



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Otimização do ferramental utilizado no processo de revestimento por PVD em segmentos de motor

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

Autor

Isabel Maria Monteiro de Castro

Orientador

Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa

Engenheiro Nuno Costa

Júri

Presidente Professor Doutor **Cristóvão Silva**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor **Amílcar Lopes Ramalho**
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



MAHLE – COMPONENTES DE MOTORES, S.A.

Coimbra, Julho, 2013

“Se, a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela”
“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho normal”
“A imaginação é mais importante que o conhecimento”

Albert Einstein

Ao meu Avô.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado um realidade e aos quais estarei eternamente grata.

Ao orientador deste estágio 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.

Ao orientador no DEM professor Doutor José Domingos pela disponibilidade e paciência com que me transmitia os conhecimentos.

Ao professor Doutor Albano Carvalheiro, pela ajuda na análise dos testes realizados na empresa.

Ao professor Doutor Cristóvão Silva pelas palavras sempre otimistas e pela ajuda constante, obrigada por tudo.

Ao Nogueira desenhador da empresa que sempre me ajudou nos projetos sem a sua ajuda seria difícil passar das ideias para o computador, e ao Rui Santos colaborador do PVD que com a sua experiência me transmitiu informações relevantes para este projeto.

Ao Filipe Fernandes e ao Diogo Neto pelo apoio nas áreas não dominadas por mim.

À Mahle, onde desenvolvi este projeto e de forma particular ao Eng.º Nuno Costa, meu orientador, pela oportunidade e confiança demonstrada.

Por fim ao meu avô Joaquim, que sempre acreditou em mim e sem ele nada disto seria possível.

Resumo

Este projeto foi desenvolvido na Mahle Componentes de Motores S.A., que utiliza o PVD através do processo de evaporação catódica para revestir os segmentos de motor com nitreto de cromo. No caso particular deste trabalho, a otimização do processo acima mencionado passa pelo estudo do ferramental utilizado para revestir esses segmentos.

Os fatores a ter em conta na otimização do ferramental são o aumento da área útil de revestimento, a redução de massa e eliminação da utilização de anéis de refugo nas extremidades. Com a otimização desses fatores espera-se aumentar a produtividade levando mais anéis por ferramental e melhorar a ergonomia dos movimentos para os operadores reduzindo o peso do ferramental. Para se avaliar a possibilidade de aumento de área útil de revestimento foi necessário a realização de testes nas zonas possíveis de serem aumentadas, para isso recorreu-se à perfilometria e a difração de Raio-X para analisar se realmente há possibilidade de se aumentar a área de revestimento.

No último capítulo, Proposta de Melhoria, estão apresentadas duas soluções para um novo ferramental visando a redução significativa na massa do mesmo, tendo sempre em atenção o total cumprimento das exigências do ferramental utilizado atualmente.

Palavras-chave: PVD, Ferramental, Segmentos de motor, Nitreto de cromo, Revestimento

Abstract

This project was developed at Mahle Componentes de Motor S.A., using the PVD through the process of cathode evaporation to coat the piston rings with chromium nitride. In the particular case of this work, optimization of the above process involves the study of the tooling used to coat these piston rings.

Factors to consider in optimizing the tooling are increased coating area, mass reduction and elimination of the use of scrap rings on the ends. By optimizing these factors, there are expected increases in productivity by mounting more rings on the tooling and improve the ergonomics of movement for operators by reducing the weight of the tooling. To evaluate the possibility of increased area of coating, it was necessary to conduct tests on possible areas to be increased resorting to profilometry and X-ray diffraction to analyze whether there really is the possibility of increasing the coating area.

The last chapters, Improvements Proposal, are presented two solutions to a new tooling. These solutions aim to significant mass reduction. Keeping in mind the total fulfillment of the tool requirements used today.

Keywords PVD, Tooling, Piston ring, Chromium nitride, Coating

Algum conteúdo desta dissertação não poderá ser publicada pois é confidencial. Se pretenderem a dissertação na sua íntegra deverá contactar a empresa Mahle Componentes de Motores S.A..

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
Siglas	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Empresa	2
1.2. Características dos anéis produzidos	5
1.2.1. Definição e Importância	5
1.2.2. Nomenclatura de anéis de pistão	5
1.2.3. Funções dos Anéis de Pistão	7
1.2.4. Materiais Utilizados nos Segmentos	9
1.2.5. Revestimentos e Tratamentos de Superfícies Utilizados.....	9
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	11
2.1. Aplicação de Revestimentos.....	11
2.2. Nitreto de Crómio.....	13
2.3. Deposição em Fase de Vapor – PVD	15
2.4. Revestimento por Arco Catódico	18
2.4.1. Princípios do Processo.....	18
2.4.2. Fases do Processo	20
2.5. Equipamento.....	21
3. FERRAMENTAL UTILIZADO PARA REVESTIR OS ANÉIS	24
3.1. Desenho do ferramental atual	24
3.2. Componentes do ferramental.....	25
3.3. Massa do ferramental.....	26
3.4. Montagem dos Anéis	27
3.5. Desmontagem dos Anéis	28
3.6. Especificações requeridas para o ferramental	32
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
4.1. Colocação das amostras.....	36
4.2. Técnicas de Caracterização das amostras.....	37
4.2.1. Perfilometria	37
4.2.2. Difração de Raio-X.....	39
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	42
5.1. Caracterização das Amostras Revestidas	42
5.1.1. Distribuição da Espessura.....	42
5.1.2. Difração de Raio-X.....	45
5.2. Teste realizados no laboratório da Mahle.....	46
5.3. Aumento de produtividade	48
6. PROPOSTAS DE MELHORIA	49

6.1. Proposta 1	49
6.2. Proposta 2	52
6.2.1. Análise estrutural	56
7. CONCLUSÕES	64
7.1.1. Balanço do estágio	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO A - Nomenclatura do anel	69
ANEXO B - Colocação dos anéis nas árvores.	70
ANEXO C - Colar superior	72
ANEXO D – Testes realizados	73
Amostra do Topo	74
Amostra do Fundo	76
ANEXO E – Desenhos de ferramental	78
ANEXO F - Simulação da proposta cilíndrica.	81
ANEXO G – Noção de Micron	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Segmento de aço com tratamento de nitretação e deposição de CrN por PVD [25].	2
Figura 2. Alguns componentes de motores produzidos na Mahle.	3
Figura 3. Algumas das mais conceituadas marcas de automóveis clientes da Mahle.	5
Figura 4. Nomenclatura associada ao anel.	6
Figura 5. Função dos diferentes tipos de anéis.	7
Figura 6. Localização dos anéis no motor.	8
Figura 7. Zonas de um sistema tribológico substrato/revestimento [3].	12
Figura 8. Representação das 3 fases do processo PVD. Deposição de CrN [24].	15
Figura 9. Sistema de vácuo usado pelo processo PVD de evaporação por arco catódico [23].	18
Figura 10. Fases do processo com aplicação na camada de Nitreto de Crómio (CrN).	20
Figura 11. Limpeza Iónica [23].	20
Figura 12. Deposição intercamada de CrN [23].	21
Figura 13. Deposição de CrN [23].	21
Figura 14. Esquema da disposição das 8 fontes de evaporação de Cr.	22
Figura 15. Equipamento utilizado para revestir os anéis.	23
Figura 16. Conjunto de 8 árvores montadas com anéis coladas na mesa.	23
Figura 17. Ferramental utilizado atualmente. (a) Ferramental (b) Desenho CAD do ferramental atual.	24
Figura 18. Todos os elementos integrantes de um ferramental.	25
Figura 19. Pontos de apoio necessários para o ferramental.	32
Figura 20. Funcionamento dos Excêntricos.	33
Figura 21. Visualização do efeito de sombra provocado pelas guias.	34
Figura 22. Conjunto Coluna + Guia + Cunha.	35
Figura 23. Colar inferior.	35
Figura 24. Esquema que representa a colocação das amostras no dummy.	37
Figura 25. Documento gerado pelo <i>software</i> do equipamento que permite calcular a altura do degrau.	38
Figura 26. Esquema representativo da lei de Bragg [11].	40
Figura 27. Equipamento de Raio-X com amostra de silício.	41

Figura 28. Representação dos pontos de análise recorrendo à técnica de perfilometria.	43
Figura 29. Distribuição da espessura da camada ao longo da amostra referente à zona do Topo.....	43
Figura 30. Distribuição da espessura da camada ao longo da amostra referente à zona do Fundo.....	44
Figura 31. Esquema representativo dos pontos difratados.	45
Figura 32. Difractogramas de raio-X: das amostras nas diferentes zonas.....	46
Figura 33. Revestimento de CrN em segmento de aço nitretado obtido através do microscópio óptico do microdurometro.	47
Figura 34. Fita de aço com revestimento CrN.....	47
Figura 35. Proposta Cilíndrica com três pontos de apoio.....	50
Figura 36. Comparação das propostas de melhoria (b) e (c) com a atual (a). (a) Ferramental atual (b) Ferramental otimizado com coluna reduzida (c) Ferramental otimizado com peça única.	54
Figura 37. Distribuição da tensão equivalente de von Mises no colar inferior atual.	57
Figura 38. Distribuição do campo de deslocamentos no colar inferior atual.	57
Figura 39. Distribuição da tensão equivalente de von Mises no colar inferior otimizado. .	58
Figura 40. Distribuição do campo de deslocamentos no colar inferior otimizado.	58
Figura 41. Árvores suportadas no carro de apoio.....	59
Figura 42. Distribuição da tensão equivalente de von Mises na coluna atual.	60
Figura 43. Distribuição do campo de deslocamentos na coluna atual.....	60
Figura 44. Distribuição da tensão equivalente de von Mises na coluna otimizado.....	61
Figura 45. Distribuição do campo de deslocamentos na coluna otimizada.....	61
Figura 46. Distribuição da tensão equivalente de von Mises na peça única.	61
Figura 47. Distribuição do campo de deslocamentos na peça única.	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Principais revestimentos para aplicações tribológicas e suas características [4].	13
Tabela 2. Massa do ferramental dividido em maior e menor que 110 mm.	26
Tabela 3. Massa de cada componente individual.	27
Tabela 4. Técnicas experimentais e respectivas propriedades analisadas.	37
Tabela 5. Valores do gráfico referente ao Topo importante para análise.	37
Tabela 6. Valores do gráfico referente ao Fundo importantes para análise.	44
Tabela 7. Resultados da espessura (μm) e microdureza da fita de aço revestido com CrN.	47
Tabela 8. Massa da proposta cilíndrica.	51
Tabela 9. Vantagens e Desvantagens Proposta 1.	51
Tabela 10. Comparação das massas do ferramental atual com as propostas.	55
Tabela 11. Vantagens e Desvantagens Proposta 2.	55
Tabela 12. Comparação dos resultados das simulações nos diferentes colares.	58
Tabela 13. Comparação da simulação nas diferentes colunas.	61

SIGLAS

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

PVD – Physical Vapor Deposition

CrN – Nitreto de Crómio

Cr – Crómio

IUA – Instrução de usinagem de anéis

AN – Sigla utilizada nas referências dos diferentes segmentos, significa que o produto em produção é um anel

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de aumentar os níveis de produção dos processos atuais de fabricação e da redução dos custos associados motivam o desenvolvimento de diversos trabalhos nas diferentes áreas de conhecimento. A melhoria do modo de vida das pessoas influencia o desenvolvimento da indústria, que tem impacto no melhoramento e estimula a descoberta de novos processos e métodos utilizados na produção. Com a realização deste trabalho pretende-se a otimização do processo Physical Vapor Deposition (PVD), utilizado na produção de anéis de maior valor acrescentado da Mahle.

Hoje em dia, a grande aposta desta indústria, é o aumento de vida e fiabilidade das suas peças, pois o consumidor pretende ter o mínimo de custos de manutenção. Como muitas das peças dos motores automóveis, os anéis (expressão utilizada para designar segmentos) de pistão estão sujeitas a grande desgaste em serviço. Estes anéis têm a função de evitar que os gases de combustão passem para o cárter, evitando assim a queda de pressão de combustão. Se os anéis estiverem desgastados os gases de combustão podem passar no espaço existente da folga entre o pistão e o cilindro, levando à perda de rendimento do motor, à contaminação do óleo lubrificante, impedindo que o óleo lubrificante passe para a câmara de combustão.

Para melhorar estas propriedades mecânicas, é habitual aplicar um revestimento com o objetivo de prolongar a vida do anel com melhor rendimento possível. Para aumentar a duração e a fiabilidade destas peças são utilizados revestimentos na superfície de trabalho cada vez mais evoluídos.

Atualmente pretende-se que a vida mínima dos segmentos ultrapasse a fasquia 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 unidirecional. Torna-se essencial 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 atualmente utilizado para satisfazer os requisitos acima descritos é o nitreto de crómio – CrN, o qual é aplicado sobre substratos (anéis) previamente sujeitos a um tratamento termoquímico de nitretação gasosa (ver Figura 1). A variante PVD utilizada é a evaporação catódica reativa.

Atualmente é utilizado um ferramental para levar os anéis para dentro da câmara de PVD, mantendo os anéis na posição adequada de forma a garantir o seu conveniente revestimento. O propósito deste trabalho é projetar um novo ferramental que melhore o ferramental utilizado atualmente. No passado já se fizeram modificações com vista a reduzir a massa, mas ainda existe espaço de redução adicional.

O presente trabalho pretende otimizar o ferramental existente tendo em conta fatores como o aumento da área útil ou seja, aumento de produtividade, assim como a redução de massa melhorando a ergonomia. Este trabalho pretende disponibilizar um conjunto de propostas que sirvam para uma futura implementação incrementando a eficiência do processo.

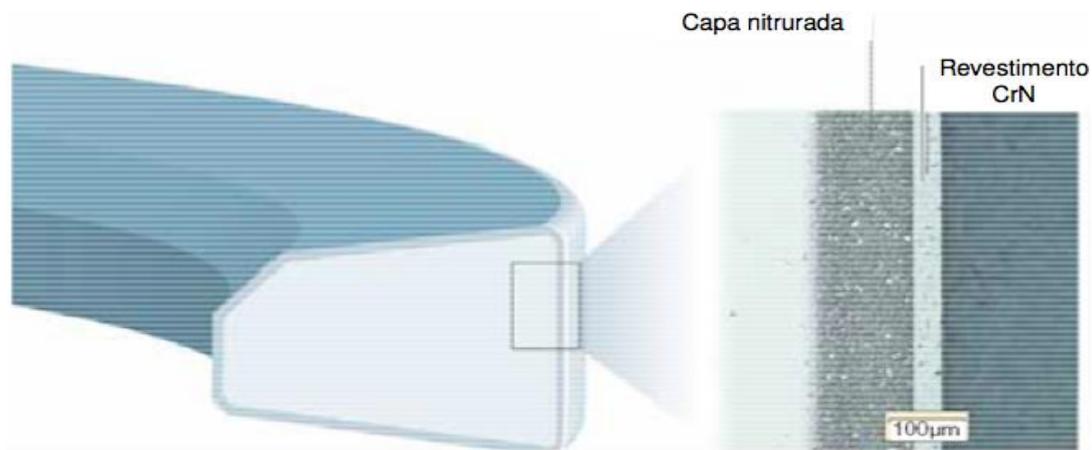


Figura 1. Segmento de aço com tratamento de nitretação e deposição de CrN por PVD [25].

1.1. Empresa

O grupo MAHLE nasceu em 1920 em Stuttgart, e desde a sua fundação que mantém uma constante procura de novas soluções e desenvolvimento tecnológico de forma a melhorar continuamente os seus produtos e de modo a obter a satisfação total dos seus

clientes. Para esse efeito, mantém diversos centros de tecnologia espalhados pelo mundo trabalhando fortemente em investigação e desenvolvimento de tecnologia de ponta para componentes de motores.

No contexto mundial, atualmente, o grupo MALHE está entre os 30 maiores fornecedores da indústria automóvel, sendo líder no mercado de componentes, sistemas e periféricos de motores de combustão. Em 2010, as vendas superaram os 5,2 biliões de euros. Globalmente, mais de 47500 empregados trabalham em 100 fábricas e em 8 centros de investigação e desenvolvimento. Também a nível mundial cerca de 3000 engenheiros e técnicos de desenvolvimento trabalham em parceria com os clientes da MAHLE em produtos e sistemas centrados no desenvolvimento contínuo do motor de combustão interna. As principais fábricas estão localizadas na Europa, Estados Unidos, México, China, Japão, Argentina e Brasil. Esta disposição geográfica permite um relacionamento mais próximo com clientes locais e uma adaptação às várias regiões abrangidas, com os necessários ajustes. Os principais componentes produzidos por este grupo são: pistões, anéis de pistão, camisas, árvores de canes, bronzinas, buchas, engrenagens e filtros. Alguns componentes estão representados na Figura 2.



Figura 2. Alguns componentes de motores produzidos na Mahle.

A única fábrica do grupo existente em Portugal, fundada em 1990, está situada no núcleo industrial de Murtede do concelho de Cantanhede e ocupa uma área de 83.000 m². Originalmente denominada de Cofapeuropa, foi adquirida pelo grupo MALHE em 1997. Esta dedica-se exclusivamente ao fabrico de anéis de pistão, vulgarmente designados de segmentos, sempre na linha das tecnologias de topo.

Emprega neste momento aproximadamente 700 pessoas e tem uma capacidade de produção anual de aproximadamente 45 milhões de anéis. A taxa de ocupação ronda os 95%, estando no horizonte o aumento de capacidade de algumas das linhas de produção.

A Mahle possui uma linha completa de anéis de compressão, raspadores e de óleo para motores Diesel e Otto, com uma variedade de diâmetros entre 35 mm a 160 mm. Esta fábrica é líder mundial na produção de anéis de aço nitretado com PVD para aplicação em HDD (Heavy Dutty Diesel).

Na produção de anéis de pistão pode ser utilizada uma gama completa de ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular, produzidos com a mais alta tecnologia de ponta de fundição.

A produção de anéis é baseada no custo adequado, procurando melhorar e inovar, tendo sempre em mente a importância dos desempenhos, preço e preocupações ambientais. É através deste equilíbrio nem sempre perfeito, difícil e trabalhoso de alcançar que o sucesso tem surgido, tornando-se uma marca de confiança revelada pelos clientes.

Esta empresa como todas as demais do grupo, é certificada segundo os mais elevados padrões de qualidade internacionais da indústria automóvel e apoiada pelas seguintes certificações.

- Certificação do sistema de gestão da qualidade
 - ✓ ISO/TS 16949:2002 (DQS)
- Certificação do sistema de gestão ambiental
 - ✓ ISO/TS 14001:2004 (DQS)

Na Figura 3 podemos ver algumas das mais conceituadas marcas de automóvel como clientes de equipamento original e Racing.



Figura 3. Algumas das mais conceituadas marcas de automóveis clientes da Mahle.

1.2. Características dos anéis produzidos

1.2.1. Definição e Importância

A norma Internacional ISO 6621/1 define os anéis de pistão como uma mola circular metálica que, quando instalada nos cilindros dos motores, torna-se circular e autoexpansível, proporcionando uma vedação móvel entre a câmara de combustão e o cárter do motor. No entanto esta definição é demasiado simplista e não descreve a enorme precisão, importância e responsabilidade dos anéis de pistão no funcionamento do motor onde estão instalados. Um dos exemplos é o motor de Formula 1 que custa cerca de 300.000€ e que em caso de falha por parte dos anéis, se traduziria num enorme prejuízo.

1.2.2. Nomenclatura de anéis de pistão

De seguida, apresenta-se a nomenclatura dos anéis de pistão, ou seja, definir quais são os nomes dados às diversas partes e às dimensões principais dos anéis (ver Figura 4):

- **Faces laterais** – são as partes do anel que ficam em contacto com as canaletas do pistão, em posição paralela à cabeça do pistão, podendo também ser chamada de “face superior” e “face inferior”.
- **Face externa** – parte do anel que fica em contacto com a parede do cilindro. Também designada de “face de trabalho” ou “face de contacto”.

- **Face interna** – lado do anel que fica voltado para o fundo da canaleta do pistão.
- **Altura** – distância entre as faces laterais do anel, medida normalmente em milímetros.
- **Espessura radial** – distância entre as faces externa e interna do anel.
- **Folga lateral** – diferença entre as alturas do segmento e da ranhura de montagem do pistão.
- **Diâmetro nominal** – diâmetro externo do anel, “fechado ” ou confinado no diâmetro do cilindro de pistão para o qual foi projetado. É igual ao diâmetro nominal do cilindro, sendo medido em milímetros.
- **Folga entre pontas** – distancia medida entre as extremidades do anel, quando instalado no cilindro de diâmetro correspondente.
- **Força tangencial** – força que o anel faz ao expandir-se quando instalado num cilindro.
- **Conformidade** – capacidade que um anel tem de adaptar a sua face de trabalho aos contornos de um cilindro em toda a sua circunferência, mesmo que a superfície de cilindro esteja ovalizada. Se um determinado anel se adapta facilmente a um cilindro deformado, diz-se que tem grande conformidade.

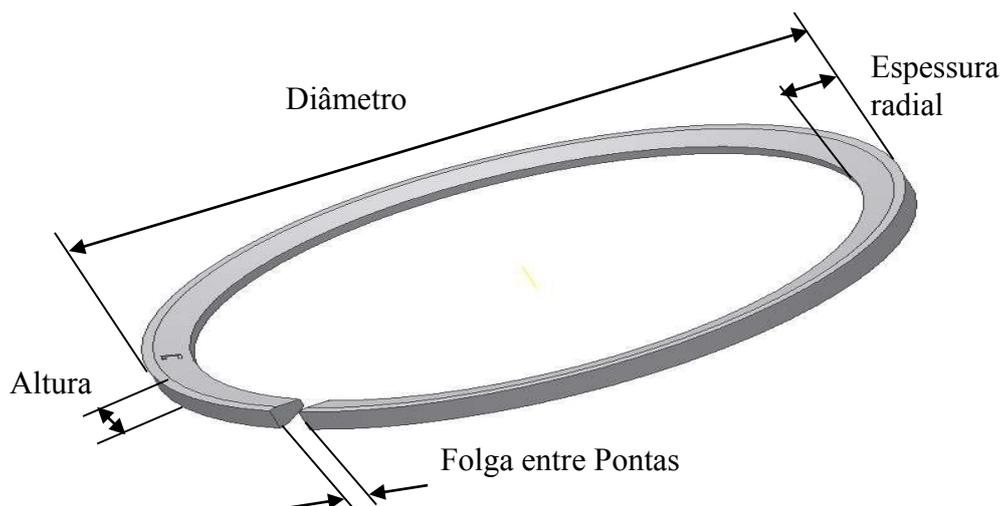


Figura 4. Nomenclatura associada ao anel.

1.2.3. Funções dos Anéis de Pistão

Nos motores de combustão interna, os anéis de pistão tem de cumprir três principais funções :

- Vedação da câmara de combustão em relação ao cárter, impedindo que os gases da combustão ou a pressão de compressão passem para o cárter;
- Transmitir o calor absorvido pela cabeça do pistão para as paredes do cilindro e destas para o sistema de arrefecimento;
- Controlar o consumo de óleo lubrificante.

Para atender a todos esses requisitos, simultaneamente, foi necessário desenvolver três tipos básicos de anéis: o de compressão, o raspador e o de óleo, cujas funções e características serão descritos a seguir. Na Figura 5 estão representados os diferentes tipos de anéis assim como a sua localização no pistão.

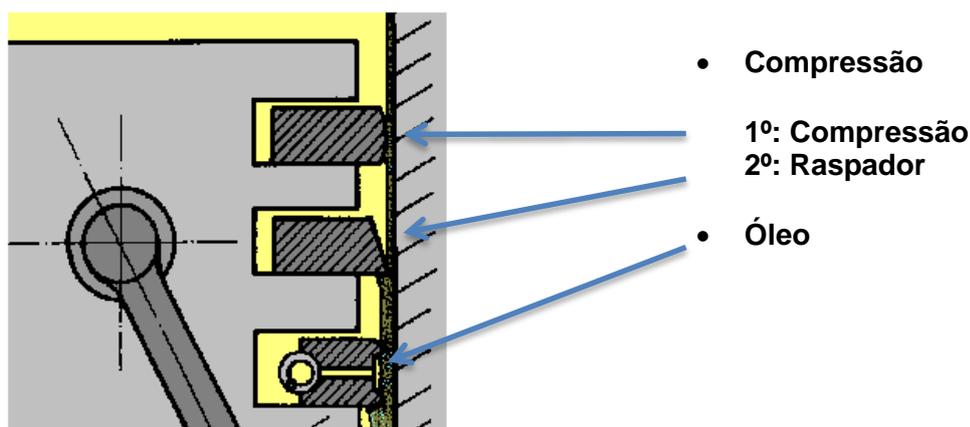


Figura 5. Função dos diferentes tipos de anéis.

1.2.3.1. Função dos anéis de compressão

Os anéis de compressão, visam principalmente, vedar a câmara de combustão, impedindo que os gases da combustão passem para o cárter do motor, através da folga entre o pistão e o cilindro, evitando assim a perda de rendimento do motor e a contaminação do óleo lubrificante. Esta função é a mais importante e só pode ser cumprida quando houver um contato total entre a face de trabalho do anel e a parede do cilindro, em toda a sua circunferência (exceto na folga entre pontas), e simultaneamente, quando uma das faces laterais do anel encostar na face lateral da canaleta correspondente.

Outra tarefa que os anéis devem cumprir, é impedir que o óleo lubrificante passe em excesso para a câmara de combustão e seja queimado. Ao mesmo tempo pretende-se também que exista uma película (filme) fina de óleo permaneça sobre a parede do cilindro para evitar atrito “seco” (metal com metal) dos anéis com o cilindro.

Por ultimo, os anéis de compressão devem ter uma boa capacidade de transmitir calor. Essa característica é necessária porque a cabeça do pistão está diretamente exposta aos gases quentes da combustão e, por isso, aquece bastante. Se não houvesse essa troca de calor pelos anéis de compressão, o pistão ao atingir temperaturas elevadas danificar-se-ia irremediavelmente.

1.2.3.2. Função dos anéis de óleo

O objetivo destes anéis é raspar o excesso de óleo da parede do cilindro e drená-lo em direção ao cárter do motor, assegurando uma película adequada de óleo, suficiente para lubrificar os anéis de compressão. Assim, o anel de óleo precisa ter uma grande conformidade e apresentar um elevado poder de raspagem.

1.2.3.3. Localização dos Anéis no Motor

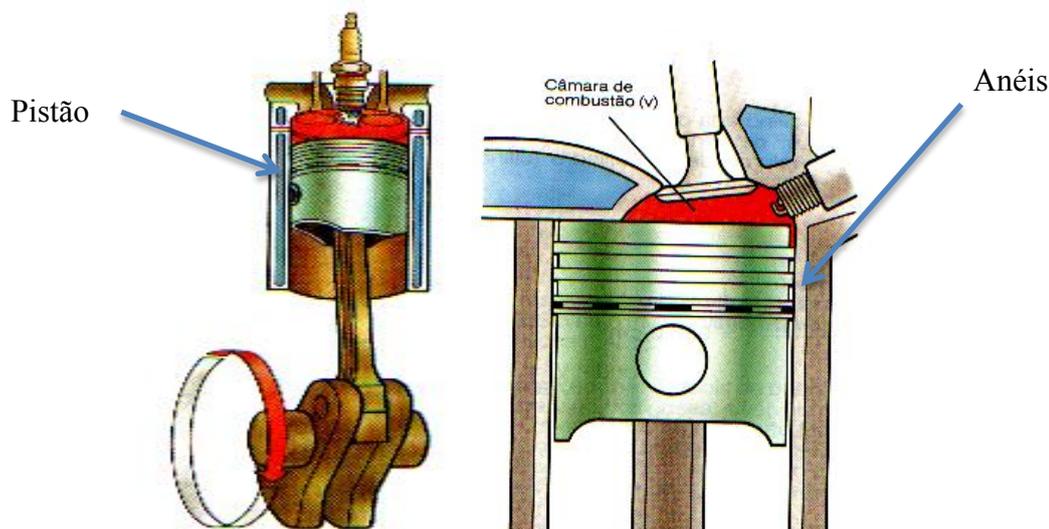


Figura 6. Localização dos anéis no motor.

1.2.4. Materiais Utilizados nos Segmentos

Os anéis de pistão são produzidos com materiais adequados a cada tipo de aplicação. Quando se seleciona o material (metal base) para um anel, devem ser considerados os seguintes fatores:

- Resistência mecânica adequada, estabilidade em altas temperaturas;
- Boa resistência à quebra por fadiga;
- Boa resistência ao desgaste, compatível com o cilindro e pistão;
- Boa resistência à corrosão.

Os materiais mais usados são o ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e aço. Na fundição estática, os anéis em ferro fundido cinzentos são obtidos com recurso a moldações destrutíveis, isto é, a moldações em areia verde. A fundição centrífuga é utilizada para anéis em ferro fundido nodular que suportam grandes esforços em funcionamento e que necessitam de materiais de maior resistência e sua composição.

O aço é adquirido aos melhores fabricantes mundiais e, devido às suas elevadas resistências mecânicas, à fadiga e à corrosão é utilizado em anéis sujeitos a condições de trabalho extremas.

1.2.5. Revestimentos e Tratamentos de Superfícies Utilizados

Com a expansão da utilização de técnicas de deposição foi possível produzir “novos materiais” com propriedades substancialmente diferentes daqueles obtidos pelos processos de fabrico tradicionais. Através de uma seleção criteriosa dos parâmetros de deposição, podem-se criar materiais com as propriedades que se pretende.

Para aumentar a resistência ao desgaste dos anéis e dos cilindros, as superfícies de trabalho (face de contato) dos anéis podem ser protegidas com camadas de material resistente ao desgaste. Os tipos de processos utilizados são:

- **Cromagem** – a eletrodeposição de camada de cromo na superfície de trabalho do anel de pistão confere-lhe uma excelente resistência ao desgaste abrasivo, assim como uma boa resistência a escoriações (desgaste adesivo). A resistência ao desgaste abrasivo de um anel cromado é três vezes maior do que um anel sem cromo e pode diminuir o desgaste do cilindro em 50%.

- **Nitreção** – é um tratamento termoquímico, que visa a alteração superficial do aço através da difusão a uma determinada temperatura, com o objetivo de lhe proporcionar certas características, tais como: elevada resistência ao desgaste, maior resistência à fadiga por flexão e torção. Pode-se considerar a nitreção um tratamento final, por isso as peças destinadas a este tratamento deverão estar praticamente acabadas.
- **PVD (Physical Vapor Deposition)** – processo de deposição em vácuo, onde um material vaporizado é transportado e por fim depositado na superfície de um substrato. Este tipo de tecnologia conduz ao aumento de espessura na superfície das peças de alguns microns. Este revestimento confere elevados índices de adesão ao substrato, baixas tensões internas residuais, proteção térmica e química, elevada resistência ao desgaste e elevada dureza superficial.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. Aplicação de Revestimentos

Com vista à resolução de problemas como a corrosão e o desgaste, tendo por objetivo a melhoria do tempo útil dos componentes mecânicos e o aumento da segurança desses mesmos componentes, verificou-se a necessidade por parte da indústria de desenvolver técnicas de proteção de superfícies, que constituíssem um verdadeiro valor acrescentado em termos de resistência *versus* custo.

A utilização de revestimentos permite dispor das propriedades requeridas para as superfícies nos locais onde são mais necessárias, dissociando-as claramente das propriedades do núcleo, quando isso se torna necessário. Além disso, os revestimentos passaram a permitir a obtenção de propriedades tribológicas até esse momento nunca atingidas [1].

A utilização de materiais compósitos para aplicações de alta tecnologia tem-se vindo a expandir, em particular nos casos onde é requerido ao material uma combinação de propriedades estruturais, algumas vezes, impossíveis de nele existirem; por exemplo exigir para uma determinada aplicação, um material com elevada dureza e boa tenacidade [2]. Neste caso em particular interessa apenas ser elevada na superfície de trabalho do anel. Podemos recorrer a um material compósito constituído por dois materiais, um de dureza muito elevada mas de espessura muito fina para que “não se note” a sua baixa tenacidade, depositado sobre outro material que apresente elevada tenacidade.

Para a formação de um revestimento consideram-se normalmente três estágios [2]:

- Síntese ou produção das espécies a depositar;
- Transporte das espécies para o substrato;
- Deposição no material e crescimento do filme.

A aplicação de revestimentos consiste essencialmente na deposição de um material previamente selecionado sobre um substrato. O material escolhido para o

revestimento varia em função das características que se pretendem implementar na superfície e do material do substrato. Para que se consiga alcançar os objetivos pretendidos, a superfície revestida deve apresentar uma série de propriedades que combinem perfeitamente. Assim, poderemos considerar que uma superfície revestida pode ser representada pela Figura 7.



Figura 7. Zonas de um sistema tribológico substrato/revestimento [3].

A superfície deste sistema deverá possuir baixa rugosidade, elevada resistência ao corte e ser quimicamente inerte. É fundamental que na interface deste sistema haja uma forte adesão e elevada resistência ao corte. Deverá existir coerência entre as propriedades de condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica, dureza, tenacidade e elasticidade do substrato e do revestimento para que este sistema possua características tribológicas convenientes [1,3].

Existem essencialmente dois grandes grupos de tratamentos de superfícies, os obtidos por difusão de um elemento no seio da matriz do material previamente selecionado e o proveniente da deposição do material sobre o outro, ou seja de uma sobre camada denominada revestimento ou filme fino ou ainda película fina [2].

A deposição de revestimentos duros na superfície dos materiais, pelas técnicas de PVD, em particular os nitretos de metais de transição, como Cr-N, Ti-Al-N, Ti-N, Zr-N tem vindo a ser intensamente desenvolvidas no sentido de otimizar as propriedades em serviço de componentes estruturais e funcionais. Os materiais acima mencionados não podem ser usados por si só, devido à sua suscetibilidade à fratura, mas quando depositados na forma de filmes finos perdem a fragilidade, conformam-se à tenacidade do substrato e promovem uma melhoria das propriedades mecânicas, permitindo assim, aumentar o tempo de vida dos componentes que são revestidos [6], melhorando não só a resistência ao desgaste, mas também a resistência química em ambientes agressivos [7-8]. Além de

duros, apresentam no geral, um baixo coeficiente de atrito, boa adesão e elevada condutividade elétrica e térmica [9,10]. Na Tabela 1 estão representados os principais revestimentos para aplicações tribológicas e as suas características.

Tabela 1. Principais revestimentos para aplicações tribológicas e suas características [4].

Material do revestimento	Espessura (µm)	Microdureza HV50	Coefficiente de atrito	Estabilidade Térmica (°C)	Cor do revestimento
TiN	2 a 5	2200	0,4	600	Dourado
CrN	2 a 10	1900	0,3-0,5	700	Prata
ZrN	2 a 5	2500	0,3-0,4	600	Amarelo
TiCN	2 a 5	2800	0,4	400	Prateado
TiAlN	2 a 5	3000	0,3-0,4	900	Violeta-cinza

2.2. Nitreto de Crómio

O nitreto de crómio tem uma importância tecnológica considerável devido ao baixo custo do crómio e do azoto e porque se podem formar ligações entre os dois elementos, apesar da afinidade do N com o Cr ser mais baixa do que com o Ti. O CrN é um composto intersticial, onde os átomos de azoto ocupam os interstícios octaédricos [11].

As propriedades tribológicas, nomeadamente a resistência ao desgaste, dependem não só da composição química do revestimento com também da sua resistência à oxidação e corrosão [12]. Nesse sentido, uma das grandes vantagens dos revestimentos à base de CrN relaciona-se com a sua excelente resistência à corrosão e oxidação, nomeadamente em comparação com TiN [13]. O CrN pode trabalhar em aplicações industriais inclusive a temperaturas superiores a 750 °C, mantendo uma boa resistência a oxidação [14].

A dureza do nitreto de crómio em relação à de outros nitretos de metais é relativamente baixa (1600-2000 HV), mas tem a vantagem de estar sujeito a tensões de

compressão menos elevadas. É por isso possível depositar filmes mais espessos e compensar a menor dureza, que normalmente significa menor resistência ao desgaste, minimizando a influência do substrato.

Uma das primeiras aplicações do nitreto de cromo foi na área do revestimento de superfícies na produção de ferramentas metálicas. O tempo de vida das ferramentas aumentou mais de cinco vezes [15]. Para temperaturas relativamente elevadas (700-800°C) forma-se à superfície do revestimento uma camada densa de óxido de cromo (Cr_2O_3) que impede a progressão da oxidação do material [15,16]. Em contrapartida, no caso do TiN forma-se TiO_2 , mas a adesão deste óxido é baixa, destacando-se com uma certa facilidade.

Y. L. Su & al. [17] produziram e mediram a dureza e desgaste de revestimentos de TiN, Ti (C,N), CrN e Cr (C,N) e verificaram que apesar de uma maior dureza dos revestimentos à base de titânio, a resistência ao desgaste do revestimento com cromo foi superior. Quando comparado com outros nitretos, o nitreto de cromo apresenta geralmente um melhor desempenho devido à sua estrutura que é normalmente mais densa. Para melhorar ainda o desempenho deste revestimento, testou-se o comportamento de revestimentos de nitreto de cromo com uma intercamada de cromo, e o desempenho melhorou [18].

Existe também uma motivação extra para depositar nitreto de cromo e essa razão prende-se com a substituição do cromo electrodepositado por este nitreto, devido aos problemas que este material coloca em termos ambientais [19].

2.3. Deposição em Fase de Vapor – PVD

De acordo, com grande parte da literatura, as técnicas de deposição classificadas como PVD são, nas suas diversas variantes, a pulverização catódica (sputtering) e a evaporação. A importância destas técnicas na produção de revestimentos tem vindo a acentuar-se nos últimos anos, devido à versatilidade e às excelentes propriedades que os filmes apresentam. Em ambas as técnicas, a deposição dos revestimentos compreende basicamente três fases [2] (ver Figura 8):

- Transformação do material a depositar para a fase gasosa;
- Transporte do vapor, entre a fonte e o substrato;
- Condensação do vapor à superfície do substrato e respetiva formação de revestimentos.

Os processos de revestimento por PVD baseiam-se na atomização ou vaporização da matéria de uma fonte sólida, normalmente designada por alvo, fazendo a transferência desse material até ao substrato, onde se irá formar uma película de revestimento [1]. Este processo realiza-se dentro de uma câmara de deposição sujeita ao vácuo e permite obter revestimentos com elevada pureza, praticamente isentos de defeitos do ponto de vista metalúrgico ou físico.

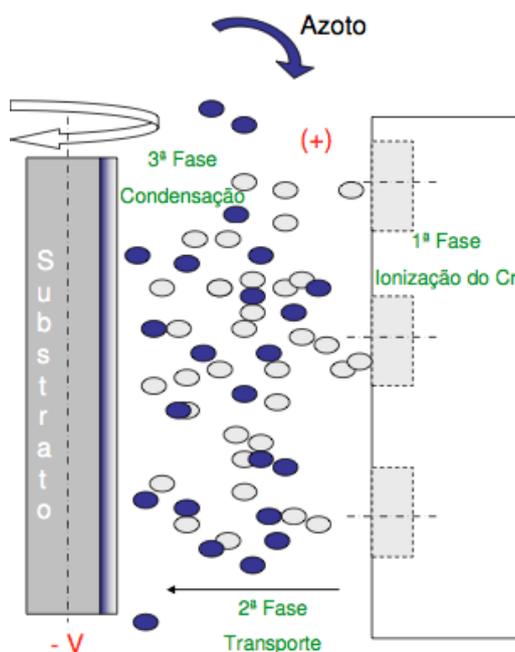


Figura 8. Representação das 3 fases do processo PVD. Deposição de CrN [24].

Frequentemente são citados as seguintes vantagens [1,20,21] a favor dos revestimentos de PVD:

- A possibilidade de operar a pressões de trabalho muito baixas permite sintetizar materiais de elevada pureza;
- Melhoria na adesão do revestimento ao substrato, devido à possibilidade de se “limpar” pulverizando (etching), e ainda pré-aquecer os substratos através de bombardeamento iónico e neutral da superfície do substrato;
- Processos tais como os efeitos dispersivos dos gases e a possibilidade de se rodar ou deslocar as amostras relativamente à fonte de vapor durante a deposição permitem uniformizar as espessuras dos revestimentos;
- Após o revestimento, elimina-se a necessidade de maquinar ou polir, já que na maior parte dos casos a morfologia superficial do substrato é praticamente reproduzida à superfície do revestimento;
- Possibilidade de controlo da taxa de deposição;
- Normalmente não são utilizados quaisquer efluentes ou poluentes, dado que na maior parte dos casos não intervêm produtos ou soluções tóxicas;
- Temperaturas de deposição relativamente baixas. A ionização direta dos átomos do material a depositar providencia benefícios previamente só conseguidos em substratos aquecidos;
- Evita a contaminação pelo hidrogénio; fenómeno que acontece por vezes em eletrodeposições;
- Pode ser elaborada uma grande variedade de revestimentos;
- Possibilidade de depositar ligas;
- Deposição de uma vasta gama de materiais, numa variada gama de substratos;
- Possibilidade de variar as propriedades dos filmes, desde a interface com o substrato até à superfície, ao longo do processo de deposição;

- Possibilidade de realização de filmes multi-graduados, com densidades de constituintes variáveis ao longo da espessura do revestimento.

Contudo existem algumas desvantagens associadas a este processo [22]: Os furos perfurados, ranhuras, entre outros somente podem ser revestidos até uma profundidade equivalente ao diâmetro ou à largura da abertura; Resistente à corrosão apenas em determinadas condições; Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças a serem revestidas devem girar durante o processamento.

Para obter as características anteriormente referidas apareceram várias soluções dentro do processo PVD, tendo como principal diferença a forma como as partículas são aceleradas a partir do alvo em direção ao substrato. No processo PVD por evaporação, é utilizada energia térmica para que ocorra mudança de fase do material, de sólido ou líquido para a fase vapor. No processo PVD por Sputtering, a fase vapor é transferida pelo bombardeamento de íons positivos a partir de um plasma, através de um mecanismo de transferência de momento (BUNSHAH, 1986). Esses processos envolvem a dissociação do material evaporante em fragmentos que são transportados ao substrato, onde se recombinam na forma do composto depositado.

Atendendo aos objetivos e tema deste trabalho, os revestimentos por arco catódico irão merecer, seguidamente, um tratamento mais detalhado.

2.4. Revestimento por Arco Catódico

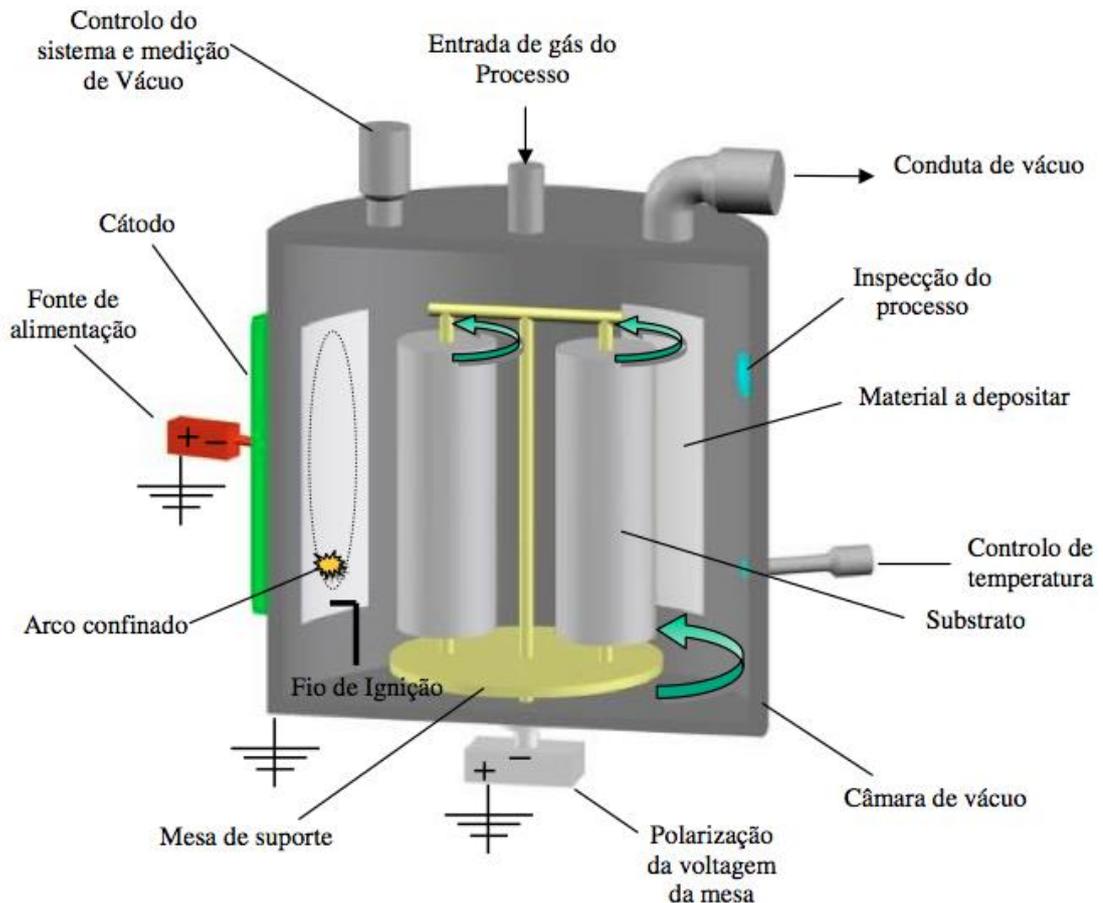


Figura 9. Sistema de vácuo usado pelo processo PVD de evaporação por arco catódico [23].

2.4.1. Princípios do Processo

A deposição por arco catódico é uma técnica de PVD que utiliza a vaporização através de um elétrodo (estando este sobre condições de aquecimento), como uma fonte de vaporização de material. O material vaporizado tem origem num arco de elevada densidade de corrente (10^6 - 10^8 A/cm²) na superfície do cátodo e baixa voltagem, encontrando-se este usualmente no estado sólido [5,23].

Os iões de metal são guiados por um campo magnético, acelerados e projetados sobre a peça a recobrir pela ação de uma diferença de potencial existente entre as peças e a câmara. A energia cinética dos iões é transformada em calorífica ao embater de encontro à peça e contribui para a manutenção da temperatura durante a fase da deposição. Diferentes

compostos formam-se ao introduzir, na câmara, gases reativos de natureza distinta, a baixas pressões [23].

A evaporação por arco catódico permite a criação de depósitos espessos em espaços de tempo relativamente curtos, para além de ser possível a evaporação simultânea de metais diferentes. Isto é conseguido devido às altas intensidades de corrente aplicadas ao arco elétrico, que para este caso particular permitem uma taxa de deposição próximo dos 4 $\mu\text{m/h}$ [24]. 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. Esta técnica facilita a obtenção de camadas dopadas e de multicamadas de forma a melhorar as propriedades das camadas simples e convencionais. [25]

É uma técnica talhada para o tratamento de peças com geometria simples devido à tendencial linearidade do fluxo iónico, ou seja só reveste efetivamente as zonas do substrato que vêm diretamente o alvo. 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 [26].

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.

2.4.2. Fases do Processo

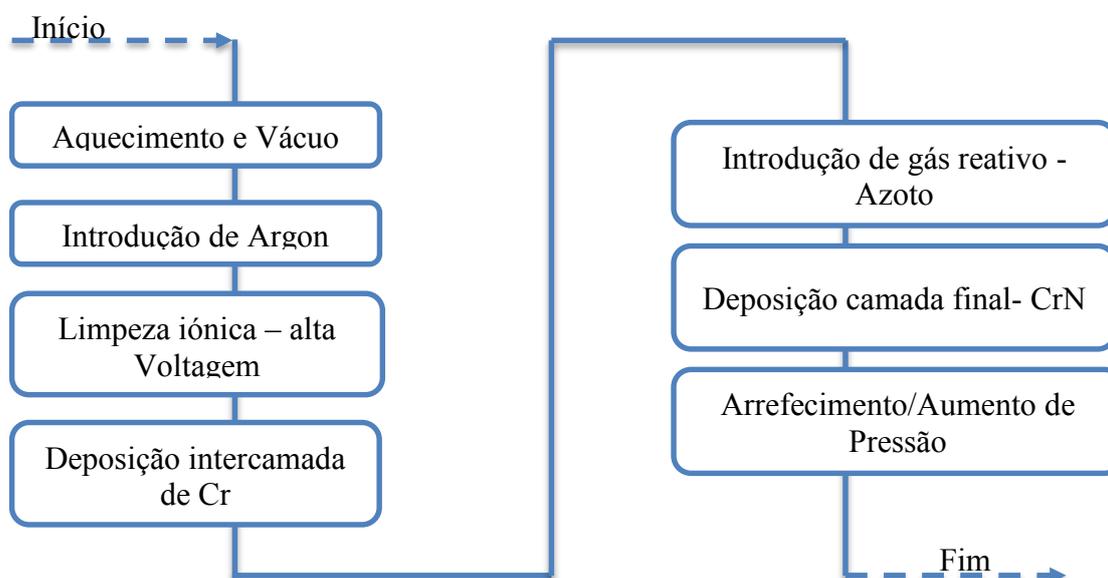


Figura 10. Fases do processo com aplicação na camada de Nitreto de Crômio (CrN).

2.4.2.1. Limpeza Iônica

A limpeza da superfície das peças é realizada numa atmosfera inerte. A uma baixa pressão é aplicada uma alta voltagem negativa no substrato, o que provoca uma aceleração das partículas ionizadas na direção do substrato.

Devido ao alto nível de energia de ionização, o impacto elástico das partículas no substrato irá remover eventuais impurezas existentes na superfície do substrato.

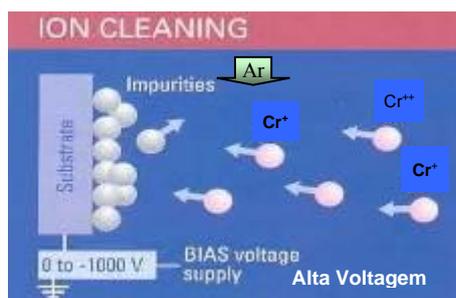


Figura 11. Limpeza Iônica [23].

2.4.2.2. Deposição Intercamada de Crômio.

A camada de Cr é depositada com o intuito de melhorar a adesão entre a camada final (CrN) e o substrato. A uma pressão superior à da limpeza iônica é aplicada uma baixa voltagem negativa no substrato, o que provoca uma aceleração das partículas ionizadas na direção do substrato.

A um menor nível de energia de ionização, o impacto inelástico devido à menor aceleração das partículas provoca a aderência destas ao substrato.

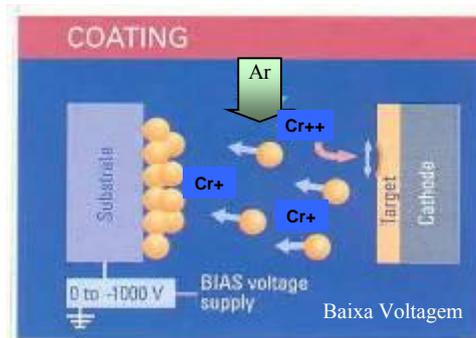


Figura 12. Deposição intercamada de CrN [23].

2.4.2.3. Deposição Camada CrN

Após a deposição da camada de Cr, é introduzido Azoto. Este vai reagir com o material vaporizado, formando CrN.

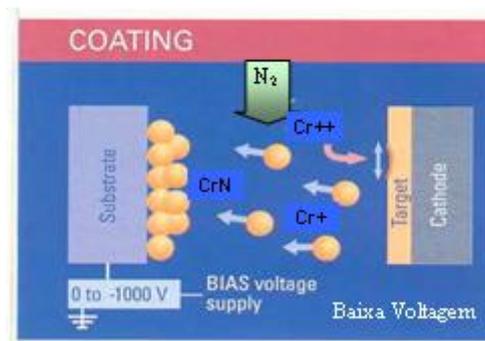


Figura 13. Deposição de CrN [23].

2.5. Equipamento

Confidencial

Confidencial

Confidencial

3. FERRAMENTAL UTILIZADO PARA REVESTIR OS ANÉIS

Neste capítulo será explicado o sistema utilizado para transportar os anéis a serem revestidos nas câmaras de PVD. Serão também apresentadas todas as características do sistema atual, assim como vantagens e desvantagens da utilização desse sistema.

3.1. Desenho do ferramental atual

Confidencial

3.2. Componentes do ferramental

O ferramental é o suporte que transporta os anéis para a câmara de PVD, para serem revestidos com nitreto de cromo. Existem várias especificações que o ferramental deve ter para o correto revestimento ser aplicado. Uma má disposição dos anéis pode levar a um revestimento não desejado, em zonas não pretendidas. Para projetar um novo ferramental alguns aspetos devem ser estudados e pensados, ou seja não podemos projetar um ferramental para colocar objetos cilíndricos pois os anéis são muito mais que isso.

Confidencial

Os operadores recebem na instrução para usinagem de anéis – IUA apenas as dimensões dos componentes que tem de ser ajustados para os diferentes tipos de anéis a revestir.

3.3. Massa do ferramental

Um dos fatores a ter em conta na otimização do ferramental é a redução de massa das árvores, pois pretende-se também melhorar a ergonomia.

A Tabela 2 indica a massa do ferramental mais utilizado, referente às diferentes referências - AN's com maior produção, utilizados atualmente. Estes foram pesados numa balança da empresa que tem um erro associado de ± 200 gramas. Estes valores dão-nos uma noção mais precisa de quanto pesam em média os ferramentais utilizados.

Confidencial

Na Tabela 3 estão apresentadas as massas referentes a todos os componentes do ferramental de 138 mm de diâmetro. Optou-se por fazer o estudo com este diâmetro visto ser um dos de maior utilização, e a diminuição de massa neste ferramental terá desta forma maior impacto na produção, facilitando os movimentos realizados pelos operadores. Estes componentes foram pesados na balança referida anteriormente. A variação de massa do ferramental do mesmo grupo não é acentuada pois alguns dos componentes são os mesmos, e os que diferem a diferença é reduzida.

Confidencial

Observando a Tabela 3 conseguimos analisar os componentes que maior percentagem tem no conjunto total, mais à frente iremos estudar a possibilidade de reduzir a massa dessas peças.

3.4. Montagem dos Anéis

Confidencial

Confidencial

Confidencial

Confidencial

Confidencial

3.6. Especificações requeridas para o ferramental

Confidencial

Confidencial

Confidencial

Confidencial

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho divide-se em duas partes, uma diz respeito ao estudo da possibilidade de aumentar a área efetiva de revestimento do ferramental e outra parte referente a propostas de otimização do ferramental a nível estrutural. Neste capítulo é apresentado o procedimento utilizado para o estudo do aumento da área efetiva do ferramental.

4.1. Colocação das amostras

Para verificar a possibilidade de aumentar o número de segmentos revestidos por ferramental estudou-se as zonas externas à zona efetiva de revestimento. Foram colocadas duas amostras de silício estrategicamente nas extremidades do dummy (simula uma árvore de anéis dentro da câmara) para se poder fazer a comparação entre as zonas efetivas e não efetivas. As amostras foram divididas em duas zona, uma zona denominada como OK e representa a zona efetiva, possuindo as propriedades e espessura desejada, e a zona ? (desconhecida) onde se fará o estudo das características. A divisão dessas duas zonas é representada pela linha cinzenta a tracejado. Na Figura 24 estão representadas as distâncias necessárias para o estudo da caracterização das amostras.

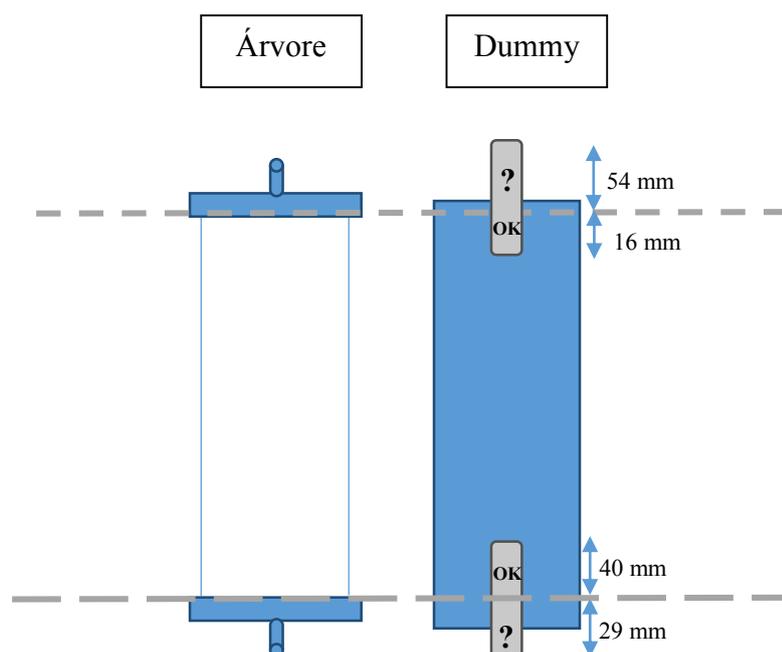


Figura 24. Esquema que representa a colocação das amostras no dummy.

4.2. Técnicas de Caracterização das amostras

Para conhecer e compreender o comportamento do filme depositado foram utilizadas diferentes técnicas de caracterização. Seguidamente são descritas de modo sucinto as técnicas utilizadas na caracterização do filme. A Tabela 4 indica quais os métodos e as respetivas propriedades possíveis de analisar.

Tabela 4. Técnicas experimentais e respetivas propriedades analisadas.

Técnica Experimental	Propriedades
Perfilometria	Espessura
Difração de Raio – X	Avaliação Estrutural

4.2.1. Perfilometria

A espessura dos revestimentos foi avaliada por um perfilómetro criando intencionalmente um degrau entre o substrato e o revestimento com recurso a uma suspensão de nitreto de boro, facilmente removível após o revestimento. O perfilómetro utilizado neste trabalho foi o Perthometer Concept V7.00 da Mahr.

De entre as técnicas para a determinação da espessura de revestimentos, a apalpação mecânica ou laser com recurso a um rugosímetro é muito utilizada devido à sua simplicidade e relativa precisão. A medição da rugosidade é feita por uma cabeça mecânica, ou ótica (LASER), que se desloca na superfície em análise, ao longo de um comprimento pré-estabelecido, registando a altura a que se encontra em cada momento do percurso.

Através do contato e do movimento da ponta sobre a superfície da amostra é capaz de gerar um perfil de altura, que consiste em fazer varreduras sobre a amostra. Para a análise de dados, deve-se levar em consideração a influência do instrumento e do ambiente sobre as medidas. Quando uma varredura é concluída, o programa gera automaticamente uma imagem do perfil por onde a ponta passou. Um perfil referente a uma das medições realizadas está representado na Figura 25. A diferença de altura entre as interseções da curva obtida informa a altura do degrau que corresponde à espessura do filme crescido. O valor desse degrau é calculado pelo computador, onde é traçada uma linha média dos pontos antes e durante o degrau, posteriormente é calculado a distância entre essas duas linhas.

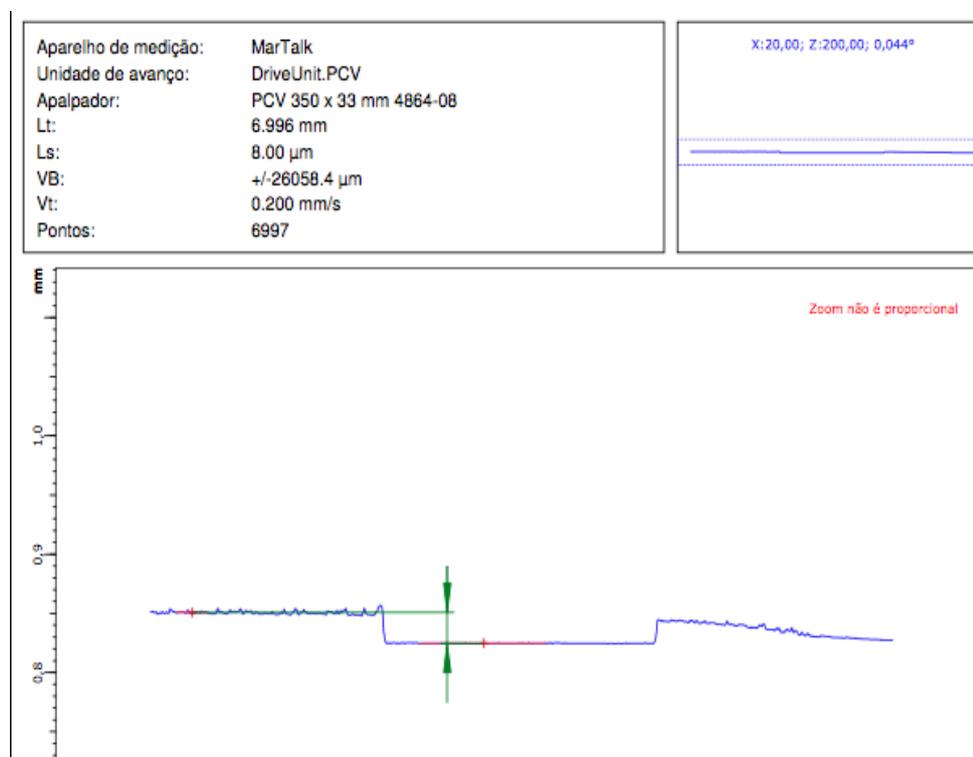


Figura 25. Documento gerado pelo *software* do equipamento que permite calcular a altura do degrau.

Os parâmetros utilizados para realizar as medidas foram: velocidade de varredura 0,02 mm/s, distância horizontal a ser percorrida pela ponta da amostra 7mm e o raio do apalpador mecânico tem um raio de 0,025 mm.

4.2.2. Difração de Raio-X

Os raios X podem ser utilizados para revelar informações detalhadas acerca da composição química e da natureza física de vários tipos de materiais naturais ou manufaturados, desde metais, minerais, óleos ou outros líquidos, a plásticos, farmacêuticos e semicondutores [5].

A análise estrutural dos filmes foi avaliada por recurso à técnica de difração de raios X. Esta técnica pertence à família das técnicas não destrutivas e permite obter informação acerca da estrutura cristalina, do tamanho de grão, da orientação preferencial bem como a identificação e análise das fases cristalinas presentes. É igualmente comum a utilização deste método no cálculo de tensões residuais para pequenos volumes cristalinos. Contudo, a sua utilização nos revestimentos de filmes finos pouco espessos, pode sofrer a influência indesejada do substrato, devido ao elevado poder de penetração deste tipo de radiação. Este fator leva a que os espectros de difração possam conter alguma informação relativa ao substrato. [11]

O principal funcionamento deste método consiste no bombardeamento de elétrons de elevada energia com um comprimento de onda conhecido na superfície do material a analisar. Dessa interação, alguma radiação é difundida de forma coerente dando origem à difração, permitindo determinar as fases cristalinas presentes no material em estudo. Este fenómeno ocorre sempre que se verificam determinadas condições que obedecem à lei de Bragg [28]:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta$$

Uma vez que as estruturas cristalinas possuem distâncias interplanares da mesma ordem de grandeza de comprimento de onda da radiação, a lei de Bragg relaciona a distância entre dois planos paralelos consecutivos de uma família de planos d_{hkl} com o ângulo de feixe (θ) e o comprimento de onda (λ) dos raios X.

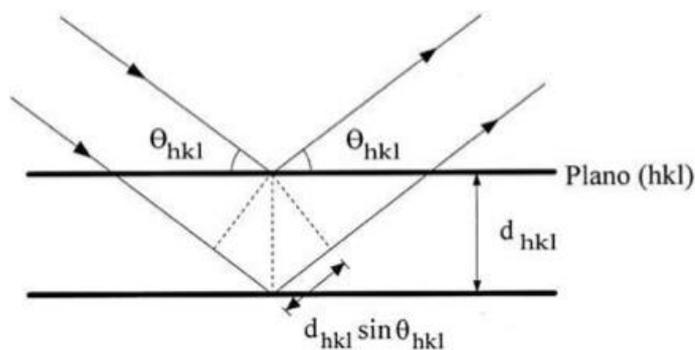


Figura 26. Esquema representativo da lei de Bragg [11].

A intensidade do feixe depende de fatores como a deposição química, estrutura e volume do material, enquanto o ângulo θ para o qual ocorre difração, depende das distâncias interplanares características das fases presentes no material.

Os planos de difração e as respectivas distâncias interplanares, bem como as densidades atômicas ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada material cristalino. Uma base de dados contendo fichas padrão com informações cristalográficas básicas e algumas propriedades físicas é constantemente atualizada pelo ICDD – Internacional Centre for Diffraction Data, servindo assim de comparação na identificação e indexação das fases presentes nas amostras. Para uma análise mais precisa de picos, a difração pode fornecer informação valiosa sobre características estruturais dos materiais estudados, em particular o tamanho médio de grão (D), relacionado com a largura a meia altura (FWHM – Full Width at Micro-Analysis) dos picos difratados e o parâmetro de malha que está associado à posição dos picos de difração. Para isso, recorreu-se à fórmula de Scherrer [28]:

$$D = \frac{0,9\lambda}{\cos\theta \cdot FWHM}$$

onde, a FWHM é introduzida em radianos de modo a manter as unidades de λ e θ .

O difratograma da difração de raios X, mostra:

- As fases presentes na amostra através das posições dos picos;
- As concentrações de cada fase através do comprimento de cada pico;
- O tamanho das cristalites através das larguras dos picos;

- Se existem microtensões, através das larguras dos picos, associado às suas posições.

Neste estudo, os ensaios de difração de raios X foram efetuados num difractor Philips, modelo X'Pert, representado na Figura 27. Os ensaios foram realizados em modo rasante, num intervalo de difração $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$ com um ângulo de incidência de 2° , com um passo de $0,020^\circ$ e tempo de aquisição de 1,5s por canal.

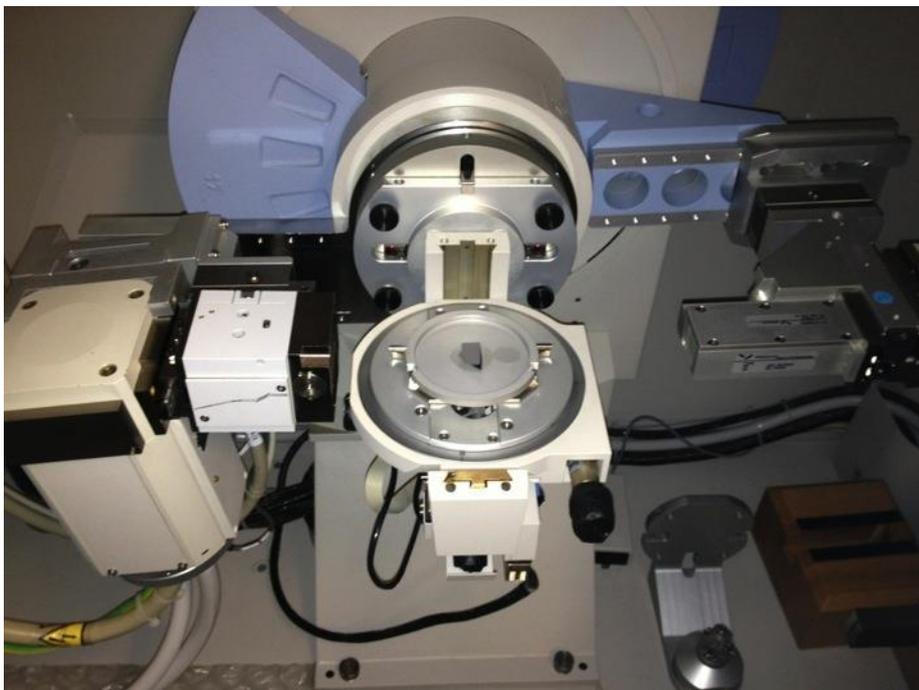


Figura 27. Equipamento de Raio-X com amostra de silício.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Confidencial

5.1. Caracterização das Amostras Revestidas

5.1.1. Distribuição da Espessura

Os resultados referentes à técnica de perfilometria sobre a distribuição da espessura da camada depositada ao longo das amostras estão apresentados em forma de gráfico na Figura 29 e Figura 30. Foi feita a análise da espessura ao longo das duas amostras de milímetro em milímetro, como representado na Figura 28.

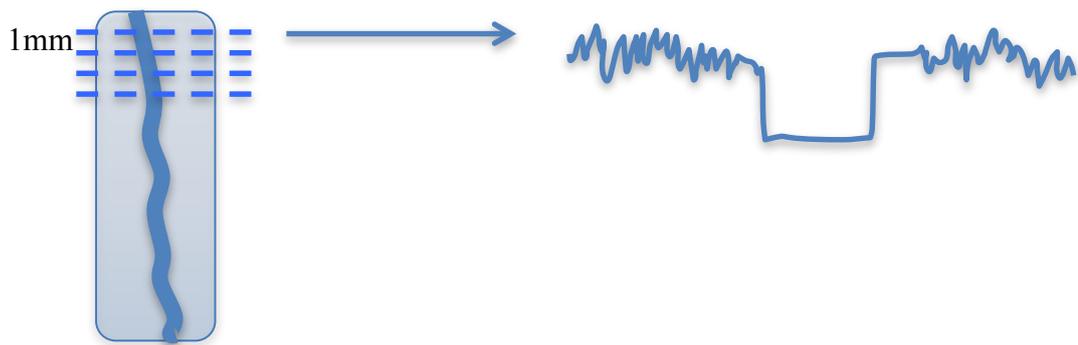


Figura 28. Representação dos pontos de análise recorrendo à técnica de perfilometria.

Confidencial

Confidencial

Os resultados são favoráveis relevando a possibilidade do aumento da área útil, aumentando assim a produtividade.

5.1.2. Difração de Raio-X

A difração de raio-X constitui uma ferramenta útil na verificação da estrutura ao longo da amostra. Foram realizados quatro difrações de Raio-X, três na amostra do Topo e uma na do fundo. Na Figura 31 está representado a divisão das zonas nas diferentes amostras, a vermelho (tracejado) representa o sítio onde as difrações foram feitas.

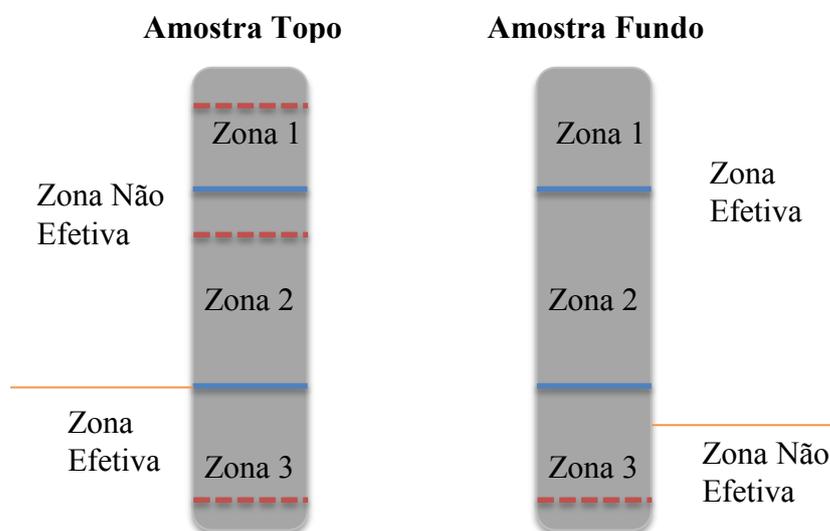


Figura 31. Esquema representativo dos pontos difratados.

A Figura 32 representa os difratogramas realizados nas duas amostras nos pontos referidos anteriormente.

Confidencial

Comparando os difratogramas verifica-se que estes não revelam diferenças acentuadas. Com efeito, não há aparecimento de novos picos em relação à ficha de ICDD de CrN. Da análise da Figura 32 pode concluir-se que não há desvios nos picos de difração logo a estrutura é a mesma em toda a amostra.

5.2. Teste realizados no laboratório da Mahle

Foi realizado em paralelo ao teste das amostra de silício colocados no dummy e referidos anteriormente, outro teste no laboratório da empresa afim de complementar e estabelecer alguma fiabilidade dos resultados obtidos. Os resultados foram conseguidos recorrendo à metalografia. Foi colocada uma fita de aço num dummy efetuou-se o revestimento na fita, posteriormente foram selecionados os pontos de análise e cortou-se a fita nesses pontos. Fez-se a montagem dos corpos de prova em resina (fita cortada em perfil) necessário para poder se realizar as medições no equipamento. O aparelho utilizado foi um microdurometro da marca Leica que tem associado um *software* que permite medir a espessura da camada de CrN assim como as microdurezas, através da análise da imagem obtida devidamente ampliada. A Figura 33 mostra um exemplo de uma imagem gerada pelo equipamento, que neste caso trata-se de um revestimento de CrN em segmento de aço nitretado que permite fazer a análise da espessura e microdureza.

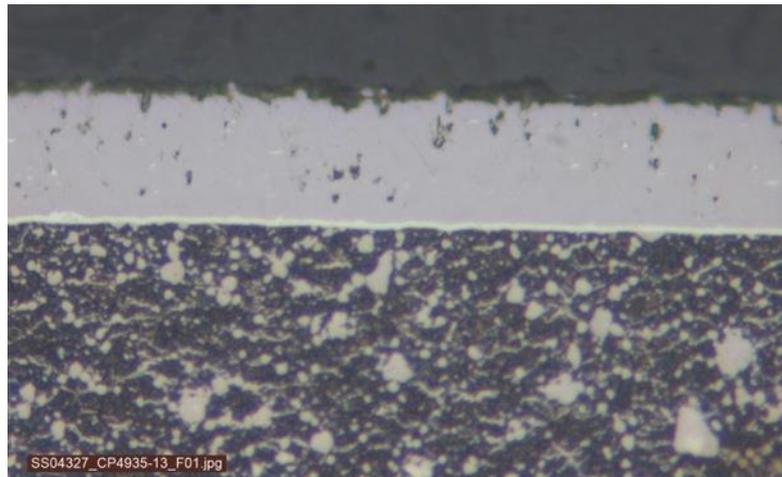


Figura 33. Revestimento de CrN em segmento de aço nitretado obtido através do microscópio óptico do microdurometro.

Confidencial

Após o estudo das amostras revestidas juntamente com os resultados do laboratório da Mahle conclui-se que de acordo com as especificações de processo, há efetivamente possibilidades de se aumentar a área efetiva sem comprometer as propriedades requeridas. Contudo para validar os resultados obtidos neste trabalho é necessário a realização de outros testes que suportem esta teoria. Apenas dois testes não são suficientes para poder garantir até onde podemos aumentar efetivamente. Com este trabalho conseguimos verificar que realmente há margem para aumento mas é necessário a reprodução destes testes em diferentes condições, como exemplo fazer os mesmos testes no final de vida dos *targets* (material a depositar) ou utilizando diferentes programas.

5.3. Aumento de produtividade

Pela análise dos dois testes realizados, poderemos aumentar cerca de 30 mm no topo e mais 20 mm no fundo.

Confidencial

6. PROPOSTAS DE MELHORIA

O projeto mecânico surge de uma necessidade. Supri-la, resolver o problema é tarefa do engenheiro. Como exemplo, a necessidade não é construir uma ponte ou viaduto, o que inviabilizaria uma série de soluções para o mesmo problema; a necessidade é transportar produtos ou pessoas além do obstáculo natural; seja ele um rio ou um vale [28].

Neste projeto em particular surge a necessidade de otimizar o suporte onde os anéis são revestidos, pretende-se reduzir a massa do ferramental utilizado. Com a redução do peso além de se melhorar a nível ergonómico, prevê-se que o tempo de processo PVD diminua pois a massa total será menor. Um aspeto importante a ter em atenção no desenvolvimento do novo protótipo é o custo do ferramental, não será vantajoso projetar um protótipo que cumpra os objetivos mas que em termos de económicos aumente substancialmente.

6.1. Proposta 1

Confidencial

Confidencial

Na Tabela 8 estão indicadas as respectivas massas dos componentes da proposta cilíndrica. Na Tabela 9 identificam-se as vantagens e desvantagens associadas a esta proposta de melhoria.

Confidencial

Tabela 9. Vantagens e Desvantagens Proposta 1

Vantagens	Desvantagens
Se conseguirmos uma espessura reduzida do tubo a massa do ferramental pode diminuir.	Necessidade de espaço para guardar todos os ferramentais.
Montagem na horizontal mais fácil.	Não ajustável como o ferramental existente, no caso extremo apenas poderá ser utilizado por um único diâmetro.
Menor tempo de setup.	Não aproveitamento (retrabalho) de peças existente pois o conceito é diferente.
Preço do ferramental prevê-se que seja inferior pois o sistema é mais simples.	Como tem peças mais pequenas pode empenar e o sistema de cunhas ao fim de algum tempo deixar de ser funcional.
	Pode não ser funcional para o processo pretendido.

6.2. Proposta 2

Durante o desenvolvimento deste trabalho conclui-se que a projeção de um novo protótipo que cumprisse tais exigências seria um trabalho bastante complicado. Quando pensávamos num sistema flexível tanto o preço como a massa aumentavam exponencialmente. Se nos viramos para sistemas simples não cumpriam as exigências pretendidas, teríamos sempre de acrescentar peças e mais peças que no final transformava-se num sistema mais complexo que o utilizado atualmente. Depois de algumas tentativas falhadas em arranjar algo novo, chegou-se à conclusão que o mais indicado até por limitação de tempo de estágio seria otimizar o sistema atual e tentar fazer o máximo de melhorias possíveis tendo em conta os objetivos pretendidos.

Confidencial

Confidencial

Confidencial

Na Tabela 10 é feita a comparação das massas da solução atual juntamente com as propostas de melhoria. Na Tabela 11 identificam-se as vantagens e desvantagens associadas à proposta de melhoria.

Confidencial

Tabela 11. Vantagens e Desvantagens Proposta 2.

Vantagens	Desvantagens
Os operadores já conhecem o conceito, já estão familiarizados com o processo de montagem.	Tempo de setup elevado.
Sistema bastante estruturado e adaptável a vários diâmetros, reunindo quase todas as condições necessárias.	Sistema de montagem não é o mais otimizado.
Eliminação dos anéis de refugo nas extremidades.	

6.2.1. Análise estrutural

Para complementar o estudo e justificar que a redução da dimensão das peças não traria problemas de resistência mecânica ao sistema, recorreu-se à análise estrutural pelo método dos elementos finitos. O *software* utilizado foi o *autodesk inventor* no módulo referente ao método dos elementos finitos.

Todas as peças foram verificadas considerando uma análise estática com carga constante no tempo. As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia [30].

6.2.1.1. Colar inferior atual

Confidencial

Confidencial

Confidencial

Como era de esperar ambas as variáveis aumentam no colar otimizado, pois o sistema suporta quase a mesma carga com menos material. A diferença de valores entre os dois é acentuada, contudo para o sistema é insignificante pois no caso da tensão de cedência do material em questão rondará os 200 MPa. Em relação ao deslocamento máximo que ocorre preferencialmente na zona do conjunto da coluna + guia + cunha é desprezável pois estamos a falar de deslocamentos muito reduzidos que em nada afetará o sistema.

Concluimos que a utilização dos colares com uma espessura reduzida, se as cargas aplicadas foram as corretas, não afetará a estabilidade do sistema sendo os valores obtidos muito inferiores aos de limite do material em utilização.

6.2.1.3. Coluna

No caso do dimensionamento da coluna, na situação de funcionamento não há grande esforço (peso próprio) assim considerou-se apenas o dimensionamento na situação mais crítica que é quando o ferramental se encontra na horizontal, por exemplo quando colocados nos carros de apoio suportando o peso dos anéis nessa área, representado na Figura 41.

Confidencial

Portanto nesta situação a barra vai estar solicitada à flexão sendo essa a principal análise a realizar recorrendo ao método de elementos finitos. Fixou-se as duas

pontas para simular a fixação aos colares. A aplicação da cargas será o peso dos segmentos distribuídos uniformemente ao longo do seu comprimento que equivale a 60 N, representado na Figura 42 pelas setas amarelas.

Confidencial

Confidencial

Confidencial

Mais uma vez o aumento do valor das variáveis em estudo é esperado no caso do otimizado, contudo se as condições impostas forem as corretas os resultados obtidos no otimizado não afetará a estabilidade do sistema, tanto no caso da coluna reduzida como na utilizando a peça única (consultar Tabela 13). Apesar do valor da tensão de von Mises na peça única ser superior ao da coluna reduzida, o deslocamento máximo é menor que na peça única. Isto deve-se à concentração de tensões perto das zonas de fixação, como se verifica pela comparação da Figura 44 com a Figura 46. No entanto, os valores obtidos são bastante inferiores aos do limite de elasticidade deste material. Um fator a ter em conta tanto no atual como o otimizado com a redução da coluna, é que os anéis não serão apoiados só na coluna terá ainda as guias que dará mais estabilidade ao sistema, por uma questão de simplificação resolveu-se simular apenas com a coluna em ambos os casos.

A tentação para aceitar os resultados provenientes do programa é grande, quaisquer que sejam esses resultados, uma vez que considera que o *software* escolhido tem elevada qualidade. Os potenciais perigos de uma utilização nestas condições são a não percepção de eventuais erros na introdução dos dados, a ausência de correspondência entre o modelo selecionado e a estrutura que está a ser analisada, e o facto de serem desprezadas importantes condicionantes [30].

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas propostas para otimizar o ferramental atualmente utilizado para o revestimento PVD, em paralelo fez-se a análise do aumento do comprimento através dos testes de espessura e características nas zonas onde não é revestido anel.

Realizaram-se dois testes para avaliar a possibilidade de aumentar o comprimento do ferramental e verificou-se que há possibilidade de aumentar tanto no topo como no fundo. Para apoiar este estudo a empresa deverá realizar mais testes para validar os resultados obtidos, e verificar até onde as características estão de acordo com as especificações do produto efetivamente, com um grau de certeza mais elevado. Os resultados deste estudo indicam que podemos aumentar a produção anual, considerando as modificações propostas.

Foi sendo claro ao longo da descrição das propostas, qual seria a escolhida. As opções descritas relativas à proposta 1 não foram levadas muito em consideração pois pensa-se que o sistema terá problemas na montagem e conseqüentemente no processo de deposição, em contra partida tem a vantagem de reduzir a massa do conjunto. É um sistema que precisa de ser testado e ser melhorado após esses testes, pois há a possibilidade de os anéis não ficarem completamente apoiados levando ao não alinhamento dos anéis.

Posto isto, a proposta 2 é a solução mais vantajosa para o processo em questão. A proposta de otimização além de reduzir a massa do sistema atual em 40% ou 47%, dependendo do que a empresa considerar mais conveniente, consegue satisfazer todos os requisitos para o correto revestimento. Caso a coluna fique muito dispendiosa, por ser preciso elevado tempo de maquinação, pode-se optar por soldar os apoios para as guias. A empresa prevê que os colares ainda possam diminuir mais a espessura, segundo o estudo feito pelo método dos elementos finitos não haveria grandes problemas porém existe a desvantagem da fixação dos excêntricos e da coluna ao colar que pode não ser o suficiente.

Contudo este projeto não deverá ser considerado como final, mas sim como uma sugestão para no futuro se realizarem melhorias que otimizem o procedimento. As

sugestões apresentadas a seguir foram surgindo ao longo do desenvolvimento deste trabalho. O facto de estas sugestões não terem sido aprofundadas deve-se a limitações de tempo e de recursos, decorrentes do contexto académico em que se enquadra este projeto, seguem-se algumas propostas:

- A redução de massa do ferramental usado atualmente, ou seja modificar as peças de maior massa retirando-lhe material. Sendo uma solução para se continuar a utilizar o ferramental já existente. Algumas peças com os excêntricos e colunas podem ser trabalhados para serem utilizados nos colares projetados.
- Automatizar o processo de montagem dos anéis nas árvores, pois além de reduzir o tempo de montagem reduz o esforço requerido do trabalhador.

Confidencial

7.1.1. Balanço do estágio

A realização deste estágio foi particularmente importante, proporcionando uma primeira experiência com o mundo de trabalho. Essa experiência permitiu a aplicação em ambiente industrial de conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico. Esse ambiente tem ainda a vantagem de obrigar o aluno a lidar com a equipa de trabalho da organização, desde a gestão de topo até aos colaboradores, permitindo perceber as dificuldades associadas à implementação de medidas que implicam mudanças de hábitos de trabalho. Uma das grandes dificuldades recaiu sobre a gestão do tempo que não permitiu a realização de mais testes nem testar o protótipo desenvolvido.

O balanço final do projeto é extremamente positivo, não só pela aprendizagem obtida neste tempo como constituiu um começo extremamente motivador no mundo de trabalho. Permitiu perceber como passar da teoria à prática, proporcionando uma experiência real e uma visão do funcionamento de uma estrutura multinacional. Não esquecendo a dedicação e profissionalismo de todos os colaboradores da empresa que sempre me ajudaram a compreender o problema no qual estava inserida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Maria de Fátima Andrade “Análise da morfologia e da resistência ao desgaste de revestimentos TiAlSiN efectuados por PVD” Tese de Mestrado, Universidade do Porto, 2008

[2]. Cavaleiro, A., & Vieira, M. T. (1995). "Sebenta de Apoio às Disciplinas: Engenharia de Superfícies e Degradação e Proteção de Superfícies". Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologias.

[3]. K. Holmberg, A. Matthews, “Coatings Tribology- Properties, Techniques and applications in surface Engineering”, Tribology Series, 28, ed. D. Dowson, Elsevier, 1994, 440p.

[4]. <http://www.heattech.com.br/boletins/Boletim-Técnico-12-2010.pdf> acessado a 23 junho de 2013.

[5]. Ricardo José Monteiro dos Reis (2004/2005), “Estudo de defeitos dos revestimentos de anéis de pistão”. Projeto de Engenharia de Materiais, Universidade de Coimbra.

[6]. P. Panjan et al., Vacuum 61 (2001) 241-244.

[7]. Dobrzanski et al., Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005) 816– 821.

[8]. M. Andritschky, Journal of Materials Processing Technology 53 (1995) 33-46.

[9]. D.N. Allsopp, I.M. Hutchings, Wear 251 (2001) 1308–1314.

[10]. J.C. Oliveira et al., Surface and Coatings Technology 200 (2005) 395–398.

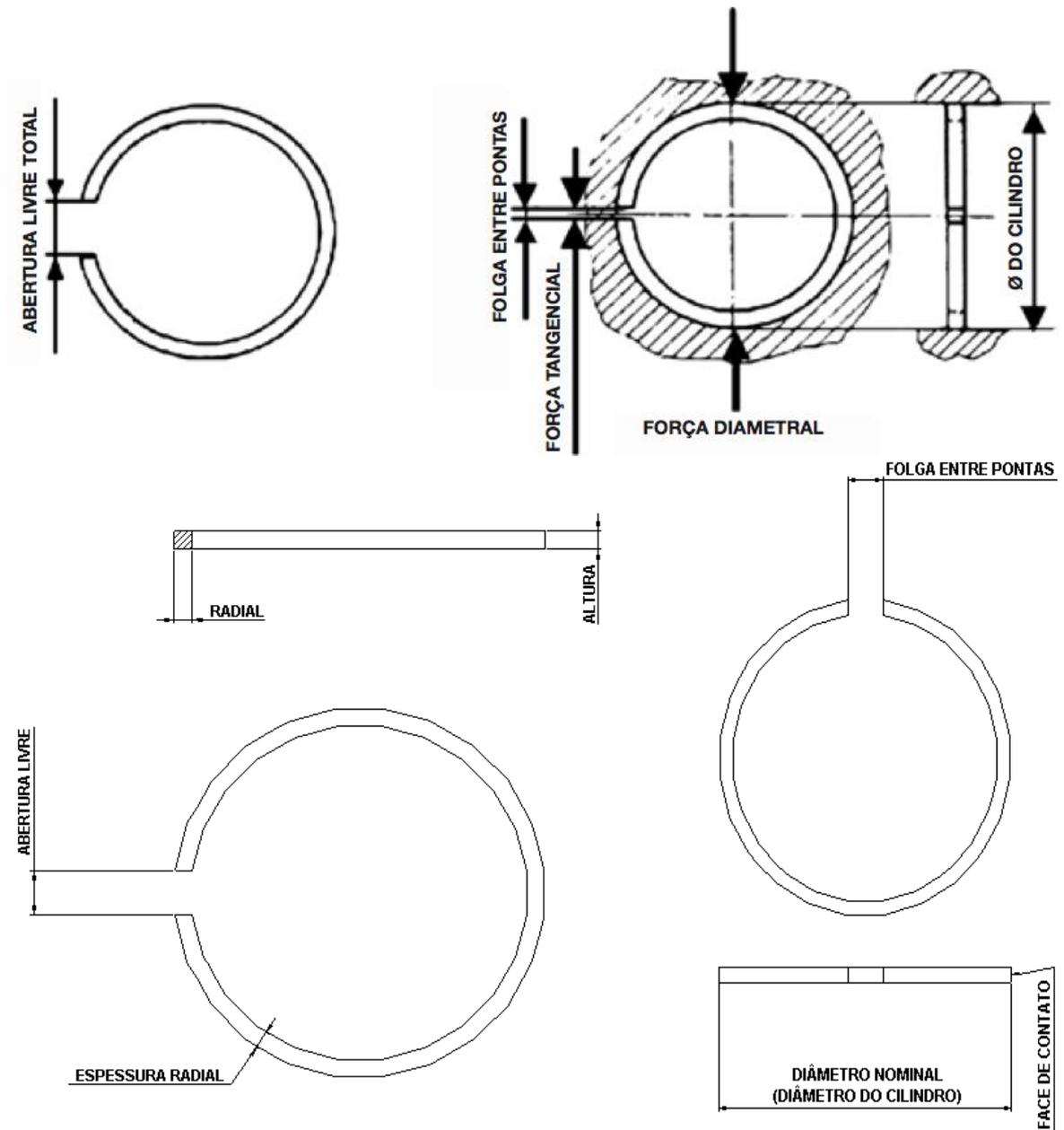
[11]. João Daniel Rodrigues da Costa “Estudo e Caracterização de Filmes Finos à base de Nitreto de Crómio” Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Departamento de Mecânica, 2011.

[12]. J.L. Mo et al., Tribology International 42 (2009) 1758–1764.

[13]. W.H. Zhang, J.H. Hsieh, Surface and Coatings Technology 130 (2000) 240-247.

- [14]. B. Navinsek et al., *Surface and Coatings Technology* 74 75 (1995) 155 161.
- [15]. O. Knotek, A. Schrey, in *Handbook of Thin Film Process Technology*, IOP Publishing Ltd (1995).
- [16]. L. Cunha, M. Andritschky, L. Rebouta, R. Silva, *Thin Solid Films* 317, 351 (1998).
- [17]. Y. L. Su, S. H. Yao, C. S. Wei, W. H. Kao, C. T. Wu, *Materials Science and Technology* Vol. 15, 73 (1999).
- [18]. W. Brandle, C. Gendig, *Thin Solid Films* 290-291, 343 (1996).
- [19]. E. Broszeit, C. Friedrich, G. Berg, *Surface & Coatings Technology* 115, 9 (1999).
- [20]. F.J.G. Silva, "Estudo da estrutura e comportamento tribológico de revestimentos duros e ultra-duros executados no vácuo", Tese de Doutoramento, FEUP, Novembro 2001
- [21]. A. Mathews, in: *Protective Coatings and Thin Films*, NATO ASI, 1996.
- [22]. <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bpt/por/01-products-services/03-coating-technology/01-coating-processes/indexW3DnavidW261.php> acessado no dia 23 de junho de 2013.
- [23]. Pinto, L., & Costa, N. (2004). *Degradação e Proteção de Materias PVD - Arco Catódico*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- [24]. Manuel Fernando Ferreira "Optimização de Processo PVD tendo em vista ganhos de produtividade." Tese de Mestrado, Universidade do Porto, 2008
- [25]. Donald M. Mattox, "Handbook of Physical vapour Deposition (PVD) Processing", Society of Vacuum Coaters, 1998
- [26]. 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
- [28]. B. D. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction*, second edition, editado por Addison- Wesley Publishing Company, Inc, Massachusetts, USA (1978).
- [30]. Álvaro F. M. Azevedo (2003), "Método de Elementos Finitos" Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ANEXO A - NOMENCLATURA DO ANEL



ANEXO G – NOÇÃO DE MICRON

