

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

FRANCISCO PEREIRA NETTO

**O USO DE FACAS NA INDÚSTRIA: CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE CASO
NO CORTE DE ESPONJAS**

São Carlos

2016

O USO DE FACAS NA INDÚSTRIA: CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE CASO NO CORTE DE ESPONJAS

Relatório final do trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Área de Concentração: Tribologia e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan.

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Francisco Pereira Netto

Título: O uso de facas na indústria: caracterização e estudo de caso no corte de esponjas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

Eng. Marcelo Paulo Gonçalves Pedrosa

Instituição: SEM-EESC-USP

Nota atribuída: 9 (nove)

Marcelo Pedrosa
(assinatura)

Prof. João Manuel D.A. Rolfo

Instituição: Depto de Materiais EESC-USP

Nota atribuída: 10 (dez)

João Manuel D.A. Rolfo
(assinatura)

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN (Orientador)

Instituição: SEM - EESC - USP

Nota atribuída: 9,5 (Nove e meio)

Carlos Alberto Fortulan
(assinatura)

Média: 9,5 (Nove e meio)

Resultado: Aprovado

Data: 05/12/2016

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC:

☒ SIM ☐ Não, Visto do orientador Carlos Alberto Fortulan

Após implementação das sugestões da banca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por proporcionar, a cada dia, a oportunidade de aprender e fazer algo de bom.

Agradeço aos meus pais Francisco e Juliana, à minha irmã Kiara e a toda a minha família, pelo incondicional apoio desde a minha alfabetização até este momento, pela paciência e pelo exemplo que sempre me deram.

Agradeço aos meus professores e colegas de turma, que sempre colaboraram com o meu aprendizado e seguiram comigo este caminho em busca do diploma em Engenharia Mecânica.

Agradeço aos irmãos do Ministério Universidades Renovadas e da Pastoral de Rua, pela amizade sincera e por suas orações durante todos os anos de faculdade.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Carlos Alberto Fortulan e a todos os técnicos dos laboratórios dos cursos de mecânica e de materiais, os quais deram contribuição fundamental para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à equipe de engenheiros da empresa onde fiz estágio, por todos os ensinamentos e trocas de experiência durante esse período de contato tão prático com a engenharia, e por confiar a mim responsabilidades e projetos.

“Considerando tudo, cheguei à conclusão de que não existe nada melhor para o ser humano do que ser feliz no trabalho que realiza e desfrutar dos seus resultados; afinal essa é a sua recompensa.”

Ecl 3, 22a

RESUMO

NETTO, FRANCISCO PEREIRA. O uso de facas na indústria: caracterização e estudo de caso no corte de esponjas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O estudo trata de um processo de corte na indústria utilizando a tecnologia conhecida como corte e vinco. Apesar de ser uma tecnologia amplamente aplicada na indústria gráfica, este trabalho é um estudo de caso na conversão de esponjas para a limpeza, as quais apresentam certas peculiaridades devido à sua flexibilidade, leveza e heterogeneidade. Uma revisão bibliográfica foi feita com o propósito de conhecer a fundo a tecnologia empregada: quais as principais dificuldades encontradas pelas empresas e qual o estado da arte no corte com lâminas. Posteriormente, foram analisadas amostras de três tipos de lâminas utilizadas na indústria para o corte de esponjas. Dureza, durabilidade, ângulo de ponta, composição química, microestrutura e força de corte foram determinados para as amostras obtidas. O desempenho destas foi relacionado a suas características físicas e geométricas, e as três amostras comparadas entre si. O comportamento do material a ser cortado também foi analisado, determinando-se a espessura limite no momento do corte. Por fim, foram determinadas as características desejáveis para uma ferramenta a ser usada neste processo, buscando o melhor custo benefício.

Palavras-chave: Corte e vinco, esponja, espuma de poliuretano, lâmina, desgaste, afiação.

ABSTRACT

NETTO, FRANCISCO PEREIRA. Utilization of steel rule dies at the industry: characterization and case study of the cut of sponges – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The study deals with a cutting process at the industry, using the steel rule die technology. Even though it is a well-known technology for its application at the graphic industry, the present work is a case study of the conversion of cleaning sponges, products that have some peculiarities due to its flexibility, lightness and heterogeneity. A review has been made with the purpose to develop a deep knowledge in the technology used: what are the main challenges faced by the companies and what is the state of the art in the blade cutting. After that, three samples of blades used in this industry were analyzed. Hardness, durability, edge angle, chemical composition, microstructure and cut force were determined for the samples obtained. Their performance was then correlated with their physical and geometrical properties, and also compared between the three of them. The behavior of the material being cut was analyzed as well, and the limit thickness at the moment of the cut was measured. To conclude, the desired characteristics for a blade to be used in this kind of process were determined, looking for the best cost benefit.

Keywords: Steel rule dies, sponge, polyurethane foam, blade, wear, sharpness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de matriz de corte e vinco sendo montada, e da complexidade de formas que pode assumir.	24
Figura 2: Gráfico da resposta à compressão de uma espuma de poliuretano.....	28
Figura 3: Os quatro tipos de geometrias de lâminas oferecidos pela empresa Helmold.....	31
Figura 4: As duas invenções de Ken Holliday, que visam introduzir mecanismos que exerçam pressão sobre as lâminas, fixando-as à placa. À esquerda, o mecanismo formado por uma mola e um elemento esférico. À direita, o mecanismo em “U” de material elástico.....	32
Figura 5: Invenção de Peter Sandford, que utiliza uma camada polimérica com o intuito de reforçar a placa e pressionar a lâmina	33
Figura 6: Proposta de Philip Saunders para otimizar as juntas das facas, evitando espaços sem corte.	34
Figura 7: Representação de uma lâmina comprimindo uma porção de material flexível.	35
Figura 8: Duas amostras de cada lote de lâminas embutidas em resina.....	37
Figura 9: Esquema das indentações para a medição de dureza na seção transversal de uma lâmina.	38
Figura 10: Montagem realizada para a determinação da força de corte para cada lâmina. Uma pinça para ensaio de tração (1) fixa uma lâmina (2) que corta o material (3) que está sobre uma placa polimérica (4) apoiada em uma mesa para ensaio de compressão (5).39	
Figura 11: Esquema da seção transversal de uma lâmina, ilustrando as duas faces que formam o ângulo de ponta.....	41
Figura 12: Gráfico da medição do perfil de dureza das amostras do fornecedor A.	43
Figura 13: Gráfico da medição do perfil de dureza das amostras do fornecedor B.	44
Figura 14: Gráfico da medição do perfil de dureza das amostras do fornecedor C.	44
Figura 15: Gráfico da força de corte ao longo do deslocamento da lâmina do fornecedor A..	46
Figura 16: Gráfico da força de corte ao longo do deslocamento da lâmina do fornecedor B..	46
Figura 17: Gráfico da força de corte ao longo do deslocamento da lâmina do fornecedor C..	47
Figura 18: Imagens ao longo do tempo de um ensaio de força de corte. No momento 4 é quando o corte tem início.	48
Figura 19: Metalografia da seção transversal de uma lâmina do fornecedor A microestrutura é praticamente homogênea em todas as regiões.....	49
Figura 20: Martensita como microestrutura da lâmina do fornecedor A.	50

Figura 21: Imagem da microestrutura homogênea de uma amostra de lâmina do fornecedor B.	50
Figura 22: Microestrutura martensítica de uma amostra de lâmina do fornecedor B.	51
Figura 23: Metalografia de uma lâmina do fornecedor C, onde são visíveis três regiões distintas: Fio de corte endurecido, centro do material e região descarbonetada nas superfícies superior e inferior.	51
Figura 24: Região da ponta da lâmina do fornecedor C com maior aumento.....	52
Figura 25: Ponta de lâmina endurecida fraturada.....	53
Figura 26: Microestrutura martensítica do corpo da lâmina do fornecedor C.	53
Figura 27: Imagem destacando as superfícies descarbonetadas da lâmina.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos aços analisados. Os valores se referem a porcentagens em peso.....	55
Tabela 2: Durabilidade relativa entre as lâminas dos três fornecedores, medida no processo real da indústria de corte de esponjas.....	56
Tabela 3: Valores de ângulo de ponta das lâminas dos 3 fornecedores.	57
Tabela 4: Custos relativos entre as lâminas dos 3 fornecedores.	58
Tabela 5: Valores da relação entre Durabilidade e Custo para as lâminas dos 3 fornecedores.	58

LISTA DE SIGLAS

HRC	<i>Hardness Rockwell C (Dureza em Rockwell C)</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
A1	<i>Amostra do lote 1 do fornecedor A</i>
A2	<i>Amostra do lote 2 do fornecedor A</i>
B1	<i>Amostra do lote 1 do fornecedor B</i>
B2	<i>Amostra do lote 2 do fornecedor B</i>
B3	<i>Amostra do lote 3 do fornecedor B</i>
C1	<i>Amostra do lote 1 do fornecedor C</i>
C2	<i>Amostra do lote 2 do fornecedor C</i>
Fe	<i>Ferro</i>
Mn	<i>Manganês</i>
Al	<i>Alumínio</i>
Si	<i>Silício</i>
Cr	<i>Cromo</i>
S	<i>Enxofre</i>
Ge	<i>Germânio</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	Espuma flexível de poliuretano	27
2.2	Lâmina.....	29
2.3	Placa	31
2.4	Corte de materiais flexíveis	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	Dureza das lâminas.....	37
3.2	Força de corte	38
3.3	Espessura de corte	39
3.4	Análise metalográfica.....	40
3.5	Composição química	40
3.6	Durabilidade	40
3.7	Ângulo de ponta	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Valores de Dureza HRC	43
4.2	Força de corte	45
4.3	Espessura de corte	48
4.4	Metalografias.....	49
4.5	Composição química	55
4.6	Durabilidade	56
4.7	Ângulo de ponta	57
4.8	Custo.....	57
5	CONCLUSÕES.....	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ¹	61

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do período industrial, percebe-se que quanto mais um determinado bem é produzido, mais barato tende a ser o seu custo de fabricação. Nesse sentido, a busca das empresas tem sido por lidar com volumes cada vez maiores de matéria-prima, os quais são divididos em porções adequadas à venda ao consumidor apenas ao final do processo. Fica evidente então que surge um procedimento comum a muitos setores diferentes, que consiste basicamente em converter uma grande quantidade de um produto em vários itens menores. A esse processo dá-se o nome de conversão ou corte. Este procedimento pode ser realizado através de variadas tecnologias, que vão desde a utilização de instrumentos manuais até o de ferramentas à laser. Uma das tecnologias mais comuns e conhecidas é a lâmina de corte. Geralmente composta por um material mais resistente do que aquele a ser cortado, estas ferramentas basicamente concentram toda a pressão aplicada sobre elas em uma área bem pequena e determinada da matéria-prima, provocando o cisalhamento. Sua geometria permite que o movimento relativo entre a ferramenta e o material continue após o início do corte, e a lâmina penetre cada vez mais pelo espaço aberto por ela. São variadas as características da faca e da peça que irão atuar simultaneamente para o procedimento de corte, determinando assim sua velocidade, acabamento superficial, acuracidade, presença de cavaco e energia empregada.

Ao analisar o conceito de “lâmina”, também é possível encontrar uma vasta gama de geometrias e modalidades de aplicação, cada uma adequada a um tipo de conversão. Para o corte de matérias-primas em que duas dimensões (comprimento e largura) são muito maiores do que a terceira (espessura) destaca-se o chamado “Corte e Vinco”. Esta tecnologia é hoje empregada principalmente na indústria de papéis e cartões, mas também encontra espaço na automotiva, de circuitos impressos, circuitos flexíveis, componentes médicos e etiquetagem, de acordo com a companhia Mathias Die. São convertidos materiais como espuma vinílica acetinada (E.V.A), embalagens, papelão, madeira, alimentos, tubos, plásticos, tecidos, borracha, couro, espumas e feltros. Também conhecidas como “matrizes”, as facas deste tipo de tecnologia são compostas de lâminas (geralmente de aço) cravejadas em uma placa (geralmente de madeira) que possui sulcos com a geometria 2D do item a ser convertido. As lâminas se mantêm presas à placa por interferência nos sulcos em que são inseridas. Uma prensa é utilizada para pressionar a matriz contra a matéria-prima até que o corte seja efetuado, sendo este realizado em poucos segundos.

Com o passar do tempo, a indústria de corte e vinco foi se diversificando e novas tecnologias foram incorporadas. Com a possibilidade e a precisão do corte à laser, as

placas de sustentação das lâminas passaram a ser feitas também em acrílico ou metal. Para a dobra e o corte das lâminas, máquinas automáticas permitem a obtenção de geometrias ainda mais complexas, em um tempo menor. Um problema recorrente era que ao afastar a matriz do material já cortado, a peça muitas vezes ficava presa à matriz: para isto, a empresa Dafa Borrachas afirma que foram desenvolvidas borrachas com diferentes durezas, dimensões e geometrias, que são coladas à matriz para expulsar as peças após o corte. Além disso, hoje é possível encontrar no mercado uma variedade de lâminas que permitem não apenas cortar, mas também marcar dobras (embalagens de papelão), perfurar (picotes de canhotos) e até mesmo gerar em embalagens uma tira destacável, como um “zipper”. Outra variação vem com as facas circulares, as quais permitem um fluxo contínuo de material sendo cortado, solução muito utilizada para produtos com altas tiragens e baixas espessuras. Há também as matrizes flexíveis produzidas pela Apple Die que são utilizadas em conjunto de bases rígidas: esta tecnologia pode ser usada em facas planas ou circulares, é bastante leve e fácil de armazenar e não possui juntas ou espaços, porém é mais cara e difícil de ser encontrada.

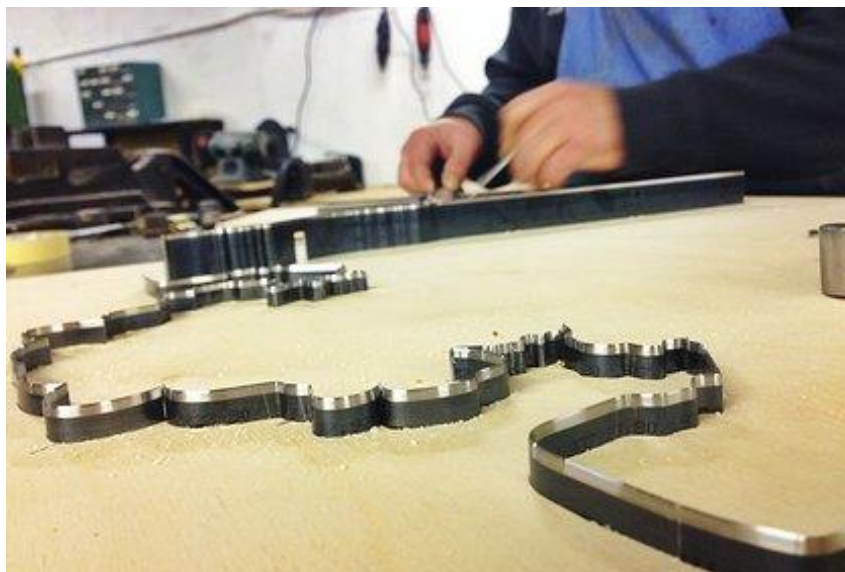


Figura 1: Exemplo de matriz de corte e vinco sendo montada, e da complexidade de formas que pode assumir. Fonte: <http://www.steel-rule-die.com>

Como toda ferramenta, as matrizes de corte e vinco possuem uma durabilidade limitada. A da lâmina é determinada pelas características do seu material, da sua geometria, das pressões aplicadas e do material a ser cortado. Algo semelhante ocorre com a placa: após o cegamento das lâminas, estas podem ser retiradas e novas são postas no lugar. A esse procedimento dá-se o nome de “reforma da faca”, e a durabilidade da placa pode ser medida

tanto em número de cortes realizados quanto em reformas que esta suporta. Sendo assim, existe uma busca constante pela otimização desta ferramenta para que sua durabilidade seja superior e permita uma diminuição nos custos de produção. Além disso, a diminuição das frequências das trocas da matriz também reduz o tempo em que as máquinas de corte ficam paradas para trocas, característica especialmente desejável em se tratando da produção de grandes quantidades de peças.

As facas são muitas vezes responsáveis pela modificação final no produto antes do processo de embalagem, e portanto, também são bastante responsáveis por problemas de qualidade no mesmo. É interessante ressaltar que um defeito causado na etapa de conversão causa a perda de todo o material e os processos realizados até aquele ponto, o que significa um custo significativo de tempo e matéria prima. Isto se torna ainda mais crítico devido à busca pela excelência nos conceitos de *lean manufacturing*, que vem sendo feita pela indústria como um todo desde a metade do século passado. Nesse contexto, busca-se a Qualidade Total (produtos sem defeitos) e o Desperdício Zero, desde o início até o final da fabricação de qualquer produto. Deve-se dizer também que possíveis problemas de qualidade que passem despercebidos na produção e cheguem até o cliente podem gerar sua insatisfação, algo cada dia mais condenável em qualquer tipo de empresa por danificar a imagem da marca e eventualmente causar a perda de fidelidade do comprador.

O presente trabalho se insere no contexto de uma fábrica de esponjas, cortadas com o tipo de faca previamente mencionado. Trata-se de um produto de baixo valor agregado e de altíssima demanda, presente em praticamente todos os lares do Brasil. Economicamente falando, a elasticidade preço-demanda é alta, ou seja, uma pequena variação no preço do mesmo pode fazer uma grande quantidade de consumidores optar por uma outra marca ou produto similar. Por esta razão, é essencial que os custos de fabricação sejam otimizados onde possível, sem que haja uma perda de qualidade ou produtividade, uma vez que o tempo também é um recurso escasso. Especificamente no caso das facas, busca-se a máxima durabilidade das lâminas e das placas, ao mesmo tempo em que se visa com esta ferramenta converter esponjas de qualidade, sem defeitos que gerem custos adicionais ou uma má experiência para o cliente.

Esponjas são bastante flexíveis e leves, sensíveis à temperatura, umidade e impurezas. Estas características conferem uma certa dificuldade no processo de corte, pois o material não se comporta da mesma forma durante todo o procedimento e devido à sua sensibilidade, é facilmente danificado gerando defeitos. Além disso, as esponjas possuem duas camadas de material muito diversas uma da outra, sendo compostas uma de espuma de

poliuretano e outra de uma manta abrasiva de alta resistência, as quais devem ser cortadas simultaneamente e com a mesma precisão e acabamento.

A proposta deste trabalho de conclusão de curso é avaliar o processo de corte de esponjas para compreender como as características do ferramental podem minimizar custos e tempos do procedimento, sem prejudicar a qualidade do produto e a sua produtividade. Serão feitos ensaios para compreender o desgaste das ferramentas, suas causas e principais fatores que o influenciam. Paralelamente, deverá ser compreendido o comportamento do material convertido durante o corte.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a compreensão do fenômeno em questão, será analisado em um primeiro momento cada um dos elementos separadamente, para em seguida estudar a interação entre eles. Segundo Kalder e Venuvinod (1997), os três fatores que mais influenciam um corte são a composição da matéria-prima, a geometria e o material da ferramenta.

2.1 Espuma flexível de poliuretano

Começando pela matéria-prima, Lima (2006) afirma que a espuma de poliuretano permite obter boa precisão dimensional e qualidade superficial. Além disso, ressalta que possui baixa densidade, elasticidade permanente e resistência à abrasão. A maior parte do seu uso é para a confecção de assentos automotivos ou residenciais, colchões e sofás. Já Silva, Beretta e Kindlein (2011), em seu trabalho estudaram o comportamento desta espuma quando submetida a um procedimento de corte (usinagem). Nesse contexto, propuseram que a qualidade da espuma é proporcional a quanto peso esta suporta por unidade de área, medida por um teste que calcula a chamada força de indentação ou IFD. Esta força está correlacionada à densidade da espuma e materiais com boa performance são aqueles que são macios no início do teste, mas a partir de uma certa deformação apresentam boa resistência mecânica. Para a determinação da densidade da espuma, os autores realizaram pesagem e medição do volume, de acordo com a norma ASTM D3574-08 (A). A continuação desta norma, ASTM D3574-08 (B1), trata do ensaio de indentação mencionado, e consiste em medir a força necessária para causar deformações de 25 e 65% no material testado.

Ao buscar um entendimento mais profundo sobre o comportamento da espuma de poliuretano, Gibson e Ashby (1999) determinaram que além da composição do material e de sua densidade relativa, é importante conhecer também as células de que a espuma é formada: se são abertas ou fechadas, qual é o diâmetro médio e qual a espessura média das paredes. A resposta à compressão de uma espuma de poliuretano pode ser melhor compreendida a partir do gráfico de Avalle, Belingardi e Montanini (2001), presente na figura 2.

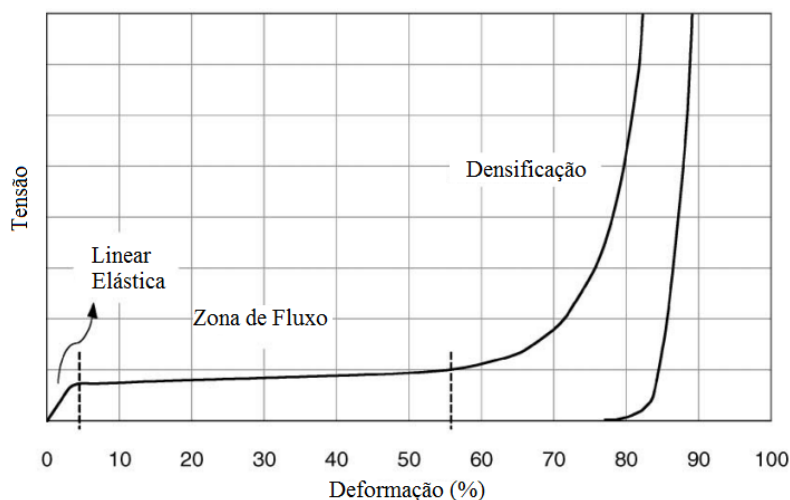


Figura 2: Gráfico da resposta à compressão de uma espuma de poliuretano. Fonte: Avalor, Belingardi e Montanini (2001).

Nesta figura, distingue-se três comportamentos distintos durante o ensaio: o primeiro, que vai geralmente do início da compressão até 5% de deformação, o material se comporta elasticamente com deformação proporcional à tensão, onde numa visão microscópica ocorre a deformação das paredes das células por flexão. Em seguida, temos a zona de fluxo em que o gráfico é quase horizontal, já que praticamente o material se deforma a uma pressão constante devido à flambagem das paredes das células. Por fim, quando as paredes das células já deformadas começam a tocar umas nas outras, ocorre a densificação e um súbito aumento de resistência mecânica, que tende àquela do material maciço. Este comportamento foi também observado por Goods et al (1997) e Gibson e Ashby (1999) ao analisarem a resistência à compressão de espumas de poliuretano.

Ainda segundo Gibson e Ashby (1999) uma característica interessante das espumas, que são sólidos celulares, é que devido ao fato deste material não ser maciço, a compressão deste em uma determinada direção não acarreta necessariamente uma expansão nas outras direções: sendo assim, o volume não se conserva. Esta característica será essencial para a realização do corte por meio da tecnologia de corte e vinco, pois a distância do fio de corte da lâmina até a superfície da placa não deverá ser obrigatoriamente maior do que a espessura não deformada da esponja.

2.2 Lâmina

Outro elemento que atua diretamente na conversão de esponjas é a lâmina que compõe a faca. Esta é feita geralmente de aço, devido ao fato de ser um material de propriedades bastante conhecidas e versáteis. Neste caso, duas características que se destacam nesse material são sua boa resistência ao desgaste e maleabilidade.

Segundo Glaeser (1980), a resistência ao desgaste dos aços está relacionada à sua dureza, de maneira que em alguns casos, um aumento em 5 HRC na dureza pode significar uma redução no desgaste em duas vezes. No entanto, a dureza excessiva não deve ser vista como algo bom, pois pode levar a um aumento de fragilidade e diminuição de resistência à fadiga. Krushchov (1969) e Mulhearn e Samuels (1962) propõem que para o caso da abrasão, um dos mecanismos de desgaste, este é inversamente proporcional à dureza da superfície sendo desgastada. Por esta razão, Bruce (2012) sugere que para diminuir os efeitos da abrasão, é recomendado um aumento na dureza superficial das ferramentas, algo que segundo ele, já é comum na indústria. Isto pode ser feito por meio de tratamentos superficiais e/ou térmicos, fazendo com que a gama de materiais que podem ser cortados com aço seja bastante ampla, se estendendo desde materiais moles, como espuma vinílica acetinada (E.V.A.), até materiais mais duros, como o amianto. Outra possibilidade de melhoria nas características superficiais de uma ferramenta é a mudança em sua composição química, ou seja, o recobrimento do aço por exemplo com uma fina camada de outro material, como uma cerâmica. Como declara Bruce (2012), muitos dos cobrimentos obtidos a partir de Physical Vapor Deposition (PVD) and Chemical Vapor Deposition foram desenvolvidos para ferramentas de corte, as quais requerem resistência ao desgaste, a choques e ao calor.

Por outro lado, os aços também apresentam maleabilidade e ductilidade, necessárias para que este seja conformado nas geometrias das facas, muitas vezes com curvas e ângulos agudos. A forma mais utilizada para quantificar estas características é a medição da dureza do aço. Quanto mais duro, maior será sua resistência ao desgaste e menor será sua capacidade de ser dobrado sem quebrar. Por isto, a tecnologia mais avançada na fabricação destas ferramentas permite a obtenção de uma lâmina com o seu interior em aço de menor dureza, maleável, e com a superfície funcional tratada para uma resistência superior, como é o caso da lâmina Universal H60, da companhia Steel Rule Diemasters.

O desgaste é em muitos casos o fator determinante na durabilidade de ferramentas de corte. Para a indústria sucroalcooleira, Lima et al (2012) apresenta um estudo onde são comparadas duas tecnologias de recobrimento superficial diferentes para o aumento de

resistência de facas. Muitas são as técnicas que permitem obter lâminas que resistem por mais tempo: a Steel Rule Diemasters oferece lâminas resfriadas criogenicamente, as quais prometem durar de duas a três vezes mais do que as comuns devido a uma tecnologia antes empregada apenas em ferramentas e outras matrizes. Revestimentos superficiais que são resistentes a adesivos e evitam o acúmulo de partículas também são oferecidos para uma melhor performance. Como dito anteriormente, o mecanismo principal de desgaste que atua sobre as lâminas de corte é a abrasão, que consiste no contato e movimento relativo com partículas ou formas ásperas duras, as quais deformam a superfície. Por ser um problema tradicional e presente em muitas indústrias, Bruce (2012) relata que este é hoje solucionado a partir de princípios já validados que consistem na seleção dos materiais, dos parâmetros de operação e lubrificação efetiva. No caso estudado pelo presente trabalho, a lubrificação não é possível devido à natureza do produto cortado, sendo ainda mais relevantes os primeiros dois princípios mencionados.

Além das características do material, outra propriedade da lâmina de bastante influência durante o processo de corte é a sua afiação. Uma primeira divisão pode ser feita entre lâminas de corte central, cuja aresta cortante se encontra no meio da espessura da lâmina, ou lâminas de corte lateral, onde a aresta cortante é mais próxima de uma das superfícies, conforme a figura 3.

Neste contexto, todos sabem que uma lâmina “afiada” é aquela que corta “melhor”, mas não existem definições padronizadas sobre o que determina o quanto “afiada” é uma lâmina, e nem quanto um corte é “melhor” que outro. Reilly, McCormack e Taylor (2004) afirmam que estudos relacionam a afiação de uma lâmina ao perfil de sua aresta cortante, outros à qualidade da aresta cortante e outros ainda com as forças necessárias para realizar o corte. Por esta razão, os autores propuseram estudar esta questão e determinar uma escala que permitisse comparar a afiação de dois instrumentos diferentes.

Uma proposta alternativa de medição da afiação de uma lâmina foi feita por McGorry, Dowd e Dempsey (2005), que desenvolveram um método para ser empregado próximo ao local onde esta é utilizada, baseado na força média para a realização do corte. Segundo eles, este é útil para determinar quando as ferramentas devem ser re-afiadas, mas não identifica padrões de desgaste que possam ocorrer ao longo ou em pontos específicos das lâminas.

A afiação da ferramenta de corte é ainda mais importante no corte de sólidos macios, como ressaltam McCarthy, Hussey e Gilchrist (2007) ao dizerem que ela influencia na qualidade superficial da peça e na vida útil da ferramenta. Para estes autores, esta

característica é relacionada em primeira ordem com a força de corte, e consequentemente com a energia necessária para realizá-lo. Acrescentam ainda que a afiação determina também a profundidade que a lâmina penetra na peça antes que o corte de inicie. Porém, além destes autores, Reilly, McCormack e Taylor (2004) também afirmam que não ainda não se tem uma definição padrão de afiação, pois algumas são baseadas na geometria e outras na força de corte.

Segundo estes últimos, os parâmetros geométricos relevantes desta ferramenta são o raio da aresta cortante, o ângulo da lâmina e sua espessura. Conforme pesquisa relatada por McCarthy, Hussey e Gilchrist (2007), as forças de corte aumentam com o aumento do ângulo da lâmina e com o aumento do raio de aresta. Quanto ao ângulo da lâmina, o mesmo é dito por uma empresa fabricante de lâminas para corte e vinco, Helmold, a qual vende lâminas com os tipos de afiação apresentados na figura 3.

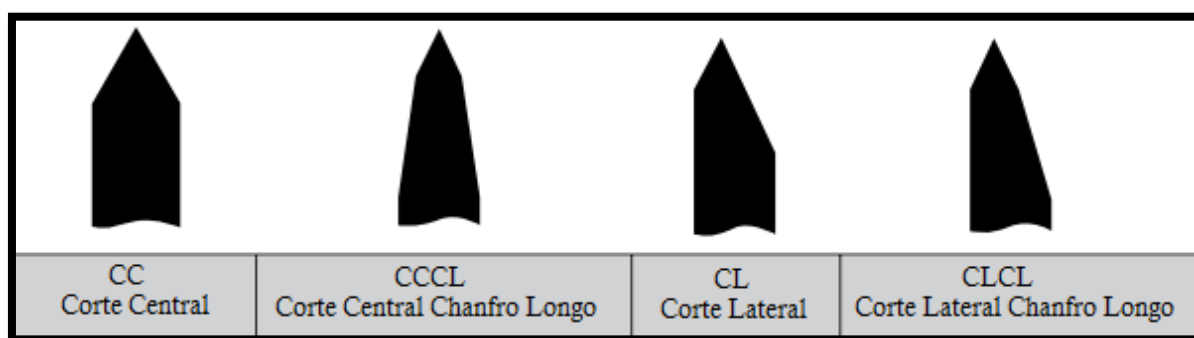


Figura 3: Os quatro tipos de geometrias de lâminas oferecidos pela empresa Helmold.
Fonte: <http://www.helmold.com>

A empresa ressalta ainda que os ângulos mais agudos geram menos pressão sobre o material adjacente ao corte, deformando-o menos e causando menos defeitos. Ainda sobre afiações diferentes, a Helmold permite que o cliente escolha entre a afiação *ground* ou a afiação *shaved*. A primeira tem a característica de criar micro serras na lâmina, que auxiliam no corte de plásticos e filmes não fibrosos. Já a segunda cria uma aresta com acabamento polido, ideal para papel, papelão e outros materiais fibrosos, além de reduzir a criação de pó durante o corte.

2.3 Placa

Na sequência, será analisada também a placa onde as lâminas são cravadas. Esta parte da ferramenta apesar de não ter contato diretamente com a matéria prima, é de muita

importância pois deve manter as lâminas na posição correta durante todos os cortes, e sua falha gera defeitos no produto. Anteriormente produzidas de forma artesanal, hoje são quase todas em madeira compensada e cortadas geralmente à laser, o que permite uma maior precisão nos sulcos e melhor acabamento superficial. Segundo a empresa Apple Die, em seu estabelecimento podem ser cortadas placas de até 48x97 polegadas, equivalentes a 1219x2464mm. Nada impede também que duas placas diferentes sejam unidas para a formação de uma mesma faca, o que não é muito comum pois apresenta maior complexidade para manter a geometria precisa. A empresa Midwest Dies (<http://steel-rule-dies.com>) afirma ter desenvolvido uma tecnologia inovadora a qual combina duas madeiras cortadas a laser sobrepostas: desta maneira, imperfeições decorrentes do corte a laser são superadas conseguindo uma tolerância de 0.005 polegadas, metade daquela oferecida pela concorrência.

Pode-se notar também que a placa tem sido alvo de um grande número de inovações, registradas através da criação de patentes. Em 1978, Kenneth C. Jessen, funcionário da Hewlett Packard, propôs a criação de matrizes básicas que pudessem ser combinadas de modo a produzir uma variedade de geometrias diferentes. Estas seriam fixadas a uma placa principal, por meio de um sistema de imãs, gerando assim mais flexibilidade para esta ferramenta. Com o intuito de aumentar a durabilidade da placa da matriz, Ronald A. Hillock registrou em 1989 uma patente em que a placa deveria ter camadas de reforço de Kevlar laminadas junto com a madeira.

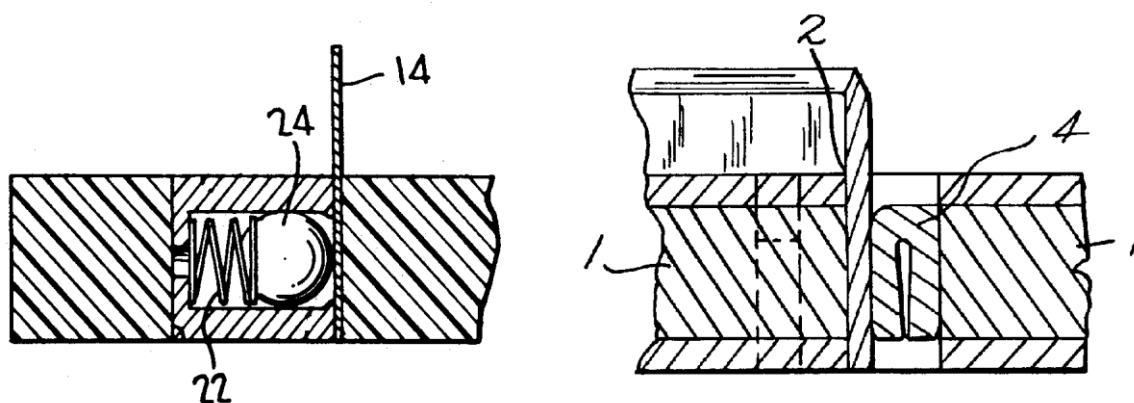


Figura 4: As duas invenções de Ken Holliday. À esquerda, o mecanismo formado por uma mola (22) e um elemento esférico (24) que pressiona a lâmina (24) contra a placa. À direita, o mecanismo em “U” (4) de material elástico melhora a fixação da lâmina (2) na placa (1). Fonte: Patentes nº US 5029505 A e US 5197367 A.

Já Ken Holliday, em 1990 registrou duas invenções que visavam melhorar a forma com que as lâminas ficavam presas na placa, que antes se baseava apenas na interferência com os sulcos. Segundo ele, elementos elásticos deveriam ser inseridos no interior da placa e próximos aos sulcos, de modo que quando as lâminas fossem inseridas, esses elementos fossem deformados e permanecessem pressionando as lâminas contra a parede oposta. Na primeira invenção, o funcionário da Southeastern Die Company sugeriu o uso de molas combinadas com elementos esféricos, os quais seriam posicionados em câmaras perpendiculares aos sulcos no interior da placa. Já na segunda, utilizou elementos em formato de “U” feitos de material elástico, que eram comprimidos lateralmente e exerciam uma força normal contra das lâminas. Provavelmente o segundo invento é um aperfeiçoamento do primeiro, pois utiliza um mecanismo mais simples e barato para realizar a mesma função.

Em 1993, Steven B. Michlin patenteou uma placa de metal que, segundo ele, teria uma série de vantagens. Seria mais durável, as lâminas poderiam ser trocadas e poderiam haver também furos passantes na placa, por onde o material cortado cairia. Uma forma de expulsar as peças convertidas seria por meio de canais na placa por onde passasse ar comprimido. Para a fabricação, Steven sugeriu o corte a laser, por sua precisão e qualidade.

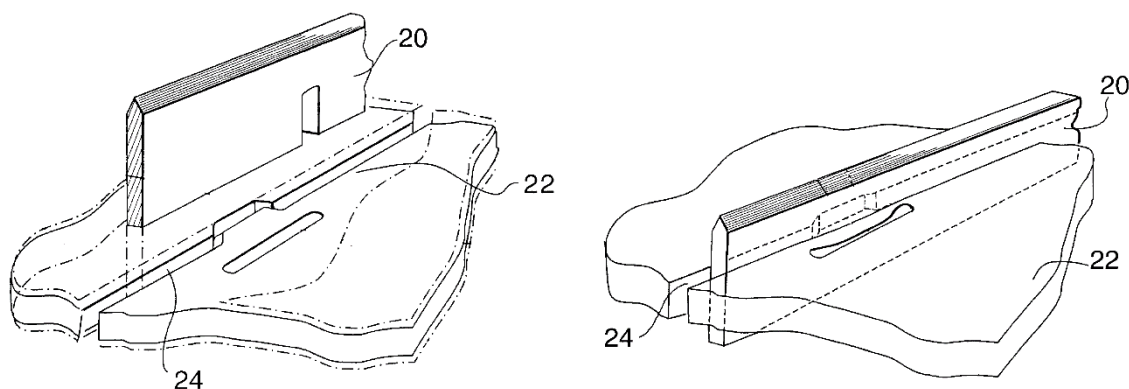


Figura 5: Invenção de Peter Sandford, que utiliza uma camada polimérica (22 e 24) com o intuito de reforçar a placa e pressionar a lâmina (20). Fonte: Patente nº US 6085625 A.

O surgimento de novos materiais sempre aumentou as possibilidades de invenções e motivou os autores de patentes a usá-los de maneira inovadora. Nesse contexto, Peter E. Sandford em 1997 propôs uma placa multicamadas em que uma delas seria de LexanTM (polycarbonato) ou LuciteTM (acrílico). Esta camada teria indentações e espaços vazios próximos aos sulcos, de modo que após a montagem das lâminas, essas protuberâncias as pressionassem conferindo maior estabilidade ao conjunto, de maneira similar aos inventos de Ken Holliday. Na mesma linha de raciocínio baseada na introdução de novos materiais, uma

equipe de três autores em nome da empresa Atlas Die patenteou uma placa de plástico laminado, sendo esta bastante leve e robusta, com dimensões estáveis e mantendo tolerâncias de ± 0.002 polegadas. A versão de placa apresentada pelos autores é composta por poliuretano rígido, com camadas externas feitas de outro material, placa esta que deve agir em conjunto com uma contra faca de aço.

No que concerne ao arranjo das lâminas na faca, Philip G Saunders propôs em 1966 uma forma de evitar que as lâminas fiquem separadas nas juntas, pontos onde duas lâminas diferentes se encontram. Isto pode ser feito mediante a utilização de lâminas que se encaixam, conforme a figura 6.

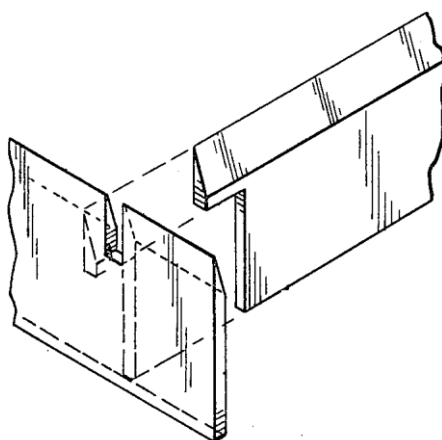


Figura 6: Proposta de Philip Saunders para otimizar as juntas das facas, evitando espaços sem corte. Fonte: Patente nº US 3383969.

Esta invenção tem a intenção de prevenir que dois produtos adjacentes permaneçam unidos após o corte por uma estreita faixa de material, correspondente ao espaço que pode existir entre duas lâminas que se encontram caso estas não estejam bem posicionadas.

2.4 Corte de materiais flexíveis

Após analisar cada um dos elementos que participam no fenômeno estudado, o corte de esponjas pela tecnologia de corte e vinco, é necessário buscar um entendimento mais aprofundado em quais são as características específicas deste processo que são relevantes. De acordo com McCarthy, Hussey e Gilchrist (2007), pelo fato da espuma ser um material de baixo módulo elástico, quando a lâmina entra em contato com ela e começa a pressioná-la, a espuma oferece baixa resistência e se deforma ao invés de ser cortada. Porém, como visto anteriormente, ao longo de um processo de compressão, a resistência da espuma aumenta

gradualmente, até que a força exercida por esta é suficiente para que o corte ocorra. Neste ponto, a lâmina começa a separar o material formando uma trinca e penetrando por ela. Este processo continua com um aumento na força necessária, até que atinge um platô de força constante em regime permanente. A Figura 7, apresentada por McCarthy, Hussey e Gilchrist (2007), mostra o ponto de início do corte. O material neste caso se deforma de uma quantidade δ , mediante a aplicação de uma força F . O corte então começa e a lâmina se aprofunda no material de uma quantidade h . Se neste caso a lâmina retrocede e é retirada, a deformação delta desaparece, de modo que o comprimento efetivamente cortado é de dimensão h . O mesmo fenômeno é descrito por Atkins (2006) e Silva (2011), que afirmam que em se tratando de materiais flexíveis, estes podem ser empurrados ao invés de cortados.

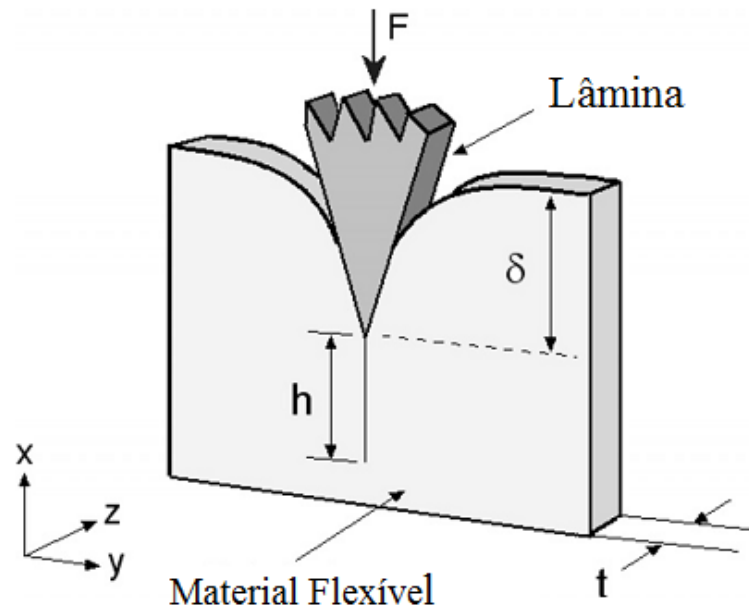


Figura 7: Representação de uma lâmina comprimindo uma porção de material flexível.
Fonte: McCarthy, Hussey e Gilchrist (2007)

Como ressaltam Gibson e Ashby (1999), é interessante notar que durante a deformação, as paredes das células da espuma adjacentes ao ponto de pressão mudam de direção e passam a se alinhar com a força aplicada. Aquelas que estão em uma posição acima de onde se encontra o fio da lâmina passam a não mais resistir por flexão mas por uma tensão de tração, “puxando” para cima a zona do material que está sofrendo pressão da ferramenta. Isto contribui bastante para o início do corte, pois aumenta a resistência da espuma à indentação. Quanto mais estreita for a lâmina e mais agudo o ângulo, mais próxima da vertical será a direção destas paredes de células em tração, e consequentemente maior será a força resistente que estas serão capazes de aplicar. Por esta razão, pode se afirmar que lâminas mais

finas e com ângulo mais agudo devem ser consideradas mais afiadas, ou seja, cortarão o material com menor deformação e força.

Fazendo um paralelo entre resistência à deformação e densidade de espuma, Silva, Beretta e Kindlein (2011) que fizeram um estudo sobre a usinagem deste material, afirmam que espumas de menor densidade irão se deformar mais graças a sua baixa IFD, sendo assim o seu corte mais difícil e sensível aos parâmetros de trabalho. Fica assim evidente a observação de Wright e Cumming (1969), de que o ideal é adequar os parâmetros de corte às características da espuma cortada, não sendo possível adotar generalizações.

A partir destas informações, pode-se inferir quais as características buscadas para a ferramenta a ser utilizada na conversão de esponjas. Por um lado, é essencial que a afiação da lâmina seja adequada à espuma, para que o corte seja realizado com forças e deformações menores, proporcionando assim melhor qualidade e acabamento superficial do produto. Em contrapartida, deve-se procurar por uma lâmina robusta e resistente ao desgaste, principalmente devido ao fato do produto considerado ser composto em parte de uma manta abrasiva de alta resistência, capaz de retirar material da lâmina e mudar suas características geométricas que proporcionam o corte. Quanto à placa, é fácil notar o quanto a sua resistência é um fator importante para a indústria que utiliza o corte e vinco, uma vez que um grande número de invenções foram criadas para aumentar sua durabilidade e consequentemente diminuir os custos relacionados à matriz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma vez que a proposta deste estudo é determinar a influência das características das lâminas durante o corte de esponjas na indústria, foram obtidas amostras de lâminas comerciais utilizadas para tal finalidade. Estas foram compradas de três fornecedores diferentes, que serão referidos de agora em diante como A, B e C, e utilizadas efetivamente no processo estudado. Após o fim de sua vida útil, foram separadas e identificadas pequenas quantidades de cada um delas. Também foram obtidos pequenos segmentos de lâminas novas, para serem utilizados no teste de força de corte e na medição do ângulo de ponta. Dois lotes diferentes foram obtidos dos fornecedores A (A1 e A2) e C (C1 e C2), e três lotes do fornecedor B (B1, B2, B3). Uma diferença entre as amostras no entanto deve ser notada: aquelas do fornecedor A e B possuem espessura de 2 pontos, correspondente a 0,7mm. Já as lâminas do fornecedor C medem 1,05mm de espessura, ou 3 pontos como na nomenclatura padrão deste tipo de produto.

3.1 Dureza das lâminas

Uma das propriedades mais relevantes para a durabilidade das lâminas é a dureza. Isto porque ela está intimamente relacionada à sua resistência ao desgaste. Para determinar os valores desta propriedade, as amostras de lâminas tiveram de ser cortadas transversalmente e embutidas em resina, para posterior lixamento e polimento com óxido de cromo. O corte foi realizado com refrigeração, para que não houvesse alteração da microestrutura do material devido ao aquecimento. Duas amostras de cada lote foram embutidas em cada resina.



Figura 8: Duas amostras de cada lote de lâminas embutidas em resina.

Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

O equipamento para a medição de microdureza Vickers utilizado é da marca Buehler, modelo 1600-6300, com 200gf de carga. Como o intuito era de obter a dureza tanto no fio de corte quanto no corpo desta, foram realizadas 10 medições de dureza por amostra, posicionadas de acordo com o esquema ilustrado na Figura 9.

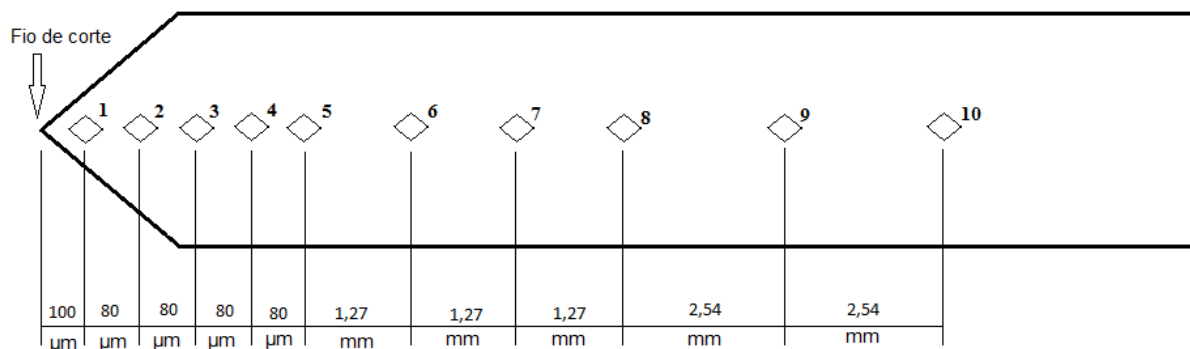


Figura 9: Esquema das indentações para a medição de dureza na seção transversal de uma lâmina. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

O espaçamento utilizado entre indentações e entre as indentações e as extremidades da amostra foi igual ou maior que 2,5 vezes a diagonal da indentação, com o objetivo de evitar efeitos de borda e da deformação plástica.

3.2 Força de corte

Um ensaio específico para este trabalho foi realizado com o intuito de conhecer a força e o deslocamento da lâmina necessários para realizar o corte total do material: espuma e manta abrasiva. Para isto, foi utilizada uma máquina de ensaio universal EMIC modelo DL-10000 com célula de carga de 10 kN. Uma pinça utilizada para ensaio de tração fixava uma amostra de lâmina nova, que era posicionada de modo a cortar a largura de uma esponja. O material a ser cortado ficava sobre uma placa polimérica, que era apoiada sobre uma mesa para ensaio de compressão. A montagem descrita pode ser vista na Figura 10.

A lâmina descia então a uma velocidade de 50mm/minuto, enquanto a força necessária para tanto era medida pelo sistema. Seis cortes foram realizados para cada lâmina (A,B,C) dando origem às curvas dos gráficos: Figura 15, Figura 16, e Figura 17.

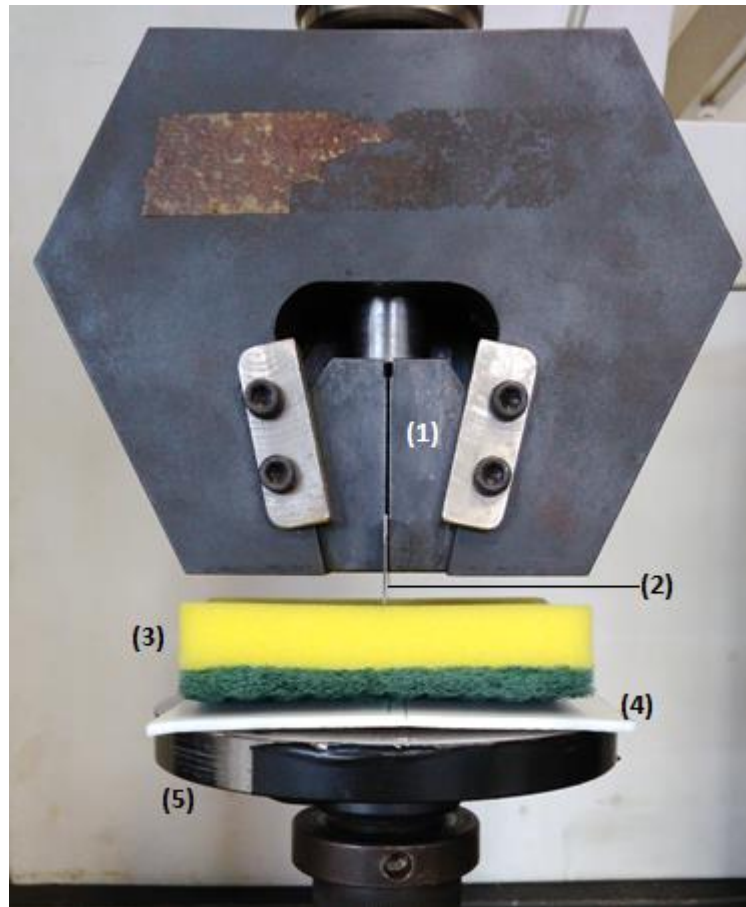


Figura 10: Montagem realizada para a determinação da força de corte para cada lâmina. Uma pinça para ensaio de tração (1) fixa uma lâmina (2) que corta o material (3) que está sobre uma placa polimérica (4) apoiada em uma mesa para ensaio de compressão (5).

Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

3.3 Espessura de corte

A espessura do material no momento do corte foi estimada através das imagens, uma vez que o equipamento utilizado para o teste da força de corte media apenas o deslocamento da lâmina, e não sua posição absoluta. A lâmina era erguida após cada corte manualmente, não possibilitando assim uma repetibilidade adequada. Sendo assim, os ensaios foram gravados e o filme pausado no momento do corte, para que fosse realizada a medição da espessura do material. Esta foi comparada com a espessura conhecida da lâmina, de 0,7 ou 1,05mm.

3.4 Análise metalográfica

Paralelamente às medidas de dureza, foram obtidas as metalografias das amostras, com o objetivo de entender qual é a microestrutura encontrada em cada lâmina. Para isso foram utilizadas as amostras embutidas que haviam sido preparadas para o ensaio de dureza. Após o procedimento de polimento, foi feito um ataque químico com Nital 2% durante aproximadamente 14s, com subsequente limpeza com álcool e secagem com ar quente. Dois microscópios com câmeras acopladas foram utilizados para a obtenção das imagens, com aumentos variando de 50x a 1000x.

3.5 Composição química

É sabido que as aplicações do aço são inúmeras, bem como suas variações e composições. Sendo assim, foi também realizada uma análise de composição química para determinar as porcentagens em peso de elementos químicos que influenciam na temperabilidade deste, e consequentemente na formação da microestrutura e de sua dureza. Amostras dos 7 lotes de lâminas analisados foram cortadas e posteriormente lixadas, para a retirada de eventuais impurezas e óxidos da superfície a ser utilizada. O equipamento utilizado para determinar a composição química dos aços foi um EDX-720, utilizando-se atmosfera de vácuo. Deve-se ressaltar que a varredura feita é capaz de medir apenas metais com o número atômico maior do que 11, portanto a quantidade de Carbono presente na amostra não é obtida. A varredura realizada contemplava os elementos de Sódio até Urânio, em dois canais diferentes. Uma segunda varredura contemplando todos os elementos detectáveis em 6 canais diferentes foi realizada para confirmar a validade dos resultados anteriores, não sendo encontrado nenhum elemento diferente daqueles já obtidos na primeira.

3.6 Durabilidade

A durabilidade da lâmina em quantidade de ciclos é uma informação essencial para a empresa que a utiliza, pois permite calcular o custo desta ferramenta vinculado ao produto final. Além disso, uma maior durabilidade significa menos trocas, e consequentemente menos tempo gasto com esta operação. Um contador de cortes foi então instalado nas prensas que realizam a conversão das esponjas, e o número de cortes que cada faca realizava até ser necessária a troca foi obtido. Por questões de segredo industrial esse número não será revelado neste trabalho. Ao invés disso, uma das amostras (fornecedor A) será utilizada como

referência e considerada 100%, enquanto o número médio de cortes que as amostras de B e C realizaram será dado relativamente ao valor de referência.

3.7 Ângulo de ponta

Outra variável a ser considerada nesta análise é o ângulo de ponta da ferramenta, também conhecido como ângulo de afiação. Não há teorias comprovadas experimentalmente que demonstrem como o ângulo da ferramenta influencia na força de corte, na qualidade do produto final ou na durabilidade da ferramenta.

Para esta medição foram utilizadas amostras novas de lâminas dos fornecedores A, B e C. Com o auxílio de um prisma V padrão, as amostras foram colocadas verticalmente (com sua seção transversal na horizontal) sobre um projetor de perfis com goniômetro. A partir do perfil da ferramenta aumentado, foi medido o ângulo entre as duas faces de cada lâmina, como esquematizado na Figura 11.



Figura 11: Esquema da seção transversal de uma lâmina, ilustrando as duas faces que formam o ângulo de ponta. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados das medições e análises realizadas nas amostras de lâminas obtidas dos 3 fornecedores.

4.1 Valores de Dureza HRC

A microdureza foi medida na escala Vickers. No entanto, o próprio equipamento fornecia já a dureza equivalente em Rockwell C, valor este que foi utilizado para a confecção dos gráficos a seguir. Cada linha do gráfico representa uma amostra. Foram então medidas duas amostras para cada lote de lâminas.

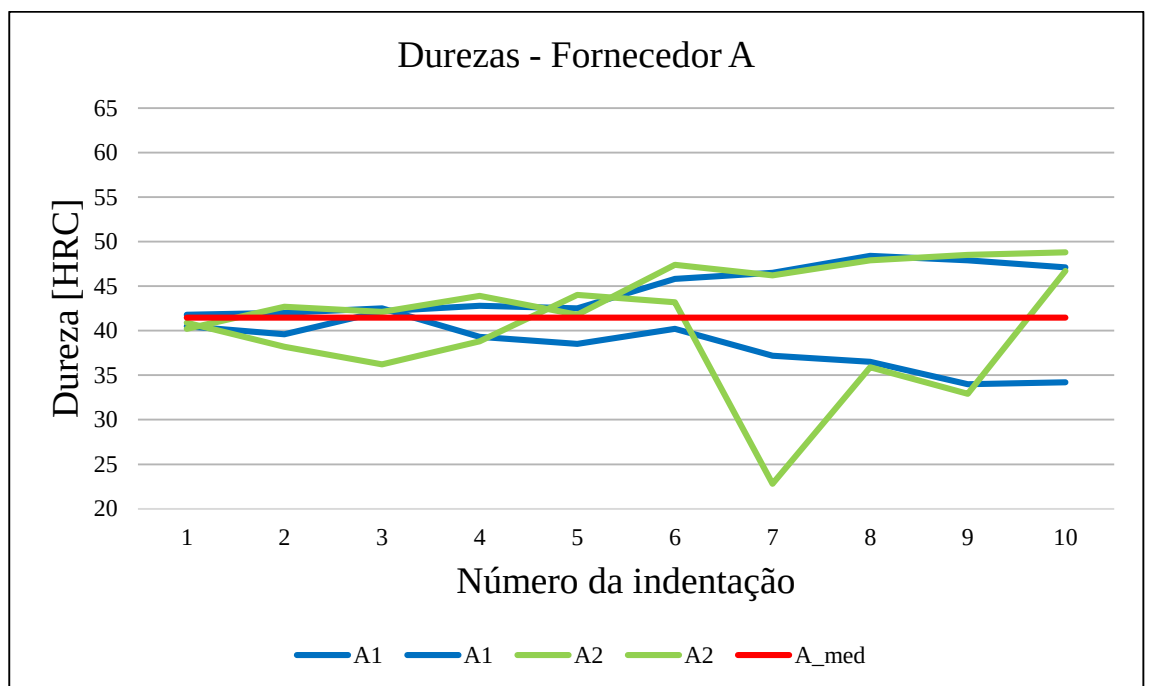


Figura 12: Gráfico da medição do perfil de dureza das amostras do fornecedor A.

Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Da Figura 12 tem-se que a dureza média das amostras é de 41,4 HRC. Nota-se também que nas posições mais próximas ao fio de corte (1 a 5) a dureza é mais constante, enquanto nas posições mais distantes (6 a 10) a variabilidade é maior.

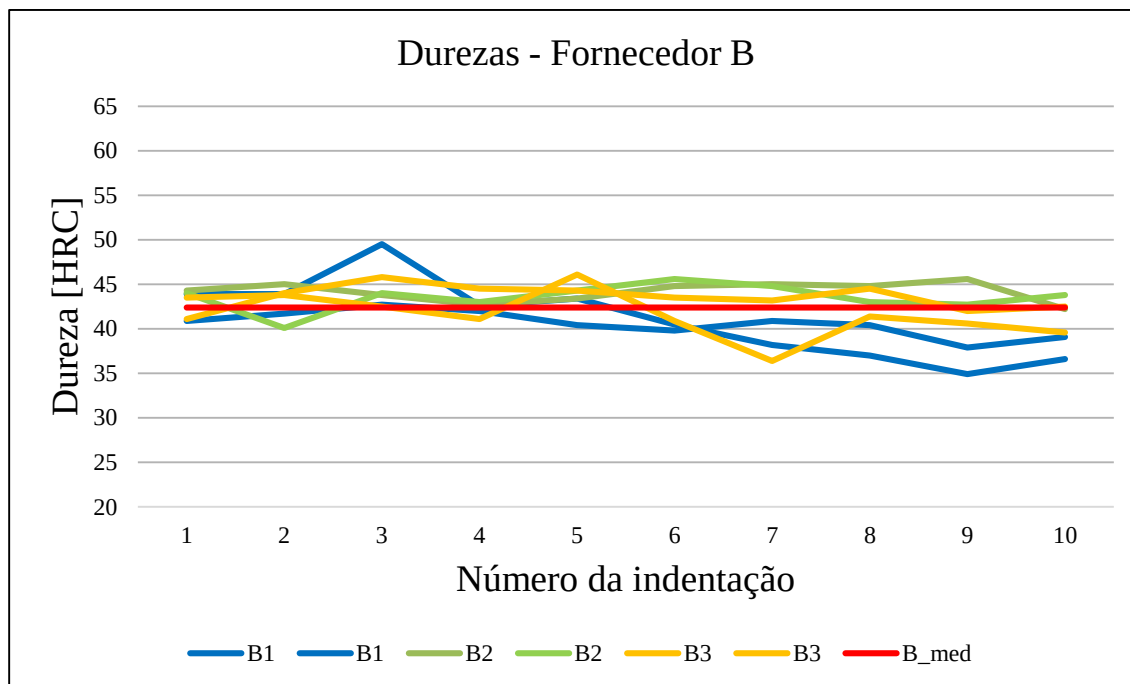


Figura 13: Gráfico da medição do perfil de dureza das amostras do fornecedor B.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Já o gráfico da Figura 13 é aquele que mostra a maior regularidade nas durezas ao longo da lâmina. Praticamente todos os valores estão na faixa entre 40 e 45HRC, com uma média de 42,4 HRC. Há apenas uma ligeira queda do lote 1 na região mais afastada do fio de corte

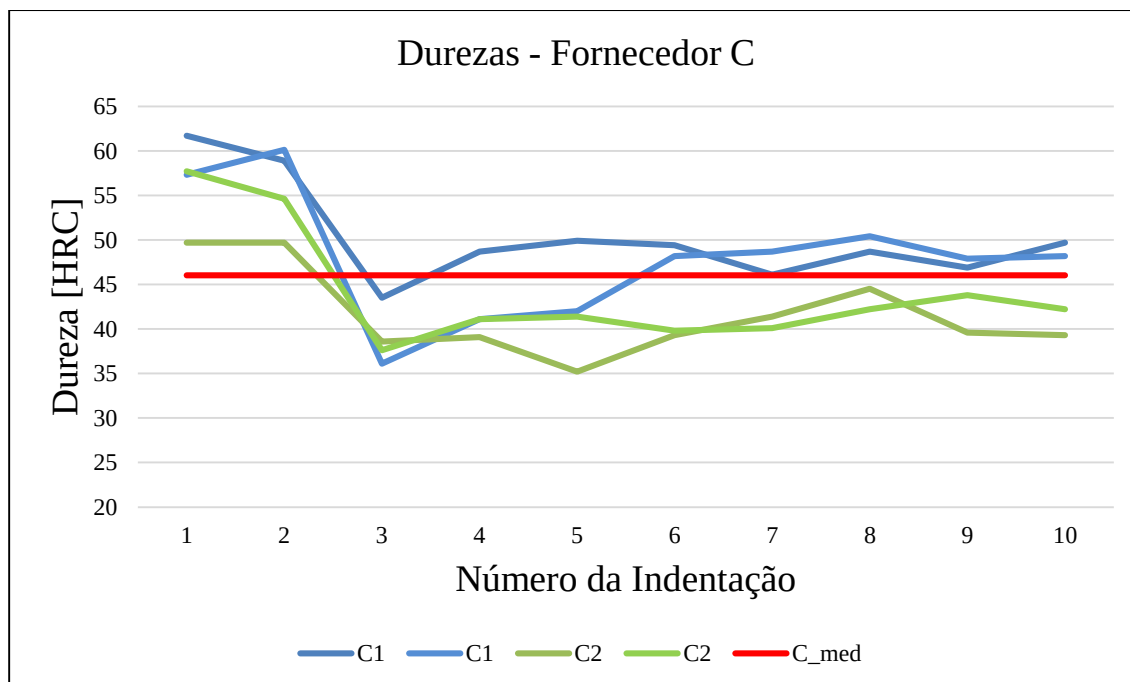


Figura 14: Gráfico da medição do perfil de dureza das amostras do fornecedor C.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Por fim, nas amostras do fornecedor C se vê um comportamento bastante característico. Uma dureza bastante alta de aproximadamente 57HRC é encontrada no fio de corte, que é tratado para obter esta propriedade. Após uma distância de aproximadamente 200µm, a dureza cai consideravelmente para o valor que será praticamente constante ao longo do perfil. Deve-se ressaltar que esta queda brusca de dureza não é interessante para a peça, uma vez que dá origem a uma região enfraquecida. O lote 1 apresentou dureza mais alta, na faixa entre 45 e 50HRC, enquanto o lote 2 ficou com média de 40HRC.

No que se refere à dureza do material, é visível a maior qualidade da lâmina fornecida por C. Ela apresenta as características desejáveis de maior dureza no fio de corte, e certa constância ao longo da seção transversal. No entanto, o excesso de dureza pode se tornar fragilidade ao considerarmos o transporte destas lâminas e a sua montagem de forma manual nas facas: uma fratura nesta região compromete o corte e pode causar a troca prematura.

4.2 Força de corte

As curvas a seguir mostram as forças medidas pelo equipamento em cada corte. A força é dada em Newtons, enquanto o deslocamento está em milímetros. Pode-se notar em todos os gráficos um comportamento bastante semelhante, caracterizado por 3 fases. A primeira delas é um platô horizontal e praticamente nulo, que corresponde à força para deformar a espuma. À partir de quando a lâmina encontra a manta abrasiva, dá-se início à segunda fase, que é quando a força de corte começa a crescer exponencialmente até chegar a um pico: momento em que o corte se inicia. Por fim, na terceira fase a força cai ligeiramente durante o corte.

Pode-se perceber no entanto que após o corte a força volta a crescer. Esta fase representa a penetração da faca na placa polimérica utilizada como substrato para a esponja, e deve portanto ser desconsiderada pois não reflete o corte do material de interesse.

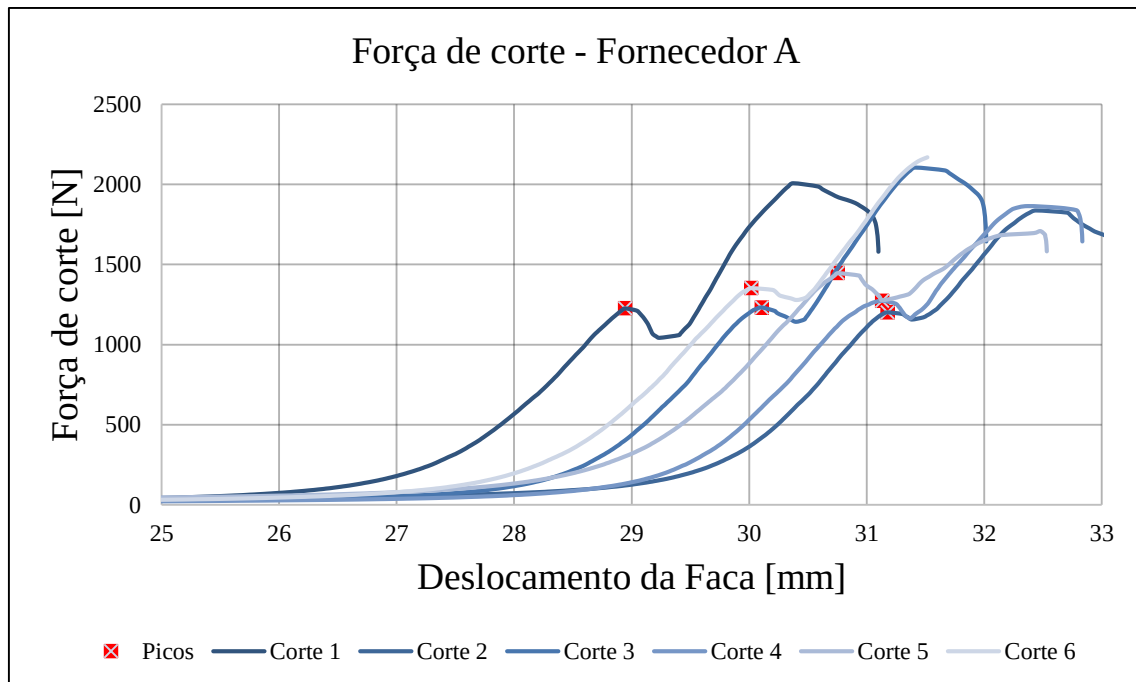


Figura 15: Gráfico da força de corte ao longo do deslocamento da lâmina do fornecedor A. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Do gráfico A percebe-se que o pico da força de corte da esponja (o primeiro a ocorrer) deu-se em média com 1300N.

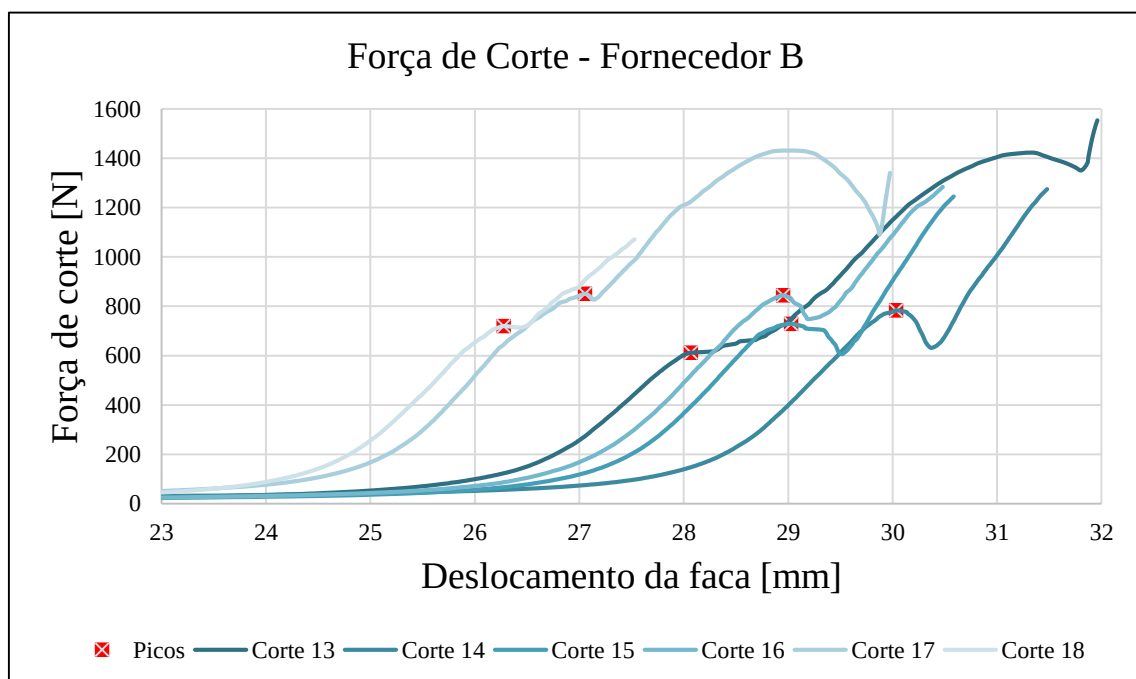


Figura 16: Gráfico da força de corte ao longo do deslocamento da lâmina do fornecedor B. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Para a amostra de lâmina do fornecedor B, o início do corte das esponjas se deu com uma força média de 750N.

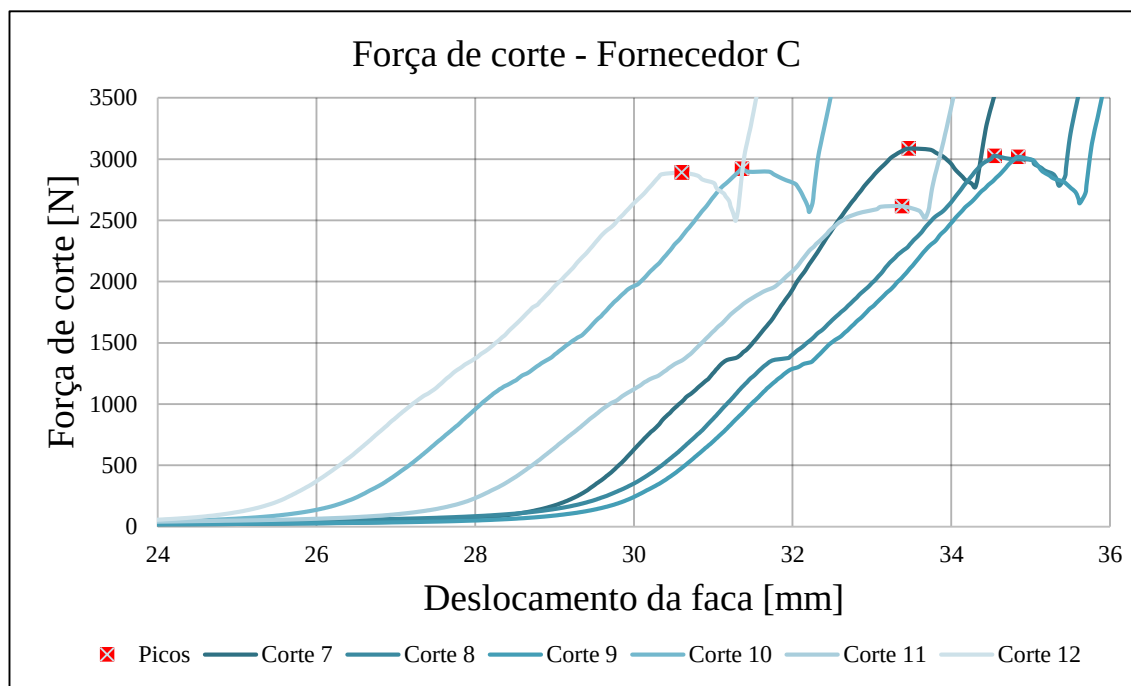


Figura 17: Gráfico da força de corte ao longo do deslocamento da lâmina do fornecedor C. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Já com a lâmina de C, os picos de força de corte ocorreram praticamente todos a uma força de 3000N.

Analisando estes dados de força de corte, temos que a lâmina C necessitou de uma força muito maior do que aquela de suas concorrentes. Uma maneira de explicar isso é que esta lâmina é 50% mais espessa do que as outras duas, o que aumenta a área afetada e pode aumentar a força resistente da esponja.

Por mais que a dureza seja geralmente o fator mais relevante ao se pensar em desgaste, não pode ser relevado o resultado do teste da força de corte: a lâmina de C necessita de uma força 4 vezes maior para cortar o material do que B. Sendo assim, o desgaste em C será bem mais intensificado, podendo explicar assim sua menor durabilidade apesar de maior dureza.

4.3 Espessura de corte

Exemplos das imagens utilizadas para a determinação da espessura do material no momento do início do corte estão na Figura 18.



Figura 18: Imagens ao longo do tempo de um ensaio de força de corte. No momento 4 é quando o corte tem início. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Das imagens feitas pode-se notar que o corte acontece com espessura média de 0,5mm. Também do gráfico de forças de corte pode ser obtido este valor, ao verificar o deslocamento da faca do primeiro pico (início do corte) até o ponto em que a força começa a aumentar pela segunda vez (encontro da faca com a placa polimérica).

4.4 Metalografias

Após analisadas as metalografias de todas as amostras, serão aqui mostradas aquelas mais representativas, as quais ilustram os comportamentos de dureza já apresentados.

Analisando as amostras do fornecedor A, notou-se uma microestrutura praticamente homogênea ao longo de toda a lâmina, formada basicamente por martensita.

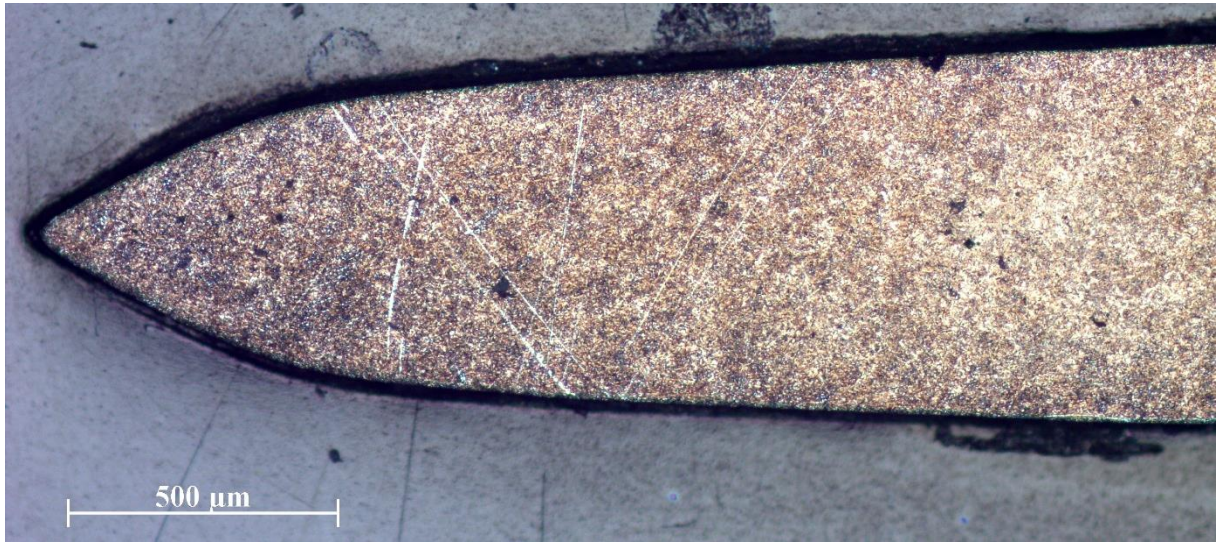


Figura 19: Metalografia da seção transversal de uma lâmina do fornecedor A microestrutura é praticamente homogênea em todas as regiões. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Com um aumento maior, é visível a estrutura semelhante à martensita revenida. De acordo com Colpaert (2008), não é possível fazer a caracterização com segurança de constituintes aciculares quando utilizado ataque com nital. No entanto, os valores de dureza medidos das amostras confirmam a hipótese de uma estrutura martensítica.

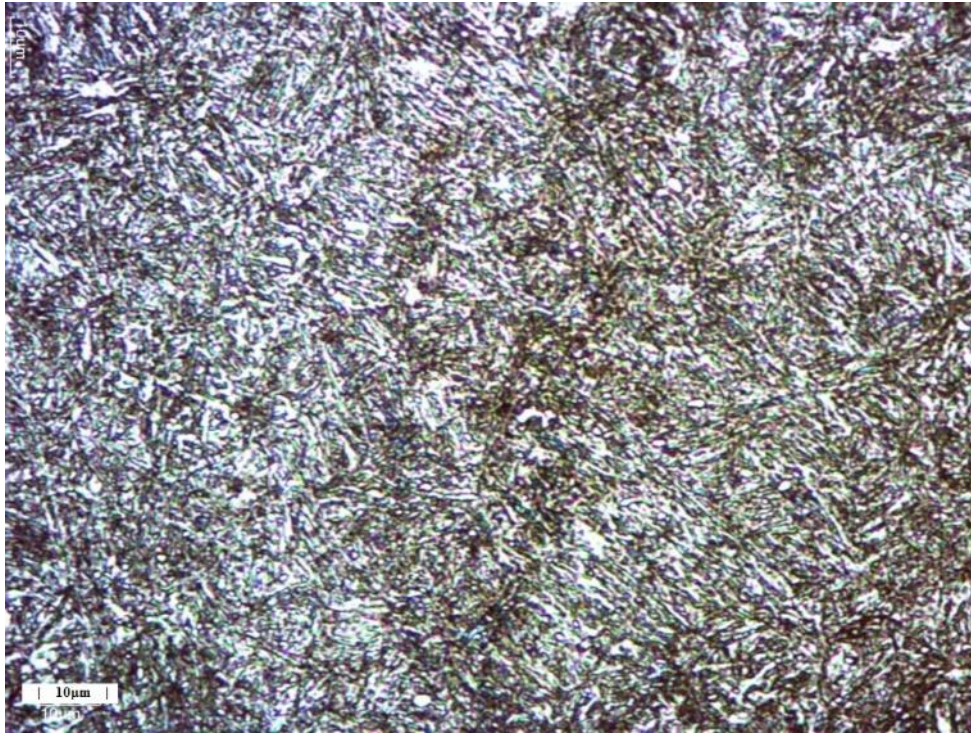


Figura 20: Martensita como microestrutura da lâmina do fornecedor A.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

No caso do fornecedor B, temos novamente uma microestrutura homogênea na seção transversal da lâmina, referente a um aço médio carbono temperado.

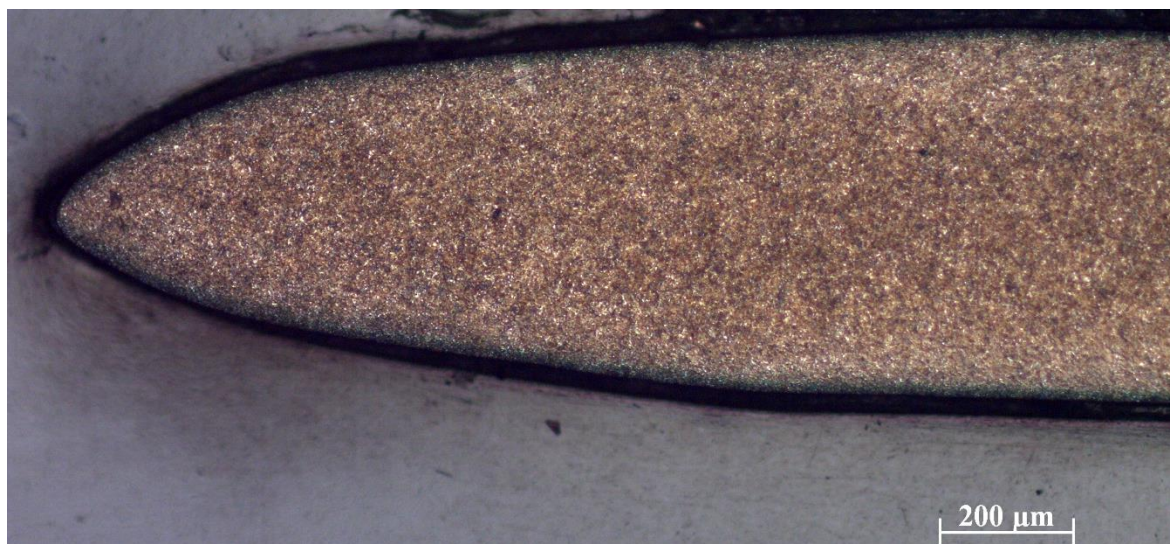


Figura 21: Imagem da microestrutura homogênea de uma amostra de lâmina do fornecedor B.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

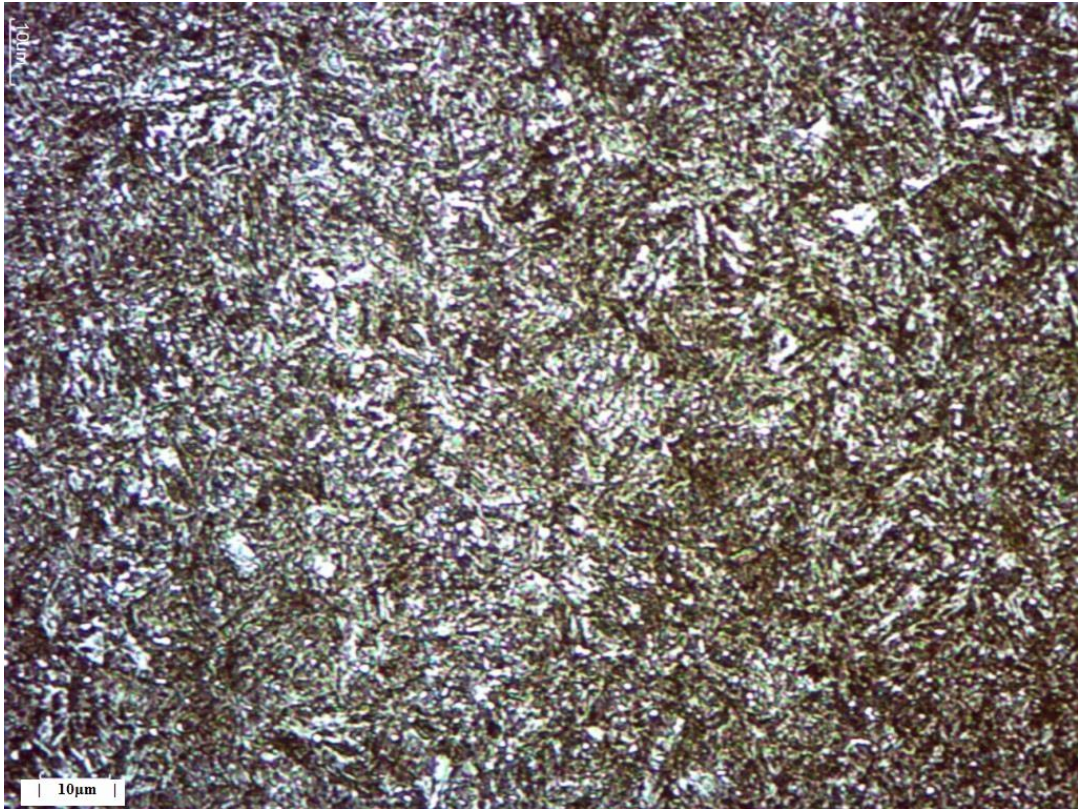


Figura 22: Microestrutura martensítica de uma amostra de lâmina do fornecedor B.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Em seguida, serão apresentadas as metalografias das amostras do fornecedor C.

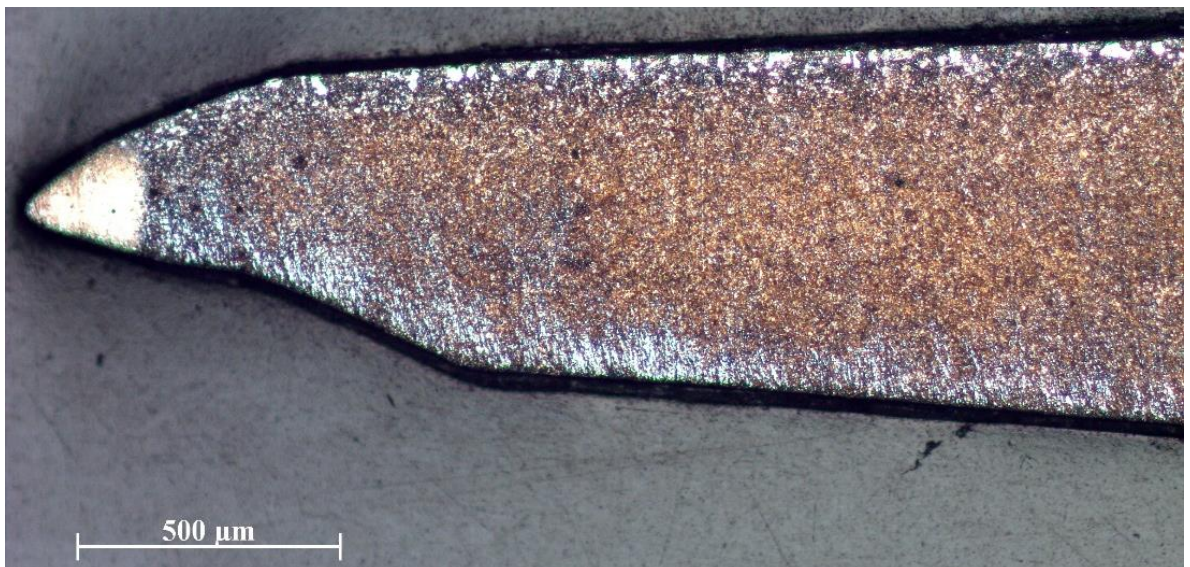


Figura 23: Metalografia de uma lâmina do fornecedor C, onde são visíveis três regiões distintas: Fio de corte endurecido, centro do material e região descarbonetada nas superfícies superior e inferior. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Como pode ser visto na Figura 23, estão presentes três regiões com metalografias distintas que compõem a seção transversal da lâmina. No fio de corte, a região mais brilhante é característica de um tratamento localizado para o aumento de dureza, como evidenciado na medição desta propriedade já mencionada. A principal motivação para esse tratamento é aumentar a resistência ao desgaste do fio de corte, e o consequente aumento da durabilidade da lâmina. Em segundo lugar temos as superfícies mais claras, as quais sofreram um tratamento de descarbonetação dando origem a uma microestrutura basicamente ferrítica. Isto é feito para aliviar as tensões que são formadas quando as lâminas de corte e vinco são dobradas para dar à matriz o formato do produto final. Por fim, tem-se o corpo no interior da lâmina com estrutura martensítica, para conferir resistência mecânica e suporte para o fio de corte.

Apesar da alta dureza do fio de corte ser desejável para o aumento da durabilidade, ela causa também uma fragilização desta região, que pode culminar em fraturas como a observada na Figura 25 e com a perda do ângulo de ponta da ferramenta.

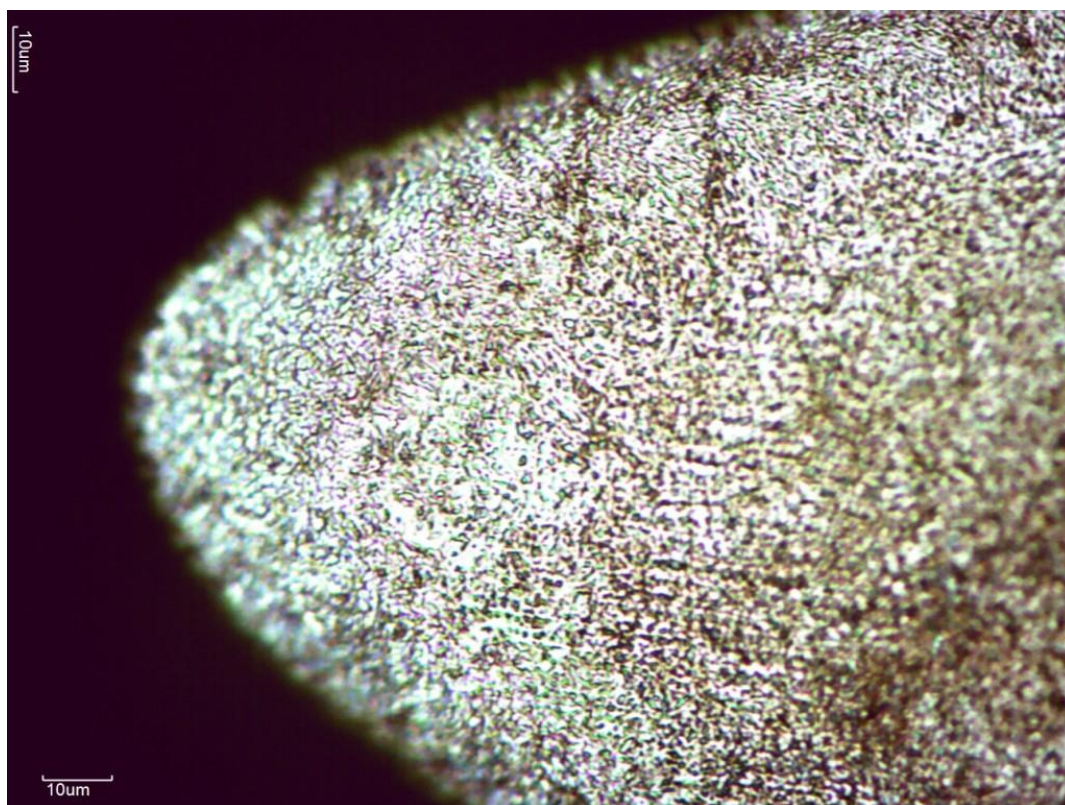


Figura 24: Região da ponta da lâmina do fornecedor C com maior aumento.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

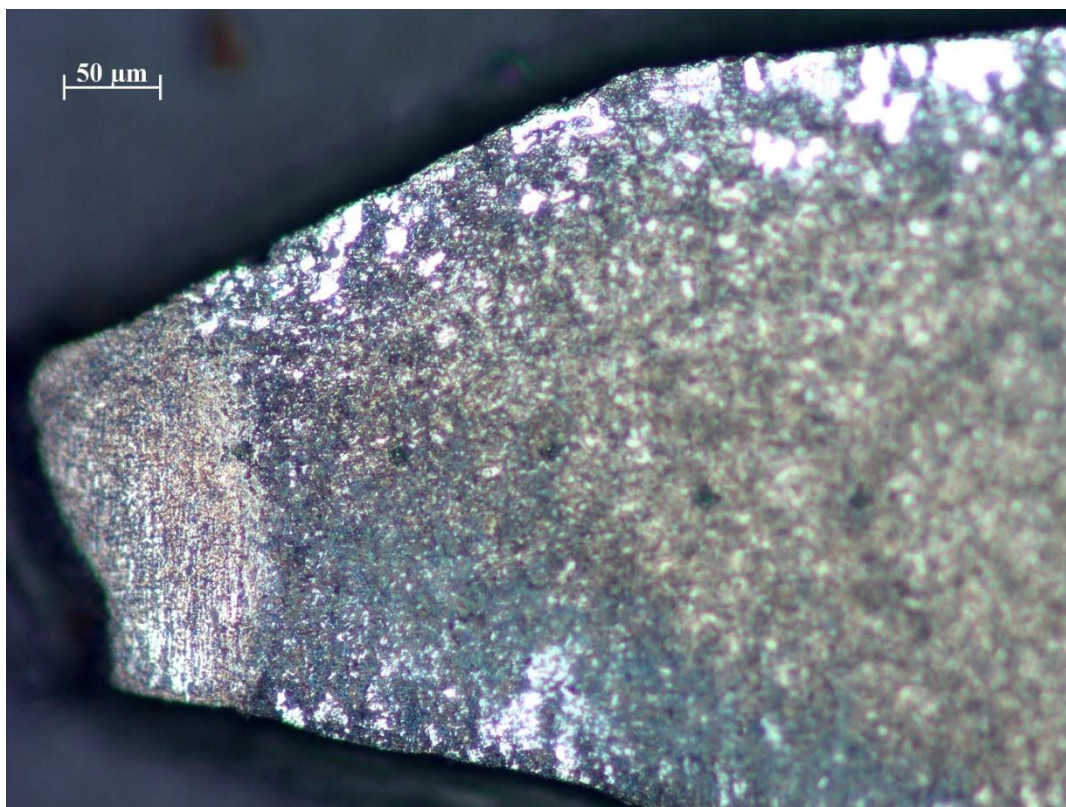


Figura 25: Ponta de lâmina endurecida fraturada. Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

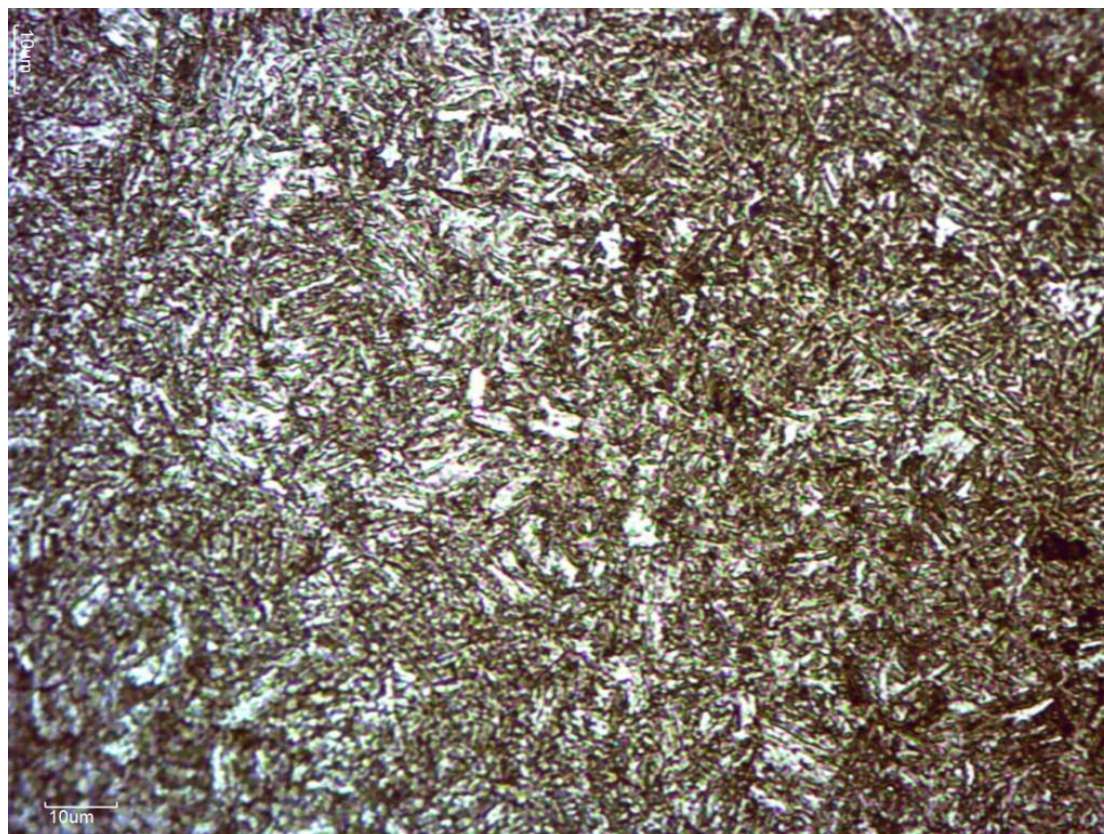


Figura 26: Microestrutura martensítica do corpo da lâmina do fornecedor C.
Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

Para buscar entender melhor qual a microestrutura obtida, procedeu-se com a comparação destas metalografias com aquelas apresentadas por Colpaert (2008). As que mais se assemelharam foram aquelas de martensita revenida, onde as agulhas já não ficam tão evidentes. No subcapítulo 15.2 “Aços Temperados e Revenidos”, são apresentadas imagens de aços com diferentes teores de carbono e revenidos a diferentes temperaturas. Destas metalografias conclui-se que os aços das lâminas possuem teores de carbono entre 0,6% e 0,8%, revenidos em temperaturas entre 400°C e 600°C. A figura 14.34 deste livro mostra uma estrutura de martensita revenida de um aço com 0,35% de C e dureza de 300HV, enquanto a figura 15.14 ilustra um material com 0,45C de dureza 320HV. Estas informações confirmam que os aços analisados possuem mais altos teores de carbono, uma vez que a dureza média avaliada foi de 420HV.

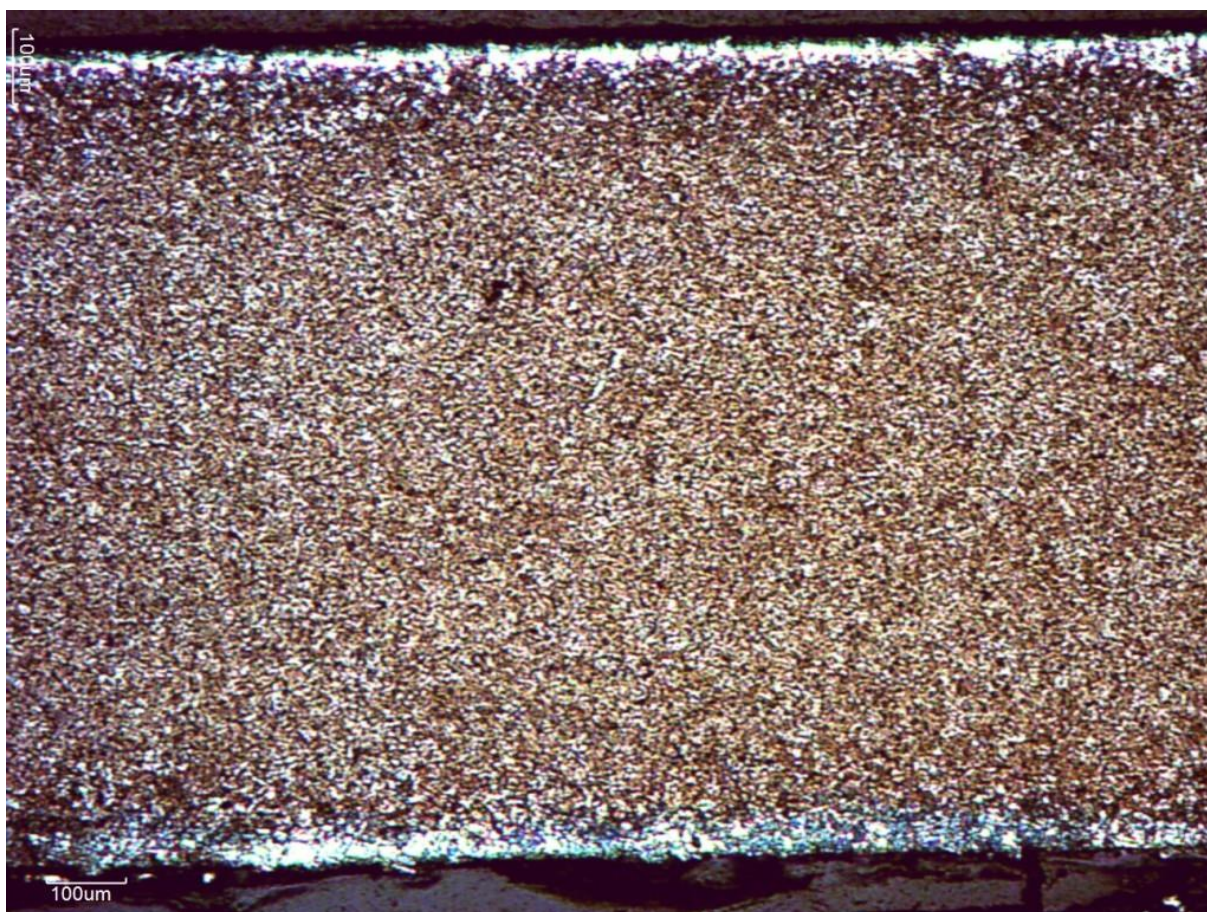


Figura 27: Imagem destacando as superfícies descarbonetadas da lâmina.

Fonte: Francisco Pereira Netto, 2016.

A microdureza e a espessura médias desta região descarbonetada foram medidas, fornecendo os valores de 115HV e 30 μ m. Esta dureza em Vickers corresponderia a uma dureza equivalente inferior a 20HRC.

A análise metalográfica confirma os resultados da medição de dureza: A e B possuem microestrutura homogênea formada por martensita revenida a altas temperaturas, e formadas em um aço com alto teor de carbono chegando a durezas médias de 42,5HRC. Já C revela 3 regiões de microestruturas e durezas distintas: ponta com 57HRC, corpo em martensita revenida com 45HRC e superfícies ferríticas com menos de 20HRC. Estes tratamentos carregam consigo um custo mais elevado deste produto, que o prejudica consideravelmente na relação custo/benefício uma vez que, como será exposto na seção 4.5, sua durabilidade não é proporcionalmente maior.

4.5 Composição química

A Tabela 1 mostra, para cada lote de amostras, a porcentagem em peso de cada elemento químico. Vale ressaltar que elementos de número atômico abaixo de 11 não são captados pelo equipamento, e portanto, não aparecem na análise. O mais representativo destes é o carbono, que influencia diretamente nas características dos aços.

Tabela 1: Composição química dos aços analisados. Os valores se referem a porcentagens em peso

	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2
Fe	98,260	98,069	98,540	98,526	98,660	98,176	97,903
Mn	0,882	0,849	0,743	0,823	0,733	0,714	0,743
Al	0,435	0,594	-	-	-	0,819	0,842
Si	0,251	0,257	0,339	0,255	0,250	-	0,233
Cr	0,125	0,148	0,339	0,355	0,357	0,292	0,279
S	-	0,042	0,039	-	-	-	-
Ge	0,046	0,043	-	0,040	-	-	-

Nota-se primeiramente o Ferro, principal componente dos aços, que aparece em média com a porcentagem de 98%. Como elementos secundários estão presentes em pequenas quantidades: Manganês, Alumínio, Silício e Cromo. Impurezas em pequenas quantidades também foram detectadas: Enxofre e Germânio. De acordo com Rollo e Fortulan (2015), “(...) nas aplicações mais gerais são utilizadas ligas de ferro e carbono, geralmente denominadas aços não ligados ou, por causa da produção em larga escala, Aços comuns. São vendidos com

base em sua resistência mecânica e não conforme sua constituição química; contém pequenos teores, inevitáveis e às vezes até desejáveis de outros elementos tais como manganês e silício (...). Segundo a classificação AISI/SAE, tratam-se todos de aços 10XX, pois contém menos de 1%p de Manganês, concentração de Enxofre inferior a 0,04%p, Silício entre 0,15%p e 0,35%p, sem a presença de Níquel ou Molibdênio. O Manganês é responsável por melhorar a temperabilidade, enquanto a presença de Cromo é geralmente associada a resistência à corrosão. Assim como o Manganês e o Silício, a presença de Alumínio tem influência de ação desoxidante e produz os chamados “aços acalmados”, com menor presença de defeitos internos segundo DEMEC UFPR (2013).

A composição química demonstrou ser a maior semelhança entre os 3 fornecedores. O uso de aços alto teor de carbono com boa temperabilidade é bastante coerente com a necessidade de aplicação, pois oferece dureza elevada a baixo custo, e pode ser considerado o ideal pois exigências de proteção à corrosão e resistência à altas temperaturas não são tão relevantes.

4.6 Durabilidade

Como citado anteriormente, a durabilidade de cada faca foi medida em número de cortes, porém serão representados aqui as proporções entre os valores.

Tabela 2: Durabilidade relativa entre as lâminas dos três fornecedores, medida no processo real da indústria de corte de esponjas.

	A	B	C
Durabilidade	100%	137%	121%

Deve-se ressaltar porém que a determinação de quando uma faca está “cega” é feita baseada na experiência dos operadores, que notam quando esta passa a não cortar adequadamente o material. Além disso, sabe-se que esta dificuldade em realizar o corte pode ser causada pelo mal funcionamento de outros componentes deste processo de conversão, os quais são mais dificilmente ajustados. Sendo assim, há uma variabilidade nestes dados decorrente de outros fatores que não apenas o desgaste das lâminas.

4.7 Ângulo de ponta

Os ângulos medidos estão representados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de ângulo de ponta das lâminas dos 3 fornecedores.

	A	B	C
Ângulo de ponta (°)	60	50	55

Nota-se que não existe um padrão na indústria em relação ao ângulo de afiação, provavelmente decorrente da ausência de estudos que determinem um ângulo ótimo que maximize a durabilidade da lâmina e diminua a força de corte. Como citado anteriormente, é possível também que este ângulo ótimo varie de acordo com o material a ser cortado, tornando sua determinação mais complexa.

Com relação aos experimentos, nota-se que A e B que possuem a mesma espessura, porém a força necessária para o corte de A é maior do que aquela de B. O fato do ângulo de ponta de B ser 10° mais agudo que aquele de A está de acordo com a percepção de que ângulos menores deixam a lâmina mais “afiada” e diminuem a força de corte.

Não foram detectadas variações de qualidade superficial da peça cortada em decorrência de ângulos de corte diferentes, sendo que todos eles proporcionaram acabamento aceitável.

Neste caso, a melhor performance em termos de força de corte e durabilidade foi obtida pela lâmina B, com ângulo de 50°. Deve-se dizer no entanto que existe um compromisso entre performance e resistência, pois quanto mais agudo o ângulo, melhor sua performance porém menos resistente se torna a lâmina.

4.8 Custo

Em se tratando de um estudo de caso real da indústria, não pode ser negligenciado o custo de cada um dos materiais, uma vez que este incide indiretamente sobre o custo do produto final. Novamente por questões de segredo industrial, não serão publicados os custos em reais por metro de lâmina, mas novamente uma relação entre o custo de cada fornecedor e o custo referência, aquele do fornecedor A.

Tabela 4: Custos relativos entra as lâminas dos 3 fornecedores.

	A	B	C
Custo (em relação a A)	100%	121%	167%

Fica claro nesta seção que as características de dureza obtidas através de diferentes condições metalográficas encontradas nas amostras do fornecedor C tem um custo proporcionalmente mais elevado.

A partir dos valores acima, pode ser então determinada uma relação entre durabilidade/custo, a qual de uma maneira simplista revela o quanto um mesmo investimento dura em cortes, ou seja, quantos cortes a faca faz para cada real gasto com ela.

Tabela 5: Valores da relação entre Durabilidade e Custo para as lâminas dos 3 fornecedores.

	A	B	C
Durabilidade/Custo	100%	113%	73%

Da Tabela 5 verifica-se então que a lâmina do fornecedor B é aquela que proporciona maior economia, enquanto a C apresenta pior custo benefício. Sendo assim, todos os outros testes foram feitos para tentar compreender o porquê isso ocorre, e finalmente determinar quais seriam as características desejáveis de uma lâmina para este processo.

Deve ser lembrado também que toda troca de lâminas ou reforma de facas possui um custo de mão de obra associado. Sendo assim, devido à crescente tendência de automação da área industrial, é interessante para a empresa que estes custos sejam minimizados, o que ocorre quanto maior é a durabilidade da lâmina.

5 CONCLUSÕES

Da revisão bibliográfica feita pode-se concluir a importância do processo de corte na indústria, uma vez que foram encontrados não só artigos científicos relacionados ao assunto, mas também considerável número de patentes e empresas que atuam no setor. Devido à tradição nesta área, as matrizes de Corte e Vinco tem seu uso já consolidado no mercado, sem porém abrir mão de empregar modernas tecnologias para o aumento de sua eficiência. Desde o corte a laser das placas até as lâminas com recobrimentos superficiais, avanços tem sido feitos com o intuito de aumentar a durabilidade e qualidade destas ferramentas. As características da lâmina de maior influência no corte foram determinadas como dureza, (medida de resistência ao desgaste), durabilidade (medida por meio do número de cortes efetuados) e afiação, sendo esta definida ou em termos de geometria ou de força de corte.

Levando em consideração os ensaios realizados, chega-se à conclusão de que a lâmina de corte e vinco ideal possui dureza elevada. Deve-se ressaltar porém duas condições: primeira é que a dureza não deve ser demasiada a ponto de fragilizar a ponta do material e contribuir para fraturas. A segunda, que nos casos em que a lâmina deve ser dobrada ou curvada essa dureza pode gerar tensões indesejáveis e também levar à fratura, sendo nestes casos recomendadas lâminas um pouco mais dúcteis.

Quanto ao ângulo de ponta, o mais agudo apresentou melhor performance. Em busca de um resultado mais conclusivo, sugere-se para trabalhos posteriores o teste de ângulos menores de 50°, medindo força de corte e durabilidade para determinar o ponto ótimo deste compromisso.

Ao escolher o material e o tratamento térmico, deve-se levar em consideração os custos do processo. Sendo o produto em questão de baixo valor agregado, fica inviável tratamentos muito específicos que encareçam o processo, ou aços com elementos de liga em alta quantidade. No entanto, deve se estar atento que por tratar-se de uma material a ser temperado e revenido, a adição em pequenas quantidades de alguns elementos pode ser interessante, como por exemplo Vanádio (maior resistência), Molibdênio (melhor temperabilidade) e Níquel (resistência ao impacto). Aumentar levemente o teor de Manganês (melhor temperabilidade) e Cromo (resistência à abrasão e corrosão) também pode levar a melhores resultados.

Das lâminas analisadas, aquelas fornecidas por B são as que mais se enquadram nestas características.

Também é desejável um aumento na resistência das madeiras onde são cravadas as lâminas. Sua durabilidade não pôde ser medida com precisão pois é maior do que o período de

realização deste projeto. Porém, ocorre por vezes que os sulcos se alargam e não fixam adequadamente as lâminas. Uma opção é aumentar o número de camadas da madeira, distribuindo melhor a pressão sobre a faca e também evitando possíveis empenamentos. Uma revisão periódica das condições do martelo da prensa que realiza o corte é recomendada, com o intuito de detectar possíveis anomalias que possam danificar a ferramenta ou realizar um corte desalinhado que gere problemas de qualidade.

Como avaliado também, a firmeza do substrato deve ser considerada, uma vez que a espessura da esponja no momento do corte é muito baixa. Se o substrato ceder alguns milímetros, a faca não cortará a esponja acarretando problemas de qualidade e produtividade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹

- MCCARTHY, C.T.; HUSSEY, M.; GILCHRIST, M.D.; **On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – indentation experiments.** Engineering Fracture mechanics 74 (2007) p.2205-2224
- GOODS, S.H.; NEUSCHWANGER, C.L.; HENDERSON, C.; SKALA, D.M. **Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam.** California, 1997
- GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solid Structure and Properties.** 2 ed Cambridge University Press, 1999.
- SILVA, F.P.; BERETTA, E.M.; KINDLEIN JÚNIOR, W. **Avaliação da usinabilidade de espumas flexíveis de poliuretano.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul – RS.
- Disponível em: <<http://www.helmold.com>> . Acesso em: 24 mar. 2016.
- Disponível em: <<http://www.mathias-die.com>> . Acesso em: 24 mar. 2016.
- Disponível em: <<http://www.steel-rule-die.com>> . Acesso em: 27 mar. 2016.
- Disponível em:<<http://steel-rule-dies.com>> . Acesso em: 28 mar. 2016.
- Disponível em:<<http://www.appliedie.com>> . Acesso em: 2 abr. 2016.
- Disponível em:<<http://www.dafaborrachas.com.br/corte-vinco>> . Acesso em: 2 abr. 2016.
- REILLY, G.A., MCCORMACK, B.A.O., TAYLOR, D. Cutting sharpness measurement: a critical review. **Journal of Materials Processing Technology**, p.261-267, Nov. 2004.
- KALDER, S. VENUVINOD, P.K. Macro level optimisation of cutting tool geometry. **Journal of Manufacturing Science and Engineering** 119 (1997) 1–9.
- MCGORRY, R. W.; DOWD, P. C.; DEMPSEY, P. G. **A technique for field measurement of knife sharpness.** Applied Ergonomics, p, 635-640, 36 (2005).
- LIMA, A. C.; SIQUEIRA, I.L.; OLIVEIRA, F.P. DE; MORAIS, L. I.; MORAIS NETO, V.P. DE. **Soldagem de Revestimentos Duros em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar de Indústria Sucroalcooleira: Eletrodo Revestido “versus” Arame Tubular.** In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7.2012, Palmas - TO.
- BRUCE, R. W. **Handbook of Lubrication and Tribology**, Volume II: Theory and Design, 2nd ed, STLE, 2012.
- GLAESER, W. **Wear resistant materials**, ASME Wear Control Handbook, ASME, Fairfield, NJ, 1980.
- KRUSHCHOV, M. M., **Principles of abrasive wear**, Wear, 10, 1969, 291-309

- MULHEARN, T.O. AND SAMUELS, L.E. **The abrasion of metals: a model of the process**, Wear, 5, 1962, 478-498.
- HILLOCK, R. A.; ROSSE, S. B. **Steel rule die and method of manufacture**. US 4981061, 1989.
- SAUNDERS, P. G. **Steel rule cutting dies**. US 3383969, 1966.
- HOLLIDAY, K. **Steel rule die holder**. US 5029505 A, 1990.
- HOLLIDAY, K. **Steel rule die retaining board and die lock**. US 5197367 A, 1991.
- SANDFORD, P. E. **Steel rule die system**. US 6085625 A, 1997.
- BRAYTON, R.S.; KUSH, M.; MCARTAN, R. **Lightweight dimensionally stable steel rule die**. US 5943935 A, 1997.
- MICHLIN, S.B. **Long life re-rulable steel rule die system**. US 5566594 A, 1993.
- JESSEN, K. C. **Permanent magnetic hold down for steel rule dies**. US 4233873 A, 1978.
- ATKINS, T. **Optimum blade configurations for the cutting of soft solids**. Engineering Fracture mechanics, n.73, p. 2523-2531, 2006.
- SILVA, F.P. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. UFRGS, Porto Alegre 2011.
- WRIGHT, P.; CUMMING, A. P. C. Effectiveness for Material Removal. **Journal of Manufacturing Science and Engineering** February 2004. SoftPolyurethane Materials. Gordonand Breach: New York, 1969, 66-68.
- AVALLE, M.; BELINGARDI, G.; MONTANINI, R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. **International Journal of Impact Engineering**. 25 (2001) 455-472.
- LIMA, M.A.M. **Introdução aos materiais e processos para designers**. Rio de Janeiro: Ciência moderna, 2006.
- COLPAERT, H., **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4^a. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2008.
- ROLLO, J.M.D.A.; FORTULAN, C.A. **Aula 5 - Metais como materiais de engenharia**: curso Materiais para engenharia, 2015. Notas de aula.
- EFEITO dos elementos de liga nos aços: curso TM233, 2013, DEMEC, UFPR. Notas de aula.