Universidade do Vale do Paraíba Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Mestrado Profissional em Processamento de Materiais

José Aparecido Granato

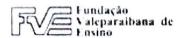
OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE CROMAGEM VISANDO REDUÇÃO DE TRINCAS NO REVESTIMENTO

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE CROMAGEM VISANDO REDUÇÃO DE TRINCAS NO REVESTIMENTO

Dissertação apresentada no Programa de Pósgraduação em Processamentos em Materiais, como complementação de créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Processamentos em Materiais.

Orientador: Profo. Dro Dr Viliam Sinka

Co-oritentador: Prof^a. Dr^a Erika Peterson Gonçalves





TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Granato, José Aparecido.

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE CROMAGEM, VISANDO REDUÇÃO DA NÃO CONFORMIDADE "ELIMINAÇÃO DE TRINCAS" NA CAMADA DE CROMO. / José Aparecido Granato; orientador, Viliam Sinka; co-orientador Érika Peterson Gonçalves. - São José dos Campos, SP, 2019.

67 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais e Catálise.

Inclui referências

l. Processamento de Materiais e Catálise. 2. Processamentos de Materiais. 3. Eliminar Não conformidade "Trinca" na Luva Direção. 4. Padronizar espessura da camada de cromo. 5. Reduzir Dureza Vickers na Cromação. I. Sinka, Viliam, orient. II. Gonçalves, Érika Peterson, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais e Catálise. IV. Título.

Eu. José Aparecido Granato, autor (a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 31 de Junho de 2019.

Autor (a) da Obra

11

			Mord	
Data da defesa:	1	1		





JOSÉ APARECIDO GRANATO

"OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE CROMAGEM VISANDO REDUÇÃO DE TRINCAS NO REVESTIMENTO."

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

Λ /		
PROF.ª DR.ª LÚCIA VIEIRA		
PROF. * DR. * LUCIA VIEIRA		
PROF. DR. VILIAM SINKA VACALLY TOLER		
PROF.ª DR.ª ERIKA PETERSON GONÇALVES Diancales		
PROF. PAR. ANA PAULA FONSECA ALBERS - Unifesp		
PROF. MSc. CARLOS EDUARDO MONTEIRO RODRIGUES – Embraer		

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D - Univap

São José dos Campos, 31 de maio de 2019.

Este trabalho é dedicado:

À minha esposa, por sua total dedicação à família, me apoiando em todos os momentos para que esta vitória fosse possível.

Aos meus filhos, por compreenderem minha ausência durante o período de estudo e pesquisas.

Aos meus amigos, pelo apoio e convivência nessa trajetória.

Aos professores e a todos que direta e indiretamente se tornaram corresponsáveis desta conquista.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, que tornou possível a conclusão desta dissertação.

Aos professores, funcionários e amigos conquistados nesta instituição, pelos ensinamentos, orientações e referências, obtidos em virtude de suas atitudes e gestos.

À minha esposa Dalva, pelo amor incondicional, pela compreensão e conselhos nas horas em que mais precisei.

Aos meus filhos, Bruna e Marcos Paulo, que nos momentos mais difíceis, mesmo sem saber, contribuíram e forneceram uma enorme alegria em minha vida.

Aos meus amigos da empresa Carlos Eduardo Monteiro Rodrigues, João Antônio Pontes Martins, Reinaldo Ponte Junior e Rodrigo de Almeida Souza pela colaboração durante a elaboração do meu trabalho.

Aos meus amigos, Celso Martins, Bruno de Castro e Cleber José Ferreira e Elton Erreria Dadamo pelo apoio e orientações, e também por não hesitarem em ajudar em momento algum.

Aos amigos e orientadores Erika, Ivone e Sinka, pela paciência e orientações para a construção deste trabalho.

A uma amiga que me orientou e passou uma energia muito forte, a professora Ivone Regina de Oliveira.

Aos professores do programa de Mestrado Profissional em Processamento de Materiais.

Aos amigos da secretaria UNIVAP, pelo grande apoio.

"Para ser superado não é preciso parar, basta permanecer com a mesma velocidade, atitude ou forma de pensar. [...] O progresso não para, e aquele que não antecipa suas próprias mudanças está condenado a ser um perdedor. [...] O sucesso aparece para aquele que embarca em um processo de aprimoramento contínuo." (Claudiney Fullmann - Prefácio do livro *A Meta*).

RESUMO

No processo de fabricação da luva direção, observou-se várias não conformidades. Para elimininar e/ou mitigar estas não conformidades, identificou-se algumas oportunidades de melhorias. Uma destas melhorias é a redução da dureza da camada, evitando o trincamento no revestimento. A dureza da camada do revestimento de cromo deve ser reduzida para que os esforços mecânicos ocasionados pelos processos de retifica sejam absorvidos pelo metal base, que assim reduzem a ocorrência das trincas. O aço AISI 4340 é utilizado para a luva direção e devido à necessidade de alta resistência ao desgaste e à corrosão é revestido por cromo. Neste trabalho avaliou-se a eletrodeposição de cromo na luva direção, para analisar a possível redução da espessura da camada de cromo. O objetivo foi avaliar o efeito da redução da dureza que inicialmente estava em 940 HV. Uma camada com maior dureza é susceptível ao trincamento, sendo que a redução da dureza diminuiria a tendência ao trincamento após a retífica. A redução da dureza foi obtida pelo aumento da temperatura do banho. Aumentando a temperatura de 53°C para 58°C, a redução da dureza de 940 HV para 860 HV foi obtida mantendo a mesma densidade de corrente.

Palavras-chave: *Trinca*. Aço AISI 4340. Dureza. Desgaste a Corrosão. Aplicação de camada de Cromo.

STUDY OF THE PROPAGATION OF THE CRACK IN STEEL AISI 4340 SUBMITTED TO THE GRINDING OF THE CHROMIUM LAYER

ABSTRACT

In the process of landing gears manufacturing, several nonconformities were observed. In order to eliminate and / or mitigate these nonconformities, some opportunities for improvement have been identified. One such improvement is the reduction of the hardness of the layer, avoiding cracking in the coating. The hardness of the chromium coating layer must be reduced so that the mechanical stresses caused by the grinding processes are absorbed by the base metal, which thus reduces the occurrence of cracks. The steel AISI 4340 is used for the landing gears and due to the need for high resistance to wear and corrosion is coated by chrome. This work evaluated the electrodeposition of chromium in the landing gears. analyzing the possible reduction of the of the chromium layer thickness. The objective was to evaluate the effect of the reduction of hardness that was initially at 940 HV. A harder layer is susceptible to cracking, and the reduction of hardness would reduce the tendency to cracking after grinding. The hardness reduction was obtained by increasing the temperature of the bath. Increasing the temperature from 53°C to 58°C, the reduction of the hardness from 940 HV to 860 HV was obtained while maintaining the same current density.

Keywords: Crack. Steel AISI 4340. Hardness. Friction Corrosion. Application of Chrome layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trem de Pouso14
Figura 2 - Curva TTT do aço AISI 434019
Figura 3 Shot Peening19
Figura 4 - Tensão gerada na superfície da peça pela aplicação do shot peening20
Figura 5 - Eficiência da corrente em função do tipo e concentração de catalisadores.
(250 g.L ⁻¹ de ácido crômico, 55°C, A/dm ²)23
Figura 6 - Eficiência da corrente em função do tipo e concentração de ácido crômico (55 °C, A/dm²)27
Figura 7 - Variação da dureza em função da temperatura e densidade de corrente28
Figura 8 (a) - A influência da temperatura sobre a aparência das camadas em função da temperatura e densidade de corrente A/dm². 8 (b) - A influência do metal base sobre a aparência das camadas em função da temperatura e densidade de corrente A/dm², área de depsósito ótimo.
Figura 9 - Exemplos típicos de anodos auxiliares31
Figura 10 - Interação entre os grãos abrasivos de uma ferramenta e a peça a ser retificada
A retificação, segundo STEMMER, (1992) enquadra-se como processo de usinagem com ferramenta (rebolo) com a parte cortante de geometria indefinida, na figura 11 é apresentadas algumas formas de retificação.Figura 11 - Tipos de Retificação35
Figura 12 – Fluxograma do processo de fabricação da luva direção38
Figura 13 - Mostra a esquema do dispositivo mecânico para realizar a dobra dos CDP's a 90°45
Figura 14 - Representação esquemática do tratamento térmico do aço AISI 434047
Figura 15 - Microestrutura do aço AISI 4340 temperados e revenido: Martensita revenida. – 1.000X. Ataque Nital 2% (ASM Handbook v. 7)
Figura 16- Mostra o Aço AISI 4340 tratado termicamente para dureza de 50,5 HRC e 53 HRC48
Figura 17 - Mostra (b) Núcleo de Microestrutura constituída de martensita revenida Aço AISI 4340 tratado termicamente para dureza de 50,5 HRC e 53 HRC49
Figura 18 - Foto mostra a espessura de camada de cromo depositado no metal base estudado

Figura 19 – CDP Dobrado a 90º sem desplacamento da camada de cromo do aço AISI	ı
4340	52
Figura 20 – CDP rompido após o dobrado a 90º com desplacamento da camada de cromo do aço AISI 4340	52
Figura 21 – Mostra o padrão de microtrincas de uma superfície de placa de cromo com	1
mais de 700 microtrincas por cm. Ampliação da imagem 100x	
Figura 22 - Trinca na camada de cromo do aço AISI 4340 luva direção	54
Figura 23 - Marcas, trincas e trepidações de retífica na camada de cromo do aço AISI 4340 luva direção	55
Figura 24 - Cromo Duro: Região isenta de trincas pós-cromo e pós-retífica do cromo en	n
função da dureza da temperatura e densidade de corrente	55
Figura 25 - Cromo Duro: Variação da dureza em função da temperatura e densidade de	е
corrente5	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Característica do depósito de cromo	.29
Tabela 2 - Concentração dos elementos químicos no aço AISI 4340 segundo as norm	as
AMS 6414K e 6415S	.36
Tabela 3 – Etapas da realização do ensaio de Líquido Penetrante	.41
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Aço AISI 4340 após tratamentos térmico	.50
Tabela 5 – Médias dos resultados do Ensaio de Tração do Aço AISI 4340	.50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI American Iron and Steel Institute

ASM American Society for Metals

ASTM American Society for Testing and Materials

SAE Society of Automotive Engineers

MQL Minima Quantidade de Lubrificação

HVOF High Velocity Oxygen Fuel

TCC Tetragonal de Corpo Centrado

TTT Tempo – Temperatura – Transformação

HRC Rockwell Hardness C

NC Não Conformidade

LP Líquido Penetrante

Qw Taxa de Remoção do Material

Vw Velocidade Periférica da peça

Vs Velocidade Periférica do Rebolo

Vf Velocidade de Avanço

Dw Diâmetro da Peça

CDP's Corpos de Prova

LP Líquido Penetrante

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volume	m^3
σ_{e}	Tensão de escoamento	MPa
Α	Corrente Elétrica	Ampére
Е	Módulo de elasticidade longitudinal	MPa
g	Unidade de Peso	gramas
S	Unidade de tempo	segundo
h	Unidade de tempo	hora
min	Unidade de tempo	minuto
rpm	Velocidade Angular	rotação por minuto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Tratamentos Térmicos	
3.2 Shot Peening	19
3.3 Eletrodeposição de Cromo	
3.3.1 Finalidades e aplicações do cromo	
3.3.2 Teoria da Deposição	22
3.3.3 Condições de Deposição	
3.4 Ensaio de Líquido Penetrante (LP)	
3.5 Processo de Retificação	
3.6 O Aço AISI 4340	
4 MATERIAIS E MÉTODO	38
4.1 Tratamentos térmicos	
4.2 Deposição de cromo duro	
4.3 Ensaios realizados	
4.3.1 Metalografia	
4.3.2 Ensaio de microdureza Vickers	
4.3.3 Ensaio de Tração	
4.3.4 Líquido Penetrante	
4.3.5 Descrição do procedimento	
4.3.7 Aplicação do Penetrante	
4.3.8 Remoção do Excesso de Penetrante	42
4.3.9 Aplicação do Revelador	
4.3.10Inspeção e Aplicação	
4.3.11Ensaio de Aderência ao cromo	
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 Ensaios no aco AISI 4340	46
5.1.1 Tratamentos Térmicos	
5.1.2 Microestrutura	
5.1.3 Propriedades mecânicas	
5.1.4 Ensaio de microdureza no cromo	
5.1.5 Ensaio de Aderência	51
5.1.6 Avaliação das microtrincas no cromo	53
5.1.7 Ensaio por Líquido Penetrante	
5.1.8 Ensaio de Dureza Vickers x Temperatura	55
6 CONCLUSÃO	58
7 SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

1 INTRODUÇÃO

No final dos anos 20 e início dos anos 30, ocorreu uma mudança revolucionária na aeronáutica com o aparecimento de formas aerodinâmicas de aeronaves metálicas com características tais como: capôs removíveis, retração do trem de pouso e contendo revestimentos de alumínio (JAKAB, 1999). Para isto os materiais sempre desempenharam um importante papel na construção de aeronaves. Antes da Primeira Guerra Mundial, as estruturas aeronáuticas eram construídas basicamente por tecidos e madeira, que, por suas características de anisotropia, absorção de umidade, instabilidade dimensional e vulnerabilidade, favoreceram o desenvolvimento de outros materiais, principalmente materiais de alta resistência mecânica (CARVALHO, 1999; GUIMARAES, 1994). Para o projeto de um avião, deve ser considerada uma sequência repetida de operações que consiste basicamente em quatro fases: taxiamento no aeroporto, decolagem, voo de cruzeiro (civil) ou operacional (militar) e aterrissagem. Conhecidas as fases, o projeto deve levar em consideração partes distinto do avião. Esta distinção é necessária, uma vez que são empregados diferentes critérios para seleção de material em diferentes partes do avião, algumas das partes mais críticas da estrutura de um avião são as asas, a fuselagem e o trem de pouso (GODEFROID, 1993). O trem de pouso é submetido a elevadas tensões tanto na decolagem, devido ao peso da aeronave e do combustível, quanto na aterrissagem, quando toca o chão devido ao peso e ao impacto, a figura 1 mostra um desenho esquemático de um trem de pouso.

Figura 1 - Trem de Pouso.



Fonte: O Autor (Cortesia Empresa)

Os materiais metálicos submetidos a carregamentos variáveis podem falhar sobtensões inferiores às necessárias para o carregamento estático. Essas falhas são chamadas de falhas por fadiga. Que são falhas catastróficas, ou seja, sem que haja indicação prévia da falha (DIETER, 1988).

A severidade do meio em que atuam os trens de pouso e o carregamento cíclico a que estão submetidos tornam a caracterização em fadiga importante para garantir a durabilidade e segurança do componente (TORRES; VOORWALD, 2002; VOORWALD et al., 2005).

As falhas repentinas que ocorrem sobre componentes estruturais, não apresentam deformação plástica macroscópica, e representam um grave problema por atingir proporções catastróficas (CAMARGO, 2007).

Estima-se que cerca de 90% das falhas em serviço dos componentes que estão sujeitos a trabalhos cíclicos, podem ser atribuídos ao fenômeno de fadiga (CAMARGO, 2007).

A fadiga é um importante parâmetro a ser considerado, em projetos de estruturas aeronáuticas comumente submetidas a carregamentos cíclicos. Para trens de pouso, além da resistência à fadiga, a resistência aos desgastes e corrosão deve ser considerada para garantir o funcionamento e a integridade do componente (SOUZA; VOORWALD; CIOFFI, 2008).

Uma consideração estrutural marcante na falha por fadiga é o fato das trincas geralmente terem início em uma superfície livre, geralmente uma interface, entre a superfície dos metais, região normalmente ocorrem às máximas tensões. É muito bem conhecido que as trincas de fadiga se iniciam em singularidades que se encontram na superfície ou logo abaixo da mesma. Portanto, a falha dos metais por fadiga é causada pelo início e crescimento de uma trinca a partir de um defeito superficial (MILLER, 1993).

Atualmente, materiais de alta resistência mecânica, como o aço AISI 4340, são revestidos por cromo duro ou cádmio, com a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste e a corrosão, a camada de cromo dura já produzida por eletrodeposição a partir de uma solução contendo trióxido de cromo e um catalizador de ácido sulfúrico em proporção adequada e ensaios tem demonstrado que um aço revestido com cromo duro, resiste ao desgaste entre 5 (cinco) a 8 (oito)

vezes mais que o aço sem cromo. Entretanto, os processos de eletrodeposição das camadas de cromo e do cádmio produzem como resíduos íons de cromo no estado hexavalente e cianetos, que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (BONORA, 2015).

Outro aço utilizado em eixos estruturais pela indústria aeronáutica em trens de pouso é o aço inoxidável 15-5 PH.

Devido à sua elevada resistência mecânica e alta resistência à corrosão, o mesmo se torna muito atrativo para indústria aeronáutica. Entretanto, sua aplicação é restringida pela sua baixa resistência ao desgaste, quando comparado com materiais revestidos por cromo duro.

Deste modo, faz-se necessário a realização de um tratamento superficial que aumente sua dureza para utilização em trens de pouso, que são expostos a ambientes agressivos e estão sujeitos ao atrito constante entre seus componentes (ITAL, 2008).

Neste estudo abordam-se os conceitos envolvidos, tais como, conceitos de Tração e trincas, retificação, conceitos de *Shot Peening*.

E tem como objetivo analisar a influência da espessura de uma camada de cromo duro eletrodepositado na luva direção fabricada com aço de alta resistência, AISI 4340 (utilizado em trens de pouso de aeronaves), com dureza de 850 HV a 1000 HV.

O produto de luva direção é um componente do trem de pouso que tem a função de direcionar os giros da aeronave, e sofre esforços axias e radiais em seu funcionamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi reduzir as não conformidades (NC), geradas ao longo do processo produtivo da luva direção contendo revestimento de cromo.

2.2 Objetivos Específicos

- Reduzir a não conformidade por trinca da camada de cromo;
- Reduzir a área anódica para eliminar encabeçamento de cromo nas extremidades conhecida como efeito "pontas" (Excesso de corrente nos cantos vivos do produto).
- Reduzir a dureza do cromo para observer deformações durante esforços de usinagem (Retífica), e interferência na montagem térmica;
- Reduzir o tempo de banho no processo de cromagem;
- Analisar a relação de dureza e temperatura para uma mesma densidade do banho buscando a diminuição da dureza;
- Eliminar a propagação das microtrincas existentes na camada de cromo duro buscando eliminar a propagação da trinca para o metal base.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos dos aços, principalmente a têmpera, são dependentes da temperabilidade.

De acordo com (SILVA; MEI, 1988), ela pode ser definida como "propriedade que determina a profundidade e distribuição de dureza quando uma liga ferrosa é resfriada rapidamente". Isto significa dizer que o conceito de temperabilidade é associado à capacidade de formar martensita a uma determinada profundidade em uma peça.

Para se obtiver uma estrutura martensítica, é necessário que o aço austenitizado seja submetido a um rápido resfriamento, de forma a inibir a difusão do carbono, resultando numa estrutura TCC (BONORA, 2015). Nos aços de baixo carbono é extremamente difícil de realizar este tratamento térmico. (COSTA, 2013).

Foi esta dificuldade de formação da fase martensítica a partir de açoscarbono comuns que tem levado ao desenvolvimento de ligas metálicas em que fosse possível a obtenção desta estrutura.

O aço AISI 4340 é um exemplo destas ligas, pois além dos benefícios individuais produzidos pela adição dos elementos de liga, estes elementos provocam o retardo do início das transformações perlíticas e bainíticas.

Este fenômeno permite a obtenção de estrutura martensítica em peças de grandes espessuras, que é o caso de componentes mecânicos utilizados nas indústrias aeronáutica, automobilística, naval, petroquímica, entre outras.

A figura 2 mostra a curva TTT desta liga, onde é possível observar o deslocamento do início das transformações ferríticas e bainíticas para a direita, ou seja, num maior tempo.

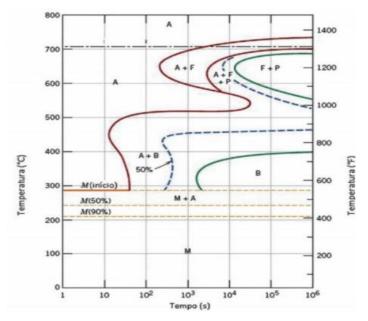


Figura 2 - Curva TTT do aço AISI 4340.

Nota: A-Austenita, B-Bainita, C-Cementita, P-Perlita, M-martensita, F-Ferrita.

Fonte: Adaptado de Callister (2012, p. 365).

3.2 Shot Peening

Shot Peening pode ser definido como um tratamento superficial a frio gerado pelo impacto controlado de granalhas. Estas granalhas possuem forma esférica e são projetadas a altas velocidades de forma a realizar um trabalho a frio na superfície do componente visando o aumento das propriedades superficiais por deformação plástica, a figura 3 mostra um esquema do processo de Shot Peening (CAMARGO, 2007).

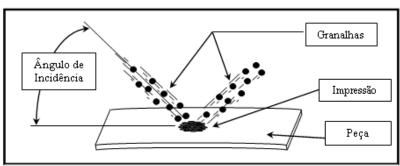


Figura 3 Shot Peening.

Fonte: O Autor.

O principal propósito do processo de *shot peening* é a indução de tensões residuais de compressão na superfície da peça. Esta tensão residual de compressão induzida é responsável pelo incremento da vida em fadiga do componente. A espessura desta camada comprimida depende do material a ser trabalhado e sua geometria (momento de inércia) e da intensidade de jateamento aplicado. A tensão residual de compressão pode prevenir alguns tipos de falhas, tais como (CAMARGO, 2007):

- a. Formação / Propagação de falhas devido a solicitações cíclicas
- b. Falhas devido a Corrosão Sob Tensão (SCC Stress Corrosion Cracking)

A figura 4 ilustra o diagrama de tensões gerado a partir da deformação plástica causada na superfície pelo impacto das esferas no processo de *Shot Peening*.

Tensão gerado na Superfície

Compressão

Fonte: O Autor.

Figura 4 - Tensão gerada na superfície da peça pela aplicação do shot peening.

3.3 Eletrodeposição de Cromo

3.3.1 Finalidades e aplicações do cromo

O cromo é um metal de cor branca e azulada semelhante à platina, poder de reflexão do cromo altamente polido para raios de luz e calor, é alto, cerca de 65%

comparado aos 88% para a prata polida. O peso específico é de 6,9 a 7,1 g/cm⁻³ dependendo da densidade de corrente utilizada durante a cromação e seu ponto de fusão esta em torno de 1.875 °C. A temperatura acima de 370 °C, o cromo duro muda de estrutura cristalina hexagonal, responsável pela sua alta dureza, para uma estrutura cristalina menos dura, a cúbica de corpo centrado. Acima de 300°C formam-se filmes visíveis de óxidos.

O coeficiente de expansão térmica do cromo é de 8,1 x 10⁻⁶ mm/mm°C. Situase entre o coeficiente de expansão térmica do ferro fundido cinzento e do aço. Para aplicações técnicas isto é uma grande vantagem, porque há relativamente poucas tensões térmicas que poderiam conduzir a um desprendimento da camada de cromo, como é o caso do níquel que tem um coeficiente de expansão térmica de 14 x 10⁻⁶, cobre de 17 x 10⁻⁶ (o cobre, porém é tão dúctil que normalmente não há perigo), ou o alumínio, como um coeficiente de expansão témica de 25,7 x 10⁻⁶ mm/mm°C (SAE AMS 2440, 2013).

Como elemento de liga, o cromo é usado há muito tempo para aumentar o intervalo de temperatura no qual uma têmpera é possível e na fabricação de aços inoxidáveis nos quais a fácil oxidação superficial do cromo permite o desenvolvimento de um filme de óxido passivo na superfície, que protege a liga.

Este filme de óxido superficial confere aos revestimentos de cromo duro, características de alta resistência à corrosão a altas temperaturas. A posição eletroquímica do cromo (sem o filme de óxido) em relação ao hidrogênio protegeria anodicamente o ferro, de maneira semelhante ao zinco. O filme de óxido é invisível, transparente e incolor, de maneira que o brilho do cromo é preservado, formando-se instantaneamente na presença de oxigênio. O cromo duro, portanto não resistirá em meios que destruam os filmes já existentes, como meios contendo ácidos cloridrico, forte agente redutor, ou que impeçam a formação dos mesmos, como por exemplo, água contendo matérias orgânicas em decomposição devido à ausência de oxigênio (SAE AMS 2440, 2013).

O cromo é um dos poucos metais que pode ser depositado com alta dureza, a partir de uma solução elétrolítica. O endurecimento superficial que se pode obter com este revestimento ao contrário obtida por outros metodos, não afeta o metal base. A camada aplicada é normalmente fina, por isso a dureza da mesma deve ser

medida com equipamentos de micro-dureza, uma vez que o peso aplicado pelo corpo de penetração dos equipamentos comuns romperia a camada e o resultado seria a dureza do metal base. A dureza das camadas de cromo duro varia de cerca 850 a 1250 Vickers (cerca de nove, escala Mohs), porém, para satisfazer exigências extraordinárias, poderá ser ainda consideravelmente superior ou inferior a esses valores. (MIL-STD-1501, 2018).

3.3.2 Teoria da Deposição

A deposição de cromo metálico é muito mais complexa do que do cobre ou níquel, porque o íon que conduz o metal é o ânion, sendo a parte que deveria migrar para o anodo durante a eletrólise. Apenas em 1924 foram descobertos métodos de deposição que permitem a aplicação em escala industrial destes revestimentos, o banho recomendado por Liebreich, na Alemanha, é conhecido banho "Padrão" e constituí-se de 200 g.L⁻¹ de anidrio crômico (CrO₃) e 2,4 g.L⁻¹ de ácido sulfúrico. O teor de ácido súlfurico normalmente é expresso em porcentagem do anidrio crômico, correspondendo no presente caso a 1,5%. O ácido sulfúrico tem a função de catalisador no range de 1,5 % a 3,5 %, sendo, portanto, indispensável para a eletrodeposição (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013).

A figura 5 mostra o diagrama de eficiência de corrente em função da concentração do catalisador para os processos de deposição eletroquímica da camada de cromo duro.

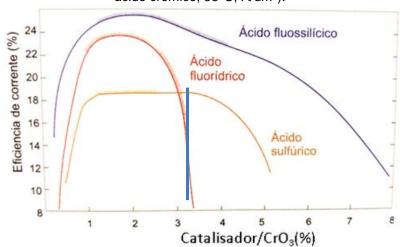


Figura 5 - Eficiência da corrente em função do tipo e concentração de catalisadores. (250 g.L⁻¹ de ácido crômico, 55°C, A/dm²).

Fonte: Adaptado pelo Autor (MIL-STD-1501, 2018).

A deposição de cromo metálico a partir de uma solução de ácido crômico, na presença de um catalisador adequado, se processa junto a, e possivelmente por intermédio da liberação de hidrogênio pela redução eletroquímica de íons de cromo hexavalente (MIL-STD-1501, 2018).

Se a eletrólise for feita a um potencial catódico baixo, de maneira que não haja descarga de hidrogênio, só obteremos uma redução para cromo trivalente. Apenas acima de um determinado potencial catódico aparece o hidrogênio molecular e a partir deste ponto obtém-se a redução para cromo metálico. Na teoria de E.Mueller sobre o mecanismo de deposição, uma solução pura e aquosa de ácido crômico é um meio oxidante fortíssimo. Com polarização catódica, já com potenciais muito baixos, há passagem de corrente pelo eletrólito e um aumento da curva de densidade da corrente em função do potencial. Na primeira inclinação desta curva há uma redução de ácido crômico de acordo com a equação (MIL-STD-1501, 2018).

No catodo formam-se íons de cromo trivalente e álcali livre, se o eletrólito diretamente sobre o catodo tornar-se alcalino, forma-se rapidamente cromato trivalente, que é insolúvel e recobre o catodo como um filme isolante de espessura

molecular, estas moléculas são situadas da tal maneira que a extremidade básica fique projetada para o catodo, cessando a reação de redução.

Com o aumento da tensão aplicada, inicia-se novamente a passagem de corrente elétrica, até o potencial de hidrogênio ser atingido. A formação de hidrogênio no catodo só é possível porque os íons, por seu reduzido tamanho, conseguem difundir através dos poros do filme de cromo até o catodo.

O radical ácido não consegue difundir através destes poros e migra ao anodo, onde, por dissociação de água ocorre desenvolvimento de oxigênio do anodo. É somente na presença de catalisadores adequados, como por exemplo, ácido sulfúrico , fluossilícico) e fluorídrico (, que a deposição de cromo metálico torna-se possível. Também neste caso há a formação de um filme isolante de cromatos básicos. Mas, encontram-se presentes em solução, além de íons hidrogênio e do radical ácido , radical Com aumento de tensão e densidade de corrente, ocorre, em primeiro lugar, a difusão de íon de hidrogênio pelos poros de filme isolante, que é descarregado no catodo. Uma vez que o radical não pode passar pelos poros do filme isolante, o radical passa pelos poros do diafragma e reage com parte básica da molécula de cromato de cromo com a formação de cromo trivalente . Este é reduzido a cromo metálico segundo a equação: (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013).

Pelo poro formado no filme um novo radical ácido pode difundir ser reduzido e fechar o poro. Este processo de migração de íons de ácidos estranhos, formação de poros, deposição de cromo e fechamento dos poros, da-se continuamente em toda a superfície catódica, de modo que com a superação do potencial de cromo, cromo metálico, deposita-se por descarga de cromo hexavalente ao cromo metálico, sem que os produtos intermediários possam ser observados em concentraçãos mensuráveis.

As diferentes teorias sobre o mecanismo de decomposição referem-se principalmente aos processos de redução que ocorrem simultâneamente ou consecutivamente sobre a curva da densidade de corrente em função de potencial. Alguns pesquisadores consideram diversos graus de redução parcial, como exemplo

uma redução eletroquímica de ácido crômico para íons trivalentes de cromo e finalmente ao cromo metálico.

Por este fenômeno seria ligado a uma forte polarização química, porque todos os metais conhecido na prática de cromagem, como ferro, níquel ou cobre, dissolvese em ácido crômico, formam-se íons e na forma de íons metálicos têm o papel importante nas reações químicas envolvidas.

As reações anódicas se dão na superfície de peróxido de chumbo dos anodos. Este peróxido é um bom condutor elétrico, enquanto que o óxido de chumbo é quase um isolante (MIL-STD-1501, 2018).

Por isso, o filme anódico tem de ser formado antes ou no início da cromação (filme preto). Como os cromatos trivalentes formados no catodo devem ser reoxidados para ácido crômico (cromo hexavalente) no anodo, uma área anódica bastante grande é necessária para conseguir um equilibrio estável do eletrólito. Anodos de ferro não podem ser utilizados, uma vez que esta reoxidação não ocorre nestes materiais. (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013).

3.3.3 Condições de Deposição

Os principais parâmetros de deposição de cromo duro contemplam inúmeras modificações dos depósitos, produzidas por pequenas mudanças das condições de deposição.

Os principais parâmetros de deposição são os seguintes:

- a. Concentração de ácido Crômico;
- b. Escolha do catalisador;
- c. Proporção entre ácido crômico e catalisador
- d. Temperatura;
- e. Densidade de corrente;
- f. Rendimento de corrente:
- g. Duração de deposição;
- h. Difusão de hidrogênio.

A concentração de anidrido crômico utilizada nos banhos industriais varia de 200 a 600 g.L⁻¹. O rendimento de corrente aumenta com a diminuição da

concentração de anidrico crômico. A condutividade elétrica atinge um máximo com cerca de 450 g.L⁻¹ e aumenta com a temperatura do banho. A concentração relativamente alta de acompanhada de temperatrura e densidade de corrente elevadas, o cromo depositado apresenta uma dureza bem menor do que sob condições padrão de temperatura, densidade de corrente e concentração do banho, é, porém praticamente isento de poros. Assim, para cromação dura industrial, é conveniente usar os banhos com concentrações menores de , isto é 250 g.L⁻¹, para poder trabalhar com densidade de corrente mais elevada obtendo-se camadas de cromo mais espessas por unidade de tempo. Como catalisadores utilizam-se: ácido súlfurico, ácido fluoridrico, ácido fluossilícico ou misturas destes e seus sais. O rendimento de corrente varia fortemente com ácido utilizado. De acordo com a figura 6, verifica-se:

- Para ácido Sulfúrico 18,3% de rendimento de corrente.
- Para ácido fluorídrico 23,5% de rendimento de corrente.
- Para ácido fluossilícico 24,5% de rendimento de corrente.

A figura 6 apresenta o gráfico de eficiência de corrente em função do ácido cromico, os resultados foram obtidos em um processo de camada de cromo em aço AISI 4340.

Na figura 6 verifica-se um maior rendimento de corrente é obtido com a utilização de ácido fluorídrico e ácido fluossilícico. Mas mesmo assim o ácido sulfúrico é o mais usado hoje como catalisador, isto porque, os ácidos fluoridrico e o fluossilícico exercem forte ataque sobre os anodos, sobre as peças a serem cromadas e sobre o revestimento dos tanques de processamento.

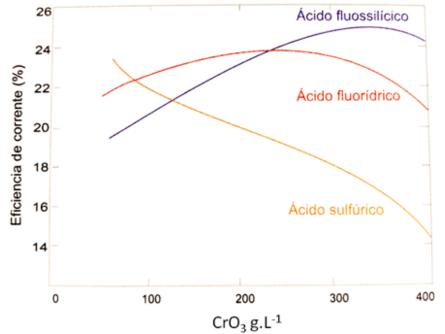


Figura 6 - Eficiência da corrente em função do tipo e concentração de ácido crômico (55 °C, A/dm²).

Fonte: Adaptado pelo Autor (MIL-STD-1501, 2018).

A relação de ácido sulfúrico e ácido crômico varia de 1 a 2% para depósitos industriais brilhantes e duros, acima de 2% e abaixo de 0,5%, não ocorre à deposição do cromo, devido à formação de cromo trivalente e devido ao ácido sulfúrico ser um catalisador (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013). A temperatura é um fator decisivo no processo de cromação, sendo que na temperatura de 55 ° C, figura 7, ocorre a formação de filmes com propriedades adequadas para a aplicação em luva direção.

A temperatura é um fator decisivo na cromação, na figura 7 verifica-se que a temperatura de 55 °C é dos pontos críticos nas curvas.

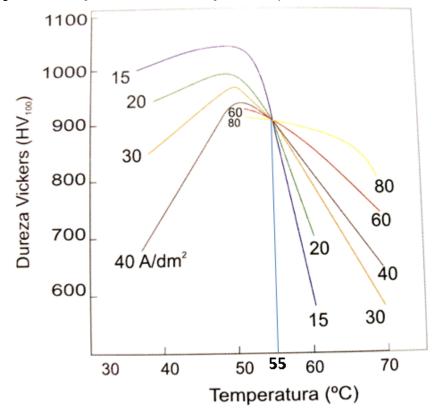


Figura 7 - Variação da dureza em função da temperatura e densidade de corrente.

Fonte: Adaptado pelo Autor (MIL-STD-1501 2018).

Com o aumento da temperatura, não haverá mais a deposição de metal.

A temperatura de cerca de 40 °C obtém-se um cromo com alta dureza, porém frágil com uma rede pronunciada de fissuras. Com uma temperatura de cerca de 20 °C obtém-se um cromo queimado, isto é, uma camada de flocos e partículas com alta dureza, porém soltas, que podem estar sujeitas a tensões internas excessivas se desprendem do metal base durante a eletrodeposição, confome tabela 1. (CHEIK, 2010).

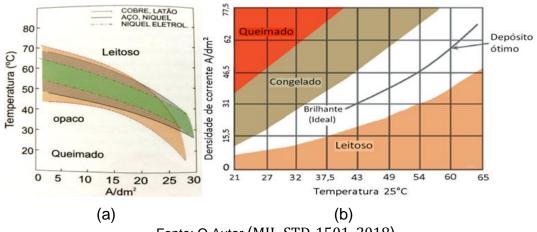
Tabela 1 - Característica do depósito de cromo

Temperatura (°C)	Característica do depósito
20	Cromo queimado por uma camada de flocos e partículas durissímas, porem soltas, que por tensões internas excessivas se desprendem do material - base durante a eletrodeposição.
40	Cromo duríssimo, porem quebradiço com uma rede bastante pronunciada de fissuras.
55	É um dos pontos críticos de deposição do cromo.
65	Cromo leitoso, mole, que possibilita um polimento posterior.
Acima de 65	Não ocorre a deposição do metal.

Fonte: Adaptado pelo Autor (MIL-STD-1501, 2018).

Como a temperatura, também a densidade de corrente influi decisivamente sobre as propriedades da camada depositada. Na figura 8 observa-se um ponto em comum, à temperatura de 55°C, utilizando-se diferentes densidades de corrente obtendo-se também a mesma dureza de camada. Para a densidade de corrente vale o inverso já dito sobre a temperatura, com densidades de corrente demasiadamente elevadas obtém se o cromo duríssimo queimado. E com densidade de corrente demasiadamente baixas cessa a deposição de cromo (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013). A figura 8 (a) mostra que para diferentes materiais temos os intervalos de deposição de camadas de cromo duro, liso e brilhante. Isto provavelmente porque, como vemos na teoria da decomposição, há uma influência dos íons do metal base sobre o mecanismo de deposição. Verificou-se que a densidade da corrente e a temperatura têm influência destacada sobre a dureza, tensões internas e outras propriedades da camada. Se a dureza, em princípio, independe praticamente da espessura da camada, as tensões internas aumentam com a mesma. A figura 8 (b) mostra uma região denominada brilhante que é a região de deposito ótimo, respeitanto os parâmetros ideais de temperatura e A/dm².

Figura 8 (a) - A influência da temperatura sobre a aparência das camadas em função da temperatura e densidade de corrente A/dm². 8 (b) - A influência do metal base sobre a aparência das camadas em função da temperatura e densidade de corrente A/dm², área de depsósito ótimo.



Fonte: O Autor (MIL-STD-1501, 2018).

Os parâmetros ideais de temperatura e A/dm² devem ser consideradas cuidadosamente, uma vez que existe o perigo das trincas existentes na camada de cromo duro servirem como ponto de partida para trincas no metal base (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013). A resistência à abrasão do revestimento não é proporcional à dureza e costuma apresentar um ponto ótimo a cerca 1000 HV.

Como essa resistência á abrasão do revestimento não sendo proporcional à dureza, coincide diretamente a aparência brilhante do cromo para a grande maioria das aplicações industriais. Deve-se para isto, todavia, levar em consideração a espessura da camada; pois camadas muito grossas de "cromo brilhante" apresentariam tensões internas proibitivas, que até com um impacto leve a camada de cromo se estilhaçaria.

Características da camada em relação a propriedades:

- A faixa de dureza é de 65 á 68 HRC 850 -1000 HV em média;
- Dureza obtida com baixa temperatura (média de 55 °C);
- Não introduz tensão ou empenamento na peça;
- A composição e controle do banho são os fatores que influenciam na dureza obtida;
- A espessura da camada n\u00e3o exerce influ\u00e9ncia sobre a dureza do cromo duro; resist\u00e9ncia a temperaturas at\u00e9 300 \u00f3C;

 Ensaios tem demonstrado que um aço revestido com cromo duro, resiste ao desgaste entre 5 (cinco) a 8 (oito) vezes mais que o aço sem cromo;

Com seu baixo coeficiente de atrito o cromo depositado tem baixo poder aglutinante e umedecedor, por isso é repelente a pinturas e óleos. (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013).

Devido ao baixo poder de nivelação do banho de cromo duro e a grande variação das propriedades físicas do depósito com a variação da densidade da corrente, a cromação dura exige uma obtenção de revestimentos uniformes em toda a superfície a ser cromada.

O mais importante é a utilização de anodos auxiliares, para termos um acompanhamento conforme a geometria da peça, para se obter um revestimento mais uniforme na superfície.

Como os anodos normalmente são de chumbo, para permitir a reoxidação do cromo trivalente e hexavalente, precisa ter seções relativamente grandes para permitir a passagem da corrente elétrica necessária mostrada na figura 9.



Figura 9 - Exemplos típicos de anodos auxiliares.

Fonte: O Autor (Cortesia Empresa)

Outra forma para conseguir uma melhor distribuição de corrente elétrica é com a utilização de anodos intermediários, estes são condutores não ligados a qualquer potencial, colocados entre o anodo e o catodo agindo como divisores de potencial, onde a ponta mais próxima no anodo torna-se catódica e a ponta próxima da peça serve como anodo (MIL-STD-1501, 2018). Existe além do baixo poder de penetração, ainda o forte problema da polarização, na prática denominado de "efeito de pontas" significa que há alta densidade de corrente nas pontas, cantos vivos,

arestas, e outros pontos protuberantes de uma peça. Existem dois meios para contornar este fenômeno de polarização, a primeira é a colocação de "ladrões" de corrente, como arames ou outros condutores ligados diretamente ao catodo.

Com este processo se mantém a densidade de corrente na peça dentro de limites admissíveis. A segunda é a utilização de blindagem, estas são isolantes, também colocados na frente destes pontos críticos com largura suficiente para desviar parcialmente as linhas de força (MIL-STD-1501, 2018); (SAE AMS 2440, 2013).

O poder de penetração é conforme procedimento interno que a empresa se resguarda o direito de sigilo industrial, que através de ensaios determinou-se um padrão a ser seguido e o banho não é sensível a interrupções de corrente elétrica. Para fins de proteção contra corrosão, a camada depositada tem um aspecto opaco, cinzento mole, mas altamente densa, sendo muito utilizada para algumas aplicações. No caso de camadas espessas encontram-se dificuldades devido à possível formação de fissuras (MIL-STD-1501, 2018); (SAE AMS 2440, 2013).

A aderência do cromo ao metal base não é tão eficaz como nos banhos convencionais, a capacidade do revestimento em resistir ao arrancamento quando solicitado em tração, é normalmente denominado de aderência. A aderência consiste, por definição, na adesão entre as partículas e o substrato e a coesão entre as partículas das várias camadas sobrepostas. Portanto, pode-se afirmar que as propriedades físicas e o comportamento mecânico de um revestimento aspergido dependem da: aderência entre as lamelas e o substrato, da resistência coesiva entre as lamelas, do tamanho e morfologia dos poros, da presença de trincas e da microestrutura das lamelas. Na análise da aderência do revestimento normalmente considera três mecanismos, de acordo com a natureza das forças atuantes: mecânica, difusão e adesiva. A aderência é, portanto, uma combinação destes três mecanismos.

No instante do impacto das partículas aquecidas e aceleradas contra o substrato, essas se achatam em uma forma lenticular, esfriam-se rapidamente e ancoram mecanicamente, por intermédio de forças mecânicas, nas irregularidades da superfície, como mostra o esquema da figura 9. (FREITAS, 2015).

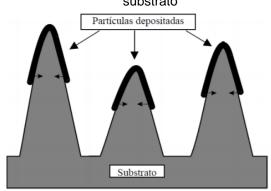


Figura 9 - Mostra a Esquema do ancoramento mecânico das partículas na superfície rugosa do substrato

Fonte: O Autor. (FREITAS, 2015).

3.4 Ensaio de Líquido Penetrante (LP)

O ensaio por LP é um processo não destrutivo de detecção de descontinuidades que surgem à superfície nos materiais sólidos (metálicos, cerâmicos e polímeros) e não porosos ou com uma superfície não muito grosseira. Trata-se, portanto, de um ensaio superficial de inspeção indireta já que utiliza um penetrante que se introduz nos defeitos superficiais, no qual após a aplicação de um revelador, este revela de uma forma clara, esses defeitos (fissuras, poros). O método LP é desenvolvido em larga escala na indústria após a segunda guerra mundial, devido à necessidade de encontrar um controle válido e alternativo ao ensaio por partículas magnéticas, no qual este ensaio requer materiais ferromagnéticos, (SAE AMS 2440, 2013).

O método de ensaio por LP consiste na aplicação de um líquido (penetrante) com características especiais (molhantes) sobre a superfície da peça que deve estar devidamente limpa e seca, para que deste modo o líquido, após algum tempo penetre nas descontinuidades presentes na peça.

De seguida o excesso de líquido é removido para que se possa aplicar sobre a superfície um produto chamado revelador. Por sua vez este revelador irá absorver o líquido que ficou retido nas descontinuidades.

A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície, que será avaliada de acordo com a norma utilizada na fabricação da peça ou material.

3.5 Processo de Retificação

A retificação é caracterizada como um processo de usinagem por abrasão em que a ferramenta (rebolo) atua sobre a peça, por ser utilizada para a obtenção de melhores tolerâncias dimensionais e geométricas com bons acabamentos superficiais, é considerada uma operação de precisão e, geralmente, é o processo final de usinagem de uma peça. O processo de retificação é largamente empregado nas indústrias, geralmente em peças que oferecem um corte contínuo, um problema pouco estudado, são geometrias de peças que proporcionem corte interrompido, como é o caso, por exemplo, da retificação de um eixo que possua um rasgo de chaveta, este tipo de corte é usualmente estudado em processos convencionais como torneamento (DINIZ; GOMES; BRAGHINI JUNIOR, 2005).

Embora a retificação necessite de boa refrigeração em função da grande quantidade de calor gerado durante o processo (MALKIN, 1989), é possível realizar os testes com MQL pelo fato de o corte ser intermitente, o qual proporciona um período de arrefecimento no momento em que não há o acoplamento rebolo/peça, o aço escolhido para o trabalho foi o AISI 4340, pois é de grande uso industrial, para a produção de componentes mecânicos que recebem esforços dinâmicos.

Um estudo mais detalhado do assunto merece atenção, a fim de estabelecer quais são os melhores parâmetros e condições para a operação em questão. A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças que necessitam de elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica. Ocorre através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta e a peça a ser retificada, é o processo que visa solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a sequência de fabricação, embora seja um dos processos que apresentam menor domínio tecnológico (OLIVEIRA, 1998).

O processo de retificação é de bastante complexidade, uma vez que este apresenta muitas variáveis envolvidas, e estas são muito sensíveis a pequenas alterações.

A retificação confere à peça o acabamento final, minimizando as rugosidades e irregularidades superficiais através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça a ser retificada com mostra a figura 10.

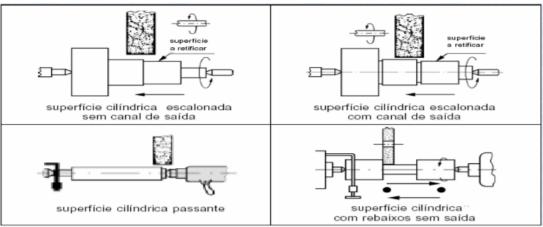
Elemento abrasivo Cavaco
Rebarba
Peça

Figura 10 - Interação entre os grãos abrasivos de uma ferramenta e a peça a ser retificada.

Fonte: O Autor (STEMMER, 1992),

A retificação, segundo STEMMER, (1992) enquadra-se como processo de usinagem com ferramenta (rebolo) com a parte cortante de geometria indefinida, na figura 11 é apresentadas algumas formas de retificação.

Figura 11 - Tipos de Retificação.



Fonte: Adaptado de (STEMMER, 1992),

3.6 O Aço AISI 4340

No aço AISI 4340 os principais componentes adicionados são o cromo, o níquel e o molibdênio, além de 0,4% de carbono (SILVA; MEI, 1988, p. 264). Sua composição química para aplicação aeroespacial é determinada pelas normas (AMS 6414K., 2007) e (AMS 6415S, 2007), com última revisão em 2007, veja a tabela 3. A porcentagem de ferro na liga deve completar os 100%.

Tabela 2 - Concentração dos elementos químicos no aço AISI 4340 segundo as normas AMS 6414K e 6415S

Normas	Elemento	Carbono	Manganês	Sílicio	Fósforo	Enxofre	Cromo	Níquel	Molibdênio	Cobre
AMS 6414	Máximo (%)	0,38	0,65	0,15	-	-	0,70	1,65	0,20	-
	Mínimo (%)	0,43	0,90	0,35	0,01	0,01	0,90	2,00	0,30	0,35
AMS 6415	Máximo (%)	0,38	0,65	0,15	-	-	0,70	1,65	0,20	-
	Mínimo (%)	0,43	0,85	0,35	0,03	0,03	0,90	2,00	0,30	0,35

Fonte: Adaptado pelo Autor (COSTA, 2013).

Segundo a tabela 3, a diferença básica entre os aços produzidos segundo as normas AMS6414K e AMS 6415S pode ser observada nas concentrações máximas de fósforo e enxofre, que são menores na norma AMS 6414K devido à diferença nos processos de fabricação de cada norma. Na norma AMS 6415S a liga metálica é produzida conforme processos convencionais de fundição. Já na norma AMS 6414K,

a liga é refinada pelo processo VAR (*vacuum arc refining*) garantindo a qualidade aeronáutica. A aplicação aeronáutica inclui eixos, atuadores e cilindros.

4 MATERIAIS E MÉTODO

Todo o aço AISI 4340 utilizado neste estudo foi cedido pela empresa Aéronautica. Os corpos de prova para os ensaios sofreram tratamento térmicos antes da sua confecção seguindo a sequência do processo de fabricação da luva direção, nas condições reais de produção, conforme a figura 12.

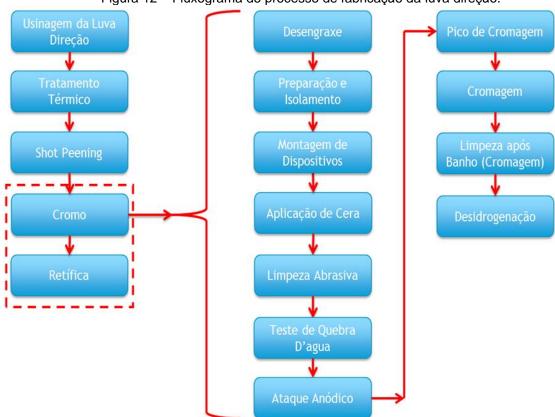


Figura 12 – Fluxograma do processo de fabricação da luva direção.

Fonte: O Autor

4.1 Tratamentos térmicos

Após análise química e aceitação do material, o lote adquirido de aço comercial AISI 4340 composto por uma barra com diâmetro de 2 polegadas e 3 metros de comprimento foram seccionados em barras menores com 25 cm de comprimento, as quais foram submetidas a tratamento térmico de têmpera -

revenido, envolvendo as seguintes etapas: aquecimento a 830 °C por 45 minutos, seguido de tempera em óleo a temperatura ambiente a 45 °C, e posterior revenimento em dois ciclos de 4 horas cada a 230 °C com resfriamento ao ar.

Os CDP's foram submetidos junto com a luva direção ao processo de austenitização a uma temperatura de 830 °C com patamar por 45 minutos, logo após foi temperado em óleo (Voluta "C") e revenimento duplo a 230 °C por duas horas cada.

4.2 Deposição de cromo duro

A camada de cromo duro foi produzida em um banho por eletrodeposição a partir de uma solução contendo trióxido de cromo e um catalisador de ácido sulfúrico em proporção adequada. A eletrodeposição de cromo duro foi realizada em uma solução contendo 250 g.L⁻¹ de ácido crômico e 2,5 g.L⁻¹ de ácido sulfúrico. A densidade de corrente foi de 31 A/dm² a 46 A/dm², com velocidade de deposição de 20 mm/h a 30 mm/h, em uma temperatura de 50 °C a 55 °C, conforme as normas (SAE AMS-QQ-C-320, 2018); (SAE AMS 2440, 2013). Para Nascimento, Torres e Voorwald (1999), o processo ocorreu em aproximadamente em 5,5 horas.

Após as análises foi realizada a variação no processo de eletrodeposição a temperatura de 53 °C e a dureza de 940 HV para 860 HV, com a utilização do catalisador ácido sulfúrico a 18,3% de eficiência.

4.3 Ensaios realizados

As análises realizadas foram: metalografia, medições de microdureza, ensaio de tração, ensaios de aderência do cromo duro.

4.3.1 Metalografia

Os ensaios por microscopia óptica foram realizados no laboratório da empresa aéronautica, temos o microscópio Nikon EPIPHOT 200. As etapas para preparação das amostras para microdureza e microscopia óptica foram as seguintes: corte embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. As amostras

foram embutidas em baquelite de base epóxi para a proteção das bordas dos revestimentos. O lixamento do material base teve a seguinte sequência de granulometria: 100, 220, 320, 400, 600, 1.000 e 1.200.

O polimento foi realizado em uma politriz automática da marca Polipan, o ataque químico Nital 2% (98% álcool etílico e 2% ácido nítrico) durante 10 segundos, é realizado somente para revelar ou realçar detalhes da microestrutura. Após a realização do ataque químico, a amostra foi lavada com água destilada por um período de 2 minutos.

4.3.2 Ensaio de microdureza Vickers

Os modelos de revestimento, embutidos em baquelite, foram analisados pelo ensaio de microdureza Vickers utilizando durômetro Marca Shimadzu, modelo HMV.

Conforme procedimento interno que a empresa se resguarda o direito de sigilo industrial medições foram realizadas para cada um dos modelos, utilizando uma carga de 500 gf, em diferentes pontos do revestimento. Foram realizados ensaios de microindentação (HV), para os materiais como recebidos, com carga de 500 gf aplicada durante 15s.

Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM E 384. Os CDP's de aderência são utilizados para verificação da dureza do revestimento, que é no mínimo 850 HV (ASTM E 140 – 07, 2007).

4.3.3 Ensaio de Tração

Os corpos de prova foram fabricados segundo as MIL-HBK-5. Os parâmetros de ensaios foram estabelecidos segundo procedimentos internos que a empresa se resguarda do sigilo industrial, porém foi determinada a média dos resultados do ensaio de tração do aço AISI 4340.

4.3.4 Líquido Penetrante

Tabela 3 – Etapas da realização do ensaio de Líquido Penetrante.

Tabela 3 – Etapas da realização do ensalo de Líquido Penetrante.						
Etapas de realização do ensaio.	Resumo da sequência do ensaio					
Preparação da	Consiste na avaliação da superfície a examinar,					
superfície a ser	pois o sucesso do método depende dos defeitos					
examinada	estarem abertos à superfície.					
oxammada .	obtatom abortos a supernois.					
Limpeza da superfície	A superfície a examinar deve ser bem limpa, normalmente utiliza-se um solvente para este efeito.					
Aplicação do	Consiste na aplicação de um líquido chamado					
penetrante	penetrante, geralmente de cor vermelha ou					
	fluorescente, para que toda a área de interesse					
	seja coberta, formando um filme sobre a mesma.					
Remoção do excesso	Após o tempo de penetração o líquido em					
de penetrador	excesso deve ser removido da superfície.					
p						
Aplicação do	Consiste na aplicação de um filme uniforme de					
revelador	um material revelador sobre a superfície da peça.					
	·					
Avaliação ou inspeção	A avaliação deve ser feita em boas condições de					
das indicações	luminosidade, podendo esta ser feita com luz					
produzidas	natural (branca), luz ultravioleta ("luz negra").					
Limpeza após o	É necessário limpar completamente a superfície					
ensaio	da peça, para remover todos os resíduos das					
	etapas anteriores.					

Fonte: O Autor

4.3.5 Descrição do procedimento

O ensaio por LP quando é requerido contratualmente deve ser realizado um procedimento do ensaio de acordo com a norma associada ou de acordo com as especificações do cliente. A inspeção deve ser realizada por um técnico certificado (nível 1 ou superior), sendo que é necessário um técnico de nível 2 que aprove o respetivo ensaio.

4.3.6 Limpeza Inicial

A limpeza inicial deve ser realizada de duas formas: limpeza mecânica e química. A limpeza mecânica consiste na remoção de escórias, óxidos entre outros, através de lixas, discos abrasivos e escovagem. A limpeza química consiste em remover gorduras, óleos, pinturas, que possam interferir com a entrada do líquido nas imperfeições. Esta limpeza deverá decorrer através de um agente de limpeza químico (solvente).

4.3.7 Aplicação do Líquido Penetrante

O Líquido penetrante pode ser aplicado por spray, por derrame, por imersão ou por pintura, sendo que este normalmente é de cor vermelha ou fluorescente. A temperatura de aplicação deve situar-se entre os 10°C e os 50°C, para minimizar a humidade nas descontinuidades da peça. Quanto ao tempo de penetração deve situar-se entre os 5 os 60 minutos. Este tempo deve ser estabelecido tendo em conta: o material a ensaiar, tipo de descontinuidade, recomendações do fabricante e temperatura da peça.

4.3.8 Remoção do Excesso de Penetrante

A remoção do excesso de penetrante pode ser realizada através de solventes ou água, esta deve ser realizada sempre com o maior cuidado, para que o penetrante não seja removido das descontinuidades. Nos penetrantes fluorescentes é necessário comprovar, com luz ultravioleta se a superfície da peça está completamente isenta de penetrantes.

4.3.9 Aplicação do Talco Revelador

O talco revelador pode ser seco ou húmido e deve ser aplicado uniformemente, este deve ser aplicado logo após a remoção do excesso de penetrante. O papel do revelador é puxar o penetrante do interior da descontinuidade para a superfície, ficando este devidamente visível. Também promove um fundo (branco) de contraste quando se usa o sistema visível. Existem

alguns tipos de reveladores: pós-secos, de suspensão em água, de base solvente e solvente em água. Quanto ao tempo de revelação este deve situar-se entre 10 a 30 minutos.

4.3.10 Inspeção e Aplicação

A inspeção final deve ser realizada depois de decorrido o tempo de revelação acima indicado, normalmente esta é realizada com um acompanhamento de uma luz natural ou luz branca, com uma iluminação não inferior a 500lx ou luz negra. Pelas suas características básicas e simplicidade o ensaio por líquidos penetrantes é um dos mais utilizados pela indústria quando comparado com outros ensaios não destrutivos. Este se trata de um ensaio economicamente satisfatório na revelação de defeitos superficiais. Estes podem ser aplicados durante o processo de fabricação ou como manutenção, que por sua vez podem ser aplicados numa grande variedade de produtos, metálicos e não metálicos, forjados, fundidos, cerâmicos de alta densidade, sendo que estes não devem ser porosos (SAE AMS 2440, 2013). O ensaio por líquidos penetrantes pode ser utilizado para avaliar vários tipos de componentes, sejam eles complexos pequenos ou muito grandes. Algumas aplicações comprovadas para ensaios de líquidos penetrantes são:

- Na inspeção de blocos hidraulicos.
- Na inspeção de eixos.
- Na inspeção de atuadores.
- Na inspeção de cilindros.
- Na inspeção de componentes de trem de pouso.
- Na inspeção da luva direção.

O método LP apresenta algumas limitações, como a impossibilidade de avaliar descontinuidades no interior do material em estudo. O ensaio não apresenta resultados viáveis se a superfície do material for rugosa. As descontinuidades detetadas por este ensaio normalmente não são possíveis de dimensionar a sua profundidade (SAE AMS 2440, 2013).

4.3.11 Ensaio de Aderência ao cromo

Os ensaios de aderência foram realizados nos mesmos CDP's utilizados para medições de microdureza. Para os ensaios de aderência os CDP's foram desmagnetizados.

A desmagnetização foi feita no próprio tanque de revestimento de cromo, onde se inverteu a polaridade conhecida como o ataque anódico em uma amperagem de mais ou menos 12 A por CDP's.

Após a desmagnetização, foi iniciado o processo de deposição de cromo a 20 A para cada CDP's produzindo uma camada de pelo menos 50 µm.

Antes do ensaio é necessário realizar a desidrogenação que foi feito a 190°C por 4 horas no forno de atmosfera controlada.

Ao término do processo de cromagem retira-se os CDP's que serão aparados para as dimensões padrão.

Com auxílio do dispositivo de dobra realiza-se o dobramento a 90º, e verifica a região do raio externo, se não ocorreu o desplacamento da camada de cromo, o lote deste processo esta aprovado.

Caso o CDP's apresente desplacamento, o produto dever ser descromado, e iniciar todo o processo de eletrodeposição novamente e com novos CDP's.

O ensaio de aderência foi feita por dobramento dos CDP's com um ângulo de dobramento de 90º em um dispositivo, mostrado na figura 13, a inspeção é feita com lupa a uma ampliação de 10X.

A avaliação foi realizada observando a região do raio externo (tracionado) pela presença ou não de desplacamento da camada.

Figura 13 - Mostra a esquema do dispositivo mecânico para realizar a dobra dos CDP's a 90°



Fonte: O Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaios no aço AISI 4340

São apresentados os resultados obtidos nos ensaios, as discussões baseadas nestes e nas referências já comentadas no capítulo do objetivo e da revisão bibliográfica. Após toda a parte experimental, os dados analisados na sequência com o objetivo de correlacionar os resultados dos diferentes ensaios no aço AISI 4340.

Todos os parâmetros dos CDP's controlados pelo laboratório da empresa mostraram-se dentro do esperado conforme as especificações em comparação com os valores registrados na empresa ao longo do tempo, garantindo a representatividade do material em relação a todos os lotes produzidos até então. Além dos parâmetros da matéria prima controlada e dentro das especificações é preciso garantir que as variáveis dos processos tambem estejam estáveis para todos os CDP's.

As análises realizadas foram: microestrutura, medições de microdureza, ensaio de tração, ensaios de aderência do cromo duro.

5.1.1 Tratamentos Térmicos

Os CDP's do aço AISI 4340 foram tratadas termicamente para obtenção da microestrutura martensítica, submetida a tratamento de tempera e revenido (aquecimento a 830 °C durante 45 minutos e resfriamento brusco em óleo, seguido de revenido a 230 °C por 45 minutos, sendo resfriados ao ar).

Portanto, a utilização do aço AISI 4340 é interessante quando o mesmo é submetido ao tratamento da têmpera, devido à sua alta temperabilidade, que aumentará a resistência mecânica do mesmo, combinado ao tratamento do revenimento, que reduzirá sua dureza, resultando numa boa correlação entre resistência mecânica e tenacidade à fratura, que pode ser comprometida pela presença do hidrogênio, que aumenta ainda mais as tensões internas, causando a fragilização devido à redução da tenacidade à fratura.

Após o tratamento térmico de tempera e revenido, foi verificada em todas as barras uma dureza variando entre 50,5 e 53 HRC a partir de medidas longitudinais e transversais nos CDP's.

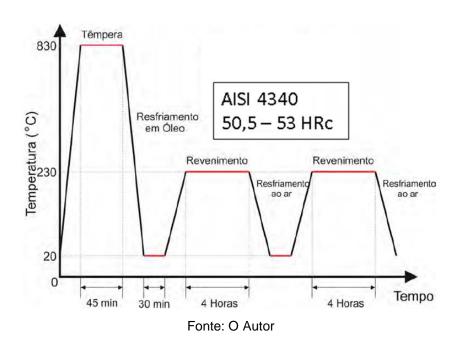


Figura 14 - Representação esquemática do tratamento térmico do aço AISI 4340

5.1.2 Microestrutura

A microestrutura do CDP's após o tratamento térmico de tempera e revenido devera ser constituida de matriz martensita revenida.

Os ensaios por microscopia óptica mostraram que, após tratamento térmico de têmpera e revenido, para a obtenção das durezas de 50,5 HRC e 53 HRC.

O aço AISI 4340 apresentou uma microestrutura de martensita revenida, e importante ressaltar que a martensita possui uma resistência mecânica e dureza muito maior que a perlita, sendo, portanto, mais frágil.

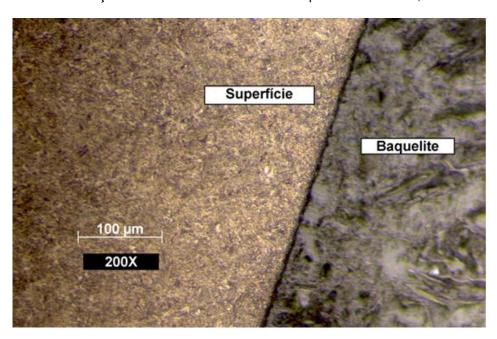
Trata-se de martensita revenida conforme comparação com a ASM Handbook v.7, figura 15, 16, 17 em conformidade a microestrutura esperada para o tratamento térmico de têmpera seguida de duplo revenimento, aplicado aos CDP's do aço AISI 4340.



Figura 15 - Microestrutura do aço AISI 4340 temperados e revenido: Martensita revenida. – 1.000X. Ataque Nital 2% (ASM Handbook v. 7).

Fonte: O Autor

Figura 16- Mostra o Aço AISI 4340 tratado termicamente para dureza de 50,5 HRC e 53 HRC.



Microestrutura (a) Superfície

Fonte: O Autor

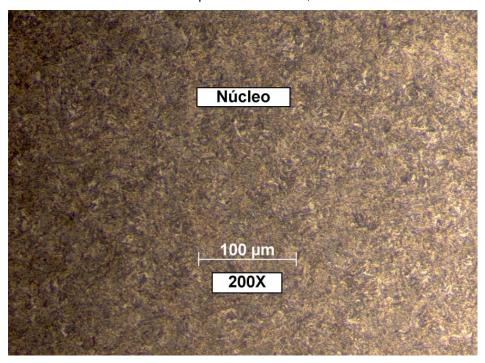


Figura 17 - Mostra (b) Núcleo de Microestrutura constituída de martensita revenida Aço AISI 4340 tratado termicamente para dureza de 50,5 HRC e 53 HRC.

Microestrutura (b) Núcleo

Fonte: O Autor

A microestrutura mostrada na figura 16 (a) superfície e a figura 17 (b) núcleo apresenta uma superfície sem deformações comparadas à figura 15 (AMS Handbook v.7), após tratamento térmico. Tendo a martensita uma fase metaestável composta por ferro que está supersaturada com carbono e que é o produto de uma transformação sem difusão (atérmica) da austenita. A dureza da martensita depende do teor de carbono e dos elementos de liga do aço, sendo que um maior teor de carbono resultará em uma martensita de maior dureza. A martensita, no estado póstêmpera, praticamente nunca é utilizada, sendo necessária a aplicação de um tratamento térmico posterior à têmpera.

O resultado da dureza em estado temperado e revenido foram de 50 a 53 HRC, o que caracteriza conformidade com as especificações, com relação ao ensaio de microdureza para determinação de contaminação superficial, ou seja, descarbonetação e/ou enriquecimento.

5.1.3 Propriedades mecânicas

Os ensaios de corpos de provas, foram analisados comparativamente quanto à dureza, após o tratamento térmico e resistência à tração do aço AISI 4340.

Os resultados dos ensaios mecânicos após tratamentos témicos se encontram na tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Aço AISI 4340 após tratamentos térmico

Propriedades Mecânicas Após Tratamentos Térmicos	Valores
Limite de resistência à tração	1.790 a 1.930 Mpa
Limite de escoamento	≥ 10%
Limite de elasticidade 0,2 %	1490% minimo
Redução de área	≥ 30%
Dureza	50,5 a 53,0 HRc

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados dos ensaios mecânicos após tratamentos témicos se encontram na tabela 5.

Tabela 5 – Médias dos resultados do Ensaio de Tração do Aço AISI 4340.

Propriedades Mecânicas Após Tratamentos Térmicos	Amostra 1	Amostra 2	
Propriedades Mecânicas	Valores		
Tensão Máxima	1825 MPa	1823 MPa	
Tensão de Escoamento 0,2 %	1510 MPa	1504 MPa	
Alongamento	11,62%	11,42%	

Fonte: O Autor

Os resultados da tabela 5 têm as médias dos valores encontrados nos ensaios de tração, conforme citado no item 4.3.3 os valores e parâmetros deste ensaio estão estabelecidos nos procedimentos internos que a empresa se resguarda do sigilo industrial, porém foi determinada a média dos resultados do ensaio de tração mecânica do aço AISI 4340.

5.1.4 Ensaio de microdureza no cromo

A camada de cromo duro foi analisada após ter sido realizado um corte transversal no CDP's e as medidas foram realizados ao longo da seção transfersal, tendo a parte escura que é o baquelite, seguida da camada de cromo duro e por fim o metal base, ao realizar a medição no microscópio encontrada a dimensão da camada de cromo em 50 µm, estes CDP's acompanharam a luva direção no processo de eletrodeposição de cromo, que com resultado de 50 µm de espessura e microdureza de 860 HV conforme mostra figura 18.

→ Baquelite

50 µm → Camada de Cromo Duro

→ Metal Base AISI 4340

Figura 18 - Foto mostra a espessura de camada de cromo depositado no metal base estudado.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Eliminou-se os problemas de trincamentos ocasionados pelo processo de retífica de peças cromadas pela aplicação dos parâmetros adequados de temperatura e densidade de corrente, resultando em valor de dureza superficial que não sofre danos durante os processos de retífica.

5.1.5 Ensaio de Aderência

O ensaio de aderência foi realizado após a finalização do processo de cromagem, os CDP's são fixados em dispositivo realizado à dobra de 90º e verificado a um aumento de 10 x.

A região do raio externo conforme a figura 19, nem a cromagem nem qualquer desplacamento deve mostrar a separação do metal base ou um do outro em sua interface conforme a figura 20.

Quando submetida ao teste de aderência, este teste deve ser realizado a cada lote fabricado junto ao produto luva direção.

Figura 19 – CDP Dobrado a 90º sem desplacamento da camada de cromo do aço AISI 4340.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 20 – CDP rompido após o dobrado a 90º com desplacamento da camada de cromo do aço AISI 4340.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Pode ser notado que na figura 20 próximo o rompimento o desplacamento da camada de cromo devido a termos uma variação no processo de cromoagem e em sua composição microtrincas, e com esforço do ensaio de dobramento ocorreu inclusive à separação em duas partes do CDP.

Após esta analise de dobramento, foi verificado em todas as fases do processo e foi constada a variação na temperatura do banho, afetando a cromação.

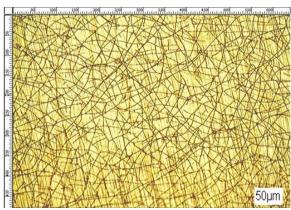
Acertado os parâmetros do banho e refeito o ensaio de aderência e o resultado obtido ficou conforme a figura 19, sem desplacamento após o dobramento a 90°.

E essas microtrincas podem se propagar e transferir para o metal base no produto final.

5.1.6 Avaliação das microtrincas no cromo

A superfície da placa de cromo da peça deve ser gravada anódicamente durante 30 segundos a uma densidade de corrente de 15 a 31 A/dm² na solução. A placa de cromo deve ser inspecionada sob ampliação de 100x usando um microscópio óptico para certificar que as microfissuras sejam reveladas. O processo de gravação deve ser repetido até que as microtrincas da placa de cromo são reveladas, depois disso, placa de cromo deve ser inspecionada microscopicamente (ampliação de 100x ou superior). O posicionamento das duas imagens deve estar distantes 180° uma da outra, e as aferições devem ser realizadas ao menos em três posições diferentes, ou seja, borda direita, centro e borda esquerda da placa de cromo. Para cada imagem, três medições diferentes de microfissuras ocupado. Foi utilizada técnicas de metalografia quantitativa (por análise de imagens),para avaliar as microtrincas presentes na figura 21. As linhas finas e pretas representam as microtrincas com uma faixa de 500 a 700 microtrincas conforme figura 21.

Figura 21 – Mostra o padrão de microtrincas de uma superfície de placa de cromo com mais de 700 microtrincas por cm. Ampliação da imagem 100x.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Valores abaixo de 700, mas acima de 500 microfissuras ou microtrincas por centímetros podem ser aceitáveis, valores menores que 500 microfissuras

por centímetros provavelmente não aumentarão a drenagem do fluido hidráulico, devido a possíveis vazamentos, pois quanto mais microfissuras, melhor é a superfície, pois fica mais fechada a camada.

5.1.7 Ensaio por Líquido Penetrante

O ensaio de líquido penetrante foi realizado sobre a região da luva direção isenta de trincas após cromo, e isenta de trinca após retífica de cromo, com a melhoria do processo alterando a relação de dureza x temperatura x densidade da corrente elétrica.

No produto luva direção foram realizados vários ensaios de líquido penetrante ao longo de um período, detectou-se as trincas, começou-se a realizar uma investigação para que fosse possível verificar as origens das trincas, na imagem (a), apresenta trinca causadas pelo impacto na montagem térmica, na imagem (b, c, d), tem-se alterações relacionadas a amperagem e na imagem (e), a variação se deu pela alteração da temperaturta. Com isso foi possível realizar fabricação, cromação após retífica, conforme a figura 22.

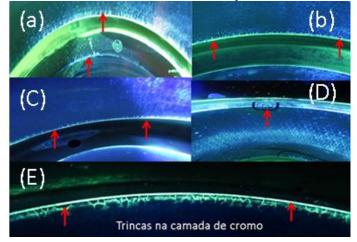


Figura 22 - Trinca na camada de cromo do aço AISI 4340 luva direção.

Fonte: Adaptado pelo Autor

Como o processo de retifica é realizado após a eletrodeposição de cromo, e se a camada ficar com a espessura maior que a especificada, podem ocorrer marcas de rebolo na superfície conforme mostrado na figura 23.

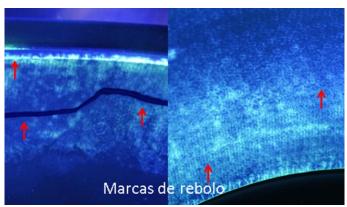


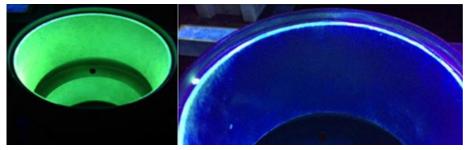
Figura 23 - Marcas, trincas e trepidações de retífica na camada de cromo do aço AISI 4340 luva direção.

Fonte: Adaptado pelo Autor

Com os resultados dos ensaios foram fixada nova relações entre a dureza, temperatura e densidade da corrente elétrica, que tem grande influência nos parâmetros de processo da deposição de cromo.

Padronizado o processo de retífica após a eletrodeposição de cromo, a figura 24 (a), mostra isenção de trinca e a figura 24 (b), mostra isenção de marcas de retífica de rebolo na superfície.

Figura 24 - Cromo Duro: Região isenta de trincas pós-cromo e pós-retífica do cromo em função da dureza da temperatura e densidade de corrente.



(a) Pós-cromo (b) Pós-retífica Fonte: Elaboradoo pelo Autor

5.1.8 Ensaio de Dureza Vickers x Temperatura

Analisou-se a relação de dureza e temperatura do banho com a mesma densidade do banho para que consequentemente ocorra à diminuição da dureza.

Realizou-se uma alteração no processo quanto à relação de dureza x temperatura x densidade da corrente elétrica, onde se aumentada à temperatura e diminuida a densidade terão uma camada de cromo depositada com menor dureza.

Ao reduzir a temperatura e aumentar a densidade da corrente elétrica, tem-se uma camada de cromo depositada com maior dureza. O processo de análise mostra que com a relação de dureza x temperatura x densidade da corrente elétrica, aumentando a temperatura de 53 °C para 58 °C tem-se uma redução de dureza de 940 HV para 860 HV.

Mantendo em média a mesma densidade de corrente elétrica e a dureza especificada que é de 850 HV, que a densidade de corrente pode variar em uma faixa de 39 A/dm² a 46 A/dm², no caso da luva direção utilizou-se 42 A/dm².

Elimina-se a trinca no revestimento de cromo após retífica, conforme figura 24 e consequentemente tem-se um processo onde à trinca em aço AISI 4340 submetido á retífica da camada de cromo foi eliminada através da relação dos parâmetros atingidos de dureza x temperatura x densidade da corrente elétrica. Entre as variáveis do processo, a densidade de corrente foi de 40 A/dm² com os problemas de trincamento detectados no revestimento cromado, a dureza do cromo foi reduzida de 940 HV para 860 HV.

As relações dos parâmetos acima analisados são apresentadas na figura 25.

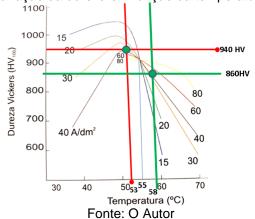


Figura 25 - Cromo Duro: Variação da dureza em função da temperatura e densidade de corrente.

Com estes parâmetros, o que realmente ocorre é a redução da densidade de corrente com a temperatura e o que aumenta é a taxa de reação nas áreas catódica e anódica.

Com os problemas detectados de trincas no revestimento de cromo, foi realizada a redução da dureza de cromo como mostra a figura 25.

6 CONCLUSÃO

As análises feitas neste estudo da propagação da trinca no aço AISI 4340 submetido a processo de cromação, seguida por retífica mostraram a possibilidade de otimizar os parâmetros do processamento como temperatura, densidade da corrente, concentração do banho nas características da camada de cromo como redução da espessura e o nível da dureza.

A preparação e a caracterização do processo de cromação ao realizar a eletrodeposição são de importantes para obter um resultado satisfatório, isento de trincas na camada de cromo, com a redução da dureza de 940 HV para 860 HV.

Com os ensaios realizados observou-se a redução da não conformidade no revestimento de cromo isolando área do anodo com desvios de geometria, com uma distribuição uniforme, atingindo uma redução de tempo de banho em 40%.

Com a redução de dureza de 940 HV para 860 HV e mantendo em média a mesma densidade de corrente elétrica a dureza obtida que é de 850 HV.

A densidade de corrente pode variar em uma faixa de 39 A/dm² a 46 A/dm² e no caso da luva direção se utiliza 42 A/dm² para obter-se a dureza esperada.

Eliminou-se as trincas no revestimento de cromo após retífica, consequentemente tem-se um processo onde às trincas em aço AISI 4340 submetido á retífica da camada de cromo foram eliminadas através da adequação dos parâmetros, aumentando a temperatura de 53 °C para 58 °C.

7 SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

A partir dos experimentos concretizados, dos resultados obtidos e do estudo bibliográfico realizado, abrem-se possibilidades para os seguintes estudos futuros;

Pode-se realizar uma abordagem semelhante à deste trabalho para o estudo do tema em outras ligas susceptíveis, que são muitas, visando avaliar se os efeitos nestas ligas são semelhantes aos que ocorrem no aço AISI 4340 ou se apresentam muitas variações;

Avaliar a resistência à corrosão das luvas de direção estudadas neste trabalho, por meio da câmara de névoa salina;

Ensaios com aumento de área anódica e com isso aumento da área para ocorrer às reações de redução do metal, onde possivelmente ocorrera o aumento do rendimento da deposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMS 6414KK. Steel, Bars, Forgings and Tubing. 0.80Cr - 1.8Ni - 0.25Mo (0.38-0.43C) (SAE 4340). Vacuum Consumable Electrode Remelted. Warrendale: SAE International Group. 2007.

AMS 6415SS. Steel, Bars, Forgings and Tubing. 0.80Cr - 1.8Ni - 0.25Mo (0.38 – 0.43C) (SAE 4340). Warrendale: SAE International Group, 2007.

ASTM E140 – 07. Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, and scleroscope hardness. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

BONORA, R. G. Influência do tratamento Superficial 3IP na vida em fadiga do aço ABNT 4340 e 15-5 PH para aplicação Aéronáutica. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratingueta, 2015.

CALLISTER, W. D. **Uma Introdução a Ciências dos Materiais.** Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. p. 365.

CAMARGO, J. A. M. A influência do shot peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050 – T 7451 de uso aeronáutico. 2007. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

CARVALHO, A. L. M., Comportamento Mecânico das Ligas de Alumínio 7010-T74 e 7050-T7451 de Aplicação Aeronáutica. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 1999.

COSTA, G. B. Influência da hidrogenação sobre a microestrutura e magnetização de saturação do aço AISI 4340 (AMS 6414K e AMS 6415S). 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campinas, Campinas 2013.

CHEIK, R. C. **Estudo de uma linha de cromagem visando aumento de produtividade**. 82f. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Centro Universitário La Salle, Canoas, 2010.

DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. 3th. ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 1988.

DINIZ, A. E.; GOMES, D. M.; BRAGHINI JUNIOR, A. Corte. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 159, p. 240–248, 2005.

FREITAS, Bruno Cavalcante. Estudo das propriedades microestruturais de ligas de níquel-cromo e cobalto-cromo obtidas pelo processo de metalização a arco elétrico. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2015.

GODEFROID, L.B. **Propagação de trinca por fadiga sob carregamento com amplitude constante e variável em ligas de alumínio para a indústria aeronáutica.** 1993. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

GUIMARÃES, A.V. **Estudo de deformação a frio**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 1994.

ITAL, T. C. Processo de enriquecimento de nitrogênio e seu efeito namicroestrutura e dureza do aço inoxidável 15-5 PH. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

JAKAB.P. L. Wood to Metal: The Structural Origins of the Modern Airplane. **Journal of Aircraft**, v. 36, n. 6, p. 914-918,1999.

MALKIN, S. Grinding Technology: Theory and Aplications of Machining with Abrasives. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1989.

MILLER .K.J. Materials Science Perspective of Metal Fatigue Resistance. **Materials Science and Technology**, v. 9, p. 453-462., 1993.

MIL-STD-1501 Chromium Plating, Low Embrittlement, Electro-Deposition, 2018.

NASCIMENTO, M. P.; TORRES, M. A. S.; VOORWALD, H. J. C. Microtrincas em cromo duro. Efeitos nas resistências à fadiga e corrosão do aço de uso aeronáutico – ABNT 4340. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGINIERIA MECANICA,

CIDIM 99, 4., Santiago. **Anais...** Santiago: Univ. Santiago de Chile, 1999. v. 1, p. 1–7.

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação.** São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica; Laboratório de Máquinas Ferramentas Universidade de São Paulo, 1998.

SAE AMS-QQ-C-320. Recobrimento de cromo duro. Empresa aéronautica **Standards.** São Paulo: Associação Brasileira de tratamentos de Superfícies, 2018.

SAE AMS 2440:2007 (R2013) Inspection Of Ground, Chromium Plated Steel Parts, 2013.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

SOUZA, R.C.; VOORWALD, H.J.C.; CIOFFI, M.O.H. Fatigue strength of HVOF sprayed Cr3C2–25NiCr and WC-10Ni on AISI 4340 steel. **Surface & Coating Technology**, v.203, p.191-198, 2008.

STEMMER, C. Ferramentas de corte I e II. Florianópolis: EdUFSC, 1992.

TORRES, M. A. S.; VOORWALD, H. J. C. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 24, p. 877-886, 2002.

VOORWALD, H. J. C. et al. Evaluation of WC-17Co and WC-10Co-4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and corrosion strength of AISI 4340 steel. **Surface and Coatings Technology**, v.190, n. 2, p.155-164, 2005.