

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JUNIOR CESAR GOBBI DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FACAS EM AÇO FERRAMENTA AISI D2 POR
MEIO DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ENSAIO DE DUREZA**

LONDRINA

2023

JUNIOR CESAR GOBBI DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FACAS EM AÇO FERRAMENTA AISI D2 POR
MEIO DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ENSAIO DE DUREZA**

**Evaluation of the wear of knives in AISI D2 tool steel using microstructural
characterization and hardness test**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JUNIOR CESAR GOBBI DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE FACAS EM AÇO FERRAMENTA AISI D2 POR
MEIO DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ENSAIO DE DUREZA**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 17/novembro/2023

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

LONDRINA

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me proporcionar saúde para chegar até este momento. Aos meus pais, Cristina de Lourdes Gobbi e Nilton Cesar de Farias, fica a eterna gratidão por me proporcionar apoio emocional e financeiro para concluir mais esta etapa tão importante para a vida.

Agradeço a minha família e amigos da minha cidade natal pela compreensão e apoio. Também, às amizades construídas durante a graduação, das quais foram primordiais na caminhada. Também, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial ao departamento de Engenharia de Materiais, em especial ao professor orientador Dr. Odney Carlos Brondino, por compartilhar todo o conhecimento.

Agradeço ao Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Londrina pela disponibilidade de equipamentos para que parte das imagens apresentadas neste trabalho fossem obtidas.

RESUMO

Uma das principais propriedades mecânicas dos materiais que conferem resistência ao desgaste é a dureza, imprescindível para boa utilização da ferramenta. Dentre alguns aços utilizados para esta finalidade está o AISI D2, aço ferramenta de trabalho a frio com dureza de aproximadamente 60 HRC. O presente trabalho enfoca na caracterização microestrutural e de dureza do aço AISI D2 aplicado à fabricação de facas circulares e utilizadas para cortar tubos de papel, e, também, a proposta de melhoria na resistência ao desgaste de utilização por nitretação por plasma. Para isto, realizou-se acompanhamento da variação de massa e diâmetro das facas utilizadas, sendo nitretadas e não nitretadas, bem como aferidas as suas durezas e analisadas suas microestruturas por microscópio óptico e eletrônico de varredura. Identificou-se que o processo de corte não é capaz de mudar as propriedades mecânicas do aço AISI D2, e a nitretação por plasma conferiu melhora na dureza superficial, porém, nos parâmetros utilizados, não foi suficiente para garantir ganho considerável. Também, identificou-se possibilidades de continuidade no estudo visando a melhoria da ferramenta e sua utilização, levando em consideração parâmetros de manutenção da máquina, custo-benefício do aço utilizado para a aplicação.

Palavras-chave: dureza; resistência ao desgaste; aço ferramenta; AISI D2; microestrutura; nitretação por plasma.

ABSTRACT

One of the main mechanical properties of materials that provide resistance to wear is hardness, which is mandatory for good use of the tool. Among some steels used for this purpose is AISI D2, a cold work tool steel with a hardness of approximately 60 HRC. This work focuses on the microstructural and hardness characterization of AISI D2 steel applied to manufacture circular knives and used to cut paper tubes, and also on a proposal to improve wear resistance when used by plasma nitriding. To this end, the variation in mass and diameter of the knives used was monitored, whether nitrided and not nitrided, as well as their hardness and metallography measured to visualize the microstructure using an optical and scanning electron microscope. Based on the analyses carried out and the results obtained, it was identified that the cutting process is not capable of changing the mechanical properties of AISI D2 steel, and plasma nitriding provided an improvement in surface hardness, however, in the parameters used, it was not enough to guarantee a considerable gain. Also, possibilities for continuing the study were identified to improve the tool and its use, taking into account machine maintenance parameters and cost-benefit of the steel used for the application.

Keywords: hardness; wear resistance; tool steel; AISI D2; microstructure; plasma nitriding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tubo de papel fabricado e cortado na empresa do estudo.....	13
Figura 2 – Distribuição em rede dos carbonetos de cromo no AISI D2	19
Figura 3 – Microestrutura do aço ferramenta AISI D2 autenitizada a 1010°C e resfriada em óleo. Aumento de 500x. Ataque Nital 4%	19
Figura 4 – Microestrutura do aço AISI D2 identificado carbonetos primários e secundários	20
Figura 5 – Micrografia em MEV de amostras de aço AISI D2 identificado carbonetos (CSs) e austenita retida (γ R).....	23
Figura 6 – Dissolução do carbono de um aço ligado com 1,55 %C, 11,7 %C, 0,77 % Mo durante a austenitização.....	23
Figura 7 – Relação de dureza e austenita retida pela temperatura de austenitização de dois corpos temperados em óleo a vácuo por 30 minutos...	24
Figura 8 – Curvas de revenimento para o aço AISI D2 em diferentes temperaturas de austenitização	25
Figura 9 – Esquema de esquematização de equipamento de nitretação por plasma	27
Figura 10 – Microestrutura AISI D2 não nitretada e nitretada por 60 minutos por MEV	28
Figura 11 – Desenho técnico das facas utilizadas no estudo.....	29
Figura 12 – Facas disponibilizadas pela empresa em diferentes tempos de vida útil	29
Figura 13 – Fluxograma da metodologia empregada no trabalho.....	30
Figura 14 – Exemplo de numeração das facas	31
Figura 15 – Esquema das posições de aferição dos diâmetros das facas.....	32
Figura 16 – Fixação e posicionamento do relógio comparador no fio de corte das facas	33
Figura 17 – Esquemática de identificação de relevos e declives no fio de corte das facas	33
Figura 18 – Ilustração do processo do fornecedor do tratamento de nitretação por plasma	34
Figura 19 – Posicionamento das facas na máquina de corte de tubos	35
Figura 20 – Representação do corte de tubos a partir do fracionamento de um master.....	36
Figura 21 – Corte de amostras para embutimento	36
Figura 22 – Embutimento	37
Figura 23 – Amostras com cortes longitudinal e transversal	37
Figura 24 – Microscópio Óptico.....	38
Figura 25 – Metalização por deposição de ouro	39
Figura 26 – Microscópio Eletrônico de Varredura.....	39
Figura 27 – Equipamentos de medição de dureza	40
Gráfico 1 – Comparação da variação de massa e diâmetro das facas utilizadas e afiadas	43
Gráfico 2 – Percentual de variação de massas das facas após utilização	44
Gráfico 3 – Comparação da variação de diâmetro das facas utilizadas	45
Figura 28 – Microestruturas da faca para descarte ampliada em 500x. Atacadas com Nital 4% com variações no tempo de ataque. Carbonetos Primários (CP) e Secundários (CS)	46

Figura 29 – Microestruturas das facas com meia vida, ampliada em 500x. Atacadas com Nital 4%. Empregando-se apenas um tempo para o ataque	47
Figura 30 – Microestruturas das facas em estado de nova, ampliada em 500x. Atacadas com Nital 4% com variações no tempo de ataque	48
Figura 31 – Microestrutura da faca em estado de nova nitretada por plasma, ampliada 500x. Ataque químico 2,5 min. Nital 4%	49
Gráfico 4 – Dureza média das facas cortadas e embutidas. Valores em HRC ...	52
Figura 32 – Esquema de corte e rotação das facas	54
Figura 33 – MEV das amostras em diferentes condições. Aumento de 10.000x	56
Figura 34 – Microanálise elemental (EDS) em porcentagem atômica no fio de corte da faca em diferentes condições.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Habilidade dos elementos de liga em conferir algumas propriedades aos aços para ferramentas e matrizes	16
Tabela 2 – Comparação entre composições químicas de AISI D2	17
Tabela 3 – Divisão da quantidade de facas por estado (nova, afiada e descartada) e finalidade.....	31
Tabela 4 – Parâmetros da nitretação por plasma das facas AISI D2.....	33
Tabela 5 – Massa das facas antes e após serem utilizadas para corte	41
Tabela 6 – Diâmetros das facas antes e após serem utilizadas para corte.....	42
Tabela 7 – Variação de raio das facas por relevos e declives antes e após utilizadas	42
Tabela 8 – Variação de raio das facas por relevos e declives antes e após utilizadas.	44
Tabela 9 – Faca na condição de descarte	50
Tabela 10 – Faca na condição de meia vida.....	50
Tabela 11 – Faca na condição de nova.....	50
Tabela 12 – Faca na condição de nitretada	50
Tabela 13 – Dureza média das facas em condições diferentes em 3 pontos centrais.....	51
Tabela 14 – Dureza média das facas em 3 regiões das amostras embutidas em condições diferentes	51
Tabela 15 – Quantidade de cortes por par de facas nas condições novas e novas nitretadas	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivo específico	12
3	JUSTIFICATIVA	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1	Aços para ferramentas	14
4.2	A influência da dureza na ferramenta de corte	15
4.3	Resistência mecânica e ao desgaste em ferramenta de corte	15
4.4	Influência da composição química em aços ferramentas	16
4.5	Aços ferramentas para trabalho a frio	16
4.6	Composição química do AISI D2	17
4.7	Microestrutura do AISI D2	18
4.8	Tratamento térmico em aços ferramentas	20
4.9	Tratamento térmico em aço AISI D2	20
4.9.1	Alívio de tensões	20
4.9.2	Têmpera	21
4.9.2.1	Temperabilidade	21
4.9.3	Revenimento	21
4.10	Tamanho de grãos em aços ferramentas	25
4.11	Nitretação por plasma em AISI D2	26
5	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA PESQUISA	29
5.1	Materiais	29
5.2	Metodologia	30
5.2.1	Identificação e separação das amostras	31
5.2.2	Aferição de massa e diâmetros das facas	32
5.2.3	Aferição das medidas dos seus diâmetros e suas variações	32
5.2.5	Testes das facas temperadas e nitretadas em máquina	34
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
7	CONCLUSÃO	57
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Navarro (2006), o uso de diversos instrumentos na atualidade é um reflexo da contínua evolução humana, que remonta aos primórdios da história, quando o ser humano começou a desenvolver ferramentas para suprir suas necessidades. Essas ferramentas têm aplicações abrangentes, incluindo tanto o corte em âmbito doméstico quanto industrial (REIS, *et al.*, 2019).

A maioria das ferramentas mecânicas metálicas enfrenta condições rigorosas de esforço e desgaste (SILVA, 2008; VOURLIAS *et al.*, 2011). Para garantir o desempenho ideal de uma ferramenta de corte, busca-se um material com propriedades específicas, tais como alta dureza, resistência ao desgaste abrasivo, tenacidade, resistência ao impacto e cisalhamento, a fim de evitar possíveis falhas. Além disso, esses materiais devem apresentar boas propriedades mecânicas em diversas temperaturas de trabalho (REIS *et al.*, 2019). Com o intuito de aprimorar a produtividade e reduzir os custos de fabricação, é essencial promover melhorias no desempenho e na longevidade das ferramentas de corte e de suas propriedades (DAS e RAY, 2012).

Para este trabalho, uma multinacional líder na fabricação de embalagens e produtos relacionados disponibilizou dados e ferramentas de corte para análise. Sua unidade na cidade de Londrina - PR é responsável pela produção de papel industrial, tubos e cones feitos com papel reciclado. Os produtos, especialmente os tubos, são amplamente utilizados em diversos setores industriais, como suporte para enrolamento de papéis, filmes poliméricos, tecidos, fios e outros materiais. Além de sua utilidade nos mais variados segmentos, esses produtos são ecologicamente corretos, sendo fabricados e descartados de forma sustentável, possibilitando a reciclagem. Sua versatilidade de uso e baixo custo torna-se uma escolha atrativa para diversas aplicações industriais (CARDOSO, *et al.*, p. 403-411, 2012).

Uma parcela significativa das principais perdas financeiras e operacionais de uma indústria é atribuída ao desgaste de ferramentas, o que se tornou uma das maiores preocupações da indústria global (OLIVEIRA e SILVA, p. 3-10, 2015). O termo "tribologia", derivado do grego, refere-se ao estudo do atrito e engloba a ciência que investiga a interação entre superfícies em movimento relativo, abrangendo fenômenos como atrito, desgaste e lubrificação (HUTCHINGS, 1992). Conforme

definido pela Norma DIN 50320, o desgaste é caracterizado como a perda progressiva de material na superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo com outro corpo, independentemente de ser sólido, líquido ou gasoso.

Diante dessa questão desafiadora, o presente trabalho aprofunda o estudo dos efeitos microestruturais decorrentes do desgaste do aço ferramenta empregado no corte de tubos de papel de várias dimensões ao longo de períodos de trabalho. Além disso, identifica e caracteriza os parâmetros especificados pelo fornecedor dessa ferramenta. Com base nessas informações, propõe melhorias tanto na fabricação quanto na utilização dessas ferramentas, visando aprimorar seu desempenho e eficiência.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem objetivo de avaliar o desgaste em facas de corte de aço AISI D2 empregadas no processo de corte de tubos de papel.

2.2 Objetivo específico

- Comparar o desgaste do aço AISI D2 em facas utilizadas para cortar tubos de papel de diferentes resistências;
- Avaliar o impacto da temperatura alcançada durante o corte no desgaste e na vida útil das facas em aço AISI D2 para cortar tubos de papel;
- Investigar a relação entre a dureza e a resistência ao desgaste das facas por meio da perda de material e quantidade de corte;
- Comparar a microestrutura e a dureza das facas em diferentes tempos de uso;
- Analisar como o processo de afiação das facas afeta sua microestrutura e propriedades do material;
- Identificar os principais fatores que potencializam o desgaste da ferramenta e propor melhorias na fabricação e utilização das facas para otimizar seu desempenho e vida útil.

3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho foi proposto a partir de um problema industrial em uma empresa produtora de tubos de papel, o processo de fabricação de tubos de papel reciclado envolve diversas variáveis, incluindo o dimensionamento do tubo, como comprimento e espessura da parede. Para garantir que as especificações de comprimento sejam mantidas, são utilizadas facas de aço ferramenta. Porém, devido à variação de resistência dos tubos, essas facas são constantemente submetidas a atrito excessivo, resultando em desgaste no fio de corte.

Nesta empresa existe uma máquina cortadeira que emprega duas facas simultaneamente para o corte dos tubos. Essas facas frequentemente precisam ser trocadas devido à perda de capacidade de corte, o que leva à formação de rebarbas indesejadas nos produtos. Em média, as facas são trocadas três vezes ao dia e enviadas para afiação em uma retífica e retornam à empresa. Cada faca tem, em média, uma vida útil de sete afiações até que não seja mais viável sua utilização devido a redução do seu diâmetro consideravelmente. Gerando impacto na eficiência dos turnos devido a quantidade de *set up*, bem como o elevado custo de facas novas e afiações.

Ao mapear e caracterizar o processo de fabricação e utilização dessas facas, bem como estudar sua vida útil, desgaste e impacto no desempenho, é possível propor projetos de melhorias para tornar o processo de corte de tubos de papel mais eficiente.

A Figura 1 ilustra um exemplo de um tubo fabricado e cortado nas instalações da empresa.

Figura 1 – Tubo de papel fabricado e cortado na empresa do estudo



(a) Tubos de papel

(b) Desvio de qualidade no corte

Fonte: Autoria própria

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Aços para ferramentas

Somente no decorrer do século XX, o uso de aço para ferramentas se popularizou, tornando-se essencial estudar e pesquisar suas diversas possibilidades de usabilidade e desenvolvimento. Isso inclui a aplicação de tratamentos térmicos, químicos e a incorporação de elementos de liga. Desde sua fabricação, que envolve a fundição e a transformação mecânica, até o tratamento térmico final, esses aços exigem cuidados especiais devido às aplicações exigentes a que serão submetidos, o que impõe uma grande responsabilidade em relação às suas propriedades físicas e químicas (CHIAVERINI, 2012).

O desenvolvimento dessas ligas possibilitou condições de serviço mais severas, maior controle dimensional das ferramentas e a redução de problemas como trincas durante os tratamentos térmicos (ASM HANDBOOK, 2004). De acordo com Silva e Mei (2010), essa classificação de aço enfrenta rigorosas solicitações, o que demanda um alto controle de suas propriedades mecânicas e microestrutura. Algumas características fundamentais dos aços para ferramentas incluem:

- Dureza: Os aços para ferramentas possuem alta dureza, o que lhes permite manter a forma e a aresta de corte por mais tempo, mesmo sob condições de trabalho intensas;
- Resistência ao desgaste: Esses aços apresentam resistência ao desgaste, o que é crucial para que as ferramentas mantenham sua eficiência ao longo do tempo de uso, mesmo quando utilizadas em materiais de alta dureza;
- Tenacidade: A tenacidade é uma característica importante para evitar falhas catastróficas das ferramentas sob altas cargas de impacto ou choque;
- Estabilidade dimensional: Os aços para ferramentas possuem boa estabilidade dimensional, o que significa que eles não sofrem deformações significativas durante o uso, garantindo precisão nas operações de corte;
- Resistência à temperatura: Esses aços devem resistir a altas temperaturas de trabalho, sem perder suas propriedades mecânicas ou microestruturais;
- Microestrutura controlada: Uma microestrutura bem controlada é essencial para garantir a uniformidade e consistência das propriedades mecânicas da ferramenta;

- Usinabilidade: Importante para a fabricação das ferramentas, permitindo a obtenção de geometrias complexas com facilidade;
- Capacidade de tratamento térmico: Os aços para ferramentas devem ser facilmente tratáveis termicamente para alcançar as propriedades mecânicas desejadas.

Essas características são cruciais para assegurar o desempenho eficiente das ferramentas e a durabilidade em ambientes industriais desafiadores. Cabe ressaltar que a seleção do aço para ferramentas depende da aplicação específica e das condições de trabalho às quais a ferramenta será submetida (CHIAVERINI, 2012).

4.2 A influência da dureza na ferramenta de corte

A dureza das ferramentas deve ser superior à dureza das peças nas quais serão utilizadas para corte, usinagem ou conformação. De acordo com Callister (2016), a dureza é uma medida da resistência do material à deformação plástica localizada. Quanto maior a dureza do material, maior será sua resistência a esse tipo de deformação localizada. Nos aços a dureza é influenciada principalmente pelo teor de carbono, exceto nos aços com elevados teores de elementos de liga. Para GGD Metals, em aplicações críticas de desgaste, pode-se utilizar dureza superior a 60 HRC.

4.3 Resistência mecânica e ao desgaste em ferramenta de corte

A resistência mecânica dos materiais pode ser definida como a relação entre as cargas externas aplicadas a um corpo e a intensidade das forças internas resultantes (HIBBELER, 2004). Quando utilizadas, as ferramentas devem apresentar a capacidade de suportar esforços, como tração, compressão, torção e flexão, sem falhas ou deformações permanentes do material (CHIAVERINI, 2012).

No caso de aços ferramenta, a resistência ao desgaste é de extrema importância devido à vida útil dessas peças, que estão constantemente em contato com outros materiais. O desgaste é definido como o deslocamento de material causado pelo atrito com partículas duras (DIAS e GOMES, 2003). Esse processo pode ocorrer para metais em contato com outros metais, sólidos não metálicos, líquidos em movimento ou partículas sólidas, bem como partículas de líquido transportadas em um fluxo gasoso (RAMALHO, p. 315-336, 1997).

4.4 Influência da composição química em aços ferramentas

Os elementos de liga mais comuns que estão presentes nos aços ferramenta são prioritariamente carbono, silício, manganês, cromo, vanádio, tungstênio, molibdênio e cobalto. Quando combinados com tratamentos térmicos, esses elementos desempenham um papel fundamental na garantia das propriedades mecânicas das ferramentas. Por exemplo, eles conferem dureza e resistência ao desgaste através da precipitação de carbonetos na matriz da microestrutura (CHIAVERINI, 2012).

Tabela 1 – Habilidade dos elementos de liga em conferir algumas propriedades aos aços para ferramentas e matrizes

Propriedades	Elementos de liga
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	Mn, Mo, Cr, Si, Ni, V
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Tenacidade pelo refino do grão	V, W, Mo, Mn, Cr

Fonte: Chiaverini (2012)

4.5 Aços ferramentas para trabalho a frio

Os aços ferramenta para trabalho a frio, também conhecidos como aços indeformáveis, apresentam baixa susceptibilidade a alterações na forma e dimensões durante o tratamento térmico. Essa característica é favorecida pelo método de têmpera em óleo ou ar, resultando em elevadas durezas.

Esses aços são amplamente utilizados em aplicações que não envolvam aquecimento repetido ou prolongado a temperaturas superiores a 205 a 260°C e quando se requer um controle dimensional preciso. Exemplos de utilização incluem matrizes para trabalhos a frio, como forjamento, estampagem, corte, compactação de pós metálicos, entre outros.

As letras que compõem a nomenclatura desses aços seguem as diretrizes da normativa AISI, representando diferentes tratamentos térmicos ou teores elevados de carbono e cromo. Por exemplo, a classe "A" corresponde a aços temperados em ar (do inglês "Air"), a classe "D" a aços de alto carbono e alto cromo, o grupo "O" a aços temperados em óleo (do inglês "Oil"), e outros indicam elevada resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 2012).

No contexto deste estudo, o foco recai sobre o aço ferramenta AISI D2, que é uma liga Fe-C-Cr com adições de molibdênio e vanádio para aprimorar a resposta ao revenimento. As propriedades desse aço dependem diretamente do tamanho, formato e distribuição dos carbonetos de cromo antes do tratamento térmico, assim como da resposta ao tratamento térmico em si (GOBBI, 2009).

4.6 Composição química do AISI D2

Tabela 2 – Comparação entre composições químicas de AISI D2

Fonte	%C	%Mn	%Mo	%V	%Cr	%Si	%P	%S
Villares Metal	1,50	-	0,95	0,90	12,00	0,30		
GGD Metals	1,50	0,60	1,00	1,00	12,00	0,60		
LabMetal	1,50	0,30	0,95	0,90	12,00	-		
Norma	1,40 a	0,60	0,70 a	1,10	11,0 a	0,60	0,035	0,030
Mercosul	1,60	máx	1,20	máx	13,0	máx	máx	máx

Fonte: Villares metal (2003), GGD Metals, LabMetal via Aços Roman e Norma Mercosul (1997)

Segundo Medanha (2008), os principais efeitos dos elementos nos aços são:

- Carbono (C): Elemento responsável pela formação do eutético durante a solidificação. Contribui para a formação da martensita na têmpera e a precipitação dos carbonetos secundários durante o revenimento;
- Cromo (Cr): Eleva a temperabilidade, além da precipitação de carbonetos durante o endurecimento secundário pelo revenimento;
 - Molibdênio (Mo) e Vanádio (V): Juntos favorecem a precipitação de carbonetos no endurecimento secundário durante o revenimento;
 - Fósforo (P): Em teores superiores a 0,03% causa fragilidade significativa;
 - Enxofre (S): Causa fragilidade acima dos teores permitidos;
 - Silício (Si): Atua como desoxidante e como se dissolve na ferrita e tende a decompor os carbonetos. Aumenta a resistência à corrosão e a resistência à tração, mas prejudica a soldabilidade do material;
 - Manganês (Mn): Age como desoxidante (até 0,5%) e, também, como dessulfurante (MnS). Em teores mais elevados, melhora a temperabilidade apreciavelmente. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após a têmpera.

4.7 Microestrutura do AISI D2

A microestrutura do aço AISI D2 é composta por matriz ferrítica e carbonetos de cromo. Os carbonetos eutéticos formam uma rede celular interconectada após a solidificação, apresentando tamanho grosseiro e anisotrópico. Essas características são cruciais para o processamento e a aplicabilidade do aço como ferramenta, bem como para sua resposta ao tratamento térmico (DEVI e MOHANTY, 1998). É fundamental quebrar essa rede eutética durante as operações de deformação do lingote por forjamento e/ou laminação, transformando-a de uma estrutura celular em estrias (LYMAN e BOYER, 1978).

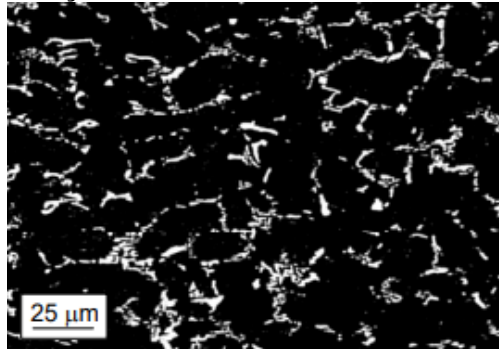
O tamanho de grão em um material policristalino influencia em suas propriedades mecânicas, condutividade elétrica, condutividade térmica, entre outras características. Grãos menores geralmente estão associados a materiais mais duros e resistentes, enquanto grãos maiores podem resultar em maior ductilidade e tenacidade (VANDER VOORT, 1999).

Os principais responsáveis pela resistência ao desgaste desse aço são os carbonetos eutéticos (ZUM GAHR, 1980). Essa estrutura em rede é quebrada durante o trabalho mecânico a quente no lingotamento, e a intensidade da quebra está relacionada ao grau de deformação no lingote. Portanto, a distribuição desses carbonetos será maior e em pequenos tamanhos, resultado de um maior grau de deformação que está relacionado à intensidade da quebra da rede (MEDANHA, 2008).

Essa redistribuição de carbonetos é responsável pela forte anisotropia de propriedades entre as direções longitudinal e transversal das barras. Isso confere resistência e melhora a resposta ao tratamento térmico, onde os carbonetos estão homogeneamente distribuídos (SOUSA, p. 861-868, 2009).

A Figura 2 representa a microestrutura do AISI D2 no estado recozido, onde as partes brancas são os carbonetos e a região escura representa a matriz ferrítica. Observa-se a presença de carbonetos em rede no corte transversal de um tarugo cilíndrico, sendo uma estrutura indesejável devido à fragilização do material.

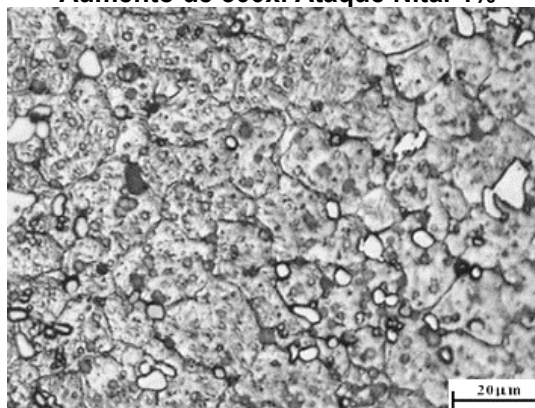
Figura 2 – Distribuição em rede dos carbonetos de cromo no AISI D2



Fonte: Medanha (2004)

De acordo com Silva e Mei (2010), para obter um melhor desempenho do aço AISI D2 em trabalho a frio, a microestrutura ideal é composta por uma matriz ferrítica com distribuição uniforme de carbonetos de cromo. A Figura 3 exemplifica uma microestrutura normalmente encontrada em aços ferramentas destinados a trabalho a frio. Assim, quanto mais arredondados, menor o tamanho e a boa distribuição dos carbonetos no aço AISI D2, maior será a resposta positiva ao tratamento térmico, especialmente em relação à deformação e resistência à fratura do material. Essa microestrutura em questão refere-se ao aço para ferramentas recozido, sugerindo que o tratamento térmico tenha sido realizado conforme recomendações (MEDANHA, 2008).

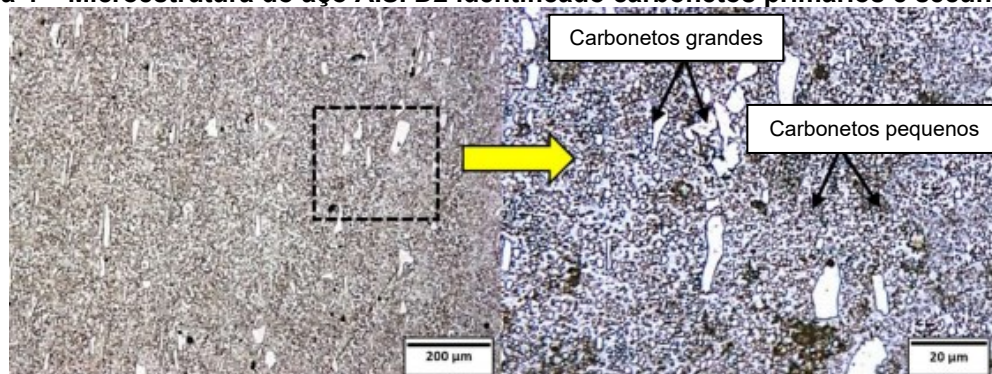
Figura 3 – Microestrutura do aço ferramenta AISI D2 austenitizada a 1010°C e resfriada em óleo. Aumento de 500x. Ataque Nital 4%



Fonte: Gobbi (2009)

A Figura 4 ilustra a dissolução dos carbonetos eutéticos e secundários com o aumento da temperatura de austenitização. Na Figura 4 é possível identificar os carbonetos primários (grandes) e os secundários (pequenos) em determinada região da microestrutura do aço AISI D2.

Figura 4 – Microestrutura do aço AISI D2 identificado carbonetos primários e secundários



Fonte: Adaptado Mohammed, *et al.* (2018)

4.8 Tratamento térmico em aços ferramentas

O tratamento térmico é uma etapa fundamental para alcançar as propriedades finais desejadas nos aços, especialmente nos aços ferramenta, apresentam uma ampla faixa de temperaturas para tratamento. As temperaturas mais elevadas são recomendadas para aços rápidos, visando à formação de granulação grosseira, e requerem cuidados especiais, como dois patamares de aquecimento. Isso é necessário para evitar a decarbonetação nos aços com elevados teores de carbono durante o tratamento térmico e possíveis empenamentos. Isso se faz necessário para assegurar a obtenção das propriedades mecânicas desejadas (CHIAVERINI, 2012).

4.9 Tratamento térmico em aço AISI D2

4.9.1 Alívio de tensões

O alívio de tensões é uma etapa importante que deve ocorrer após a usinagem e antes da têmpera em peças que tiveram grande quantidade de material removido. Conforme indicado por Villares (2003), esse procedimento envolve um aquecimento lento até temperaturas entre 500 e 600 °C, seguido de um resfriamento controlado em forno até alcançar 200 °C. Se o alívio de tensões for aplicado após uso da ferramenta já tratada termicamente, ele deve ser realizado a uma temperatura 50 °C abaixo da temperatura do último revenimento. Por outro lado, de acordo com GGD Metals, o tratamento de alívio de tensões deve ser conduzido entre 550 e 650°C, com duração mínima de 2 horas. Após esse processo, é recomendado resfriar lentamente no forno até 300°C e, em seguida, utilizar um resfriamento mais rápido em ambiente calmo.

4.9.2 Têmpera

Segundo Villares (2003), o aquecimento necessário para a têmpera das ferramentas deve ocorrer na faixa de 1010 a 1030 °C. Recomenda-se realizar um pré-aquecimento nas ferramentas antes desse processo. Para o resfriamento adequado, é indicado utilizar um óleo apropriado com agitação e aquecido entre 40 e 70 °C, ou um banho de sal fundido mantido entre 500 e 550 °C, seguido por um resfriamento final em ar calmo.

Já para GGD Metals, o procedimento de austenitização requer aquecimento entre 1020 e 1040 °C. No entanto, antes da austenitização, é essencial realizar dois pré-aquecimentos para garantir uma temperatura homogênea e minimizar distorções. O tempo de aquecimento é de 1 hora para cada 25 mm de espessura, acrescido de 1 hora para cada 25 mm adicionais. O resfriamento pode ser feito utilizando ar, óleo morno, banho de sal ou pressão de nitrogênio em forno a vácuo.

4.9.2.1 Temperabilidade

A temperabilidade é uma propriedade que determina a distribuição e a profundidade da dureza obtida pelo tratamento térmico de têmpera (MELLOY, 1977). Ela representa a medida da profundidade na qual a microestrutura apresenta-se com 50% de martensita e a dureza correspondente (CHUEN, 1979). Essa característica é essencial, pois quanto maior a temperabilidade, maior será a penetração da dureza após a têmpera. Nos aços-carbono comuns, a temperabilidade é geralmente baixa, especialmente em seções superiores a 25 mm. No entanto, alguns elementos de liga, como o cromo, podem contribuir para melhores resultados nesse aspecto (CHIAVERINI, 2012).

4.9.3 Revenimento

O revenimento deve ser realizado imediatamente após a têmpera, de acordo com Villares (2003), assim que a temperatura atingir 60 °C. No entanto, para GGD Metals, o revenimento ocorre em 70 °C. Ambos os métodos requerem a realização de dois revenimentos com intervalos até que a peça esfrie à temperatura ambiente. A faixa de temperatura para o revenimento dependerá da dureza desejada para a aplicação final,

conforme ilustrado na Figura 7. Em aplicações com desgaste crítico, a GGD Metals recomenda uma dureza superior a 60 HRC. Se o material for posteriormente submetido a um tratamento de nitretação, o revenimento deve ser obrigatoriamente realizado em alta temperatura.

A têmpera e o revenimento do aço ferramenta AISI D2 conferem a ele diversas propriedades metalúrgicas, tais como endurecimento, teor de austenita retida e resistência ao desgaste. As principais características dessas etapas são a temperatura de austenitização e do revenimento.

É necessária para obter boas propriedades mecânicas que os carbonetos de cromo, molibdênio e vanádio sejam dissolvidos na matriz, pois:

- Favorece o endurecimento da martensita na têmpera, sendo principalmente característica da dissolução dos carbonetos de cromo;
- Diminui o teor de austenita retida após a têmpera;
- Favorece o endurecimento secundário obtido por revenimento com carbonetos de cromo, molibdênio e vanádio dissolvidos.

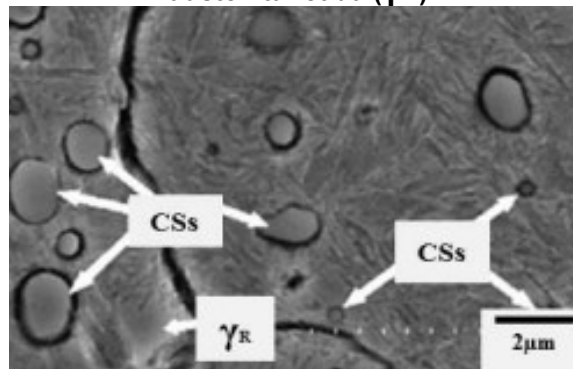
Observa-se que, com o aumento da temperatura de austenitização, há um incremento no teor de carbono dissolvido na matriz, ocasionado pela dissolução dos carbonetos. O carbono desempenha um papel fundamental no endurecimento da martensita, mas também influencia a temperatura do início de sua formação (GUILLERMET, 1991).

A "Austenita Retida" refere-se à austenita não transformada durante o resfriamento de têmpera, formada devido ao aumento do teor de carbono dissolvido na austenita, o que diminui a temperatura de formação da martensita. Portanto, é crucial controlar a temperatura de austenitização para obter melhores resultados na têmpera. A combinação desses efeitos é responsável pela resistência à fratura do aço. Os teores de Mo e V dissolvidos na matriz promovem um endurecimento secundário eficiente durante o revenimento. O teor de Cr, além de aumentar a temperabilidade, também contribui para o sucesso do endurecimento secundário (HONEYCOMBE, 1981).

Durante o revenimento, a quantidade de austenita retida proveniente da têmpera é reduzida, mas esse processo pode levar ao excessivo amaciamento da matriz e coalescimento dos carbonetos, resultando na diminuição da dureza. A Figura 5 apresenta uma micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura de uma

amostra de aço AISI D2 submetida a tratamento térmico convencional, na qual é possível observar uma matriz revenida com a precipitação de carbonetos secundários (CSs) de diferentes tamanhos e a presença de austenita retida (γ_R) (DAS *et al.*, 2010).

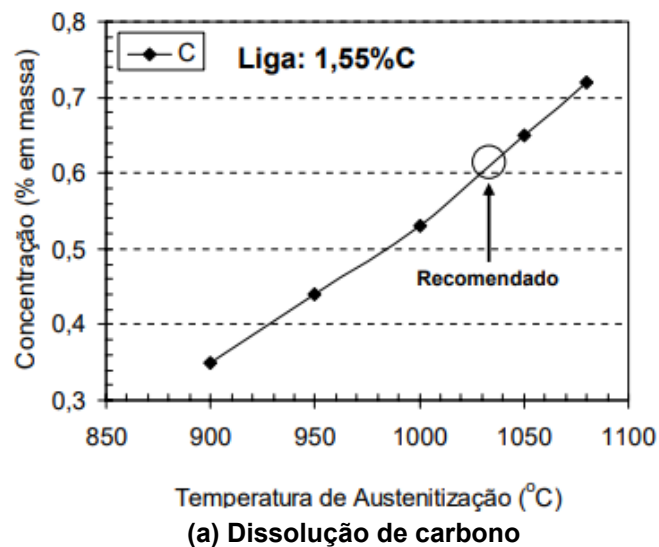
Figura 5 – Micrografia em MEV de amostras de aço AISI D2 identificado carbonetos (CSs) e austenita retida (γ_R)

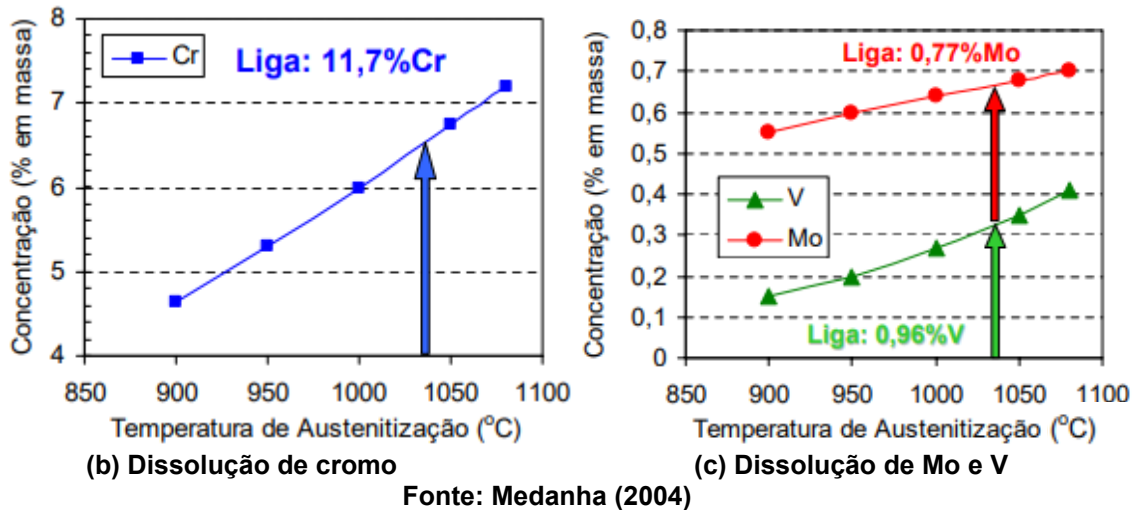


Fonte: Das *et al.* (2010)

A Figura 6 representa a dissolução do carbono de um aço ligado com 1,55 %C em massa, em função da temperatura de austenitização. Da qual (a) identifica a concentração de dissolução do carbono e na temperatura de austenitização, bem como representa (b) para cromo e (c) para molibdênio e vanádio.

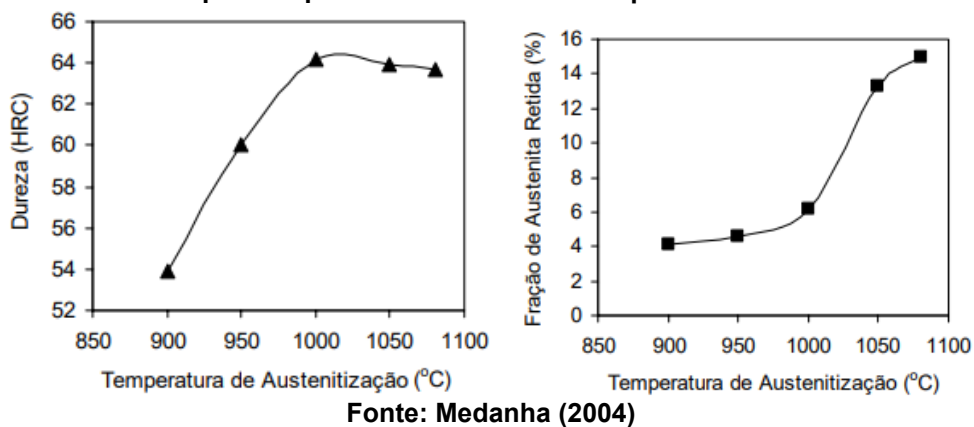
Figura 6 – Dissolução do carbono de um aço ligado com 1,55 %C, 11,7 %C, 0,77 % Mo durante a austenitização





A Figura 7 apresenta uma comparação entre a dureza e a quantidade de austenita retida em função da temperatura de austenitização. Observa-se que a dureza aumenta até cerca de 1000°C e, em seguida, diminui. Esse aumento inicial da dureza é resultado do maior teor de carbono dissolvido na matriz, enquanto o aumento da quantidade de austenita retida está relacionado à redução da temperatura de têmpera. Esses dois parâmetros estão diretamente relacionados, pois o aumento da dureza até 1000°C é acompanhado por um leve aumento da quantidade de austenita retida. No entanto, a partir de 1000°C, a quantidade de austenita retida aumenta significativamente, e como essa fase possui baixa dureza, resulta em uma diminuição na dureza geral do aço.

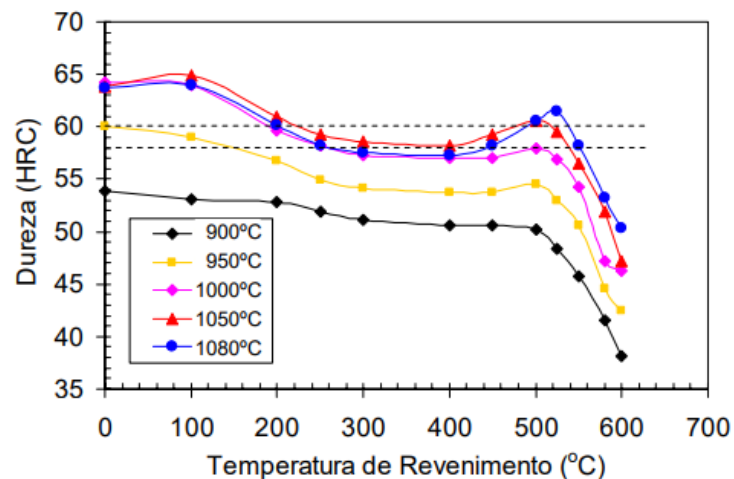
Figura 7 – Relação de dureza e austenita retida pela temperatura de austenitização de dois corpos temperados em óleo a vácuo por 30 minutos



O tratamento de revenimento após a têmpera é de extrema importância para garantir a dureza e resistência adequadas do aço. A Figura 8 ilustra as diferentes

temperaturas de revenimento para diversas temperaturas de austenitização durante a têmpera do aço D2. Temperaturas próximas de 500°C oferecem maior potencial para o endurecimento secundário, intensificando-se à medida que a temperatura de austenitização aumenta e a dissolução dos carbonetos de Mo e V se torna mais efetiva durante a austenitização (MEDANHA, 2008).

Figura 8 – Curvas de revenimento para o aço AISI D2 em diferentes temperaturas de austenitização



Fonte: Medanha (2008)

Verifica-se que durezas elevadas, em torno de 58 a 60 HRC, apresentam melhor resistência ao desgaste. Em temperaturas próximas de 1000°C, onde o potencial de endurecimento secundário é baixo, essa dureza só é alcançada com temperaturas de revenimento muito próximas a 200°C. Por outro lado, para austenitização acima de 1000°C, a dureza desejada pode ser obtida tanto próxima a 200°C quanto acima de 500°C, onde há um maior potencial para o endurecimento secundário. É importante notar que quanto maior a temperatura de austenitização, maior a fração de austenita retida, o que leva a alterações nas propriedades de resistência do aço (MEDANHA, 2008).

4.10 Tamanho de grãos em aços ferramentas

O tamanho de grão é importante na análise da microestrutura de materiais, principalmente em metais e ligas metálicas. Essa condição fornece informações valiosas sobre a estrutura cristalina do material, que está diretamente relacionada às suas propriedades mecânicas, como resistência, dureza, ductilidade e tenacidade.

Algumas informações importantes que podem ser obtidas por meio da medição de tamanho de grão são:

- Tamanho médio de grão: A medição permite determinar o tamanho médio dos grãos presentes na microestrutura do material. Grãos menores estão geralmente associados a uma maior resistência e dureza, enquanto grãos maiores podem conferir maior ductilidade;
- Distribuição de tamanho de grão: Além do tamanho médio, a análise revela a distribuição de tamanho de grão, ou seja, como os tamanhos dos grãos variam na microestrutura. Uma distribuição mais homogênea pode indicar um material mais uniforme e previsível em suas propriedades mecânicas;
- Orientação dos grãos: A medição pode fornecer informações sobre a orientação dos grãos na microestrutura do material. A orientação dos grãos pode influenciar a anisotropia das propriedades, ou seja, a variação das propriedades em diferentes direções;
- Mudanças após tratamentos térmicos: A medição de tamanho de grão pode ser usada para monitorar mudanças na microestrutura após tratamentos térmicos, como recozimento, têmpera ou têmpera e revenimento. Essas mudanças podem afetar as propriedades mecânicas finais do material;
- Avaliação de defeitos e inclusões: A análise de tamanho de grão pode ajudar a identificar defeitos, como contornos de grão irregulares, e inclusões que podem impactar a qualidade e a resistência do material (Callister, 2016).

4.11 Nitretação por plasma em AISI D2

A nitretação a plasma é um processo termoquímico conhecido como nitretação iônica, que utiliza a deposição assistida por plasma para melhorar as propriedades do material. Esse processo resulta em aprimoramentos significativos nas características do material, como resistência à corrosão, oxidação, adesão e propriedades mecânicas de superfície, incluindo dureza, fadiga, fricção e resistência ao desgaste (Varavallo *et al.*, 2010).

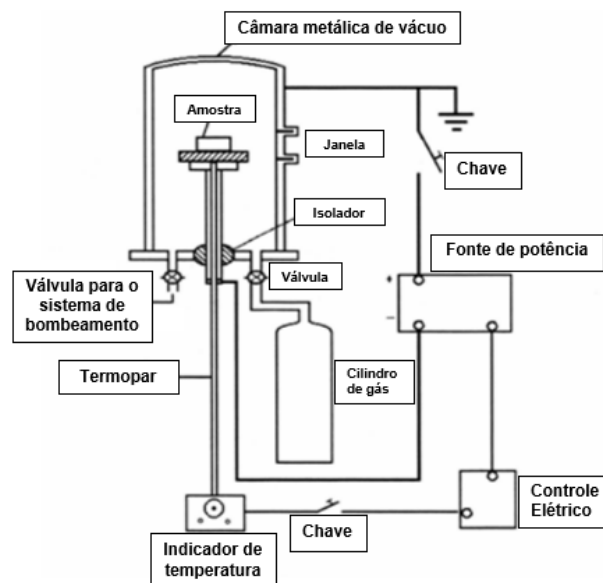
De acordo com Gomes *et al.* (2003), a nitretação é uma tecnologia empregada para melhorar as propriedades de superfície, conferindo maior vida útil a componentes

sujeitos a fadiga, desgaste e corrosão. O processo de nitretação em aços é normalmente conduzido em uma faixa de temperatura entre 400°C e 650°C. Nessa temperatura, a superfície do componente a ser tratado é polarizada como um cátodo em uma descarga de plasma de N₂ puro ou uma mistura de N₂/H₂ operando em 400 a 1000V, ou ainda, pulsada com frequências de dezenas de kHz. Os íons de nitrogênio presentes na descarga de plasma são adsorvidos na superfície do componente e, por meio de um processo físico-químico complexo, difundem-se termicamente em camadas profundas, com espessuras que podem variar de frações de milímetros a alguns milímetros de profundidade. Entretanto, para obter camadas modificadas úteis, são necessários tempos de nitretação relativamente longos, chegando a dezenas de horas, sob as condições físico-químicas adequadas.

Quando a solução intersticial sólida de nitrogênio na região nitretada excede o limite de solubilidade, ocorre a precipitação dos nitretos dos componentes do aço. A formação seletiva de determinados nitretos depende dos parâmetros do processo, como composição do gás, densidade de íons de nitrogênio, pressão, temperatura da amostra e tensão de polarização. Dentre os nitretos mais desejáveis para serem sintetizados na camada composta, destacam-se os Fe₄N e o Fe₂₋₃N, devido às suas propriedades tribológicas, como maior dureza e resistência ao desgaste (Gomes *et al.*, 2003).

A Figura 9 esquematiza o funcionamento do equipamento utilizado no processo de nitretação a plasma (Gomes *et al.*, 2003).

Figura 9 – Esquema de esquematização de equipamento de nitretação por plasma

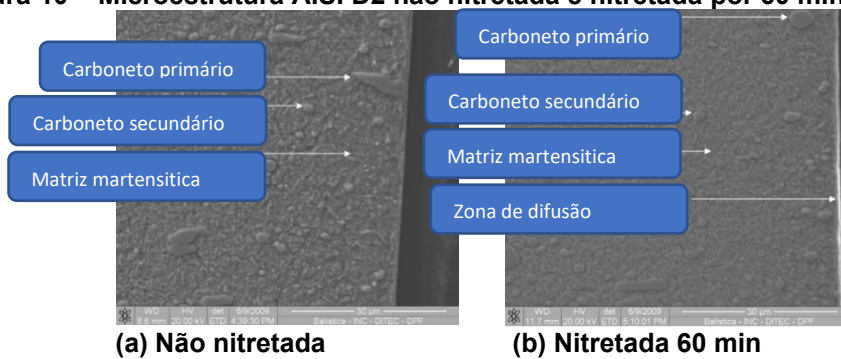


Fonte: Froehlich (2003)

Para Gobbi (2009) a nitretação à baixa temperatura para o AISI D2 proporciona aumentos consideráveis na resistência ao desgaste. A nitretação do D2 acarreta o aumento na microdureza, sem que haja mudança considerável na tenacidade (Souza, *et. al*, 2009).

Tem-se na Figura 10 as microestruturas do aço AISI D2 não nitretado e nitretado, identificando os carbonetos primários, secundários, a matriz martensítica e a zona de difusão.

Figura 10 – Microestrutura AISI D2 não nitretada e nitretada por 60 minutos por MEV



(a) Não nitretada

(b) Nitretada 60 min

Fonte: Gobbi (2009)

5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA PESQUISA

5.1 Materiais

O presente trabalho utilizou 15 facas em aço ferramenta AISI D2, que passaram por tratamento térmico de têmpera e revenimento. A empresa solicita facas em AISI D2 com 120 mm de diâmetro e expressão de corte de 20 mm, apresentando um fio de corte na extremidade, como indicado no detalhe "A" da Figura 11. A única exigência da empresa é o dimensionamento preciso para um encaixe perfeito na máquina de corte, bem como o tratamento térmico. Outras especificações ou propriedades desejadas não são solicitadas, embora a própria não faça a verificação da eficiência dos tratamentos realizados.

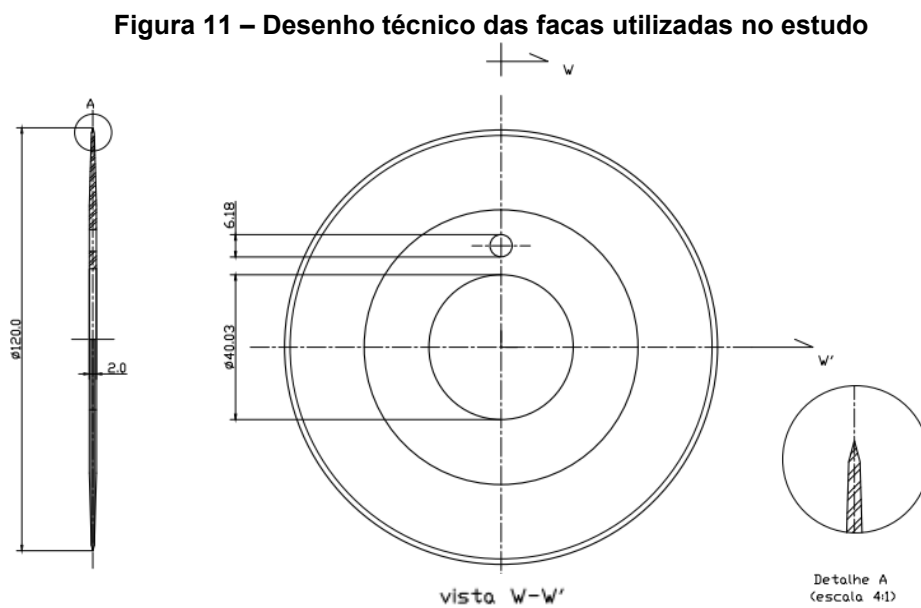
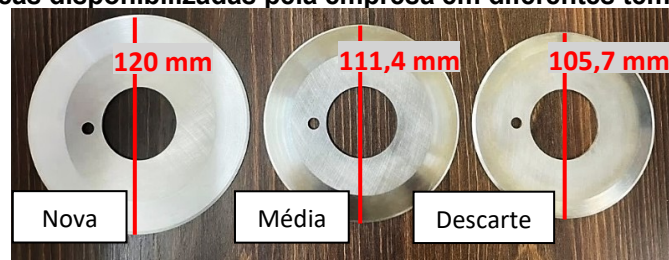


Figura 12 – Facas disponibilizadas pela empresa em diferentes tempos de vida útil

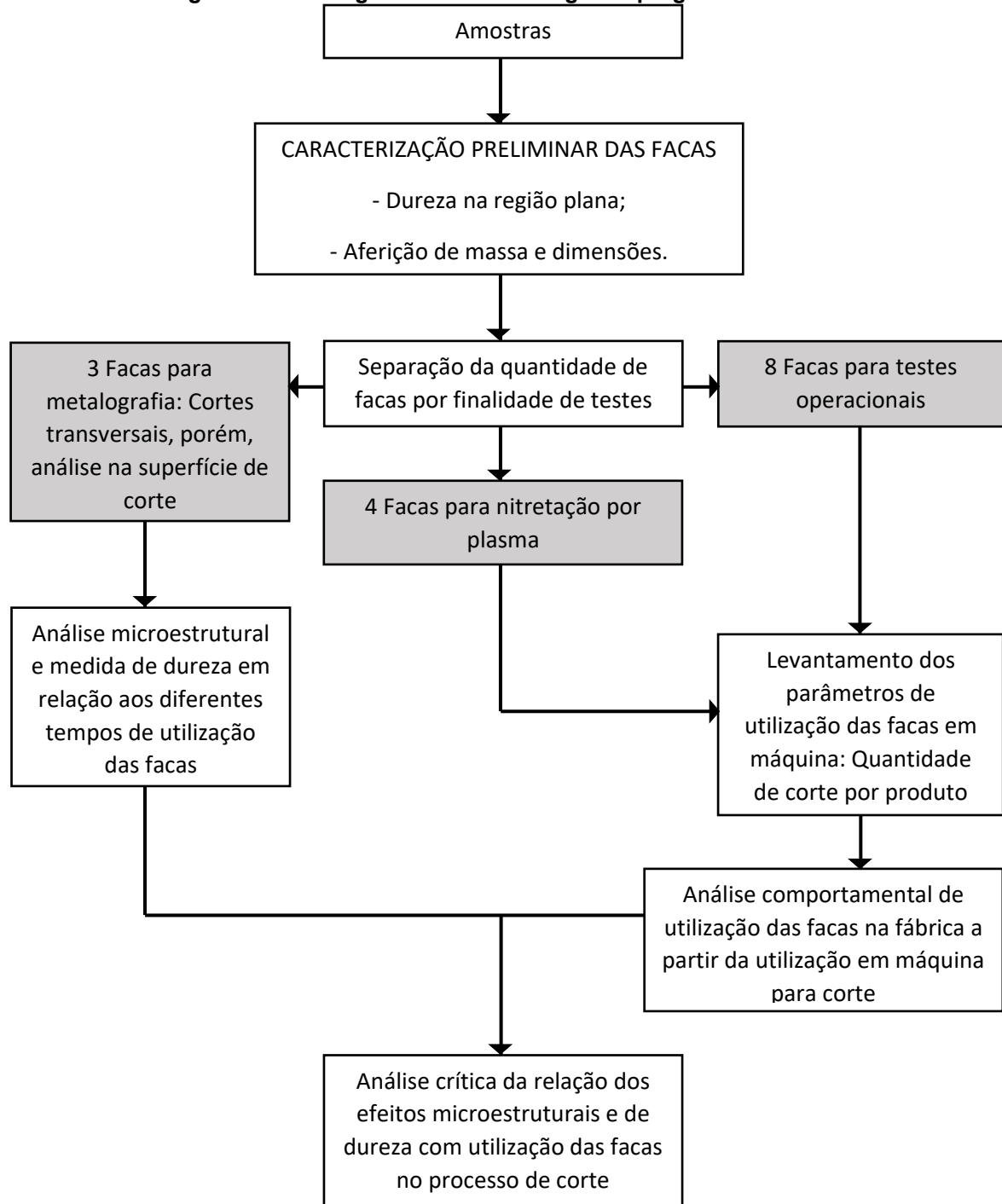


Sendo o diâmetro indicado acima a média de todas as facas disponibilizadas pela empresa para os testes.

5.2 Metodologia

O fluxograma da Figura 13 sequencia as etapas realizadas no trabalho, do qual divide-se entre os fluxos e caminhos que, mesmo distintos, vão ser considerados para a análise final das amostras.

Figura 13 – Fluxograma da metodologia empregada no trabalho

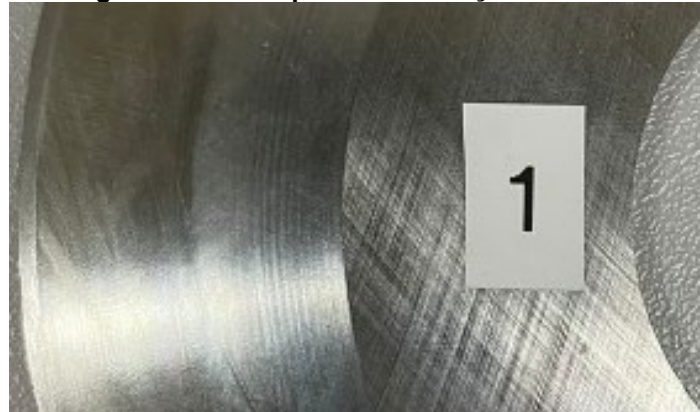


Fonte: Autoria própria (2023)

5.2.1 Identificação e separação das amostras

Com o auxílio de uma etiquetadora, as 15 facas foram numeradas sequencialmente de 1 a 15, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de numeração das facas



Fonte: Autoria própria (2023)

Das 15 facas, as 13 primeiras são novas, recém-recebidas do fornecedor tratadas termicamente por têmpera e revenimento. Dentre essas 13, 8 facas foram destinadas para testes em máquina, sendo que 4 delas passaram por tratamento termoquímico de nitretação por plasma, e 1 foi designada para corte de amostras e captação de imagens de microestrutura. Além disso, há 1 faca em condição de trabalho de médio prazo, que já passou por processos de afiação em retífica, mas ainda possui potencial de utilização. Por fim, tem-se 1 faca que se encontra no final de sua vida útil, tendo perdido dimensões significativas devido a múltiplas afiações em seu fio de corte. Essas condições das facas estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Divisão da quantidade de facas por estado (nova, afiada e descartada) e finalidade

Estado	Finalidade	Quantidade
Nova	Testes operacional + ensaio de dureza	8
Nova	Nitretação + teste operacional + ensaio de dureza	4
Nova	Metalografia + ensaio de dureza	1
Afiada (meia vida)	Metalografia + ensaio de dureza	1
Afiada (descarte)	Metalografia + ensaio de dureza	1

Fonte: Autoria própria (2023)

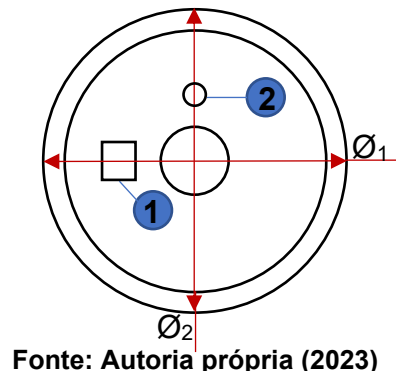
5.2.2 Aferição de massa e diâmetros das facas

A partir de uma balança semi-analítica da marca Gehaka modelo BK-300 disponível no laboratório disponível na empresa do estudo, as 15 facas foram pesadas uma por vez seguindo a ordem crescente da identificação relatada acima. As massas foram obtidas e anotadas considerando 3 casas decimais. Essas medidas foram obtidas nas mesmas facas antes e após serem testadas em máquina e serem desgastadas para que a variação seja comparada e discutida.

5.2.3 Aferição das medidas dos seus diâmetros e suas variações

Com um paquímetro analógico universal de 300mm e precisão de 0,02 mm, mediu-se o diâmetro de cada faca em duas direções, tendo como referência a posição do adesivo de numeração (ponto 1) e o furo de encaixe em máquina (ponto 2), como ilustrado na Figura 15 abaixo. Para as duas medidas encontradas em cada faca, foi considerado um diâmetro médio.

Figura 15 – Esquema das posições de aferição dos diâmetros das facas



Fonte: Autoria própria (2023)

Com o relógio comparador, mediu-se a variação de raio em centésimos de milímetros por todo o perímetro do fio do corte. O relógio ficou posicionado de forma que a esfera da ponta de leitura ficasse exatamente sob o fio de corte como ilustrado na Figura 16. Então, a rotação da faca pelo torno foi realizada manualmente para que pudesse identificar as variações na medida de forma minuciosa.

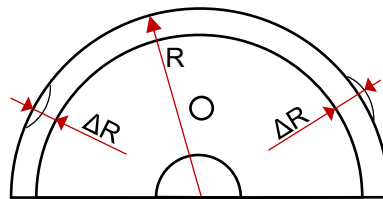
Figura 16 – Fixação e posicionamento do relógio comparador no fio de corte das facas



Fonte: Autoria Própria (2023)

Medindo-se os relevos e declives em relação ao raio de cada faca como representado na figura 17.

Figura 17 – Esquemática de identificação de relevos e declives no fio de corte das facas



Fonte: Autoria própria (2023)

5.2.4 Nitretação por plasma das facas AISI D2

Quatro das facas fornecidas como amostras foram nitretadas por plasma por uma empresa terceira, da qual realizou o procedimento seguindo os parâmetros descritos no Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros da nitretação por plasma das facas AISI D2

Parâmetro	Valor
Temperatura	400° C
Pressão	350 Pa
Atmosfera	80% vol. H ₂ / 20% vol. N ₂
Tempo	60 min

Fonte: Gobbi (2009) e Souza, et. al. (2009)

A Figura 18 ilustra o equipamento onde foi realizado o tratamento termoquímico de nitração por plasma.

Figura 18 – Ilustração do processo do fornecedor do tratamento de nitretação por plasma



Fonte: TTI Plasma (2023)

As peças destinadas ao tratamento foram previamente limpas sem ficar quaisquer resquícios de óleo ou graxa em sua superfície. As facas foram dispostas no interior do forno para que não encostassem entre si e nem em qualquer outra região, mantendo toda a sua área exposta para o tratamento. Na sequência o forno foi ligado até 400 °C.

5.2.5 Testes das facas temperadas e nitretadas em máquina

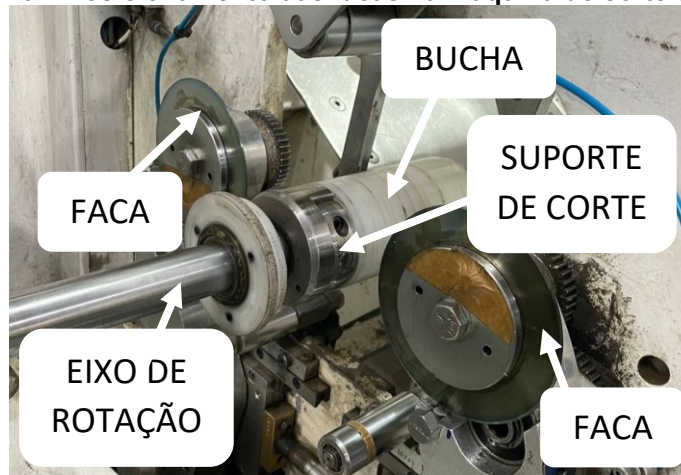
As facas foram empregadas em uma máquina para realizar cortes em tubos com diferentes resistências. Das 15 facas utilizadas, 8 delas estavam em condição de nova, ou seja, dentro dos parâmetros dimensionais de Ø120mm fornecidos pelo fornecedor, fabricadas em aço AISI D2 temperado e revenido. Além disso, 4 facas também estavam em estado novo, mas foram submetidas a um tratamento químico de superfície de nitretação por plasma.

As facas foram usinadas pelo fornecedor para garantir um encaixe perfeito na máquina. Durante o processo de corte, as facas trabalham em pares, os tubos giram a uma velocidade de 200rpm, e ambas as facas encostam para realizar o corte. No momento do corte, as facas permanecem estáticas, mas logo após o corte do tubo, elas sofrem uma rotação de aproximadamente 20° em seu eixo, resultando em um próximo corte que não será realizado exatamente no mesmo ponto.

Essa rotação das facas pode gerar variações na posição dos cortes subsequentes e influenciar na qualidade e precisão do processo de corte. Portanto, é importante levar em consideração essa rotação das facas ao analisar os resultados obtidos durante os testes em máquina.

A Figura 19 ilustra o procedimento de encaixe do par de facas na máquina. O tubo é inserido automaticamente na bucha durante a operação do equipamento. As facas se aproximam do tubo, efetuando o corte até encostarem-se no suporte de corte, que permanece estático, funcionando apenas como base para assegurar que todas as fitas de papel que compõem a espessura do tubo sejam cortadas adequadamente.

Figura 19 – Posicionamento das facas na máquina de corte de tubos

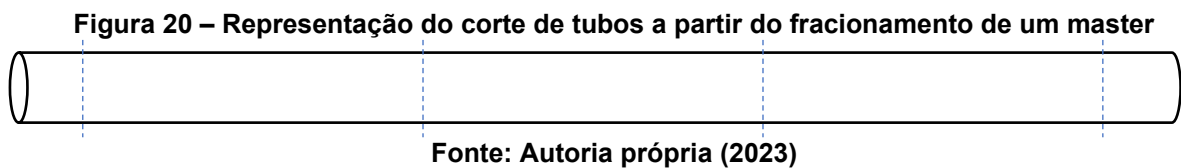


Fonte: Autoria própria (2023)

A máquina cortadeira possui um sistema integrado de controle de parâmetros, o qual permite calibrar a velocidade do eixo de rotação com a dos tubos e calcular a quantidade de tubos a serem cortados. Esse sistema de controle possibilita ajustar precisamente as configurações do corte, garantindo a eficiência e a exatidão do processo de corte dos tubos.

O tubo master é utilizado para o fracionamento em tubos menores, conforme ilustrado na Figura 20. O comprimento e outras propriedades dos tubos menores são

determinados pelas especificações do cliente da empresa do estudo. Portanto, o tubo master possui um comprimento fixo, mas para cada um deles, pode resultar em mais cortes. No contexto deste trabalho, a quantidade de vezes em que as facas cortaram foi considerada em vez do número total de tubos resultantes. Por exemplo, se um master é fracionado em 3 tubos, o computador inserido na máquina mostrará 3 tubos, mas as facas cortaram 4 vezes, pois as extremidades do master são descartadas.



5.2.6 Corte de amostras e embutimento

As facas foram categorizadas em quatro grupos: 1 para descarte, 1 em meia-vida, 1 nova e 1 nova submetida ao processo de nitretação por plasma. Utilizando cortadora de metal com disco cerâmico e sistema de refrigeração por água, foram retiradas duas fatias cortadas lentamente de cada faca, abrangendo desde o centro até o fio de corte. Em seguida, cada fatia foi dividida em duas partes para permitir o processo de embutimento, conforme pode ser observado na Figura 22.

Figura 21 – Corte de amostras para embutimento



Fonte: Aatoria própria (2023)

Utilizou-se a embutidora Arotec PRE 30Mi para realizar o embutimento de todas as amostras, os parâmetros foram mantidos em pressão entre 100 e 150 kgf/cm², temperatura acima de 120°C e como substrato utilizou-se baquelite.

Figura 22 – Embutimento



(a) Embutidora



(b) Amostra no compartimento
Fonte: Autoria própria (2023)



(c) Inserção de baquelite

Portanto, obteve-se 7 amostras a partir das facas, das quais foram embutidas na seção longitudinal e transversal para cada parte retiradas, como exemplifica a Figura 23.

Figura 23 – Amostras com cortes longitudinal e transversal



Fonte: Autoria própria (2023)

Para as amostras com cortes longitudinais, considerou-se para análise a superfície de corte das facas, a face de contato com os tubos, pois, devido a sua baixa espessura, dificultou-se que o corte fosse precisamente na região central dela. Para o estudo em questão, é melhor que a análise microestrutural acontece na face superficial da faca para que seja possível identificar variações na região mais próxima ao atrito enquanto as facas operam em máquina.

5.2.7 Preparação de amostras para análise microestrutural

As superfícies das amostras foram preparadas para a análise de microestrutura utilizando lixas d'água acopladas em uma lixadeira e politriz elétrica com controle de vazão d'água. O processo de lixamento iniciou com a amostra fixa manualmente sobre a lixa em rotação, buscando um tensionamento uniforme ao longo do tempo, embora seja difícil controlá-lo completamente manualmente. Esse procedimento foi repetido

com a troca de lixas, começando com granulometria 200, passando por 400, 600 e finalizando com 1200. A cada troca de lixa, a amostra foi rotacionada em 90° em relação à posição anterior para garantir a homogeneidade do lixamento em todas as direções. Após a etapa de lixamento, a mesma máquina foi utilizada para realizar o polimento das amostras. Para esse fim, um tecido de polimento com abrasivo de alumina em suspensão foi utilizado.

Para melhor visualização dos grãos do aço, realizou-se ataque químico com solução ácida de nital 4%, indicado no trabalho de VATAVUK, *et. al.*, (2003)

5.2.8 Microscópio Óptico

Foram obtidas imagens da microestrutura das amostras utilizando um microscópio óptico em 100x e 500x.

Figura 24 – Microscópio Óptico



Fonte: Autoria própria (2023)

5.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Após a preparação completa das amostras, incluindo os passos de corte, lixamento, polimento e ataque químico, procedeu-se à obtenção de imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em ampliações de 500x, 1000x, 5000x e 10000x dos cortes transversais das quatro amostras distintas. Estas amostras consistiam em uma lâmina na condição de descarte, uma na condição de meia-vida, uma nova e outra na condição temperada e nitretada por plasma. Utilizou-se o

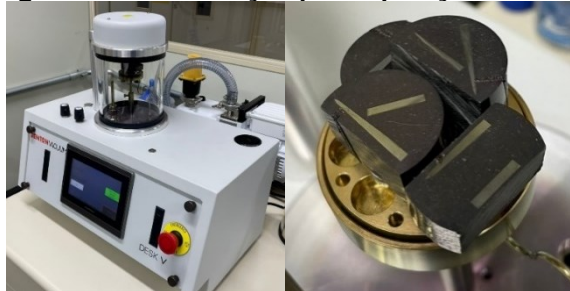
equipamento da marca Tescan Vega disponível no laboratório multiusuário da UTFPR.

Para a metalização das amostras, foi empregado um evaporador (representado na Figura 25, da marca Denton Vacuum disponível no laboratório multiusuário da UTFPR) com o propósito de depositar uma camada fina de ouro sobre cada amostra. Esse procedimento envolve a evaporação controlada do metal alvo (ouro) em uma câmara de vácuo. Os átomos de metal evaporado são, então, depositados na superfície da amostra, formando uma camada condutora e delgada.

A fim de possibilitar a visualização de seções ultrafinas sob o feixe de elétrons, utilizou-se uma fita de carbono extremamente fina. Tal abordagem tem por finalidade minimizar a dispersão dos elétrons e conferir à amostra a transparência necessária para a análise.

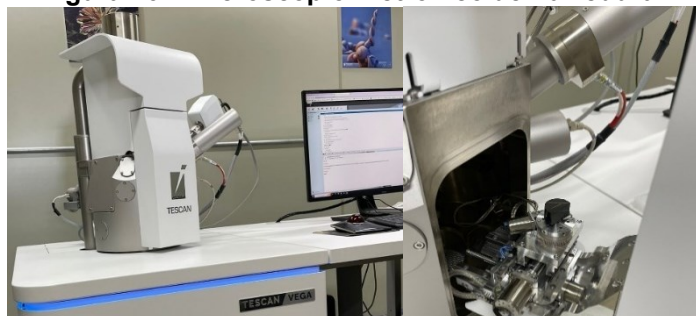
Posteriormente, as amostras foram inseridas no microscópio conforme ilustrado na Figura 26. As imagens foram capturadas pelo detector de elétrons de elétrons secundários (SE) e, através do Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), foi possível obter as curvas características referentes à composição química de cada amostra. Todo procedimento foi realizado em laboratório multiusuário disponível na UTFPR.

Figura 25 – Metalização por deposição de ouro



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 26 – Microscópio Eletrônico de Varredura

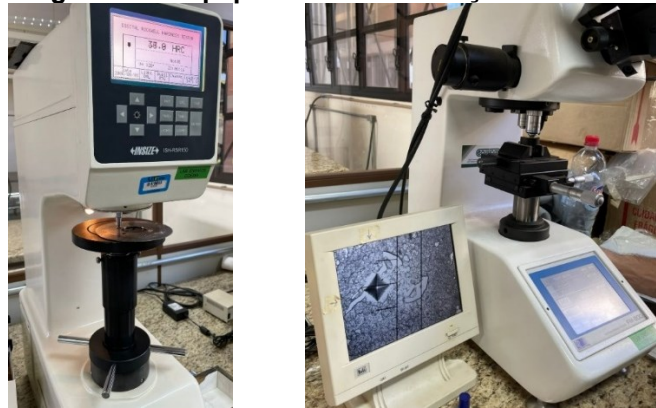


Fonte: Autoria própria (2023)

5.2.10 Aferição de durezas

Para todas as facas em análise, mediu-se a dureza em HRC na INSIZE ISH-RSR150 disponível na UTFPR - LD (DAEMA – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais) representado pela Figura 27 (a). As facas foram posicionadas de modo que a aferição acontecesse apenas na região central delas, pois, próximo da região de corte a angulação impossibilita a medição de dureza (efeito de borda) por esse método. Para a análise da variação de dureza até regiões próximas do fio de corte, utilizou-se medidas de microdureza Vickers pelo equipamento Microhardness Tester FM-800 da marca Future-Tech disponibilizado pelo DAEMA-LD, seguindo os mesmos parâmetros para todas medidas de 500gf por 5 segundos na superfície das amostras embutidas, realizando amostragem em diferentes regiões da faca, indo do centro até próximo do corte, denomina-se a região entre essas duas como intermediária, como representado pela Figura 27 (b).

Figura 27 – Equipamentos de medição de dureza



(a) Dureza HRC

(b) Microdureza Vickers

Fonte: Autoria própria (2023)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As massas obtidas para as 15 facas estão representadas na Tabela 5, das quais os valores da coluna “massa antes” representam os valores de massa antes da utilização em máquina para corte e “massa após” após sua utilização. Os campos que estão sem valores significam que essas facas (14 e 15) não foram testadas em máquina novamente após a primeira aferição por não estarem em estado de nova. A Faca 9 foi separada para corte e embutimento e análise microestrutural representando todas as outras nesse mesmo estado.

Tabela 5 – Massa das facas antes e após serem utilizadas para corte

Numeração	Estado da faca	Massa antes (g)	Massa após(g)
1	Nova	120,785	120,383
2	Nova	120,072	120,054
3	Nova	117,933	117,512
4	Nova	120,151	119,053
5	Nova	120,447	120,132
6	Nova	118,046	117,765
7	Nova	119,563	119,254
8	Nova	120,056	119,649
9	Nova (micrografia)	118,924	118,483
10	Nova (nitretada + micrografia)	116,635	115,799
11	Nova (nitretada)	117,961	117,634
12	Nova (nitretada)	119,642	119,457
13	Nova (nitretada)	119,952	119,581
14	Meia vida	104,438	-
15	Descarte	100,417	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 5, observou-se que a variação de massa foi discreta quando comparada com a massa prévia ao procedimento de corte. Tal constatação implica que, mesmo essa variação sendo discreta, há influência na qualidade do corte, pois a faca perde o fio de corte, porém, não exerce impacto considerável na variação de diâmetro das facas, então, conclui-se que a perda considerável de diâmetro das facas é originada a partir do processo de afiação delas.

Com o paquímetro analógico, obteve-se as médias dos diâmetros das amostras representadas no Tabela 6.

Tabela 6 – Diâmetros das facas antes e após serem utilizadas para corte

Numeração	Estado da faca	Diâmetro médio (mm)	Desvio padrão amostral
1	Nova	120,0	0
2	Nova	120,0	0
3	Nova	120,0	0
4	Nova	120,0	0
5	Nova	120,0	0
6	Nova	120,0	0
7	Nova	120,0	0
8	Nova	120,0	0
9	Nova (micrografia)	120,0	0
10	Nova (micrografia + nitretação)	120,0	0
11	Nova (nitretada)	120,0	0
12	Nova (nitretada)	120,0	0
13	Nova (nitretada)	120,0	0
14	Meia vida	111,4	0,14
15	Descarte	105,7	0,14

Fonte: Autoria própria (2023)

Já com o relógio comparador obteve-se os resultados em relação as variações de raios descritas na Tabela 7. Valores que variam entre positivo representando os relevos em relação ao ponto 0 do relógio comparador e os negativos os declives.

Quando observadas as variações centesimais, é nítido que as facas não apresentam dimensional exato nem antes e nem após a utilização.

Tabela 7 – Variação de raio das facas por relevos e declives antes e após utilizadas

Numeração	Estado da faca	Variação de raio antes (mm)	Variação de raio após (mm)
1	Nova	+0,05 e -0,04	+0,04 e -0,15
2	Nova	+0,06 e -0,05	+0,05 e -0,20
3	Nova	+0,20 e -0,05	+0,13 e -0,18
4	Nova	+0,10 e -0,10	+0,08 e -0,26
5	Nova	+0,01 e -0,15	+0,03 e -0,22
6	Nova	+0,01 e -0,09	+0,05 e -0,23
7	Nova	+0,05 e -0,05	+0,07 e -0,15
8	Nova	0,00 e -0,18	+0,01 e -0,23
9	Nova (micrografia)	+0,01 e -0,14	-
10	Nova (para nitretação)	+0,10 e -0,05	+0,14 e -0,14
11	Nova (para nitretação)	+0,11 e -0,03	+0,1 e -0,10
12	Nova (para nitretação)	+0,1 e -0,05	+0,09 e -0,19
13	Nova (para nitretação)	+0,04 e -0,05	+0,03 e -0,09
14	Meia vida	+0,1 e -0,06	-
15	Descarte	+0,05 e 0	-

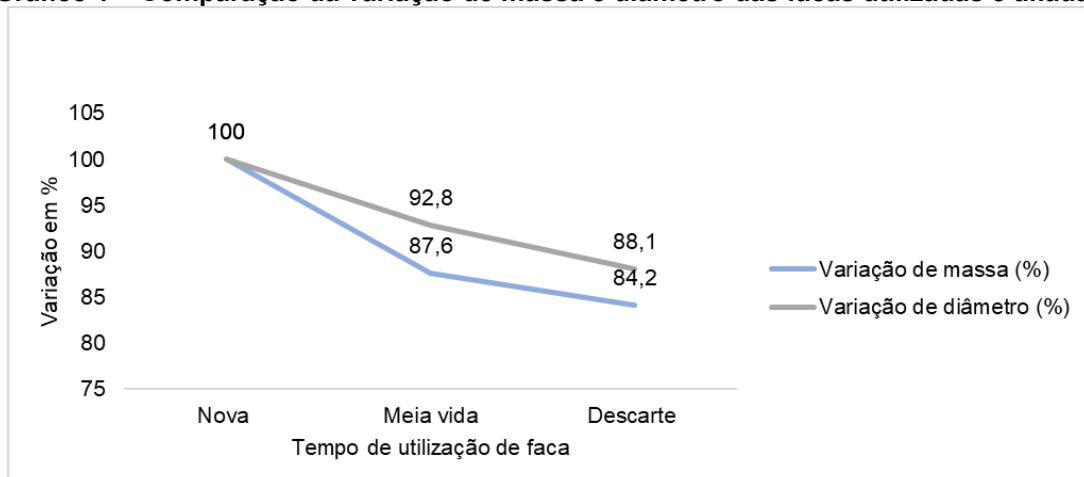
Fonte: Autoria própria (2023)

Segundo a empresa que disponibilizou as facas para estudo, a confecção dos tubos é feita a partir de várias fitas de papéis reciclados, das quais possuem propriedade variadas comparando uma das outras na confecção de um mesmo tubo, e, também contém cola para conferir aderência entre os papéis. A eficiência de corte deve ser alta, pois, qualquer rebarba gerada nas camadas de fita externas são consideradas desvios na qualidade do produto, como por exemplo a Figura 1 (b), já que para a utilização efetiva no encaixe dos tubos em rebobinadeiras nos clientes da empresa, é necessário que não haja tais obstruções.

Para Gobbi (2009), desgaste é a perda progressiva de massa de uma superfície em contato com outra. Portanto, mesmo que a faca a olho nu não demonstre variações consideráveis pelo desgaste após o corte, a variação de massa existe, mesmo que mínima, como observado na Tabela 5 e Gráfico 1. Informações estas somadas aos resultados obtidos pela variação do diâmetro medida a partir do relógio comparador nas facas antes e após a utilização da faca em máquina, determinam que, o desgaste existe e, pelo desvio gerado na qualidade do corte dos tubos, precisa ser minimizado.

Cada faca normalmente empregada no corte tem em média uma vida útil de 8 afiações em retífica até perder dimensional de encaixe em máquina. Então, pode-se observar abaixo a relação de perda de massa e diâmetro levando em consideração a média de ambos após utilização e afiação das facas.

Gráfico 1 – Comparação da variação de massa e diâmetro das facas utilizadas e afiadas

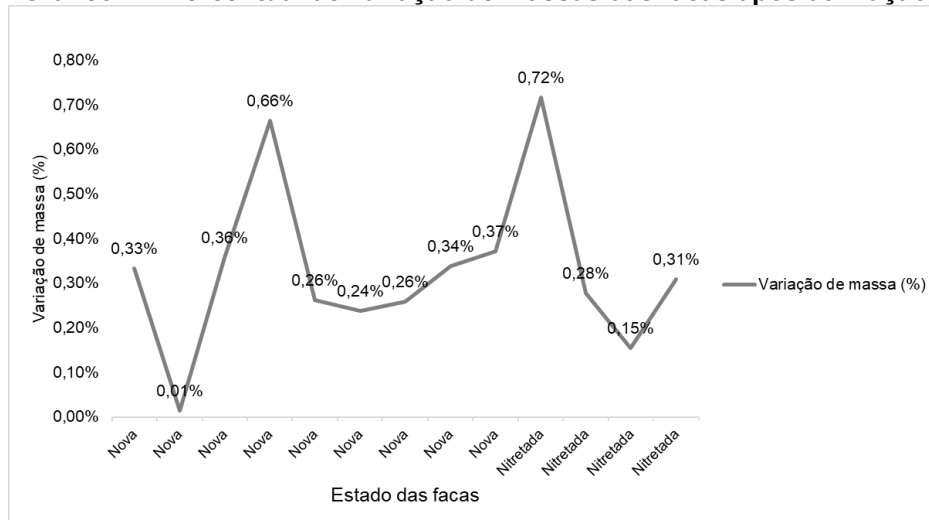


Fonte: Autoria própria (2023)

Comparando com a massa média e diâmetro médio das facas novas, identifica-se que houve uma redução de massa de aproximadamente 15,8% e de 11,9% no diâmetro tomando a faca nova em estado 100% como fator de comparação para as

variações. Portanto, é possível obter a linha representativa do desgaste em função da variação de massa, dos quais os percentuais são referentes a variação de massa de cada faca antes e após utilização para corte, como mostrados no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Percentual de variação de massas das facas após utilização



Fonte: Autoria própria (2023)

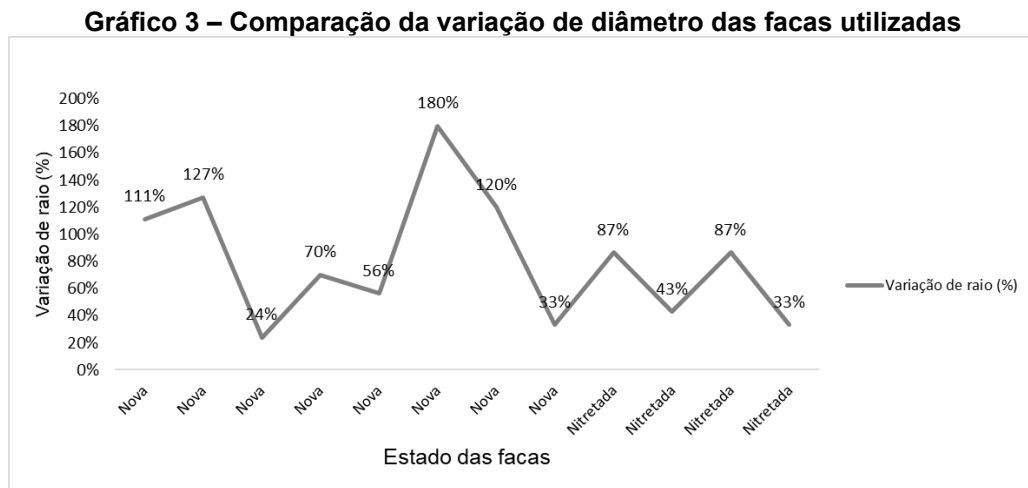
As variações de massa por utilização (Gráfico 2) são mínimas quando as facas são submetidas a apenas uma utilização até perder sua eficiência de corte, porém, o desgaste é sutil e incapaz de causar variações perceptíveis no diâmetro delas. Para melhor avaliação, obteve-se os seguintes resultados de variação de raio centesimal de cada faca, também antes e após utilização, descrito na Tabela 8.

Tabela 8 – Variação de raio das facas por relevos e declives antes e após utilizadas.

Estado da faca	Variação de raio antes (mm)	Variação de raio após (mm)
Nova	0,09	0,19
Nova	0,11	0,25
Nova	0,25	0,31
Nova	0,2	0,34
Nova	0,16	0,25
Nova	0,1	0,28
Nova	0,1	0,22
Nova	0,18	0,24
Nova (nitretada)	0,15	0,28
Nova (nitretada)	0,14	0,2
Nova (nitretada)	0,15	0,28
Nova (nitretada)	0,09	0,12

Fonte: Autoria própria.

Logo, é possível obter a linha representativa do desgaste em função da variação de raio mostrado no Gráfico 3, dos quais os percentuais são referentes à variação dos raios de cada faca antes e após utilização para corte. Mostrando o quanto a variação depois de testar em máquina representa da variação antes de testar. Do qual o primeiro ponto de 111% representa o quão a mais variou o raio após utilização, sendo o valor de 0,19mm comparado com 0,09mm.



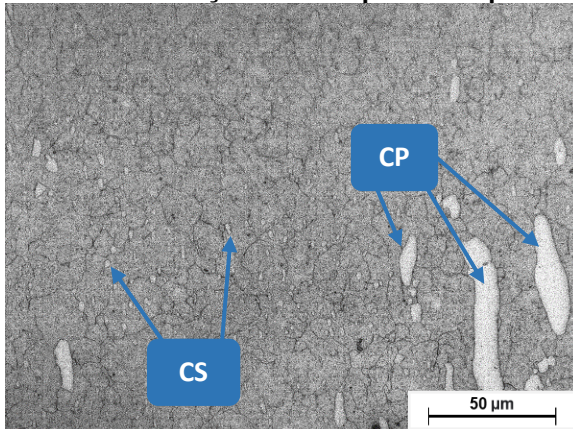
Fonte: Autoria própria (2023)

Observou-se valores mais expressivos em função da variação de massa, então, mesmo que o desgaste seja sutil em diâmetro pelo paquímetro e massa, quando comparado as variações centesimais de raio antes e após utilização pelo relógio comparador, o desgaste fica mais aparente. Não houve heterogeneidade nos valores encontrados, dos quais para algumas facas em estado de nova os valores foram abaixo de 100%, já para outras também novas, superiores a 100%. Característica que não se estendeu para as facas nitretadas, pois, os percentuais de variação encontram-se abaixo de 100%. Do qual este percentual representa o quanto variou a mais o raio após utilização das facas em máquina comparando com a variação antes de utilização, ambas captadas pelo relógio comparador.

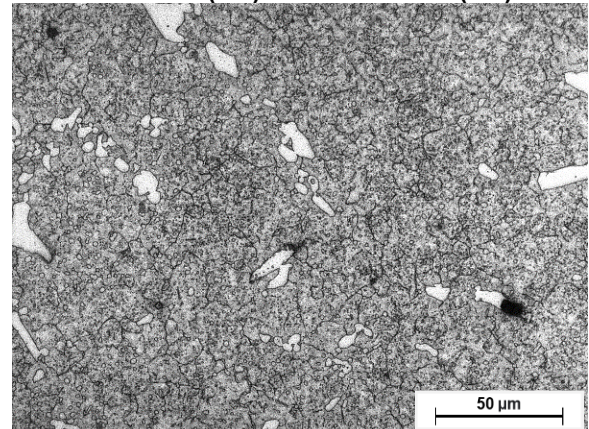
As micrografias representadas abaixo estão divididas em três tempos de vida das facas, sendo i) nova a faca temperada e revenida sem utilizar em máquina, ii) meia vida, o mesmo tipo de faca anterior, porém já utilizada, desgastada e afiada em retífica atingindo a metade da sua capacidade de utilização em máquina devido a perda de diâmetro, iii) a faca de descarte, mesmo tipo das anteriores, porém desgastou o suficiente para perder encaixe em máquina. Para cada faca preparou-se amostras em cortes transversais e longitudinal, do qual o longitudinal é a superfície

das facas assim como descrito anteriormente. Lembrando que as facas foram observadas em 3 regiões: centro até próximo ao fio de corte, a região entre essas duas medidas denominou-se intermediária. Nestas 3 regiões também foram realizadas as medidas de durezas apropriadas para cada uma delas.

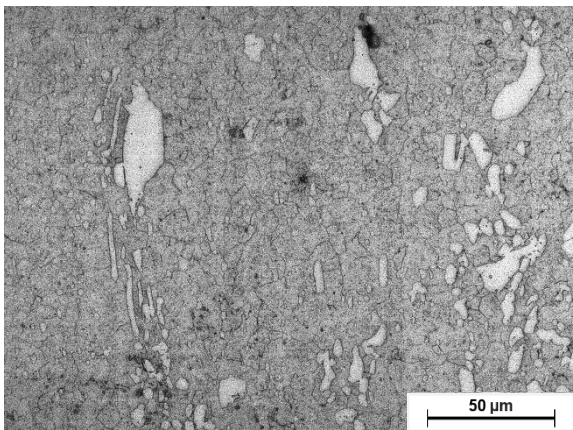
Figura 28 – Microestruturas da faca para descarte ampliada em 500x. Atacadas com Nital 4% com variações no tempo de ataque. Carbonetos Primários (CP) e Secundários (CS)



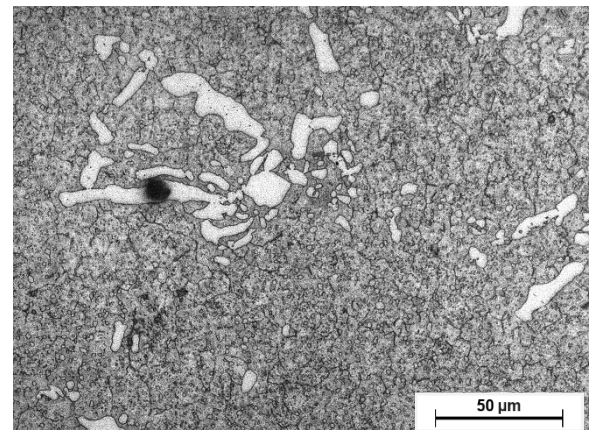
(a) Centro – Transv. – Ataque 2,5 min



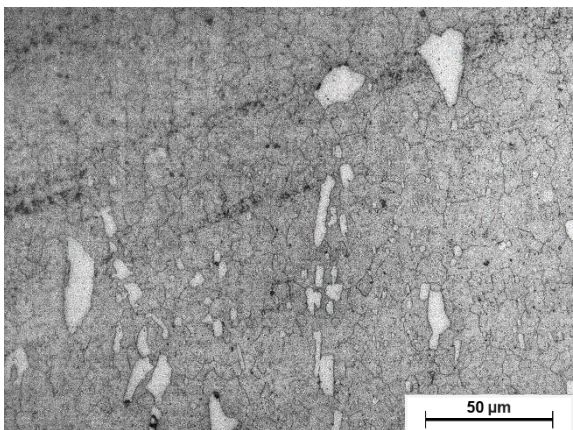
(b) Centro – Longitu. – Ataque 5,5 min



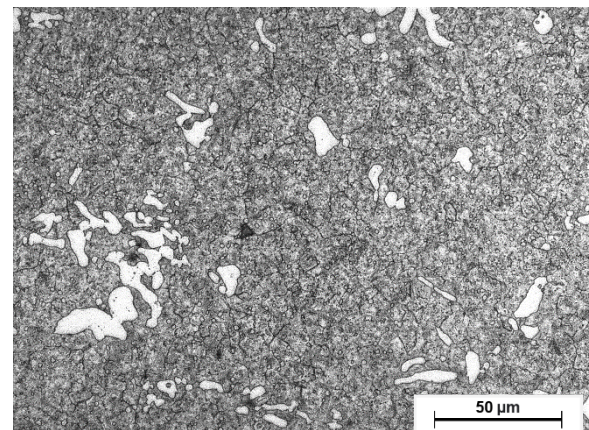
(c) Intermediário – Transv. – Ataque 2,5 min



(d) Intermediário – Longitu. – Ataque 5,5 min



(e) Fio de corte – Transv. – Ataque 2,5 min

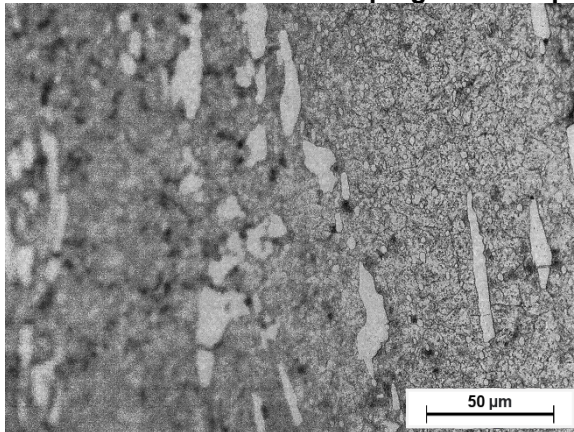


(f) Fio de corte – Longitu. – Ataque 5,5 min

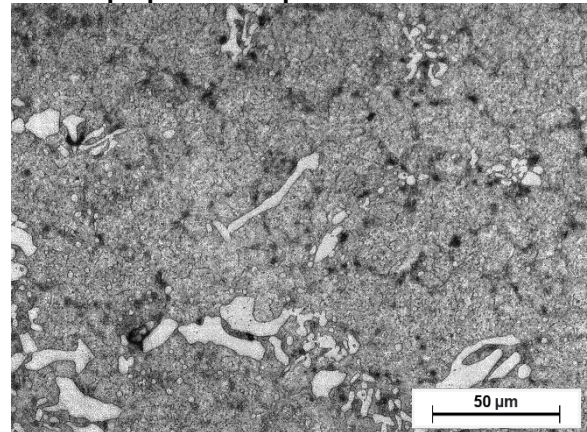
Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como esperado com base na bibliografia ilustrada na Figura 4, observa-se a presença de cabornetos primários (CP) e secundários (CS) de forma similar. Analisando as diferentes regiões da mesma amostra, não nota-se diferenças microestruturais consideráveis, tanto para o corte transversal e longitudinal.

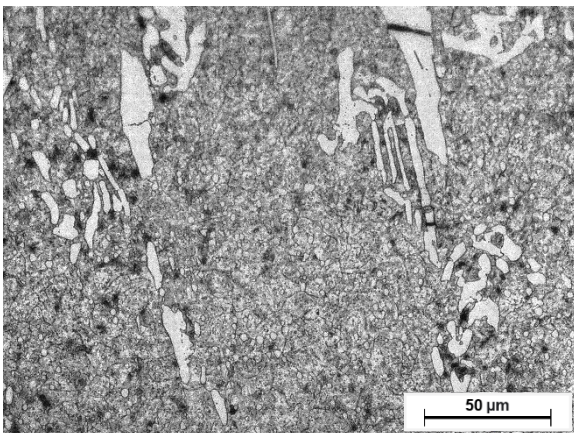
Figura 29 – Microestruturas das facas com meia vida, ampliada em 500x. Atacadas com Nital 4%. Empregando-se apenas um tempo para o ataque



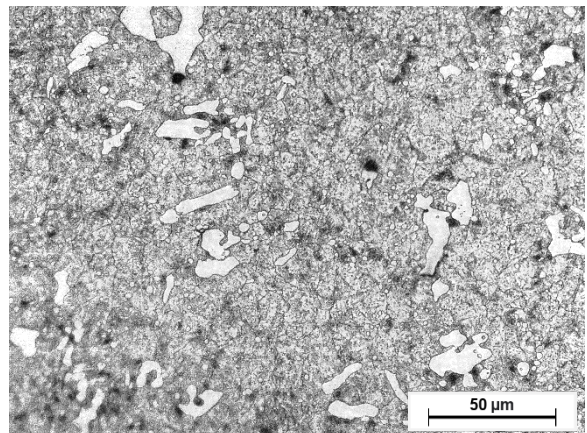
(a) Centro – Transv. – Ataque 2 min



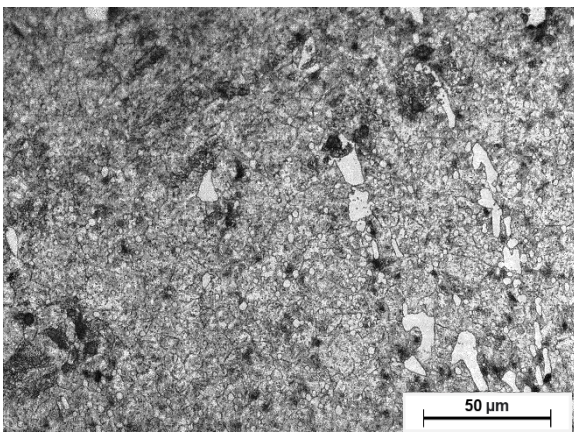
(b) Centro – Longit. – Ataque 2 min



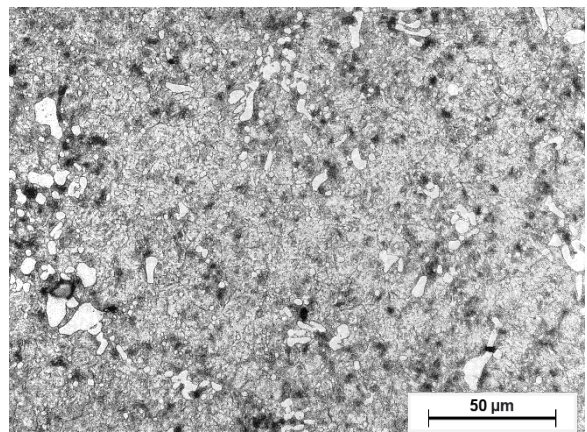
(c) Intermediário – Transv. – Ataque 2 min



(d) Intermediário – Longit. – Ataque 2 min



(e) Fio de corte – Transv. – Ataque 2 min

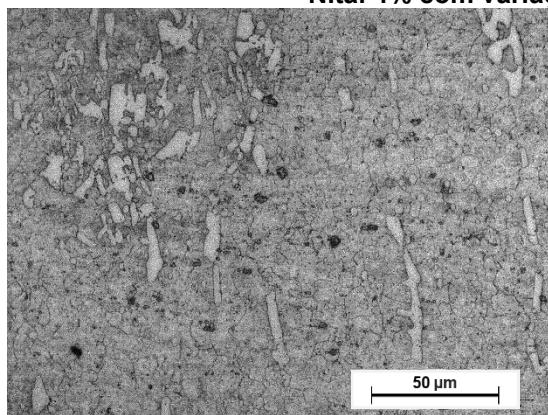


(f) Fio de corte – Longit. – Ataque 2 min

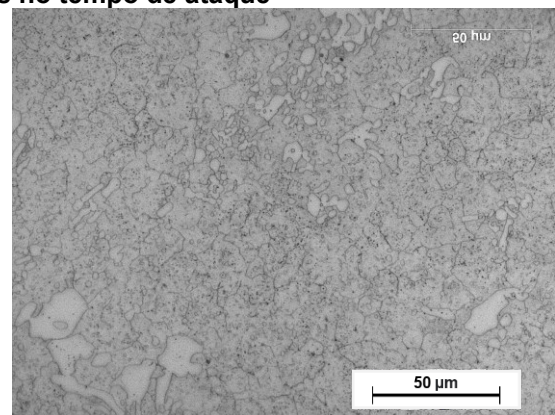
Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando as microestruturas das amostras de faca meia vida, nota-se que não há diferenças consideráveis na estrutura. Porém, observa-se que há a presença de prováveis pequenos pontos de oxidação não observados na faca nova. Segundo Revie (2008) a oxidação pode, de fato, favorecer o desgaste de materiais, especialmente em condições de alta temperatura e umidade. Mas, pelas proporções e pela vida útil similar entre as afiações das facas, há interferência no desgaste, porém, mínima para o estudo em questão.

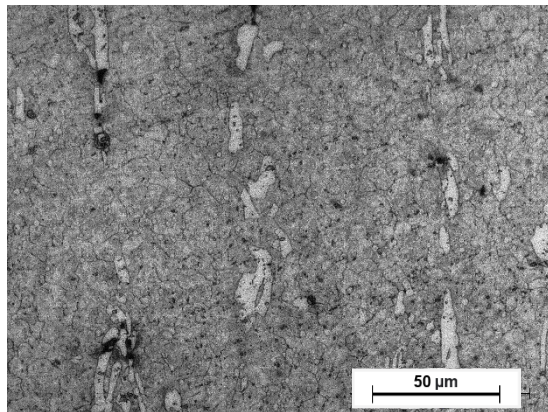
Figura 30 – Microestruturas das facas em estado de nova, ampliada em 500x. Atacadas com Nital 4% com variações no tempo de ataque



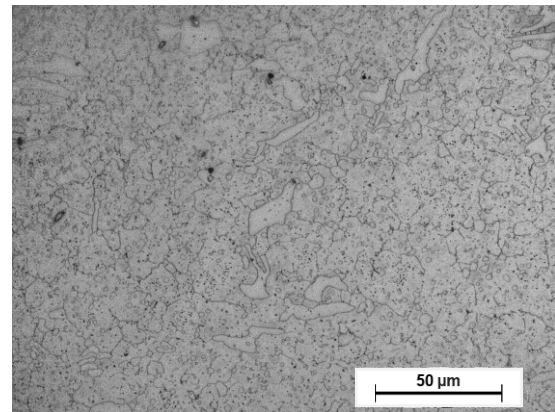
(a) Centro – Transv. – Ataque 1,5 min



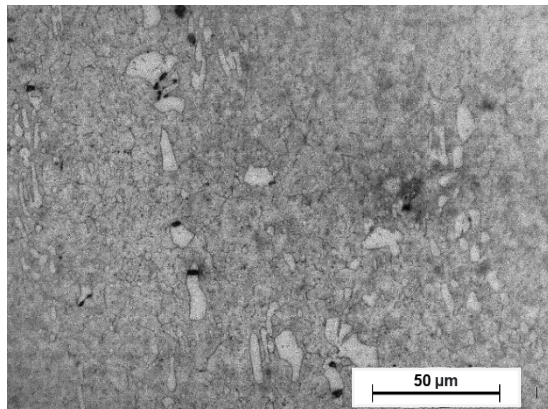
(b) Centro – Longit.I – Ataque 2 min



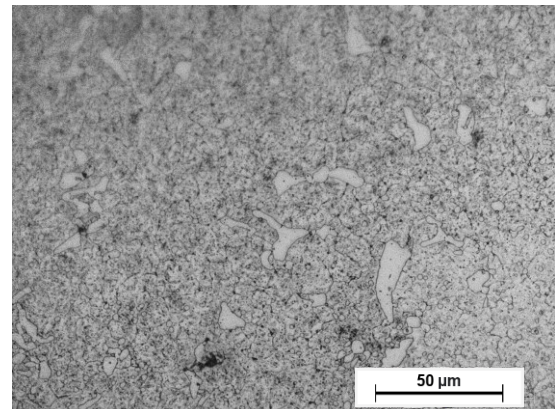
(c) Intermediário – Transv. – Ataque 1,5 min



(d) Intermediário – Longit. – Ataque 2 min



(e) Fio de corte – Transv. – Ataque 1,5 min

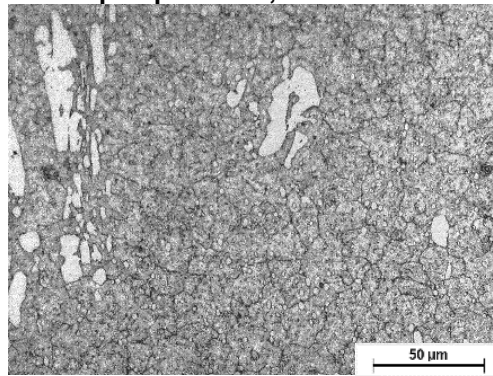


(f) Fio de corte – Longit. – Ataque 2 min

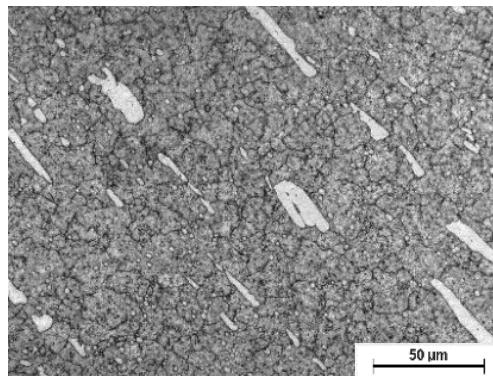
Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como observado nas microestruturas da faca meia vida, as características estenderam-se para a faca em estado de nova. Observou-se a presença de carbonetos primários e secundários, também, os pontos de oxidação. Porém, nota-se na Figura 31, microestrutura da faca nova nitretada, há semelhança com as micrografias da faca nova, não possuindo os pequenos pontos de oxidação, mesmo que mantida a aparência semelhante em relação a carbonetos primários e secundários.

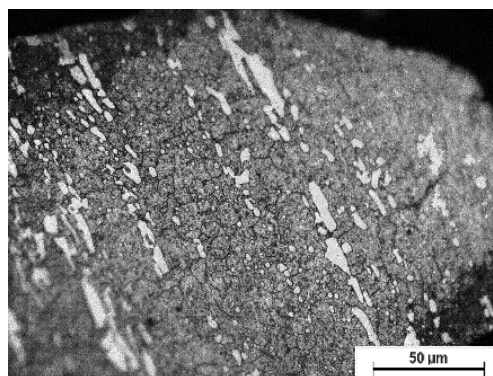
**Figura 31 – Microestrutura da faca em estado de nova nitretada por plasma, ampliada 500x.
Ataque químico 2,5 min. Nital 4%**



(a) Centro – Transversal



(b) Intermediário – Transversal



(c) Fio de corte – Transversal

Fonte: Autoria própria (2023)

Com intuito de analisar se houve mudanças microestruturais sutis para todas as amostras, aplicou-se o método de medição de tamanho de grão por interceptação citado acima (CALLISTER, 2016). Foram traçadas retas de tamanhos conhecidos em todas as imagens obtidas por Microscópio Óptico. Então, aplicando-se a combinação de as fórmulas (1), (2), (3), (4) e (5) também citadas acima, obteve-se os valores de G (número do tamanho de grão) descritos nas Tabelas de 9 a 12.

Tabela 9 - Faca na condição de descarte

Região	Transversal	Longitudinal
Centro	9,97	10,21
Intermediário	10,04	10,10
Fio de corte	10,24	10,32

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 10 - Faca na condição de meia vida

Região	Transversal	Longitudinal
Centro	10,04	10,21
Intermediário	10,45	10,29
Fio de corte	10,45	10,24

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 11 - Faca na condição de nova

Região	Transversal	Longitudinal
Centro	9,9	10,15
Intermediário	10,19	10,12
Fio de corte	10,10	10,20

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 12 - Faca na condição de nitretada

Região	Transversal	Longitudinal
Centro	10,21	-
Intermediário	9,99	-
Fio de corte	10,04	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores de tamanho médio de grão são próximos, tanto para as amostras cortadas transversalmente quanto para longitudinais, logo, determina-se que, segundo Callister (2016), não há variação nas propriedades entre as amostras, pois, todas apresentam distribuição, formato e tamanho de grão semelhantes. Nota-se também que pelo valor alto na classificação ASTM, as microestruturas apresentam grão refinados, contribuindo diretamente para a propriedade de dureza, da qual favorece na minimização do desgaste.

Analisando as imagens, é possível notar que há uma diferença sutil em todas as amostras entre transversal e longitudinal em função da orientação dos carbonetos primários, tornando possível anisotropia nas propriedades. Porém, observou-se na Tabela 13 que as diferenças nas durezas são mínimas quando comparadas ao volume de cortes que as facas realizam. Este valor é o médio encontrado em 3 pontos aferidos na região central das facas.

Tabela 13 – Dureza média das facas em condições diferentes em 3 pontos centrais

Condição da Faca	Média de Dureza HRC	Desvio padrão amostral
Nova	59,2	0,17
Nova	59,3	3,15
Nova	59,2	0,21
Nova	58,5	2,1
Nova	58,3	1,3
Nova	61,2	1,1
Nova	60,8	1,09
Nova	59,6	0,6
Nova	58,5	0,23
Meia vida	59,1	4,07
Descarte	61,1	0,12
Nitretada	59,6	0,18
Nitretada	58,9	1,24
Nitretada	57,4	1,1
Nitretada	57,5	0,9

Fonte: Autoria própria (2023)

Sendo o desvio padrão amostral das médias de 1,15.

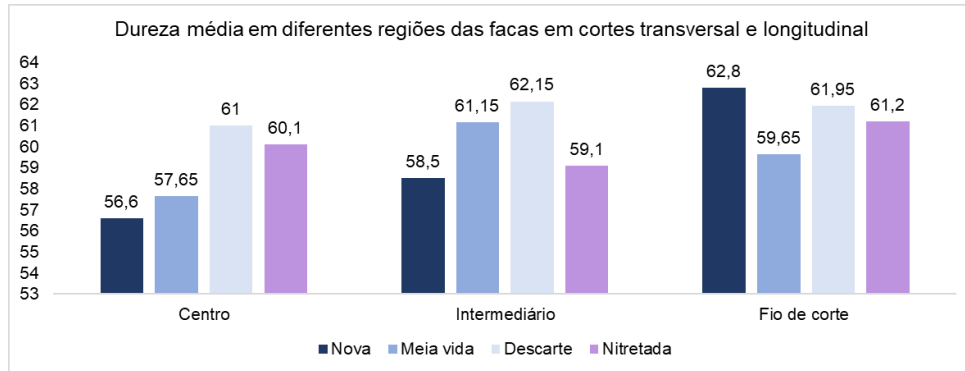
Na Tabela 14, tem-se a média de 3 pontos por faca e região, obtidos nas amostras que foram realizadas a metalografia. Os valores foram convertidos diretamente na máquina em HRC.

Tabela 14 – Dureza média das facas em 3 regiões das amostras embutidas em condições diferentes

Faca	Corte	Dureza Centro	Dureza Intermediário	Dureza Fio de Corte
Nova	Transversal	616,4HV – 56,6HRC	636,1HV – 57,2HRC	-
Nova	Longitudinal	625,7HV – 56,6HRC	750HV – 59,8HRC	767,8HV – 62,8HRC
Meia vida	Transversal	582,4HV – 54,3HRC	711,5HV – 60,6HRC	674,6HV – 59HRC
Meia vida	Longitudinal	719,8HV – 61HRC	737HV – 61,7HRC	703,3HV – 60,3HRC
Descarte	Transversal	688HV – 59,6HRC	720,8HV – 61HRC	692,9HV – 59,8HRC
Descarte	Longitudinal	756,7HV – 62,4HRC	779HV – 63,3HRC	802HV – 64,1HRC
Nitretada	Transversal	698,8HV – 60,1HRC	676,6HV – 59,1HRC	724,7HV – 61,2HRC

Fonte: Autoria própria (2023)

Sendo o desvio padrão amostral das durezas das facas em condição de nova 2,69, meia vida 2,99, descarte 1,61 e nitretadas 0,8. O campo que está sem valor é devido a dificuldade de aferição da medida por haver angulação da superfície (efeito de borda). Abaixo têm-se os valores médios de dureza por região das amostras em diferentes tempos de vida das facas (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Dureza média das facas cortadas e embutidas. Valores em HRC

Fonte: Autoria própria (2023)

Existem diferenças nos valores de durezas para todas as partes aferidas, porém, variação mínima, visto valores próximos dos desvios padrão amostral, quando as facas são submetidas à aplicação de corte, esta diferença torna-se insignificante na contribuição ao desgaste, ilustrando que mesmo após afiações, a propriedade de dureza do material mantém-se inalterada.

Assim como observado nas micrografias e no valor médio de dureza das facas nitretadas, não foi possível identificar a camada nitretada por microscopia óptica, também, foi observado que não houve ganhos consideráveis na dureza superficial, uma vez que a dureza após a nitretação se assemelha as facas nova, meia vida e descarte. Como as facas trabalham em pares, as 8 em estado de novas foram testadas em máquina considerando-se a ordem crescente para a formação dos pares, sendo o primeiro par as facas 1 e 2 e assim sucessivamente. Com isso, obteve-se a quantidade de cortes em que cada um dos pares suportou (Tabela 15) até que começasse apresentar rebarbas nos tubos cortados como na Figura 1 (b).

Tabela 15 – Quantidade de cortes por par de facas nas condições novas e novas nitretadas

Numeração das facas	Estado da faca	Quantidade de cortes
1 e 2	Nova	726
3 e 4	Nova	600
5 e 6	Nova	850
7 e 8	Nova	784
10 e 11	Nova (nitretada)	896
12 e 13	Nova (nitretada)	860

Fonte: Autoria própria (2023)

A produção varia conforme a demanda dos clientes, nem sempre as facas trabalham nas mesmas condições, há momentos que os tubos para recorte possuem uma composição que confere elevada resistência, exigindo mais do par de facas para

que o corte aconteça, mas, também há momentos em que ocorre ao contrário. Em um turno de trabalho da cortadeira, pode-se considerar diferentes produções. Visto isso, para obter-se os dados acima, as facas foram submetidas a cortar os tubos de propriedades similares, logo, percebe-se que as facas temperadas, revenidas e nitretadas tiveram maiores eficiências em relação à quantidade de cortes do que as facas somente temperadas e revenidas. Apresentando, em média, um ganho de 18,65%.

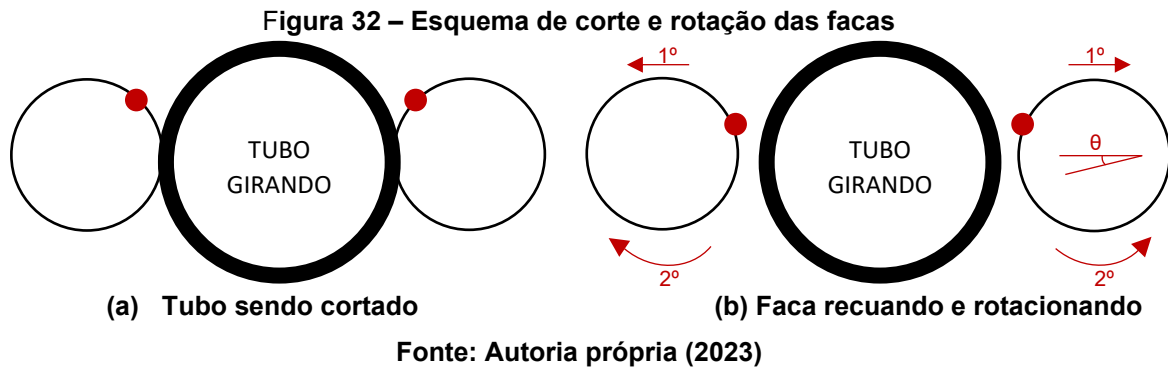
Mesmo que no referente estudo não tenham sido levantados os valores financeiros envolvidos, esperava-se valores mais expressivos em relação à quantidade de cortes para que seja possível impacto na eficiência de produção sem que eleve os custos consideravelmente.

Analisando todas as informações citadas, observa-se a partir do Tabela 5 que a variação de massa após a utilização das facas foi pequena, pois, o desgaste é mínimo considerando a perda de material da superfície, porém, analisando a eficiência do corte, do qual deseja-se uma superfície lisa e sem rebarbas no tubo, essa perda mínima de material da superfície da faca é suficiente para causar desvios indesejados no processo de corte, interferindo na qualidade do tubo. A perda de diâmetro considerável, variando cerca de 16%, está mais condicionado a perda de material por afiação do que perda de massa no desgaste durante o corte de tubos.

Como as facas mantem-se paradas durante o corte do tubo em rotação, notou-se que o desgaste superficial não é distribuído igualmente por todo o perímetro do fio de corte, o que foi confirmado a partir da variação de centesimal de raios observadas na análise dos dados da Tabela 8, já que essas diferenças foram capitadas pontualmente, indo de valores positivos (relevos) a negativos (declives) considerando o ponto 0 do relógio comparador utilizado. Isso se dá devido à necessidade de calibração de máquina para a rotação de 20° das facas após o corte sobre seu eixo, como exemplificado na Figura 32.

Após o corte o par de facas recua para sua posição inicial, rotacionando sobre seu eixo em 20° teórico, porém, se este parâmetro estiver desregulado do programado, o ponto de corte deixará um *gap* do perímetro de fio de corte e, mesmo que a faca rotacione 360°, os *gaps* serão mantidos e os pontos de corte serão sempre os mesmos, desgastando, então, sempre nos mesmos lugares, não aproveitando toda a região de corte da faca. Operacionalmente não foi possível medir a angulação de

rotação das facas, mas, operadores com experiência na máquina relataram que não há regulagem acirrada desta angulação.



Segundo Silveira (2010) uma das principais funções dos lubrificantes é a redução de atrito entre as superfícies. Logo, a lubrificação das facas em máquina e em trabalho de corte precisa ser efetiva. Ao acompanhar o desempenho dos cortes, observou-se que há lubrificação do par de facas, porém, em pouca quantidade de lubrificante, tornando elevado o atrito da superfície das facas com a superfície do tubo cortado, portanto, maior o desgaste pontual do fio de corte.

Com citado, cada tubo dentro do mesmo lote pode apresentar propriedades variadas, pois, a matéria-prima é reciclada de forma que não garante, por exemplo, mesma resistência por todo o comprimento das fitas de papel utilizadas na fabricação dos tubos. Também, a quantidade de cola entre as fitas, mesmo com vazão controlada na produção toda, pode ser absorvida mais em alguns pontos do papel do que outros. Portanto, isso pode ocasionar uma variação na resistência mecânica no comprimento de um mesmo tubo. Desta forma, em poucos minutos as facas podem estar sujeitas a variações no desgaste da superfície do fio de corte. Então, devido ao atrito não ser uniforme por todo o fio de corte, a eficiência de utilização é reduzida, podendo o par de facas ser trocados por apresentar baixa eficiência de corte em alguns pontos, mas, em outros ainda manter o fio de corte afiado.

Além disso, a variação na resistência dos tubos somadas à instabilidade deles em rotação de máquina –que pode variar devido ao empenamento do tubo *master*, a variação de espessura de parede do tubo, geometria da faca, etc., leva a baixa eficiência de corte que pode não estar relacionado somente à afiação. A região de corte da faca precisa ser estreita em espessura para não afetar no comprimento programado de corte do tubo, mas, quanto mais fina a espessura das facas, maior a

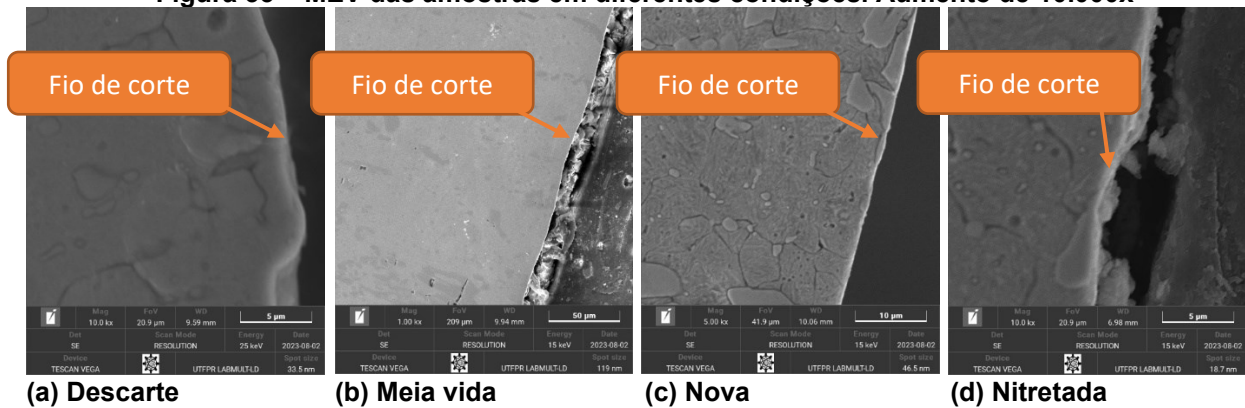
instabilidade delas ao cortar, pois, com a vibração da máquina com tubo em rotação, pode ocasionar desvios no corte que não são provenientes da perda de afiação. As facas em estudo possuem espessura de 2mm que se estreitam até a extremidade do fio de corte, o que leva a instabilidade durante o corte de tubos, sendo maior para tubos mais resistentes.

Observa-se que o material das facas e suas propriedades encontram-se dentro dos parâmetros entregues pelo fornecedor, bem como a eficiência da afiação, pois, tanto a faca na condição de nova, meia vida quanto a de descarte mostra-se sem variação de dureza e microestrutura partindo de regiões do centro até o fio de corte observadas. Segundo Coutinho (1992), os aços para trabalho a frio estão sujeitos a amolecimento da superfície quando mantidas temperaturas contínuas próximas de 200°C. Aleatoriamente aferiu-se a temperatura das facas em trabalho, não ultrapassando 60°C. Esta temperatura é baixa e quando submetida nas facas utilizadas em AISI D2, não promove mudanças na microestrutura e propriedades do material, concretizado pela não variação de tamanho de grão por todas as amostras estudadas.

Optou-se por uma camada de nitretação não tão profunda para que não houvesse uma passível fragilização da extremidade de fio de corte e possivelmente a fratura da faca nessas regiões no momento de operação, já que existe a instabilidade citada acima. Logo, segundo Gobbi e Souza et. al. (2009), utilizou-se os parâmetros de nitretação da Tabela 4, que, referentes ao aço AISI D2, confere ao aumento de aproximadamente 65% da microdureza da superfície deste aço. Entretanto, observa-se na Tabela 13 uma variação da dureza média das facas nitretadas e não nitretadas, das quais conferem um aumento desconsiderável nas facas nitretadas. Com estes parâmetros de nitretação, a profundidade da camada é considerada pequena e, satisfatória ao processo de desgaste por corte de tubos, mostrando uma eficiência de 18% superior, como pôde-se observar pelas quantidades de cortes na Tabela 15, houve aumento na eficiência, mas, quando somados aos demais parâmetros de desvios, este ganho é consideravelmente pequeno.

Para realização do MEV, separou-se as 4 amostras cortadas e embutidas transversalmente, sendo a amostra 1 da faca em estado de descarte, amostra 3 em tempo médio de vida, amostra 5 referente a faca nova e amostra 7 a faca nova e nitretada. Obteve-se as seguintes imagens das superfícies das amostras.

Figura 33 – MEV das amostras em diferentes condições. Aumento de 10.000x



Fonte: Autoria própria (2023)

Nota-se que não há diferenças aparentes entre as facas e suas magnificações, até mesmo considerando a faca nitretada. O tratamento de nitretação aconteceu em parâmetros controlados e citados acima, considerando o receio da fragilização por excesso de endurecimento das extremidades do fio de corte, o que poderia ocasionar em fratura das facas devido à vibração maquinária. Deve-se considerar, também, que a faca nitretada utilizada para obter as imagens foi utilizada em máquina para corte antes de ser levada ao MEV, portanto, o desgaste proveniente do teste consumiu a pequena camada de nitretação da superfície. Então, assume-se que houve endurecimento superficial pelo tratamento químico, porém, foi mínimo a ponto de não ser possível observá-lo nitidamente a partir do MEV.

Figura 34 – Microanálise elemental (EDS) em porcentagem atômica no fio de corte da faca em diferentes condições

Iron	56.80	Iron	47.11	Iron	47.96	Carbon	52.99
Carbon	27.24	Carbon	29.42	Carbon	31.63	Iron	28.90
Chromium	10.59	Chromium	13.48	Chromium	14.70	Chromium	11.60
Nitrogen	2.77	Aluminum	5.50	Nitrogen	2.86	Nitrogen	4.00
Silicon	0.91	Nitrogen	3.31	Vanadium	0.92	Aluminum	0.96
Niobium	0.68	Vanadium	0.46	Silicon	0.75	Vanadium	0.60
Vanadium	0.58	Niobium	0.33	Niobium	0.74	Silicon	0.48
Phosphorus	0.25	Phosphorus	0.17	Phosphorus	0.23	Niobium	0.33
Sulphur	0.13	Sulphur	0.15	Sulphur	0.16	Phosphorus	0.06
Molybdenum	0.06	Molybdenum	0.07	Molybdenum	0.07	Sulphur	0.06
						Molybdenum	0.03

(a) Descarte (b) Meia vida (c) Nova (d) Nitretada

Fonte: Autoria própria (2023)

Percebe-se que a composição química em porcentagem atômica de todas as amostras ensaiadas encontra-se em proporções próximas da literatura, variando alguns elementos de liga.

7 CONCLUSÃO

- Apesar de não observar ganhos consideráveis altos na eficiência de corte após a nitretação das facas, é possível concluir que o tratamento de superfície de nitretação por plasma confere maiores quantidades de cortes, porém, quando somados aos desvios, a geometria das facas, a lubrificação e correção de parâmetros mecânicos da máquina, este tratamento torna-se insuficiente;
- As propriedades mecânicas das facas, medidas pela dureza, são próximas do referencial teórico. Essas propriedades são consideravelmente elevadas para a finalidade de uso da ferramenta. No entanto, o atrito excessivo reduz a capacidade das facas de manter a qualidade de corte dentro dos padrões da empresa em questão;
- Mesmo tomado como o principal responsável pelo desgaste excessivo no início do estudo, o material do aço AISI D2 temperado e revenido possui propriedades relevantes contra o desgaste quando levado em consideração o seu custo-benefício, e, considerando que não há interferência de temperatura no processo estudado, o aço ainda pode ser considerado para a finalidade. Assim, uma nova seleção de materiais não seria a melhor opção inicialmente;
- É relevante considerar a alteração no desenho das facas, tornando-as com espessuras maiores para garantir mais estabilidade quando submetidas às vibrações da máquina como citado e, também, nos ajustes de parâmetros de máquina para que esta nova configuração não interfira nas especificações de corte, como o comprimento dos tubos, visto que a espessura das facas interfere diretamente no comprimento do tubo cortado, pois, consome mais do comprimento no momento do corte. Observa-se que a variação do raio das facas analisadas pelo relógio comparador não é contínua, possuindo pontos com maiores desgastes do que em outros, levado a hipótese de que possivelmente a rotação mínima das facas em seu eixo após o corte não esteja exatamente coerente o referencial com o prático. Logo, torna-se necessária a revisão de parâmetros mecânicos da máquina cortadeira.

Desta forma, torna-se necessária a revisão de parâmetros mecânicos da máquina cortadeira.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ajustes em parâmetros de máquina para redução da vibração e instabilidade, uma vez que essas condições favorecem o desgaste. Para tanto, deve-se considerar a possibilidade de rotação das facas durante o corte, melhorar a lubrificação e ajustar melhor a fixação do tubo a ser cortado e das facas;
- Estudar os melhores desenhos técnicos para o formato de faca circular utilizada no processo, considerando variações no ângulo de corte, espessura etc.;
- Fornecer especificações para o prestador de serviços de afiações, deixando claro o máximo de retirada de material, diminuindo o diâmetro, aceitável em cada afiação, garantindo, assim, que a faca tenha mais tempo de vida útil;
- Continuar os testes dos tratamentos químicos de superfície (Nitretação) a fim de conferir maiores camadas de nitretação e conseqüentemente ganhos nas propriedades mecânicas superficiais, na redução ao desgaste e na vida útil das facas;
- Revisar os padrões de qualidade do processo de corte levando em consideração as possíveis variações que são provenientes da perda de fio de corte da ferramenta, e demais desvios, fazendo com que reduza a incidência de rebarbas, tornando-se fácil a identificação da real necessidade de afiar a faca naquele momento;
- Elaborar melhor a especificação técnica da matéria-prima, considerando baixos teores de matérias inorgânicas nos papeis utilizados na confecção dos tubos.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. **Heat Treating**. Ohio: ASM International, p. 2173, 2004.

Aços Roman. **AISI D2 (W-Nr-1.2379 ou VD-2) | Aço Ferramenta de Trabalho à Frio**. Disponível em: < <https://aco.com.br/aco/aisi-d2/>>. Acesso em 15 de out., 2022.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 9ª ed., 2016.

CARDOSO, M. T. *et al.*, **Propriedades Físicas E Mecânicas De Papéis Reciclados Utilizados Para Fabricação De Tubos**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 403-411, abr.-jun., 2012. ISSN 0103-9954

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. Editora ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, p. 293-352, 2012.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica, 9ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

CHUEN, S. L. K. **Estimativa da Temperabilidade do aço SAE 8620 a partir da composição química e do tamanho de grão austenítico**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, p. 186, 1979.

COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: FCO, p. 405, 1992.

DAS, D., RAY, K. K., **Structure-property correlation of sub-zero treated AISI D2 steel**, *Materials Science and Engineering: A*, v. 541, p. 45-60, abr., 2012.

DAS, D.; SARKAR, R.; DUTTA, A. K.; RAY, K. K. **Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel**. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, p. 589-603, 2010.

DEVI, M. U., MOHANTY, O. N, **Plasma-nitriding of tool steels for combined percussive impact and rolling fatigue wear application**, Surface and Coatings Technology, v. 107, n. 1, p. 55-64, ago 1998.

DIAS, M. F., GOMES, S. I. **Avaliação da Resistência ao Desgaste abrasivo a Baixa Tensão de Revestimentos soldados por arco submerso**. II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Paulo, 2003.

DOIRON, T. O., Jr., PREWITT, C. T.; HAWK, J. A. **Metallography and Microstructures of Metals, Ceramics, and Polymers**. ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-805-3.

FROEHLICH, R., A. Tese de doutorado: **Tratamento Superficial Duplex com TiN e CrN de Aços Ferramenta Classe AISI H13 para Matrizes de Injeção de Ligas de Alumínio**. PPGEM, UFRGS, 2003.

GGD METALS. **AISI D2 – GGD D2** Catálogo de Materiais. Disponível em: < <https://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2018/04/A%C3%87O-D2.pdf>>. Acesso em: 15 out., 2022.

GOBBI, S. J. **Influência do tratamento criogênico na resistência ao desgaste do aço para trabalho a frio AISI D2**. Universidade de Brasília. Brasília, DF: 109p. 2009. Disponível em: < http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4272/1/2009_SilvioJoseGobbi.pdf>. Acesso em 29 out., 2022.

GOLDSTEIN, J., NEWBURY, D. E., ECHLIN, P., JOY, D. C., FIORI, C., LIFSHIN, E. **Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis**. Springer Science & Business Media, 2018.

GOMES, G. F, UEDA, M., REUTAUER, H. **Alternated high and low pressure nitriding os austenitic stainless steel: Mechanisms and results**. Journal of Applied Physics. Vol. 94, n 8, p. 5379-5383, 2003.

GUILLERMET, A.F. **Thermodynamic Analysis of the Stable Phases in the Zr-Nb System and Calculation of the Phase Diagram**, Z.Metallkde, Bd.82H.6, p.478-480, 1991.

HIBBELER, R. C., **Resistência dos Materiais**. Pearson Prentice Hall, 5ª edição, São Paulo, 2004.

HONEYCOMBE, R.W.K., **Steels: Microstructure and Properties**, Ed. Edward Arnold, London, 1981.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology, friction and wear of engineering materials**, Cambridge Butterworth Heinemann, 1992.

LYMAN, T., BOYER, H. E., **Metallography, structures, and phase diagrams**. v. 8, p. 402-404, 1978.

MEDANHA, A., **Estudo da Resistência à Fratura do Aço Ferramenta para Trabalho a Frio AISI D2**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, p. 151, 2004.

MEDANHA, A. *et al.* **Principais parâmetros metalúrgicos e suas Influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2**. Seminário da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes – ABM, VI, São Paulo, 2008.

MELLOY, G. F. **Hardness and Hardenability**. ASM, Metals Park, Ohio, 1977.

MOHAMMED, M., D., *et al.* **Microstructure and Mechanical Properties of Thixowelded AISI D2 Tool Steel**. MDPI - Metals, 2018. DOI 10.3390

NAVARRO, R. F. **A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna**. REMAP - Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.1, p. 01-11, 2006. ISSN 1809-8797

NORMA MERCOSUL. **NM 122:07, Aços Ferramenta: Classificação, Designação e Composição Química**. Ed. 1,1997.

Norma DIN 50320: **Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste**, Metalurgia e Materiais. v. 53, p. 619-622. 1997

OLIVEIRA, C. G. SILVA, I. P. P. **Os Estudos Tribológicos No Ensino De Engenharia Mecânica**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 34, n. 2, p. 3-10, 2015. ISSN 0101-5001

RAMALHO, J. P. **Revestimento por Soldagem**. São Paulo: Coleção Tecnologia SENAI – Soldagem. p. 315-336, 1997.

REIS, B. C. M.; PEREIRA, N. F. S.; SANTOS, A. J., *et al.* **Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento**. Revista Matéria, v.24, n.3, 2019. ISSN 1517-7076

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. Wiley, 2008.

SILVA, A. L. C. E., MEI, P. R., **Aços e ligas especiais**, 3 ed., São Paulo, Edgard Blücher, 2008.

SOUSA, R. R. M., *et al.* **Nitretação iônica em gaiola catódica do aço ferramenta tipo AISI D2 para trabalho a frio**. Revista Matéria, v. 14, n. 2, p. 861-868, 2009. ISSN 1517-7076

TTI PLASMA. **Nitretação a plasma**. Disponível em: <<https://ttiplasma.com.br/nitretacao-a-plasma>>. Acesso em 15 de out. de 2023.

VARALHO, R. *et al.* **The Influence Of Plasma Nitriding On The Fatigue Behavior Of Austenitic Stainless Steel Types Aisi 316 And Aisi 304**. 18th IFHTSE Congress. Rio de Janeiro, jul., 2010. ISSN 1516-392X

VATAVUK, J. *et al.* **Efeito da Nitretação Gasosa nas Propriedades Mecânicas dos Aços Ferramenta para Trabalho a Frio AISI D2 e D6**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, n. 3, p. 61-70, 2003. ISSN 1518-7470

VILLARES METALS. **Aço Para Trabalho a Frio – VD2**. Catálogo de Materiais. 2016. Disponível em: <<https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VD2>>. Acesso em: 28 set. 2022.

VOORT, G. F. V. **Grain Size Measurement**. In: VOORT, G. F. V. **Metallography: Principles and Practice**. ASM International. Cap. 10, 1999.

VOURLIAS, G., CHALIAMPALIAS, D., ZORBA, T. T., *et al.* **A combined study of the oxidation mechanism and resistance of AISI D6 steel exposed at high temperature environments**, Surface Science, v. 257, n. 15, pp. 6687-6698, mai., 2011.

ZUM GAHR, K. H., ELDIS, G. T. **Abrasive Wear of White Cast Irons**. Wear, v.64, p. 175-194, 1980.