

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FELIPE AZEVEDO BACCAN

**COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
AÇOS FERRAMENTA CONVENCIONAIS E SINTERIZADOS NA APLICAÇÃO EM
FACAS CIRCULARES INDUSTRIAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2019

FELIPE AZEVEDO BACCAN

**COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
AÇOS FERRAMENTA CONVENCIONAIS E SINTERIZADOS NA APLICAÇÃO EM
FACAS CIRCULARES INDUSTRIAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico 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. Amadeu Lombardi Neto

LONDRINA
2019



TERMO DE APROVAÇÃO

FELIPE AZEVEDO BACCAN

COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS FERRAMENTA CONVENCIONAIS E SINTERIZADOS NA APLICAÇÃO EM FACAS CIRCULARES INDUSTRIAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 22 de novembro de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica)
Orientador

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe já falecida Sandra, que foi quem me deu forças para correr atrás dos meus sonhos e no momento que eu mais precisei de coragem me deu todo o apoio para viajar para outro estado e cursar esta graduação, e só por isso posso estar escrevendo este texto hoje.

Agradeço a minha avó Fátima e ao meu tio Ricardo, pois sempre estiveram ao meu lado durante a graduação, mesmo distantes, torcendo por mim e me dando todo o apoio nos momentos difíceis.

Agradeço aos amigos que a faculdade me deu e que espero carregar por toda a minha vida. Em especial aos meus amigos Eduardo, Karina e Matheus que estiveram do meu lado durante toda a graduação, comemorando e curtindo os bons momentos e passando juntos os momentos difíceis, me dando força e inspiração.

Agradeço á todos os meus professores da graduação, por todos os ensinamentos e experiências passadas.

E por ultimo, agradeço á oportunidade de ter feito uma universidade pública onde adquiri maturidade e experiência que me fizeram uma pessoa melhor e mais preparada.

RESUMO

BACCAN, F. A. **Comparação da microestrutura e propriedades mecânicas de aços ferramenta convencionais e sinterizados na aplicação em facas circulares industriais.** 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, PR, 2019.

As facas circulares industriais são largamente utilizadas em uma série de indústrias para a realização do corte transversal e longitudinal dos materiais. Durante a aplicação, estas ferramentas precisam ter resistência ao desgaste e tenacidade para prolongar a sua vida útil. No presente trabalho foram comparados a resistência ao desgaste, tenacidade e dureza de aços sinterizados e aços ferramenta convencionais, relacionando-se com as características microestruturais de cada aço e discutindo sobre a eficiência e vida útil na sua aplicação. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica dos aços mais aplicados em facas circulares industriais, sendo possível concluir uma superioridade dos aços ferramentas sinterizados, quanto as suas propriedades de tenacidade, de resistência ao desgaste e de retificabilidade. Essas vantagens dos aços sinterizados, resultam em uma vida útil de 4 a 6 vezes maior que a dos aços obtidos por metalurgia convencional, o que justifica a substituição na aplicação em facas industriais.

Palavras-chave: Faca circular. Aços ferramenta. Desgaste. Tenacidade.

ABSTRACT

BACCAN, F. A. **Comparison of microstructure and mechanical properties of conventional tool steel and sinterized in application in industrial circular knives.** 51 f. Undergraduate Thesis – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, PR, 2019.

The industrial circular knives are widely used in a several industries for transverse and longitudinal materials cutting. These applications demand the tools to have wear resistance and toughness to prolong their life. In the present work the wear resistance, toughness and hardness of the sintered steels and conventional tools steels were compared, according to their microstructural characteristics and discussing the efficiency and tool life in the context of industrial circular knives. For that, it was realized a bibliographic review of the most applied industrial circular knives steels was performed, it was possible to conclude on the superiority of the sintered steels, showing improved toughness, wear resistance and rectifiability. These higher gride properties, resulted in a tool life 4 to 6 times higher than steels obtained from conventional metallurgical process, what justified the substitution in the industrial circular knives application.

Keywords: Circular knives. Tool steel. Wear. Toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos de facas circulares comerciais. A – Faca circular reta serrilhada com dentes em “V”; B – Faca circular cônica baioneta; C – Faca circular reta serrilhada com dentes retos; D – Faca circular cônica.	13
Figura 2 - Esquema do corte tangencial utilizado na indústria de celulose e papel. .	14
Figura 3 - Modelo comercial de contra-faca circular e sua vista lateral.	15
Figura 4 - Modelo comercial de suporte de faca pneumático para corte sob pressão.	16
Figura 5 - Maquinário para corte de papel com diversas facas circulares.	16
Figura 6 - Exemplos de diferentes configurações de perfis de lâminas circulares de corte industrial.....	17
Figura 7 - Classificação dos processos de separação (norma DIN 8588).	19
Figura 8 - Diagrama de dureza-tenacidade de materiais utilizados em ferramentas de corte.....	22
Figura 9 - Representação do desgaste abrasivo.	27
Figura 10 - Desgaste abrasivo no flanco de uma ferramenta de corte utilizada em usinagem. Em B é possível visualizar a superfície dos carbonetos resistindo ao desgaste abrasivo.....	27
Figura 11 - Desgaste de uma ferramenta de HSS, na usinagem de aço carbono. ...	29
Figura 12 - Ilustração esquemática do processo de nucleação e propagação de trincas pelo desgaste por fadiga.....	30
Figura 13 – Exemplo prático do desgaste por fadiga em um ferro fundido	30
Figura 14 - Comparação entre a microestrutura da seção transversal de um (A) HSS AISI M3 obtido por PM e (B) HSS AISI M3 produzido por lingotamento.	34
Figura 15 - Distribuição de tamanho de carbonetos no HSS T15 em função do processo de fabricação.	35
Figura 16 - Dureza Rockwell C dos aços: D2, D6, M2, Sinter 23 e Sinter 30 em função da temperatura de revenimento.....	40
Figura 17 - Superfície de corte de facas circulares industriais. A – Faca circular utilizando o Aço convencional AISI M2; B – Faca circular utilizando o Aço sinterizado ASP 2053.....	43
Figura 18 - Estimativa do custo total de ferramental na produção seriada de uma peça.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Habilidades dos elementos de liga em conferir certas propriedades aos aços ferramenta.	24
Tabela 2 - Classificação dos aços ferramenta.....	24
Tabela 3 - Composição em % de massa dos aços: VWM3C e Sinter 23.....	36
Tabela 4 - Resistência a ruptura transversal (TRS) em MPa dos aços rápidos: Sinter 23 e VWM3C em função da condição de tratamento térmico.....	37
Tabela 5 - Tamanho médio dos carbonetos (μm) dos aços Sinter 23 e VWM3C.....	38
Tabela 6 - Resultado de dureza Rockwell C dos aços sinter 23 e VWM3C de acordo com a temperatura de austenitização.	39
Tabela 7 - Composição química em % de massa dos aços: AISI D2, AISI D6, AISI M2, Sinter 23 e Sinter 30.....	39
Tabela 8 – Composição em % de massa dos aços: Böhler S390, Vanadis 4, Vanadis 10 e AISI D2.....	41
Tabela 9 – Resultado obtido de volume desgastado para os aços estudados.	42
Tabela 10 – Estimativa da vida útil de aços populares na aplicação em facas circulares industriais.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS

HSS	Aço rápido
HRC	Dureza Rockwell C
nm	Nanômetro
µm	Micrômetro
AISI	Instituto Americano de ferro e Aço
CVD	Deposição química em fase vapor
PVD	Deposição física em fase vapor
PM	Metalurgia do pó
MO	Microscópio óptico
CBN	Nitreto cúbico de Boro
TRS	Resistência de ruptura em flexão

LISTA DE SÍMBOLOS

r_{IS}	Raio de deformação a frente da trinca
K_{IC}	Tenacidade a fratura no estado plano de deformação
σ_{YS}	Limite de escoamento
E	Módulo de elasticidade
Q	Taxa de desgaste
K_A	Constante de Archard
F_N	Força normal
H	Dureza
R_A	Rugosidade média

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	JUSTIFICATIVA	12
4	REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1	Facas circulares industriais	13
4.1.1	Contra-faca circular	13
4.1.2	Suporte para faca circular	15
4.2	Processo de Corte	19
4.2.1	Corte por Faca circular	19
4.3	Materiais utilizados em ferramentas de corte industriais	21
4.3.1	Aços ferramenta obtidos por metalurgia convencional	23
4.3.2	Aços ferramenta sinterizados	25
4.3.3	Carbonetos sinterizados	25
4.4	Desgaste das ferramentas de corte de aço ferramenta	26
4.4.1	Desgaste abrasivo	26
4.4.2	Desgaste adesivo	28
4.4.3	Desgaste por fadiga	29
5	METODOLOGIA DE PESQUISA	32
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6.1	Comparação entre as principais propriedades dos aços para trabalho a frio convencionais e obtidos por metalurgia do pó	33
6.1.1	Microestrutura	33
6.1.2	Tenacidade	36
6.1.3	Dureza	39

6.1.5 Resistência ao Desgaste.....	41
6.1.6 Retificabilidade.....	43
6.1.7 Custo X Vida útil.....	43
7 CONCLUSÃO	47
8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação que envolvem mudanças de forma, podem ser classificados em duas categorias: fabricação sem remoção de material e fabricação com a remoção de material. Enquanto a primeira categoria é composta pelos processos de fabricação como soldagem, conformação e fundição, a segunda é composta basicamente pelos processos de usinagem. Os custos envolvidos nas operações de usinagem representam cerca de 15% de todos os produtos manufaturados nos países industrializados (AMORIM, 2002).

Diversos segmentos industriais necessitam do corte transversal ou longitudinal do produto semi-acabado para o ajuste dimensional do produto final. Estas operações devem ser realizadas com alta velocidade e precisão para manter a alta produtividade e a qualidade da produção. As facas circulares industriais são as ferramentas mais utilizadas neste tipo de operação por apresentarem eficiência no corte contínuo de uma gama diversa de materiais (BLANCO, 2016).

As primeiras facas circulares industriais eram inicialmente constituídas em aço carbono, entretanto, com o avanço dos sistemas de corte e da velocidade de produção, tornou-se necessário a confecção de facas circulares com aços mais resistentes, que pudessem ser operados em velocidades superiores e por um período mais longo de tempo. Então surgiram as primeiras facas circulares em aços ferramenta, englobando as facas de aços para trabalho a frio e de aços rápidos (HSS, do inglês *High Speed Steel*) (TKM, 2016).

Atualmente, grande parte da indústria ainda utiliza facas circulares de aço ferramenta obtidos por metalurgia convencional, entretanto a partir de 1980 surgiram as primeiras facas em aço ferramenta sinterizado, uma tecnologia que lentamente tem se difundindo no mercado, substituindo as ferramentas de aço convencional, pelas suas propriedades que serão discutidas neste trabalho (TKM, 2016).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Comparar os aços ferramenta para trabalho a frio obtidos por metalurgia convencional com os aços ferramenta obtidos por metalurgia do pó em relação à microestrutura e às propriedades mecânicas fundamentais para o bom desempenho na aplicação em facas circulares industriais.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar o tamanho e distribuição dos carbonetos entre os aços sinterizados e convencionais, relacionando com as propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade;
- Comparar a tenacidade dos aços ferramenta sinterizados e convencionais;
- Comparar a resistência ao desgaste dos aços ferramenta sinterizados e convencionais
- Comparar a dureza dos aços ferramenta sinterizados e convencionais;
- Discutir a influência do processo de obtenção dos aços ferramenta com o tempo de vida útil na aplicação em facas circulares industriais;

3 JUSTIFICATIVA

As facas circulares são utilizadas em diversos segmentos industriais, como por exemplo, nos setores: Alimentício, celulose e papel, embalagens, têxtil, polimérico, siderúrgico, eletroeletrônico, gráfico, etc., sendo muito empregadas por agregar velocidade à produção e por possuir cortes precisos e de qualidade (AFIGRAF, 2012).

Mesmo com a elevada demanda industrial pelas facas circulares, existe uma escassez de trabalhos na literatura que apresentam alguma discussão sobre os materiais nos quais são confeccionadas. Portanto, mostra-se relevante a realização de um estudo comparativo entre os principais materiais utilizados nessas ferramentas.

Quando a seleção de um material para uma aplicação específica de faca circular industrial é feita corretamente, evita-se uma série de despesas nas indústrias nas quais estão inseridas. Estes custos podem ser advindos dos seguintes fatores: substituição prematura da faca, necessidade de reafiações e tempo de setup para substituição e afiações da ferramenta.

Quando utiliza-se o aço mais indicado para a aplicação, além da redução de custos, aumenta-se a qualidade da superfície cortada, devido à superioridade na retenção do fio de corte da faca, que promove cortes mais refinados por um maior período de tempo.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Facas circulares industriais

As facas circulares industriais são ferramentas de corte utilizadas em larga escala por diversos segmentos industriais. Elas são aplicadas no corte de uma infinidade de materiais, como por exemplo: chapas de aço, polímeros termoplásticos, elastômeros, couro, tecidos, mangueiras hidráulicas, no corte de produtos alimentícios, e com grande destaque, no corte de papel e papelão (SATURNO, 2010)

As facas circulares são fornecidas em aços temperados e revenidos, o gume cortante pode ser liso ou serrilhado, o diâmetro externo pode variar de 30 mm a 600 mm, possuem um furo centralizado, que pode possuir diferentes dimensões e formatos para promover sua fixação no suporte para faca (AFIGRAF, 2012; SATURNO, 2010). As dimensões são definidas de acordo com o segmento industrial e com as necessidades de cada empresa. As facas circulares podem ser cônicas ou retas, sendo que as cônicas apresentam uma conicidade padronizada e são utilizadas em conjunto com um contra-faca, principalmente no corte longitudinal. As facas retas possuem uma conicidade menor do gume da ferramenta, sendo muito utilizadas no corte transversal dos materiais através do corte sob pressão (KLINGELNBERG, 2014). Alguns modelos de facas circulares podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 - Modelos de facas circulares comerciais. A – Faca circular reta serrilhada com dentes em “V”; B – Faca circular cônica baioneta; C – Faca circular reta serrilhada com dentes retos; D – Faca circular cônica.



Fonte: Adaptada de Metalúrgica Lucco, 2018.

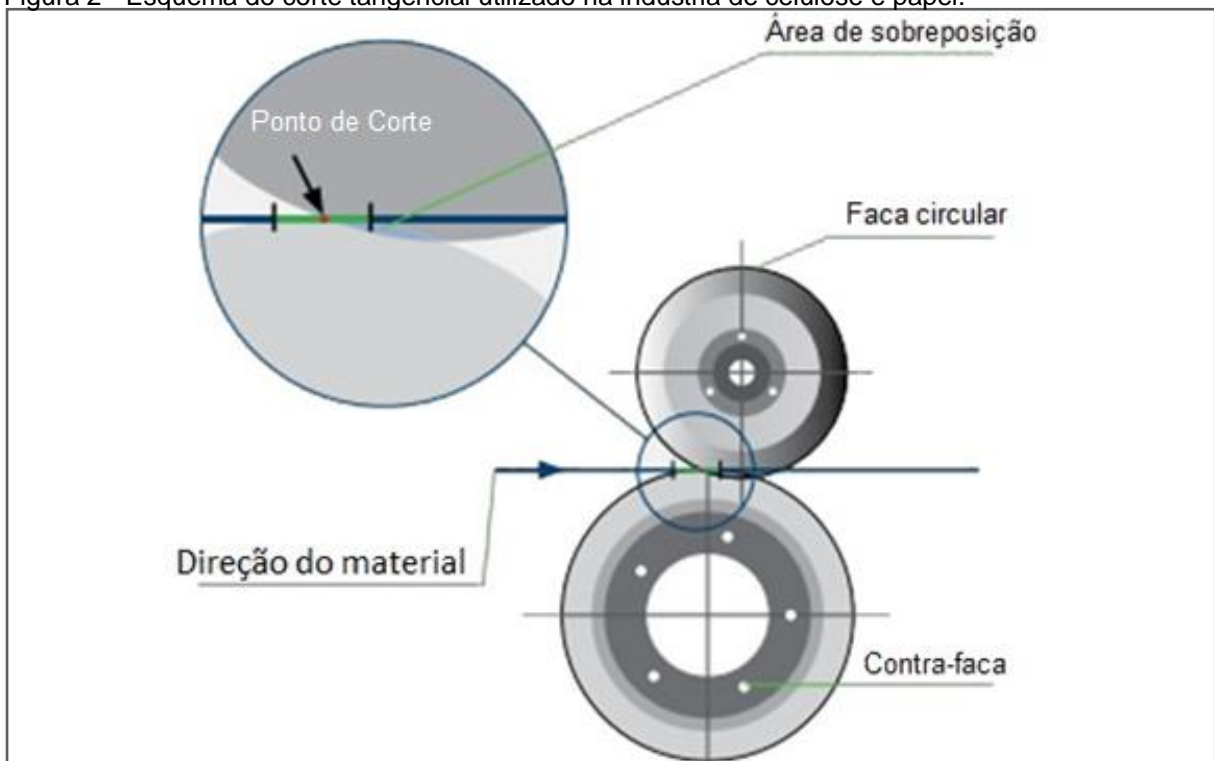
4.1.1 Contra-faca circular

Dependendo do tipo de material trabalhado, pode ser utilizado um contra-faca para auxiliar no processo de corte, que é popularmente conhecido como corte

tesoura. Neste tipo de operação o contra-faca é rotacionado no sentido oposto da faca circular. O material trabalhado mantém uma velocidade determinada, enquanto é tracionado por bobinas para passar entre os gumes cortantes das facas, onde o material é cortado através do esforço cisalhante. A distância lateral entre a faca e o contra-faca é dependente da espessura e do material a ser cortado, geralmente sendo definidas através de gabaritos personalizados para cada tipo de corte, sendo que se a distância for menor que a necessária gera-se desgaste excessivo do ferramental, e se a distância for superior a ideal causa-se um corte irregular com a formação de rebarbas.

A profundidade de sobreposição entre a faca e o contra-faca também é um fator relevante para a qualidade do corte, variando também com a espessura do material trabalhado, sendo que até um certo limite, quanto menor for a profundidade de sobreposição, melhor fica a qualidade superficial do corte (TKM, 2016). Na Figura 2 encontra-se disponível um esquema demonstrando o funcionamento de um sistema de corte com a utilização de um contra-faca.

Figura 2 - Esquema do corte tangencial utilizado na indústria de celulose e papel.



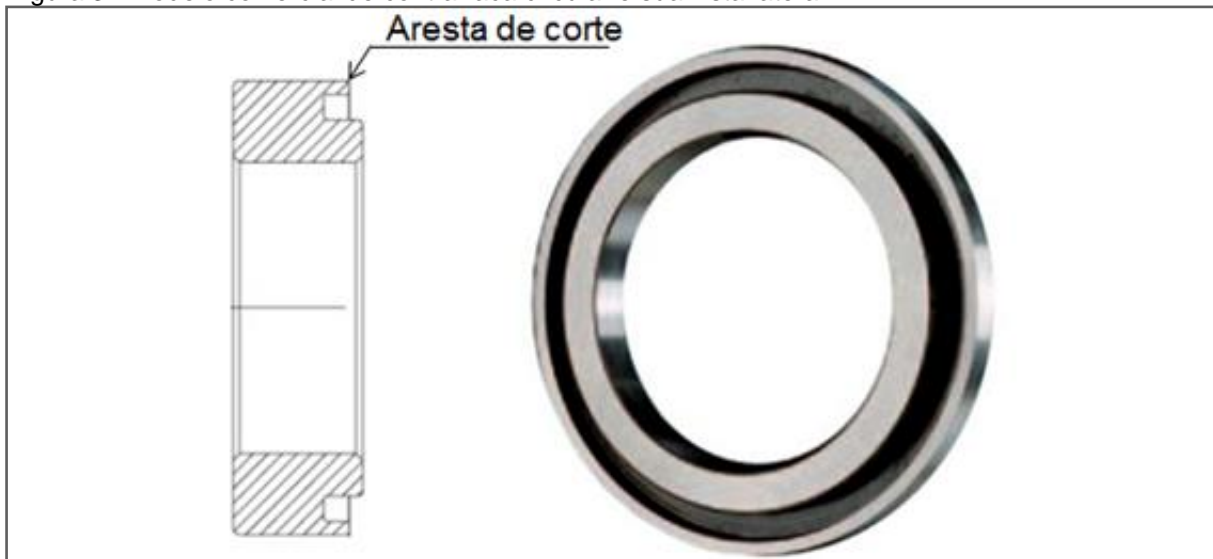
Fonte: Adaptado de TKM, 2016.

O contra faca possui uma aresta de corte e deve ser constituído de um material com excelentes propriedades mecânicas para garantir sua integridade

durante um longo período, pois, durante a operação, o mesmo sofre desgaste e esforços de flexão.

Os contra-facas são utilizados principalmente em operações que envolvem o corte longitudinal de materiais em folhas ou chapas, sendo vastamente utilizado no corte de papel e de chapas de aço, em um sistema que permite o corte com altíssima produtividade (MARIO COTA, 2012). Na Figura 3 é possível visualizar um modelo de contra-faca comercial.

Figura 3 - Modelo comercial de contra-faca circular e sua vista lateral.



Fonte: Adaptada de TKM, 2016.

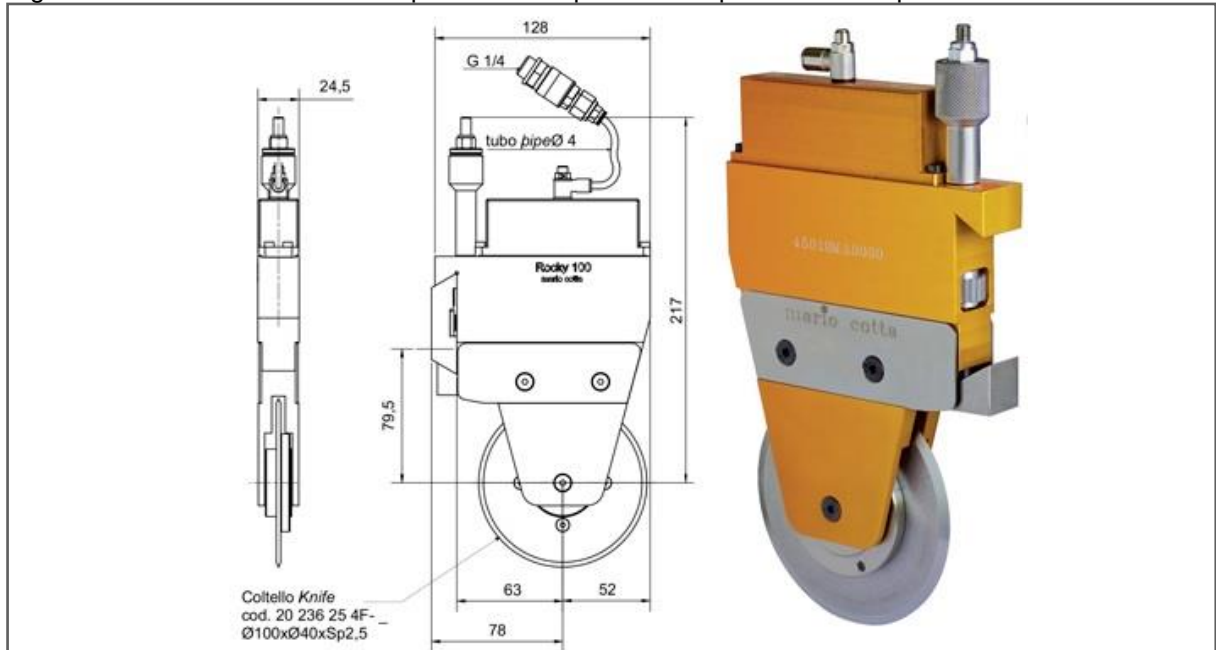
4.1.2 Suporte para faca circular

O suporte da faca executa a tarefa de fixar a faca circular, sendo responsável por transmitir o torque do motor do equipamento para a faca. É muito importante que durante a rotação, a faca circular esteja bem fixa no suporte, para evitar ao máximo a sua vibração, que gera por consequência: aumento no desgaste do fio de corte, desgaste axial pelo batimento lateral da faca no material trabalhado, além de aumentar os esforços de flexão na extensão da faca, aumentando a chance de uma fratura catastrófica.

Na Figura 4 pode ser visualizado um modelo de equipamento para corte transversal de tubetes utilizado sem a presença de um contra-faca, que é chamado comercialmente de corte por esmagamento ou corte por pressão (KLINGELNBERG, 2014).

Os suportes para faca podem ter configurações diversificadas, sendo que sua movimentação é dependente do equipamento ao qual estão inseridos, podendo ser uniaxial ou biaxial, por ação hidráulica, pneumática ou manual (MARIO COTA, 2012).

Figura 4 - Modelo comercial de suporte de faca pneumático para corte sob pressão.



Fonte: Mario Cotta, 2012.

Os suportes também podem estar posicionados em série em um mesmo equipamento como representado na Figura 5, sendo esta configuração muito comum na indústria de papel e papelão e no corte de chapas metálicas (SATURNO, 2010).

Figura 5 - Maquinário para corte de papel com diversas facas circulares.

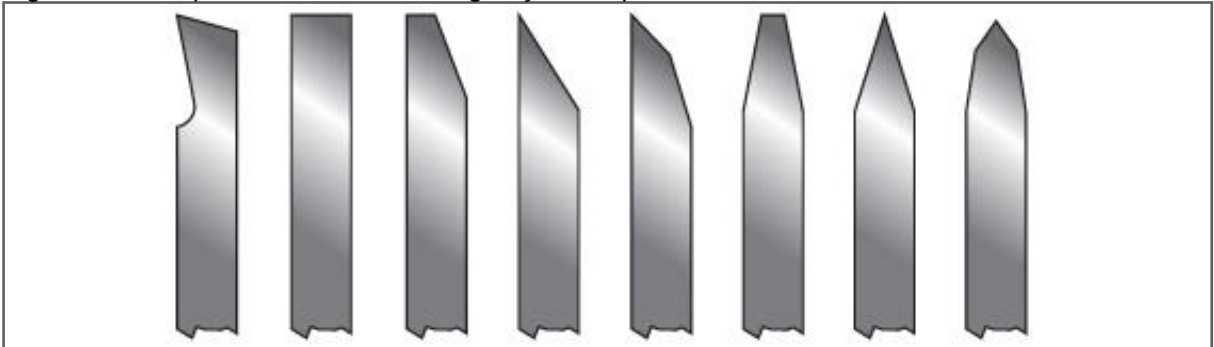


Fonte: Klingelberg, 2014

4.1.3 Perfil e afiação das lâminas

As lâminas das facas circulares industriais podem ser fornecidas biseladas em uma única face ou nas duas faces da lâmina, podendo ter um único ângulo ou dois ângulos de afiação com diferentes geometrias, como esquematizado na Figura 6.

Figura 6 - Exemplos de diferentes configurações de perfis de lâminas circulares de corte industrial.



Fonte: Adaptado de GSP, 2016.

O perfil da lâmina e o ângulo de afiação são escolhidos de acordo com o segmento industrial em que a faca é utilizada, variando com o material trabalhado, com o material em que é constituído a faca e com a qualidade superficial de corte desejada (KLINGELNBERG, 2014).

Tendo em conta que a tensão admissível especificada para uma determinada ferramenta, a força suportada pelo material é totalmente dependente da área de sua seção transversal. Quando reduzimos a seção transversal do gume cortante também é reduzida a força necessária para ultrapassar a tensão admissível, facilitando o mecanismo de falha. Por consequência, quando deseja-se trabalhar com ângulos muito pequenos e gumes muito afiados, é necessário que o material da ferramenta tenha uma boa tenacidade para suportar a elevada tensão no seu gume cortante. A mesma relação também pode ser realizada com o material trabalhado, visto que a força necessária para cortar uma embalagem polimérica é muito diferente da força necessária para cortar uma chapa de aço. Desta forma, o ângulo do gume de uma faca pode ser reduzido ao trabalhar-se com materiais com menor resistência ao cisalhamento e dureza.

O ângulo de afiação da ferramenta está diretamente relacionado com a vida útil e com o desgaste da faca. As facas mais afiadas, ou seja, com ângulos pequenos de afiação, tendem a sofrer menos desgaste, pois durante o corte, além

de necessitar de uma força inferior, também são penetradas com uma espessura muito menor no material de trabalho, o que diminui muito o desgaste lateral sofrido pela faca. Já em termos de vida útil, quando tem-se uma faca muito afiada, a tendência é que sua vida útil seja reduzida devido ao desgaste e, principalmente à fadiga, portanto é importante cadenciar bem o ângulo de afiação do gume com as necessidades da aplicação (SMITH, 2008).

Podemos citar dois exemplos muito distintos de aplicação das facas circulares industriais, uma delas é aplicação no corte de carcaças de animais, onde a qualidade e precisão do corte não são importantes, e a principal preocupação é com a vida útil do material. Neste caso pode-se escolher ângulos de afiação intermediários e selecionar materiais com maior tenacidade e mais baratos, como por exemplo um aço ferramenta para trabalho a frio. O segundo exemplo trata-se de um micrótomo, um aparelho capaz de produzir cortes de 1 a 10 μm em material biológico para preparação de amostras para microscopia. Neste caso temos diversas solicitações, a afiação da ferramenta tem que ser impecável, o polimento tem que ser feito na escala de 0,03 μm (R_A), o material tem que ser resistente a corrosão, dentre muitas outras solicitações que poderiam ser citadas. Neste caso específico, a requisição de tenacidade torna-se quase irrelevante, visto que os cortes realizados são pequenos e controlados. A Leica, uma das maiores desenvolvedoras mundiais de micrótomos, trabalha com algumas facas circulares de CBN e diamante na lâmina de seus micrótomos, pois é possível usinar o raio do gume cortante muito baixo (escala micrométrica) nestes materiais, o que para outras classes de materiais provocaria deformação plástica antes de obter raios tão pequenos (LEICA, 2010).

A lâmina deve ser bem afiada, polida e sem rebarbas para produzir um corte preciso, com bom acabamento e com menor aquecimento. Entretanto durante a operação de corte ocorre o desgaste do gume cortante, o que acaba comprometendo as condições ideais de corte (KLINGELNBERG, 2014). Recomenda-se para a indústria de papel, a reafiação da faca quando a espessura do fio de corte chega a 0,3 mm, porém este procedimento muitas vezes pode ser bem complexo devido à grande extensão do fio de corte, e da complexidade do perfil da lâmina utilizado. Muitas vezes a reafiação não pode ser realizada dentro da própria empresa, necessitando a contratação de serviços externos para realiza-la (AFIAÇÃO CAMPINAS, 2018).

4.2 Processo de Corte

Corte é o processo de conformação mecânica que se destina à obtenção de formas geométricas a partir da ação de pressão exercida por um punção ou uma lâmina de corte. Quando o punção ou a lâmina inicia a penetração no material, o esforço de compressão converte-se em esforço cortante, provocando a separação brusca da seção (BOFF et al., 2012).

O processo de corte está classificado na norma alemã DIN 8580, como um dos processos de fabricação, cujo objetivo é a alteração da forma de um material, pela sua separação (SOUZA, 2001).

Müller (2012), descreve que os processos de separação de materiais encontrados na norma DIN 8588 podem ser divididos em: corte por cisalhamento, corte por faca, corte por esmagamento, rasgar e quebrar; conforme representado na Figura 7.

Figura 7 - Classificação dos processos de separação (norma DIN 8588).



Fonte: Adaptado de Müller, 2012.

4.2.1 Corte por faca circular

Discutir sobre os parâmetros de corte das facas circulares torna-se complexo devido a sua grande versatilidade, podendo ser aplicadas em diversos tipos de equipamentos de corte, com configurações e parâmetros diferenciados para cada aplicação. Entretanto, em grande parte das indústrias de alta produtividade, onde utiliza-se facas circulares, elas são aplicadas no corte longitudinal de materiais em forma de chapas, no chamado corte tesoura (TKM, 2016).

No corte tesoura, o material trabalhado é geralmente tracionado através de bobinas, passando entre as arestas de corte da faca circular e do contra-faca, ambas mantendo uma certa velocidade de rotação em sentidos opostos. A

velocidade de rotação é dependente da resistência ao cisalhamento e da velocidade de avanço do material trabalhado, sendo que velocidades muito altas causam maior desgaste do gume cortante da ferramenta, mas também possibilitam a realização do corte com uma profundidade de sobreposição menor entre as facas, o que diminui o desgaste lateral da faca circular (TKM, 2016).

O perfil e o ângulo do gume cortante da faca circular também alteram as propriedades e os esforços de corte, sendo que para ângulos menores e mais afiados, necessita-se uma força inferior para cisalhar o material de trabalho, além de gerar um corte mais limpo e com melhor qualidade superficial, entretanto para ângulos muito pequenos, gera-se tensões muito altas no gume cortante, o que aumenta o risco da fratura do gume da ferramenta, requisitando materiais com tenacidade apreciável para suportar a tensão de trabalho (KLINGELNBERG, 2014).

A rugosidade da superfície de corte é outro aspecto que interfere na qualidade do corte e no desgaste da faca, sendo que quanto menor for a rugosidade superficial, maior será a qualidade da superfície cortada e menor será o desgaste adesivo da faca circular, além de dificultar a nucleação de trincas superficiais, o que aumenta significativamente a resistência a fadiga da ferramenta (TKM, 2016).

No corte por pressão ou esmagamento, que é muito utilizado no corte de barras, tubetes e fios em diversos segmentos industriais, a faca circular movimentase axialmente, avançando em direção ao material de trabalho em uma velocidade de rotação geralmente superior á do corte tesoura (METALURGICA LUCCO, 2018). A força utilizada para a realização do corte é dependente da velocidade de rotação, da velocidade de avanço da faca e do perfil e afiação da ferramenta. Para altas velocidades de avanço, aumenta-se a produtividade, entretanto também aumenta-se a força necessária para o corte, necessitando de uma maior tenacidade da ferramenta para suportar a tensão. Quando utiliza-se velocidades maiores de rotação, a força necessária para realizar o avanço é reduzida, entretanto em altas rotações gera-se um maior aquecimento e desgaste abrasivo da ferramenta, requisitando de maior dureza a quente e resistência ao desgaste (TKM, 2016; GSP, 2016).

Em ambos os tipos de corte, o material trabalhado interfere muito nos parâmetros de corte e nos esforços relativos a ferramenta. A resistência ao cisalhamento, as dimensões e a presença de partículas abrasivas influenciam nos parâmetros de corte e no desgaste da ferramenta. As partículas abrasivas são as

principais causadoras do desgaste abrasivo, enquanto as dimensões e a resistência ao cisalhamento interferem na força necessária para efetuar o corte (SATURNO, 2010).

4.3 Materiais utilizados em ferramentas de corte industriais

As ferramentas utilizadas em operações de corte são confeccionadas a partir de materiais com elevada dureza, refletindo na resistência ao desgaste, buscando-se obter assim uma maior vida útil da ferramenta. Outra propriedade muito importante é a tenacidade. A tenacidade dos aços é definida como a energia que um material pode absorver antes de fraturar. A tenacidade à fratura é outra propriedade muito importante, definida como a resistência do material à propagação de uma trinca. O material da ferramenta deve possuir elevada tenacidade à fratura para ser capaz de absorver muita energia antes de fraturar, para que a ferramenta resista aos choques provenientes da operação de corte (SILVA et al., 2005).

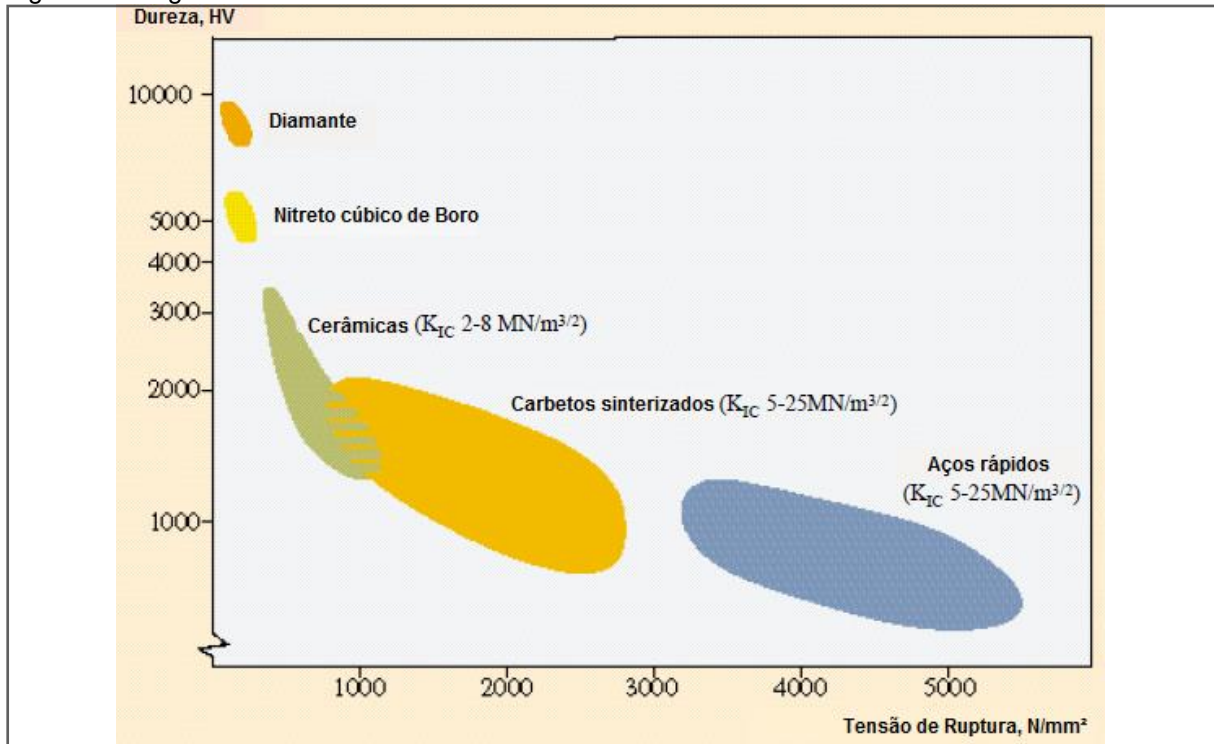
O problema que ocorre é que as propriedades de dureza e tenacidade são antagônicas, ou seja, os materiais que apresentam elevada dureza apresentam menor tenacidade e vice-versa (NETO, 1996).

A dureza elevada garante um maior tempo de utilização e tempo entre afiações da ferramenta, se não houver a fratura da ferramenta, visto que o desgaste do gume cortante é reduzido. Já a tenacidade elevada dificulta a propagação das trincas e a fratura repentina do fio de corte da lamina, o que inutiliza imediatamente a ferramenta.

Um dos desafios na seleção de um material para uma ferramenta de corte é conciliar a máxima dureza e resistência à abrasão com a tenacidade suficiente para não haver a fratura da mesma, visto que são propriedades antagônicas. Deve-se analisar caso a caso para que se encontre a melhor relação entre as duas propriedades para a aplicação específica. Na Figura 8 é possível observar como essas propriedades variam para alguns dos principais materiais utilizados em ferramentas de corte.

Durante a operação de corte, as ferramentas estão sujeitas a altas tensões de contato e altas temperaturas recorrentes do atrito entre a interface da ferramenta e a superfície do material a ser cortado (KALPAKJIAN; SCHMID, 2010).

Figura 8 - Diagrama de dureza-tenacidade de materiais utilizados em ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Sandvik, 2004.

Conseqüentemente, o material da ferramenta de corte deve possuir as seguintes propriedades (MACHADO, 2009):

- Alta dureza.
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência à compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Nenhum dos inúmeros materiais de corte disponíveis atualmente possui todas essas propriedades no mais alto grau. Desta forma, em cada aplicação específica, deve-se analisar quais são as propriedades primordiais e quais as propriedades secundárias, de modo a selecionar o material adequado em cada caso

(STEMMER, 1993). A definição das propriedades mais relevantes na seleção do material para a ferramenta de corte depende de uma série de fatores operacionais, entre os quais, podem ser citados: o material submetido ao processo de corte, a natureza e os parâmetros da operação de corte, a forma e as dimensões da ferramenta e a utilização de um fluido de refrigeração ou lubrificação (FERRARESI, 1969).

As facas circulares industriais devem possuir o menor raio de curvatura possível em seu gume cortante, com o intuito de reduzir a força normal necessária para a operação de corte, pois a tensão cisalhante gerada no material de trabalho é dependente da área de aplicação, da força normal e do material a ser cortado, que por sua vez é função do raio do gume cortante da ferramenta, sendo que para raios menores, diminui-se a força necessária para efetuar o corte (KLINGELNBERG, 2014).

A restrição do raio da ponta, a pequena espessura do corpo (de 0,6 a 4,0 mm) e a grande relação entre diâmetro e espessura, são fatores limitantes na seleção do material da faca circular, pois apesar da dureza ser um fator importantíssimo, neste caso, a tenacidade pode tornar-se ainda mais importante para que o material suporte as elevadas tensões durante a operação de corte, sem que haja a fratura da ferramenta (SMITH, 2008).

4.3.1 Aços ferramenta obtidos por metalurgia convencional

Os aços ferramenta são aços carbono, em conjunto com outros elementos de liga, que podem ser tratados termicamente, obtendo-se alta dureza e boa resistência mecânica, sendo aplicados principalmente em ferramentas e matrizes industriais (NETO, 1996). Os aços ferramenta são os materiais mais utilizados nas facas circulares industriais, sendo que seus principais pontos positivos são: Boa tenacidade, preço inferior aos outros materiais de corte, facilidade de usinagem, podendo-se obter gumes com ângulos muito baixos e o seu tratamento térmico é relativamente simples.

As principais propriedades mecânicas dos aços ferramenta estão diretamente associadas com o teor de carbono e de elementos de liga presentes em sua estrutura. Na Tabela 1 é possível observar a influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços ferramenta.

Tabela 1 – Habilidades dos elementos de liga em conferir certas propriedades aos aços ferramenta.

Propriedade	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 de grão	V, W, Mo, Mn, Cr

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2005.

A resistência ao desgaste é influenciada principalmente pela sua dureza superficial, que pode ser aumentada com a utilização de tratamentos térmicos, termoquímicos ou utilização de recobrimentos com materiais de dureza superior a do aço. As características que afetam a tenacidade negativamente nestes aços são: formação de carbonetos grandes, segregados e alinhados, elevada tensão interna causada pelo resfriamento brusco durante a têmpera, presença de defeitos internos, retificação inadequada e presença de cantos vivos (CHIAVERINI, 2005).

Os aços ferramenta podem ser classificados em famílias específicas, de acordo com o tipo de seu tratamento térmico, com sua aplicação e através dos principais elementos de liga (SILVA; MEI, 2011). A classificação dos aços ferramenta pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos aços ferramenta.

Classificação dos Aços Ferramenta		Série
Aços temperáveis em água (<i>Water</i>)		W
Aços resistentes ao Choque (<i>Shock</i>)		S
Aços para fins especiais	Tipo baixa liga (<i>Low alloy</i>)	L
	Tipo carbono-tungstênio	F
	Aços para moldes	P
Aços para trabalho a frio	Aços temperáveis em óleo (<i>Oil</i>)	O
	Aços média liga temperáveis ao ar (<i>Air</i>)	A
	Aços Alto carbono, alto cromo	D
Aços para trabalho a quente (Hot Working)	Ao cromo	H1 – H19
	Ao tungstênio	H20 – H39
	Ao molibdênio	H40 – H59

Aços rápidos (HSS)	Ao Tungstênio Ao Molibdênio	T M
-----------------------	--------------------------------	--------

Fonte: Adaptado de Silva; Mei, 2011.

4.3.2 Aços ferramenta sinterizados

Esta categoria de aços é obtida através da metalurgia do pó (PM, do inglês *powder metallurgy*) que é composta basicamente por quatro etapas: produção dos pós, mistura dos pós e aditivos, compactação/moldagem e sinterização. A microestrutura final obtida é dependente de todas estas etapas, dependendo de parâmetros de processamento como: tipo e tamanho do pó de ferro utilizado, pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização e atmosfera utilizada (BINDER, 2009).

Os aços ferramenta obtidos pela PM utilizam os mesmos tratamentos térmicos básicos que os aços ferramenta convencionais, entretanto eles tendem a responder mais rápido e com maior previsibilidade aos tratamentos, por causa da sua homogeneidade microestrutural. Os tratamentos térmicos utilizados são em ordem: recozimento, têmpera e múltiplos revenimentos. A temperatura ideal para cada tratamento varia de acordo com a quantidade e natureza dos elementos de liga do aço (SILVA; MEI, 2011).

4.3.3 Carbonetos sinterizados

São produzidos através da PM, pela sinterização de carbonetos de metais refratários com um aglomerante, tais como Fe, Ni ou Co, resultando em um material com excelente resistência a abrasão, mesmo em altas temperaturas. Atualmente os carbonetos sinterizados, também conhecidos como metais duros, são a família de materiais mais utilizados nas ferramentas para usinagem, com destaque para o carboneto de tungstênio (WC) aglomerado com Co, que é o material mais utilizado em insertos para usinagem de ligas de difícil usinagem (SMITH, 2008).

Apesar do grande sucesso da família dos metais duros na usinagem, estes materiais não são tão utilizados quando se trata da aplicação em facas circulares industriais (METALURGICA LUCCO, 2018). A dureza muito elevada dos carbonetos sinterizados, acaba resultando em uma tenacidade bem inferior a família dos aços ferramenta. As facas circulares industriais, por possuírem uma elevada relação de

diâmetro por espessura e um gume cortante com espessura muito reduzida, na maioria das aplicações requerem uma tenacidade elevada para evitar a fadiga e a fratura do gume cortante (NETO, 1996).

Os metais duros são indicados para facas circulares industriais onde a dureza é o requisito principal, como por exemplo no corte de chapas de aços alta liga, onde a dureza torna-se a propriedade mais importante para que seja possível efetuar o corte sem o desgaste excessivo da ferramenta, entretanto, como já discutido anteriormente, o raio do gume cortante e o ângulo de corte tem que ser aumentados para evitar a fratura do material (SANDVIK, 2004).

Existem outros materiais com durezas muito elevadas que são utilizados como ferramentas de corte no processo de usinagem, podendo-se citar: nitreto cúbico de Boro, algumas cerâmicas como a alumina (Al_2O_3), o nitreto de silício (Si_3N_4) e o diamante. Esses materiais apresentam resistência a abrasão excelentes; entretanto, a baixa tenacidade só permite a aplicação destes materiais em facas circulares industriais em casos muito específicos, como o do micrótomo citado anteriormente (STEMMER, 1993).

4.4 Desgaste das ferramentas de corte de aço ferramenta

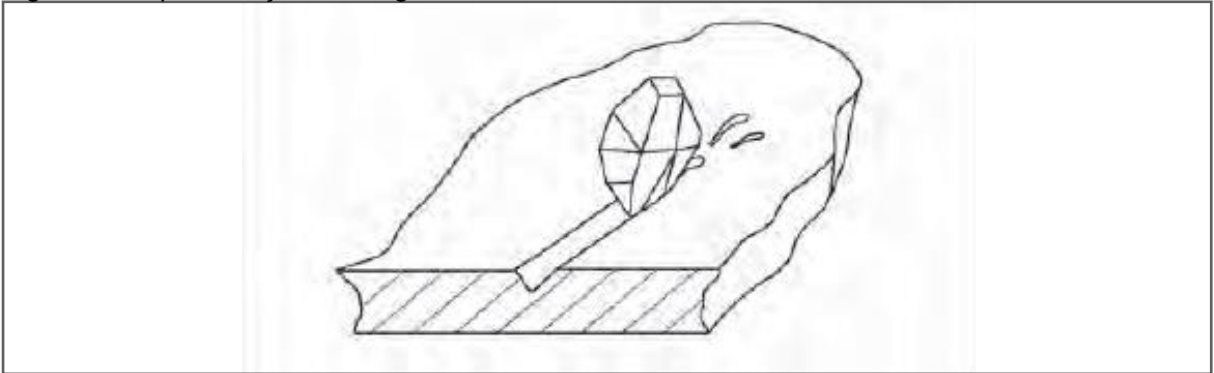
Existem três tipos de desgaste predominantes nos aços ferramentas: abrasão, adesão e desgaste por fadiga. Durante a aplicação em ferramentas de corte, os mecanismos de desgaste ocorrem em conjunto, sendo dependentes do tipo e dos parâmetros de corte utilizados, portanto para uma solução ideal é necessário experimentação e conhecimento sobre o material e a aplicação, para que sejam utilizados corretamente os meios de proteção contra o desgaste, como por exemplo: tratamentos térmicos, tratamentos termoquímicos e aplicação de revestimentos químicos por CVD ou PVD (NETO, 1996).

4.4.1 Desgaste abrasivo

É caracterizado pela perda de massa da ferramenta, através da remoção de material pela ação da penetração de partículas ou protuberâncias no interior do aço, que são forçados a movimentar-se através da superfície, removendo um sulco de material por onde passam, como esquematizado na Figura 9. Este desgaste ocorre

quando uma fase dura é atritada contra o material da ferramenta, esta fase pode estar envolvida em uma matriz mole, como o caso de inclusões de óxidos no papel (NETO, 1996).

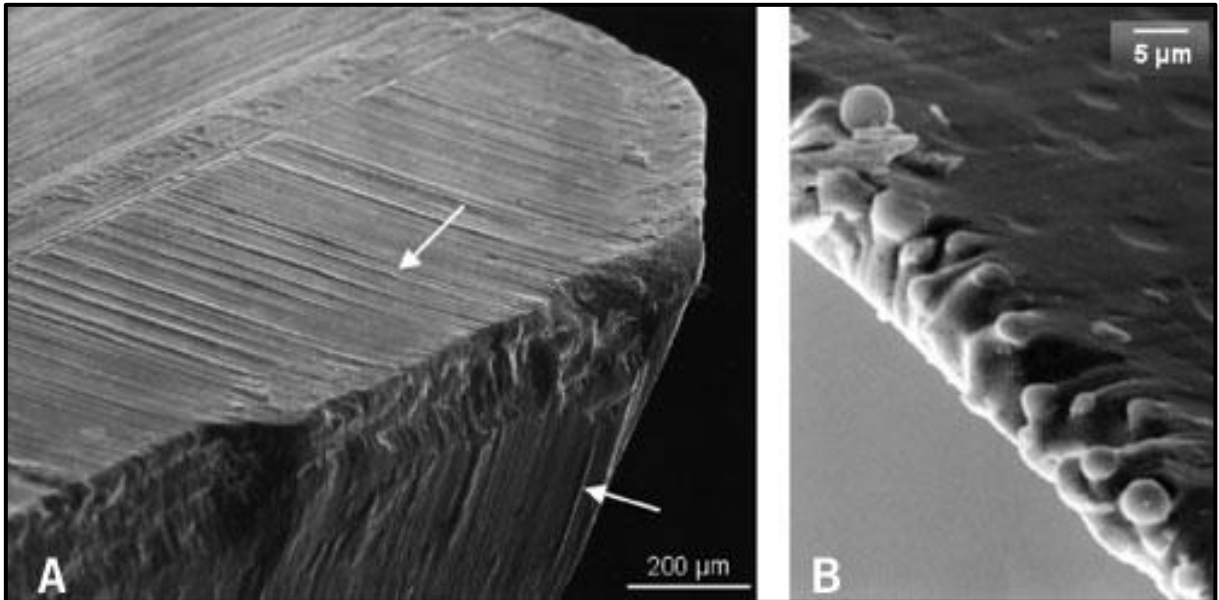
Figura 9 - Representação do desgaste abrasivo.



Fonte: Budinski, 2007.

O desgaste abrasivo é predominante na região do flanco da ferramenta, devido ao grande atrito com o material de trabalho. Na Figura 10 pode ser visualizado o desgaste abrasivo em uma ferramenta de HSS. O padrão ranhurado indicado na Figura 10 A, ocorre em função da combinação dos riscos causados por partículas do material de trabalho, mais duras que a matriz do HSS, com a proteção contra os riscos de uma fase muito dura de carbonetos, capaz de resistir à abrasão destas partículas, como podemos ver na figura 10 B com maior amplificação. A resistência ao desgaste abrasivo é aumentada em função da dureza e da fração de carbonetos presentes nos aços ferramenta (HOGMARK; OLSSON, 2008).

Figura 10 - Desgaste abrasivo no flanco de uma ferramenta de corte utilizada em usinagem. Em B é possível visualizar a superfície dos carbonetos resistindo ao desgaste abrasivo.



Fonte: Hogmark, Olsson, 2008.

A taxa de desgaste gerada pelas “ n_p ” partículas abrasivas atuantes no sistema, pode ser definida pela equação de Archard (1), para o desgaste abrasivo.

$$Q = K_A \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

Onde Q é a taxa de desgaste, que é interpretada como o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento; K_A mede a severidade do desgaste, conhecido como constante de Archard, um parâmetro adimensional e sempre menor que 1; F_N é a força normal total aplicada sobre o sistema e H é a dureza do material desgastado (BUDINSKI, 2007).

4.4.2 Desgaste adesivo

Ocorre quando o material trabalhado adere na superfície da ferramenta, devido à falta de lubrificação e as elevadas pressões existentes no processo. Este desgaste acontece em consequência da solda a frio de regiões microscópicas entre a ferramenta e o material de trabalho (NETO, 1996).

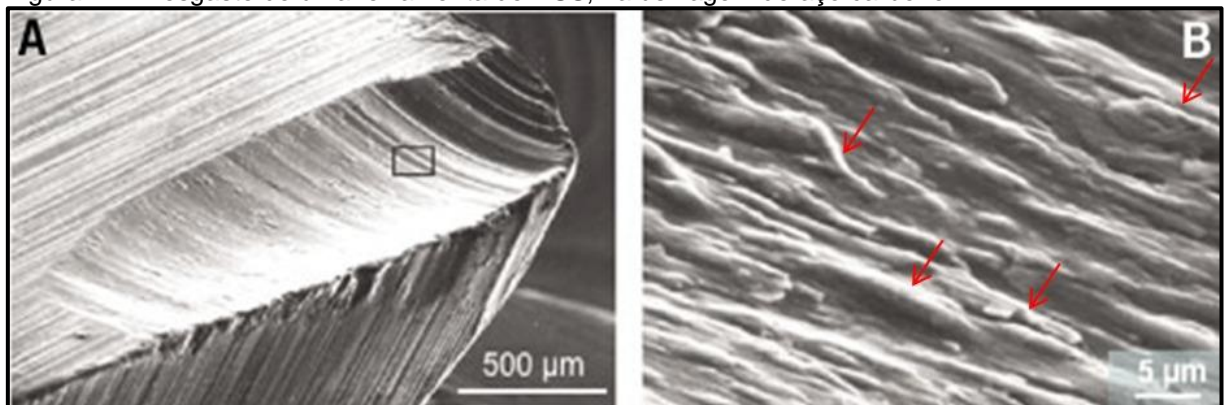
O desgaste adesivo nos aços ferramenta é favorecido por altas velocidades de corte e por altas temperaturas, onde a elevada tensão de cisalhamento na interface de corte, gera a microsoldagem de pequenas partículas de cavaco na superfície da ferramenta. A adesão também pode ocorrer no corte de materiais quimicamente agressivos ao aço ferramenta, mesmo em temperaturas controladas

(HOGMARK; OLSSON, 2008; TIER, 1998). A adesão de uma camada do material trabalhado no gume cortante da ferramenta é conhecida como gume postiço ou aresta postiça, gerando alteração da geometria da ferramenta, dificultando o processo de corte e acelerando os mecanismos de desgaste (TIER, 1998).

Na Figura 11, é possível observar o flanco de uma ferramenta de usinagem de HSS, que aparenta em menor magnificação (A) ter sofrido apenas o desgaste abrasivo, entretanto, quando em maior magnificação (B), é possível visualizar a adesão de partículas do material trabalhado (Aço carbono) na superfície da ferramenta, demonstrando que os fenômenos de desgaste podem acontecer em conjunto (HOGMARK; OLSSON, 2008).

Dentre os fatores que diminuem a ocorrência deste tipo de desgaste estão: Aumento da dureza a quente do HSS, presença de precipitados lubrificantes na ferramenta (como nódulos de grafita), redução do tamanho de grão e o aumento na fração de carbonetos finos (NETO, 1996).

Figura 11 - Desgaste de uma ferramenta de HSS, na usinagem de aço carbono.

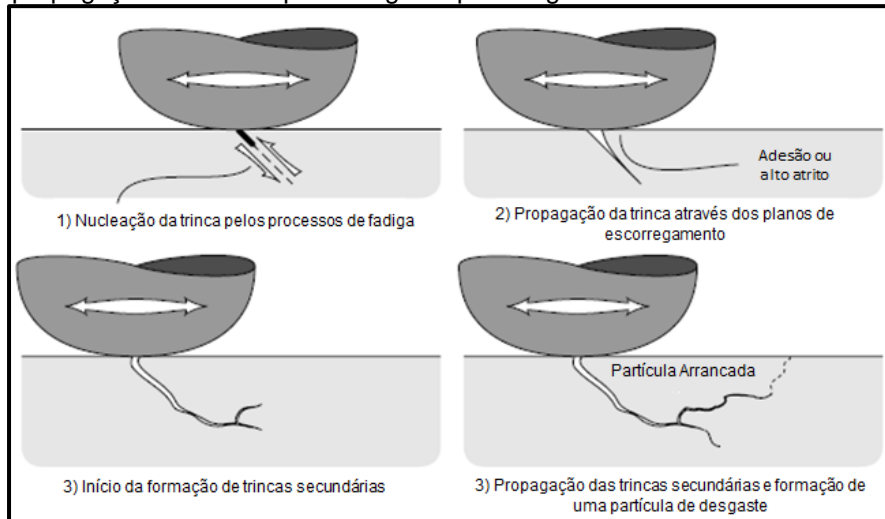


Fonte: Hogmark; Olsson, 2008.

4.4.3 Desgaste por fadiga

É causada pela rolagem ou escorregamento de um componente sobre outro durante um grande número de ciclos, isto leva a formação de microtrincas com origem na superfície, que posteriormente acabam resultando na fratura ou na formação de *galling*, que é a remoção de material da ferramenta causada pela adesão do material trabalhado na ferramenta. A Figura 12 ilustra bem como pode ser formado o *galling* através do desgaste por fadiga.

Figura 12 - Ilustração esquemática do processo de nucleação e propagação de trincas pelo desgaste por fadiga.

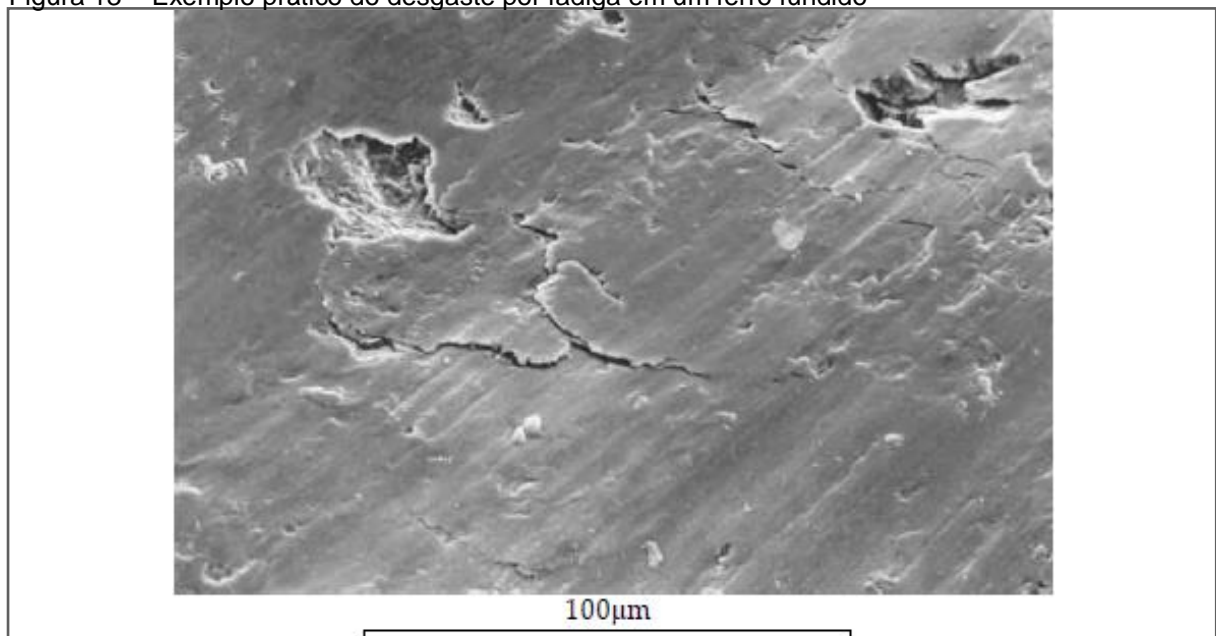


Fonte: Adaptado de Stachowiak, 2013.

O *galling* ocorre geralmente em situações onde se tem o desgaste por fadiga, onde através do esforço repetitivo, uma trinca se propaga o suficiente para ser arrancada pela adesão entre a ferramenta e o material de trabalho (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

A solução para este problema seria o aumento da tenacidade e da dureza do aço. Uma resolução plausível é a diminuição do tamanho dos carbonetos propiciada pela PM, que possibilita o aumento da tenacidade sem comprometer a dureza dos aços ferramenta. A Figura 13 traz um caso do desgaste por fadiga em um ferro fundido.

Figura 13 – Exemplo prático do desgaste por fadiga em um ferro fundido



Fonte: Stachowiak, 2013 [39].

Em estudos realizados por Kalin et al. (2005), o aumento da tenacidade mostrou-se mais importante do que o aumento da dureza na resistência ao desgaste dos HSS, sendo que, as menores perdas de massa após o ensaio de desgaste foram notadas para os HSS revenidos em temperaturas mais elevadas. A microestrutura final do aço mostrou afetar diretamente os resultados nos ensaios de desgaste, demonstrando a importância do refino dos carbonetos na tenacidade a fratura e no desgaste por fadiga (KALIN et al., 2005).

5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Buscando-se realizar a comparação da microestrutura e propriedades mecânicas dos principais aços utilizados em facas circulares industriais, foi realizada uma revisão bibliográfica. Buscando-se obter equidade durante as comparações realizadas, foram estabelecidos alguns critérios, sendo eles:

- Os dados comparados de uma propriedade específica foram coletados do mesmo trabalho. Este cuidado foi tomado para que o procedimento experimental não tenha influência sobre a validação dos dados, pois mesmo utilizando a mesma norma técnica, pode-se ter influência do equipamento ou das condições do ensaio.
- Todos os materiais comparados podem ser utilizados como facas circulares industriais e estão disponíveis ao menos em um dos catálogos citados durante este trabalho.
- Os aços comparados não foram os mesmos em todas as propriedades mecânicas abordadas devido à escassez de trabalhos disponíveis na literatura que realizam comparações das propriedades mecânicas de aços sinterizados e convencionais.
- Nem todos os materiais comparados têm sua composição química semelhante, devido à uma das principais vantagens dos aços obtidos por PM que é a capacidade de adicionar uma quantidade superior de elementos de liga sem provocar excesso de fragilidade nos aços.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Comparação entre as principais propriedades dos aços para trabalho a frio convencionais e obtidos por metalurgia do pó.

Através dos dados coletados na revisão bibliográfica, foi realizada a comparação entre a microestrutura, tenacidade, dureza, resistência ao desgaste, retificabilidade e vida útil dos principais aços ferramenta sinterizados e convencionais. As comparações foram realizadas com o intuito de estabelecer qual o processo de fabricação mais adequado na produção de facas circulares industriais.

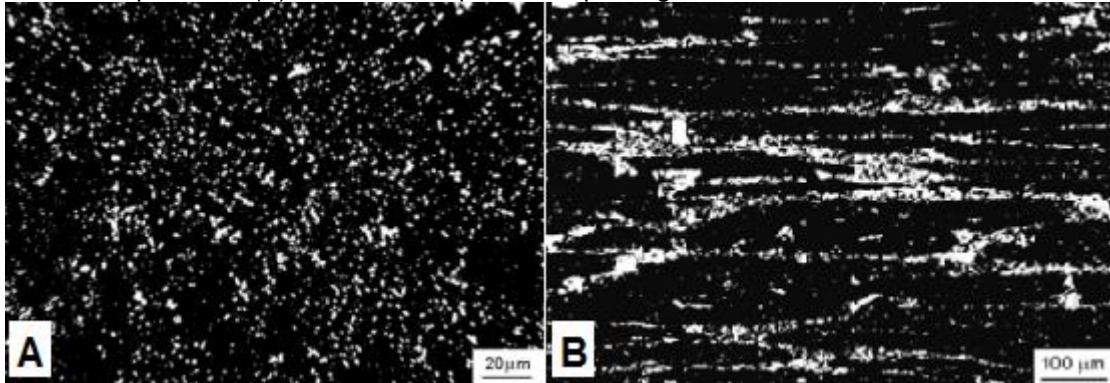
6.1.1 Microestrutura

Os aços ferramenta sinterizados apresentam tenacidade e resistência a abrasão superiores aos aços convencionais de composição equivalente. Podemos atribuir essa superioridade a homogeneidade, tamanho e volume dos carbonetos.

Os aços convencionais apresentam uma microestrutura com carbonetos grosseiros e alinhados. Esses carbonetos podem conferir uma excelente resistência a abrasão, entretanto comprometem a resistência ao choque e a tenacidade a fratura, fornecendo campos com maior concentração de tensão e caminhos frágeis para a propagação de uma trinca. Em contrapartida, os aços sinterizados apresentam uma distribuição homogênea de carbonetos refinados, que além de conferir uma excelente resistência ao desgaste, também conferem uma boa tenacidade, dificultando a propagação de uma trinca em sua estrutura (NETO, 1996).

Na Figura 14, pode-se visualizar a diferença na homogeneidade dos carbonetos e a microestrutura de um HSS convencional e do HSS de mesma composição sinterizado. A diferença entre o tamanho dos carbonetos é tão grande, que é necessário apresentar as micrografias em escalas diferentes, buscando-se evidenciar a diferença entre a homogeneidade dos carbonetos.

Figura 14 - Comparação entre a microestrutura da seção transversal de um (A) HSS AISI M3 obtido por PM e (B) HSS AISI M3 produzido por lingotamento.



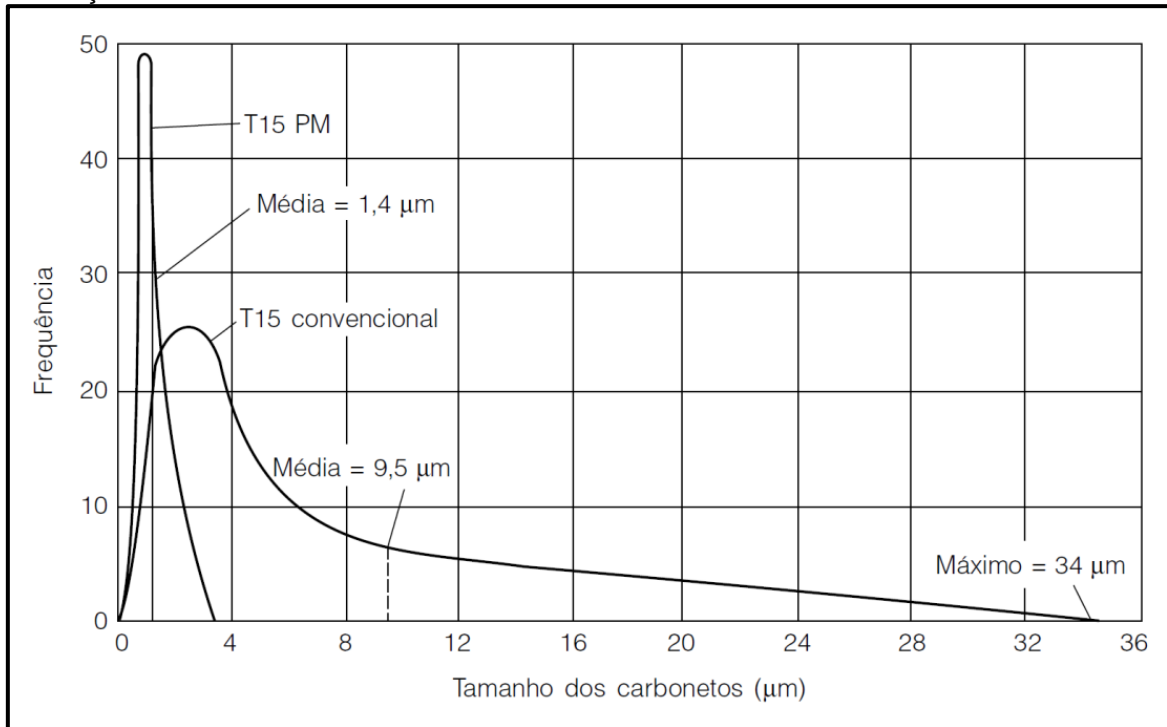
Fonte: Adaptado de Mesquita, Barbosa, 2005.

Na produção de aços sinterizados não há completa fusão e posterior solidificação da matéria prima, portanto, os mecanismos difusionais e o tempo de difusão são limitados e ocorrem basicamente durante a fabricação do pó metálico, durante sua solidificação. Desta maneira, a segregação de carbonetos é praticamente eliminada, podendo-se controlar o tamanho dos carbonetos e aumentar de forma relevante a fração volumétrica em sua microestrutura. Podemos relacionar a fração volumétrica de carbonetos diretamente com a resistência a abrasão dos aços ferramenta.

Nos aços convencionais é impossível se obter uma microestrutura com carbonetos muito refinados devido aos mecanismos difusionais durante o lingotamento, que promovem a segregação dos carbonetos primários. Mesmo com o posterior forjamento e tratamentos térmicos, ainda não é possível promover um refino dos carbonetos tão eficiente quanto ao dos aços sinterizados. O mesmo ocorre com a quantidade de carbonetos, que a partir de um certo limite causa a ocorrência de segregações grandes o suficiente para promover a fragilização e até trincas durante o processamento dos aços convencionais (NETO, 1996).

Na Figura 15 pode-se visualizar a distribuição do tamanho de carbonetos para o HSS AISI T15, utilizando metalurgia convencional e por PM. A diferença entre o tamanho médio dos carbonetos fica evidente, sendo quase 7 vezes maiores para o aço obtido por metalurgia convencional. Outro fator preocupante é o tamanho máximo dos carbonetos no aço obtido por metalurgia convencional, chegando a 34 μm, valor muito superior ao obtido por PM que não chega a 4 μm.

Figura 15 - Distribuição de tamanho de carbonetos no HSS T15 em função do processo de fabricação.



Fonte: Silva; Mei, 2011.

Como a tenacidade a fratura está relacionada com a capacidade de deformação na zona plástica a frente da trinca, pode ser explicado o motivo pelo qual o aumento do tamanho e fração volumétrica de carbonetos, causa a redução da tenacidade a fratura, através da redução da zona plástica (matriz) a frente da trinca. A equação (2) relaciona o raio de deformação a frente da trinca (r_{is}), ou seja, o raio da zona plástica a frente da trinca com a tenacidade a fratura do material no estado plano de deformação (K_{IC}) (SILVA, 2001).

$$r_{is} = K_{IC}^2 / \sigma_{YS} E \quad (2)$$

Onde σ_{YS} é o limite de escoamento do material; E é o módulo de elasticidade.

Desta forma, quanto menor for o espaçamento entre carbonetos, menor será a tenacidade a fratura do aço. Podemos correlacionar isto com a superioridade dos aços sinterizados, pois através da distribuição homogênea de carbonetos refinados, também há uma distribuição homogênea das zonas plásticas na microestrutura, deste modo não fornecendo caminhos preferenciais para a propagação de uma trinca e, portanto necessitando de muito mais energia para a propagação da trinca.

Os aços ferramenta convencionais, por sua vez possuem de forma geral carbonetos maiores e alinhados, desta maneira formam-se regiões na microestrutura com espaçamento mínimo entre carbonetos, que promovem caminhos frágeis, onde uma trinca pode se propagar com uma energia muito menor (SILVA, 2001).

O tamanho dos carbonetos também pode interferir diretamente na nucleação de uma trinca nos aços ferramenta. De maneira geral os carbonetos por terem composições distintas da matriz, não possuindo discordâncias móveis, pois suas ligações são principalmente de caráter covalente, podendo ser considerados como defeitos, causando um campo de concentração de tensão ao seu redor. Os carbonetos apresentam um módulo de elasticidade muito superior ao da matriz martensítica, isto significa que ao aplicar uma tensão dentro do regime elástico do material, a matriz tenderia a se deformar mais que os carbonetos, entretanto, isso não é possível pois os carbonetos estão aglutinados na matriz, causando uma tensão na interface matriz-carboneto, proporcional ao tamanho e a irregularidade do carboneto. A partir de um certo tensionamento cíclico, pode haver o descolamento na interface matriz- carboneto, iniciando uma trinca na região. Os carbonetos grosseiros também fornecem campos preferenciais para a propagação de uma trinca, através do efeito concentrador de tensão causado pelo aumento do raio dos carbonetos (SILVA, 2001).

6.1.2 Tenacidade

Para realizar um comparativo da tenacidade dos aços ferramentas obtidos pelos dois processos de fabricação estudados neste trabalho, inicialmente iremos utilizar os dados coletados na tese de Filho (2006), que buscou realizar um comparativo nas principais propriedades de aços rápidos da série M3:2 (aços rápidos ao molibdênio) obtidos por diferentes processos utilizando os mesmos tratamentos térmicos. O comparativo foi realizado entre o aço obtido por metalurgia convencional VWM3C e o aço Sinter 23 obtido por PM. A composição química dos aços estudados esta apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição em % de massa dos aços: VWM3C e Sinter 23.

Aço / Elemento	C	Si	P	V	Cr	Mn	Mo	W	Co	Fe
VWM3C	1,21	0,38	0,05	2,42	4,88	1,52	4,65	5,77	-	Balanço

Sinter 23 1,36 0,90 0,03 3,15 4,34 0,41 4,40 6,17 0,41 Balanço

Fonte: Adaptado de Filho, 2006.

Para a determinação da tenacidade foi utilizado o ensaio de flexão em três pontos, pois de acordo com os trabalhos de Mesquita e Barbosa (2000) e Silva (2001) para os aços de alta dureza, a resistência a ruptura transversal (TRS) obtida no ensaio de flexão, pode ser relacionada diretamente com a tenacidade a fratura do material. Nos aços ferramenta com dureza acima de 60 HRC devido ao grande volume de carbonetos que se comportam semelhantes a defeitos na matriz martensítica a tensão de ruptura em flexão estaria associada diretamente ao valor de K_{IC} e, portanto, com a tenacidade do material (FISHMEISTER; OLSSON, 1980).

Os ensaios foram realizados com corpos de prova de dimensões: 31,7 x 11 x 5,5 mm. Ambos os aços passaram pelos tratamentos de têmpera e revenimento em diferentes temperaturas. Na Tabela 4 é possível visualizar os resultados de resistência à ruptura transversal (TRS, do inglês - *Transverse Rupture Strength*) para as diferentes condições de tratamento térmico (Temperatura de austenitização / temperatura de revenimento) dos aços em estudo.

Tabela 4 - Resistência a ruptura transversal (TRS) em MPa dos aços rápidos: Sinter 23 e VWM3C em função da condição de tratamento térmico.

Condição de tratamento térmico	Sinter 23	VWM3C
1140 / 540	2734 ± 405	1650 ± 492
1140 / 560	3546 ± 399	1675 ± 314
1140 / 580	3495 ± 423	1749 ± 408
1160 / 540	2192 ± 196	1317 ± 410
1160 / 560	3110 ± 568	1325 ± 413
1160 / 580	3705 ± 139	1223 ± 578
1180 / 540	2325 ± 229	1496 ± 539
1180 / 560	2527 ± 298	1171 ± 256
1180 / 580	3619 ± 416	1548 ± 334
1200 / 540	2647 ± 408	1402 ± 303
1200 / 560	3392 ± 413	1307 ± 519
1200 / 580	2731 ± 615	1349 ± 456

Adaptado de Filho, 2006

Como esperado, o aço Sinter 23 sinterizado, apresenta a TRS muito superior ao do aço obtido por lingotamento. Comparando os valores obtidos nas condições mais favoráveis de tratamento térmico, temos: para o aço sinterizado Sinter 23 uma

TRS média de 3705 Mpa, com austenitização realizada a 1160°C e revenimento a 580°C contra uma TRS média de 1749 Mpa para austenitização realizada a 1140°C e revenimento realizado a 580°C, ou seja, nas condições otimizadas de tratamento térmico para maior tenacidade possível, o aço rápido sinterizado Sinter 23 possui uma TRS maior que o dobro da do aço obtido por metalurgia convencional. Visto que a composição dos dois aços é muito semelhante, podemos afirmar que o processo de fabricação foi fator fundamental para a grande diferença de tenacidade dos aços estudados.

Também foi realizada uma caracterização do tamanho dos carbonetos a partir da análise dos campos de microscopia eletrônica de varredura dos aços estudados, em um software de análise de imagem. Os dados obtidos podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tamanho médio dos carbonetos (μm) dos aços Sinter 23 e VWM3C.

Condição de tratamento térmico	Sinter 23	VWM3C
1140 / 540	1,234 \pm 0,136	1,877 \pm 0,088
1140 / 560	1,352 \pm 0,068	1,846 \pm 0,107
1140 / 580	1,263 \pm 0,150	1,997 \pm 0,109
1160 / 540	1,249 \pm 0,079	1,878 \pm 0,078
1160 / 560	1,347 \pm 0,054	2,023 \pm 0,169
1160 / 580	1,250 \pm 0,107	2,060 \pm 0,095
1180 / 540	1,231 \pm 0,058	2,325 \pm 0,196
1180 / 560	1,135 \pm 0,067	2,060 \pm 0,135
1180 / 580	1,261 \pm 0,121	2,076 \pm 0,165
1200 / 540	1,222 \pm 0,050	2,194 \pm 0,194
1200 / 560	1,205 \pm 0,068	2,029 \pm 0,128
1200 / 580	1,227 \pm 0,059	1,975 \pm 0,147

Adaptado de Filho, 2006.

O tamanho dos carbonetos é muito superior no aço obtido por metalurgia convencional. Comparando os aços nas condições de tratamento térmico onde obteve-se a maior tenacidade, o tamanho médio dos carbonetos é 60% maior no aço obtido por lingotamento. O tamanho dos carbonetos influencia a tenacidade diretamente, assim como discutido anteriormente, indicando a grande superioridade dos aços sinterizados em condições de aplicação que necessitam de tenacidade, como é no caso da aplicação em facas circulares industriais.

6.1.3 Dureza

Para realizar a análise comparativa entre a dureza de aços ferramentas obtidas pelos diferentes processos de fabricação, serão utilizados os dados obtidos nos trabalhos de Filho (2006) e de Mesquita e Barbosa (2005).

No trabalho de Filho, foram realizados ensaios de dureza Rockwell C, com 50 indentações nos aços da família M3:2, cuja composição se encontram na Tabela 3 da seção 6.1.2. Os resultados obtidos no ensaio de dureza podem ser visualizados na Tabela 6 (FILHO, 2006).

Tabela 6 - Resultado de dureza Rockwell C dos aços sinter 23 e VWM3C de acordo com a temperatura de austenitização.

Material	Temperatura de austenitização			
	1140°C	1160°C	1180°C	1200°C
Sinter 23	61,9 ± 0,6	60,6 ± 0,6	59,4 ± 0,5	60,5 ± 1,3
VWM3C	62,8 ± 0,2	62,9 ± 0,3	62,4 ± 0,4	61,8 ± 0,1

Adaptado de Filho, 2006.

Analisando os dados apresentados na tabela 6 é possível analisar uma suave superioridade do aço obtido por lingotamento. Sendo que na comparação da dureza máxima, o aço VWM3C apresenta 62,9 HRC, contra 61,9 HRC do aço Sinter 23. Ou seja, uma diferença pouco significativa em termos práticos (FILHO, 2006).

No trabalho de Mesquita e Barbosa, foram comparados alguns dos aços ferramentas mais utilizadas em ferramentas de cortes e punções industriais, sendo eles, os aços obtidos por metalurgia convencional: AISI M2, AISI D2 e AISI D6 e os aços obtidos por PM: Sinter 23 e Sinter 30, cujas composições se encontram na Tabela 7 (MESQUITA; BARBOSA, 2005).

Tabela 7 - Composição química em % de massa dos aços: AISI D2, AISI D6, AISI M2, Sinter 23 e Sinter 30.

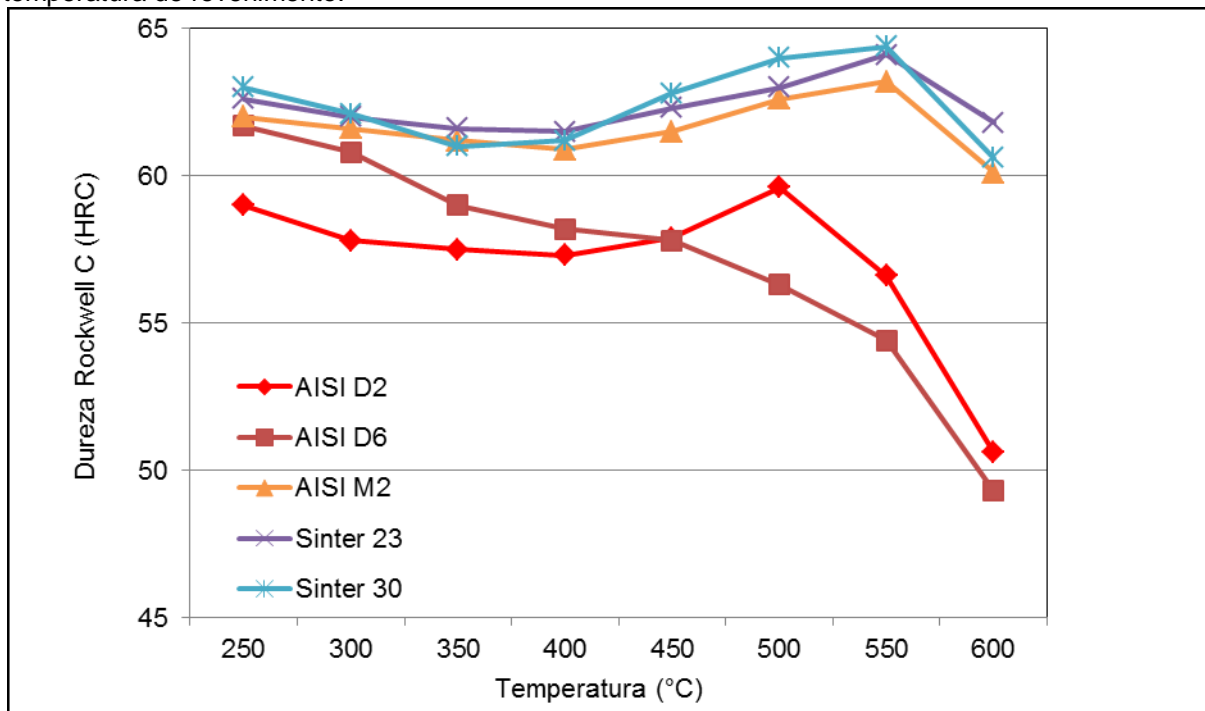
Aço	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
AISI D6	2,10	0,3	0,3	11,5	-	0,7	0,2	-
AISI D2	1,50	0,3	0,3	12,0	1,0	-	0,9	-
AISI M2	0,89	0,4	0,3	4,2	5,0	6,1	1,9	-
Sinter 23	1,28	0,4	0,3	4,2	5,0	6,3	3,0	-

Sinter 30	1,28	0,4	0,3	4,2	5,0	6,3	3,0	8,4
-----------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Adaptado de Mesquita e Barbosa, 2005.

Todos os aços foram temperados em temperatura otimizada e revenidos em diferentes temperaturas. Os resultados de dureza Rockwell C em função da temperatura de revenimento dos aços podem ser visualizados na Figura 16.

Figura 16 - Dureza Rockwell C dos aços: D2, D6, M2, Sinter 23 e Sinter 30 em função da temperatura de revenimento.



Fonte: Adaptado de Mesquita e Barbosa, 2005.

Podemos verificar na figura 16 uma diferença significativa entre a dureza dos aços para trabalho a frio AISI D2 e AISI D6 para os HSS AISI M2, Sinter 23 e Sinter 30, sendo que os HSS apresentaram uma dureza muito maior, principalmente em temperaturas de revenimento superiores. Motivo pelo qual os HSS são superiores em aplicações onde o atrito durante o corte produz temperaturas próximas a 500°C.

Relativo ao processo de fabricação houve pouca diferença de dureza na comparação entre os HSS sinterizados e o HSS convencional, sendo que os aços sinterizados apresentaram uma dureza um pouco superior. O aumento do teor de Vanádio pode justificar o aumento na dureza, pois forma carbonetos de elevada dureza.

Analisando ambos os trabalhos, fica claro que o processo de fabricação não é o fator mais relevante na definição da dureza do material. O tratamento térmico e a composição química se mostraram muito mais influentes nos resultados obtidos. A dureza é altamente influenciada pelo volume e dureza dos carbonetos formados, não sendo afetada de forma significativa pela homogeneidade e tamanho dos mesmos.

6.1.5 Resistência ao Desgaste

Para realizar a comparação da resistência ao desgaste dos aços obtidos por PM e por metalurgia convencional será utilizado o trabalho desenvolvido por Paz (2016), onde se buscou avaliar a resistência ao desgaste dos principais aços aplicados em trabalho a frio.

Para o ensaio de desgaste, o autor utilizou a norma ASTM G99 – 05 que especifica o ensaio denominado “pino e disco”. Foram confeccionados 3 corpos de prova de 30 mm de diâmetro e 6 mm de altura de cada material estudado. Cada corpo de prova foi submetido ao ensaio de desgaste onde utilizou-se uma esfera de alumina de 6 mm de diâmetro, aplicando-se uma força de 20 N e uma distância total percorrida de 390 metros em 60 minutos (PAZ, 2016).

O volume desgastado foi calculado com o auxílio de um tribômetro da marca CSM instruments.

Os materiais utilizados no ensaio foram os aços sinterizados: Böhler S390, Vanadis 4, Vanadis 10 e o aço convencional AISI D2. Suas respectivas composições estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição em % de massa dos aços: Böhler S390, Vanadis 4, Vanadis 10 e AISI D2.

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co
Böhler S390	1,4	0,6	0,3	4,8	2,0	4,8	10,4	8,0
Vanadis 4	1,4	0,4	0,4	4,7	3,5	3,7		
Vanadis 10	2,9	1,0	0,5	8,0	1,5	9,8		
AISI D2	1,5	0,25	0,35	12,0	0,78	0,8	-	-

Fonte: Adaptado de Paz, 2016.

Todos os aços utilizados nos ensaios foram temperados e revenidos buscando-se obter a maior dureza possível. As superfícies de estudo foram preparadas polidas e retificadas para cada amostra. Os resultados do ensaio de desgaste estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado obtido de volume desgastado para os aços estudados.

Aço	Acabamento Superficial	Volume desgastado (mm ³)
Böhler S390	Polido	0,11 ± 0,01
	Retificado	0,08 ± 0,01
Vanadis 4	Polido	0,17 ± 0,03
	Retificado	0,10 ± 0,01
Vanadis 10	Polido	0,13 ± 0,02
	Retificado	0,11 ± 0,02
AISI D2	Polido	0,24 ± 0,04
	Retificado	0,23 ± 0,03

Fonte: Adaptado de Paz, 2016.

Analisando os resultados obtidos no ensaio de desgaste, podemos perceber que os aços obtidos por PM obtiveram um volume desgastado muito menor do que o aço AISI D2. Os aços sinterizados em estudo possuem uma quantidade muito superior de elementos de liga formadores de carbonetos duros, como Vanádio, Molibdênio e Tungstênio. Esse alto volume de carbonetos bem distribuídos pela matriz martensítica propiciam uma excelente resistência ao desgaste, pois atuam dificultando o desgaste por partículas abrasivas, visto que a dureza dos carbonetos é muito superior à matriz do aço e que a maioria das partículas que causam a abrasão.

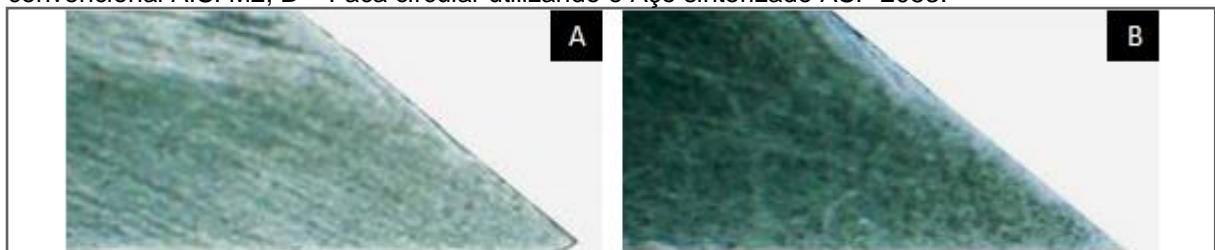
O ensaio de desgaste “pino e disco” traz bons indícios quanto a resistência ao desgaste dos aços, porém ainda não é o melhor indicador quanto ao desgaste do gume cortante, que é o principal fator que causa substituição ou reafiação em facas industriais. O ensaio de desgaste do gume cortante ainda não é normalizado e não foram encontrados trabalhos na literatura que comparam a resistência à perda de corte nos principais materiais aplicados em facas circulares industriais, por isso foi utilizado o ensaio “Pino e Disco” para fazer referência à resistência ao desgaste destes materiais.

A resistência ao desgaste influencia diretamente na vida útil e no tempo entre afiações das facas circulares industriais, impactando de maneira significativa no custo de ferramental ao longo do processo produtivo. A resistência ao desgaste superior dos aços sinterizados é refletida em economia com um menor índice de paradas para afiações e com uma vida útil prolongada das ferramentas, pois as ferramentas possuem um limite de afiações antes de perderem a sua precisão dimensional.

6.1.6 Retificabilidade

A retificabilidade dos aços obtidos por metalurgia do pó é superior a dos aços obtidos por metalurgia convencional de mesma composição. Isto ocorre devido a melhor distribuição e ao tamanho reduzido dos carbonetos presentes nos aços sinterizados. Este fator propicia a obtenção de uma superfície com baixa rugosidade e de raios menores na extremidade do gume cortante, que é excelente para a aplicação em facas circulares (BAYER et al., 1990). Na Figura 17 é possível notar a diferença entre as superfícies retificadas dos gumes de uma faca circular industrial de um aço convencional e de um aço sinterizado. Na retificação da faca de aço convencional, houve deformação plástica na extremidade do gume cortante da ferramenta, o que impossibilita a obtenção de pontas tão afiadas quanto na faca de aço sinterizado.

Figura 17 - Superfície de corte de facas circulares industriais. A – Faca circular utilizando o Aço convencional AISI M2; B – Faca circular utilizando o Aço sinterizado ASP 2053.



Fonte: Adaptado de TKM, 2016.

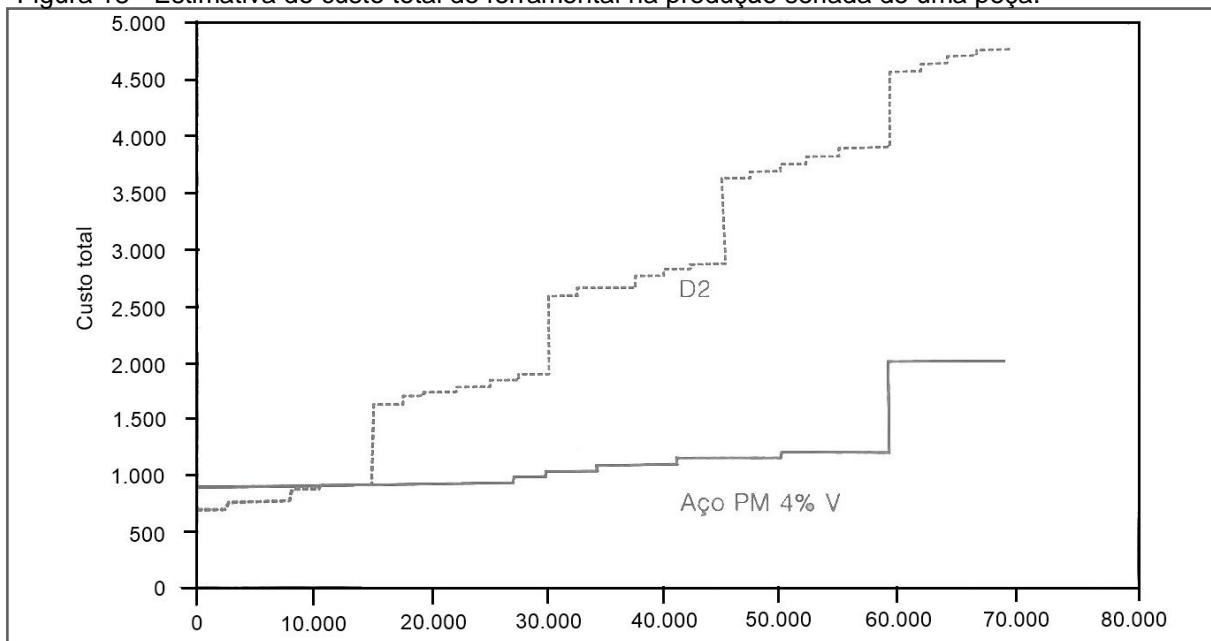
6.1.7 Custo X Vida útil

Os aços sinterizados, estão ganhando espaço no segmento de facas industriais, entretanto, a maioria das indústrias ainda trabalham com facas de aços convencionais, por conta do fator financeiro de obtenção e da maior disponibilidade

no mercado nacional (AFIGRAF, 2012). Grande parte das fabricantes de facas circulares industriais ainda não trabalham com a tecnologia dos aços sinterizados, muito por conta do preço alto de implementação da tecnologia de fabricação por PM. As peças obtidas por PM possuem uma limitação dimensional, que varia com a capacidade das prensas disponíveis, o que dificulta a produção de facas circulares com diâmetros elevados (aproximadamente acima de 200 mm) (CHIAVERINI, 1986). Entretanto, a maior parte das indústrias de alta produtividade utilizam facas circulares com dimensões inferiores a 200 mm de diâmetro, podendo ser confeccionadas por PM (SATURNO, 2010).

Na figura 18 podemos visualizar a estimativa do custo total de ferramental durante a produção de uma peça seriada. O aço AISI D2 é um dos mais utilizados na fabricação de facas circulares industriais, enquanto o aço Vanadis 4 (4% V), é um dos aços sinterizados mais utilizados na mesma aplicação. Fica muito claro quando observamos a imagem, que apesar do custo da ferramenta obtida por PM ser um pouco maior, em um longo prazo o investimento é recuperado através da maior vida útil da ferramenta e do maior tempo entre afiações.

Figura 18 - Estimativa do custo total de ferramental na produção seriada de uma peça.



Fonte: Silva; Mei, 2011.

Enquanto a vida útil da ferramenta do aço AISI D2 é de aproximadamente 15 mil unidades, a do aço Vanadis 4 é de aproximadamente 60 mil unidades. Ao final da produção de 70 mil peças o custo total de ferramental para uma ferramenta feita

com o aço convencional AISI D2 será maior do que o dobro do custo de uma mesma ferramenta produzida com o aço sinterizado Vanadis 4. Os pequenos incrementos de custos observados na Figura 18, são referentes as paradas para afiação da ferramenta.

Um dos maiores fabricantes mundiais de facas circulares industriais (Klingelberg) realizou uma projeção da vida útil de alguns materiais populares na aplicação em facas circulares. A comparação entre a vida útil dos aços pode ser visualizada na Tabela 10.

Tabela 10 – Estimativa da vida útil de aços populares na aplicação em facas circulares industriais.

Tipo de aço	Aço	Vida útil aproximada
Aço ferramenta	AISI D2	1 (base)
	AISI D6	1
Aço rápido	AISI M2	1,5 - 2
	AISI T1	1,5 - 2
Aço Sinterizado	ASP 2023	3 - 4
	ASP 2053	4 - 6
	Sinter 23	4 - 6
	Vanadis 10	4 - 6

Fonte: Adaptado de Klingelberg, 2014.

Analisando a Tabela 10, fica muito claro como a eficiência das facas circulares industriais produzidas por PM é muito superior as facas produzidas por metalurgia convencional. Todos os aços listados são comercializados pela indústria Klingelberg e o *range* na vida útil dos aços é devido ao tipo de aplicação e dos parâmetros de corte (KLINGELNBERG, 2014).

No mercado, o custo de aquisição das facas circulares do aço sinterizado ASP 2053 é, aproximadamente, o dobro do necessário para adquirir facas com as mesmas especificações produzidas com aços ferramenta convencionais (AISI D2 e AISI D6).

Tendo em vista que a durabilidade do aço ASP 2053 é aproximadamente entre 4 a 6 vezes maior do que os aços ferramentas AISI D2 e AISI D6, é muito viável o investimento inicial maior em uma faca circular do material sinterizado, pois com o tempo o investimento é recuperado através da menor necessidade de paradas para afiações e de sua durabilidade muito maior.

7 CONCLUSÃO

Através da revisão bibliográfica sobre os principais aços aplicados em facas circulares industriais obtidos por PM e metalurgia convencional, foi possível concluir:

- Os aços obtidos por PM apresentaram uma microestrutura com carbonetos muito mais refinados e homogêneos em relação aos aços obtidos por metalurgia convencional;
- Na comparação de aços ferramentas com composições semelhantes, a metalurgia do pó mostrou-se muito mais eficiente na obtenção de aços mais tenazes;
- O processo de fabricação não influi diretamente na dureza dos aços, que é afetada primordialmente pela fração de carbonetos e pelos tratamentos térmicos. Entretanto é possível adicionar uma quantidade maior de elementos de liga formadores de carbonetos nos aços obtidos por PM, possibilitando a obtenção de uma dureza final maior.
- Os aços ferramentas obtidos por metalurgia convencional apresentaram uma resistência ao desgaste muito inferior aos aços sinterizados no ensaio “Pino e Disco”.
- A superioridade na tenacidade e na resistência ao desgaste dos aços ferramentas obtidos por PM resultam em uma projeção de vida útil de 4 a 6 vezes maior das facas obtidas destes aços em relação a facas de aços ferramenta obtidos por metalurgia convencional.
- Apesar das facas circulares de aços ferramenta sinterizados terem um custo muito superior à das facas de aço convencional, mesmo assim ainda é muito vantajoso a utilização de facas circulares de aço sinterizado em indústrias de alta produtividade, pois a economia com a afiação e troca de ferramental será muito maior ao longo do tempo.

8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo comparativo de facas circulares industriais com aços ferramenta revestidos com tratamentos termoquímicos;
- Elaborar um ensaio de desgaste para comparar a resistência ao desgaste do gume da ferramentas de corte;
- Realizar um estudo comparativo entre os aços sinterizados e os carbonetos sinterizados na aplicação em ferramentas de corte industriais.

REFERÊNCIAS

- AFIAÇÃO CAMPINAS. **Afição de facas circulares.** <<http://www.afiacaocampinas.com.br/afiacao-facas-circulares>>. Acesso em: 24 de abril de 2018.
- AFIGRAF. **Catálogo faca circular.** São Paulo, 2012. 2f.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** 2002. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BAYER, A. M.; VASCO, T.; WALTON, L. R. **Properties and Selection: Specialty steels and heat-resistant alloys.** v. 1, ASM Handbook, ASM International, 1990.
- BINDER, C. **Desenvolvimento de novos tipos de aços sinterizados autolubrificantes a seco com elevada resistência mecânica aliada a baixo coeficiente de atrito via moldagem de pós por injeção.** 2009, 169f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- BLANCO, G. C. **Aplicação de DLC em facas circulares de corte industrial.** 2016. 30f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.
- BOFF, U.; MOZETIC, H.; BOESCH P.R.; SHAEFFER, L. Uma revisão dos processos de corte convencional e fine blanking. **Corte e conformação de metais**, Porto Alegre, abr. 2012, n.84, p. 24-33, abr. 2012.
- BUDINSKI, K. G. **Guide to friction, wear, and erosion testing.** 1. ed. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica volume II: processos de fabricação e tratamento.** 1. ed. São Paulo: Graw-Hill, 1986.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos materiais.** 1. ed. São Carlos: Blucher, 1969.
- FILHO, O. O. A. **Estudo comparativo de aços rápidos AISI M3:2 produzidos por diferentes processos de fabricação.** 2006. 206 f. Tese de doutorado (Obtenção do grau de doutor em ciências na área de tecnologia nuclear – materiais) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.
- FISCHMEISTER, H.F., OLSSON, L.R., Fracture toughness and rupture strength of high speed steels. **Cutting tool materials, proceedings of an international conference**, 15-17 September 1980, Mitchell, Kentucky.

- GSP. **Catálogo circular knives**. Zborovice, República Tcheca, 2016. 12f.
- HOGMARK, S.; OLSSON, M. Wear mechanisms of HSS cutting tools. **Gear solutions magazine**. Estados Unidos, n.39, p.17-28, jun. 2008.
- KALIN, M.; LESKOVSEK, V.; VIZINTIN, J. Wear behaviour of deep cryogenic treated high speed steels. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE OF HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING OF TOOLS AND DIES, 2005, Pula, Croácia. **Anais...** Ljubljana, Eslovênia: IFHTSE, 2005.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2010.
- KLINGELNBERG. **Catálogo facas planas e circulares para a indústria de conversão de papel**. Remscheid, Alemanha, 2014. 8f.
- LEICA. **Catálogo knife angle in microtony**. Alemanha, 2010. 4f.
- MACHADO, A. R.; *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
- MARIO COTA. **Catálogo suporte de faca pneumático rocky para corte sob pressão**. Curitiba, 2012. 1f.
- MESQUITA, R. A., BARBOSA, C. A., Efeito da temperatura de austenitização na tenacidade a fratura do aço rápido M2 medida através do ensaio de flexão. In: 55^o CONGRESSO ANUAL DA ABM, Rio de Janeiro, jul. 2000. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000, p.2017-2025.
- MESQUITA, R. A., BARBOSA, C. A., Uma avaliação das propriedades de desgaste e tenacidade em aços para trabalho a frio. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 2, p. 12-18, 2005.
- METALURGICA LUCCO. **Facas circulares**. < <http://www.lucco.com.br/facas-circulares.htm> >. Acesso em: 21 de abril de 2018.
- MÜLLER, R. G. **Estudo do processo de corte por cisalhamento rotativo**. 2012, 126f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panami, 2012.
- NETO, A. L. **Desenvolvimento e construção de equipamento para avaliação da resistência à abrasão de lâminas de corte nitretadas**. 1996. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- PAZ, V. F. **Estudo e caracterização metalográfica da resistência ao desgaste em aços ferramenta sinterizados, temperados a vácuo, utilizados em matrizes de estampagem**. 2016, 85 f. Dissertação de Mestrado (Obtenção do grau de mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2016.
- SANDVIK. **Catálogo understanding cemented carbide**. Londres, 2004. 20f.

SATURNO. **Catálogo facas circulares para papel e celulose**. São Paulo, [ca.2010]. 20f.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. Sumaré: Blucher, 2011.

SILVA, W. S.; MEDANHA, A.; GOLDENSTEIN, H. Estudo da Tenacidade à Fratura de Aços de Alta Resistência Mecânica Utilizando a Metodologia Chevron. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. p.01-36. 2005.

SILVA, W. S. **Estudo da tenacidade à fratura do aço rápido M2 fundido, modificado e tratado termicamente**. 2001, 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SMITH, G. T. **Cutting tool technology: industrial handbook**. 1. ed. Londres: Springer, 2008.

SOUZA, J. H. C. **Estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento**. 2001. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 4. ed. Western, Austrália: Butterworth-Heinemann, 2013.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

TIER, M. A. D. **Avaliação do desgaste do aço AISI M2 nitretado a plasma**. 1998, 156f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

TIER, M. A. D.; STROHAECKER, T. R.; BELL, T.; PESSIN, M. A. Os mecanismos de desgaste do aço rápido AISI M2 nitretado a plasma. In: 4º SEMINÁRIO DE DESGASTE, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1998.

TKM. **Catálogo machine knife: for the paper processing industri**. Remscheid, Alemanha, 2016. 13f.