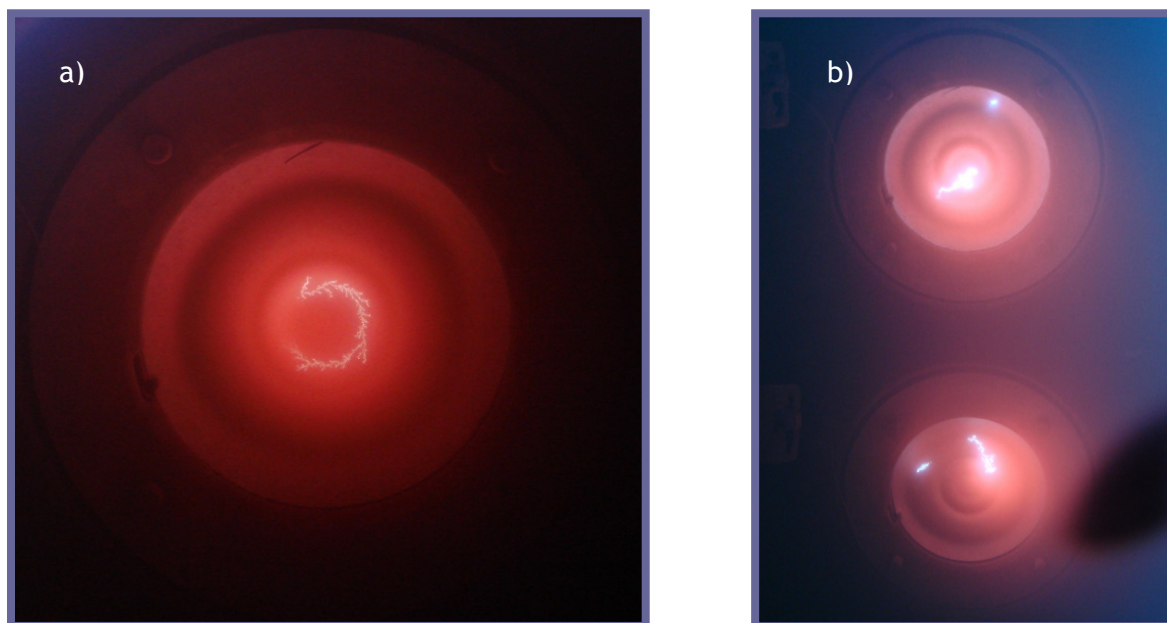


Figura 2.3 - Fotografias da incidência do arco eléctrico na superfície de fontes de evaporação em fim de vida. a) Arco bem direccionado, intensidades de corrente elevadas, b) arco com movimento aleatório, sem corrente aplicada às bobines.

Aqui tenta-se também explorar a possibilidade da taxa de deposição ser influenciada pela variação dos parâmetros das bobines dos cátodos, embora se tenha consciência de que, para esta variável, o parâmetro fundamental seja a intensidade de corrente aplicada ao arco eléctrico. Com a redução progressiva das intensidades de corrente das bobines espera-se que a maior aleatoriedade (controlada) daí resultante permita um varrimento mais amplo da superfície das fontes e, conseqüentemente um maior aproveitamento do material mais superficial, logo mais próximo dos substratos. Note-se que quando se fala em “maior aleatoriedade” do arco, pretende-se comparar o seu comportamento relativamente aos parâmetros originalmente utilizados pela empresa, que não eram actualizados à medida que as fontes de evaporação perdiam espessura. Originalmente, com o decorrer dos tratamentos, os campos seriam previsivelmente mais intensos devido à perda de espessura das fontes e conseqüente maior proximidade das bobines ao arco eléctrico, o que facilitaria o seu direccionamento. No fundo, o que se pretende com a actualização dos parâmetros é que a aleatoriedade tenda a ser controlada e permaneça relativamente constante ao longo de todo o ciclo de vida das fontes de evaporação.

Paralelamente, espera-se ser benéfico ajustar os intervalos de tempo de actividade das bobines, de forma a controlar mais eficazmente a evolução da profundidade de erosão em cada uma das trajectórias.^[17] Os tempos de actividade estão divididos em intervalos de 7,5 segundos, durante o qual as três bobines têm diferentes tempos de actividade. Estas agrupam-se em conjuntos de três por cada cátodo e ao longo deste relatório designar-se-ão por: externa, intermédia e interna, consoante passem de uma posição mais periférica para uma mais interior. Estão montadas na parte posterior de cada cátodo. A figura 2.4 esquematiza a posição de cada bobine.

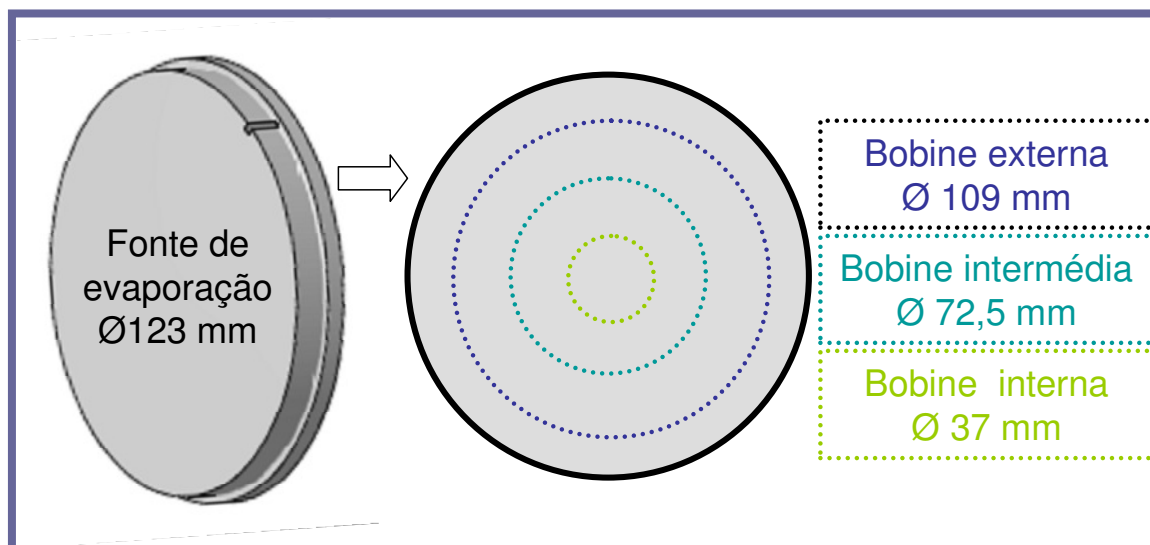


Figura 2.4 - Esquema indicativo da posição e dimensão de cada uma das três bobines que cada cátodo possui.

A única bobine que está permanentemente ligada é a interna. As bobines intermédia e externa têm períodos de actividade mais curtos e nunca estão ligadas simultaneamente entre si. Atente-se na tabela 2.1 que expõe os tempos de entrada, actividade e saída de funcionamento de cada uma das bobines.

Tabela 2.1 - Tempos de actividade das bobines dos cátodos.

Etapa (Períodos de 7,5s)	Tempos de actividade das bobines (s)		
	Bobine Interna	Bobine Intermédia	Bobine Externa
Tempo de entrada	0	3	6
Em actividade	7,5	3	1,5
Tempo de saída	0	1,5	0

Importa reter que a razão principal para a actualização dos parâmetros é a perda de espessura das fontes de evaporação. É lógico pensar que, quando as fontes de evaporação são novas, o campo magnético tem de vencer uma espessura superior, logo será de esperar que a intensidade dos campos magnéticos aumente com o desgaste das fontes simplesmente porque o arco circula em trajectórias mais próximas das bobines. É com o intuito de evitar perfis de erosão excessivamente localizados, nomeadamente nos últimos tratamentos, que se actualizam as intensidades de corrente das bobines dos cátodos para valores progressivamente mais reduzidos.

2.3 O equipamento

O equipamento sobre o qual se desenvolveu este trabalho, e que está exposto na figura 2.5, tem capacidade para tratar cerca de 1200 peças simultaneamente. Estas dividem-se em oito árvores com capacidade para cerca de 150 peças/árvore, montadas verticalmente numa mesa com movimento giratório. As próprias árvores têm um movimento giratório independente da mesa para que a distribuição do material evaporado seja optimizada. Aquando da montagem das árvores é essencial conferir o correcto alinhamento de todas as peças para que não se desenvolva o denominado “efeito sombra”, como, aliás, já foi referido neste trabalho.



Figura 2.5 - Equipamento PVD de evaporação catódica para a deposição de CrN em segmentos.

2.4 Fontes de evaporação

Das oito fontes que compõem o equipamento, seis estão localizadas em dois painéis laterais e as restantes duas num painel localizado na parede traseira da câmara de deposição. Pelo facto das zonas centrais da câmara serem favorecidas em termos de ocupação de material evaporado, as quatro fontes de evaporação dos topos (referenciadas como 1.1, 1.3, 2.1 e 2.3 na figura 1.2) são sujeitas a correntes de arco mais intensas com o intuito de aumentar a taxa de evaporação nos topos, favorecendo-se a uniformização das espessuras. Na figura 2.6 está esquematizada uma fonte de evaporação.

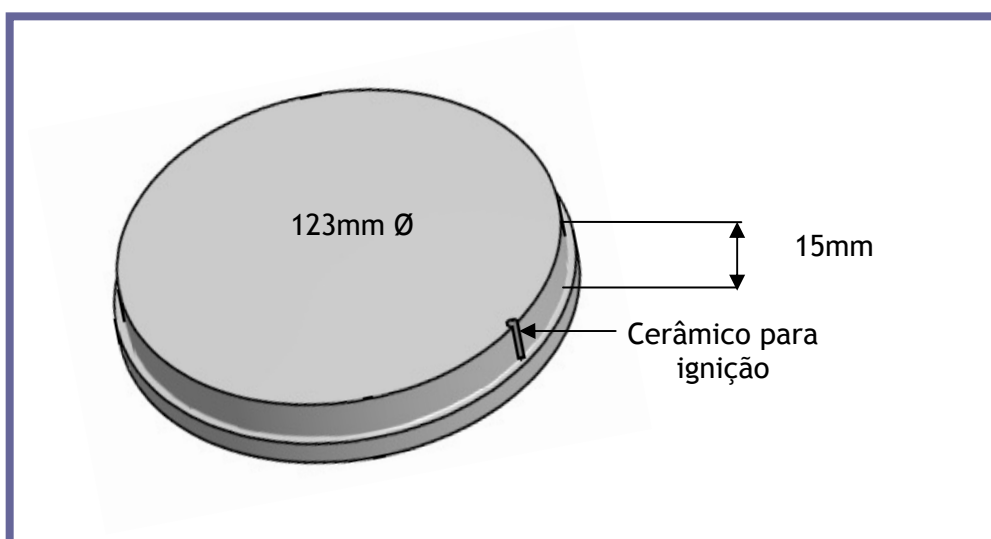


Figura 2.6 - Fonte de evaporação de Cr de elevada pureza para aplicação na técnica de evaporação a arco catódico.

O processo está talhado para que cada conjunto de oito fontes de evaporação tenha um tempo de vida de dez tratamentos. Por cada ciclo de deposição são consumidos cerca de 1,3mm em espessura de Cr, o que permite chegar ao final de vida das fontes com uma espessura de segurança de cerca de 2mm, abaixo da qual o risco de fissuração da fonte e possível estilhaçamento deixa de ser da responsabilidade do fornecedor destes consumíveis.

A ampliação do tempo de vida útil destes consumíveis está dependente do perfil de erosão que, como já foi referido anteriormente, depende fundamentalmente da intensidade de corrente aplicada ao arco e da intensidade de corrente aplicada às bobines dos cátodos.

A alimentar cada uma das bobines, três fontes de alimentação distribuem a intensidade de corrente simultaneamente pelos três painéis e independentemente por cada bobine, ou seja, as bobines estão ligadas em série, sendo permitido variar independentemente a intensidade de corrente em cada uma das três (externa, intermédia ou interna) mas não em cada uma das fontes de evaporação. Sendo assim, a alteração do valor de intensidade de corrente ou do tempo de activação das bobines, repercute-se de igual forma por todas as fontes de evaporação.

Esta limitação de hardware dificulta o processo de optimização do perfil de erosão das fontes pelo facto de existirem correntes de arco distintas, o que altera a estabilidade do arco à superfície das fontes de evaporação [\[17\]\[18\]](#), tendendo a ser maior nas fontes de evaporação às quais são aplicadas intensidades de corrente de arco mais baixas e logicamente menor para as fontes com intensidades de corrente mais altas. Isto sugere que as trajectórias sejam mais localizadas para o primeiro caso e mais aleatórias para o segundo. Poder-se-ia colocar a hipótese do índice de aproveitamento ser superior para as quatro fontes de alimentação dos topos. No entanto, e como já supracitado, as maiores intensidades de corrente de arco fomentam taxas de evaporação superiores, sendo questionável até que ponto, em termos de profundidade de remoção de material, o seu efeito não excederá as trajectórias mais localizadas dos arcos menos intensos e, em caso afirmativo, se a sua expressão estará relacionada com o tempo de vida das fontes de evaporação.

Este último aspecto está na base de muito do trabalho que é apresentado neste relatório. Realizar os dez tratamentos empregando sempre os mesmos valores de intensidade de corrente nas bobines, o que é feito originalmente, significa admitir que a estabilidade do arco tende a ser menor à medida que as fontes de evaporação se desgastam, restringindo-se o seu movimento a trajectórias cada vez mais delimitadas. Ao manter as intensidades de corrente nas bobines ao longo dos dez tratamentos, a

estabilidade do arco tende a ser maior com o desgaste das fontes de evaporação, pela simples razão de que a espessura ultrapassada pelas linhas de campo magnético é progressivamente inferior. Faz pois todo o sentido actualizar os valores de corrente nas bobinas dos cátodos à medida que estes são consumidos, de forma a promover um estilo de erosão preferencialmente superficial e conseqüentemente menos localizado. Desta forma o índice de aproveitamento destes consumíveis tende a ser superior.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Testes de validação dos parâmetros de corrente das bobines

Pelo facto deste trabalho se centrar na alteração dos parâmetros das bobines dos cátodos, planearam-se testes de validação do comportamento do arco à superfície das fontes de evaporação fazendo variar as intensidades de corrente nas bobines em três estados de vida distintos das fontes: novas; meio de vida e fim de vida. A gama de valores de intensidade de corrente testada está exposta na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros de intensidade de corrente (A) utilizados nos testes de estabilidade do alvo.

Período	Intensidade de corrente nas bobines (A)		
	Interna	Intermédia	Externa
1	0	0	0
2	0,4	0,15	0,1
3	0,5	0,4	0,15
4 (receita original)	1	0,6	0,2
5	2	1	1

Na linha correspondente ao 4º período estão evidenciados os valores originais utilizados no processo até à data de início deste estudo. Cada teste teve seis períodos de evaporação. Aos cinco períodos da tabela 3.1 deverá acrescentar-se um período inicial (período 0) de 25 minutos, programado com o intuito de se estabilizarem as condições de temperatura e pressão. Cada um dos cinco períodos descritos na tabela acima teve a duração de 10 minutos perfazendo-se um total de 75 minutos de evaporação para cada teste, tendo estes sido realizados com a câmara de deposição vazia de modo a facilitar a visualização do movimento do arco. Cada fonte de evaporação foi pesada antes e depois de cada teste, tendo sido também registados os valores de erosão (Ah) lidos pelo equipamento.

Para uma análise mais cuidada foram recolhidas e analisadas imagens do comportamento do arco em cada um dos três testes realizados. De referir ainda que os parâmetros estipulados na tabela 3.1 são do conhecimento do fornecedor do equipamento PVD.

3.2 Implementação de novos parâmetros no processo produtivo.

Após os testes de validação avançou-se para a fase de implementação de novos parâmetros no processo produtivo, expostos na tabela 3.2. A sigla “TST” identifica cada conjunto de fontes de evaporação, numerada consoante os parâmetros de intensidade de corrente e tempo de activação das bobines, analisado durante este trabalho prático.

Tabela 3.2 - Parâmetros aplicados às bobines dos cátodos.

Receita	Número de Tratamentos	Corrente (A) na bobine			Tempo (s) de bobine activada		
		Interna	Intermédia	Externa	Interna	Intermédia	Externa
Original	10	1	0,6	0,2	7,5	3	1,5
TST1	6	1	0,6	0,2	7,5	3	1,5
	4	0,5	0,4	0,15			
TST2	6	1	0,6	0,2	7,5	3	1,5
	4	0,5	0,4	0,15		3,5	1
TST3	4	1	0,6	0,2	7,5	3	1,5
	2					3,5	1
	4	0,5	0,4	0,15			
TST4	6	1	0,6	0,2	7,5	3,5	1
	2	0,7	0,4	0,15			
	2	0,6	0,3	0,1			
TST5	6	1	0,6	0,2	7,5	3,5	0
	2	0,7	0,4	0			
	2	0,6	0,3				
TST6	6	1	0,5	0	7,5	3,5	0
	2	0,7	0,3				
	2	0,7	0,15				
		Parâmetros originais		Novos parâmetros			

A receita TST1 corresponde à primeira actualização das intensidades de corrente das bobines dos cátodos para valores mais baixos, efectuada no final da sexta carga (meio de vida das fontes de evaporação). Os valores aplicados nesta e nas restantes receitas vêm de acordo com os resultados dos testes de validação da estabilidade do arco para diferentes tempos de vida das fontes de evaporação. Nesta receita os tempos de activação das bobines são os mesmos dos valores originais.

Na receita TST2 os parâmetros foram alterados no final do sexto tratamento, reduzindo-se as intensidades de corrente nas bobines para os mesmos valores de TST1 mas alterando-se os tempos de actividade das bobines intermédia e externa. Durante cada período de 7,5s a bobine externa passou a estar activa menos 0,5s (1,5s para 1,0s) tendo

sido este tempo adicionado ao tempo de actividade da bobine intermédia (3,0s para 3,5s). Este procedimento foi implementado por se verificar que o conjunto de fontes sujeito à receita TST1 apresentou melhorias significativas em termos de aproveitamento de material nas trajectórias mais internas, mas profundidades de erosão mais expressivas na trajectória mais externa.

Em TST3 os parâmetros foram actualizados duas vezes, no final da quarta carga ao se alterar o tempo de actividade das bobines intermédia e externa da mesma forma que para TST2, e no final da sexta carga, acrescentando-se a alteração às correntes nas bobines dos cátodos. No fundo, a grande diferença entre TST3 e TST2 está no tempo de actividade das bobines intermédia e externa.

Na receita TST4 os valores de intensidade de corrente nas bobines dos cátodos foram actualizados no final da sexta e oitava cargas. As alterações aos tempos de actividade das bobines intermédia e externa são as mesmas efectuadas nas receitas TST2, com a diferença de se empregarem desde o inicio de utilização do conjunto de fontes de evaporação.

Nas receitas TST5 e TST6 a bobine externa foi desligada ($t = 0s$) durante os 10 tratamentos. As intensidades de corrente foram actualizadas em função das sugestões dadas pelo fornecedor do equipamento PVD. Para uma análise mais concreta, consulte-se a tabela 3.3 que expõe as diferenças no tempo de actividade de cada bobine em relação à receita original no total dos 10 tratamentos.

Tabela 3.3 - Diferença do tempo de actividade das bobines em relação à receita original.

Δt (h:m) em relação à receita original			
Receita	Bobine Interna	Bobine Intermédia	Bobine Externa
TST1	0	0	0
TST2	- 1:35	+ 1:28	- 2:25
TST3	- 1:35	+ 2:28	- 3:25
TST4	- 1:35	+ 4:22	- 5:19
TST5	- 1:35	+ 4:22	- 15:19
TST6	- 1:35	+ 4:22	- 15:19

3.3 Identificação do ponto crítico

Após cada tratamento, o procedimento normal na empresa consiste em enviar três peças para o laboratório metalográfico para análise das características de espessuras de camada de Cr e CrN, dureza Vickers e morfologia da camada de CrN. São identificadas como Anel 1, 2 ou 3, consoante provenham da 2ª posição do topo, do meio ou da 2ª posição do fundo da árvore de peças, respectivamente. Para se identificar a extensão do gradiente

de espessuras foi implementado um método para a recolha de duas peças suplementares.

Foram retiradas peças da 5^a, 7^a, 9^a e 10^a posições a contar de cada topo, conforme ilustrado na figura 3.1, para se tentar localizar os pontos críticos das árvores. Entenda-se por ponto crítico a posição ocupada pela primeira peça a contar de um dos topos a adquirir uma espessura que, regularmente, não difira mais do que 1 μm daquela medida pelo laboratório metalográfico na peça retirada do meio da árvore (Anel 2).

Na solicitação de serviço ao laboratório metalográfico, para a identificação do ponto crítico, apenas se requereu a medição da espessura da camada de CrN, abdicando-se da medição e avaliação das restantes características. Aproveitando a designação habitualmente dada às peças que seguem para controlo metalográfico (Anel 1; Anel 2 e Anel 3), as duas peças suplementares são identificadas como 1.1 se retiradas de uma posição do topo, 3.1 se retiradas de uma posição do fundo.

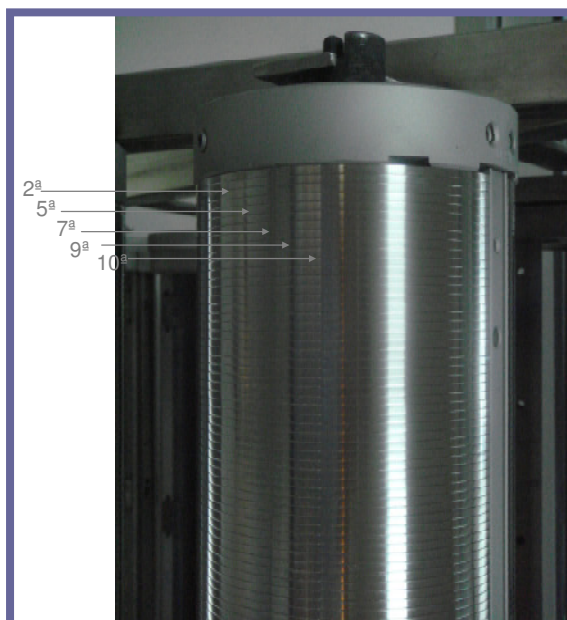


Figura 3.1 - Topo de uma árvore de peças para tratamento PVD, com indicação da posição de onde são retiradas algumas peças para identificação do ponto crítico.

3.4 Análise do desgaste das fontes de evaporação por perfilometria.

Todas as fontes de evaporação sujeitas aos novos parâmetros foram analisadas por ensaio de perfilometria, tendo-se optado pela marcação de um ponto comum em todas as fontes, sendo que os perfis de erosão são analisados do centro do alvo até esse ponto, ponto A, tal como é mostrado pela figura 3.2. Para servir como termo de comparação foi seleccionado um conjunto de alvos sujeito às condições originais e traçado um perfil de erosão seguindo os mesmos critérios.

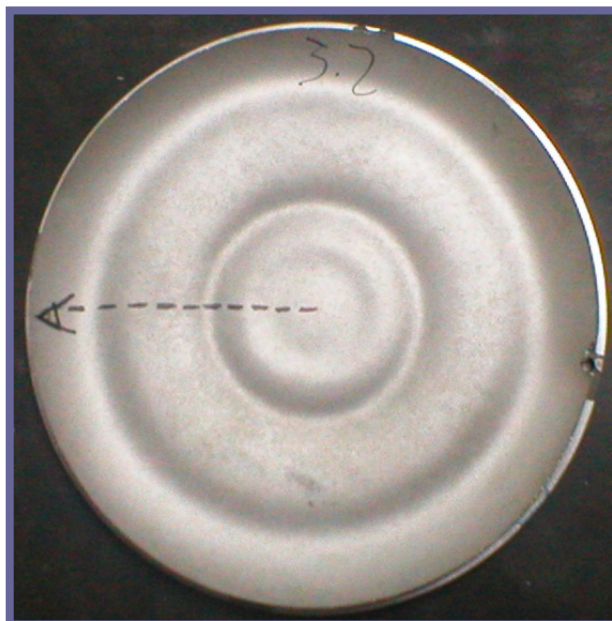


Figura 3.2 - Exemplo do procedimento utilizado para a medição dos perfis de erosão por perfilometria.

O traçado dos gráficos de perfilometria dá-nos uma previsão da perda de espessura das fontes de evaporação, e daí a oportunidade de o relacionarmos com as alterações aos parâmetros das bobines dos cátodos. A figura 3.3 pretende que o leitor compare o aspecto dos perfis de perfilometria numa fonte de evaporação da mesma posição mas de conjuntos diferentes.

Ao conjunto de fontes de evaporação TST6 foi feita uma análise de perfilometria em três das oito fontes de evaporação quando estas estavam exactamente a meio de vida de utilização. Este ensaio tem o intuito de permitir verificar se a actualização das correntes dos cátodos está a ser a mais adequada, de forma a permitir uma taxa de desgaste semelhante ao longo do consumo das fontes de evaporação. Serve ainda como suporte à convicção de que o desgaste tende a ser em profundidade à medida que as fontes vão sendo consumidas.

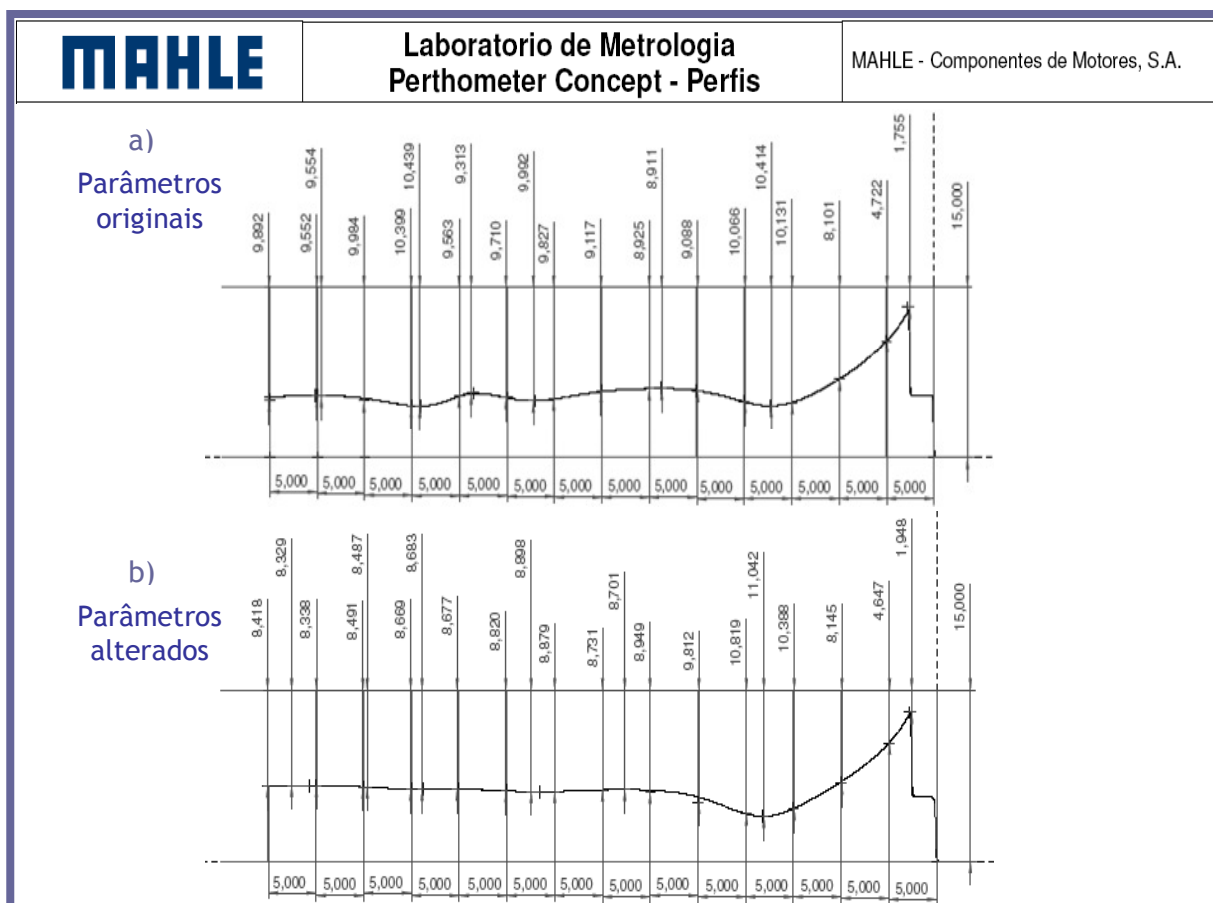


Figura 3.3 - Exemplo do traçado de 2 perfis de perfilometria em fontes de evaporação da posição 3.1 da câmara de deposição após a execução de 10 tratamentos. a) Parâmetros originais, b) novos parâmetros (TST3).

3.5 Alteração das correntes do arco eléctrico

Com perspectivas futuras de diminuição do tempo de processo e intenção de se igualarem as taxas de deposição ao longo da vertical das árvores, realizou-se um teste que consiste na aplicação de uma corrente de arco eléctrico de 170A nos topos, mantendo os 140A nas fontes do meio, de forma a igualar as taxas de deposição. O teste foi realizado numa árvore com peças de refugo e teve a duração de 7h45m. Foi antecedido por um ensaio de validação à estabilidade do arco para 170A, realizado com a câmara de deposição vazia durante 10 minutos.

No final do teste foram retiradas 9 peças para medição de espessura da camada de CrN: posições 2, 10, 20 e 40 de cada topo e uma peça do centro da árvore.

Outra abordagem consistiu em admitir a aplicação de 140A de corrente de arco eléctrico em todas as fontes de evaporação. Foi realizado um teste ligeiramente diferente para avaliação da dispersão de espessuras ao longo da vertical da câmara de deposição para a supracitada intensidade de corrente de arco eléctrico. Utilizaram-se 5 corpos de prova de 30mm de diâmetro e 5mm de espessura, colocados em simuladores de árvores, tal como representado na figura 3.4. O ensaio teve a duração de 8h de deposição de CrN. Terminado o teste, os provetes foram cortados a meio (d direcção vertical) e analisados em 8 pontos. O valor de cada ponto é a média de 3 medições.



Figura 3.4 - Montagem dos provetes para teste a 140A de intensidade de corrente do arco eléctrico em todos os cátodos. a) Antes do teste, b) Após o teste.

O objectivo deste teste é o de verificar se o gradiente de espessuras se mantém constante fazendo variar a taxa de evaporação (por redução da intensidade de corrente do arco) e, em caso afirmativo, ponderar a desactivação dos cátodos do meio antes dos cátodos dos topos. Lembre-se que 140A é a intensidade de corrente aplicada originalmente aos cátodos do meio, ou seja, é a suficiente para prover a grande percentagem de peças tratadas com 30 μm de espessura de camada no tempo normal do processo. Sabendo que a especificação após PVD exige um mínimo de camada de apenas 26 μm , a desactivação dos cátodos do meio poderia perfeitamente ser efectuada por volta das 6h30m de tratamento. Em contrapartida, os cátodos dos topos necessitariam de estar activos durante mais tempo do que o tempo actual de tratamento, prolongando-se o tempo de processo. No entanto, acredito que os ganhos em termos de aproveitamento do material das fontes de evaporação permitiriam a execução de, pelo menos, um tratamento suplementar. Esta convicção advém do facto da intensidade de corrente do arco eléctrico ser menor, o que sugere uma maior facilidade no seu controlo e menor probabilidade de criar perfis em

profundidade. Os ganhos de um tratamento suplementar podem superar o prejuízo de se aumentar o tempo de processo ou de se tratarem menos peças.

3.6 Permuta de posição das fontes de evaporação

Uma vez que no final dos 10 tratamentos o desgaste das fontes de evaporação do meio (1.2; 2.2; 3.1 e 3.2) permite realizar uma carga suplementar, achou-se de todo o interesse permutar a posição destas fontes de evaporação com as dos topos no final do 5º tratamento (meio de vida). A ordem de permuta e os desgastes intermédios e finais de cada fonte de evaporação estão expostos na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Ordem de permuta das posições das fontes de evaporação.

Fonte de evaporação	Posição inicial	Desgaste Ah		Posição final
		5º Tratamentos	Final	
A	1.1	6290	12255	1.2
B	1.2	5599	12159	1.1
C	1.3	6289	12255	3.1
D	2.1	6292	12256	2.2
E	2.2	5601	12161	2.1
F	2.3	6294	12260	3.2
G	3.1	5603	12164	1.3
H	3.2	5603	12163	2.3

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Testes de validação dos parâmetros de corrente das bobines

O critério usado para a aceitação / rejeição dos valores de intensidade de corrente da tabela 3.1 foi a estabilidade do arco à superfície das fontes de evaporação. Arcos demasiado aleatórios ou demasiado dirigidos são de evitar. No primeiro caso devido à maior propensão para a ejeção de macropartículas por sobreaquecimento local das zonas de incidência do arco eléctrico. No segundo caso pelo facto da taxa de aproveitamento de material ser reduzida devido a trajetórias muito estreitas e profundas.

Comece-se por analisar o teste executado com fontes de evaporação novas. Na verdade durante a execução deste teste não foi possível uma observação satisfatória do comportamento do arco. Isto sucedeu devido ao facto de inesperadamente o vidro através do qual seria possível fazer a observação ter ficado coberto com Cr muito rapidamente. Isto não permitiu que a observação fosse feita durante o tempo suficiente para que o arco se adaptasse às condições de pressão dentro da câmara e mostrasse um comportamento representativo da sua estabilidade para os parâmetros desejados.

Independentemente da análise de imagens, suponho que, pelo facto das fontes de evaporação possuírem menor desgaste, deve ter-se uma atenção redobrada ao seu estado de superfície, pois logicamente, a intensidade dos campos magnéticos à superfície activa das fontes será tanto menor quanto mais espesso for o alvo e daí a comportamento do arco estar mais sensível a defeitos ou sujidades da superfície.

Avançando para a análise dos resultados dos testes com as fontes de evaporação a meio de vida, observe-se a tabela 4.1, onde estão apresentadas as interpretações aos resultados obtidos. Acrescente-se que neste teste foi possível uma boa visualização do comportamento do arco.

Tabela 4.1 - Apreciação da estabilidade do arco em fontes de evaporação a meio de vida em função das intensidades de corrente aplicadas às bobines dos cátodos.

Avaliação visual da estabilidade do arco em fontes de evaporação a meio de vida.	Intensidade de Corrente			Interna		Intermédia		Externa	
	Interna	Intermédia	Externa	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	0	0	0		*		*		*
	0,4	0,15	0,1		*		*		*
	0,5	0,4	0,15	*		*		*	
	1	0,6	0,2	*		*		*	
	2	1	1		*		*		*

A análise da tabela permite-nos constatar que existem duas gamas de parâmetros para as quais o comportamento do arco foi satisfatório em termos de estabilidade e possível aproveitamento de material. Além da gama utilizada originalmente (1;0.6;0.2)

também os valores de 0.5;0.4;0.15 deram origem a resultados satisfatórios. Para que seja mais perceptível a interpretação dos resultados obtidos, analisem-se algumas fotos retiradas durante o teste com fontes de evaporação a meio de vida. Na figura 4.1 expõe-se o exemplo de um arco não dirigido, ou seja, as bobines geradoras de campos magnéticos à superfície dos cátodos estavam desligadas. Note-se a pouca direccionalidade do conjunto de pontos indicativos da incidência do arco eléctrico.

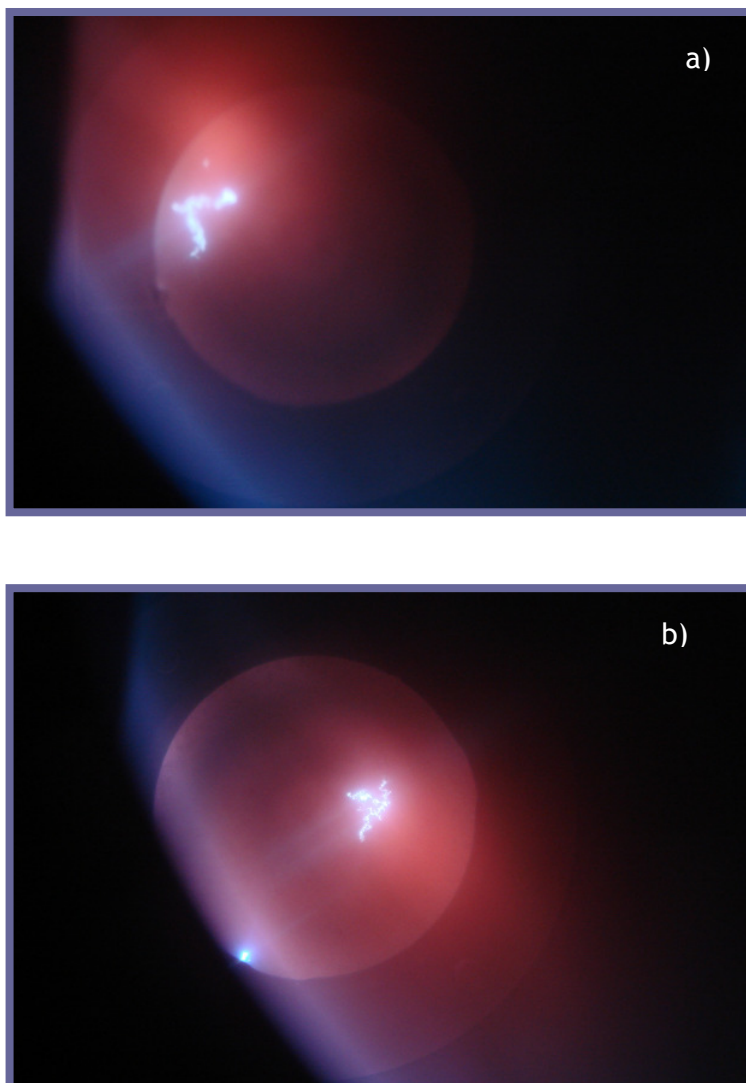


Figura 4.1 - Comportamento do arco eléctrico em fontes de evaporação a meio de vida com as bobines dos cátodos desactivadas ($I_{int}=0A$, $I_{itd}=0A$, $I_{ext}=0A$). a) e b) Fonte de evaporação 3.1

Este tipo de comportamento é propício ao sobreaquecimento local da superfície da fonte de evaporação, pois o arco não é estimulado a se mover segundo uma dada trajectória. Se assim fosse, incidiria em zonas espaçadas umas das outras evitando tempos de residência excessivos num único local.

Note-se, pela análise da figura 4.2 a diferença no tipo de trajectória imposta ao arco eléctrico quando as intensidades de corrente das bobines são: $I_{int}=0.5A$, $I_{itd}=0.4A$, $I_{ext}=0.15A$. Naturalmente, para esta gama de valores o arco percorria trajectórias bem mais definidas relativamente ao caso em que as bobines estavam desactivadas. Além das diferenças evidentes no tipo de trajectória, foi também notório um acréscimo da velocidade de movimento do arco à medida que se iam aplicando correntes progressivamente mais elevadas.

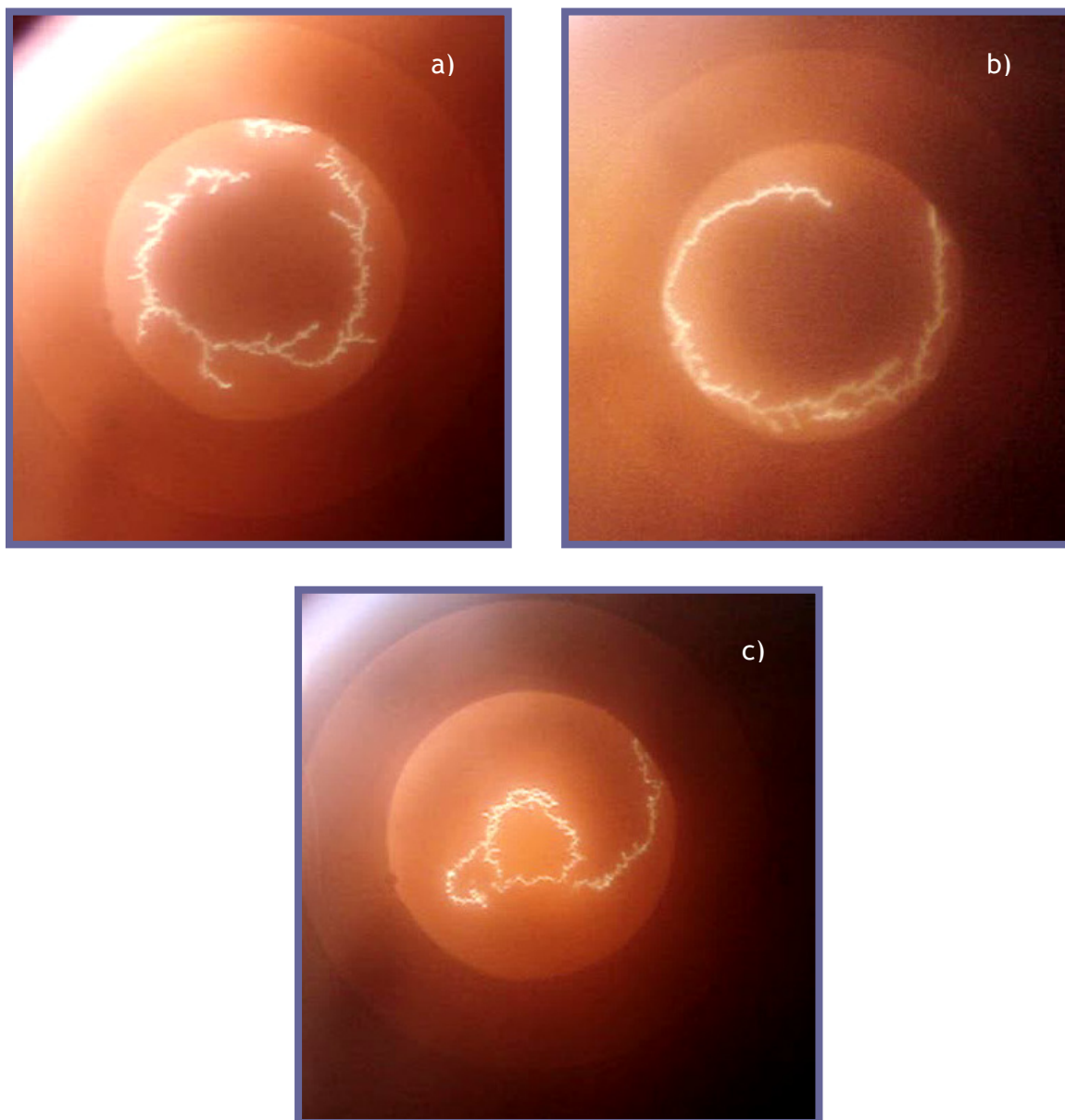


Figura 4.2 - Comportamento do arco eléctrico com a aplicação de correntes mais intensas às bobines dos cátodos $I_{int}=0.5A$, $I_{itd}=0.4A$, $I_{ext}=0.15A$. Trajecto do arco a) na bobine intermédia, b) bobine externa e c) bobine interna. Fonte de evaporação 3.1

Além das diferenças evidentes no tipo de trajectória, foi também notório um acréscimo da velocidade de movimento do arco à medida que se iam aplicando gamas de correntes progressivamente mais elevadas. Da figura 4.3 podemos deduzir isto mesmo. Note-se que a sequência de pontos de incidência do arco, é capaz de desenhar circunferências completas, sinal de que quando o arco completou o movimento circular, a luminosidade emitida pelo ponto inicial ainda estava visível. Atente-se ainda na elevada direcionalidade conseguida para os parâmetros $I_{int}=2A$, $I_{itd}=1A$, $I_{ext}=1A$ pela inexistência de “ramificações” na trajectória do arco, algo que é possível identificar na figura 4.2. Este tipo de trajectória é favorável do ponto de vista de integridade do revestimento uma vez que previne a ejeção de macropartículas causadores de defeitos de crescimento dos filmes e é propícia ao alcance de estados de ionização superiores das porções evaporadas das fontes. No entanto a erosão é extremamente localizada, levando à obtenção de taxas de aproveitamento de Cr presumivelmente reduzidas, e conseqüentemente a uma redução no tempo de vida das fontes de evaporação. Daí esta gama de parâmetros ter sido rejeitada. Como é notório, a facilidade de visualização do trajecto do arco já não é muito significativa.

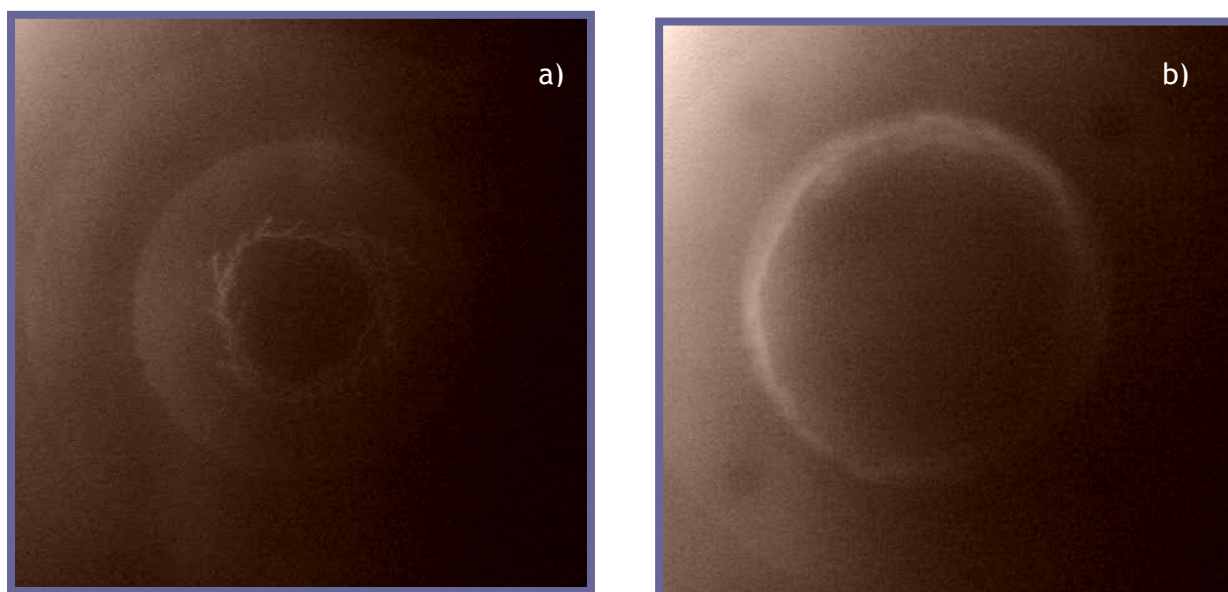


Figura 4.3 (continua)

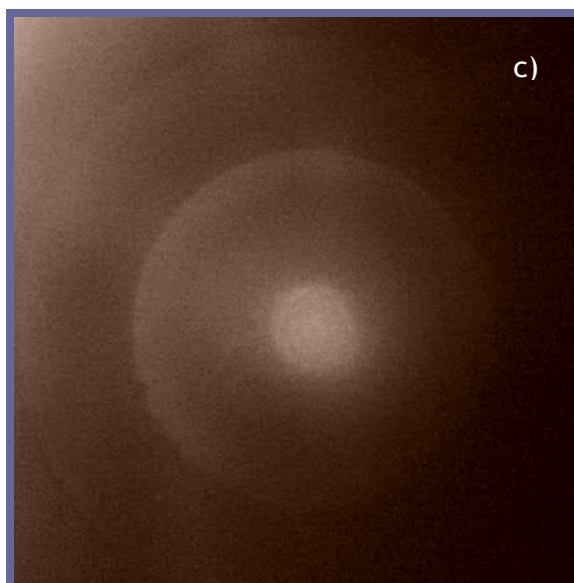


Figura 4.3 - Comportamento do arco eléctrico com a aplicação da gama de correntes mais intensas às bobines dos cátodos. a) Trajecto na bobine intermédia, b) bobine externa e c) bobine interna.

Na tabela 4.2, podem observar-se os pareceres quanto ao comportamento do arco eléctrico para a aplicação das mesmas gamas de intensidade de corrente mas em alvos já em fim de vida.

Tabela 4.2 - Apreciação da estabilidade do arco em fontes de evaporação em fim de vida em função das intensidades de corrente aplicadas às bobines dos cátodos.

Avaliação visual da estabilidade do arco em fontes de evaporação em final de vida.	Intensidade de Corrente			Interna		Intermédia		Externa	
	Interna	Intermédia	Externa	☑	✘	☑	✘	☑	✘
	0	0	0		*		*		*
	0,4	0,15	0,1	*		*		*	
	0,5	0,4	0,15	*		*		*	
	1	0,6	0,2		*		*		*
	2	1	1		*		*		*

A execução dos testes em fontes de evaporação já em final de vida, permitiu, à semelhança do que aconteceu para o teste descrito anteriormente, identificar uma gama de valores de intensidade de corrente a aplicar às bobines dos cátodos, que é, à partida, mais favorável por, teoricamente, evitar que o arco promova perfis de erosão em profundidade. Na figura 4.4 a), a trajectória do arco para a utilização dos parâmetros originais sugere um tipo de erosão consideravelmente localizada, o que aconselha à utilização de valores de intensidade de corrente mais reduzidos para os últimos tratamentos.

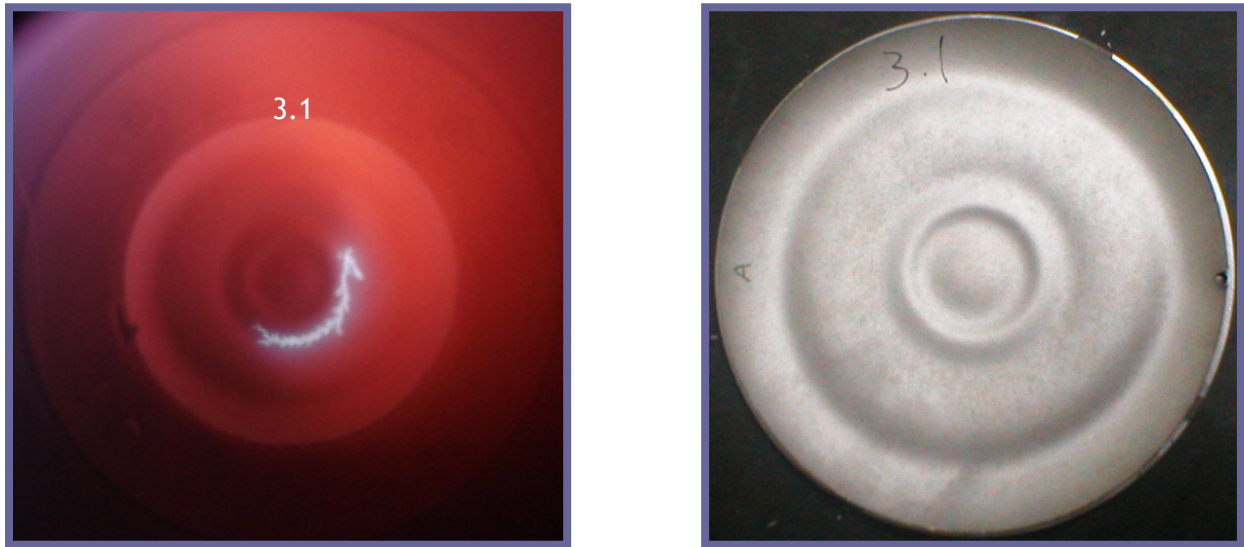


Figura 4.4 - Em a) trajetória localizada do arco durante a utilização dos parâmetros originais; b) Aspecto do perfil de erosão de uma fonte de evaporação retirada da mesma posição da câmara (3.1) e sujeita aos parâmetros originais durante 10 tratamentos.

Ajustando os valores para intensidades menores $I_{int}=0.5A$, $I_{itd}=0.4A$, $I_{ext}=0.15A$ (Período 3 da tabela 3.1), nota-se que a intensidade e direccionalidade para esta gama são já muito intensas. Veja-se a figura 4.5 que testemunha isso mesmo. Este tipo de comportamento faz crer que a erosão é, de igual modo, pronunciadamente localizada, no entanto, só pelo facto das intensidades serem menores, suponho ser razoável deduzir que as trajetórias tenderão a ser efectuadas em percursos menos localizados.

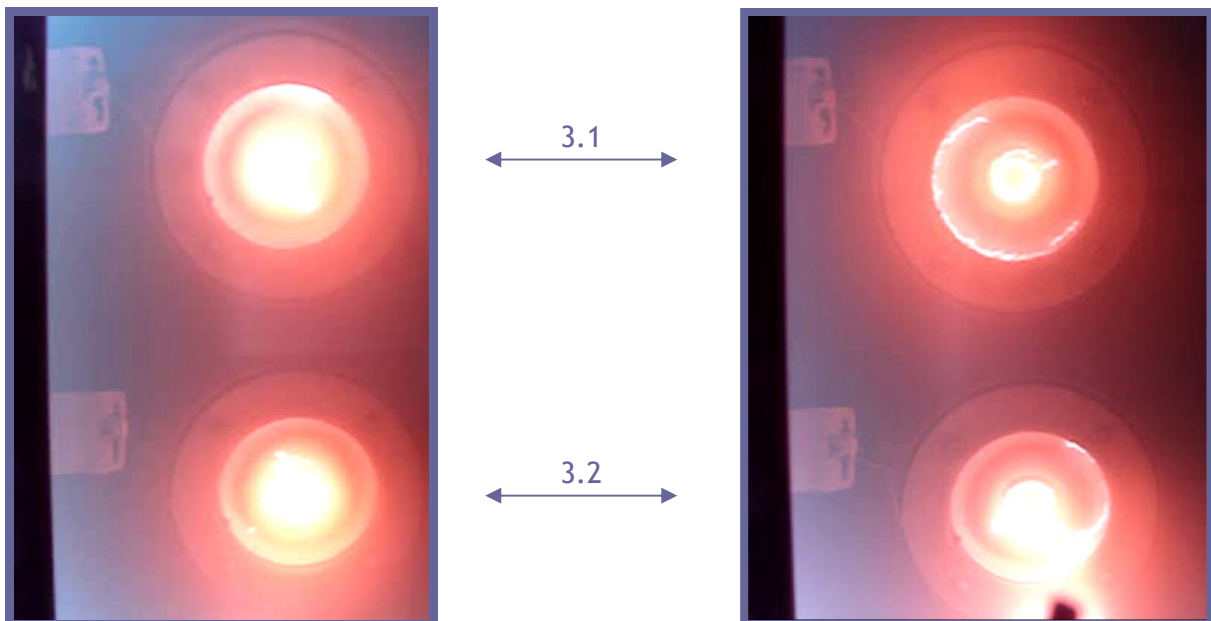


Figura 4.5 - Comportamento estável do arco eléctrico para intensidades: $I_{int}=0.5A$, $I_{itd}=0.4A$, $I_{ext}=0.15A$

Na figura 4.6 as trajectórias correspondem a uma gama de valores de intensidade de corrente ainda inferior (período 2 da tabela 3.1) $I_{int}=0.4A$, $I_{itd}=0.15A$, $I_{ext}=0.1A$, que mesmo assim, aparentam ser bem definidas no final de vida das fontes. Esta gama de valores parece ser suficientemente intensa para que nos últimos tratamentos o arco seja significativamente estável com a vantagem de desgastar as fontes de uma forma ainda menos localizada.

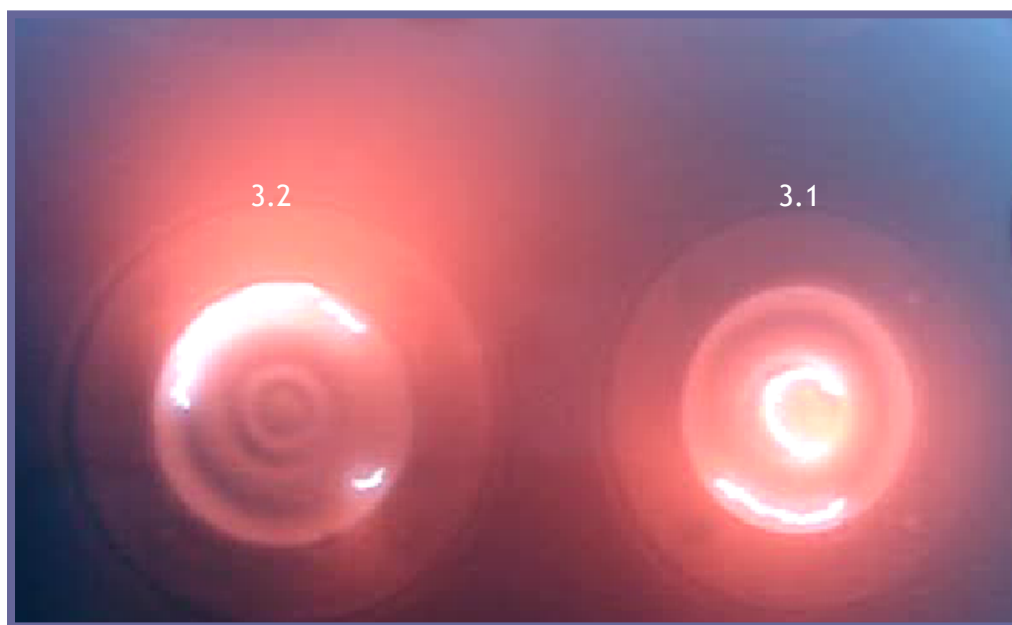


Figura 4.6 - Comportamento estável do arco eléctrico para valores de intensidade de corrente: $I_{int}=0.4A$, $I_{itd}=0.15A$, $I_{ext}=0.1A$.

Um aspecto que julgo importante salientar, e que se fez notar para qualquer uma das gamas de intensidade de corrente aplicadas, é o facto da velocidade de movimento do arco eléctrico ser notoriamente superior. Isto vai de encontro ao que a literatura nos transmite em relação à aplicação de campos magnéticos mais intensos. De facto, no decorrer dos ensaios, a gama de intensidades foi a mesma para todos os estados de vida das fontes de evaporação, no entanto, a perda de espessura das fontes de evaporação certamente que tornou o arco eléctrico bem mais sensível aos campos magnéticos aplicados.

4.2 Perda de espessura e trajectórias localizadas

Por forma a averiguar a relação da perda de espessura das fontes de alimentação com perfis de erosão mais profundos, observe-se a tabela 4.3, onde estão expostas as percentagens de perda de espessura e perda de massa das fontes de alimentação em dois períodos de 5 tratamentos.

Tabela 4.3 - Valores da variação da profundidade de erosão e variação de massa de 3 fontes de alimentação.

Estado de Vida	Fonte de evaporação					
	1.1		2.3		3.1	
	$\Delta h(\%)$	$\Delta m(\%)$	$\Delta h(\%)$	$\Delta m(\%)$	$\Delta h(\%)$	$\Delta m(\%)$
Novo - ½ Vida	26,8	30,2	32,0	30,1	27,3	27,5
½ Vida - Final	35,9	30,5	33,2	30,3	31,4	28,0
Total	62,7	60,7	65,2	60,4	58,7	55,5
% Perda de espessura	9,1	-	1,2	-	4,1	-
% Perda de massa	-	0,3	-	0,2	-	0,5
Δh - variação de espessura; Δm - variação de massa						

Analisando os valores da tabela 4.3, constata-se que a variação de massa é desprezável, enquanto que, pelo menos para as fontes 1.1 e 3.1 (9,1% e 4,1% respectivamente), as variações de profundidade de erosão são bem significativas. Isto vem confirmar a suspeita de que as trajectórias delineadas pelo arco eléctrico tendem a ser mais profundas à medida que as fontes de evaporação vão perdendo espessura. Acrescente-se que as percentagens de variação de espessura seriam teoricamente ainda mais significativas se os valores de intensidades de corrente aplicado às bobines dos cátodos não tivessem sido actualizados para valores menores no final do sexto tratamento, conforme exposto na tabela 3.2. Deduz-se portanto que a perda de espessura terá um efeito semelhante ao aumento da intensidade do campo magnético ao criar perfis mais profundos, fazendo todo o sentido actualizarem-se os valores de intensidade de corrente das bobines dos cátodos por forma a que as variações de espessura sejam idênticas ao longo de todos os tratamentos. Os valores expostos sugerem que as intensidades de corrente deveriam ser ainda mais reduzidas de forma a se alcançar essa equidade em termos de variação de profundidade de erosão. Alternativamente poder-se-iam aumentar as correntes nos tratamentos iniciais, o que seria benéfico do ponto de vista de integridade do revestimento mas penalizador no aproveitamento do material das fontes de evaporação. Da tabela 4.3 podemos também retirar a ideia da taxa de aproveitamento alcançada, cerca de 60%, um valor já bastante razoável neste tipo de processos.

4.3 Variação de espessuras

Como forma de verificar a possibilidade da alteração dos parâmetros das bobines dos cátodos ter influência na dispersão de espessuras ao longo da vertical da câmara de deposição, começou-se por averiguar a extensão do gradiente de espessuras identificando-se a localização do ponto crítico a partir do qual as espessuras são uniformes. Na tabela

4.4, identificam-se as frequências relativas das diferenças de espessura (em μm) entre peças retiradas de diferentes posições da árvore (5, 7, 9 e 10) e as peças do meio.

Tabela 4.4 - Tabela de frequências relativas para identificação do ponto crítico.

Tabela de frequências relativas				
Ocorrências (diferenças em μm)	Posição			
	5	7	9	10
0	11%	17%	10%	25%
1	28%	17%	35%	67%
2	17%	50%	50%	8%
3	39%	17%	5%	0%
4	6%	0%	0%	0%
5	0%	0%	0%	0%

Admite-se que o ponto crítico seja a 10^a posição a contar de cada um dos topos das árvores. Importa referir que nesta tabela, não estão diferenciados os valores lidos em peças retiradas do fundo ou do topo das árvores uma vez que a diferença para o valor de espessura da peça do meio é frequentemente o mesmo. Sendo assim, o ponto crítico é o mesmo no fundo e no topo. Note-se que até à posição 9 existe uma considerável variação nos valores obtidos. Já no caso dos valores da posição 10 há uma concordância bem maior, sendo os 67% de ocorrências para diferenças de espessura de $1\mu\text{m}$ exemplo disso mesmo. Adiante-se que o valor de $1\mu\text{m}$ é sensivelmente o erro de medição do operador, sendo por isso uma diferença aceitável em relação ao valor medido na peça do meio.

4.4 Teste a 140 A (todos os cátodos)

Como seria de esperar, este teste permitiu constatar que o gradiente de espessuras é maior quando se mantêm as intensidades de corrente a meio e se diminuem as dos topos. Isto sucede devido à já referida perda de material evaporado dos topos para as paredes da câmara de deposição. Porém, analisando o gráfico 4.1, constata-se que se obtêm espessuras elevadas, mesmo nos extremos. Isto acontece devido ao facto da área de superfície exposta das amostras ser elevada por se terem utilizado árvores de diâmetro inferior às que se utilizam em processo.

Perante os resultados obtidos, o interesse na redução da intensidade de corrente de arco eléctrico nos cátodos dos topos é muito pequeno uma vez que o gradiente de espessuras se torna maior e o tempo de processo teria de ser alargado. As vantagens em se operar com correntes de arco eléctrico menos intensas prendem-se com questões de estabilidade do arco (mais fácil de controlar) e, conseqüentemente, de maior facilidade na optimização dos perfis de erosão das fontes de evaporação.

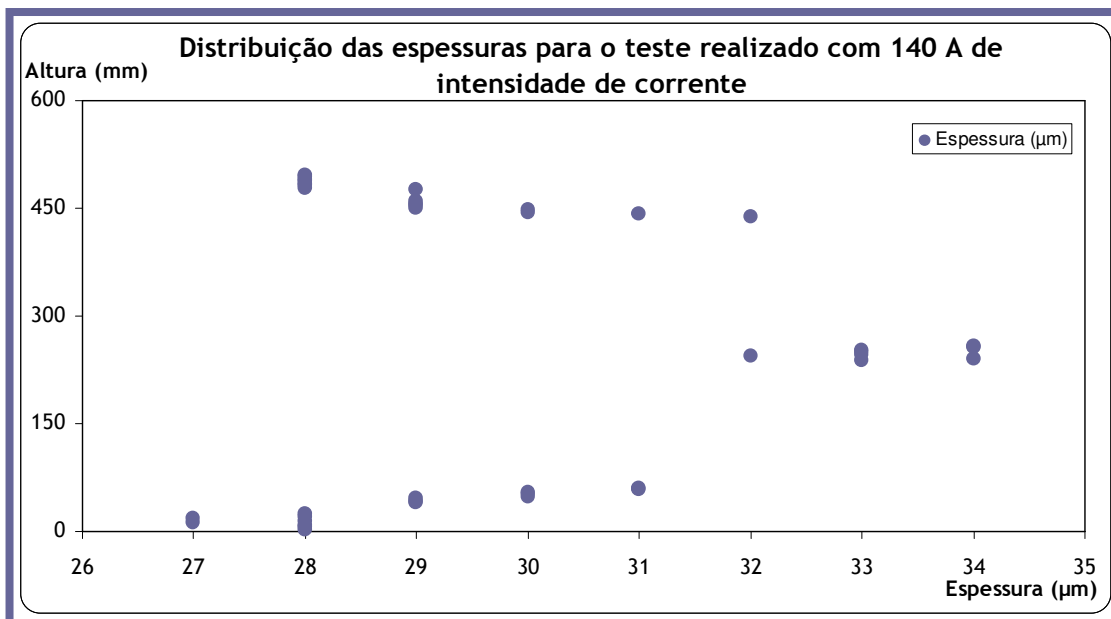


Gráfico 4.1 - Distribuição de espessuras para o teste 140 A.

4.5 Teste a 170 A (cátodos do topo)

Uma vez que as alterações dos parâmetros das bobinas não surtiram efeito no gradiente de espessuras existente, decidiu-se executar um teste que consistiu em alterar a intensidade de corrente do arco eléctrico nos cátodos dos topos. Na tabela 4.5 estão apresentados os resultados das medições efectuadas às 9 peças retiradas da árvore que seguiu para teste, conforme descrito no capítulo 3 deste trabalho.

Como se pode verificar, com a aplicação de 170 A nos cátodos dos topos as espessuras das peças retiradas das posições mais extremas das árvores chegam ao valor alvo para o qual o processo está planeado. Como seria de esperar, mantendo-se as intensidades de corrente de arco eléctrico nos cátodos das posições centrais em 140 A, as espessuras alcançadas entre as décimas posições de cada um dos topos são ligeiramente superiores comparativamente com as das peças retiradas da posição 2 de cada topo. A melhor forma para eliminar por completo o gradiente, e obter ganhos no tempo de processo é aplicar os 170 A nos cátodos dos topos e baixar ligeiramente a intensidade de corrente do arco eléctrico nos cátodos centrais para 135 A. Desta forma atenua-se a provável maior quantidade de material evaporado proveniente das fontes de evaporação dos topos.

Tabela 4.5 - Resultados do teste de uniformização de espessuras por aumento da intensidade de corrente nos cátodos dos topos para 170A.

Posição	Espessura de camada CrN (μm)
2° Topo	30
10° Topo	32
20° Topo	32
40° Topo	32
Meio	32
40° Fundo	32
20° Fundo	33
10° Fundo	33
2° Fundo	31

Com os resultados deste ensaio constata-se que é possível a redução no tempo de processo uma vez que a taxa de deposição nos topos aumentou para cerca de 4 $\mu\text{m}/\text{hora}$. No entanto, para que as fontes de evaporação suportem intensidades de arco eléctrico de 170 A ao longo de 10 tratamentos, é aconselhável que se permutem as posições centrais com as dos topos no final do 5º tratamento, caso contrário o desgaste final lido pelo equipamento nos cátodos dos topo ultrapassaria o limite estipulado de 13000 Ah.

O valor de 13000 Ah foi definido como limite levando em conta a espessura que as fontes de evaporação apresentam quando estão próximas deste valor de desgaste. Caso seja ultrapassado, não é um valor impeditivo do normal funcionamento do processo, pois não é mais do que uma estimativa, que serve como sinal de alerta aos operadores para substituírem as fontes de evaporação, podendo ser alterado sempre que se ache justificável. Julgo que actualizando os parâmetros das bobines dos cátodos, e permutando as posições das fontes de evaporação, poder-se-ão obter perfis suficientemente favoráveis para que a espessura das fontes de evaporação permita a execução de um tratamento suplementar. Neste caso, justificar-se-ia a alteração do limite de erosão para um valor superior.

Na tabela 4.6 estão calculados os desgastes no final do 5º e do 10º tratamento aplicando o procedimento de permuta de posições e aplicando os novos parâmetros de intensidade de corrente do arco eléctrico que possibilitam a eliminação do gradiente de espessuras com ganhos no tempo de processo.

Tabela 4.6 - Erosão dos cátodos para a aplicação de correntes de 170 A nos cátodos dos topos e 135 A nos do meio. Valores estimados.

Permuta de posição dos cátodos			Desgaste Ah	
Passo	I _{arco} (A)		1° ao 5°	6° ao 10°
Cr	Topos	140	0.6	408
	Meio	130		379
CrN	Topos	170	36	6120
	Meio	135		4860
	Topos	170	39	-
	Meio	135		6630
TOTAL			Topos	6528
			Meio	5239
				12278
				5265
				12173

Note-se que o cálculo para os valores de desgaste constantes da tabela 4.6, tomam como valor alvo de espessura 30 µm de camada. No entanto, sabendo que no final apenas se exigem 20 µm de camada de CrN, e que entre a etapa de controlo pós forno e controlo final apenas são removidos, no máximo, 3 µm de camada, sugiro uma redução do valor de espessura para o qual o processo está programado. Desta forma, para além de se atenuarem os desperdícios de recursos por se depositar uma camada tão elevada (30 µm) em relação à exigida no final (20 µm), uma diferença de 10 µm que corresponde a 2h30m de processo, pode-se diminuir significativamente o desgaste das fontes de evaporação, o que poderá permitir a execução de um tratamento suplementar. Sabendo que o limite inferior de especificação para a espessura da camada de CrN pós forno é de 26 µm, apresento na tabela 4.7 os ganhos em termos de tempo de processo e, conseqüentemente, de desgaste das fontes de evaporação por se programar o processo para uma espessura alvo inferior a 30 µm.

Utilizando os tempos originais de receita, a execução de um tratamento suplementar faz com que se ultrapasse o limite actual de desgaste de 13000 Ah. Apesar deste valor ser meramente um alerta, pois o que é relevante é a espessura de material das fontes de evaporação, não me parece prudente a execução de um tratamento suplementar caso a espessura alvo do processo continue a ser 30 µm. Esta opinião não se sustenta apenas no facto do desgaste limite ser ultrapassado, mas principalmente no facto de se estarem a utilizar correntes de arco eléctrico mais intensas nos topos (170 A) relativamente àquelas empregues nos parâmetros originais (155 A). Isto implica que o arco incida com maior intensidade na superfície das fontes, o que pode levar a perfis mais profundos. A maior energia de descarga eléctrica pode-se traduzir na evaporação de espécies mais energéticas, com um grau de ionização superior, criando condições para uma maior densificação do plasma à superfície das fontes de evaporação.

Tabela 4.7 - Diferenças de tempos e desgastes para a sugestão de se diminuir o valor alvo de espessura de camada para o qual o processo está programado.

Diminuição do valor alvo de espessura para o qual o processo está programado.							Tratamento suplementar		
T _d (μm\h)	I arco (A)	Espessura alvo (μm)	Tempos de receita	Tempo total (h)	Desgaste final(Ah)		Tempo	Desgaste final (Ah)	
					Topos	Meio		Topos	Meio
4	170 (topos) 135 (meio)	30	2x7h 2x7h15m 2x7h30m 2x7h45m 2x8h	75	12278	12173	8h15m	13762	13362
		28	2x6h30m 2x6h45m 2x7h 2x7h15m 2x7h30m	70	11515	11410	7h45m	12999	12600
		26	2x6h 2x6h15m 2x6h30m 2x6h45m 2x7h	65	10753	10648	7h15m	12237	11837
Desgaste limite actualmente 13000 Ah									

Caso haja oportunidade de se reduzir o valor alvo do processo para 28 μm ou 26 μm, é facilitada, como é óbvio, a execução de um tratamento suplementar, além dos ganhos em tempos de processo. Note-se pela tabela 4.7 que, mesmo apontando para 28 μm, o valor actual de 13000 Ah, teoricamente, não é ultrapassado. No entanto, volto a alertar que é fundamental avaliar o impacto que a utilização de 170 A de corrente de arco eléctrico tem na profundidade de erosão das fontes de evaporação. Esta avaliação pode ser feita sujeitando-se, no mínimo, um conjunto de fontes de evaporação a 10 tratamentos com os parâmetros de intensidade de corrente sugeridos na tabela 4.7.

Recorde-se que é conveniente que as fontes de evaporação terminem o seu tempo de vida com espessuras superiores a 2mm, sob pena de ocorrer estilhaçamento do material que as compõe. Sabendo que em média se consomem 1,3 mm de espessura por cada tratamento, significa que, para se efectuar um tratamento suplementar, no final do 10º a espessura mínima deve ser próxima dos 3,3 mm, havendo sempre alguma margem de manobra.

Independentemente da empresa pretender alterar as intensidades de corrente do arco eléctrico, sugiro que se implemente o procedimento de permuta de posição das fontes de evaporação que ocupam as posições dos topos com as centrais. Obtém-se um desgaste mais uniforme em todas as fontes e, muito possivelmente, condições para a execução de um tratamento suplementar. Atente-se na tabela 4.8 e constate-se que

empregando os parâmetros originais, mas permutando as posições das fontes de evaporação no final do 5º tratamento, o desgaste é cerca de 1100 Ah inferior ao limite de 13000 Ah. Imaginando que o último tratamento tem uma duração de 8h15m, de forma a compensar o desgaste das fontes de evaporação, o limite de 13000 Ah seria ultrapassado em 233 Ah nos cátodos dos topos e 58 Ah nos cátodos do meio. Este último valor corresponde a aproximadamente 24 minutos de tratamento e os 233 Ah correspondem a cerca de 1h25m de tratamento acima do limite.

Tabela 4.8 - Erosão dos cátodos para a aplicação de intensidades de corrente de arco eléctrico originais.

Permuta de posição dos cátodos			Desgaste Ah		
Passo	I_{arco} (A)		Tempo (h)	1º ao 5º	6º ao 10º
Cr	Topos	140	0.6	408	408
	Meio	130		379	379
CrN	Topos	155	36	5580	-
	Meio	140		5040	
	Topos	155	39	-	6045
	Meio	140		-	5460
TOTAL			Topos	5988	11873
			Meio	5419	11828
Δ Desgaste limite 13000 Ah			13000 - 11873 = 1127 Ah		
			13000 - 11828 = 1172 Ah		

Não permutando as posições, as fontes dos topos terminam com cerca de 12440 Ah e as fontes do meio com cerca de 11260 Ah de desgaste. O desgaste é menos uniforme, mesmo assim, parece-me ser perfeitamente justificável a criação de uma metodologia que seja capaz de agrupar dois conjuntos de fontes de evaporação sujeitos a 10 tratamentos cada (parâmetros de intensidade de corrente do arco eléctrico originais), e aproveitar as 4 fontes que tenham ocupado as posições centrais da câmara de deposição para um tratamento suplementar. O seu desgaste final (11260 A) sugere que possam ser utilizados em 11 tratamentos.

4.6 Perfilometria

Para que a possibilidade de execução de um tratamento suplementar ganhe maior consistência, é muito importante, senão mesmo fundamental, que se actualizem aos parâmetros das bobines dos cátodos ao longo do desgaste das fontes de alimentação. Tal como se pretende comprovar nas fotos seguintes, houve um significativo impacto no perfil de erosão das fontes de alimentação. Nas figuras 4.7 2), estão perceptíveis os resultados alcançados logo após a aplicação da receita TST1, quando comparados com o resultado da aplicação dos parâmetros originais nas figuras 4.7 1).

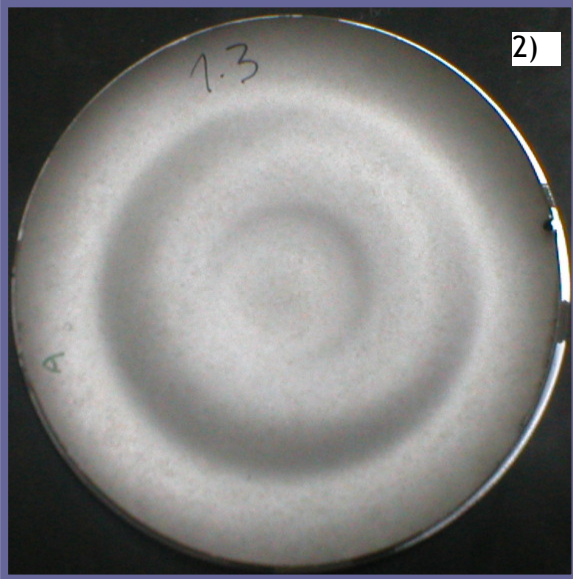
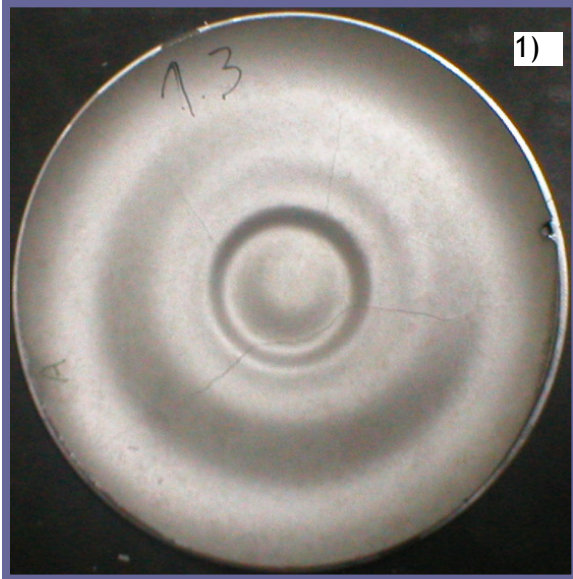
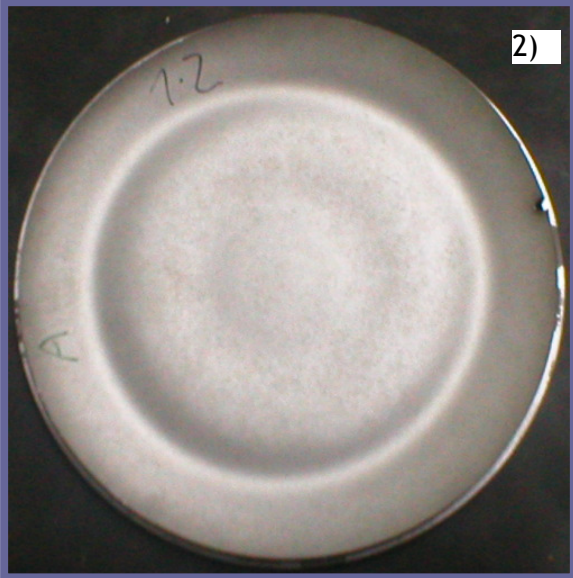
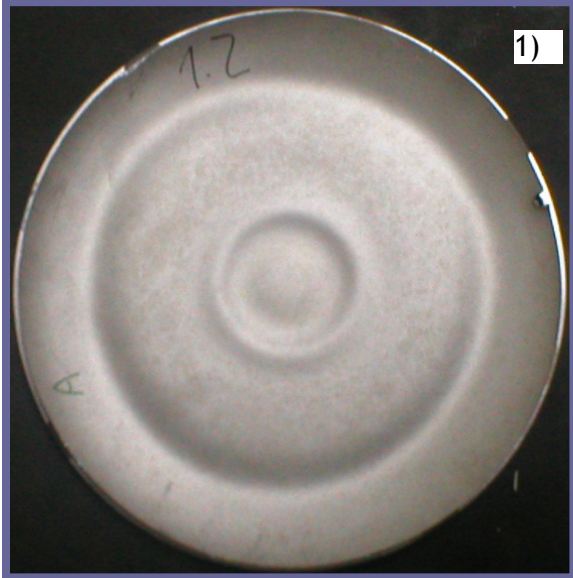
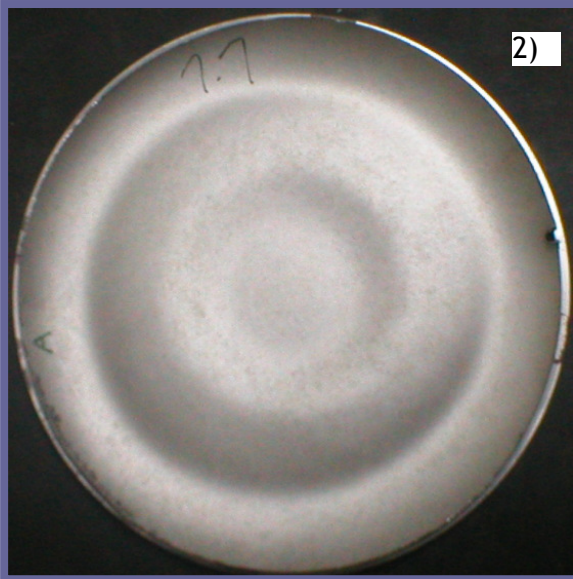
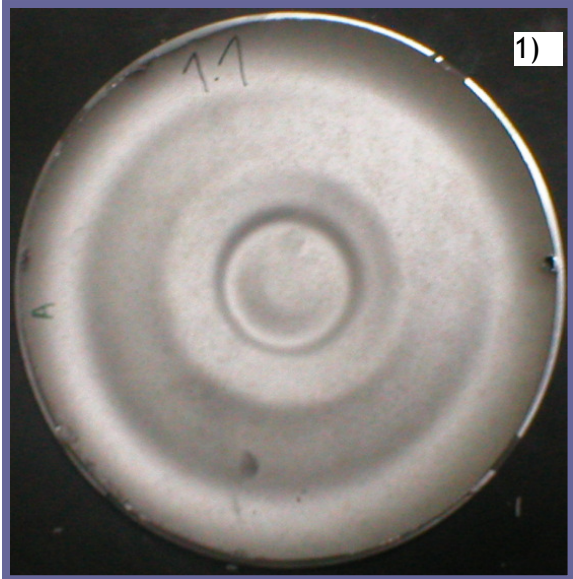


Figura 4.7 (continua)

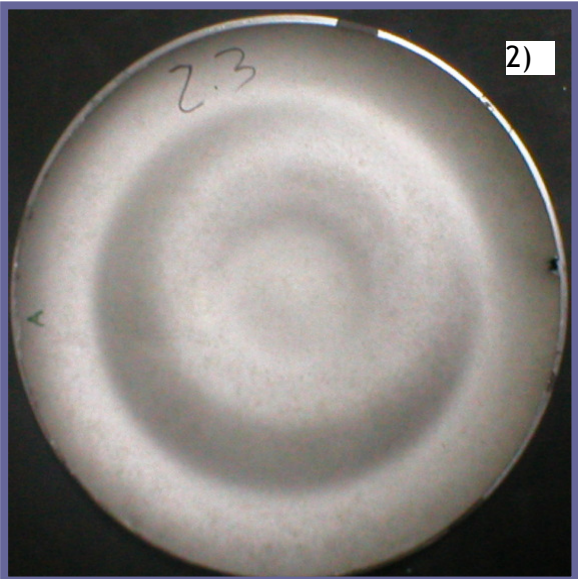
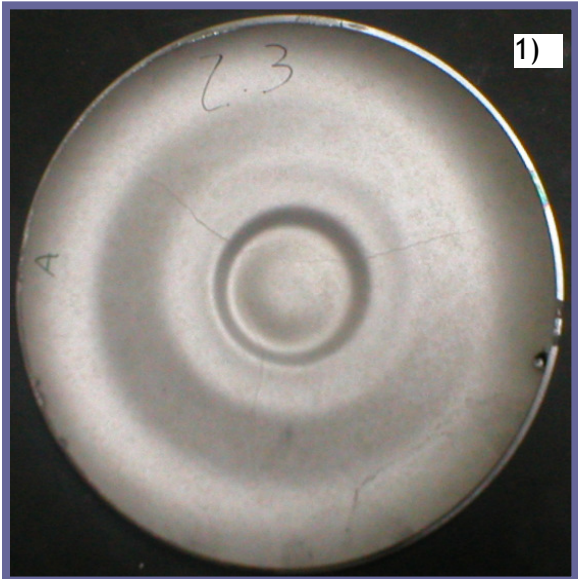
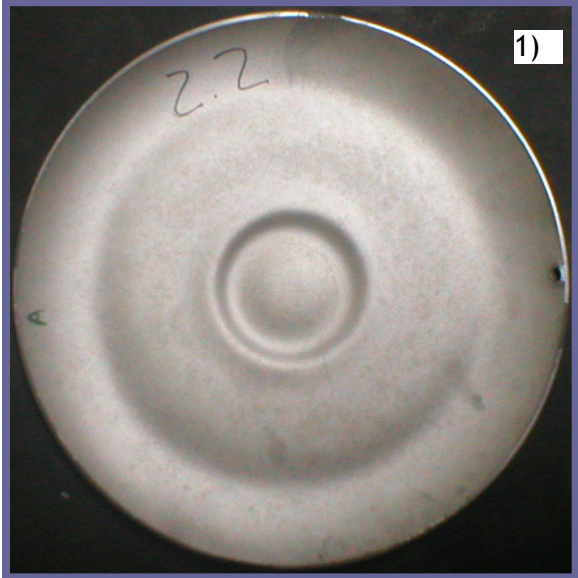
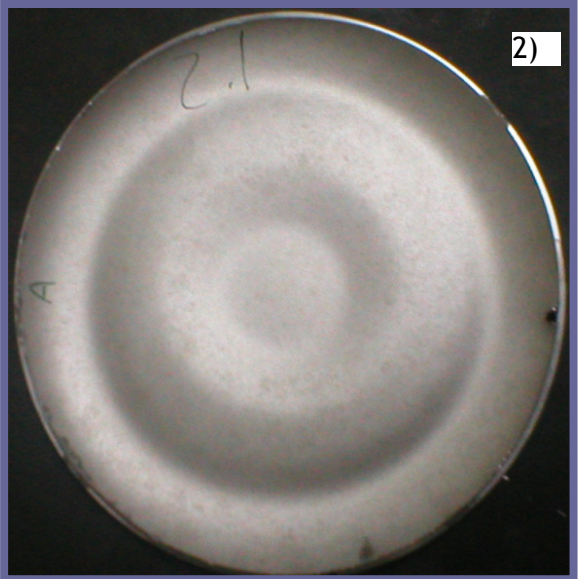
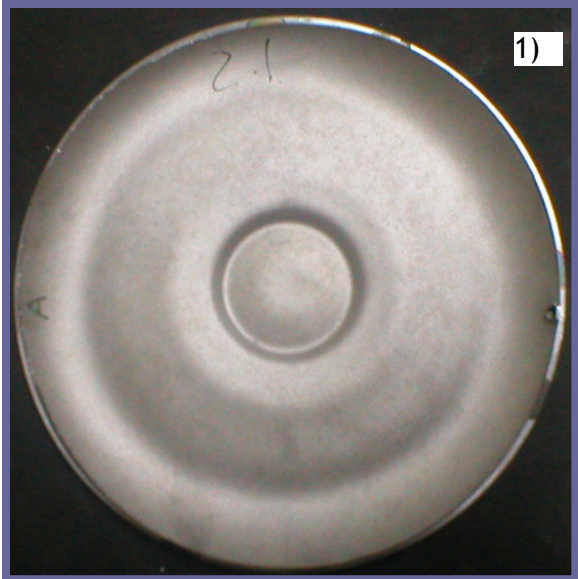


Figura 4.7 (continua)

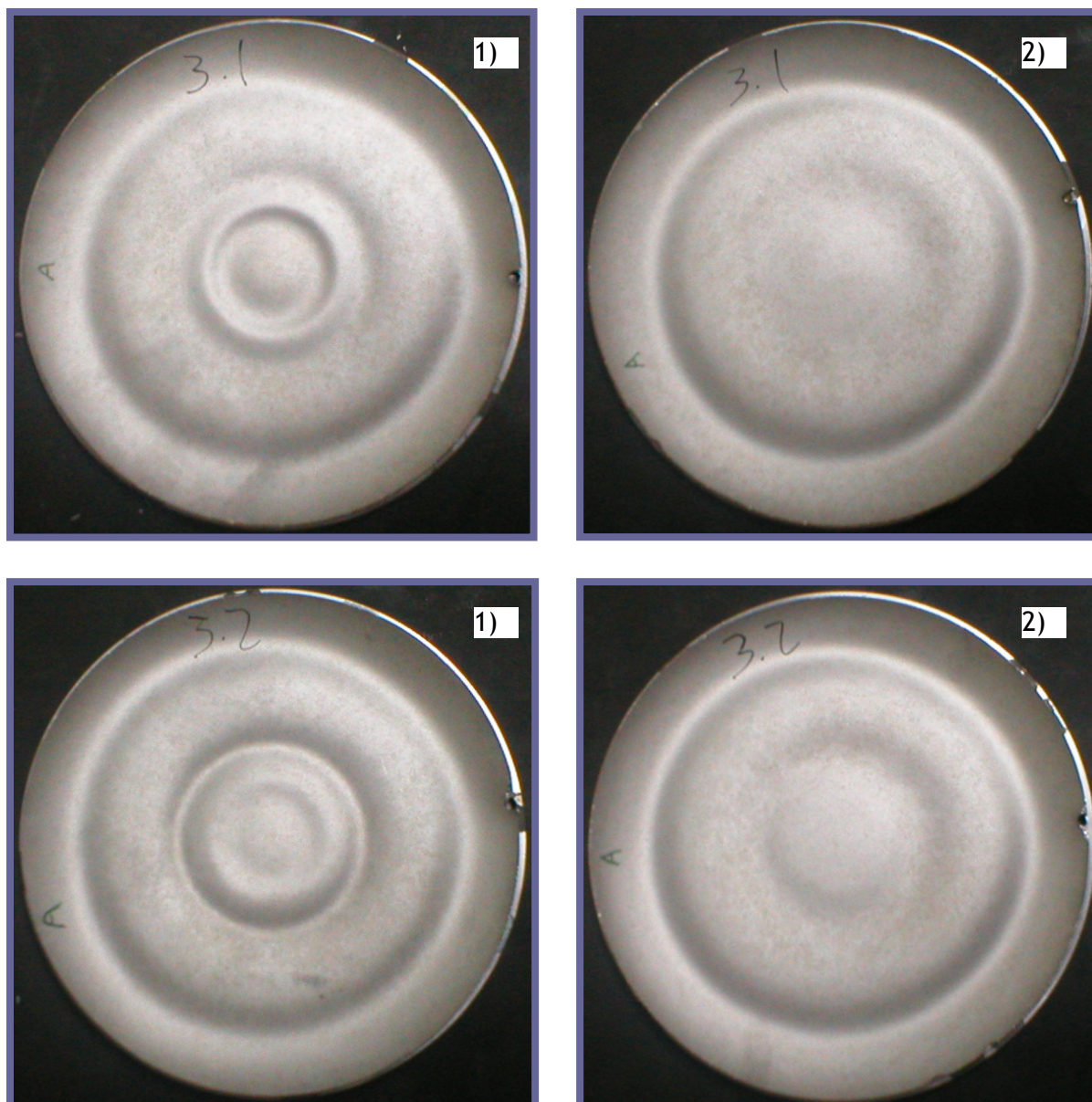


Figura 4.7 - Perfis de erosão das oito fontes de evaporação: 1) Perfis obtidos com a aplicação dos parâmetros originais, 2) Perfis obtidos após a aplicação da receita TST1.

O que facilmente se verifica, por comparação de todas as fotos acima, é a melhoria significativa no aproveitamento alcançado nas zonas mais centrais de todas as fontes de evaporação, nomeadamente as fontes que ocuparam as posições centrais (1.2, 2.2, 3.1 e 3.2) apresentam perfis praticamente planos na zona central. Ao nível das fontes dos topos (1.1, 1.3, 2.1 e 2.3), são perceptíveis as melhorias significativas na diminuição da profundidade de erosão na zona mais central da fonte, sujeita à influência da bobine interna, a qual está permanentemente activa e sujeita às maiores intensidades de corrente.

Aproveito desde já para adiantar que as restantes receitas (TST2, TST3, TST4, TST5 e TST6) tiveram como principal objectivo atenuar a profundidade de erosão na periferia de

todas as fontes de evaporação. Será necessário induzir o arco a percorrer trajectórias mais centrais para que no final dos 10 tratamentos, se criem boas condições para a aplicação de 170 A de corrente nos cátodos do topo. Em alternativa, poder-se-ia efectuar um tratamento suplementar com os parâmetros de corrente de arco eléctrico originais, sendo para isso necessário que a espessura das fontes de evaporação esteja próxima dos 3,3 mm no final dos habituais 10 tratamentos.

Nos gráficos 4.2, 4.3 e 4.4, estão traçados os perfis de erosão de todos os conjuntos de fontes de evaporação sujeitos às receitas de teste e um perfil traçado a um conjunto de fontes sujeito à aplicação dos parâmetros originais para servir como termo de comparação à evolução dos perfis de erosão. Está também representada uma linha horizontal para uma espessura de 3,3 mm, espessura mínima aconselhada no final do penúltimo tratamento, que pretende servir como ponto de referência para a possibilidade de se efectuar um tratamento suplementar além dos 10 actualmente realizados.

A análise destes gráficos confirma as melhorias significativas nas zonas mais centrais das fontes de evaporação. Constata-se também que a maior dificuldade reside nas baixas espessuras da zona mais periférica das fontes de evaporação. A tentativa de aumento de espessura nesta zona consistiu em diminuir os tempos de actividade da bobine externa (TST2, TST3 e TST4), e desactivar a bobine por completo durante os 10 tratamentos (TST5 e TST6). Como complemento, e de acordo com o que foi sendo discutido com o fornecedor dos equipamentos, tentou-se induzir o arco a movimentar-se em trajectórias mais internas, mantendo o valor de intensidade de corrente da bobine interna razoavelmente mais elevado e diminuindo consideravelmente os valores de intensidade de corrente nas bobines intermédia e externa por terem polarizações contrárias e influenciarem o movimento do arco de uma forma contrária. O que se pretende é que o valor de intensidade de corrente na bobine interna (polarização negativa) compense as intensidades de corrente aplicadas às restantes duas bobines, as quais possuem uma polarização positiva para que o arco seja absorvido para zonas mais centrais das fontes. Notou-se que mesmo desactivando a bobine externa, o arco tem uma tendência natural em viajar na zona mais periférica do alvo para as intensidades de corrente utilizadas. Esta tendência poderia ser contrariada aumentando o valor de corrente da bobine interna, no entanto, a profundidade de erosão que se desenvolveria a meio seria consideravelmente elevada, o que já acontecia quando o valor de corrente nesta bobine era de 1 A.

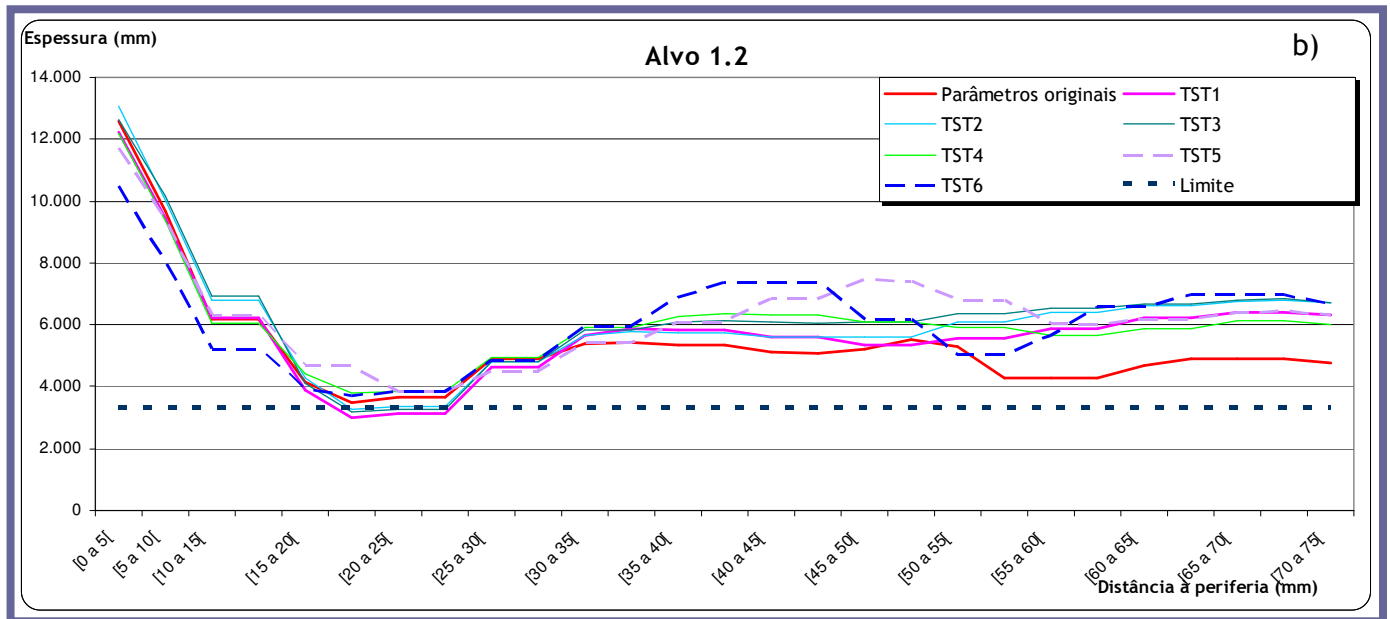
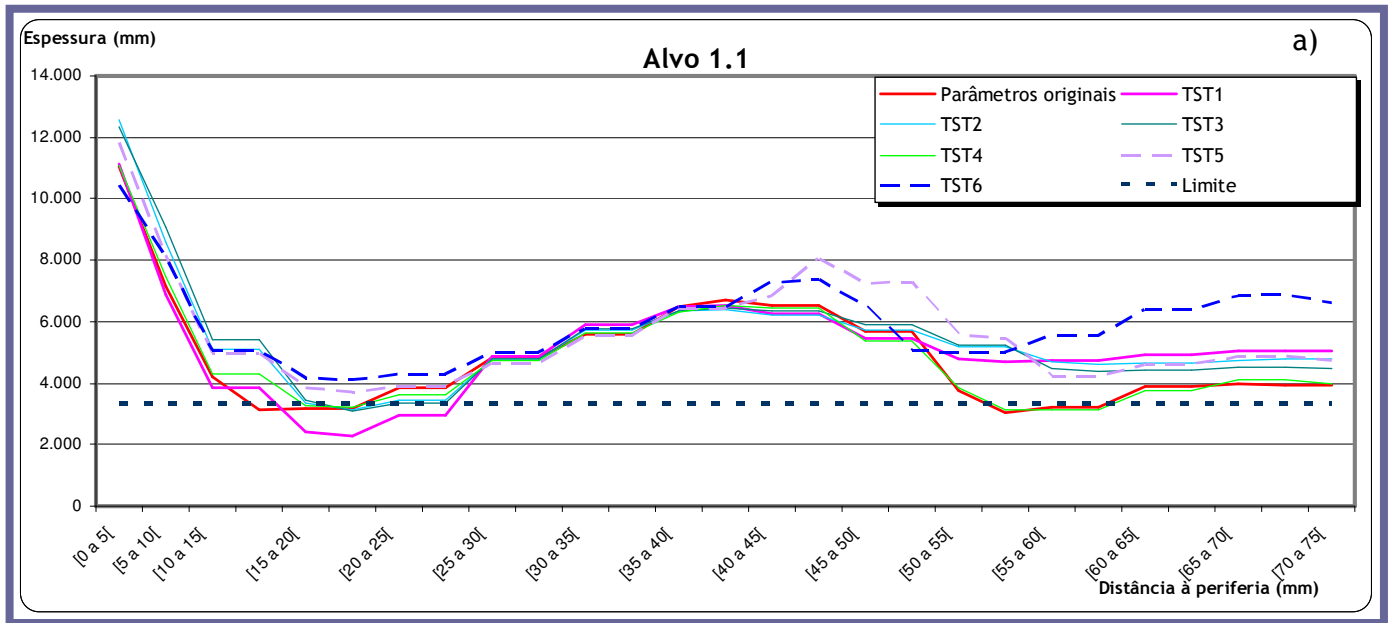
Pela observação dos gráficos 4.2, e analisando o que acontece para a curva dos parâmetros originais, notamos que os pontos mais críticos são na periferia e na zona mais interna das fontes de evaporação. No primeiro caso devido à tendência que o arco tem em

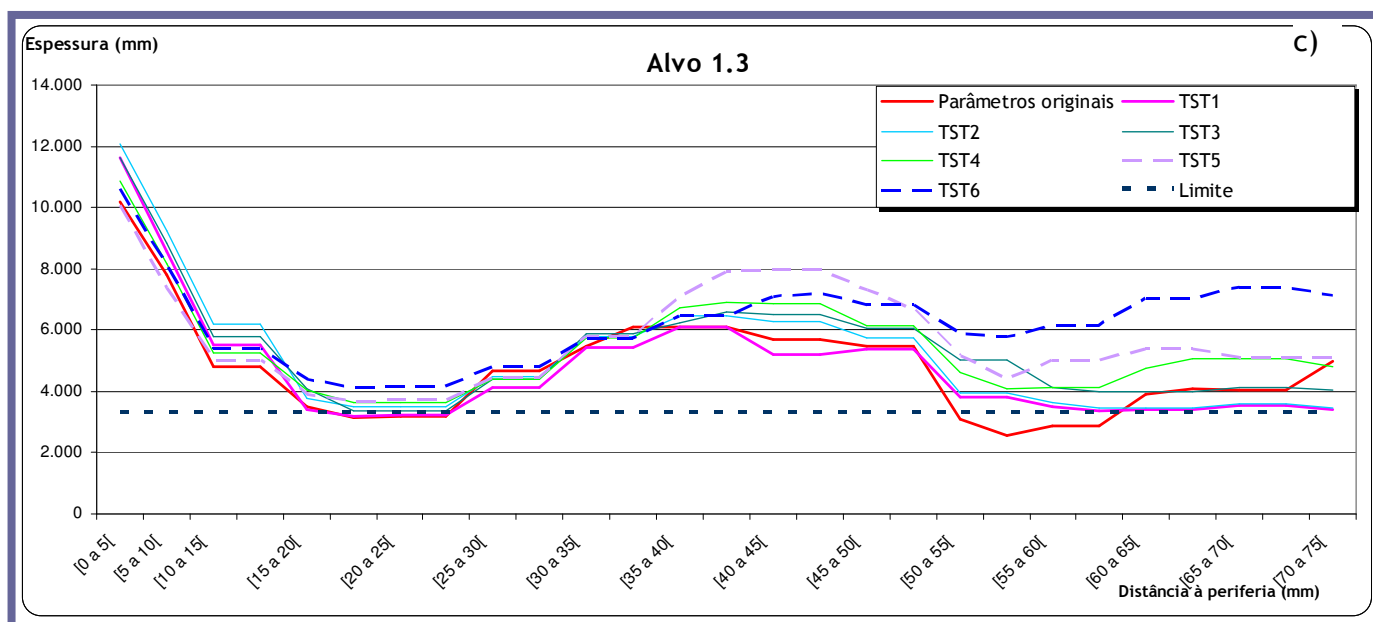
se fixar na trajectória mais externa, apesar da bobine que comanda essa trajectória estar desactiva durante 6 segundos em cada período de 7,5 segundos, e no segundo caso devido à mais elevada intensidade de corrente aplicada à bobine que opera nessa zona e que está permanentemente activa. A intensidade de corrente do arco eléctrico terá igualmente um efeito significativo na maior profundidade de erosão verificada na zona mais interna das fontes de evaporação 1.1 e 1.3 relativamente a 1.2. Note-se que na zona mais periférica da fonte 1.2 a profundidade de erosão não é tão elevada, havendo uma melhor distribuição da erosão para a zona central da fonte de evaporação. Em contrapartida nas fontes 1.1 e 1.3, o arco eléctrico cria um perfil menos homogéneo pelo facto da espessura a meio ser bastante mais elevada do que na periferia ou no centro. Com estas condições de processo, e pela análise do gráfico 4.2 b), a fonte 1.2 estaria disponível para executar um tratamento suplementar. Mesmo o valor de erosão lido pelo equipamento no final dos 10 tratamentos, cerca de 11500 Ah, aceita a execução de mais um tratamento uma vez que a erosão limite é de 13000, e em média, por tratamento, a erosão ronda os 1150 Ah para os cátodos do meio. No entanto, sempre que se chega ao final dos 10 tratamentos todas as fontes são retiradas e substituídas por fontes novas. Os gráficos 4.2 a) e c) mostram que as duas fontes dos extremos apresentam perfis de erosão muito no limite ou mesmo abaixo do aceitável para a execução de um tratamento suplementar, pelo que não é aconselhável que, aplicando os parâmetros originais, se sujeitem estas fontes a um tratamento suplementar.

A aplicação das novas receitas, em que as intensidades de corrente das bobines eram actualizadas para valores progressivamente inferiores, e em alguns casos, os tempos de actividade das bobines intermédia e externa alterados, teve um efeito mais pronunciado na zona interna das fontes de evaporação. Para as fontes do painel 1, os resultados mais satisfatórios foram alcançados com a aplicação das receitas TST5 e TST6.

Note-se que, nas fontes 1.1 e 1.3, a profundidade alcançada na periferia com a receita TST6 é cerca de 1mm inferior em relação à receita original. Uma forte razão para este efeito deve-se ao facto de, para esta receita, a bobine externa ter estado permanentemente desactivada ao longo dos tratamentos. Na fonte 1.2, em que o perfil de erosão já era suficientemente favorável na periferia, também é visível uma ligeira melhoria. Na zona central das 3 fontes do painel 1, é evidente a obtenção de espessuras mais elevadas no final dos 10 tratamentos aplicando as receitas TST5 e TST6. Na origem destes resultados estará um varrimento mais superficial por parte do arco eléctrico, conseguido mantendo-se a corrente na bobine interna razoavelmente elevada e diminuindo gradualmente a corrente na bobine intermédia, o que terá incutido no arco um movimento mais aleatório que, conseqüentemente, terá atenuado a erosão por trajectórias

excessivamente localizadas, sendo de supor que se obtenham maiores taxas de aproveitamento do material das fontes de evaporação.





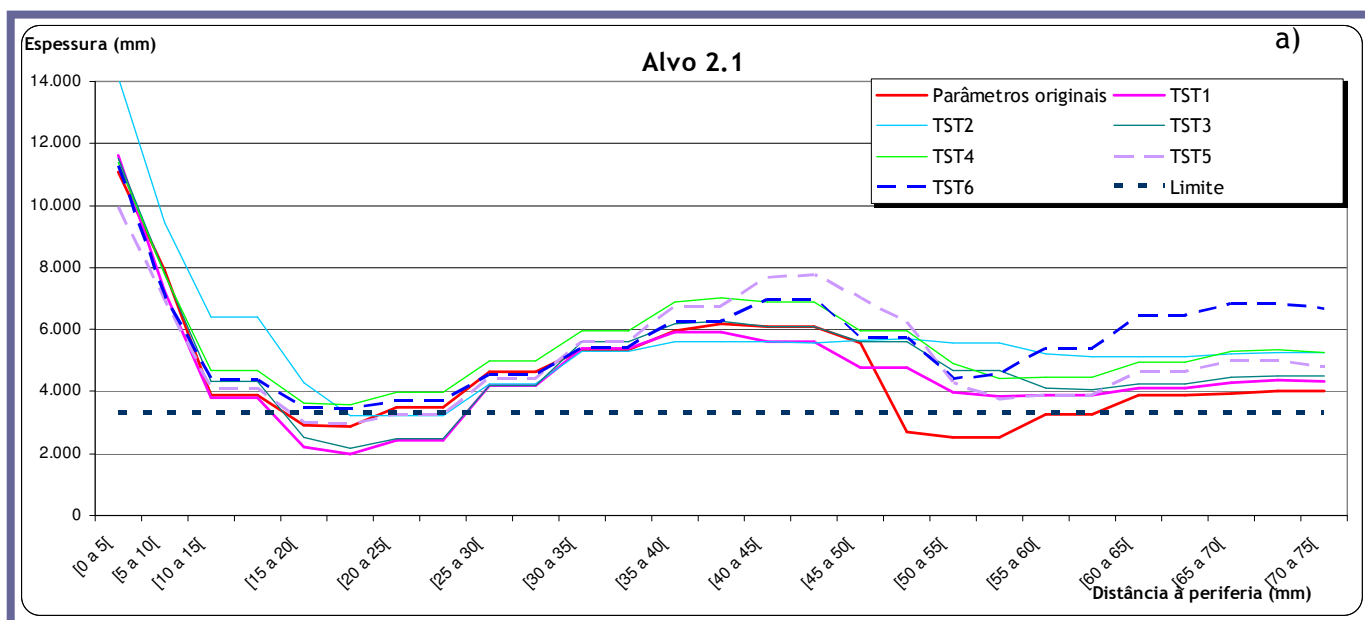
Gráficos 4.2 - Evolução dos perfis de erosão nas fontes de evaporação do painel lateral 1: a) topo, b) meio, e c) fundo.

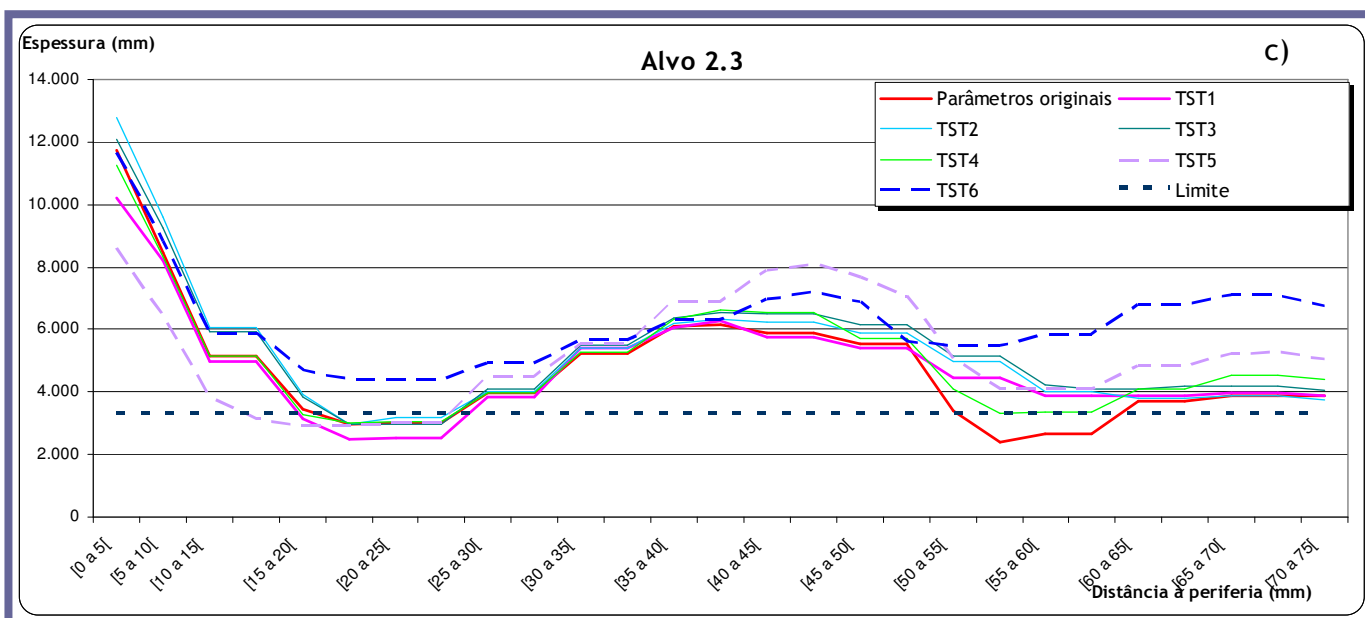
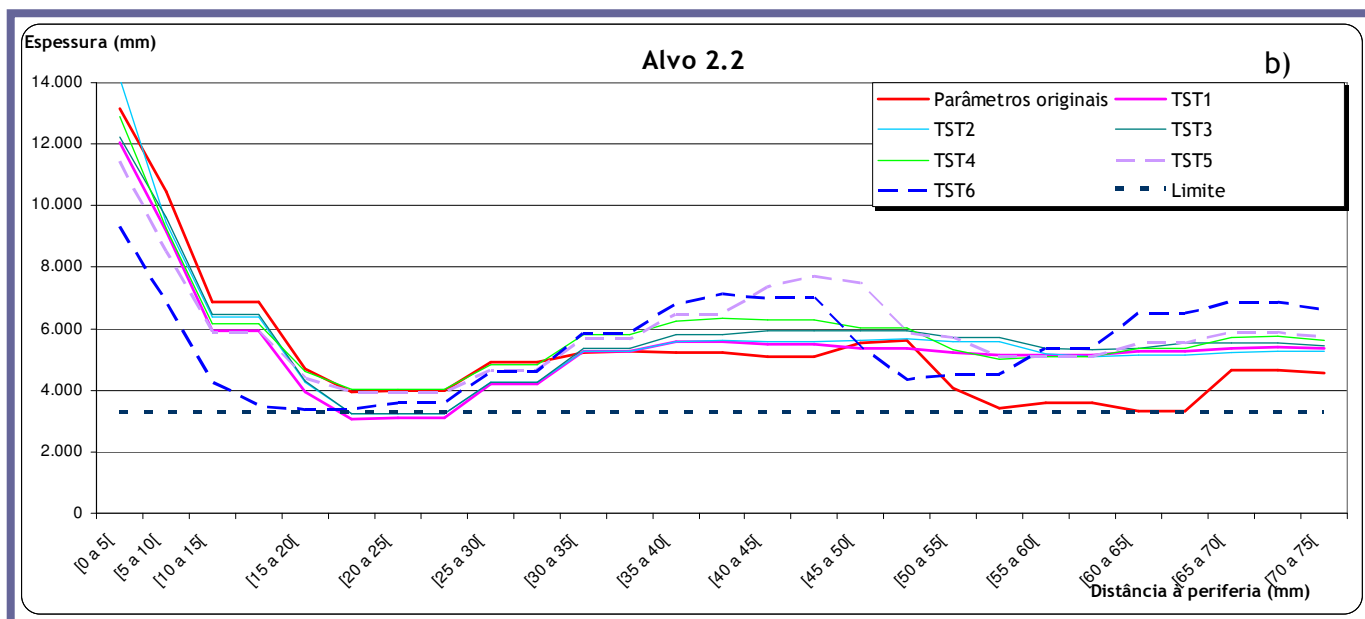
O que sucede nas fontes de evaporação do painel 2 é algo muito idêntico ao caso anterior. Nas fontes de evaporação dos extremos deste painel (2.1 e 2.3), a profundidade de erosão na zona interna é bastante pronunciada, como se pode verificar pelos gráficos 4.3 a) e c) e pelas fotos d1 e f1 das figuras 4.7. Mesmo no caso particular da fonte 2.2, nota-se que a meio da fonte a profundidade alcançada atinge praticamente o limite de 3,3 mm, o que não é constatado para as restantes fontes localizadas a meio da câmara de deposição (1.2, 3.1 e 3.2). A profundidade de erosão na periferia da fonte 2.2 é, no entanto, das menos pronunciadas.

A aplicação das novas receitas teve um efeito bastante positivo nas zonas centrais das fontes de evaporação do painel 2. Todas as fontes apresentam melhorias nestas zonas. No entanto, as profundidades de erosão na periferia destas fontes foram as mais difíceis de atenuar, nomeadamente para a fonte 2.1. A taxa de aproveitamento na zona intermédia continua baixa, o que é reflectido pelas elevadas espessuras que as fontes apresentam nestas zonas no final dos 10 tratamentos, acima de 6 mm, o bastante para a execução de mais 3 tratamentos.

Destaco o perfil muito favorável obtido na fonte de evaporação 2.3 com a receita TST6. Durante a aplicação desta receita as fontes de evaporação permutaram de posição quando se encontravam a meio de vida. A posição 2.3, que aqui se representa, foi ocupada por uma fonte de evaporação que até ao final do 5º tratamento ocupava a posição 3.2, a qual apresenta perfis de erosão muito favoráveis para todas as receitas. Daqui se retira uma boa oportunidade para se conseguirem perfis de erosão mais favoráveis. Se a empresa

achar por bem permutar as posições das fontes de evaporação a meio de vida, o que sugiro que se faça, poder-se-ão fazer determinadas combinações em que se coloquem as fontes de evaporação que ocupam as posições mais favoráveis até ao 5º tratamento em posições mais desfavoráveis em termos de profundidade de erosão nos últimos tratamentos. A fonte 2.3 é um bom exemplo. Como se observa no gráfico 4.3 c), com a aplicação das receitas de teste e da receita original, os perfis de erosão eram dos mais profundos na periferia e no centro das fontes analisadas. Pelo facto de na receita TST6 se ter colocado uma fonte proveniente da posição 3.2, que apresenta perfis muito favoráveis para qualquer receita (analise-se o gráfico 4.4 b)), a dificuldade de se conseguirem espessuras maiores nas supracitadas zonas foi aparentemente suprimida. O mesmo se passou para o perfil obtido em 1.3 (gráfico 4.2 c)), cuja profundidade na periferia foi ligeiramente atenuada pelo facto de nesta posição ter sido colocada uma fonte proveniente da posição 3.1.



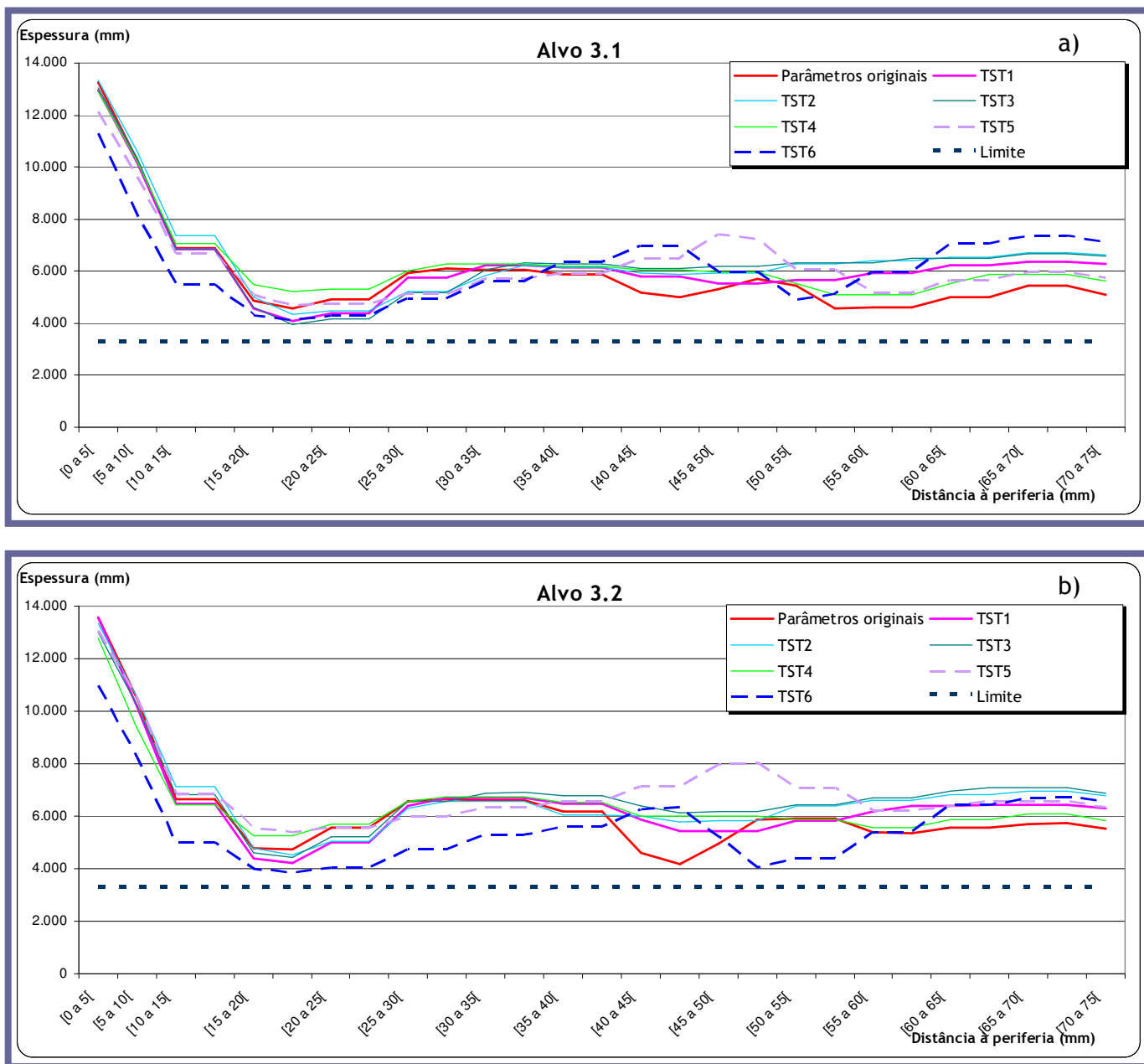


Gráficos 4.3 - Evolução dos perfis de erosão nas fontes de evaporação do painel lateral 2: a) topo, b) meio, e c) fundo

No respeitante aos perfis de erosão das fontes de evaporação das posições 3.1 e 3.2, seria possível a execução de um tratamento suplementar com estas fontes quando aplicados os parâmetros originais. Os perfis de erosão obtidos para 3.1 e 3.2 e traçados nos gráficos 4.4 estão claramente acima dos mínimos aconselháveis para a execução de mais um tratamento. Por comparação com os restantes perfis, aparentam ser os mais uniformes.

Nestas fontes, a aplicação de outras receitas para além da original não provocou grandes alterações aos perfis de erosão. Faça novamente referência ao facto de ser uma boa prática a permuta das posições das fontes de evaporação quando os conjuntos

estiverem a meio de vida (final do 5º tratamento), e aproveitarem-se estas duas fontes para ocuparem as posições mais críticas a nível de profundidade de erosão. Desta forma conseguem-se perfis de erosão mais uniformes. As permutas efectuadas durante a aplicação da receita TST6 parecem-me as mais adequadas, no entanto, julgo ser de todo o interesse que os responsáveis da empresa tentem outras combinações, nomeadamente as posições 1.1 e 2.1 com 3.1 e 3.2.



Gráficos 4.4 - Evolução dos perfis de erosão nas fontes de evaporação do painel traseiro (painel 3): a) e b) situados a meio da câmara de deposição

Para o caso dos parâmetros originais, os perfis obtidos nas fontes 1.2, 3.1 e 3.2 aparentam suportar um tratamento suplementar. No entanto, e como já foi referido, não é prática da empresa aproveitar estas ou quaisquer outras fontes para a execução de um novo tratamento, pelo que fica aqui uma sugestão, para que, pelo menos estas três fontes sejam reutilizadas. Por forma a não interferir na distribuição de espessuras, uma vez que têm um desgaste acentuado comparativamente com fontes de evaporação novas, sugiro que se crie uma metodologia de armazenamento das fontes localizadas nas posições acima referidas e se utilizem, à medida que estejam disponíveis, oito fontes para preencher as oito posições da câmara de deposição.

Julgo que a permuta de posições entre fontes de evaporação efectuada durante TST6 permitirá o aproveitamento de, no mínimo, 6 fontes de evaporação, deixando de parte as fontes 2.1 e 2.2 que permutaram entre si no final da 5ª carga e apresentam na periferia profundidades acentuadas. A sugestão de se aproveitarem as 6 fontes vem no sentido de um procedimento mais seguro, pois julgo ser viável que a totalidade das 8 fontes de evaporação seja capaz de executar 11 tratamentos seguindo os parâmetros e procedimentos aplicados durante a receita TST6.

4.7 Avaliação do refugo

Para além do controlo de espessura, dureza e morfologia solicitado ao laboratório metalográfico, é também efectuada uma inspecção visual a todas as peças, imediatamente antes do embalamento, para avaliação de pitting e possíveis lascas causadas pelas operações finais de lixamento ou escovamento na face de contacto dos segmentos. Para este trabalho, além das características de espessura, dureza e morfologia que estiveram sempre de acordo com a especificação exigida pelas normas internas da empresa, apenas é relevante a avaliação de pitting (porosidades resultantes do arrancamento de macropartículas). No entanto, os resultados de pitting e avaliação de lascas não são diferenciados na avaliação do refugo. Mesmo assim, é possível constatar, pelo gráfico 4.5 abaixo apresentado, que a aplicação das novas receitas durante os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro não prejudicou os níveis de refugo habitualmente obtidos. Janeiro, o único mês em que se utilizaram exclusivamente receitas de teste, foi mesmo o mês com menor taxa de refugo.

Com o auxílio deste gráfico confirmam-se as expectativas de que a alteração dos parâmetros de corrente nas bobinas dos cátodos é um procedimento de risco controlado mas que pode ter uma influência significativa na optimização deste processo PVD.

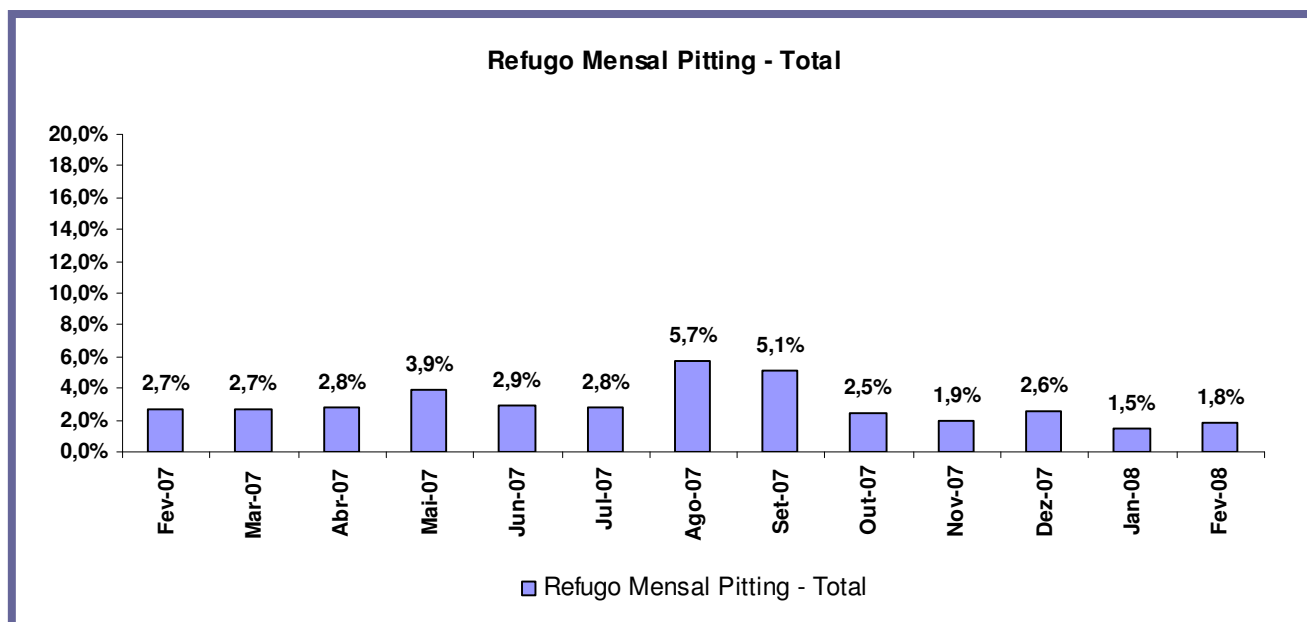


Gráfico 4.5 - Avaliação do refugio de peças sujeitas tratadas na PVD_4.








4.8 Considerações finais


De tudo o que foi apresentado e discutido, destaco a possibilidade de se diminuir o tempo de processo aumentando a intensidade de corrente do arco eléctrico dos cátodos dos topos para 170 A e reduzindo nos cátodos do meio para 135 A, programando o processo para um valor de espessura inferior a 30 μm . A execução de um tratamento suplementar é facilitada caso se permutem as posições das fontes de evaporação dos topos para o meio, e vice-versa. É fundamental a actualização dos parâmetros das bobinas dos cátodos para a concepção de perfis de erosão capazes de suportar um tratamento suplementar. A implementação da receita TST6 proporciona bons resultados. Porém, esta foi a única receita em que se permutaram as posições das fontes de evaporação. Julgo ser de todo o interesse que se experimente o mesmo procedimento para as restantes receitas, nomeadamente para a TST4 e TST5.


Consultando um documento onde constam todos os custos inerentes ao processo PVD, nomeadamente ao caso particular da máquina PVD_4, é possível constatar que a “simples” execução de um tratamento suplementar possibilita a redução em 0.03€ do custo por peça produzida. Utilizando o valor de 510.000 peças/ano, constante nesse mesmo documento, a execução de um tratamento suplementar origina um ganho de 15.300€. Neste valor não estão contabilizados os ganhos implícitos à diminuição do tempo de processo. A título de curiosidade refira-se que os segmentos com tratamento PVD têm vindo a ganhar cota de mercado, pelo que o número de peças ano tende a aumentar e consequentemente a necessidade de uma maior cadência de produção.

Outros ganhos podem advir do facto de se eliminar o gradiente de espessuras inicial. Sabendo à partida que todas as peças apresentam camadas com espessura idêntica, faz todo o sentido reduzir o controlo de peças efectuado pelo laboratório metalográfico da empresa. Actualmente são recolhidas 3 peças por cada tratamento efectuado, algo que pode ser repensado caso os responsáveis da empresa decidam adoptar algumas das sugestões que ao longo deste trabalho vêm sendo propostas.

5. CONCLUSÕES

-  A alteração da intensidade de corrente nas bobines dos cátodos não alterou o gradiente de espessuras existente ao longo da vertical da câmara de deposição da PVD_4;
-  A actualização dos parâmetros das bobines dos cátodos revelou ser um factor preponderante na modificação dos perfis de erosão das fontes de evaporação;
-  Os ensaios de perda de massa e perfilometria sugerem que a diminuição de espessura das fontes de evaporação tem um efeito idêntico ao aumento de intensidade de corrente nas bobines dos cátodos. Esta diminuição cria perfis de erosão mais localizados à medida que as fontes de evaporação vão sendo desgastadas;
-  O ensaio realizado com a utilização de 140 A de intensidade de corrente de arco eléctrico em todos os cátodos origina gradientes de espessura superiores devido às perdas significativas (2/3) de material das fontes de evaporação dos topos para as paredes da câmara de deposição;
-  O aumento da intensidade de corrente do arco eléctrico para 170 A nos cátodos dos topos permite aumentar a taxa de deposição de cerca de 3,5µm/h para 4µm/h. É aconselhável uma ligeira redução na intensidade de corrente nos cátodos do meio para 135 A de forma a se eliminar o gradiente de espessuras;
-  A permuta das fontes de evaporação a meio de vida possibilita a obtenção de perfis de erosão mais uniformes e é fundamental para a execução de um tratamento suplementar utilizando os parâmetros originais do processo (155 A e 140 A);
-  Sabendo que no controlo final é especificada uma espessura mínima de 20µm, e que nas etapas intermédias entre o pós forno e o controlo final se perdem no máximo 3 µm de camada, sugiro que se reconsidere o valor de 30 µm de espessura para o qual o processo está programado para um valor inferior. A diminuição deste valor acarreta ganhos significativos no tempo e desgaste dos consumíveis do processo;

-  A execução de um tratamento suplementar utilizando os parâmetros de intensidade de corrente de arco eléctrico acima sugeridos para a uniformização das espessuras (170 A e 135 A), está dependente da diminuição do tempo de processo que a empresa esteja disposta a implementar. Uma redução de uma hora no tempo de processo, projecta o processo para a obtenção de 26 μm no final de cada tratamento. No final dos habituais 10 tratamentos, as fontes desgastaram-se menos 10h, tempo mais do que suficiente para a execução de um tratamento suplementar. Deduz-se portanto que é possível a execução de um tratamento suplementar com redução de uma hora no processo. Não se justificam reduções de tempo de processo superiores pelo facto do ganho de material daí resultante não permitir a execução de um 12º tratamento.

-  A uniformização de espessuras sugere que se repensem as metodologias de controlo de peças provenientes de PVD na etapa pós forno.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Mahle, “Performance - Components and systems for the engine and its periphery”, 2 (2006);

[2] Pauleau Y., “Cathodic Arc Evaporation and its applications to Thin Film Synthesis”, Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques, Chapter 11, National Polytechnic Institute of Grenoble France, (2006);

[3] Boxman R.L., Martin P.J., Sanders D.M., “Handbook of vacuum arc science and technology, Fundamentals and applications”, Noyes Publications, Nova Jersey, Estados Unidos da América, (1995); p. 283

[4] Martin P.J., “Cathodic arc evaporation”, Handbook of thin film process technology, IOP Publishing Ltd, (1995);

[5] Wang D.Y., Weng K.W., “Deposition of CrN coatings by current modulating Cathodic arc evaporation”, Surface and Coatings Technology, 137 (2001), p. 31-37;

[6] Li G., Deshpande P., Li J.H., Lin R.Y., “Nano Cr Interlayered CrN coatings on steels”, Tsinghua Science and Technology, Volume 10, No. 6, December (2005), p. 690-698;

[7] Broszeit E., Friedrich C., Berg G., “Deposition, properties and applications of PVD Cr_xN coatings”, Darmstadt University of Technology, Institute of Materials Engineering, Darmstadt - Germany, (1999);

[8] Bunshah F.R., “Vapour deposition technologies”, Chapter 2, Handbook of Hard Coatings, Norwich, N.Y., Noyes Publications, Park Ridge, N.J. William Andre, Pub., (2001), p. 4-5;

[9] Ehasarian A.P., Hovsepian P.E., New R., Valter J., “Influence of steering magnetic field on the time resolved plasma chemistry in Cathodic arc discharges”, Journal of Physics D: Applied Physics, 37 (2004), p. 2101-2106;

[10] Pradhan S.K., Nouveau C., Vasin A., Djouadi M.A., “Deposition of CrN coatings by PVD methods for mechanical application”, Surface and Coatings Technology, 200 (2005), p141-145;

[11] Sítio internet <http://www.lbl.gov/tt/techs/lbnl1484.html>, (visitado em 17 de Janeiro de 2007);

[12] Boxman R.L., Martin P.J., Sanders D.M., “Handbook of vacuum arc science and technology, Fundamentals and applications”, Chapter 6, Noyes Publications, Nova Jersey, USA, (1995); p. 372-383;

[13] Santos H., “Apontamentos de Tratamentos Térmicos”, Licenciatura em Engenharia Metalúrgica e Materiais, ano lectivo 2004/05, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

[14] Boxman R.L., Martin P.J., Sanders D.M., “Handbook of vacuum arc science and technology, Fundamentals and applications”, Chapter 6, Noyes Publications, New Jersey, USA, (1995), p. 400-404;

[15] Siemroth P., Zimmer O., Schulke T., Vetter J., “Vacuum arc evaporation with programmable erosion and deposition profile”, Surface and coatings technology, 94-95 (1997), p. 592-596;

[16] Boxman R.L., Beilis I.I., Gidalevich E., Zhitomirsky V.N., “Magnetic control in vacuum arc deposition: a review”, IEEE Transactions on Plasma Science, 33 (2005), p. 1618-1625;

[17] Zimmer O., Vetter J., Rackwitz N., Siemroth P., “Calculation and measurement of the time dependent erosion rate of electromagnetic steered rectangular arc cathodes”, Surface and Coatings Technology, 146-147 (2001), p. 195-200;

[18] Drouet M.G., “The physics of the retrograde motion of the electric arc”, IEEE Transactions on Plasma Science, 13 (1985), p235-241.