

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PPGE3M

ANDERSON MAREK DA SILVA

**DESEMPENHO DE FERRAMENTA PARA CALIBRAÇÃO A FRIO TRATADA
SUPERFICIALMENTE**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PPGE3M

ANDERSON MAREK DA SILVA

**DESEMPENHO DE FERRAMENTA PARA CALIBRAÇÃO A FRIO TRATADA
SUPERFICIALMENTE**

Dissertação submetida ao Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Minas – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha.

Porto Alegre

2018

BANCA EXAMINADORA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski

Prof. Dr. Miguel Afonso Flach

Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha esposa Fabiane e minha filha Fernanda, por ter estado ao meu lado e compreendido meu empenho constante, principalmente nos últimos meses.

Ao professor Dr. Alexandre da Silva Rocha devo meus agradecimentos pela confiança e orientação prestada.

Agradeço a todos os colegas de laboratório, em especial, ao colega Msc. Rodrigo Afonso Hatwig pelas discussões técnicas que muito enriqueceram este trabalho e contribuíram para minha formação.

Agradeço a toda equipe da divisão de Forjados de Precisão da GKN do Brasil, Unidade de Charqueadas, pelo incentivo e apoio nos testes realizados em área industrial proporcionando o avanço em meus estudos durante o mestrado.

Ao LTDM, à UFRGS.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	5
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Futuro da Manufatura.....	14
2.2 Tribologia.....	16
2.3 Mecanismos de desgaste	17
2.4 Nitretação Gasosa.....	21
2.5 Revestimentos de ferramentas por PVD	26
2.6 Revestimento Dúplex	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Materiais	31
3.2 Método.....	32
3.3 Experimentos industriais	34
3.4 Caracterização do Material.....	36
3.4.1 Composição Química.....	36
3.4.2 Caracterização das Superfícies.....	36
3.4.3 Análise de Dureza	36
3.4.4 Análise Metalográfica.....	36

3.4.5	Análise Macroscópica.....	37
3.4.6	Caracterização do Desgaste	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Caracterização do Material	38
4.2	Caracterização da Superfície.....	39
4.2.1	Superfície sem Revestimento	39
4.2.2	Superfície com Nitretação Gasosa.....	39
4.2.3	Superfície com Revestimento Dúplex	41
4.3	Caracterização do Desgaste	43
4.4	Aspectos Econômicos.....	52
5	CONCLUSÕES.....	54
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
	REFERÊNCIAS.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for testing and Materials
C_N	Concentração atômica de nitrogênio na superfície do átomo
CP	Corpo de Prova
CVD	Chemical Vapor Deposition
D_N	Coefficiente de difusão
EDM	Usinagem por descarga elétrica
HRC	Dureza Rockwell
HV	Dureza Vickers
I_N	Fluxo difusivo de átomos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
SAE	Society of Automotive Engineers
PVD	Physical Vapor Deposition
X	Distância da superfície

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desgaste abrasivo por riscamento (a) e por rolamento (b).	18
Figura 2 - Tipos de desgaste.	19
Figura 3 - Classificação do desgaste.	20
Figura 4 - Incidência de modos de falhas em matrizes de forjamento	20
Figura 5 - Representação da difusão intersticial do nitrogênio na fase ferrítica do aço (Cúbica de Corpo Centrado).	22
Figura 6 - Ilustração da formação de nitretos na camada de difusão.	22
Figura 7 - Fenômenos durante o processo de nitretação.	23
Figura 8 - Morfologia da camada nitretada	24
Figura 9 - Representação camada branca aço AISI H13. Aumento 500X, ataque Nital 3%.	25
Figura 10 - Morfologia da camada nitretada para aço carbono.	25
Figura 11 - Referência para o teste de adesão.	27
Figura 12 - Defeitos de adesão de filmes revestidos	28
Figura 13 - Representação do efeito casca de gelo fina.	28
Figura 14 - Representação do revestimento sem suporte na camada.	29
Figura 15 - Representação de um substrato com revestimento Dúplex	29
Figura 16 - Esquema do gradiente de dureza e o revestimento.	30
Figura 17 - Tipos de falhas em revestimentos.	30
Figura 18 - Ferramenta de conformação.	31
Figura 19 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa	32
Figura 20 - Processo de nitretação gasosa utilizado.	33
Figura 21 - Regiões de medição do diâmetro da esfera.	35
Figura 22 - Desenho esquemático do fluxo de Calibração a Frio.	35
Figura 23 - Microestrutura do aço AISI H13, 500X, ataque químico: Nital 3%.	39
Figura 24 - Zona de difusão, 500X, ataque químico: Nital 3%.	40
Figura 25 - Perfil de dureza na camada nitretada	40
Figura 26 - AISI H13 + Revestimento Dúplex, 500x, ataque químico: Nital 3%.	41
Figura 27 - Perfil de Microdureza em regiões distintas do segmento.	42
Figura 28 - Resultado do teste de adesão conforme Norma VDI 3198.	42

Figura 29 - Condições de desgaste.	43
Figura 30 - Ferramenta com aço AISI H13 sem revestimento no final de sua vida útil.	43
Figura 31 - Marcas de usinagem e trincas na região do raio	44
Figura 32 - Detalhamento da região da trinca	44
Figura 33 - Dimensional do forjado na região do diâmetro da esfera superior.	45
Figura 34 - Ferramenta com Nitretação Gasosa no final de sua vida útil	46
Figura 35 - Deslocamento da camada nitretada na região do raio.	46
Figura 36 - Ampliação (50X) do desgaste da ferramenta sem nitretação.	47
Figura 37 - Ampliação (50X) do desgaste da ferramenta com nitretação gasosa	47
Figura 38 - Ferramenta com revestimento Dúplex	48
Figura 39 - Região de iniciação das trincas.	48
Figura 40 - Fratura por fadiga.	49
Figura 41 - Trincas na região da fratura	49
Figura 42 - Região do segmento não fraturado	50
Figura 43 - Visão global da origem do desgaste	50
Figura 44 - Evidência do desgaste	51
Figura 45 - Dimensional do forjado com revestimento Dúplex	51
Figura 46 - Comparativo da vida útil atingida das ferramentas.	52
Figura 47 - Comparativo entre o custo final das ferramentas.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conceitos de como enfrentar a crise no mercado financeiro.....	14
Tabela 2 - Condição fornecida pelo fabricante do revestimento Dúplex.	33
Tabela 3 - Composição química.	38
Tabela 4 - Estudo comparativo para análise de desvio padrão.....	53

RESUMO

Título: DESEMPENHO DE FERRAMENTA PARA CALIBRAÇÃO A FRIO TRATADA SUPERFICIALMENTE

Este trabalho apresenta um estudo relacionado a três estados de superfície aplicados em um substrato de aço ferramenta AISI H13 temperado e revenido utilizado no processo de calibração a frio para a fabricação de forjados de precisão, os quais posteriormente processados transformam-se em componentes de um semieixo homocinético. O foco deste trabalho foi demonstrar através da aplicação de tratamentos de superfície o aumento do desempenho em termos de resistência ao desgaste na interface da superfície da ferramenta em análise e também correlacionar com o seu custo benefício do produto final, visto que o critério para avaliação de vida útil depende diretamente do dimensional final do forjado. Para a comparação e o teste industrial foram estipuladas três condições diferentes de superfície para serem avaliadas. A primeira sem revestimento, a segunda com modificação superficial pelo processo de nitretação gasosa e a terceira com revestimento Dúplex PVD a base de CrTiN. A caracterização das amostras foram realizadas com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura, análises metalográficas de microestrutura e dureza. A partir dos resultados obtidos foi constatado que o revestimento Dúplex aplicado em ferramentas para calibração a frio apresentou o melhor desempenho em relação às outras duas condições propostas. O revestimento Dúplex obteve um ganho de 400% em vida útil de ferramentas correlacionado a melhor resistência ao desgaste e, além disso, uma melhor performance em seu comportamento dimensional perante ao processo aplicado. Como segunda alternativa, as ferramentas com o processo de nitretação gasosa atingiram uma redução de 17% nos custos de ferramentas por peças produzidas e acréscimo de 20% em vida útil de ferramentas, apresentando uma melhora em relação as ferramentas sem tratamento de superfície.

Palavras-chave: Forjamento, Calibração a Frio; Revestimento Dúplex; Tratamento de superfície.

ABSTRACT

Title: PERFORMANCE OF A SURFACE TREATED FORGING TOOL FOR COLD CALIBRATION.

This work presents a study related to three surface states applied on a quenching and tempered AISI H13 tool steel substrate used in the cold calibration process for the manufacture of precision forgings, which are subsequently processed into components of a halfshafts. This dissertation aims at demonstrating, through the application of surface treatments, the increase in the wear resistance performance of the tool under analysis and correlating this with cost benefit in the final product, since the end life criterion for the tools depends directly on the dimensions of the forged part. For comparison and industrial testing three different surface conditions were stipulated for evaluation. The first uncoated, the second with surface modification by the gas nitriding process and the third with PVD duplex coating based on CrTiN. The characterization of the samples was carried out with Optical and Scanning Electron Microscopy, Metallographic Analysis of the Microstructure and Hardness Tests. According with obtained results it was verified that the treatment duplex coating applied in tools for cold calibration presented the best performance in relation to the other two conditions proposed. The duplex coating obtained a gain of 400% in tool life correlated to better resistance to wear and, in addition, a better performance in its dimensional behavior in relation to the previous condition without surface treatment. As a second alternative, the tools treated by the gas nitriding process achieved a 17% reduction in tooling costs per parts produced and a 20% increase in tool life, showing an improvement over tools without surface treatment.

Keywords: Forging, Cold Calibration; Duplex coating; Surface treatment.

1. INTRODUÇÃO

Um dos processos de conformação mecânica mais utilizados para a manufatura na indústria automotiva é o processo de calibração a frio em forjamento de precisão. O processo a frio apresenta algumas vantagens em relação ao forjamento à quente como a alta precisão dimensional e a redução de desperdícios de materiais em etapas de fabricação posteriores. A necessidade de redução de custos e o aumento da produtividade dentro das organizações, aliada a pouca disponibilidade de recursos para investimento gera a necessidade do emprego de técnicas simples e de baixo custo que atuem no sentido de eliminar os desperdícios, otimizar processos e aumentar a produção. Segundo SCHULER (1998), o custo-eficácia dos processos de conformação a frio depende em grande parte dos custos das ferramentas e, conseqüentemente, da vida útil das matrizes.

Este estudo foi realizado em parceria com uma empresa do ramo automotivo onde seu principal produto é o semieixo homocinético. Para a comparação e o teste industrial foram estipuladas três condições diferentes de superfície para serem avaliadas conforme as características abaixo:

- 1 - Aço AISI H13 temperado e triplo revenido e usinagem a duro;
- 2 - Aço AISI H13 temperado e triplo revenido e usinagem a duro + nitretação gasosa;
- 3 - Aço AISI H13 temperado e triplo revenido e usinagem a duro + nitretação a vácuo + revestimento a base de CrTiN.

Dentro deste contexto, analisou-se o desempenho de uma ferramenta para a calibração a frio, visto que nas três propostas a base de seu substrato em aço AISI H13 foram tratadas termicamente pelo processo de têmpera em forno convencional seguido de um triplo revenimento e posteriormente um processo de fresamento a duro para o acabamento final da ferramenta.

Como alternativas para que se obtivesse um aumento significativo na resistência ao desgaste destas ferramentas e conseqüentemente, na redução do custo final da ferramenta viabilizando sua aplicação, foram propostos os processos os tratamentos de superfície de nitretação gasosa e o revestimento Dúplex neste substrato já tratado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Futuro da Manufatura

Com a crise econômica e o aumento da disponibilidade de máquinas nas empresas devido à queda nas vendas, o grande foco de investimentos nas grandes indústrias no ano de 2017 foi na busca por inovação em novos processos produtivos e no desenvolvimento de novos produtos, conforme relatam os dados da pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (VOLKE, 2017). A aplicação desta nova visão de mercado, vem contribuir com a melhoria na qualidade e aumento de competição de produtos brasileiros no mercado estrangeiro, trazendo benefícios para as empresas e consumidores.

A inovação competitiva para ser bem sucedida requer bem mais do que uma simples ideia, ela exige um planejamento no qual a empresa deve desenvolver novos produtos a serem mais competitivos, visando manter e ampliar sua participação no mercado numa constante evolução. (ROZENFELD et al., 2006).

Para Paula Bezerra (2015), em seu artigo “Inovação contra a crise” publicado pela Revista ISTO É DINHEIRO, empresários de diferentes setores indústrias apresentam alguns de seus pensamentos e atitudes que tomaram para enfrentarem a crise. Na Tabela 1, pode-se ver detalhadamente:

Tabela 1 - Conceitos de como enfrentar a crise no mercado financeiro.

Nome	Cargo	Como inovar em tempos de crise
Jaime Cohen Szulc	CEO da Goodyear na América Latina	“Para o grupo de inovação eu falo: sejam loucos, inventem coisas novas”
Gilberto Braga	Professor de finanças da Ibmec-RJ.	“Aprimorar o processo faz com que a empresa tenha ganhos expressivos de inovação, sobretudo contra as concorrentes”,
Luiz Carlos Andrade Junior	Vice-Presidente da Toyota no Brasil.	Buscar novos conceitos e consumidores descolados, “Conseguimos rejuvenescer a faixa de clientes em cinco anos, de 50 para 45 anos”.

Fonte: Adaptado de Bezerra (2015).

De acordo com Esteves (2014), o grande desafio para a sobrevivência das organizações se dará pelo engajamento entre produtividade, qualidade do ambiente de trabalho, gestão de matéria-prima / ferramentas e de pessoas envolvidas no sistema de produção. A redução dos custos deve ser objetivo dos fabricantes de bens de consumo que busquem sobreviver no mercado atual (OHNO, 1997). Para atingir um melhor desempenho no chão-de-fábrica, a estratificação e a coleta de dados se torna essencial para uma análise robusta com uma identificação de causa raiz e suas devidas ações corretiva (LEAN, 2004).

Segundo Favaretto et al. (2009), nos atuais sistemas de manufatura deve-se ter atenção aos controles do ferramental. Ao mesmo tempo, busca-se minimizar os custos diretos e indiretos relacionados ao processo produtivo. A relação custo-eficácia dos processos de forjamento a frio depende em grande parte dos custos das ferramentas e, conseqüentemente, da vida útil das matrizes. O desgaste da matriz influencia a estabilidade dimensional e a qualidade da superfície das peças produzidas (SCHULER, 1998).

Para a otimização de custos de um ferramental, a escolha correta dos materiais incide diretamente na produtividade e de seu custo final. A utilização de tratamentos superficiais que visam aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste e reduzem o coeficiente de atrito são fundamentais para prolongar a vida de ferramentas (MARTINS et. al, 2010).

Segundo Monteiro (2013), os modos de falha por desgaste na indústria mundial somam um prejuízo de cerca de 4 bilhões de dólares anuais, sem contar as perdas com qualidade, disponibilidade de máquinas e penalidades por não cumprir prazos de entrega. Monteiro ressalta que outras fontes de pesquisas retratam que esta falha chega afetar em torno de 2% do PIB industrial mundial.

2.2 Tribologia

O significado da palavra tribologia é derivada de duas palavras gregas, TRIBOS que significa atrito e LOGOS que significa estudo, no que resulta no significado de “Estudo do Atrito” ou a ciência que estuda o atrito. A Tribologia é definida como a ciência e tecnologia das superfícies que interagem entre si mediante um movimento relativo”, e abrange o estudo de atrito, desgaste e lubrificação relacionando com seus aspectos físicos, mecânicos, metalúrgicos e químicos (JOST, 1990). Segundo Farias (2013), estes fenômenos sempre estiveram presentes na vida do ser humano há mais de 4000 anos.

A necessidade de aquecimento no período paleolítico (2 milhões de anos a.c), fez com que o Homo Erectus através da fricção descobrisse o fogo. Simbologias Egípcias (2400 a.c) já apresentavam práticas de lubrificação em carros que movimentavam estátuas. Leonardo da Vinci (1452-1519), embora conhecido por suas obras de artes, naquela época já trazia um vasto conhecimento de atrito e desgaste, porém somente foram anunciados 200 anos após a sua morte (HUTCHINGS, 1992).

Bhushan (2013), afirma que a necessidade de conhecimentos de fatores tribológicos são fundamentais para o desenvolvimento de várias áreas na indústria, tais como: produção de sistemas de frenagem, garras, rodas de direção em automóveis, parafusos, processos de usinagem, sistema de combustão interna de motores, sistemas de engrenagens, câmeras, rolamentos e vedações. Não somente na indústria, mas também na nossa vida cotidiana a tribologia está ligada diretamente, por exemplo: o creme de barbear utilizado como lubrificante para minimizar o atrito entre a pele e a navalha; o atrito durante a caminhada para evitar o deslizamento; as articulações do corpo precisam de lubrificantes para evitar doenças osteomusculares; a saliva para lubrificar e facilitar o transporte de alimentos e líquidos suavemente através do corpo, dentre outros.

Na tribologia, pode-se classificar o desgaste sendo o principal responsável em causar a perda gradativa de materiais e em comprometer o desempenho mecânico de inúmeros equipamentos. Em segundo lugar, o atrito como agente causador das ocorrências de desgaste e dissipação de energia. Por fim, a lubrificação das superfícies com a finalidade de exercer um controle do desgaste e reduzir o atrito presentes no tribossistema (STACHOWIAK et al., 2006).

2.3 Mecanismos de desgaste

O desgaste é considerado um dano produzido pela interação entre duas superfícies. A perda progressiva de material ocorre devido a carga e deslocamento entre interfaces em contato. Para Mendes (2009), o atrito é fator prejudicial nos processos de conformação mecânica, visto que além de um maior consumo de energia provocado pela presença de desgaste de ferramenta, aumenta a força necessária para a conformação e conseqüentemente a temperatura. No entanto, alguns processos de conformação como a laminação requerem o fator atrito em sua execução, no qual é responsável pelo movimento dos materiais entre os cilindros para que ocorra o processo (SCHAEFFER, 2005).

O atrito tem relação direta na vida de ferramentas e com a força aplicada e como consequência afeta na qualidade superficial da peça, em sua microestrutura e no fluxo de material para o preenchimento das cavidades das matrizes (BUENO, 2016).

Na conformação a frio, os mecanismos de desgastes com ferramentas são causados por cinco diferentes falhas, as quais são oriundas da alta pressão de contato e do movimento relativo entre a superfície da ferramentas e do material a ser conformado. De acordo com Podgornik et. al (2015), os principais mecanismos são:

- Desgaste abrasivo;
- Desgaste Adesivo;
- Fadiga de baixo ciclo;
- Propagação de trincas;
- Deformação plástica.

O desgaste abrasivo origina-se do movimento de materiais multifásicos com partículas duras (óxidos, carbonetos, etc.) nos quais riscam a superfície das ferramentas e resultam no desgaste. Em alguns casos, o desgaste abrasivo também pode ser provocado pelo desgaste adesivo. Para que seja alcançada uma melhor resistência ao desgaste faz-se necessário o aumento de dureza da superfície da ferramenta com a utilização de tratamentos termoquímicos ou a deposição de revestimentos (PODGORNIK et. al 2015).

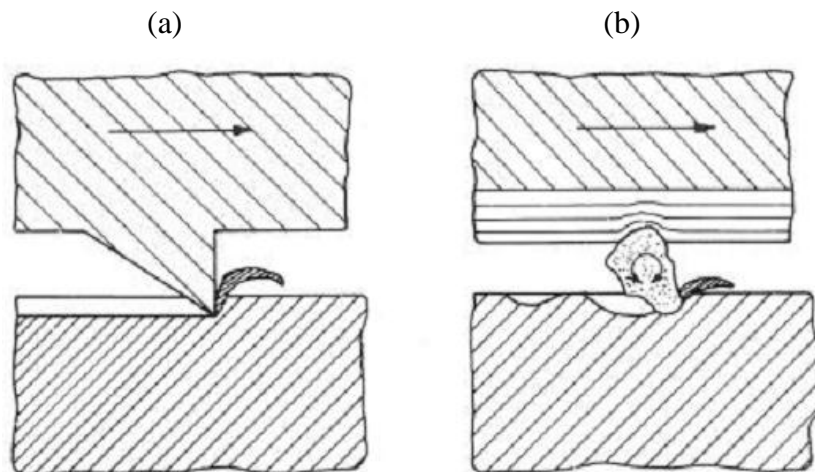
De acordo com Rooij (1998), o desgaste abrasivo é uma forma de desgaste que geralmente ocorrem nos processos de conformação de metais e, também, ressalta que

este tipo de desgaste se origina pela penetração de uma superfície dura decorrente de uma ferramenta com rugosidade elevada ou por alguma partícula em sua interface.

Segundo Hutchings (1992), uma maneira prática para definir os tipos de desgaste abrasivo é por distinção entre riscamento e rolamento. No desgaste abrasivo em riscamento (Figura 1a), formam-se riscos ou sulcos na superfície de dureza inferior (do inglês, “grooving wear”) originados pela deformação plástica provocada pelo contato com superfícies de alta dureza quando requeridas ao movimento.

Em compensação, o desgaste abrasivo por rolamento (do inglês, “rolling wear”) difere-se pela presença de partículas duras que se encontram livres na interface das superfícies em movimento, gerando na região desgastada indentações múltiplas com tamanhos variados dependendo do formato, do tamanho e da dureza das partículas abrasivas. Na figura abaixo, pode-se observar estes mecanismos com maior detalhamento.

Figura 1 - Desgaste abrasivo por riscamento (a) e por rolamento (b).

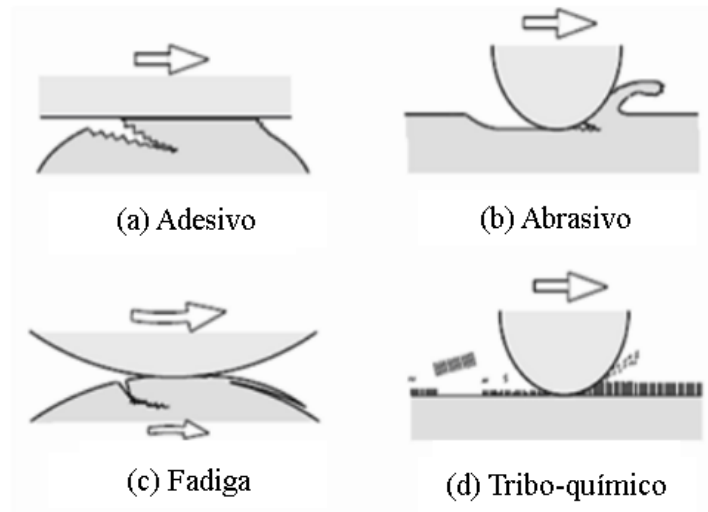


Fonte: HUTCHINGS, 1992.

O atrito e o desgaste são os fatores que influenciam diretamente no desempenho e na vida útil de ferramentas e componentes de precisão. Para facilitar estas operações, revestimentos estão entre as formas mais eficazes de eliminar este modo de falha. (OERLIKON BALZERS, 2017).

Para a Norma DIN 50320 (1979) e Kato et. al (2001), os principais mecanismos de desgaste são: Adesão, Abrasão, Fadiga Superficial e Tribo-químico (oxidação/corrosão). Na Figura 2, podem ser vistos representativamente os quatros tipos de desgaste.

Figura 2 - Tipos de desgaste.



Fonte: Adaptado de Kato (2001).

Na figura 2 (a), é representado o desgaste adesivo. Este modo de falha ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente capaz de resistir ao deslizamento. Com o resultado deste esforço, uma deformação plástica é formada na região do contato, originando uma trinca que se propaga e gera um terceiro corpo que se desprende do substrato. O desgaste abrasivo (b) origina-se da diferença do formato e dureza entre dois materiais em contato. O desgaste por Fadiga (c), pelo alto número de ciclos repetidos entre as interfaces e o desgaste Tribo-químico (d), é provocado por reações triboquímicas que produzem pequenas camadas de óxidos entre as superfícies de contato.

Segundo Budinski (1992), os modos de falha por desgaste são classificados em quatro categorias:

Abrasivo: O desgaste é originado a partir do arraste de partículas duras quando forçadas sobre uma superfície sólida.

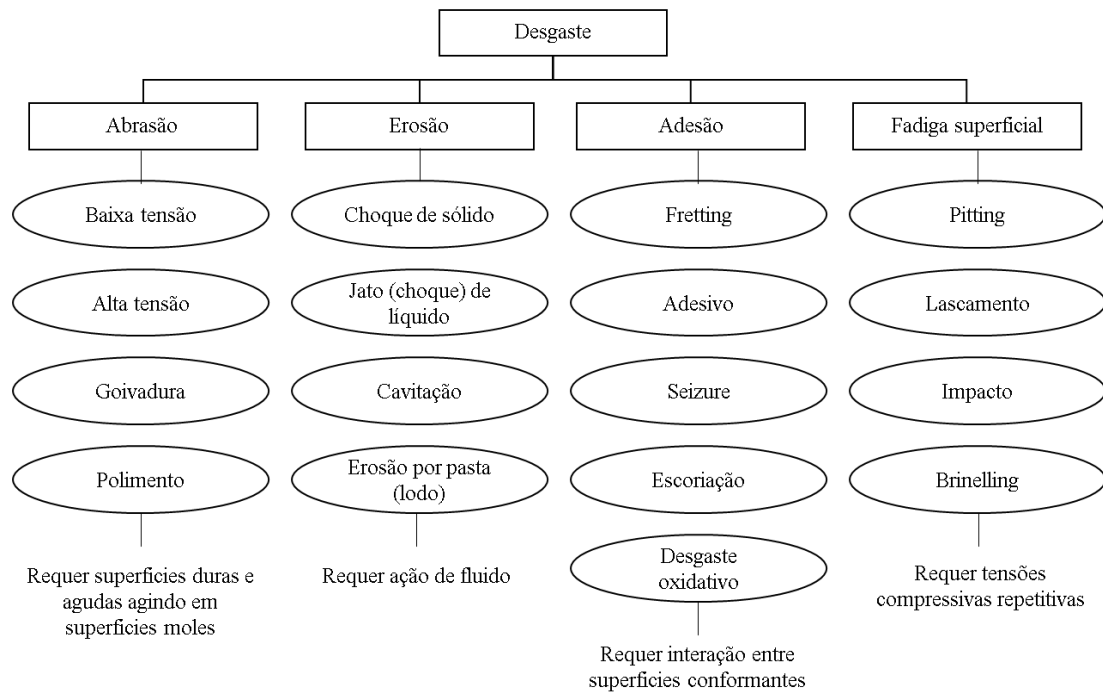
Erosivo: É resultante da perda progressiva de material a partir de uma superfície sólida quando interage com um fluido.

Adesivo: Ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Neste modo de falha, a remoção de material na superfície de contato é causada devido a uma deformação plástica.

Fadiga na superfície: Causada pelas cíclicas tensões produzidas pelo rolamento e deslizamento sobre uma superfície sólida.

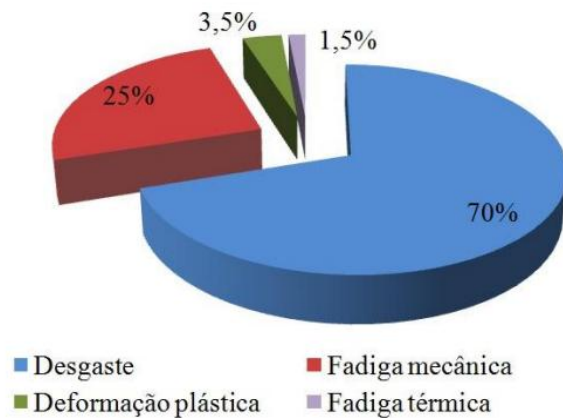
Na Figura 3, Budinski (1992) apresenta esquematicamente as divisões das categorias de desgaste. Já na Figura 4, Both (2011) apud Babu (2004) estratifica as incidências dos modos de falha em matrizes de forjamento.

Figura 3 - Classificação do desgaste.



Fonte: Budinski (1992) apud Both (2011).

Figura 4 - Incidência de modos de falhas em matrizes de forjamento



Fonte: Babu (2004) apud Both (2011).

2.4 Nitretação Gasosa

A nitretação gasosa consiste em um tratamento de endurecimento superficial por meio de tratamento termoquímico em temperaturas elevadas (entre 500 a 600°C) sob a ação de uma atmosfera rica em nitrogênio. Uma das inúmeras vantagens em utilizar a nitretação gasosa é devido a obtenção de altíssima dureza superficial na faixa de 65 HRC, alta resistência ao desgaste, melhora na vida em fadiga e na resistência a corrosão (MARTINS et. al, 2010).

Ferreira (2001), descreve que o aumento da resistência a fadiga dá-se devido ao fato de que o processo de nitretação gasosa introduz tensões residuais de compressão na superfície e também de possuir uma elevada resistência mecânica. Algumas propriedades físicas também são melhoradas como:

- Alta dureza superficial;
- Incremento da resistência ao desgaste;
- Incremento da resistência a fadiga térmica e mecânica;
- Incremento da resistência a corrosão;
- Baixa ou quase nenhuma distorção dimensional.

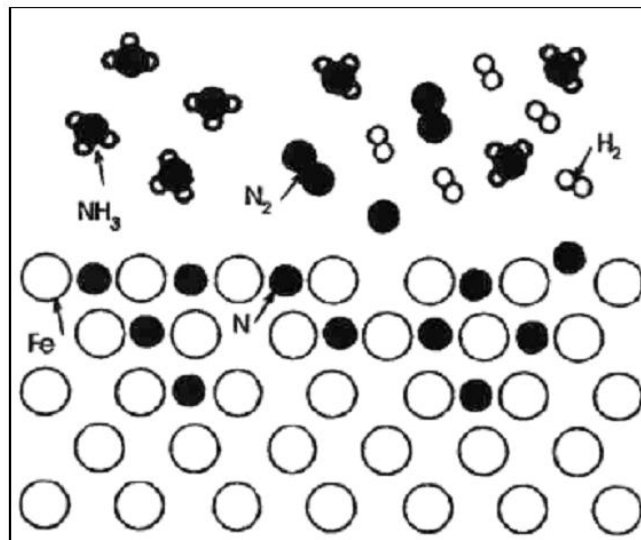
Uma das principais vantagens da nitretação em relação aos tratamentos de deposição é devido ao fato de que a camada de difusão gera um gradiente suave para a variação de dureza entre o núcleo e a periferia do material (BOTH, 2011).

De acordo com Piccilli (2009), quanto maior a temperatura no tratamento, mais profunda será a difusão de átomos de nitrogênio. Para evitar distorções e perdas de dureza no núcleo, a temperatura de processo deve ser mantida abaixo da temperatura de austenitização, usualmente na fase ferrítica do aço na faixa entre 500° até 600°C.

Melado (2011), afirma que com o aumento da temperatura na nitretação do aço ferramenta AISI H13 de 500 para 550°C favorece a precipitação de nitretos e a formação de camada branca, e conseqüentemente, o aumento significativo da espessura da camada de difusão.

Na Figura 5, pode-se verificar a origem do processo de nitretação gasosa com o início da dissociação da atmosfera de Amônia (NH_3) em um forno, na qual o nitrogênio em estado atômico é difundido e incorporado ao reticulado cristalino do metal formando nitretos de ferros a fim de endurecer a superfície.

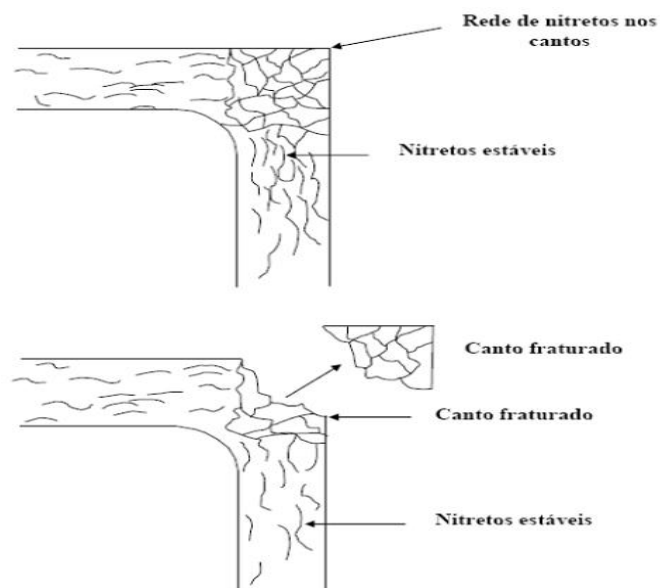
Figura 5 - Representação da difusão intersticial do nitrogênio na fase ferrítica do aço (Cúbica de Corpo Centrado).



Fonte: Adaptado de Pye (2003).

Pye (2006), descreve que apesar da nitretação ser um bom mecanismo de endurecimento superficial, o processo em altas temperaturas requer cuidados devido a formação de precipitados que causam a fragilização da camada de difusão, principalmente em regiões de canto vivo e de materiais com ligas de cromo os quais são formadores de nitretos como podemos observar na Figura 6.

Figura 6 - Ilustração da formação de nitretos na camada de difusão.



Fonte: Adaptado de Pye (2007).

Segundo Rocha (2008), para amenizar a formação de precipitados durante o processo de nitretação, o trabalho em baixas temperaturas são benéficos para aços ao Mo, como nos casos dos aços da série M (M1, M2, etc....). E também, dificultam a precipitação de nitrocarbonetos nos contornos de grãos que ocorre devido a desestabilização de carbonetos em temperaturas a partir de 500 °C.

Leandro (2005), descreve que as propriedades mecânicas adquirem um melhor resultado quando a camada de compostos apresenta somente uma fase de nitretos γ' ou ϵ ao invés de uma camada de compostos polifásica. Em relação ao desgaste, quanto maior a espessura da camada nitretada melhor será a sua resistência, no entanto, com o acréscimo da camada menor será a sua ductilidade.

Para Porter (1991, apud Diehl, 2017), a partir da representação da Primeira Lei de Fick (Equação 1), salienta que não somente a temperatura é fator determinante para a difusão de átomos de nitrogênio, mas também a concentração atômica de nitrogênio.

$$I_N = - D_N \left(\frac{\partial C_N}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Onde:

I_N = Fluxo difusivo de átomos;

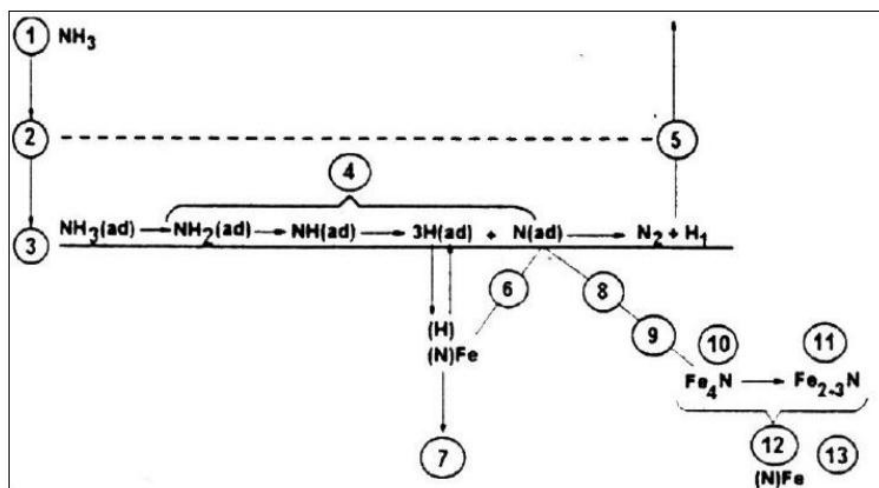
D_N = Coeficiente de difusão;

C_N = Concentração atômica de nitrogênio na superfície do átomo;

X = Distância da superfície.

De forma esquemática, Czelusniak (1994) apresenta na Figura 7, os fenômenos ocorridos na interface no aço com o gás durante a nitretação.

Figura 7 - Fenômenos durante o processo de nitretação.

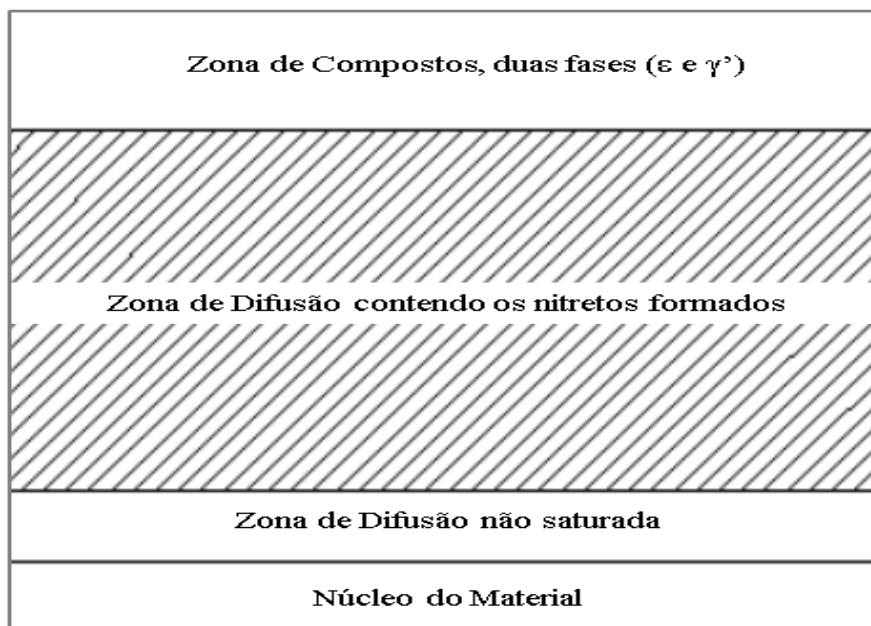


Fonte: CZELUSNIAK, 1994.

Na Figura 7, a fase 4 apresenta a quebra catalítica das moléculas de NH_3 . A formação dos constituintes da camada branca (Nitreto Gama Linha (γ') e Nitreto Épsilon (ϵ) surgem a partir das fases 10 e 11. Na fase 13, a formação da camada de difusão é obtida através da difusão do nitrogênio na interface de ferrita e precipitação de nitretos dentro do substrato do aço.

Pye (2017), descreve que um dos maiores cuidados que se deve ter com a nitretação a gás é em relação ao entendimento da preparação e limpeza da superfície a ser tratada para garantir a isenção de contaminantes durante o processo de formação da camada nitretada. Em relação a superfície da camada nitretada, Pye (2003) classifica em três regiões: a camada de compostos, a zona de difusão e a zona de difusão não saturada como apresenta a Figura 8.

Figura 8 - Morfologia da camada nitretada



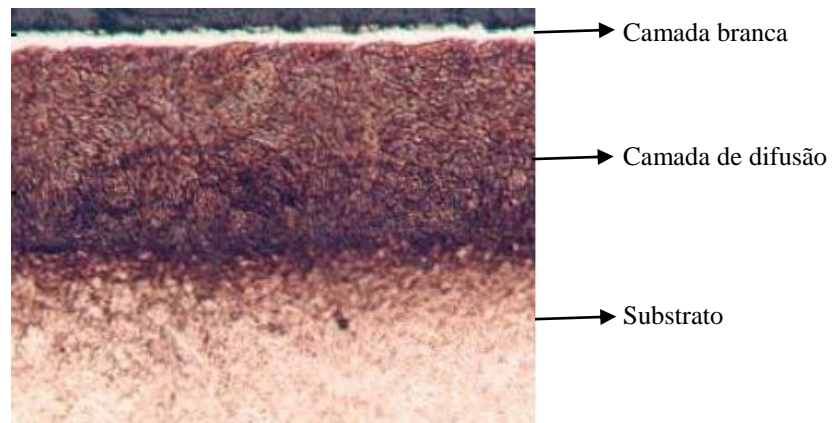
Fonte: Adaptado de Pye (2003).

Para Vendramim (2001, apud Santos, 2003), a “camada branca” comporta dois tipos de nitretos de ferro:

- Nitreto Épsilon (ϵ) – $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ – Nitreto com teor de nitrogênio superior a 8,0% em peso e configuração atômica de HC, frágil.

- Nitreto Gama Linha (γ') – Fe_4N – Nitreto com teor de nitrogênio entre 5,9 a 6,5% em peso e configuração atômica de CFC, dúctil.

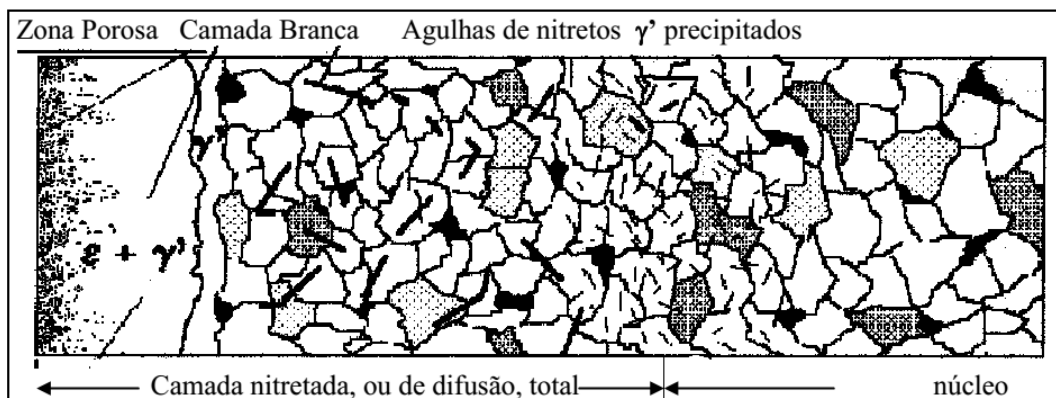
Figura 9 - Representação camada branca aço AISI H13. Aumento 500X, ataque Nital 3%.



Fonte: Adaptado de Vendramim (2017).

Para o aço H13 nitretado, o nitreto Épsilon (ϵ) e o Gama Linha (γ') podem ser encontrados tanto na camada de compostos quanto na zona de difusão junto aos precipitados de contornos de grão. Na Figura 10, podemos verificar as diferentes estruturas encontradas em um material aço ao carbono nitretado.

Figura 10 - Morfologia da camada nitretada para aço carbono.



Fonte: Adaptado de Vendramim (2017).

De acordo com a norma DIN 50190, é considerado profundidade de camada de difusão (NHT) quando se atinge de uma dureza de 50 HV 0,5 acima do núcleo do substrato conforme a equação (2):

$$\text{NHT} = \text{dureza do Núcleo (medido em HV 0,5)} + 50 \text{ HV 0,5} \quad (2)$$

Outra maneira de verificar a camada de difusão é através da microestrutura observando-se a diferença de coloração em relação ao substrato, sendo a camada

nitretada a mais escura (LOPES, 2015). Porém, este método não produz bons resultados para aços pouco ligados, devido ao baixo contraste obtido.

2.5 Revestimentos de ferramentas por PVD

No início do século XIX, o processo de PVD (Physical Vapour Deposition) foi descoberto acidentalmente por Michael Faraday ao observar em uma de suas experiências a presença de deposição de partículas na parte interna de bulbos de lâmpadas incandescentes após a explosão do filamento (DESMOND, 2014). No entanto, somente no início da década de 1960, Mattox, introduz o processo de PVD em escala industrial para modificações de superfícies de materiais. A técnica permitiu o processo de revestimento em aços ferramentas com o uso de baixas temperaturas sem perder as características metalúrgicas do substrato e sem nenhuma necessidade de um novo tratamento para a remoção de calor (LEANDRO, 2005).

Com o desenvolvimento de materiais modernos e diferentes propriedades em seus compósitos, as técnicas utilizadas na Engenharia de Superfície combinadas as diversas classes de compósitos buscaram uma melhoria em propriedades mecânicas como rigidez, força, tenacidade e resistência à fadiga. A adição de revestimentos em superfícies de ferramentas e elementos de máquina é, de certa forma, um método muito eficiente em melhorar as propriedades de fricção e resistência ao desgaste (HOGMARK et al, 2000). As razões pelo qual se aplicam revestimentos tribológicos é de se obter um aumento em vida útil de um componente e também, alcançar outras vantagens como:

- Melhor produtividade e disponibilidade de máquinas devido a melhora na resistência ao desgaste das ferramentas de corte de metal revestidas e aumento de sua vida útil.
- Redução do atrito e consumo de energia. Em alguns casos, com um atrito reduzido pode-se otimizar os estágios de resfriamento ou eliminação da lubrificação.
- Atrito aumentado ou controlado para a aplicação em sistemas de frenagem, juntas aparafusadas e conectores de segurança.

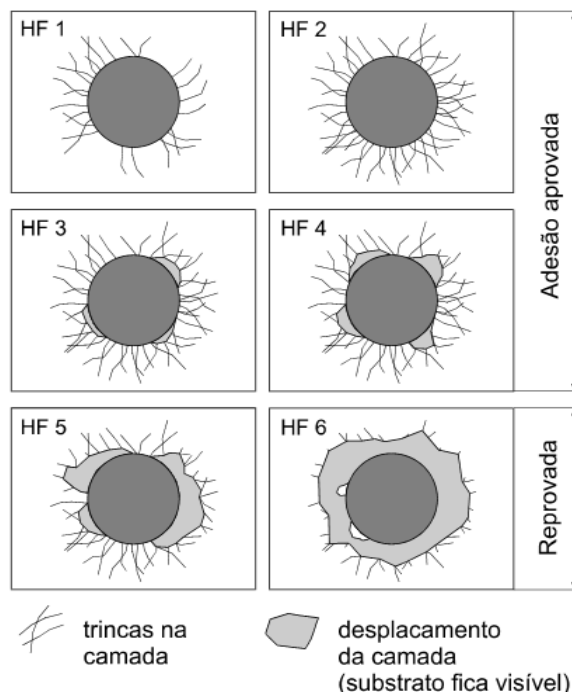
De acordo com Vencovsky (2016), os ganhos com revestimentos PVD são decorrentes de uma elevada dureza e um aumento significativo na resistência ao desgaste abrasivo de todos os tipos de ferramentas. Por apresentarem um baixo coeficiente de atrito das camadas, os revestimentos reduzem os esforços em operações de conformação de metais. Para isso, algumas características devem ser respeitadas e

estarem dentro das especificações na fase do preparo do substrato para que o revestimento consiga agregar ganhos de desempenho à ferramenta:

- Dureza – A camada revestida precisa de um bom apoio para desempenhar sua função, com isso, a dureza tem papel fundamental para garantir que a ferramenta não deforme nas condições de trabalho.
- Rugosidade baixa – Picos de rugosidade são prejudiciais a superfície da ferramenta quando submetidos a esforços tangenciais (deslizamento), ocasionando a exposição do material do substrato.
- Rebarbas de retífica – São áreas frágeis e quando se desprendem levam a camada de revestimento junto.

Para a verificação da adesão dos revestimentos pode-se utilizar a Norma VDI 3198, conhecida como “ensaios de adesão Rockwell C” (LUVISON, 2012). O objetivo do ensaio baseia-se em verificar a presença de trincas e o deslocamento da camada pelo critério comparativo utilizando a técnica de microscopia ótica a partir de um padrão estabelecido conforme a figura abaixo:

Figura 11 - Referência para o teste de adesão.

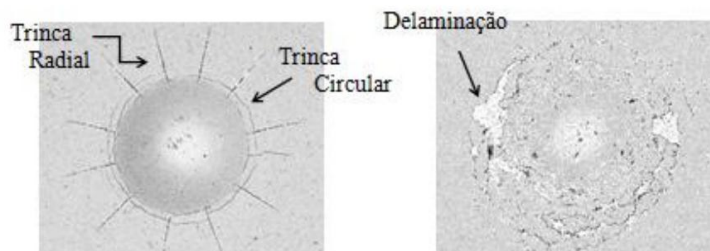


Fonte: Adaptado de Luvison (2012).

Luvison (2012), resume na figura abaixo, os três modos de falhas que podem ser analisados pelo método do ensaio Rockwell: trincas radiais, trincas circulares e

delaminação. A literatura mostra que substratos macios, isto é, com dureza baixa, beneficiam a propagação de trincas circulares nos filmes de revestimentos e em contrapartida, substratos com dureza maior favorecem a propagação de trincas radiais (KARIMI et al, 2002).

Figura 12 - Defeitos de adesão de filmes revestidos

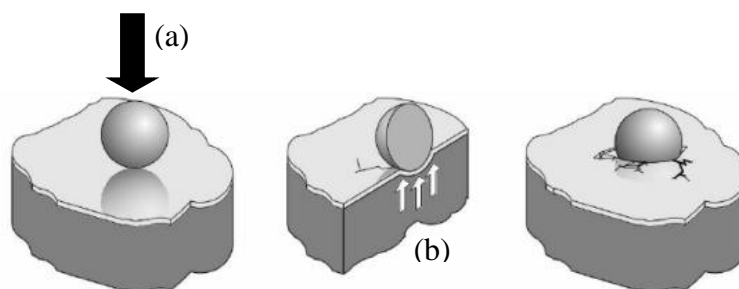


Fonte: Adaptado de Luvison (2012).

2.6 Revestimento Dúplex

Superfícies de revestimentos PVD as quais não possuem em seu substrato camadas nitretadas tendem a apresentar um baixo desempenho devido ao modo de falha chamado “*thin ice effect*” (Efeito casca de gelo fina). Quando estas superfícies revestidas com filmes de alta dureza são sujeitas a altas cargas acabam se tornando frágeis e deformando-se plasticamente ocasionando a fratura e a exposição do seu substrato (SANTOS, 2015). Na figura 13, podemos observar a ilustração deste modo de falha apresentado por Callegari (2005). Ao aplicar uma carga em uma filme duro e um substrato macio (a), o substrato cede e o filme trinca (b).

Figura 13 - Representação do efeito casca de gelo fina.

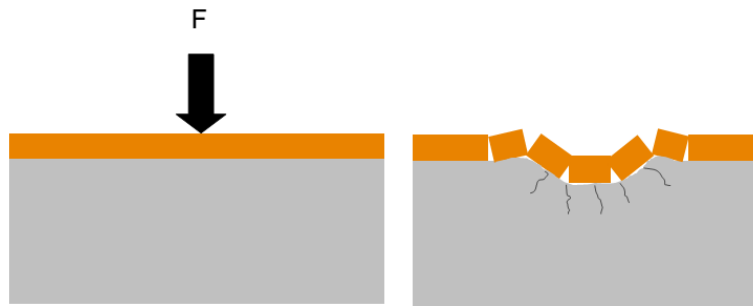


Fonte: CALLEGARI, 2005.

Devido a fragilidade destes filmes finos de revestimentos adquiridos pelo processo PVD ou CVD, para uma melhor resistência de um revestimento recomenda-se uma bom suporte mecânico, através do aumento da dureza do substrato na região

superficial. Para aços e ligas de titânio este suporte pode ser obtido através do processo de nitretação realizado anteriormente a aplicação destes filmes de revestimentos. Estes tratamentos combinados são conhecidos como “revestimentos Dúplex” (HOGMARK et al, 2000). Na Figura 14, pode-se observar a fragilidade do revestimento quando não está suportado por um substrato duro.

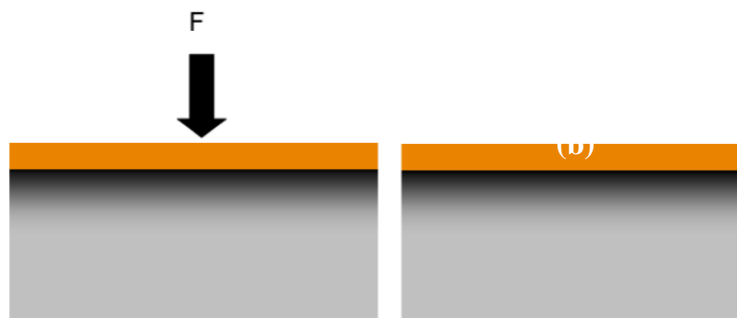
Figura 14 - Representação do revestimento sem suporte na camada.



Fonte: Adaptado de Oerlikon Balzers (2017).

Na Figura 15, a demonstração de um substrato no qual foi aplicado revestimento Dúplex (nitretação a vácuo e logo após o revestimento PVD). O filme duro (a), suportado pela camada de nitretação (b) com coloração mais escura.

Figura 15 - Representação de um substrato com revestimento Dúplex

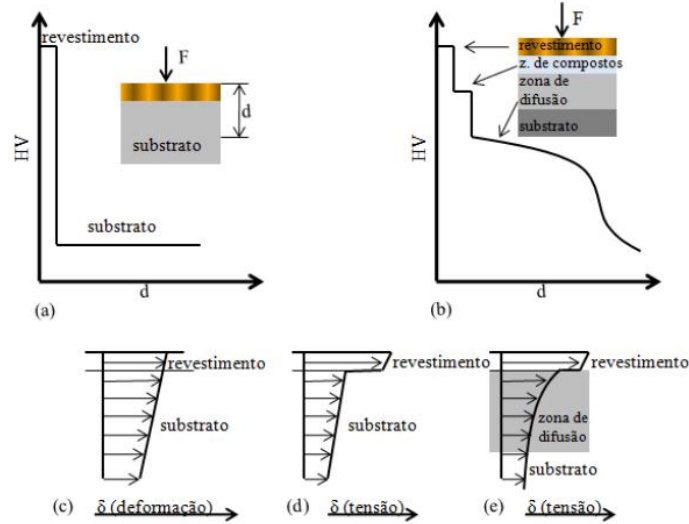


Fonte: Adaptado de Oerlikon Balzers (2017).

Na Figura 16, Froehlich (2003) apresenta o esquema relacionado ao gradiente de dureza do substrato revestido sem/com nitretação e a distribuição de tensões, visto que com a camada nitretada é estreitada a diferença entre as tensões do substrato e do revestimento, fator este correlacionado com as tensões residuais compressivas as quais reduzem as tensões aplicadas e melhoraram o desempenho em fadiga. Em (a), a distribuição de dureza no substrato depositado. Em (b), o substrato nitretado a plasma e com deposição de revestimento. Em (c), a distribuição de deformação no substrato

depositado e (d) as distribuições de tensões. Em (e), a distribuição de tensões em um substrato nitretado e revestido.

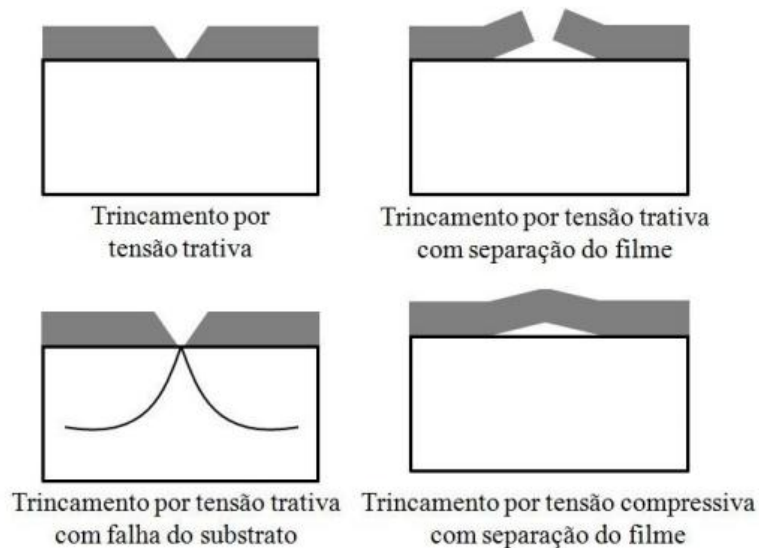
Figura 16 - Esquema do gradiente de dureza e o revestimento.



Fonte: Adaptado de Froehlich (2003).

Froehlich (2003), salienta que caso as propriedades mecânicas de dureza, magnitude de tensões residuais e resistencia adesiva entre o revestimento e o substrato não sejam alcançadas, incidirá na falha no revestimento. Na Figura 17, observa-se diferentes modos de falhas.

Figura 17 - Tipos de falhas em revestimentos.



Fonte: Adaptado de Froehlich (2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A ferramenta em análise (Figura 18), chamada de Segmento, é utilizada para o processo de calibração a frio (extrusão inversa) em forjamento de precisão e possui em seu substrato o aço AISI H13.

Figura 18 - Ferramenta de conformação.



Fonte: Autor (2018).

O processo de fabricação desta ferramenta passou pelas seguintes etapas: usinagem; tratamento térmico, retífica interna e fresamento a duro.

Na etapa de usinagem foi realizado um pré-desbaste para que a matéria-prima atingisse um sobremetal de 0.5 mm em relação dimensional final da ferramenta.

Para o tratamento térmico, utilizou-se o processo de têmpera em forno convencional com atmosfera neutra onde passaram por três patamares, sendo os dois primeiros para o aquecimento e o último para a austenitização: o primeiro patamar em temperatura de 600°C durante 30 minutos; o segundo em 900°C e o terceiro na faixa de 1015-1030°C ambos num período de 01 hora. O processo de resfriamento foi realizado em óleo com alto ponto de fulgor em uma temperatura entre 60-80°C. Logo após o processo de têmpera, o processo seguinte deu-se em três etapas de revenimento. O primeiro revenimento para alívio de tensões, revenimento da martensita revenida e os precipitados dos carbonetos na austenita retida. O segundo para revenir esta nova

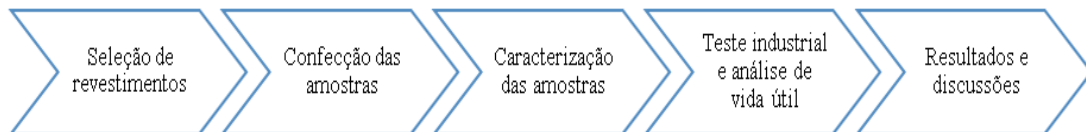
martensita e o terceiro para ajuste de dureza. Cada etapa de revenimento deu-se num período de 4-5 horas em uma faixa de temperatura de 540°C e com resfriamento ao ar até a temperatura ambiente.

Para finalizar, as etapas de retífica interna e fresamento a duro completam o processo de fabricação desta ferramenta.

3.2 Método

O trabalho foi dividido em cinco etapas, conforme Figura 19. Definido os revestimentos e tratamentos de superfície, a segunda etapa foi a construção das ferramentas. Com o teste industrial, o objetivo foi coletar dados através da avaliação do comportamento das superfícies e correlacionar com o desempenho dimensional do forjado, no qual neste caso é fator predominante para definir a vida útil da ferramenta. A partir dos resultados obtidos, a etapa final foi definir o melhor custo benefício em relação aos processos aplicados.

Figura 19 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autor (2018).

Para o desenvolvimento do estudo, foram confeccionadas três ferramentas de cada proposta de tratamento de superfície como pode-se observar nas condições abaixo:

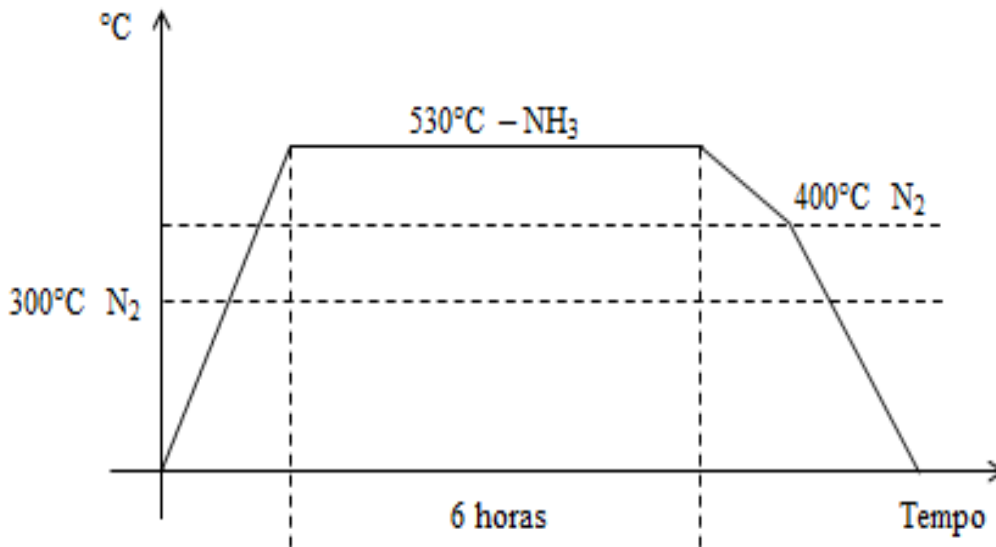
- 1 - Aço AISI H13 temperado e revenido e usinagem a duro;
- 2 - Aço AISI H13 temperado e revenido e usinagem a duro + nitretação gasosa;
- 3 - Aço AISI H13 temperado e revenido e usinagem a duro + nitretação a vácuo + revestimento a base de CrTiN.

Na primeira condição, com o tratamento superficial de têmpera e revenimento objetivando uma dureza entre 50-52 HRC.

Na segunda condição, a modificação superficial com o processo de nitretação gasosa, utilizando uma atmosfera composta de N₂ e NH₃, num patamar de 530 ° C durante um período de 6 horas com substrato temperado e revenido, conforme representa a Figura 20. Um dos motivos da escolha do processo de nitretação nesta temperatura foi devido a resultante de pequenas distorções dimensionais e a busca de

não formação de precipitação de nitretos. Esta proposta terá como benefício a melhora na resistência ao desgaste e também propõe uma condição de menor gradiente de dureza entre a camada de difusão, o núcleo e a superfície do material. Os detalhes do processo de nitretação gasosa não foram fornecidos pela empresa de tratamento térmico, no entanto foi realizada análise metalográfica da camada posteriormente ao tratamento.

Figura 20 - Processo de nitretação gasosa utilizado.



Fonte: Autor (2018).

Na terceira condição, a deposição de um revestimento Dúplex, ou seja, uma nitretação a vácuo seguida de um revestimento PVD a base de CrTiN em um substrato com dureza na faixa de 50 a 52 HRC. Na Tabela 2, pode-se verificar as características do revestimento aplicado.

Tabela 2 - Condição fornecida pelo fabricante do revestimento Dúplex.

Características do Revestimento	Especificação
Material do Revestimento	Baseado em CrTiN
Microdureza (HV 0,05)	4.200
Coefficiente de atrito a seco contra o aço	0.35
Cor	Prata- cinza claro

Fonte: Adaptado de Oerlikon Balzers (2017).

Por se tratar de um processo “Black Box”, o fornecedor do revestimento Dúplex passou de uma forma sucinta o fluxo de operações para a realização da deposição do revestimento do filme para que garantisse uma boa aderência ao filme e a não presença de defeitos: Recebimento; Inspeção de entrada; Limpeza; Polimento; Limpeza; Nitretação a baixa pressão; Polimento; Limpeza; Revestimento PVD a base de CrTiN; Polimento e Embalagem.

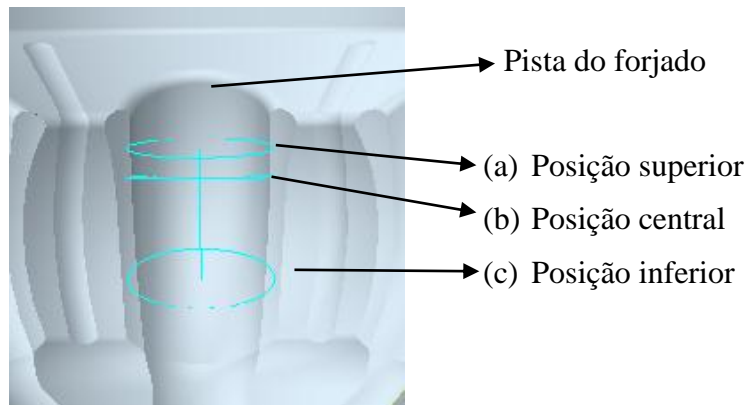
3.3 Experimentos industriais

Processo de Calibração a frio

O processo de calibração a frio foi realizado em uma prensa hidráulica da marca *FAGOR*® com capacidade de 400 toneladas. A primeira premissa para este processo foi a limpeza da superfície através de jateamento para a remoção de elementos contaminantes e um acabamento pré-determinado. A segunda foi a utilização de um fluido para conformação a frio para a lubrificação externa do forjado com aplicação via spray. Este fluido com base em ésteres, aditivos de extrema pressão do tipo inativo e antioxidante. Ambas as premissas tiveram como o objetivo a redução do atrito e o aumento da durabilidade das ferramentas. Para o processo de jateamento foi utilizado a granalha com esfera do tipo S-230. Este tipo de granalha é especificada pela norma SAE J-827, rev. Jul./05 (SINTO, 2012). O óleo lubrificante com características de viscosidade de 68 mm²/seg. a uma temperatura de 40°C, densidade de 0,942 entre 4-20 °C e ponto de fulgor de 160°C o mínimo.

Para a avaliação do desempenho da vida útil da ferramenta e o comportamento do desgaste abrasivo em relação a superfície da ferramenta foi adotado o critério do dimensional do forjado após a calibração à frio. O equipamento utilizado para a medição do forjado foi um tridimensional da marca ZEISS CONTURA SELECT com precisão de medição de 1µm. As tolerâncias dimensionais de processo referente a cota em análise (diâmetro da esfera) foram de ± 0.1 mm. Na Figura 21, pode-se verificar as três regiões distintas onde são realizadas as varreduras do diâmetro da esfera nas 6 pistas compostas no forjado de precisão, sendo que a região avaliada neste trabalho foi a posição superior (a).

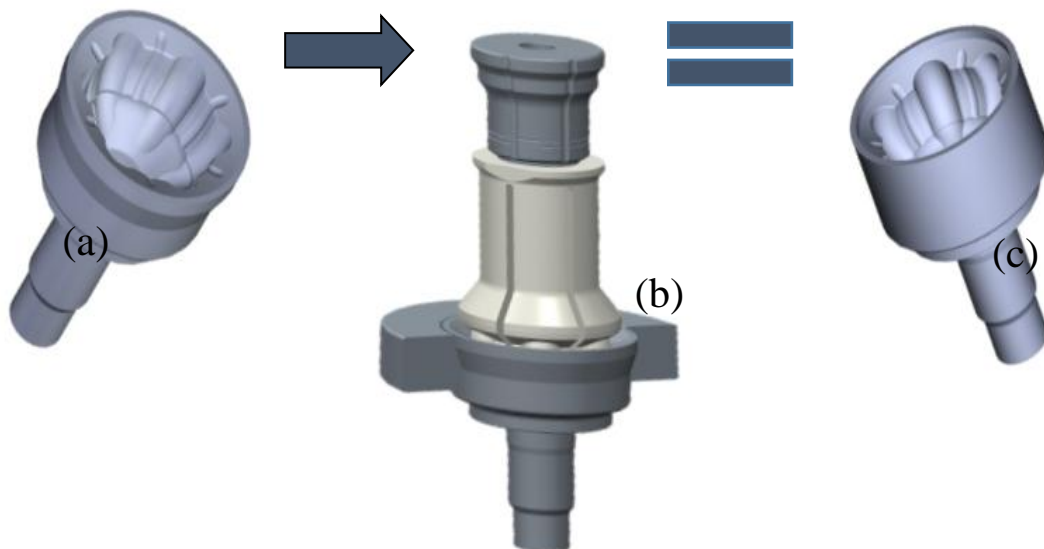
Figura 21 - Regiões de medição do diâmetro da esfera



Fonte: Autor (2018).

Na figura 22, apresenta-se o esquema das etapas do processo de entrada na calibração na qual, primeiramente, um forjado conformado a morno foi submetido a um processo de jateamento, conforme a Figura 22 (a). Já na Figura 22 (b), a esquematização do processo de calibração a frio resultando com a saída de um forjado de precisão (c).

Figura 22 - Desenho esquemático do fluxo de Calibração a Frio.



Fonte: Autor (2018).

3.4 Caracterização do Material

3.4.1 Composição Química

Para a realização deste procedimento, foi utilizado o equipamento BRUKER, modelo Q2 ION. A análise da composição química do substrato, material AISI H13 será avaliada comparando com a Norma ASTM A 681.

3.4.2 Caracterização das Superfícies

Para a caracterização das ferramentas considerou-se a realização dos seguintes procedimentos: Análise de Dureza, Análise Metalográfica e Análise Macroscópica.

3.4.3 Análise de Dureza

Para a análise da dureza do material em seu substrato foram realizados os ensaios pelo método HRC, HV 0,5, HV 0,1 e HV 0,05. Utilizou-se o durômetro da marca PANAMBRA para as medições em HRC e o microdurômetro da marca MITUTOYO para as medições de microdureza em HV. Para a realização das análises, os corpos de provas foram embutidos para facilitar o manuseio e evitar que as amostras sofressem abaulamento durante o processo de preparação ou também rasgassem suas arestas rasguem as lixas e feltros de polimento. O processo de lixamento das amostras deu-se a partir da lixas d'água com granulometria 80, 120, 240, 320, 400, 600, 1000 e 1200 sempre alterando sucessivamente em 90° a posição do corpo de prova a cada troca subsequente de lixa até desaparecer os traços da lixa anterior. No processo de polimento, foi utilizado pasta de diamante do tipo JP1. Para a revelação das estruturas, as amostras foram atacadas com reagente Nital 3%.

3.4.4 Análise Metalográfica

O procedimento metalográfico foi realizado a fim de verificar a condição microestrutural do substrato AISI H13, a camada com nitretação gasosa, e também, visando verificar as condições da camada de difusão e do revestimento Dúplex, verificando-se sua espessura e características. Para o ensaio, foi utilizado o equipamento Microscópio Óptico da marca da marca OLYMPUS GX-51 com aumentos de 5X, 10X, 20X, 50X e 100X.

3.4.5 Análise Macroscópica

A análise macroscópica foi realizada com o auxílio do equipamento Estereomicroscópio Leica, modelo EZ4D para identificar regiões que pudessem apresentar trincas e/ ou desgaste.

3.4.6 Caracterização do Desgaste

O critério adotado para a avaliação do desgaste da ferramenta de calibração a frio foi o dimensional final do forjado, visto que este é fator determinante para validação de sua vida útil.

O equipamento utilizado para a medição do forjado foi um tridimensional da marca ZEISS CONTURA SELECT. As variações de processo admitidas neste estudo foram de ± 0.1 mm para a dimensão do diâmetro da esfera (região em análise). Para cada condição proposta foram selecionadas 10 amostras de cada durante a produção.

Para a avaliação das marcas de desgaste e iniciação de trincas na região do raio da ferramenta, utilizou-se uma lupa da marca Dino Capture com aumento máximo de 200 X.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do Material

Para a caracterização da composição química do substrato utilizou-se o equipamento BRUKER, modelo Q2 ION. Os parâmetros encontrados na análise do aço AISI H13 apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pela Norma ASTM A 681 de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química.

Composição Química (%, massa)	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Mo
Máx.	0.45	0.60	0.03	0.03	1.25	5.50	1.20	1.75
Medida	0.42	0,38	< 0,01	< 0,017	1,176	5,027	0,82	1,17
Mín.	0.32	0.20	-	-	0.80	4.75	0.80	1.10

Fonte: Autor (2018).

4.2 Caracterização da Superfície

4.2.1 Superfície sem Revestimento

Com a análise metalográfica do substrato após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, é possível observar uma microestrutura constituída por carbonetos finamente dispersos em uma matriz de martensita revenida, característico do aço ferramenta AISI H13. Do ponto de vista metalográfico, a microestrutura do aço está adequada ao esperado após tratamento de têmpera e revenido. A dureza encontrada no substrato foi de 52 HRC, valor este aceitável dentro do especificado pelo projeto da ferramenta (50 – 52 HRC).

Figura 23 - Microestrutura do aço AISI H13, 500X, ataque químico: Nital 3%.



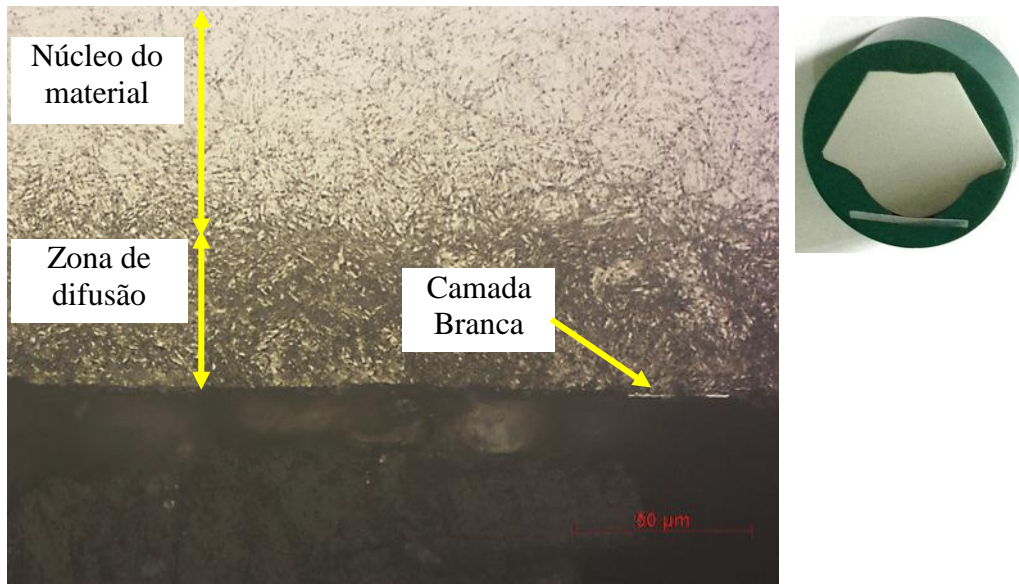
Fonte: Autor (2018).

4.2.2 Superfície com Nitretação Gasosa

Para a análise da camada nitretada foi utilizado o microscópio óptico para identificar a microestrutura e a profundidade da camada nitretada e também a presença da camada branca. O perfil de microdureza foi medido através de método Vickers com carga de 100 gf. A microdureza superficial encontrada foi de 1080 HV 0,05.

Na Figura 24, na microestrutura da camada nitretada da ferramenta desgastada na região do diâmetro da esfera (indicada na seta), nota-se a presença de precipitados de nitreto e observa-se a formação de uma camada branca com espessura não homogênea (entre 0,008 e 0,010 mm) devido ao desprendimento desta como o desgaste abrasivo durante o processo de calibração a frio.

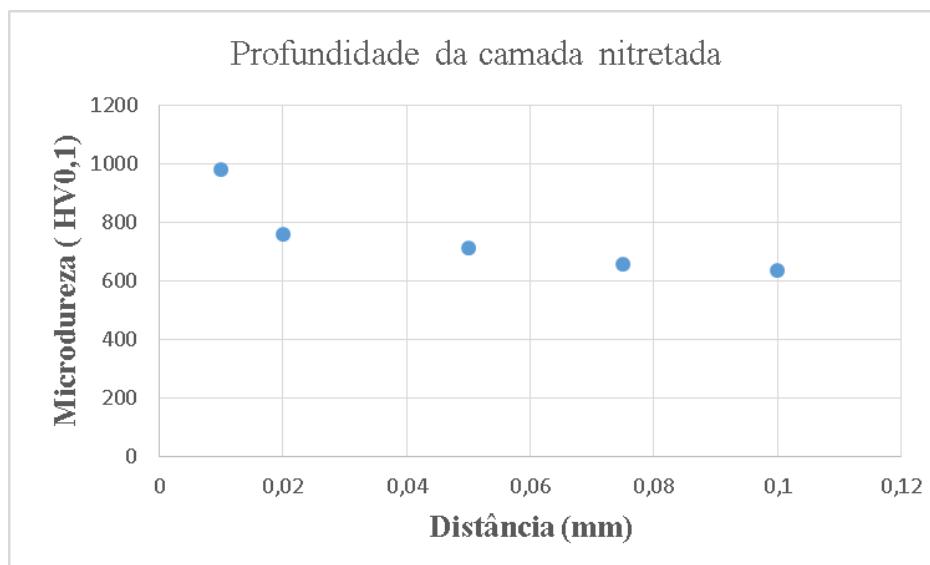
Figura 24 - Zona de difusão, 500X, ataque químico: Nital 3%.



Fonte: Autor (2018).

Pode-se observar que a zona de difusão apresenta um aspecto mais escuro do que o núcleo do material devido a distorção da rede reticular e pela presença de precipitados e nitrogênio na solução sólida. Nota-se também precipitados em contornos de grão em forma mais claras. Para a definição da espessura da camada nitretada utilizou-se o método de perfil de dureza no qual se atingiu uma profundidade de 0,05mm.

Figura 25 - Perfil de dureza na camada nitretada



Fonte: Autor (2017).

4.2.3 Superfície com Revestimento Dúplex

Com a análise metalográfica da superfície (Figura 26), pode-se observar um filme fino de revestimento de espessura da ordem de $3,45\ \mu\text{m}$ e, abaixo desta, uma zona mais escura que revela a camada de nitretação. É possível observar que não houve formação de camada branca pelo processo de nitretação, sendo este um fator de importância para garantir a adesão do revestimento posteriormente aplicado.

Figura 26 - AISI H13 + Revestimento Dúplex, 500x, ataque químico: Nital 3%.



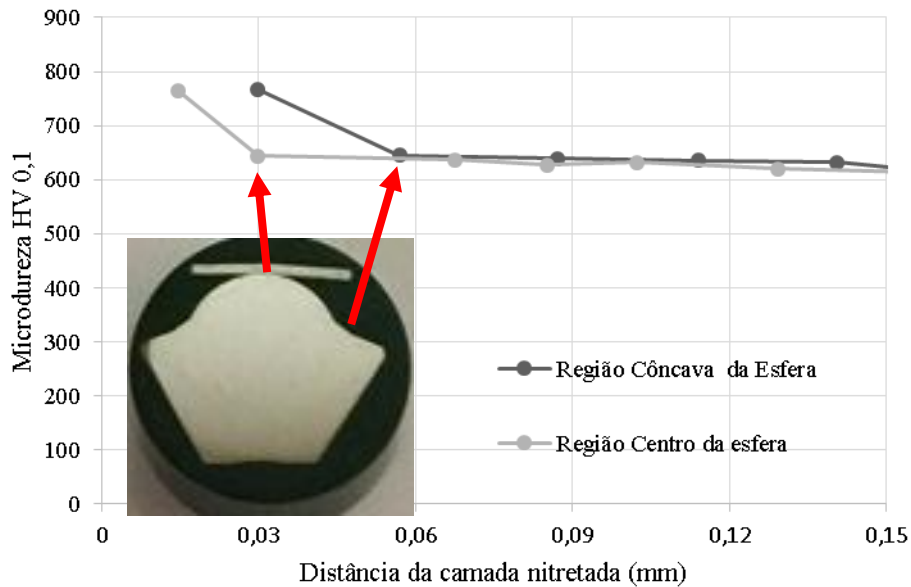
Fonte: Autor (2018).

Somente pelo ataque metalográfico não é possível medir a zona de difusão da camada nitretada, sendo necessária a execução de medições de microdureza para estimar sua profundidade. Na Figura 27, são apresentados os perfis de microdureza da camada nitretada em duas regiões distintas.

Foi utilizado o método de microdureza Vickers e carga de 100 gf. Portanto, é possível afirmar que a camada nitretada apresenta profundidade de, aproximadamente, $30\ \mu\text{m}$ na região do topo (centro) dos segmentos e de aproximadamente $60\ \mu\text{m}$ na região côncava do perfil da ferramenta.

Esta diferença na profundidade de camada nitretada provavelmente foi ocasionada devido ao processo de polimento antes da deposição do filme, visto que se trata de um processo de polimento manual e a região onde apresentou a maior espessura de camada é de difícil acesso (raio da ferramenta).

Figura 27 - Perfil de Microdureza em regiões distintas do segmento.



Fonte: Autor (2018).

Para a verificação da adesão do revestimento utilizou-se a Norma VDI 3198, conhecida como “ensaio de adesão Rockwell C” (LUVISON, 2012). Conforme a Figura 28, resultante do ensaio, o teste de adesão foi satisfatório enquadrando-se na classe HF3, onde é considerado aprovado. A nitretação a vácuo aplicada neste tratamento combinado foi fator fundamental no resultado positivo deste ensaio, pois acabou contribuindo para a sustentação da carga e aumento da resistência mecânica do revestimento Dúplex.

Figura 28 - Resultado do teste de adesão conforme Norma VDI 3198.

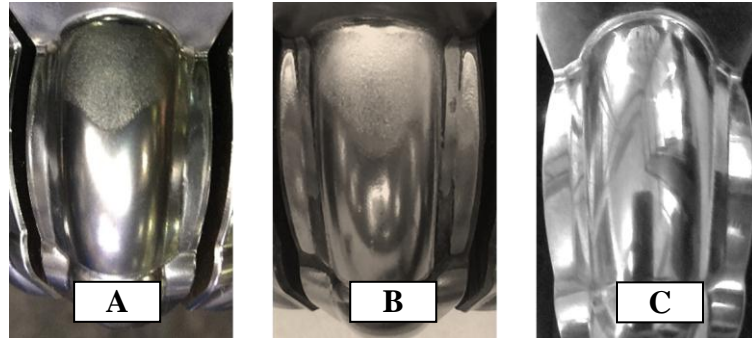


Fonte: Autor (2018).

4.3 Caracterização do Desgaste

Em seu final de vida útil, as ferramentas em análise tiveram três comportamentos diferentes. Na figura 29, a condição sem revestimento (A); a modificação superficial com o processo de nitretação gasosa (B) e a deposição com revestimento Dúplex a base de CrTiN (C).

Figura 29 - Condições de desgaste.



Fonte: Autor (2018).

Sem Revestimento

O critério adotado para a avaliação do desgaste da ferramenta de calibração a frio foi o dimensional final do forjado, visto que este é fator determinante para validação de sua vida útil. No trabalho em campo, a ferramenta com substrato de aço AISI H13 com superfície temperada e revenida atingiu uma vida média de 8.600 forjados e apresentou desgaste prematuro na parte superior da esfera (região circulada) como mostra a Figura 30.

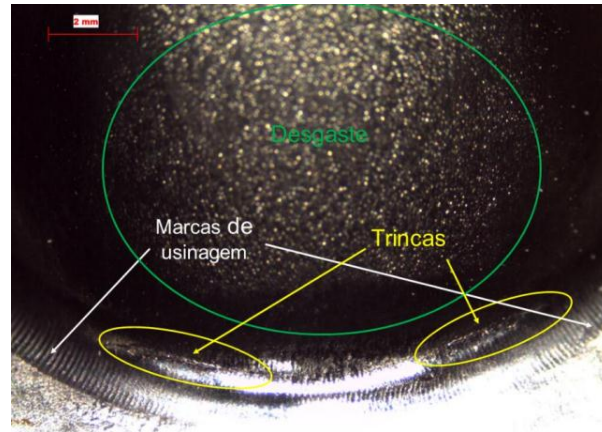
Figura 30 - Ferramenta com aço AISI H13 sem revestimento no final de sua vida útil.



Fonte: Autor (2018).

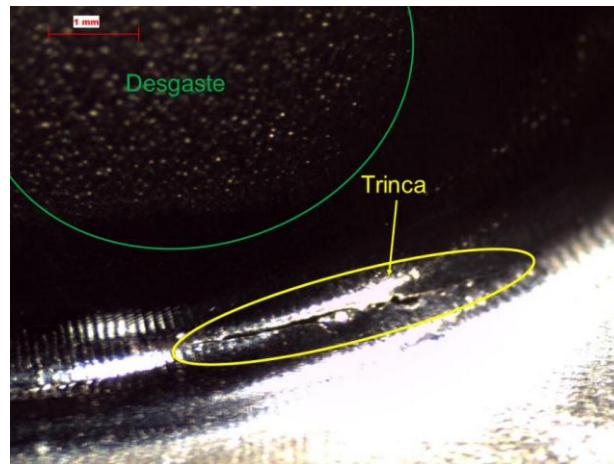
Na região circulada na Figura 30, além do desgaste, foi também identificado marcas oriundas do processo usinagem na região do raio e pontos de iniciação de trincas como pode-se ver detalhadamente nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 - Marcas de usinagem e trincas na região do raio



Fonte: Autor (2018).

Figura 32 - Detalhamento da região da trinca

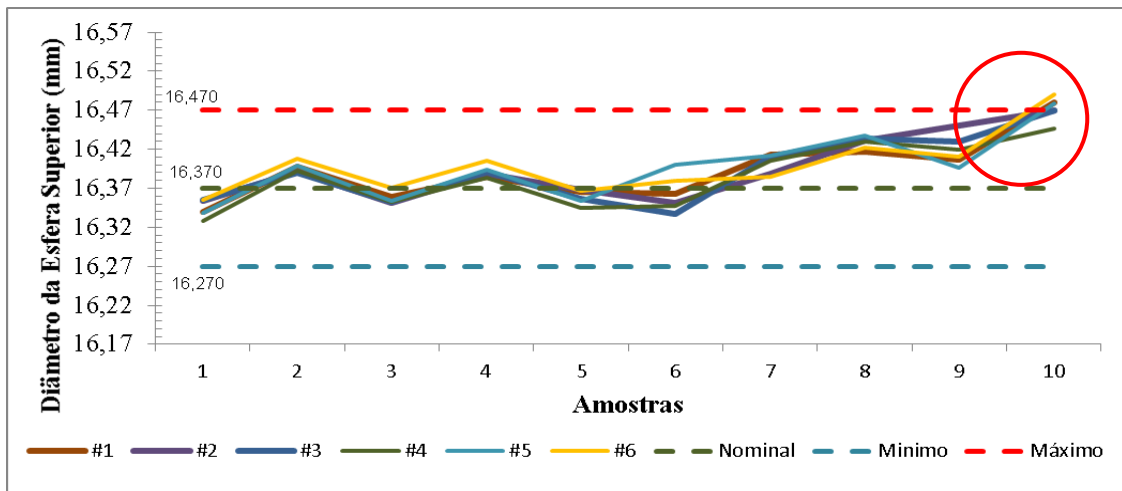


Fonte: Autor (2018).

A característica fundamental foi a presença de marcas de riscos e ranhuras, mostrando-se um desgaste do tipo abrasivo de acordo com (PODGORNIK et. al 2015).

Na região circulada na Figura 30, foi realizado o acompanhamento dimensional do forjado até o critério adotado para o descarte da ferramenta. O equipamento utilizado para a medição do forjado foi um tridimensional da marca ZEISS CONTURA SELECT. Logo, observa-se que na Figura 33, o dimensional do forjado ao longo da trajetória de trabalho da ferramenta sem o revestimento superficial, na qual apresenta uma tendência ao limite superior especificado pelo processo nas 06 (seis) pétalas da ferramenta.

Figura 33 - Dimensional do forjado na região do diâmetro da esfera superior.



Fonte: Autor (2018).

As variações de processo admitidas neste estudo foram de ± 0.1 mm para a dimensão do diâmetro da esfera (região em análise).

O período adotado para a coleta das amostras na realização do estudo foi a cada 01 hora de produção, diferentemente do sistema de controle de processo habitual que define uma frequência de medição de 02 vezes ao turno (turno de 8 horas) ou a cada troca de ferramenta.

Com Nitretação Gasosa

Para as ferramentas com a modificação superficial a partir do processo de nitretação gasosa, foi adotado o mesmo critério para a avaliação do desgaste das ferramentas sem revestimento. No teste prático, as ferramentas com nitretação a gás atingiram um desempenho de 20% superior em sua vida útil em relação às ferramentas sem revestimento, no qual atingiram uma vida útil média de 10.500 forjados e também apresentaram o mesmo modo de falha de desgaste na parte superior da esfera (região circulada), conforme a Figura 34.

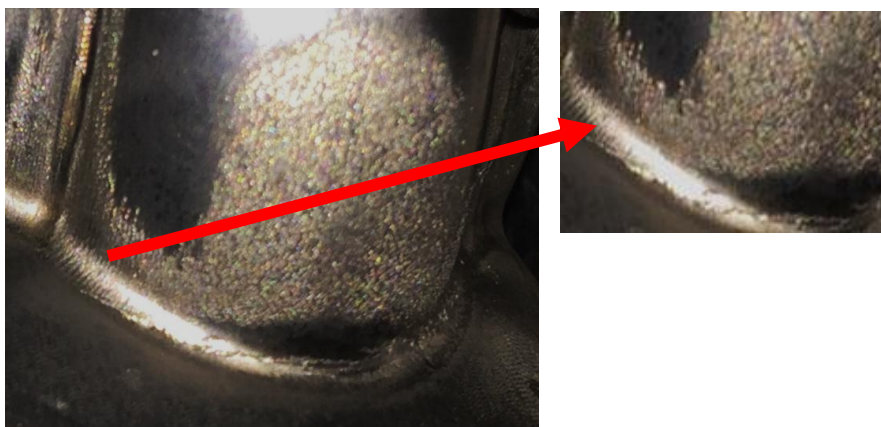
Figura 34 - Ferramenta com Nitretação Gasosa no final de sua vida útil



Fonte: Autor (2018).

Nas amostras com nitretação a gás, as marcas de desgaste apresentaram-se menos salientes do que as sem revestimento, visto que o aumento da dureza neste processo ajudou a inibir a deformação plástica. A olho nu, pode-se visualizar pontos de iniciação de trincas na região do raio, conforme observar-se na Figura 35.

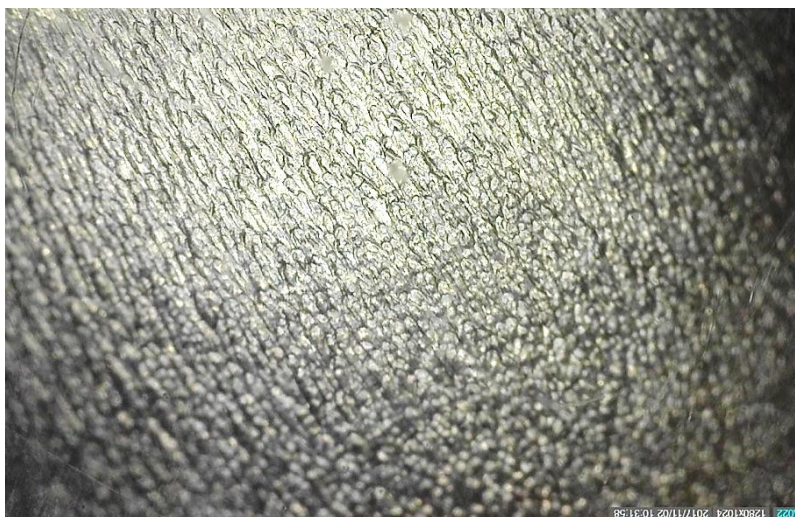
Figura 35 - Deslocamento da camada nitretada na região do raio.



Fonte: Autor (2018).

Com o auxílio de uma lupa com ampliação em 50X, percebe-se que o arraste de material e as dimensões dos riscos originados pelo desgaste abrasivo foram maiores na ferramenta sem tratamento de superfície (Figura 36) do que com nitretação gasosa (Figura 37).

Figura 36 - Ampliação (50X) do desgaste da ferramenta sem nitretação.



Fonte: Autor (2018).

Nas Figura 37, nota-se que visualmente a formação dos riscos provocados pelo desgaste abrasivo são mais estreitos e de menor intensidade em relação a ferramenta sem revestimento devido ao aumento da dureza superficial oriunda do processo de nitretação gasosa.

Figura 37 - Ampliação (50X) do desgaste da ferramenta com nitretação gasosa



Fonte: Autor (2018).

Com Nitretação a Vácuo + Revestimento PVD a base de CrTiN

Diferentemente das condições sem tratamento de superfície e com modificação superficial de nitretação gasosa, as ferramentas com revestimento Dúplex (nitretadas a vácuo e com o revestimento a base de CrTiN) não apresentaram desgaste que afetassem o comportamento dimensional tanto da ferramenta quanto ao do forjado de precisão, porém o seu modo de falha deu-se por uma fratura frágil, conforme a indicação na região circulada na Figura 38.

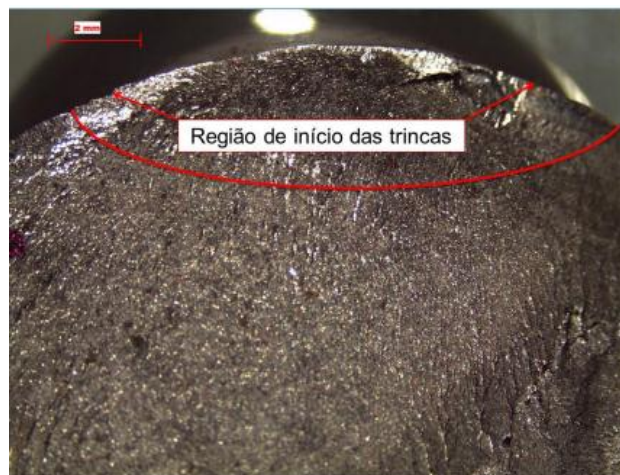
Figura 38 - Ferramenta com revestimento Dúplex



Fonte: Autor (2018).

Analisando a região circulada da fratura, como é demonstrado no detalhe da superfície fratura na Figura 39, observou-se com o auxílio de um Estereomicroscópio Leica, modelo EZ4 D, que é possível identificar o início das trincas conforme é apontado na imagem, tendo sua origem no raio de concordância.

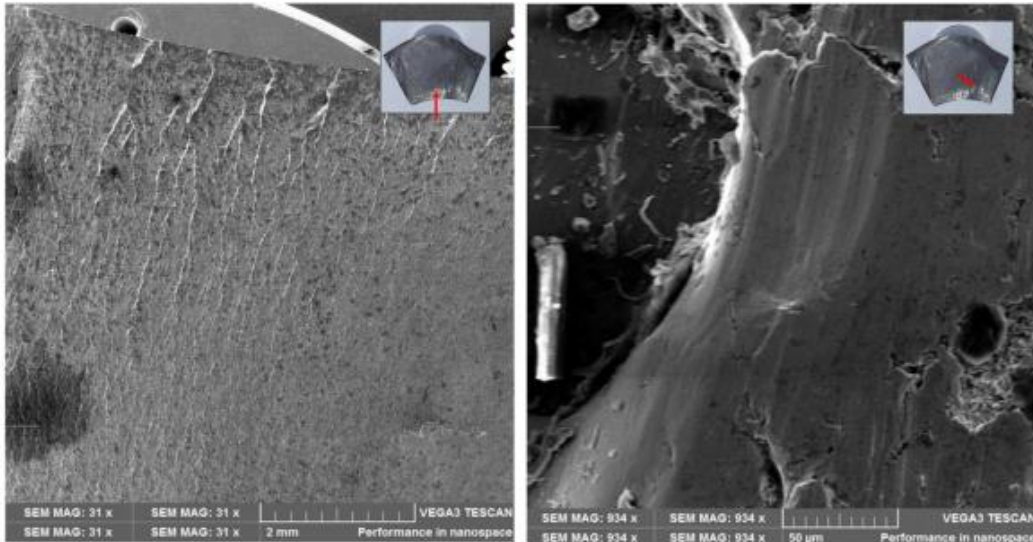
Figura 39 - Região de iniciação das trincas.



Fonte: Autor (2018).

Observando a microestrutura da região fratura pelo método de microscopia eletrônica de varredura (MEV), as características na Figura 40 evidenciam-se uma fratura por fadiga de baixo ciclo.

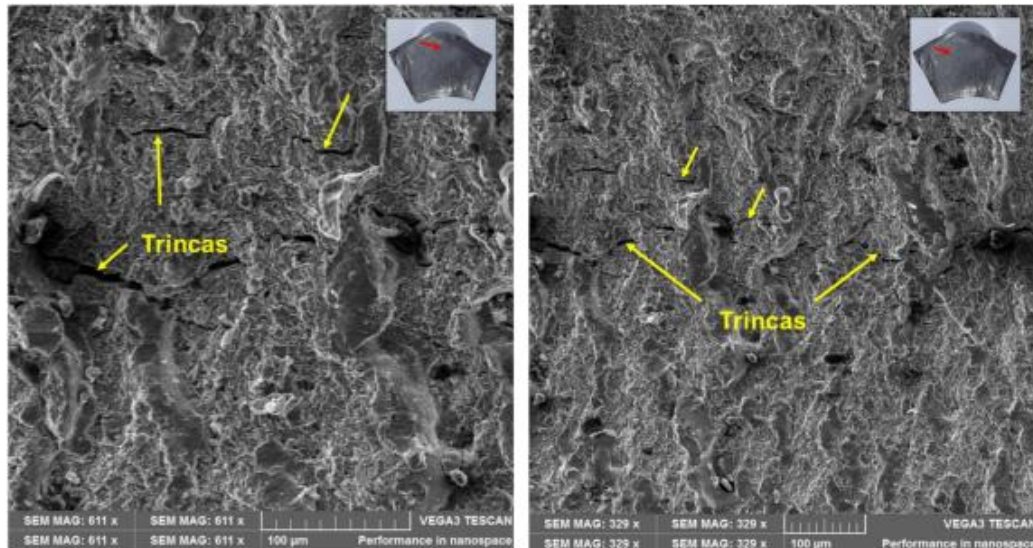
Figura 40 - Fratura por fadiga.



Fonte: Autor (2018).

Na análise da Figura 41, revelam-se inúmeras trincas como podem ser evidenciadas nas setas.

Figura 41 - Trincas na região da fratura

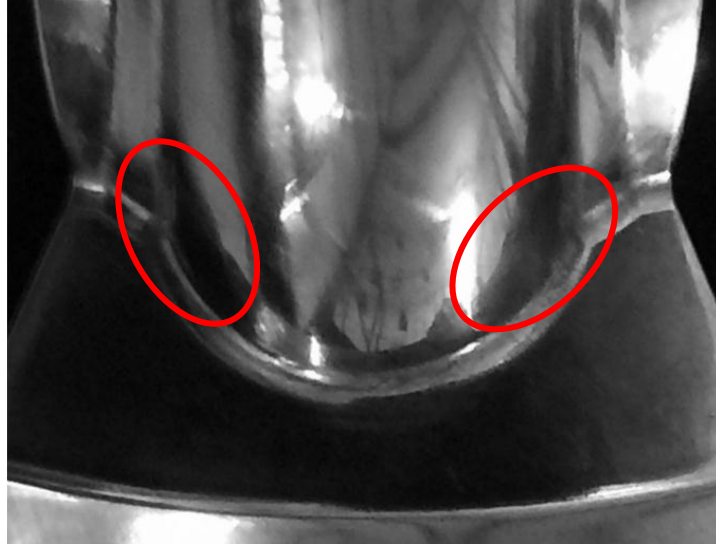


Fonte: Autor (2018).

Com a análise macroscópica na região da fratura, ou seja, no raio de concordância da ferramenta, pode-se observar pontos de iniciação de trincas as quais apresentam evidências sobre os mecanismos que levam a fratura. A Figura 42 é

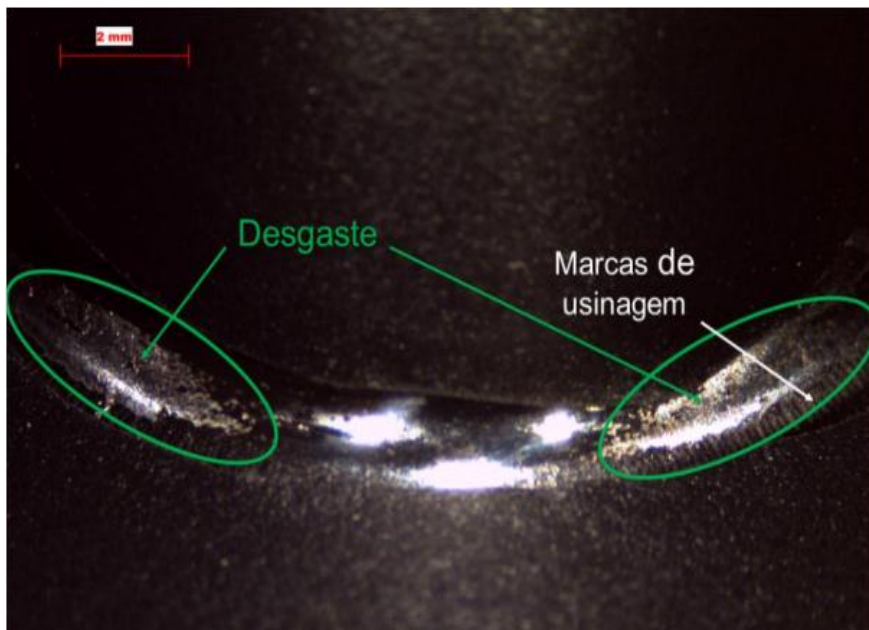
apresentada uma visão detalhada da região do segmento não fraturado, destacando em círculos a região analisada macroscopicamente nas Figuras 43- 44.

Figura 42 - Região do segmento não fraturado



Fonte: Autor (2018).

Figura 43 - Visão global da origem do desgaste



. Fonte: Autor (2018).

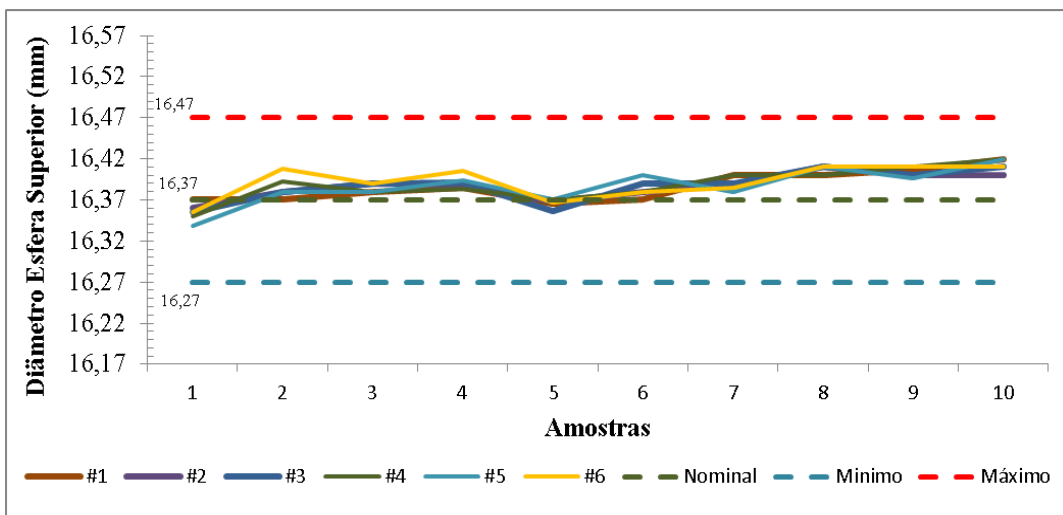
Figura 44 - Evidência do desgaste



Fonte: Autor (2018).

Em relação a performance da ferramenta, o dimensional do forjado apresentou um comportamento esperado durante a sua trajetória de trabalho, conforme é evidenciado na Figura 45. As ferramentas revestidas produziram em média 37.500 peças, resultando num desempenho superior a 400% comparado as ferramentas sem tratamento de superfície.

Figura 45 - Dimensional do forjado com revestimento Dúplex

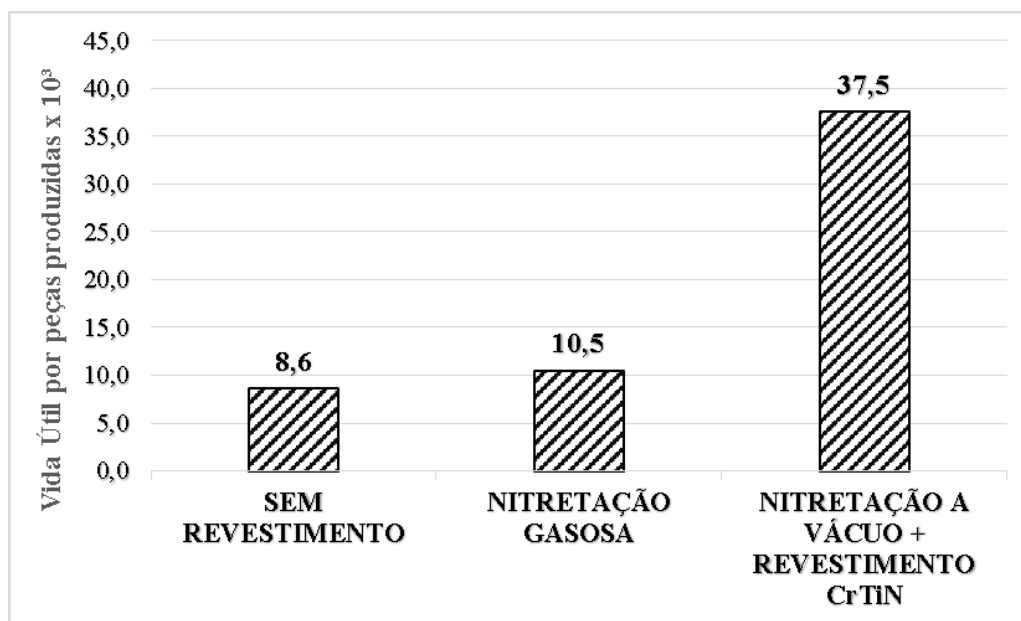


Fonte: Autor (2018).

4.4 Aspectos Econômicos

Em relação aos aspectos econômicos, a aplicação de nitretação a vácuo + revestimento CrTiN em ferramentas de calibração a frio do referido estudo permitiu um ganho econômico de 60% em relação as ferramentas sem revestimento e aumento de 400% na vida útil de ferramentas. Na figura 46, podemos evidenciar a comparação entre a vida média atingida nas três condições em análise.

Figura 46 - Comparativo da vida útil atingida das ferramentas.

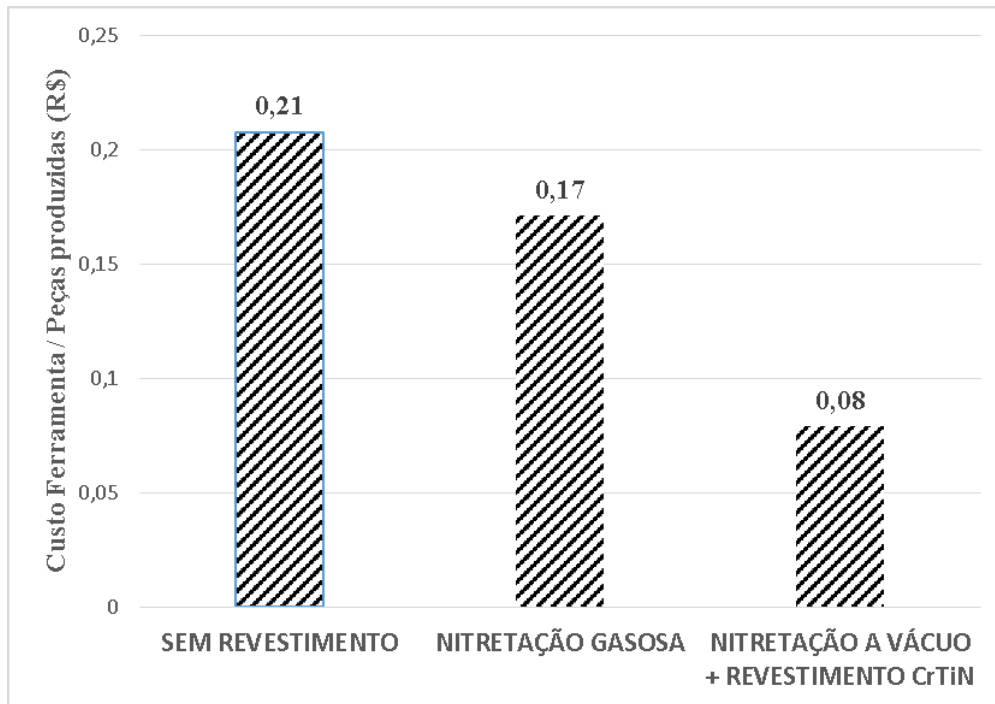


Fonte: Autor (2018).

Considerando que cada troca de ferramenta e nova liberação dimensional leva-se em torno de 1 hora, pode-se afirmar que com o melhor desempenho de vida útil de ferramentas devido a aplicação do revestimento obtém-se um ganho de 4 horas de disponibilidade de máquina.

Para as ferramentas com a modificação superficial de nitretação gasosa, os resultados financeiros obtiveram uma redução de 17% nos custos de ferramentas por peças produzidas e acréscimo de 20% em vida útil de ferramentas, apresentando uma melhora em relação as ferramentas sem revestimento como podemos observar na Figura 47.

Figura 47 - Comparativo entre o custo final das ferramentas.



Fonte: Autor (2018).

Para complementar a validação deste estudo, foi realizado um estudo adicional com um número maior de amostras e a avaliação com base no desvio padrão conforme os dados da Tabela 4.

Tabela 4 - Estudo comparativo para análise de desvio padrão.

CONDIÇÃO	NÚMERO DE AMOSTRAS	VIDAÚTIL MÉDIA	DESVIO PADRÃO
SEM REVESTIMENTO	10	8.499	1.747
NITRETAÇÃO GASOSA	10	10.685	616
NITRETAÇÃO A VÁCUO + REVESTIMENTO CrTiN	10	37.560	2.246

Fonte: Autor (2018).

Em resumo, nota-se que mesmo com o desvio padrão maior, a proposta com nitretação a vácuo e revestimento PVD a base de CrTiN torna-se a mais viável do que as outras condições devido a sua vida útil elevada.

5 CONCLUSÕES

Em relação a vida útil, as ferramentas nitretadas a vácuo e sem camada branca e, posteriormente, revestidas via PVD com CrTiN (tratamento Dúplex) apresentaram uma melhoria no desempenho de 400% em relação a condição sem tratamento superficial.

A melhoria da resistência ao desgaste das ferramentas de calibração a frio foi associada diretamente à combinação de elevada dureza e baixo coeficiente de atrito obtido na superfície. Além disso, a zona de difusão da camada nitretada, abaixo do revestimento, aumentou a dureza e conseqüentemente a resistência mecânica e adesão do revestimento ao substrato pela melhor sustentação de carga.

O modo de falha para descarte de ferramentas mudou de desgaste excessivo (no caso das ferramentas sem tratamento superficial e nitretadas a gás) para fratura por fadiga (de baixo ciclo) nas ferramentas com o tratamento Dúplex (nitretadas a vácuo e revestidas com CrTiN via PVD).

Pode-se verificar adicionalmente, uma melhoria significativa da estabilidade dimensional das ferramentas que foram tratadas pelo processo Dúplex em relação as Nitretadas a Gás e não tratadas.

Em relação aos custos de produção, o tratamento Dúplex forneceu uma redução de 60% no custo final da ferramenta por quantidade de peças produzidas viabilizando economicamente o emprego deste.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo avaliando a redução custos relacionados ao aumento de disponibilidade de máquinas com a aplicação de revestimentos, visto que este parâmetro está diretamente ligado a redução de custo operacional final.
- Melhorar o acabamento no raio de concordância dos segmentos com o corpo do punção (local de iniciação das trincas / maior desgaste) antes de realizar a nitretação e o revestimento);
- Realizar estudos com diferentes tipos de materiais para o substrato para melhorar a resistência a ruptura ;
- Realizar estudos em ferramentas para o processo de conformação a morno e outras geometrias;
- Realizar estudos com modificação superficial pelo processo de nitretação a plasma.

REFERÊNCIAS

Balinit Formera Plus. The coating solution for advanced high strength steel forming applications, disponível em: <<http://www.oerlikon.com>> Acesso em: 20 de set. 2017.

Bezerra, P. Inovação contra a crise, disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br>> Acesso em: 08 de out. 2017.

Bornia, A.C. Análise gerencial de custos: empresas modernas. Porto Alegre, Bookman, 2009.

Both, G. B. Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para a aplicação em ferramentas de conformação a frio. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2011.

Bhushan, B. Introduction to tribology. Second edition. ISBN: 978-1-119-94453-9, 2013.

Callegari, R. J. Nitretação de um aço H13 a baixas pressões em um equipamento IP35L/TECVAC. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS – 2005.

Callister, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais. Rio de Janeiro: livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2008.

Czelusniak A, Morawiski CD, Liliental WK. Automatic nitriding potential control in gas nitriding, Schaumburg, Illinois, pp 449–454. Proceedings of International Heat Treating Conference: equipment and processes, 18–20 April 1994.

Davim, J. P. Machining Fundamentals and Recent Advances. New York: Springer, 2008. 361 p.

Davim, J. P. Tribology in Manufacturing Technology. New York: Springer. ISSN 2195-0911 (2012).

Desmond, I. Revestimentos PVD, disponível em: < <https://www.johndesmond.com>> Acesso em: 07 de jan. 2018.

Diehl, I. L. Análise de camadas obtidas por Nitretação Gasosa controlada nos aços SAE H13 e SAE 4140. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS – 2017.

DIN 50320. Verschleiß-Begriffe, Systemanalyse Von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes; Benth Verlay, Berlin, 1979.

Driveline, G. Workshop de Forjaria de Precisão, 2000.

Donadel, C.M.; Canassa, E.M.; Rodriguez, C.M.T. O uso da manutenção produtiva total (MPT) como ferramenta geradora de produtividade e agilidade para a logística enxuta. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, Enegep, 2007.

Esteves, W. L. S. A aplicação do Lean Manufacturing nas indústrias. X Congresso Nacional de Excelência em Gestão, ISSN 1984-9354, 2014.

Favaretto, A. et al. O gerenciamento das ferramentas de corte na indústria automotiva: um estudo de casos na região metropolitana de Curitiba. Produto & Produção, vol. 10, n. 3, p. 45 - 60, out. 2009.

Farias, M. C. Tribologia, disponível em: < https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18_04_Palestras_Tribologia_Profa_MCristinaM_Farias.pdf> Acesso em: 19 de nov. 2017.

Ferreira, G. E. F. Avaliação da resistência à fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma. Dissertação de Mestrado, UFSC – 2001.

Froehlich, A. R. Tratamento superficial DUPLEX com TiN e CrN de Aços Ferramenta da Classe AISI H13 Para Matrizes de Injeção de Ligas de Alumino. Porto Alegre: Tese de Doutorado, 2003.

Sinto. Granalha de Aço, disponível em: < <http://www.sinto.com.br>> Acesso em: 04 de nov. 2017.

Hogmark, S. et al. Mechanical and Tribological Requirements and Evaluation of Coating Composites, disponível em: < <http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais>> Acesso em: 11 de set. 2017.

Hogmark, S. et al. Friction and Wear Measurement Techniques. Modern Tribology Handbook, 2001.

Hogmark, S. et al. Design and evaluation of tribological coatings, disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Mats_Larsson3/publication/223521207_Design_and_evaluation_of_tribological_coatings/links/0f31753aecd1d371eb000000.pdf> Acesso em: 20 de set. 2017.

Jacobsen, S. D. Caracterização estrutural e tribológica do aço AISI H13 nitretado a plasma em diferentes condições de densidade de corrente e temperatura. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2014.

Jawahir, I. S. et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 603- 626, 2011.

Karimi, A., et al. Fracture mechanisms in nanoscale layered hard thin films. *Thin Solid Films*. 2002, Vol. 420-421, 275-280.

Kato, K. Adachi, K. “Wear Mechanisms”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2. Cap 22, 2001.

Kato, K., Umehara, N., Adachi, K. Friction, wear and N₂ lubrication of carbon nitride coatings: a review. *Wear*, v. 254, p. 1062-1069, 2003.

Kato, K. Wear in relation to friction – a review, *Wear* 241, 151-157 (2000).

Lean, M. Lean Enterprise. Seu Guia de Análise de Tempo Perdido. GKN DO BRASIL LTDA, 2004.

Leandro, C. A. S. Efeito da implantação iônica por imersão em plasma no aço ferramenta tipo H13. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2005.

Lee, H. T. et al. Effect of material physical properties on residual stress measurement by edm hole-drilling method. *Journal of Engineering Materials and Technology Transactions of the ASME*, New York, v. 133, n. 2, 2011.

Leite et al. Wear, Wear mechanisms and microstructure of pulsed plasma nitride AISI H13 tool steel, 2010, 269, 466-472.

Li, Y. E. et al. Surface residual stress gradient distribution in high speed milling of H13 die steel. *Advances in Materials Manufacturing Science and Technology*, New York, v. 626-627, p. 183-188, 2009.

Lopes, H. S. M. Caracterização do Aço P20 Tratado Superficialmente por Nitrocarbonetação a Plasma. Relatório de iniciação Científica, FAPESP – 2015.

Luvison, C. Análise dos modos de falha do revestimento de AlCrN depositado por PVD sobre H13. Dissertação de Mestrado. Caxias do Sul: Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, UCS – 2012.

Martins, V. et al. Contribuição Técnica apresentada na 14^a Conferência Internacional de Forjamento - Brasil/RS, 20 a 22 de outubro de 2010, Porto Alegre, RS, Brasil.

Melado, A. C. Influência dos parâmetros de nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI H13. Dissertação Mestrado – Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2011.

Mendes, M. A. R. S. Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimentos de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio. Dissertação para obtenção do Título de Mestre. USP – 2009.

Monteiro, M. P. Inovação. Revista informativa trimestral da Eutectic Castolin, 2013.

Norcino, B. A. Uma contribuição ao estudo das tensões residuais no fresamento. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

Ohno, T. O Sistema Toyota de Produção – Além da produção em larga escala. Porto Alegre, Editora Bookman, 1997.

Pye, D. ASM American Society for Metals – Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. 2003. pp. 1 – 256.

Pye, D. Nitriding Techniques, Ferritic Nitrocarburizing, and Austenitic Nitrocarburizing Techniques and Methods. Portland: CRC Press, 2007, pp. 474 – 538.

Pye, D. Resolução de problemas no processo de nitretação – Parte I, disponível em: <<http://revistaih.com.br/resolucao-de-problemas-no-processo-de-nitretacao-parte>> Acesso em: 20 de set. 2017.

Piccilli, M. R. Otimização do processo de nitretação gasosa na redução de trincas em anéis de pistão para motores de combustão interna. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá/MG – 2009.

Podgornik, B. et al. Wear Mechanisms and Surface Engineering of Forming Tools. Institute of Metals and Technology, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenia. ISSN 1580-2949 (2015).

Ranalli, G. A. et al. Efeitos da nitretação por plasma com pós-oxidação e por banho de sal na resistência à corrosão de um aço ferramenta. Matéria (Rio J.) vol.14 no.2 Rio de Janeiro Aug. 2009.

Revestimentos PVD e CVD, disponível em: <<http://revistaih.com.br>> Acesso em: 29 de abr. 2017.

Rocha, A.S. Avaliação dos efeitos de tensões residuais através da remoção de material. Estudos Tecnológicos, v. 4, n. 3, p. 157-169, 2008.

Rozenfeld, H.; Amaral, D.C.; Forcellini, F.A.; Toledo, J.C.; Silva, S. L.; Allipradini, D.H.; Scalice, R.K. Desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo, Saraiva, 2006.

Santos, C. E. Z. Simulação Termodinâmica dos Processos de Nitretação, Nitrocarburação e Carbonitretação Gasosas. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS – 2003.

Santos, G. R. Caracterização e Avaliação do Comportamento Tribológico do Aço DIN X100CrMoV8-1-1 com Tratamento Dúplex. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2015. p. 150.

Schaeffer, L. Conformação Mecânica. Editora Imprensa. Porto Alegre, 2005.

Schaeffer, L. Considerações sobre o processo de forjamento a frio, disponível em: < <http://revistaforge.com.br/consideracoes-sobre-o-processo-de-forjamento-a-frio/>> Acesso em: 04 de nov. 2017.

Souza, R. M., et al. Numerical and experimental study of the circular cracks observed at the contact edges of indentations of coated systems with soft substrates. *Wear*. 2001, Vol. 251, 1337-1346.

Stachowiak, G.B.; Stachowiak, G.W.; Brandt, J.M. Ball cratering abrasion tests with large abrasive particles. *Tribology International*. v.39, p.1-11, 2006.

Tovbin, R.; Pinedo, C. E. Utilização de Revestimentos Tribológicos em Ferramentas para Trabalho a Frio. 7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes da ABM, 2009, São Paulo/SP.

Vendramim, J. C. Seleção de Materiais para a Nitretação, disponível em: < <http://www.isoflame.com.br>> Acesso em: 16 de set. 2017.

Volke, V. 5 objetivos dos investimentos da indústria em 2017, disponível em: <<http://www.portalindustria.com.br/agenciadni/noticias/2017/06/5-objetivos-dos-investimentos-da-industria-em-2017>> Acesso em 24 de set. 2017.

Zhang et al. The structure and tribological behaviors of CrN and Cr–Ti–N coatings. *Applied Surface Science* 253 (2007) 7353–7359

Zum, G.K. H. Microstructure and wear of materials. New York: Elsevier, 1987.