

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

TORNEAMENTO ORTOGONAL DO AÇO ABNT 1020

por

Bruno Azevedo dos Santos

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, junho de 2016

TORNEAMENTO ORTOGONAL DO AÇO ABNT 1020

por

Bruno Azevedo dos Santos

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:

Profa. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Fabiano D. Wildner

Prof. Patric D. Neis

Porto Alegre, junho de 2016.

À minha mãe Seda, aos meus irmãos Carla e Rudimar e aos meus melhores amigos Mateus e Felipe por acreditarem no meu potencial e incentivarem os meus estudos, e à minha querida esposa Karin companheira de todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Heraldo J. Amorim pela orientação, dedicação e ajuda para a realização desse trabalho.

Ao co-orientador Prof. André J. Souza pela sua disposição e compartilhamento de conhecimentos.

Ao técnico do laboratório de usinagem Guilherme Vargas Schimer pela ajuda na realização dos experimentos.

À empresa Aços Favorit pela doação do material para realização do desenvolvimento dos ensaios.

Ao Prof. Rodrigo Rossi por ceder à câmera de alta velocidade.

Ao laboratório de usinagem da UFRGS (Prof. Gilberto Dias da Cunha e técnico Volnei Batista Lopes) por permitir o uso do torno.

Ao Eng. Gustavo Simões Teixeira pelo auxílio na utilização da câmera de alta velocidade.

Ao colega e amigo Adílio Felipe por afiar as ferramentas de corte.

Aos meus amigos que contribuíram para chegar este momento.

DOS SANTOS, B. A. **Torneamento Ortogonal do Aço ABNT 1020**. 2016. 23p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **RESUMO**

Este trabalho faz uma análise experimental do torneamento ortogonal do aço ABNT 1020 com ferramenta de aço rápido. Um experimento  $2^k$  de três fatores foi realizado a fim de esclarecer o efeito da velocidade de corte, avanço e o ângulo de saída da ferramenta de corte sobre os componentes das forças de usinagem, pressão específica de corte, grau de recalque do cavaco e ângulo de cisalhamento. Os resultados experimentais foram comparados com os valores obtidos a partir da literatura. A análise dos resultados concorda parcialmente com a teoria, com influências estatisticamente significativas encontradas para o avanço, velocidade de corte, ângulo de saída da ferramenta e interação entre velocidade de corte e avanço sobre a força de corte e a pressão específica de corte e da velocidade de corte e do avanço sobre a força de avanço. O grau de recalque sofreu influência significativa do avanço e o ângulo de cisalhamento sofreu influência significativa do avanço e do ângulo de saída da ferramenta. Observou-se que o avanço foi o fator de maior influência sobre os parâmetros de saída estudados; maiores taxas de avanço foram associadas com maiores forças de corte, forças de avanço e ângulos de cisalhamento; baixos valores de avanço foram relacionados com baixos valores de pressão específica de corte e grau de recalque. A influência da velocidade de corte sobre a força e pressão específica de corte indica a ocorrência intermitente de aresta postiça de corte em testes realizados com velocidade de corte e avanço mais baixos. Todos os cavacos formados foram contínuos.

**PALAVRAS-CHAVE:** avanço, força de corte, velocidade de corte e grau de recalque.

DOS SANTOS, B. A. **Torneamento Ortogonal do Aço ABNT 1020**. 2016. 23p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ABSTRACT**

This work consists in an experimental analysis of orthogonal cutting of ABNT 1020 steel with HSS tool. A three factor  $2^k$  experiment was carried out in order to clarify the effect of cutting speed, feed rate and tool rake angle over machining force components, specific cutting pressure, chip thickness ratio and shear angle. Experimental results were compared with data from literature. Analysis of results partially agree with theory, with statistically significant influence found to feed rate, cutting speed, tool rake angle and the interaction between cutting speed and feed rate over cutting force and specific cutting pressure and cutting speed and feed rate over feed force. Thickness ratio was influenced by feed rate and shear angle had suffered statistically significant influence of feed rate and tool rake angle. Feed rate was found to be the most influencing factor over the studied output variables with higher feed rates associated to higher the cutting forces, feed forces and shear angles; low values of feed rate were related to lower specific cutting pressure and thickness ratio. The influence of cutting speed over cutting force and specific cutting pressure indicate the occurrence of intermittent built up edge in tests carried out with lowest cutting speed and feed rate. All chips formed were continuous.

**KEYWORDS:** feed rate, cutting force, cutting speed and chip thickness ratio.

## ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
2.1 Corte Ortogonal .....	1
2.2 Mecanismo de Formação do Cavaco .....	1
2.3 Força de Usinagem no Corte Ortogonal .....	3
2.4 Aresta Postiça de Corte .....	4
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	4
3.1 Preparação dos Corpos de Prova .....	5
3.2 Ferramenta de Corte .....	5
3.3 Parâmetros de Corte .....	6
3.4 Montagem e Preparação do Equipamento .....	6
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	7
5 CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
APÊNDICE .....	16

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem estão entre os processos de fabricação mais utilizados do mundo, transformando em cavaco, segundo Machado et al., 2011, algo em torno de 10% de todo o metal produzido no planeta.

O estudo dos processos de usinagem envolve o comportamento de diversos fenômenos, tais como os elementos envolvidos no desgaste da ferramenta de corte, os esforços envolvidos na remoção de material, a geração de calor durante o corte, e suas relações com os parâmetros de processo e com as características do material. Segundo Diniz et al., 2013, uma explicação científica para o comportamento desses fatores exige um estudo minucioso do processo de formação do cavaco. Apesar de serem estudados há décadas, os mecanismos de formação do cavaco ainda não são totalmente conhecidos. Isto se deve ao fato da formação do cavaco envolver temperaturas e taxas de deformação elevadas.

O corte dos metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de uma zona de cisalhamento. No processo de usinagem esta zona de cisalhamento é assumida como um plano de cisalhamento. Considera-se então que o cavaco é formado nesse plano de cisalhamento, de modo que é possível estudar a formação do cavaco geometricamente através do ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte. Este ângulo é denominado ângulo de cisalhamento e pode ser uma indicação da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco.

Considerando a importância do conhecimento dos mecanismos envolvidos na formação do cavaco, o objetivo deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros de processo na formação do cavaco no torneamento cilíndrico externo. Visando reduzir o número de parâmetros, o estudo focou na usinagem ortogonal de um material de características conhecidas, no caso o aço ABNT 1020. Para tanto, foram avaliados os efeitos da velocidade de corte, do avanço e do ângulo de saída da ferramenta sobre as componentes da força de corte e elementos associados à formação do cavaco, como o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento. Os cavacos gerados foram ainda caracterizados com relação ao tipo e forma.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Corte Ortogonal

A forma mais simplificada de um processo de usinagem é uma cunha cortante se movimentando a uma determinada profundidade de corte num material homogêneo. Esta simplificação é conhecida como corte ortogonal.

No corte ortogonal a aresta cortante é reta e normal ao plano de trabalho, definido pelas direções de corte e de avanço, de maneira que a formação de cavaco pode ser considerada como um fenômeno bidimensional [ABNT,1989]. Este modelo é utilizado para estudar a formação do cavaco, os fenômenos envolvidos e as forças atuantes no processo.

### 2.2 Mecanismo de Formação do Cavaco

Os principais elementos associados ao mecanismo de formação de cavaco são apresentados na da Figura 2.2.

O processo de formação de cavaco pode ser considerado como um processo cíclico, dividido nas seguintes etapas: recalque, deformação plástica, ruptura e movimento sobre a superfície de saída da ferramenta.

Verifica-se experimentalmente que a espessura do cavaco ( $h'$ ), é maior que a espessura do material a ser removida (espessura de corte  $h$ ), e o comprimento de cavaco correspondente é por consequência mais curto. Isso se deve à deformação plástica do material na zona de cisalhamento. Da mesma forma, a velocidade de saída do cavaco ( $V_{cav}$ ), é menor que a velocidade de corte ( $V_c$ ).

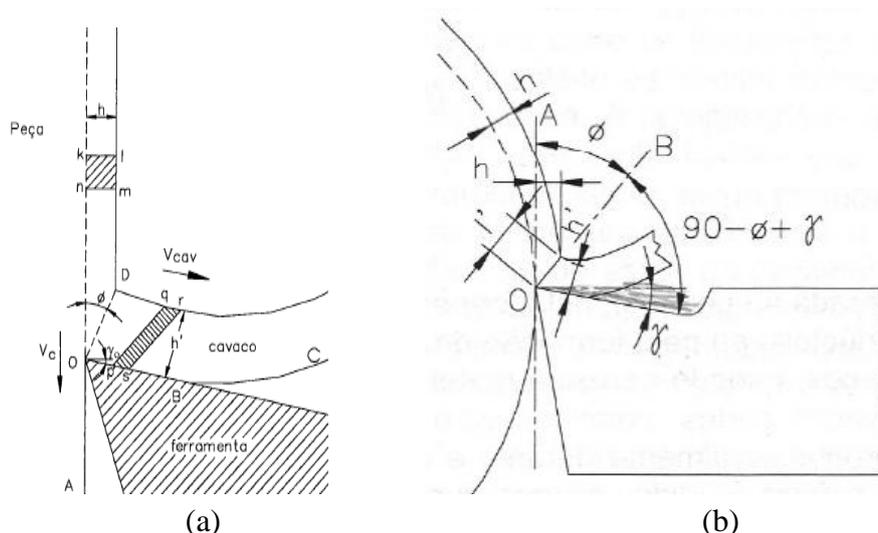


Figura 2.1 – (a) Diagrama da Cunha Cortante [adaptado de Trent, 1984]. (b) Espessura de corte  $h$ , espessura do cavaco  $h'$ , e ângulo de cisalhamento  $\phi$  [Fonte: Machado e da Silva, 2004].

Conforme o volume do material, representado pelo polígono  $klmn$  se aproxima da aresta de corte da ferramenta (Figura 2.1a), inicia-se o processo de compressão. Conforme o material se aproxima da aresta de corte ele passa pelo regime elástico e atinge o regime plástico. Por fim, as deformações sofridas fazem com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, promovendo a ruptura, que se inicia com uma trinca no ponto  $O$  e que pode se estender até o ponto  $D$ . A extensão da propagação da trinca vai determinar se o cavaco será contínuo ou descontínuo. Após a ruptura, o volume  $klmn$  deve passar por sobre a superfície de saída da ferramenta e sair como um cavaco. Todavia, ao passar pela zona de cisalhamento ele se deforma plasticamente para um novo formato, formado pelo polígono  $pqrs$ . O ângulo formado entre os planos de cisalhamento e de corte é o ângulo de cisalhamento  $\phi$  (Fig. 2.1b).

A razão entre  $h'$  e  $h$  (eq. 2.1) corresponde ao grau de recalque ( $R_c$ ). No corte ortogonal ele é uma medida de quantidade de deformação sofrida pelo cavaco, e pode ser usado para calcular o ângulo de cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco. Um grau de recalque elevado, que corresponde a um pequeno ângulo de cisalhamento, significa grande quantidade de deformação e baixa velocidade de saída do cavaco [Michellete, 1980]. A equação 2.2 apresenta a relação entre a espessura de corte (espessura de material a ser removido, segundo a direção perpendicular de corte), o avanço ( $f$ ) e o ângulo de posição da ferramenta  $\chi_r$ . No caso do torneamento ortogonal  $\chi_r$  é igual a  $90^\circ$  de modo que  $h = f$ .

$$R_c = h'/h = V_c/V_{cav} \quad (2.1)$$

$$h = f \cdot \text{sen } \chi_r \quad (2.2)$$

De acordo com a Figura 2.1a são obtidas as relações geométricas representadas pelas equações 2.3 a 2.5:

$$\text{sen } \phi = h/l' \quad (2.3)$$

$$\text{sen}(90 - \phi - \gamma) = h'/l' \quad (2.4)$$

$$\tan \phi = \cos \gamma / (R_c - \text{sen } \gamma) \quad (2.5)$$

Os valores de  $R_c$  e  $\phi$  indicam a quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento, podendo ser utilizados como uma medida da dificuldade de usinagem de um determinado material. Desse modo, materiais mais fáceis de usinar teriam baixos valores de  $R_c$ . No entanto, em se tratando de usinabilidade, outras características do material deverão ser consideradas, tais como a dureza, a resistência mecânica e a taxa de encruamento.

### 2.3 Força de Usinagem no Corte ortogonal

Segundo Ferraresi, 1970, a força de usinagem ( $F_u$ ) é a força total que atua sobre a aresta de corte durante a usinagem. No torneamento ortogonal,  $F_u$  pode ser decomposta nas direções de corte e de avanço (eq. 2.6), resultando nas componentes  $F_c$  e  $F_f$ . Admitindo que  $F_u$  atue na ponta da ferramenta e considerando estes dois sistemas de referência, tem-se o sistema “círculo de Merchant” (Figura 2.2). Segundo Trent, 1984, as componentes da força de usinagem dependem da resistência do material da peça, do plano de cisalhamento, e indiretamente, do contato entre o cavaco e a ferramenta, onde pode ocorrer aderência e escorregamento.

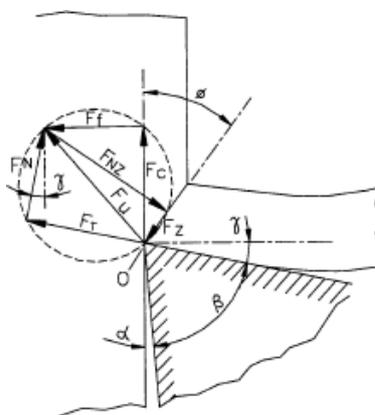


Figura 2.2 – Círculo de Merchant [Fonte: Ferraresi, 1970].

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f \quad (2.6)$$

A força de corte pode ser calculada através da equação (2.7).

$$F_c = K_s \cdot A = K_s \cdot f \cdot a_p \quad (2.7)$$

Onde  $K_s$  corresponde à pressão específica de corte,  $A$  é a área da seção de corte e  $a_p$  a profundidade de corte.

A pressão específica de corte pode ser entendida como a força efetiva consumida para arrancar uma unidade de área do material da peça. Entre os fatores que influenciam  $K_s$  pode-se destacar: o material da peça, o material e a geometria da ferramenta e o avanço.

A pressão específica de corte é considerada um relevante índice de usinabilidade dos materiais, uma vez que, não se altera a área da seção de corte, todos os fatores alteram proporcionalmente a força e pressão específica de corte [Machado e Da Silva, 2004].

Kienzle, 1951, desenvolveu uma formulação empírica para o cálculo da pressão específica de corte (equação 2.8) a partir da espessura de corte e das constantes  $K_{s1}$  e  $z$  referentes ao material. Considerando que uma diminuição ou aumento no ângulo de saída ( $\gamma$ ) proporciona respectivamente um aumento ou diminuição da força de corte, o autor sugere uma correção de 1 a 2% para cada grau de variação do ângulo de saída em relação aos valores utilizados no estudo ( $\gamma=6^\circ$  para aço e  $\gamma=2^\circ$  para ferro fundido).

$$K_s = K_{s1} \cdot h^{-z} \quad (2.8)$$

## 2.4 Aresta Postiça de Corte

A aresta postiça de corte (APC) é um fenômeno que pode ocorrer a baixas velocidades de corte na interface ferramenta/cavaco. A presença da APC altera completamente a geometria da cunha cortante da ferramenta, com efeitos em todo processo de usinagem. Segundo Machado et. al., 2011, existem evidências de que, em vez de ser um corpo separado de material encruado sobre o qual o cavaco escoava, a aresta postiça de corte é contínua com o material da peça e do cavaco, não se separando de nenhum deles durante sua ocorrência. Na interface, a primeira camada de material da peça que se une à ferramenta é endurecido a frio, com a tensão de cisalhamento não sendo suficiente para romper a ligação. Uma sucessão dessas camadas forma a APC, cujo tamanho aumenta até que um valor no qual a tensão de cisalhamento suficiente para mudar a zona de cisalhamento seja atingido. Nesse ponto, partes de sua estrutura são cisalhadas e arrastadas entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta.

O parâmetro que mais influencia a aresta postiça de corte é a velocidade de corte. Em baixas velocidades de corte há formação de APC, cujas dimensões crescem até atingir um valor máximo, a partir do qual o aumento de  $V_c$  causa a redução da APC até seu desaparecimento quando a velocidade atinge a velocidade crítica (Fig. 2.3). A influência do avanço ocorre no sentido de diminuir a velocidade crítica conforme seu aumento, o que se deve, segundo Ferraresi, 1970, ao aumento da temperatura durante o corte, que por sua vez altera a estrutura metalográfica da aresta postiça.

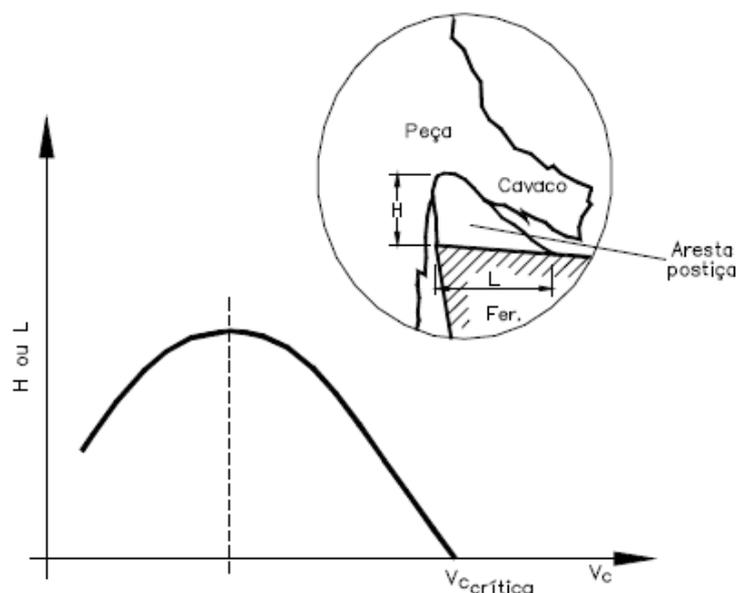


Figura 2.3 – Variação das dimensões de APC com a velocidade de corte,  $V_c$ , com a indicação da Velocidade de corte crítica [Fonte: Ferraresi, 1970].

## 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo realizado consistiu no torneamento ortogonal externo a seco em torno convencional (Romi I-20) de corpos de prova de aço ABNT 1020 trefilado sem tratamento térmico. Para tanto, utilizou-se um projeto fatorial de experimentos do tipo  $2^k$ , composto por 8 combinações de parâmetros de entrada, com três repetições. Foram avaliados os efeitos da velocidade de corte, do avanço e do ângulo de saída da ferramenta sobre as componentes da força de usinagem, o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento. Bits de aço rápido com 10% de cobalto e seção quadrada de 5/16" (7,9375 mm) foram afiados com ângulos de saída de 15 e 25°. Os testes envolveram a aquisição das forças de corte e de avanço por meio de um

dinamômetro piezelétrico Kistler 9272 com condicionador de sinais Kistler 5070A e a filmagem com uma câmera de alta velocidade Phantom v.411.

Algumas considerações foram feitas: o cavaco gerado é contínuo; não existe contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça usinada; a espessura de corte é pequena em relação à largura de corte. Uma vez que o torno utilizado possui rotação constante, limitou-se o comprimento de corte a 2 mm, visando uma variação desprezível na velocidade de corte.

Todos os experimentos foram realizados no laboratório de usinagem da UFRGS.

### 3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Foram usinados três corpos de prova (Fig. 3.1) a partir de uma barra de aço-carbono ABNT 1020 trefilado com diâmetro de 70 mm. Cada um dos corpos de prova foi usinado em três etapas: rebaixo, furos de centro e faceamento no torno convencional ROMI; desbastamento até o diâmetro externo de 65 mm e abertura de 11 canais até o diâmetro interno de 44 mm com espessura de 7,5 mm no torno CNC MAZAK QTN-II resultando em 10 anéis com 2 mm de espessura; desbaste dos anéis até o diâmetro de 63,7; rebarbamento com lima. Visando eliminar desbalanceamentos devido à fixação no torno onde seriam feitos os experimentos cada corpo de prova recebeu o último passe de torneamento na máquina operatriz utilizada para a realização dos ensaios, permanecendo nela até serem concluídos todos os testes referentes aos 10 anéis. Devido ao maior número de ensaios realizados, optou-se para realizar os testes para a determinação das forças de usinagem na forma conhecida como torneamento ortogonal. Desse modo, o avanço se dá na direção do raio da peça, com a profundidade de corte correspondendo à largura dos anéis utilizados no corte. Este procedimento resulta em menor tempo de realização dos ensaios e maior aproveitamento de material, uma vez que mais de 1/3 dos ensaios podem ser realizados em cada corpo de prova.



Figura 3.1 – Corpo de prova usinado.

### 3.2 Ferramenta de Corte

Seis ferramentas de corte (Fig. 3.2) foram afiadas com arestas de diferentes geometrias em cada extremidade. Uma vez que o comprimento da aresta é cerca de quatro vezes maior que a largura de cada anel, foi possível utilizar cada aresta de corte em três regiões diferentes. Desse modo, garante-se que todos os testes foram realizados em arestas de corte de características equivalentes, sem desgaste devido ao uso. As ferramentas foram afiadas com uma afiadora universal.



Figura 3.2 – Bits de aço rápido afiados.

As especificações das ferramentas utilizadas foram definidas com base no recomendado por Ferraresi, 1970. A Tabela 3.1 apresenta as características das arestas de corte.

Tabela 3.1 – Características das ferramentas de corte.

<b>Ferramenta</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Material</b>	HSS 10% Co	HSS 10% Co
<b>Ângulo de saída <math>\gamma</math></b>	15°	25°
<b>Ângulo de folga <math>\alpha</math></b>	9°	9°
<b>Ângulo de posição <math>\chi</math></b>	90°	90°

### 3.3 – Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte utilizados foram definidos com base em limites indicados na literatura [Machining Data Handbook, 1980], e são apresentados na Tabela 3.2, onde  $n$  corresponde à velocidade angular e  $d$  ao diâmetro externo dos anéis.

Tabela 3.2 – Parâmetros de corte.

$V_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$n$ [rpm]	$d$ [mm]	$f$ [mm.rev <sup>-1</sup> ]	$a_p$ [mm]
50	250	63,7	0,031 e 0,054	2
100	500	63,7	0,031 e 0,054	2

### 3.4 – Montagem e Preparação do Equipamento

Para que fosse possível o uso da câmera de alta velocidade para capturar a da formação do cavaco foi necessário utilizar uma máquina ferramenta que não tivesse proteção, logo foram feitos os experimentos no torno convencional ROMI. Entretanto, para poder coletar os dados das forças de corte e avanço foi necessário remover o carro transversal juntamente com o portas-ferramenta para instalação do dinamômetro (Fig. 3.3).

A câmera de alta velocidade foi posicionada sobre um tripé do lado do operador da máquina, a uma distância segura da zona de trabalho ajustando-se o zoom e o foco com o auxílio da lente.

Para cada experimento a câmera teve que ser reposicionada para melhor ajuste da imagem. Antes de iniciar a aquisição dos dados de força e das imagens foi realizada a calibração da câmera, essencial para o correto cálculo da velocidade de saída do cavaco.

Os parâmetros utilizados na câmera foram: resolução de 256x256; taxa de 20000 quadros/s; exposição de 49  $\mu$ s. Para a escolha desses parâmetros foram testadas diversas combinações, sendo escolhida a que apresentou melhores resultados nas condições avaliadas.

Após os experimentos, as ferramentas foram fotografadas em um microscópio AM-413ZT para verificar a ocorrência de desgaste ou mesmo a aderência do material da peça, indicativo de aresta postiça de corte.



Figura 3.3 – Configuração utilizada durante os experimentos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Existem diversos estudos que buscam a definição dos esforços associados a processos de usinagem. Uma das teorias mais utilizadas é a de Kienzle, 1951. A Tabela 4.1 apresenta valores de força de corte e pressão específica de corte calculados segundo as equações 2.7 e 2.8. Em ambos os casos foram calculados valores máximos e mínimos devido à correção do ângulo de saída da ferramenta. Os valores mínimos correspondem a uma correção de 2% por grau, enquanto os máximos foram calculados com uma correção de 1%. Para as geometrias de ferramenta utilizadas foram observadas reduções nos valores de  $K_s$  e  $F_c$  de 9 a 18% na ferramenta 1 e de 19 a 38% na ferramenta 2. As constantes para o aço ABNT 1020 são  $K_{s1}=1800$  e  $z=0,17$  [Ferraresi, 1970].

Tabela 4.1 – Valores de força e pressão específica de corte segundo Kienzle, 1951.

Combinação	Ferramenta	f(mm/rev)	$V_c$ (m/min)	$F_c$ (N)		$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	
				mín. – máx.	mín. – máx.		
1	1	0,031	50	165,2 – 183,3	2664,1 – 2956,5		
2	1	0,031	100	165,2 – 183,3	2664,1 – 2956,5		
3	2	0,031	50	124,9 – 163,2	2014,3 – 2631,6		
4	2	0,031	100	124,9 – 163,2	2014,3 – 2631,6		
5	1	0,054	50	261,2 – 290,6	2424,3 – 2690,3		
6	1	0,054	100	261,2 – 290,6	2424,3 – 2690,3		
7	2	0,054	50	198,0 – 258,6	1833,0 – 2394,7		
8	2	0,054	100	198,0 – 258,6	1833,0 – 2394,7		

Foram realizados três ensaios para cada conjunto de parâmetros de corte propostos. A Figura 4.1 demonstra o comportamento da média das forças de corte e avanço durante o torneamento com  $V_c= 50$  m/min,  $f= 0,054$  mm/rev e  $\gamma= 25^\circ$  (combinação 7).

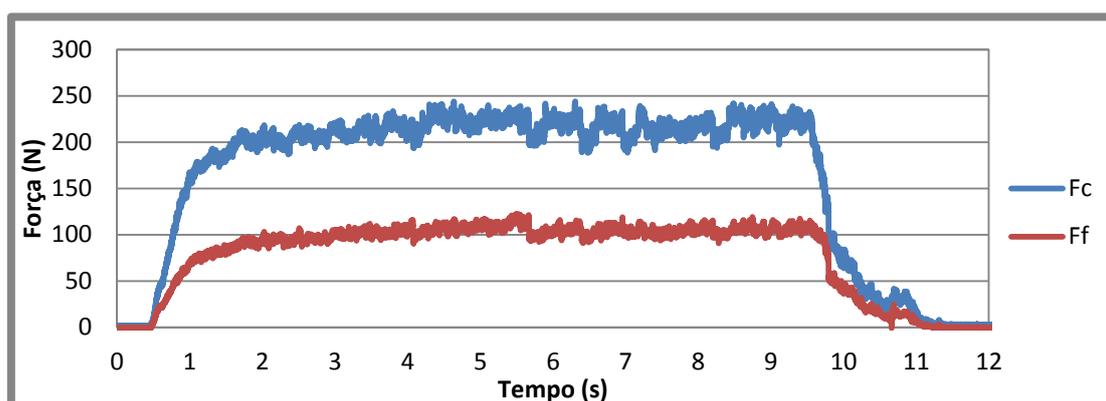


Figura 4.1 – Componentes de  $F_u$  durante o corte com  $V_c= 50$  m/min,  $f= 0,054$  mm/rev e  $\gamma= 25^\circ$ .

O comportamento das forças para todos os ensaios foi similar ao da Fig. 4.1, o que também concorda com os ensaios realizados por Cervelin, 2009, alterando apenas suas amplitudes pelo fato de o material usinado naquele estudo ser um aço temperado AISI 4340. Observa-se que as forças partem de zero e sobem até um patamar estável. Isso ocorre porque desde o momento em que a aresta de corte entra em contato com a peça até a espessura de corte se igualar ao avanço é necessário pelo menos uma revolução completa da peça. Deste

modo, os menores esforços observados no início de cada teste se devem à menor seção de corte. As forças ainda oscilam mesmo após atingir o valor constante de espessura, o que pode ocorrer devido a vibrações mecânicas do sistema máquina-peça-ferramenta, imperfeições da ferramenta e da peça e aderências instáveis do cavaco na ferramenta que quando se soltam não saem pela superfície de saída e sim espremidos entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, entre outros motivos.

Os resultados das médias das forças e pressão específica de corte obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Média dos valores das forças e pressão específica de corte experimental.

Combinação	Média $F_c$ (N)	Desvio padrão( $F_c$ )	Média $F_f$ (N)	Desvio padrão( $F_f$ )	Média $k_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão( $k_s$ )
1	145,8	12,4	72,6	7,6	2352,2	200,1
2	176,7	13,1	125,6	11,2	2850,3	211,8
3	130,7	7,8	59,7	4,5	2107,7	126,0
4	151,2	10,9	91,6	9,0	2438,4	175,2
5	247,9	14,3	134,5	9,1	2295,8	132,1
6	238,7	13,7	144,4	12,2	2210,6	126,9
7	230,3	14,6	119,3	9,7	2132,5	135,6
8	240,9	15,5	152,8	11,8	2230,8	143,3

A Figura 4.2 apresenta os resultados experimentais para a força de corte em comparação com os resultados teóricos.

Diversas análises foram realizadas a partir dos resultados apresentados na Tabela 4.2. Os resultados experimentais foram semelhantes aos resultados da equação 2.7. No entanto, o comportamento dos resultados experimentais não seguiu os destas equações para o parâmetro velocidade de corte. Observa-se que os resultados experimentais de força de corte (Fig. 4.2) concordam com os previstos por Kienzle, 1951. Na força de corte, o resultado que menos concordou com os obtidos segundo a teoria de Kienzle foi na combinação da menor velocidade de corte com o avanço mais baixo, resultando em 11% a menos que no resultado teórico.

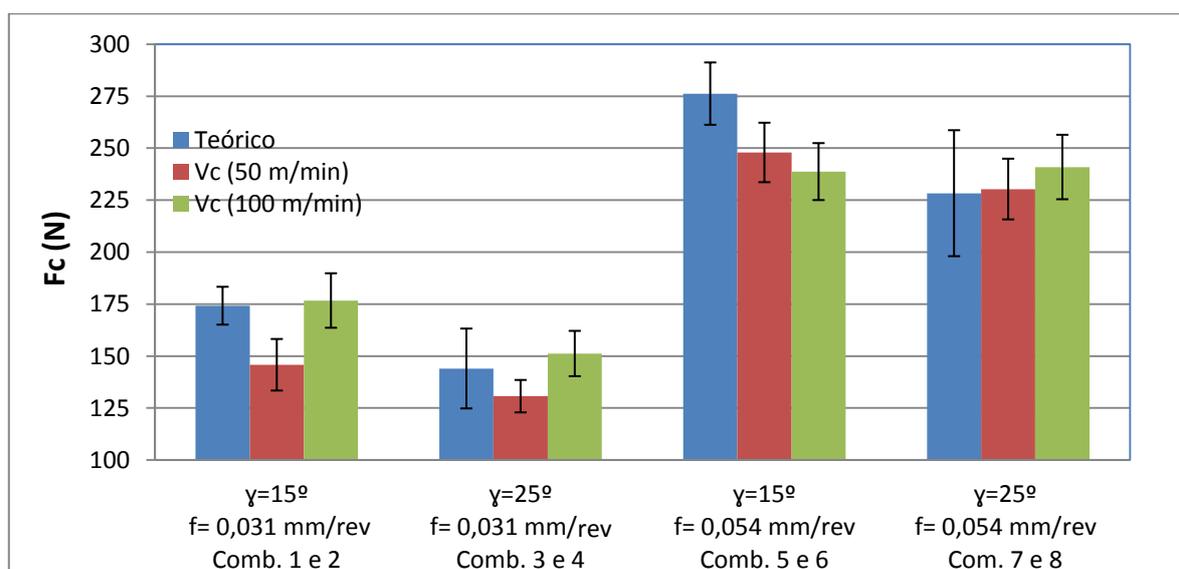


Figura 4.2 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais de força de corte.

Nas equações de Kienzle, 1951, a velocidade de corte não altera as forças de corte e pressão específica de corte. Comparando apenas as velocidades de corte constatou-se que com  $V_c=50$  m/min as forças foram menores que com a  $V_c=100$  m/min para as duas ferramentas com o menor avanço. Para o avanço mais elevado não houve variação significativa das forças. Esse comportamento pode ser relacionado à ocorrência de aresta postiça de corte na velocidade de corte mais baixa com menor avanço.

O parâmetro que mais influencia na formação da aresta postiça de corte é a velocidade de corte. A APC tem uma fase crescente seguida de uma decrescente até a velocidade crítica. O aumento da APC tende a diminuir a força de corte e vice-versa, mudando a aresta de corte e assim o ângulo de saída efetivo da ferramenta, o que explica os menores esforços observados na usinagem com  $V_c$  e avanço mais baixo. Durante o torneamento com a velocidade de corte mais baixa e o maior avanço ocorre a mudança da velocidade crítica, resultando em menor formação de APC e conseqüentemente maiores esforços. Os testes realizados com as velocidades de corte mais elevadas apresentam comportamentos mais próximos do esperado, uma vez que não se espera formação significativa de APC nestas condições. Casagrande, 2004, observou que experimentos realizados com ferramenta de aço rápido no torneamento ortogonal do aço inoxidável AISI 304 foram realizados com baixas velocidades de corte, sugerindo o aparecimento de APC pelos resultados inferiores para a força de corte comparados com os teóricos, o que concorda com o presente trabalho. Diniz et al., 2013, sugere não utilizar velocidades de corte abaixo de 150 m/min para não possibilitar o aparecimento de aresta postiça de corte, o que não foi possível nesse estudo devido às características das ferramentas de aço rápido, que não resistem a altas temperaturas e velocidades de corte.

Observou-se a formação de aresta postiça de corte em todas as condições avaliadas (Figura 4.3). No entanto, as maiores dimensões da APC ocorreram no torneamento com velocidade de corte e avanço mais baixos, e as menores dimensões foram observadas após o torneamento com os dois parâmetros a níveis mais elevados.

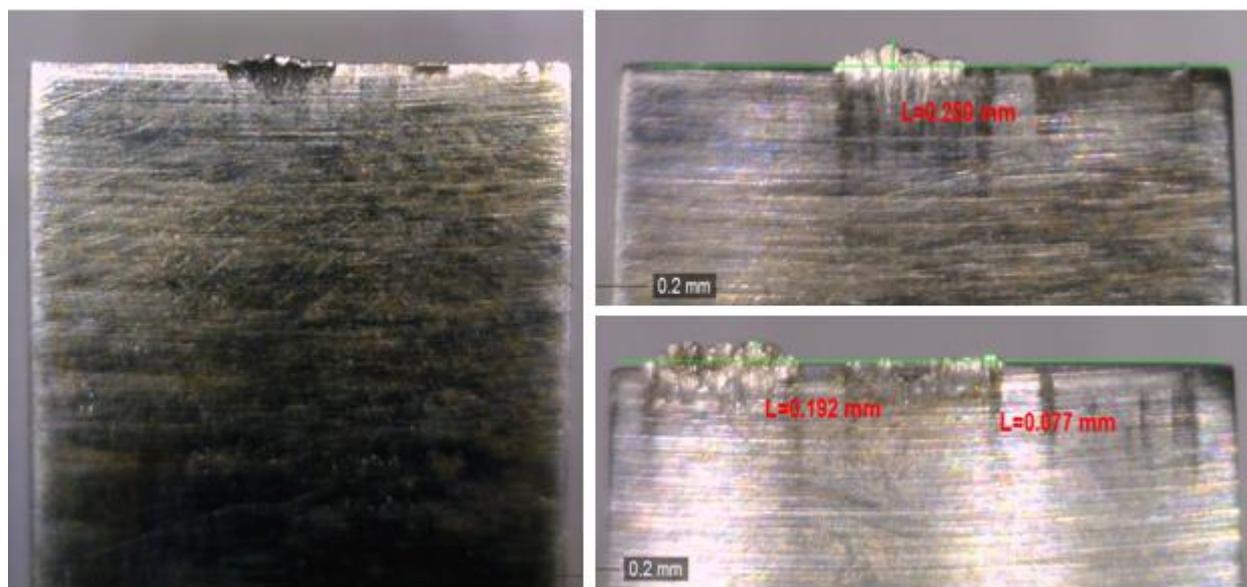


Figura 4.3 – Aresta postiça de corte formada nas ferramentas de aço rápido.

O estudo da influência dos parâmetros de processo sobre as variáveis de saída utilizou análise de variância. Para a força de corte e a pressão específica de corte foi constatada influência significativa de todos os parâmetros de entrada, e da interação entre o avanço e a velocidade de corte. Tanto o avanço quanto a velocidade de corte apresentaram influência significativa sobre a força de avanço, com nenhum efeito significativo de interação. O grau de recalque foi afetado de forma estatisticamente significativa somente pelo avanço, enquanto o

ângulo de cisalhamento varia com o avanço e o ângulo de saída da ferramenta. Para todas as análises foi utilizado um nível de significância de 5%.

Os experimentos formaram cavacos contínuos com forma de fita emaranhado nos testes realizados velocidade mais elevada, e tubular emaranhado nos testes realizados com a velocidade mais baixa. Nas combinações de 1 a 7 não houve a quebra do cavaco, devido à alta ductilidade do material e ferramenta sem quebra cavaco (Figura A1 do apêndice).

A combinação 8 ( $V_c$ ,  $f$ , e  $\gamma \rightarrow$  mais elevados) gerou cavacos em fita emaranhado. No entanto, observou-se em alguns momentos a quebra do cavaco quando o mesmo bate no fim da superfície de saída da ferramenta (Fig. 4.4). Isso se deve principalmente pelo alto  $\gamma$  combinado com a maior  $V_c$  e  $f$ , e indica um maior comprimento de contato cavaco-ferramenta.

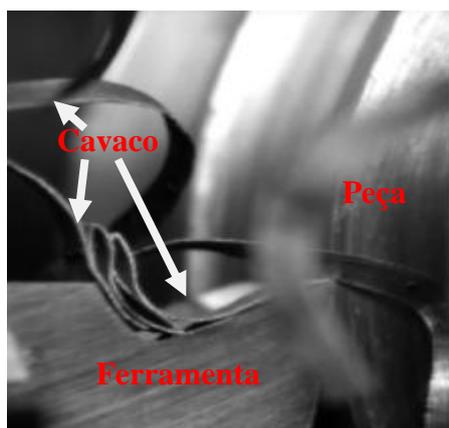


Figura 4.4 – Cavaco gerado na combinação 8 ( $V_c=100$  m/min,  $f=0,054$  mm/rev e  $\gamma=25^\circ$ ).

A mudança na saída do cavaco na combinação com maior velocidade de corte e avanço deve-se principalmente à alta velocidade de corte, que aumenta a velocidade de saída do cavaco, ao alto avanço, que aumenta a espessura do cavaco, e à  $V_{cav}$  ser paralela à superfície de saída da ferramenta. A maior espessura e velocidade de saída do cavaco fazem com que o cavaco precise de mais tempo para começar a se curvar. Este cavaco que sai rente à superfície de saída da ferramenta colide com o fim da mesma, o que só acontece com a ferramenta 2 porque a superfície de saída é mais curta, na ferramenta 1 o cavaco se curva antes de chegar nesta parede, não ocasionando a quebra do cavaco.

A análise de variância realizada indicou influência significativa do avanço, do ângulo de saída da ferramenta, da velocidade de corte e da interação  $f \times V_c$  para  $F_c$  e  $K_s$  (Fig. 4.5 e 4.6). A força de corte aumenta com o aumento do avanço e diminuição do ângulo de saída da ferramenta. Entretanto, a pressão específica de corte aumenta com a diminuição do  $f$  e do  $\gamma$ . Isto ocorre porque a área da seção de corte aumenta com o aumento de  $f$ , o que influencia somente na força (Eq. 2.7). À medida que o avanço aumenta, o fluxo lateral de cavaco é relativamente menor, e há o aumento da velocidade de avanço e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito diminui, pois o corte se torna mais dinâmico, fazendo assim com que a pressão específica de corte diminua [Diniz et al., 2013].

A velocidade de corte e a interação  $f \times V_c$  concordam com a teoria, porém não concordam com a equação 2.8, que não considera que a velocidade de corte afete  $F_c$  e  $K_s$ . As velocidades de corte utilizadas na usinagem das peças estão em uma faixa onde pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte. A  $V_c=50$  m/min estaria na faixa decrescente de criação de aresta postiça de corte, ou seja, aumentando-se a velocidade, diminui-se a formação de APC até cessar, e o aumento do avanço, apesar de não influenciar diretamente na formação de aresta postiça, desloca a velocidade crítica para um valor mais baixo, logo, sugere-se que houvesse uma menor criação de APC com o maior avanço do que com o menor avanço na mesma velocidade, a  $V_c=100$  m/min estaria próxima da velocidade crítica havendo pouca formação da APC [Ferraresi, 1970]. Isto explica o fato de a velocidade de corte influenciar de forma significativa somente quando utilizada com o avanço mais baixo.

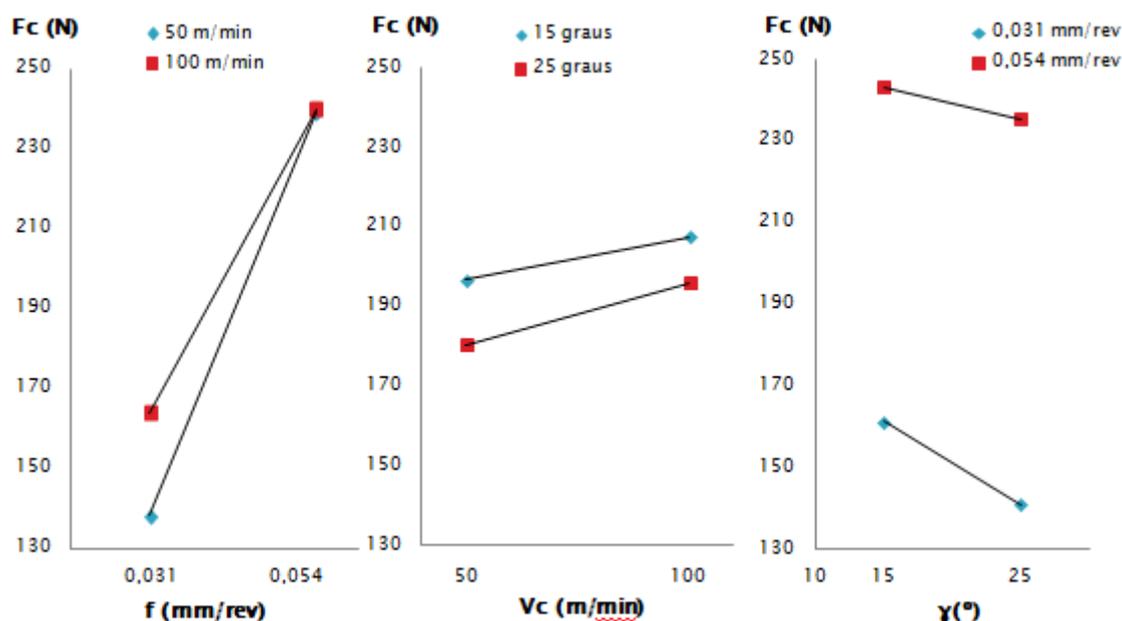


Figura 4.5 – Gráficos de dois fatores para força de corte,  $F_c$ .

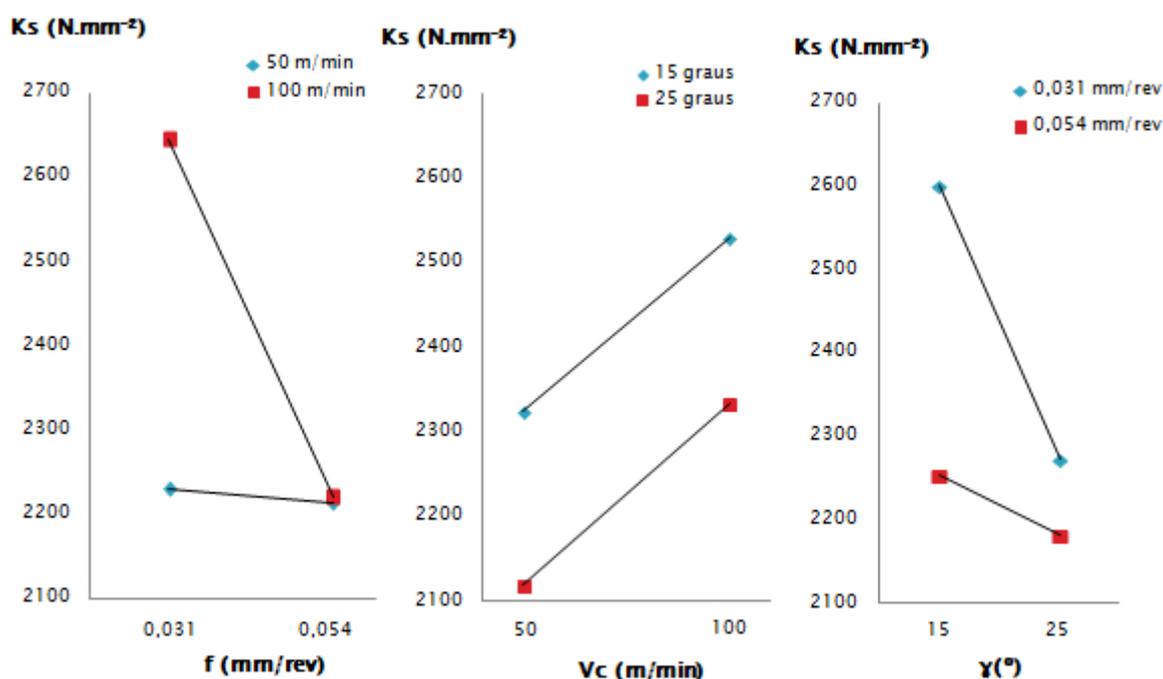


Figura 4.6 – Gráficos de dois fatores para pressão específica de corte,  $K_s$ .

As influências de  $V_c$  e  $f$  sobre  $F_f$  (Fig. 4.7) são significativas. A força de avanço não influi significativamente sobre o valor da potência de usinagem, porém essa força é importante no projeto e na estabilidade dinâmica da máquina operatriz. Com o aumento da velocidade de corte e do avanço ocorre o aumento da força de avanço.

As velocidades de saída do cavaco obtidas experimentalmente com o uso da câmera de alta velocidade e os valores calculados para o grau de recalque, espessura do cavaco e ângulo de cisalhamento (equações 2.1 e 2.5) são apresentados na Tabela 4.3.

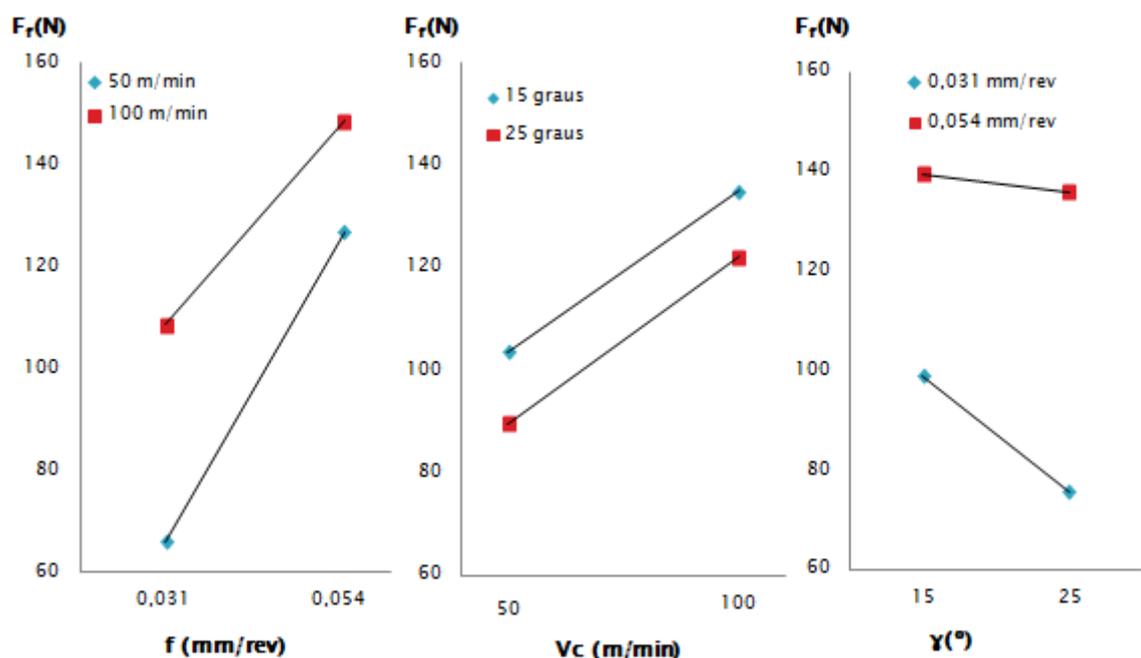


Figura 4.7 – Gráficos de dois fatores para força de avanço.

Tabela 4.3 – Resultados para a velocidade de saída do cavaco, grau de recalque, espessura do cavaco e ângulo de cisalhamento.

<b>Combinação</b>	<b><math>V_{cav}(m/min)</math></b>	<b><math>R_c</math></b>	<b><math>h'(mm)</math></b>	<b><math>\Phi(graus)</math></b>
1	21,1	2,37	0,073	24,6
2	41,7	2,40	0,074	24,3
3	22,1	2,26	0,070	26,3
4	42,4	2,36	0,073	25,1
5	23,2	2,16	0,116	27,0
6	44,8	2,23	0,121	26,1
7	23,3	2,15	0,116	27,7
8	46,1	2,17	0,117	27,4

O único parâmetro que apresentou influência significativa sobre o grau de recalque foi o avanço (Fig. 4.8). Conforme ocorre o aumento de  $f$ ,  $R_c$  diminui. Segundo Ferraresi, 1970, o ângulo de saída da ferramenta e a velocidade de corte não influenciavam no  $R_c$  nos intervalos usados no presente trabalho. No entanto, o avanço mostrou forte influência para valores menores que 0,1 mm/rev para os materiais analisados. Souza, 2013, constatou que os fatores que mais influenciam o grau de recalque na usinagem de ligas de alumínio são a dureza e o avanço; quanto maior o avanço menor  $R_c$ , concordando com o observado no presente trabalho.

Segundo a eq. 2.5, o ângulo de cisalhamento depende do grau de recalque e do ângulo de saída da ferramenta, aumentando conforme a redução de  $R_c$  e com o aumento de  $\gamma$ . Os resultados experimentais (Fig. 4.9) concordam com o previsto. Da Silva, 2008, fez estudos no corte ortogonal para o aço ABNT 1045 para várias combinações de avanço e velocidade de corte, nos quais foi variado o revestimento das ferramentas para a mesma geometria, concluindo que o avanço é o fator mais significativo para o  $R_c$  e  $\phi$ . No entanto, para velocidades de corte muito baixas, em torno de 30 m/min, o parâmetro de maior influência segundo o autor foi a velocidade de corte. Nos ensaios realizados, o aumento de  $V_c$  resultou em leve redução de  $\phi$ .

Os níveis elevados de  $R_c$  (assim como os valores baixos de  $\phi$ ) observados no presente trabalho correspondem a um elevado grau de deformação do cavaco, e se devem à alta ductilidade do material usinado.

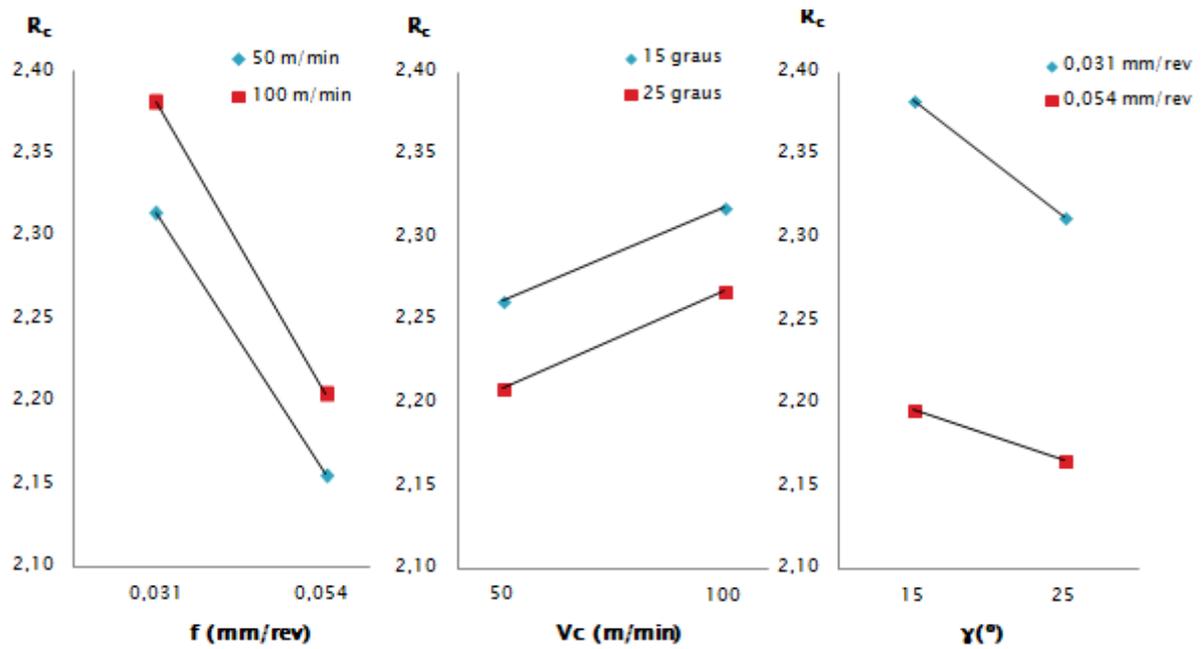


Figura 4.8 – Gráficos de dois fatores para o grau de recalque,  $R_c$ .

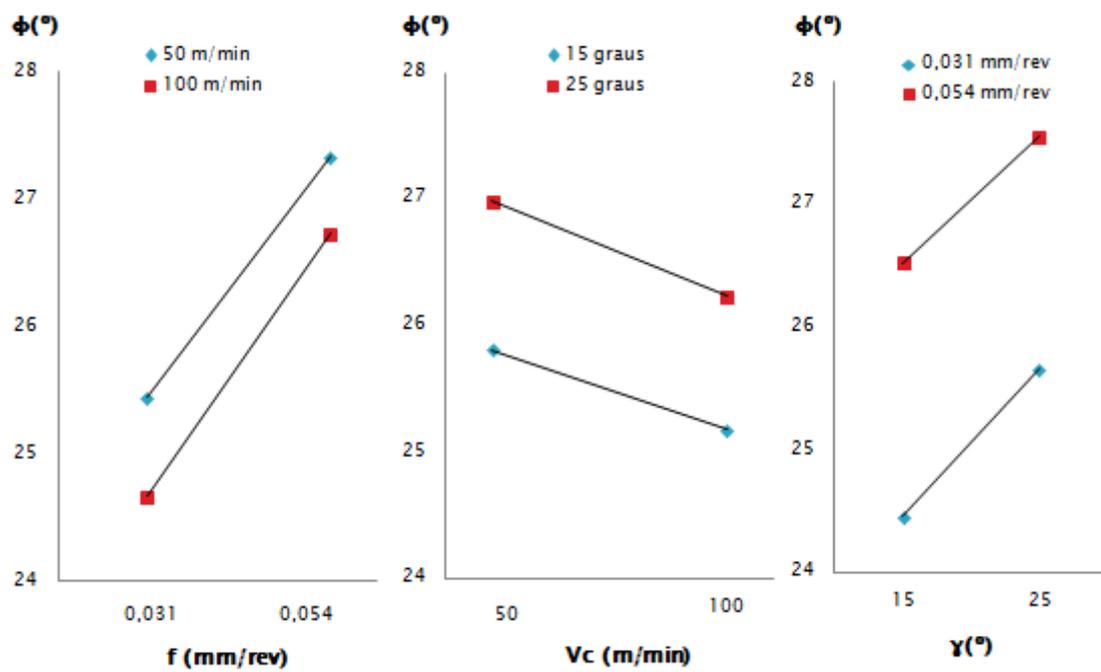


Figura 4.9 – Gráficos de dois fatores: (a)  $\phi$  X  $f$ ; (b)  $\phi$  X  $V_c$ ; (c)  $\phi$  X  $\gamma$ .

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos dados coletados nos experimentos, verifica-se que o avanço é o parâmetro de influência mais significativa sobre a força e a pressão específica de corte. Com o aumento do avanço ocorre o aumento da força de corte e a redução da pressão específica de corte. O ângulo de saída da ferramenta e a velocidade de corte possuem menor influência, com o aumento de  $\gamma$  resultando em menores valores de força de corte e pressão específica de corte, enquanto a influência da velocidade de corte está diretamente relacionada à ocorrência da aresta postiça de corte.

A análise da força de corte sugere o aparecimento da aresta postiça de corte na fase decrescente na faixa da menor velocidade de corte, observando-se a redução da APC com o aumento do avanço e na maior velocidade de corte. No entanto, a formação de APC diminui consideravelmente com o aumento da velocidade de corte, indicando que a velocidade de corte de 100 m/min está próxima de ser a velocidade crítica de formação de APC para este material. Apesar da aresta postiça de corte atuar no sentido de diminuir a força de corte, ela piora o acabamento da peça e acelera o desgaste da ferramenta, pois quando a aresta postiça se solta ela não sai pela superfície de saída, e sim espremida entre a peça e a superfície de folga. Desta forma, conclui-se que, do ponto de vista da formação de APC, para a usinagem de aço ABNT 1020 com ferramenta de aço rápido o melhor seria a utilização de velocidades de corte mais elevadas.

O aço estudado apresentou valores próximos dos encontrados pela eq. 3.7. Confirma-se que a formulação empírica de Kienzle, 1951, é adequada para prever o resultado de força e pressão específica de corte.

Em relação à força de avanço, o avanço e a velocidade de corte são os parâmetros de influência mais significativa; quanto maior o avanço e velocidade de corte, maior a  $F_f$ . A força de avanço variou pouco em relação à força de corte, sendo em média 57% da mesma com um desvio padrão de 7%. Com isso é possível obter uma estimativa da força de avanço através da força de corte.

Além de uma pequena variação, verificaram-se valores elevados de grau de recalque nos experimentos realizados. Quanto maior o avanço, menor o grau de recalque e, por conseguinte maior a facilidade de usinar esse material. O ângulo de cisalhamento aumenta com a diminuição do  $R_c$  e, por consequência, com aumento do avanço e do ângulo de saída.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); **“NBR 6162 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais”**, Rio de Janeiro, 1989.

Casagrande, M. V.; **“Estudo de Força e Pressão Específica de Corte na Usinagem do Aço Inoxidável Austenítico AISI 303”**, CONEM 2004, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém/PA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

Cervelin, J. E.; **“Estudo Teórico-experimental das Forças de Corte no Processo de Torneamento”**, Dissertação (Mestrado), Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

Da Silva, N. A.; **“Investigação Experimental da Formação do Cavaco na Usinagem do Aço ABNT 1045 e do Ferro Fundido Nodular”**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L.; **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**, Artliber, 8ª edição, 2013.

Ferraresi, D.; **“Fundamentos da Usinagem dos Metais”**, Edgard Blücher, 1970.

Kienzle, O.; **“Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spänenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen”**, Z VDI, 1951.

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B.; **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, Edgard Blücher, 2ª edição, 2011.

Machado, A. R.; Da Silva, M. B.; **“Usinagem dos Metais”**, Editora UFU, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

Machinability Data Center; **“Machining Data Handbook”**, Metcut Research Associates Inc., 3th edition, 1980.

Michellete, G. F.; **“Mecanizado por Arranque de Viruta”**, 1st Edition. Barcelona: Blume, 1980.

Souza, M. N.; **“Relação entre as Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio e o Grau de Recalque”**, 7º Congresso de Engenharia de Fabricação, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

Trent, E. M.; **“Metal Cutting”**, Butterworths, 2nd edition, 1984.

## APÊNDICE



Figura A1 – Cavacos formados e numerados conforme todas as combinações dos parâmetros: 1), 3), 5), e 7) Cavaco contínuo tubular emaranhado; 2), 4), 6), e 8) Cavaco contínuo em fita emaranhado.