

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO CORTE DO AÇO ABNT 8620 COM SERRA
FITA DE METAL DURO

por

Mathias Fritsch Bressan

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2016

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO CORTE DO AÇO ABNT 8620 COM
SERRA FITA DE METAL DURO

por

Mathias Fritsch Bressan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Heraldo J. Amorim

Co-orientador: Prof. Dr. André J. Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Patric D. Neis

Porto Alegre, 01 de Julho de 2016

Dedicado ao meu pai, Edemir Bressan, meu grande exemplo de profissional e principalmente de ser humano. Batalhador, honesto, puro, divertido, solidário e agora também colega de profissão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Peterson Borgelt, amigo de longa data, por todo suporte prestado, onde toda a ajuda oferecida e fornecida deu-se unicamente por prestígio a nossa relação de amizade.

À minha família, principalmente à minha mãe Betina Fritsch e ao meu pai Edemir Bressan, que me auxiliaram e motivaram sempre que necessário.

À Gabriella Fleytas, meu amor, por toda a compreensão e companhia no decorrer de todas as etapas do trabalho.

Aos meus amigos sempre presentes nos melhores e também nos mais difíceis momentos, Marcelo Tsai, Guilherme Silva, Mathias Paz, Roberto Machado, Rodrigo Giudici e Alejandro Oliver.

À empresa Aços Favorit, pela estrutura disponibilizada. Ao José Cláudio, Rogério Beznos e Sabine Kirst pelo apoio na organização do experimento. Ao Lucas Markiewicz e ao Sidnei Martins, por acompanharem integralmente todas as etapas práticas e por serem extremamente prestativos durante as três semanas dos testes.

Ao Márcio Krammer, por disponibilizar o espaço do LAMEF e auxiliar na análise de falha da ferramenta.

Ao sempre muito prestativo professor Dr. Heraldo J. Amorim pela orientação do trabalho.

E ainda a todos os amigos criados na faculdade pelos inesquecíveis momentos de convivência, em especial para o Vitor Becker, Erik Radke, Bruno Zart, Juliano Tonin, Leonardo Dolzan, André Veit, Leonardo Fernandes e Gustavo Schreiber.

BRESSAN, M. F., **EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO CORTE DO AÇO ABNT 8620 COM SERRA FITA DE METAL DURO**, 2016, 16 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O corte com serra fita é um processo muito utilizado em uma variedade de indústrias, onde o aço é cortado na sua forma bruta para ser utilizado em posteriores operações. Porém, por mais antiga e reconhecida que seja essa prática, não existe uma grande quantidade de trabalhos científicos elaborados sobre o assunto. Ainda assim, a evolução desse tipo de corte vem acontecendo, sendo guiada recentemente pela implementação do metal duro nas lâminas de serra. Por esses os motivos, foi decidido realizar um estudo com uma serra fita de metal duro, buscando compreender melhor como as variáveis do processo se comportam durante a operação, qual o impacto do desgaste da lâmina, e como o mesmo pode ser evitado, prolongando assim a vida da ferramenta. Para isso, toda a vida útil de uma lâmina foi monitorada. Dados do torque da máquina foram registrados durante a operação, referentes a diferentes graus de desgaste da lâmina, e a diferentes parâmetros de corte aplicados. Após o fim do experimento, pôde ser feita uma comparação entre os fenômenos previstos em equações analíticas e o comportamento real do sistema. Referente ao comportamento da força de corte, os resultados encontrados condisseram com o que foi previsto pelas equações, validando o experimento. Tais resultados permitiram encontrar o ajuste necessário dos parâmetros, para que os mesmos compensem o desgaste da lâmina, mantendo assim uma força de corte constante durante todo o processo. Através da análise de falha da serra fita foi verificado que, no momento da quebra da lâmina, os dentes ainda se encontravam com baixo desgaste. O modo de falha da ferramenta (rompimento do corpo da lâmina) foi diferente do que em outros trabalhos científicos, onde o que determinou o fim da vida útil da ferramenta foi um elevado desvio de corte. As ferramentas e métodos desenvolvidos para o trabalho possuem amplo potencial de aplicação, permitindo a futura realização de diferentes estudos. Fornecendo grande quantidade de informações sobre o processo, os programas de leitura e registro de dados, desenvolvidos exclusivamente para o teste, trouxeram um grande benefício para a empresa na qual foram realizados. Através deles foi viabilizada a obtenção de maior conhecimento e controle do processo, possibilitando assim a melhoria contínua do mesmo.

PALAVRAS-CHAVE: Serra fita, metal duro, força, desgaste

BRESSAN, M. F., **THE EFFECT OF PROCESS PARAMETERS IN CARBIDE TIPPED-TOOTH BAND SAWING OF ABNT 8620 STEEL**, 2016, 16 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Bandsawing is a machining process widely used in industry, usually employed for cutting blanks for posterior processing. In spite of being a traditional manufacturing process, research concerning this topic is poor, usually conducted by tool manufacturers and thus unavailable to the scientific community. Even so, several developments occur concerning band sawing process, such as the recent use of carbide-tipped teeth – however, the research concerning carbide-tipped bandsawing is very incipient. This work consists on the study of the behavior of process variables during bandsawing the cutting force, here represented by the torque acting during cutting, in sawing of ABNT 8620 steel. In order to evaluate the effect of tool wear over the solicitation of the tool, the whole life of a carbide-tipped bandsaw was monitored. Factorial design of experiments was used, where both cutting speed and feed speed effects were evaluated at two levels in three different moments along tool life, with torque data being recorded directly from the machine. After the end of the experiment, a comparison between the behavior predicted by theory and the results from torque monitoring was made. Variance analysis showed significant effect of cutting speed, feed speed and tool life ratio over average torque per teeth. The results agree with the predicted behavior, validating the experiment. Through a failure analysis made after the saw fracture, only a low wear was detected on the teeth. The tool failure type (fracture of the saw body), was different than reported in similar studies, where the end of tool life was determined by high out of square values. The tools and methods developed to this work have broad potential application, allowing the future realization of different studies. The computational routines used were developed exclusively for the test, providing continuous information about the process.

KEYWORDS: Bandsawing, carbide, force, wear.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 Cálculo dos parâmetros para a serra fita utilizada	3
3. METODOLOGIA.....	4
3.1. Material e equipamentos.....	4
3.2. Procedimento experimental	5
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
4.1 Torque total e torque por dente.....	7
4.2 Desgaste dos dentes e falha da lâmina	12
5. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE I	15

1. INTRODUÇÃO

O corte com serra fita é uma operação de usinagem amplamente utilizada na indústria, em especial para o corte nas dimensões desejadas de metais em estado bruto para posterior processamento. A automatização desse processo oferece diversas vantagens, uma vez que ele permite produtividade elevada associada a baixa perda de material, linearidade no corte, bom acabamento superficial e elevada vida útil de ferramenta.

Apesar de bem estabelecido e de grande aplicação industrial, o corte com serra fita é pouco estudado em comparação com outros processos de usinagem, com uma produção científica pequena quando considerada a relevância do processo. Desse modo, o seu desenvolvimento é realizado principalmente pelos fabricantes de ferramenta, sendo mais baseados em testes empíricos do que em programas de pesquisa e desenvolvimento propriamente ditos, com dados frequentemente sigilosos devido a questões comerciais.

Um avanço recente envolvendo o corte de metais é o uso do metal duro em serras fita. Com esse material é possível atingir taxas de remoção de material significativamente maiores do que com outros tipos de serra. A tecnologia de serra fita com insertos de metal duro está presente no mercado brasileiro há aproximadamente cinco anos, e ainda são poucas as indústrias que a utilizam, uma vez que ela envolve não somente a aquisição de ferramentas de custo elevado mas a adaptação de todo o maquinário que suporta as cargas do corte. No meio acadêmico há pouca pesquisa pertinente a esse tema em específico. Por essas razões, considerou-se realizar uma investigação mais aprofundada sobre esse processo, cuja aplicação deverá crescer consideravelmente nos anos futuros.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo sobre os mecanismos envolvidos no serramento com pastilhas de metal duro, de modo que seja esclarecido o comportamento das variáveis durante o processo e como elas interagem entre si. Desse modo, busca-se contribuir com a base de conhecimento dessa área, auxiliando o entendimento dos modos e mecanismos de falha e desgaste inerentes ao processo.

Através dos resultados obtidos, espera-se melhorar o desempenho do processo de serramento com ferramenta de metal duro, tornando-o menos sensível ao efeito dos fatores de ruído e reduzindo os custos associados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O corte com serra é caracterizado por uma lâmina composta por diversas arestas cortantes (dentes), sob movimento linear contínuo na direção de corte aliado a um movimento de avanço que permite a remoção de material de forma contínua. Os principais tipos de serra utilizados na indústria são do tipo alternativo, circular e serra fita. Quando a lâmina executa movimento cíclico ao redor de dois eixos paralelos, permitindo que o corte ocorra de forma retilínea e constante, chama-se o processo de corte com serra fita. Esse processo tem como diferencial baixas perdas de material devido à baixa espessura da lâmina. Entretanto, essa mesma característica também resulta em baixa estabilidade com relação a desvios no corte [Klocke, 2011].

Em relação ao material, existem três diferentes tipos de lâminas de serra fita. As ferramentas podem ser confeccionadas inteiramente em aço carbono, possuir insertos de aço rápido (bimetálicas), ou ainda pastilhas de metal duro.

Os principais parâmetros de processo associados ao corte com serra fita (Figura 2.1) são a velocidade de corte V_c [m/min] e a velocidade de avanço V_f [mm/min]. Em relação à ferramenta, o comprimento da lâmina l_B [mm] e o número de dentes z são parâmetros importantes. Em relação à geometria do dente, existem dois métodos frequentemente utilizados pelos fabricantes para evitar o acúmulo de cavaco nos canais da lâmina e reduzir o aquecimento gerado pelo atrito durante o corte: a flexão alternada dos dentes, onde a disposição padrão normalmente aplicada é direita/esquerda/reto e a fabricação de dentes com diferentes seções de corte.

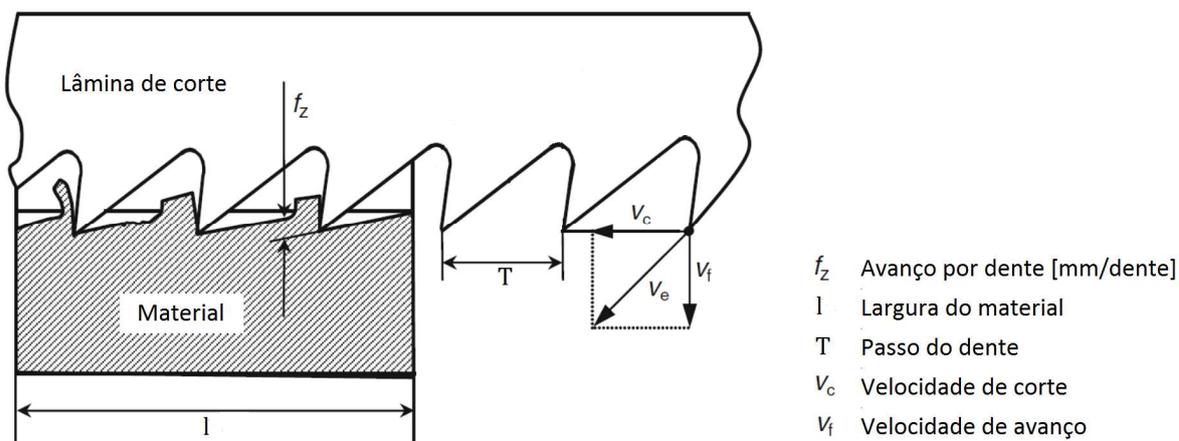


Figura 2.1 – Parâmetros de processo no serramento [Adaptado de Klocke, 2011].

O avanço por dente f_z corresponde à distância percorrida por cada dente na direção de avanço, e pode ser calculado através da equação 2.1.

$$f_z = \frac{V_f \cdot l_B}{V_c \cdot z \cdot 1000} \quad (2.1)$$

O número de dentes em contato simultaneamente z_{iE} é calculado através da equação 2.2:

$$z_{iE} = \frac{l}{T} \quad (2.2)$$

onde z_{iE} é o número de dentes em contato, l é a largura de corte [mm] e T é o passo do dente [mm].

A força de corte por dente F_{cz} [N] pode ser calculada através da equação 2.3:

$$F_{cz} = a_p \cdot f_z \cdot k_c \cdot f_{sa} \cdot K_{ver} \quad (2.3)$$

onde F_{cz} é a força de corte por dente [N], a_p é a largura de corte [mm], correspondente ao comprimento da aresta de corte dos dentes, k_c a força específica de corte [N/mm²], f_{sa} o fator de processo (igual a 1,15) e K_{ver} é o fator de desgaste [GARANT, 2016].

Uma vez que se conheça o número de dentes simultâneos em corte z_{iE} é possível calcular a força de corte total F_c , conforme equação 2.4:

$$F_c = F_{cz} \cdot z_{iE} \quad (2.4)$$

Para o corte de perfis circulares, a largura de corte deve ser calculada em função da posição da serra (eq. 2.5):

$$l(y) = 2\sqrt{2yr - y^2} \quad (2.5)$$

onde $l(y)$ é a largura de corte, y é a altura do cabeçote [mm] e r é o raio do material cortado.

Os principais critérios de fim de vida utilizados no corte com serras fita são o desgaste excessivo, a quebra dos dentes, quebra da lâmina ou ainda desvio do corte além do permissível. Sarwar, 2005, analisou a influência do desgaste dos dentes nas forças de corte e o modo de falha da serra fita, utilizando o mesmo material e parâmetros de corte durante toda

a vida útil da ferramenta, identificando o aumento da força de corte conforme ocorria o desgaste dos dentes. Três serras fita bimetálicas foram usadas no experimento, onde todos os modos de falha foram caracterizados por um elevado desvio de corte, não ocorrendo falha catastrófica, como quebra dos dentes ou da lâmina.

Diferentemente do que se adota em outros processos de usinagem a vida útil da lâmina de serra fita é dada pela área efetiva cortada, e não pelo tempo gasto no corte. Söderberg, 1986, alega que o desgaste e vida útil da lâmina estão fortemente conectados com a velocidade de corte empregada, ocorrendo diferentes tipos de desgaste nos dentes conforme a velocidade utilizada.

Ahmad, 1988, analisou a influência da velocidade de corte e de avanço na força de corte utilizando serra fita bimetálica. Foram encontrados resultados onde houve uma diminuição na força por dente com o aumento da velocidade de corte. Segundo Ahmad, isso aconteceu devido à diminuição na espessura do cavaco, causada pelo aumento da velocidade de corte. Por outro lado, com o aumento da velocidade de avanço, houve um aumento das forças envolvidas, causado por um aumento da espessura do cavaco.

A maior parte dos trabalhos publicados referentes ao assunto abordado utilizou serras fita bimetálicas para execução dos experimentos. Não foram encontrados artigos científicos envolvendo o corte com serra fita com pastilhas de metal duro.

2.1 Cálculo dos parâmetros para a serra fita utilizada

Conforme os parâmetros da serra empregada no experimento (comprimento da lâmina igual a 7830 mm e 402 dentes), é possível calcular o avanço por dente através da eq. 2.6.

$$f_z = \frac{V_f \cdot l_B}{V_c \cdot z \cdot 1000} = \frac{V_f \cdot 7830}{V_c \cdot 402 \cdot 1000} = 0,0195 \cdot \frac{V_f}{V_c} \quad (2.6)$$

A eq. 2.6 indica, para as circunstâncias do experimento, que o avanço por dente (f_z) varia conforme a razão entre a velocidade de avanço (V_f) e a velocidade de corte (V_c).

Considerando as características da serra (largura de corte $a_p = 1,6$ mm), do material cortado (ABNT 8620, com $k_c = 7650$ N/mm²) e o fator de processo para corte com serra igual a 1,15, é possível calcular a força de corte através da eq. 2.7:

$$F_{cz} = 14076 \cdot f_z \cdot K_{ver} \quad (2.7)$$

Substituindo a equação 2.6 na equação 2.7,

$$F_{cz} = cte \cdot \frac{V_f}{V_c} \cdot K_{ver} \quad (2.8)$$

A equação 2.8 demonstra, para as circunstâncias do experimento, que a força de corte por dente (F_{cz}), e conseqüentemente o torque por dente, variam conforme a razão entre velocidade de avanço (V_f) e a velocidade de corte (V_c) e ainda conforme o fator de desgaste da lâmina (K_{ver}).

3. METODOLOGIA

O trabalho consistiu em analisar a influência de diferentes variáveis no processo de corte com serra fita. Para tanto, foram realizados experimentos com uma serra fita de metal duro, nos quais foram avaliados o efeito da velocidade de corte e da velocidade de avanço sobre a força de corte, e o desgaste da ferramenta em diferentes momentos ao longo de sua vida útil.

3.1. Material e equipamentos

Os ensaios de serramento foram realizados em uma serra SFHP 520 A (Figura 3.1), de marca Franho, desenvolvida para o corte de alto desempenho com pastilhas de metal duro. Além de permitir a automatização do corte, a serra ainda informa a corrente consumida pela máquina e o torque durante o corte.



Figura 3.1 – Instalação da lâmina nova na máquina e corte do primeiro conjunto de amostras.

A ferramenta utilizada é uma serra fita HM Strong X, fornecida pela empresa Sul Corte. Essa serra se caracteriza por possuir dentes com diferentes seções e passo variado entre dentes. Os passos variam de 15,87 a 23,09 mm. Todos os cortes foram realizados com fluido de corte Tecnoil Usitex SS 19, com nível e concentração monitorados periodicamente. A Tabela 3.1 apresenta valores recomendados para o avanço por dente (f_z) para diferentes metais.

Tabela 3.1 – Recomendação de valores para avanço por dente (f_z) [Fonte: GARANT, 2016].

Material	Avanço por dente f_z [mm/dente]
Aço baixa liga	0,005 – 0,008
Aço ligado	0,004 – 0,008
Aço ferramenta	0,002 – 0,005
Aço inoxidável	0,002 – 0,005
Bronze / cobre	0,008 – 0,012
Alumínio	0,010 – 0,030

O estudo foi realizado em barras cilíndricas forjadas de aço ABNT 8620 (aço ligado). Os avanços por dente escolhidos para o teste estão de acordo com o recomendado na Tabela 3.1. Este material é amplamente utilizado na fabricação de engrenagens, pinos e peças onde há exigência de dureza superficial obtida pelo processo de cementação ou carbonitretação. Sua composição é apresentada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química do aço ABNT 8620

ABNT	C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
8620	0,18 – 0,23	0,70 – 0,90	0,035	0,040	0,15 – 0,35	0,40 – 0,70	0,40 – 0,60	0,15 – 0,25

Durante o experimento, foram cortadas ao total 36 peças do material ABNT 8620, todas com 406,4 mm de diâmetro e 55 mm de comprimento. Tais peças, utilizadas na análise, foram denominadas de amostra padrão.

3.2. Procedimento experimental

Os testes foram realizados de acordo com um projeto fatorial de experimentos, com as velocidades de corte e avanço sendo avaliadas a dois níveis cada e a proporção da vida da ferramenta em três níveis, resultando num total de doze condições distintas de usinagem, cada qual avaliada através de três repetições. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de processo utilizados em cada conjunto de testes.

Os testes foram realizados em diferentes momentos da vida de uma serra fita. Antes do início dos testes, foi necessário realizar alguns procedimentos. O primeiro foi a marcação de 6 dentes (2 conjuntos, em sequência, de dentes com diferentes arestas), para monitoramento ao longo da vida. Após a instalação e ajuste da lâmina na máquina operatriz, foi necessário realizar um procedimento, recomendado pelo fabricante da lâmina, chamado de amaciamento, no qual 0,3 m² de material são cortados com os parâmetros de processo ajustados em 50 % dos valores recomendados.

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados para o corte das amostras padrão dentro de cada conjunto de testes.

Parâmetros empregados (Velocidades de corte e avanço)	Quantidade de cortes efetuados dentro de cada conjunto
$V_c1 = 93$ m/min $V_f1 = 33$ mm/min	3 cortes (peças)
$V_c1 = 93$ m/min $V_f2 = 39$ mm/min	3 cortes (peças)
$V_c2 = 109$ m/min $V_f1 = 33$ mm/min	3 cortes (peças)
$V_c2 = 109$ m/min $V_f2 = 39$ mm/min	3 cortes (peças)

Cada conjunto de testes consistiu no corte de 12 peças segundo os parâmetros de corte apresentados na Tabela 3.3. Para que o efeito do desgaste da lâmina pudesse ser desconsiderado dentro de cada conjunto de testes, os parâmetros de corte apresentados foram aplicados aleatoriamente a cada peça cortada.

Com exceção do primeiro conjunto de testes (Figura 3.1), realizado logo após o amaciamento da lâmina (0,3 m²), foram capturadas imagens dos dentes com o uso de um microscópio digital a cada 2 m² cortados até o fim da vida útil da lâmina. Os experimentos foram realizados após o corte de 0,3, 6 e 12 m². Considerando que cada conjunto de testes correspondeu a uma área cortada de 1,5 m², a soma da área cortada no início de cada conjunto de testes (0,3, 6 ou 12 m²) com a área média cortada durante a sua execução (0,75 m²) correspondeu aproximadamente a 8, 50 e 92% da vida da ferramenta. O fim de vida da lâmina ocorreu por falha catastrófica (rompimento da lâmina) após o corte de 13,8 m² de material, marcando assim o fim do experimento. A Tabela 3.4 apresenta os experimentos realizados ao longo da vida da ferramenta.

Tabela 3.4 – Etapas do experimento.

Área cortada	Análise visual dos dentes	Análise de amostra padrão	Parâmetros de Corte	
			V_c1	V_f1
0,3 m ²	Captura de imagens dos dentes	Corte de 12 peças da amostra padrão	V_c1	V_f1
			V_c2	V_f2
2 m ²	Captura de imagens dos dentes	Cortes variados		
4 m ²	Captura de imagens dos dentes	Cortes variados		
6 m ²	Captura de imagens dos dentes	Corte de 12 peças da amostra padrão	V_c1	V_f1
			V_c2	V_f2
8 m ²	Captura de imagens dos dentes	Cortes variados		
10 m ²	Captura de imagens dos dentes	Cortes variados		
12 m ²	Captura de imagens dos dentes	Corte de 12 peças da amostra padrão	V_c1	V_f1
			V_c2	V_f2
13,8 m ²	Captura de imagens dos dentes	Falha da lâmina – Fim da vida útil		

Cortes variados foram efetuados entre os conjuntos da amostra padrão. Esses cortes foram referentes à produção cotidiana da empresa Aços Favorit, que cedeu espaço, material e maquinário para a execução do trabalho. Os cortes variados citados ocasionaram um desgaste da lâmina, permitindo a análise do comportamento da ferramenta com diferentes condições de desgaste, conforme objetivo do trabalho.

O parâmetro de saída analisado foi o torque aplicado na lâmina pela máquina, proporcional à força de corte exercida. O sinal do torque da máquina foi adquirido, junto com a posição do cabeçote, durante a execução dos testes através de programas computacionais desenvolvidos especificamente para o experimento e capazes de fazer a comunicação com o CLP (comando lógico programável) da máquina, permitindo a gravação de todos os valores nele contidos. A taxa de aquisição utilizada foi de dois pontos por segundo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Torque total e torque por dente

Os principais resultados obtidos são correspondentes ao torque durante o corte, proporcional à força de corte. A partir da leitura dos dados fornecidos pela máquina, foi possível representar o torque em função da posição do cabeçote. O ponto em que o cabeçote toca a peça é considerado como sendo a origem. O torque referente ao funcionamento da máquina sem carga (aproximadamente 1200 N.m) foi subtraído dos valores lidos, sendo considerado apenas o valor efetivamente associado ao corte. A Figura 4.1 apresenta o torque total em função da posição do cabeçote para um teste realizado com $V_c = 93$ m/min e $V_f = 39$ mm/min após 8% da vida útil da ferramenta.

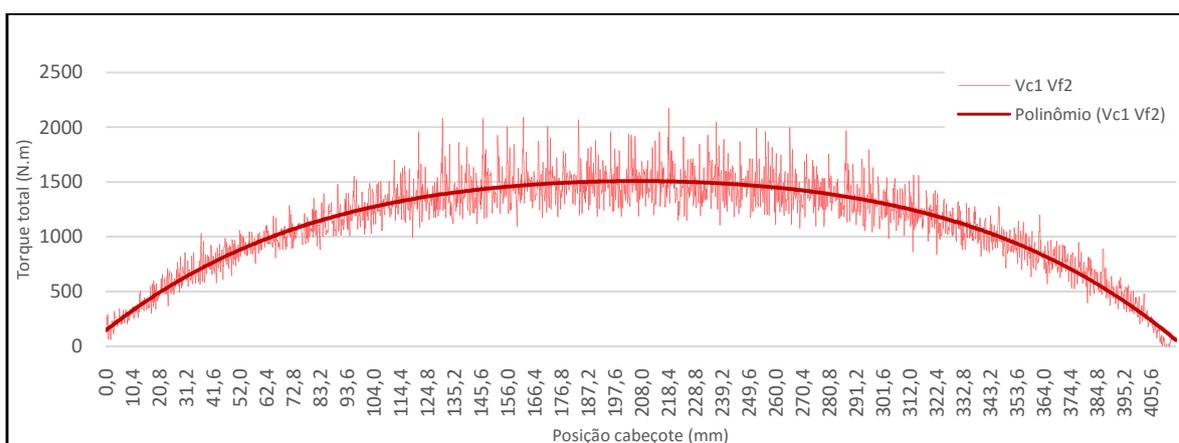
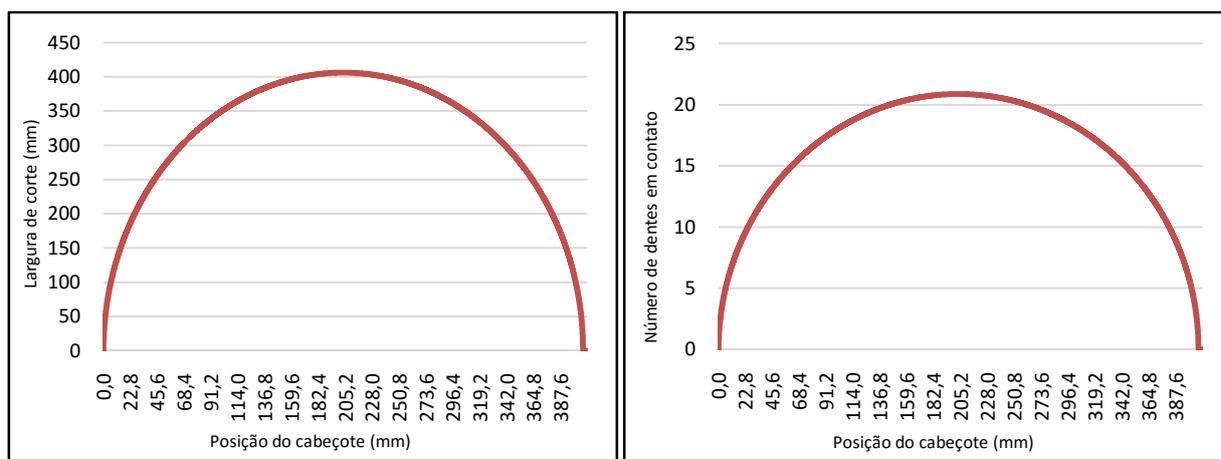


Figura 4.1 – Torque total da máquina em função da posição do cabeçote, referente ao corte de uma peça com $V_c1 = 93$ m/min, $V_f2 = 39$ mm/min após 8% da vida útil da lâmina.

Através das equações 2.2 e 2.5, foi possível calcular o número de dentes em contato com a seção de material cortado para cada posição (altura) do cabeçote (Figura 4.2). Uma vez que todas as amostras de material cortado possuem o mesmo diâmetro, e que o passo médio entre dentes é o mesmo, o número de dentes em contato para cada posição do cabeçote não varia entre os testes realizados.



(a)

(b)

Figura 4.2 – (a) Largura de corte (l) e (b) número de dentes em contato (Z_{iE}) em função da posição do cabeçote.

A partir dos resultados obtidos de torque total e número de dentes em contato em função da posição do cabeçote foi possível determinar o torque médio por dente. Diferentemente do torque total e número de dentes em contato, o torque por dente se mantém estável durante o movimento do cabeçote. Foi calculada, portanto, a média e desvio padrão para cada sinal resultante. Visando eliminar efeitos de entrada e saída da lâmina, as médias foram calculadas considerando o corte simultâneo de no mínimo seis dentes. A Figura 4.3 apresenta o torque médio por dente avaliado durante o corte de um corpo de prova com $V_c = 93$ m/min, $V_f = 33$ m/min após 8 % da vida útil da lâmina.

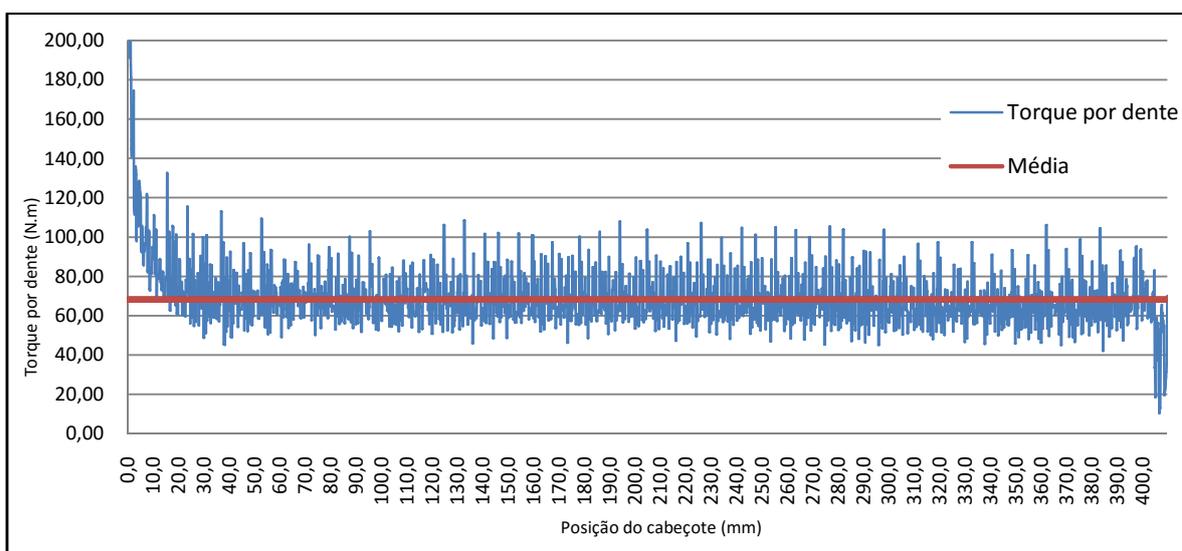


Figura 4.3– Torque médio por dente em função da posição do cabeçote e respectiva média, referentes ao corte de uma peça com $V_{c1} = 93$ m/min, $V_{f1} = 33$ mm/min. 8% vida útil da lâmina.

A Tabela 4.1 apresenta os valores correspondentes ao torque médio obtidos para cada condição avaliada. A influência dos parâmetros avaliados sobre o torque médio por dente foi avaliada através de uma análise de variância (Tabela 4.2), que indicou a influência significativa de todos os parâmetros avaliados. Nenhuma interação significativa entre os parâmetros foi identificada.

Tabela 4.1 – Valores médios registrados para o torque médio por dente [Nm].

Vf (mm/min)	% de vida projetada					
	8%		50%		92%	
	Vc (m/min)		Vc (m/min)		Vc (m/min)	
	93	109	93	109	93	109
33	68,24	58,54	69,66	61,16	77,44	66,30
	64,27	55,31	65,40	58,99	69,76	62,63
	60,78	53,40	63,95	60,02	67,71	64,47
39	76,38	69,43	78,04	72,08	87,88	79,76
	73,48	64,65	75,72	69,91	81,53	74,41
	70,06	62,60	74,85	68,27	83,40	77,08

Tabela 4.2 – Análise de variância para os parâmetros estudados. As fontes A, B e C correspondem, respectivamente, ao percentual da vida da ferramenta, V_c e V_f .

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	F tab.	Signif. ?
SQA	568,868	2	284,434	31,96	3,40	SIM
SQB	466,163	1	466,163	52,38	4,26	SIM
SQC	1018,703	1	1018,703	114,47	4,26	SIM
SQAB	6,086	2	3,043	0,34	3,40	NÃO
SQAC	18,300	2	9,150	1,03	3,40	NÃO
SQBC	0,288	1	0,288	0,03	4,26	NÃO
SQABC	0,378	2	0,189	0,02	3,40	NÃO
Erro	213,575	24	8,899			
Total	2292,361	35	$\alpha = 0,05$			

A Figura 4.4 apresenta um gráfico de dois fatores no qual o torque médio por dente é representado em função da velocidade de avanço, para as duas velocidades de corte avaliadas.

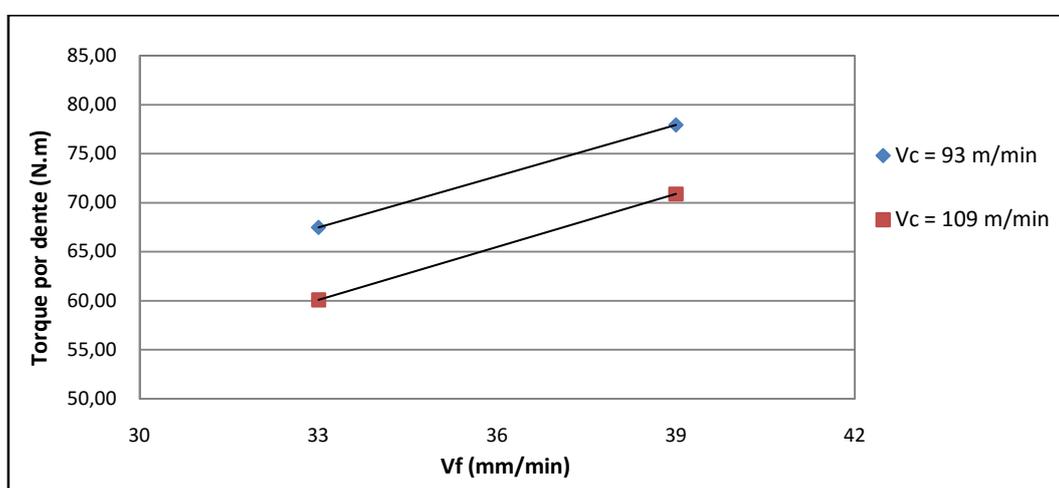


Figura 4.4– Torque médio por dente em função de diferentes velocidades de corte e avanço empregadas.

Através da Figura 4.4 é possível constatar que, com o aumento da velocidade de avanço, houve um aumento do torque por dente. Por outro lado, o aumento da velocidade de corte está associado a uma redução no torque por dente. Esse fenômeno pode ser explicado através da equação 2.6, onde, o aumento da velocidade de corte resulta na redução do avanço por dente, com conseqüente redução na força por dente. De forma semelhante, o aumento da velocidade de avanço acarreta o aumento do avanço por dente, e conseqüente aumento da força por dente.

A Figura 4.5 apresenta um gráfico de dois fatores onde o torque por dente é representado em função da velocidade de corte para diferentes momentos da vida da lâmina. Observa-se que o torque por dente diminui conforme o aumento da velocidade de corte, o que corresponde ao comportamento esperado, uma vez que velocidades de corte mais elevadas resultam em menores avanços por dente. Além disso, pode-se averiguar ainda o efeito do desgaste da lâmina no torque. Na medida em que a lâmina desgasta, ocorre um aumento do torque por dente, o que também corresponde ao comportamento esperado, e descrito pela equação 2.8.

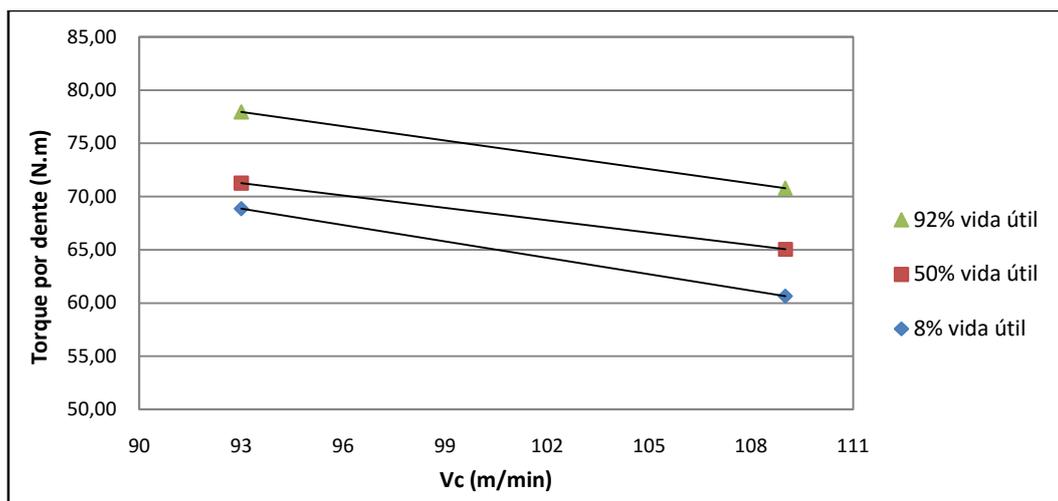


Figura 4.5– Torque médio por dente referente a diferentes velocidades de corte, em distintos momentos da vida da lâmina.

A Figura 4.6 apresenta o torque por dente em função da velocidade de avanço para diferentes momentos da vida da ferramenta. Novamente observa-se que os resultados condizem com o esperado, demonstrando a influência da velocidade de avanço e do desgaste da lâmina no torque por dente.

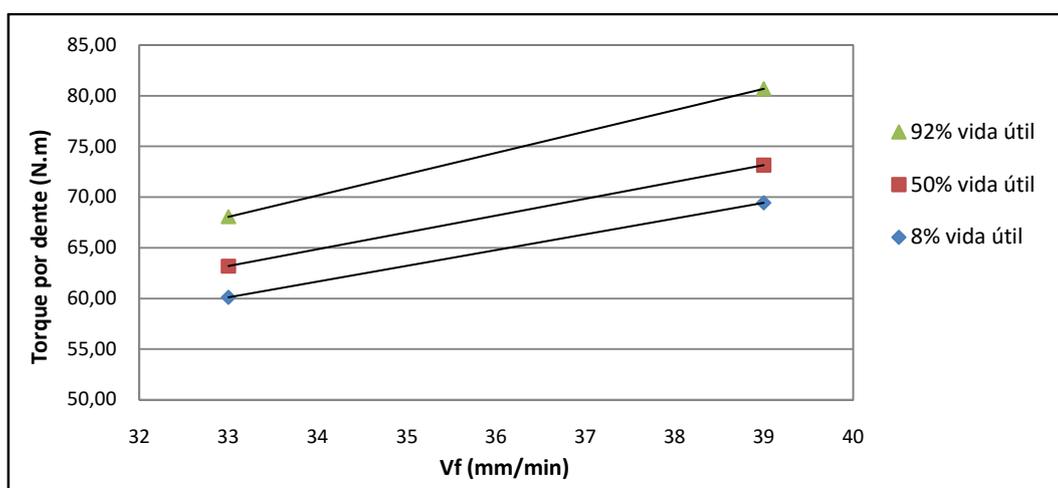


Figura 4.6 - Torque médio por dente referente a diferentes velocidades de avanço, em distintos momentos da vida da lâmina.

Relações similares às identificadas para o torque por dente são observadas entre o torque total e os parâmetros de processo. A Figura 4.7 compara o torque total obtido com as diferentes velocidades de corte durante o serramento com velocidade de avanço de 33 mm/min. Observa-se torques mais elevados associados à velocidade de corte mais baixa. A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos no corte com as diferentes velocidades de avanço ao usar uma velocidade de corte de 93 m/min. Conforme esperado, maiores esforços são associados à velocidade de avanço mais elevada. A variação do torque total conforme o número de dentes em contato com o material é observada nos dois casos, e condiz com o previsto na eq. 2.4.

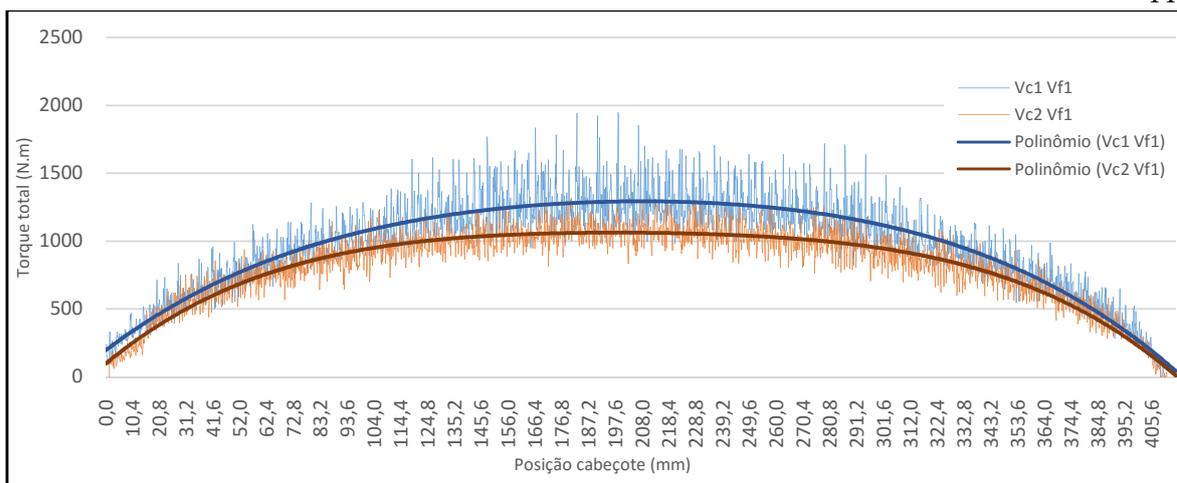


Figura 4.7 - Influência da velocidade de corte no torque total. 8% vida útil da lâmina.
Parâmetros utilizados: $V_{c1} = 93$ m/min; $V_{c2} = 109$ m/min; $V_f1 = 33$ mm/min.

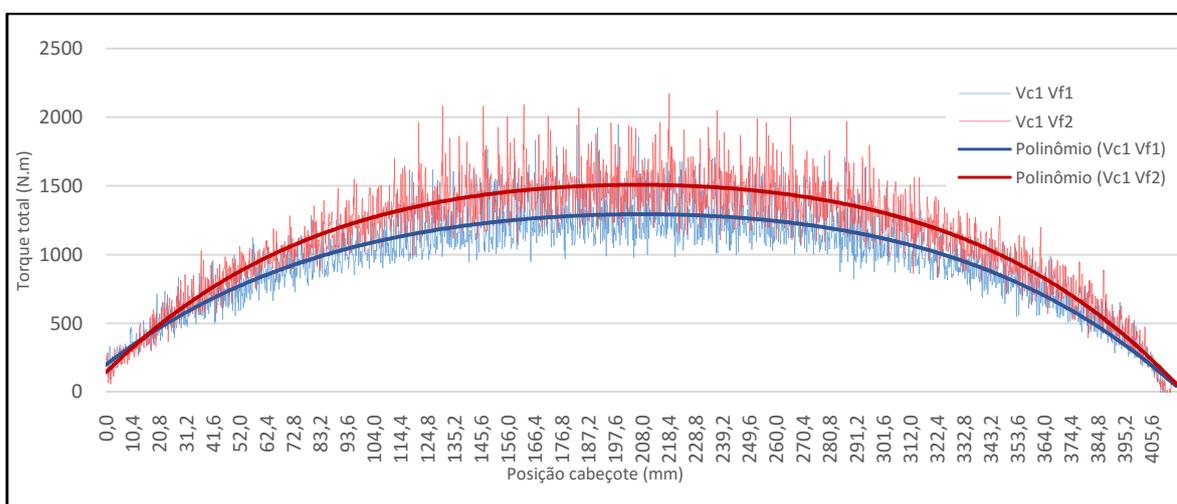


Figura 4.8 - Influência do avanço de corte no torque total. 8% vida útil da lâmina.
Parâmetros utilizados: $V_{c1} = 93$ m/min; $V_f1 = 33$ m/min; $V_f2 = 39$ m/min.

A Figura 4.9 relaciona o torque referente a cada condição de parâmetros em diferentes momentos da vida da lâmina. Através de sua análise é possível determinar qual a mudança nos parâmetros que seria necessária para que o torque por dente se mantivesse o mesmo durante toda vida útil da ferramenta. Por exemplo, caso fosse desejado manter o torque por dente sempre em torno de 65 N.m durante toda a vida da lâmina. No início de sua vida, seria mais conveniente cortar com V_{c2} e V_{f2} , pois permitem maior taxa de remoção de material. Ao chegar à metade da vida útil, os parâmetros poderiam ser ajustados para valores mais próximos a V_{c1} e V_{f1} para que o torque por dente se mantenha em níveis próximos aos observados durante o início da vida da ferramenta. Ao se aproximar do final da vida da ferramenta, os parâmetros poderiam ser ajustados para valores próximos a V_{c2} e V_{f1} . Com este procedimento se buscaria um torque por dente constante ao longo da vida da lâmina, neste caso próximo a 65 N.m. Dessa maneira é possível aumentar a vida da lâmina, ainda que com prejuízo da produtividade, adequando sua utilização à etapa de sua vida (considerando o efeito deste procedimento sobre a produtividade, é importante considerar a programação da produção, principalmente se a máquina utilizada for um gargalo).

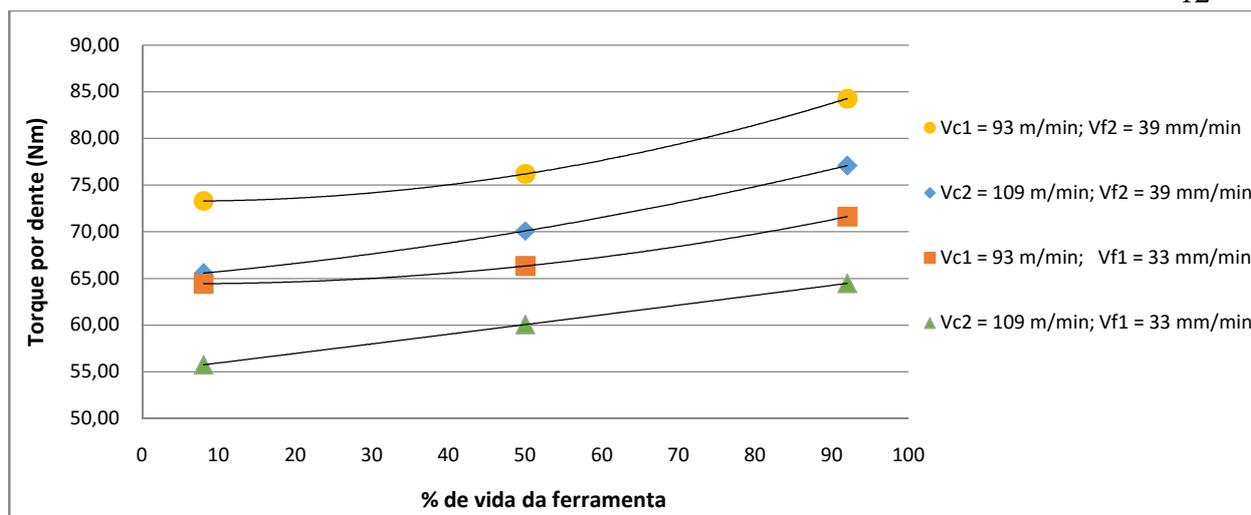


Figura 4.9 – Torque médio por dente em função do momento da vida da lâmina para diferentes condições de corte.

4.2 Desgaste dos dentes e falha da lâmina

A lâmina de corte utilizada possui dentes com três diferentes seções o que facilita a quebra e escoamento do cavaco e reduz a geração de calor proveniente do atrito dos dentes com as superfícies cortadas. Foram monitorados dois grupos de dentes, cada um composto por três dentes de diferentes seções de corte. A Tabela 4.3 apresenta as imagens de um dos grupos, capturadas por microscópio durante a vida útil da lâmina.

As imagens demonstram o desgaste gradativo dos dentes conforme seu uso. Pode-se observar que cada dente sofre atrito em diferentes regiões. Isso ocorre devido às diferentes seções de corte, cuja função é reduzir o impacto sobre cada dente, fazendo com que o esforço para a retirada do cavaco seja dividido entre as diferentes seções de corte, além de reduzir o calor causado pelo atrito durante o corte. Foi observado maior desgaste no dente de menor seção. Uma possível razão para este efeito se deve ao maior comprimento das arestas secundárias de corte. Além disso, uma vez que essas arestas possuem ângulos de saída efetivos menores que o da aresta principal de corte, não se deve descartar a possibilidade de que o desgaste observado nas pontas de corte seja potencializado pelos maiores esforços desenvolvidos nessas arestas secundárias. Conforme aumenta a seção dos dentes o comprimento ativo das arestas secundárias diminui, reduzindo este efeito.

Conforme dados da empresa onde os testes foram realizados, o modelo de serra fita do experimento, nas condições em que foi utilizada, costuma cortar entre 12 e 16 m² de material durante toda sua vida. Portanto, a vida apresentada pela lâmina testada está dentro dos padrões previstos.

É indiscutível que houve desgaste da ferramenta e que isso elevou o torque necessário para o corte. Porém, por mais que se possa perceber uma degradação nos dentes monitorados, os mesmos não se encontraram com grandes avarias após o fim do experimento, quando houve o rompimento do corpo da lâmina. Conforme apresenta a Figura 4.10, existem indícios de que a quebra da lâmina possa ter sido antecipada devido uma má conservação das pastilhas da máquina, responsáveis por guiar / direcionar a serra de fita na posição correta de corte. Com as pastilhas guias fora da sua condição ideal de funcionamento, a lâmina sofre um maior atrito e forças extras durante o processo de corte, o que pode ter afetado a vida útil da ferramenta. O aumento nos esforços causado pelo desgaste, no entanto, afeta diretamente a tensão na lâmina, de modo que deve ser considerado.

Tabela 4.3 – Imagens dos três dentes do grupo 1, monitorados durante a vida útil da lâmina.

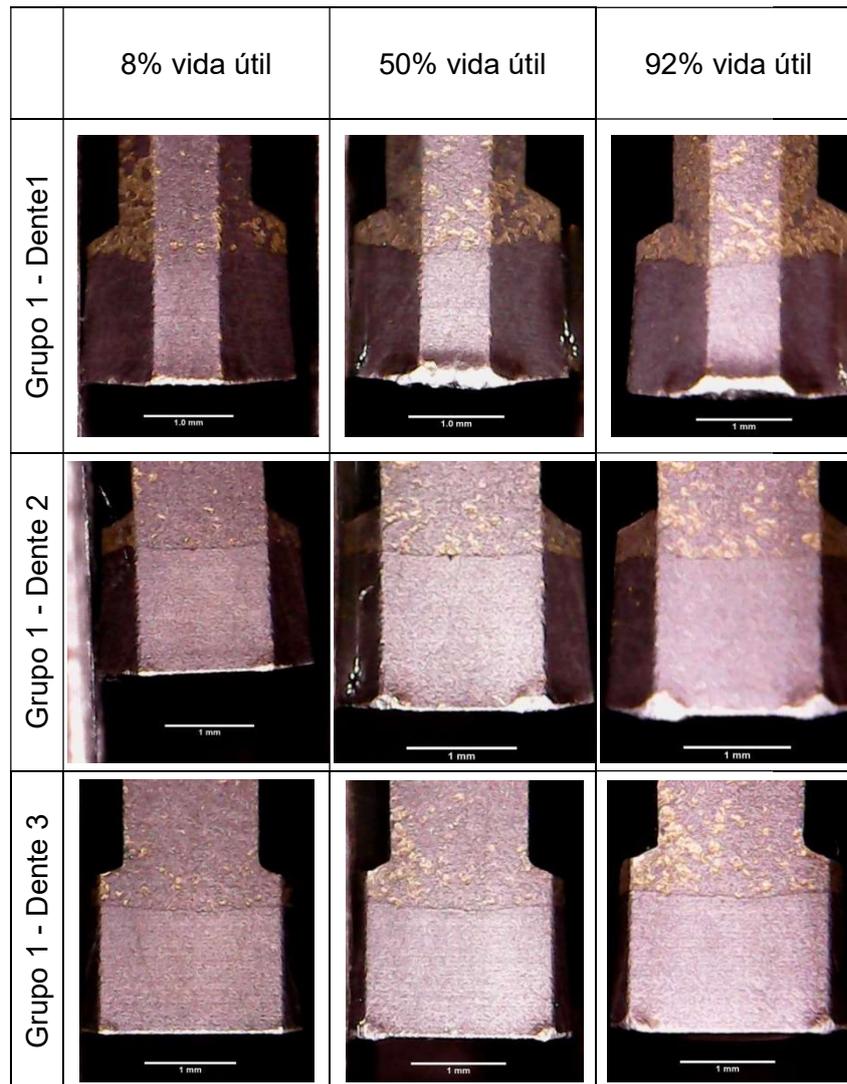


Figura 4.10 – Quebra do corpo da lâmina

5. CONCLUSÕES

Com base nos experimentos realizados, é possível afirmar que o estudo permitiu uma maior compreensão do funcionamento do processo de corte com serra fita de metal duro. Os resultados obtidos estão de acordo com o comportamento teórico previsto para casos similares, o que valida o experimento executado. A partir dos resultados encontrados podem ser propostas melhorias no processo, de modo a adequar o desempenho do sistema conforme um determinado objetivo.

Os resultados indicam a influência significativa da velocidade de corte, da velocidade de avanço e do desgaste da ferramenta sobre o torque médio por dente. Enquanto o aumento da velocidade de avanço e da área cortada pela ferramenta (desgaste) causam o aumento do torque médio por dente, uma velocidade de corte mais elevada acarreta uma redução no torque por dente.

No momento da quebra da lâmina os dentes se encontravam com desgastes dentro dos níveis aceitáveis. O modo de falha da ferramenta foi diferente do que o observado para serras bimetálicas por Sarwar, 2005, cujo fim da vida útil da ferramenta se deveu a um elevado desvio de corte.

Com base nos resultados encontrados em função dos parâmetros de corte, desgaste da ferramenta e torque da máquina, é possível determinar ajustes nos parâmetros de corte visando manter a força de corte constante ao longo da vida útil da lâmina, visando compensar assim o efeito do desgaste que a mesma sofre durante o uso. Propõe-se ainda realizar a instalação da lâmina com um tensionamento menor que o aplicado no trabalho, permanecendo dentro faixa de recomendação do fabricante, visto que a falha da ferramenta aconteceu devido altas solicitações de tração durante o teste.

Sugere-se a elaboração de futuros testes, com aplicação de diferentes parâmetros e substituição de componentes mecânicos da máquina, para que sejam adquiridos mais informações sobre os mecanismos de falha da ferramenta. Além disso, propõe-se realizar os ajustes recomendados durante a instalação e nos parâmetros aplicados, para que se mantenha a força por dente constante durante todos os cortes, verificando se essas medidas impactam a vida útil da lâmina.

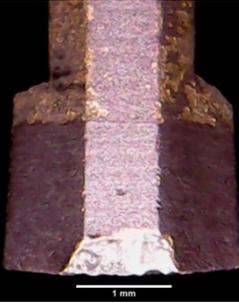
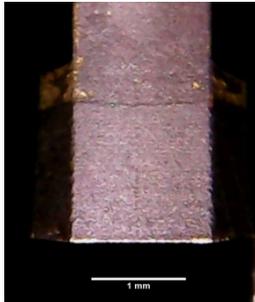
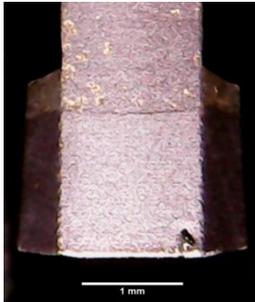
As ferramentas e métodos desenvolvidos para o trabalho possuem amplo potencial de aplicação, permitindo a futura realização de diferentes estudos. Fornecendo grande quantidade de informações sobre o processo, os programas de leitura e registro de dados, desenvolvidos exclusivamente para o presente estudo, trouxeram um grande benefício para a empresa na qual foram realizados, pois viabilizam a obtenção de maior conhecimento e controle do processo, possibilitando assim a melhoria contínua do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, M. M., “**Effect of machining parameters and workpiece shape on a bandsawing process**”, Int. Journal Mach. Tools Manufact., Vol. 29, pp.173 – 183, 1989.
- Garant, “**GARANT Machining Handbook - Sawing**”, <http://www.garant-tools.com>. Acessado em 09/04/2016.
- Klocke, F., “**Manufacturing Processes 1 - Cutting**”, Springer, 1st edition, 2011.
- Ribeiro, J. L. D., Caten, C. S., “**Série Monográfica de Qualidade – Projeto de Experimentos**”, UFRGS, 2000.
- Sarwar, M., “**Wear and failure modes in the bandsawing operation when cutting ball-bearing steel**”, Wear, Volume 259 [7-12], pp. 1144 – 1150, Elsevier, 2005.
- Söderberg, S., “**Wear mechanisms and tool life of high speed steels related to microstructure**”, Wear, Volume 110 [3-4], pp. 315 – 329, Elsevier, 1986.
- Tschätsch, H., “**Applied Machining Technology**”, Springer, 8th edition, 2008.

APÊNDICE I

Tabela A.1 - Imagens dos três dentes do grupo 2, monitorados durante vida útil da lâmina.

	8% vida útil	50% vida útil	92% vida útil
Grupo 2 - Dente 1			
Grupo 2 - Dente 2			
Grupo 2 - Dente 3	