

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

**Análise qualitativa da influência dos parâmetros de corte na temperatura em
torneamento do aço inoxidável AISI 420C**

por

André Stefenon

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, Dezembro de 2014

**Análise qualitativa da influência dos parâmetros de corte na temperatura em
torneamento de aço inoxidável AISI 420C**

por

André Stefenon

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

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: MSc. Eng. Guilherme Cortelini da Rosa

Comissão de Avaliação:

Prof.: Heraldo José de Amorim

Prof.: Patric Daniel Neis

Prof.: Tiago Becker

Porto Alegre, 05, dezembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo o apoio e incentivo que me deram por todo esse tempo de graduação.

À minha irmã Andressa pela confiança e carinho dedicado a mim.

À minha namorada Nathália pela paciência e atenção dada durante esse período.

Ao professor André João de Souza pela oportunidade e ajuda disponibilizada para resolução dos problemas.

Ao doutorando e coorientador Guilherme Cortelini da Rosa pelo apoio e dedicação de seu tempo na realização desse trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Usinagem (LAUS) Guilherme Vargas Schimer pela disponibilidade de tempo durante os experimentos.

Ao professor Dilson José Aguiar de Souza pelo compartilhamento de conhecimento e tempo, além do empréstimo do porta-ferramenta instrumentado utilizado no experimento.

Ao Fernando Mattes da empresa Seco Lesi pela doação dos insertos.

À empresa Aços Favorit pela doação do material utilizado no experimento.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), em especial ao engenheiro Amauri Mosquen, pela disposição em ajudar com o sistema de monitoramento e registro de temperatura.

A todos os meus amigos que de alguma forma se fizeram presentes durante minha vida acadêmica.

Stefenon, A. “**Análise qualitativa da influência dos parâmetros de corte na temperatura em torneamento de aço inoxidável AISI 420C**”, 2014. 15 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O torneamento de materiais endurecidos, acima de 45 HRC (\cong 455 HB), tem sido estudado frequentemente com o intuito de substituir o processo de retificação cilíndrica, um processo mais lento e inflexível. Devido à contínua necessidade de aumento da produção associado com a redução de custos, o estudo da influência dos parâmetros de entrada na usinagem é indispensável. Além do mais, a correta combinação destes parâmetros pode trazer benefícios tanto para o produto final quanto para a máquina operatriz, sendo essa a motivação para o presente trabalho. Foi feito um estudo do torneamento em aço inoxidável martensítico AISI 420C considerando como variáveis independentes de entrada três velocidades de corte e dois avanços para uma mesma profundidade de corte. Foi medida como variável dependente de saída a temperatura via sistema termopar inserido no porta ferramenta. Com isso foi feito um estudo da influência da velocidade de corte e do avanço na variação da temperatura durante o processo de usinagem. Foi possível constatar que dado um tamanho de peça a ser usinada, quanto maior a velocidade de corte e maior o avanço menor é a variação da temperatura devido, principalmente, ao tempo de usinagem ser menor. Também foi encontrada uma combinação de parâmetros que possibilitou a menor variação de temperatura com a maior taxa de remoção de material.

PALAVRAS-CHAVE: temperatura, velocidade de corte, avanço e torneamento.

Stefenon, A. “**A Qualitative analysis of cutting parameters influence in turning process temperature of stainless steel AISI 420C**”. 2014. 15 p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The turning process of hardened material, above 45 HRC (\cong 455 HB), has been studied frequently in order to replace the cylindrical grinding process, a slower and inflexible process. Due to the increased production necessity associated with costs reduction, the study of input parameters influence in machining is indispensable. Moreover the right parameters combination can bring benefits both for the final product and the machine, making this the motivation for the present work. A study of turning process on martensitic stainless steel AISI 420C was made considering three different cutting speeds and two different feed rates with a fixed cut depth. The temperature was measured as a dependent variable by embedded thermocouple into tool holder. With the results was made an influence analysis of cutting speed and feed rate on temperature variation during the turning process. It was possible notice that for a fixed workpiece length, the higher are cutting speed and the feed rate, lower is the temperature variation. It occurs because the total turning cutting time is lower. Also was found for this experiment a better combination of parameters that contains lower temperature variation with higher material removal rate.

KEYWORDS: temperature, cutting speed, feed rate and turning process.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1	Aço Inoxidável AISI 420C	2
3.2	Torneamento	2
3.3	Temperatura	3
3.3.1	Métodos de Medição de Temperatura.....	3
3.3.2	Termopar	5
4	METODOLOGIA.....	5
4.1	Corpo de Prova.....	5
4.2	Ferramenta de Corte	6
4.3	Parâmetros de Corte	7
4.4	Aquisição de Dados de Temperatura	7
4.4.1	Tempo de Resposta do Sistema	8
4.5	Área da Seção Transversal do Cavaco	9
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
5.1	Período de Estabilização do Sistema Termopar, Inserto e Peça.	9
5.2	Influência dos Parâmetros de Corte na Variação de Temperatura	10
6	CONCLUSÃO	14
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é reconhecido como o processo de fabricação mais usual do mundo, transformando em cavaco algo em torno de 10% de todo o metal produzido no planeta [Machado *et al.*, 2011]. Como definição, usinagem é um processo de remoção de material que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação de qualquer destes itens, produz cavaco [Souza, 2011]. O torneamento, processo de usinagem em estudo, conta com diferentes variáveis de entrada e de saída; dentre as principais variáveis de entrada estão: as características do material da peça, a ferramenta de corte (material e geometria), os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e o meio lubrificante. Já entre as variáveis de saída podem-se citar a temperatura, a força e o acabamento da superfície usinada (rugosidades e tensões residuais) [Souza, 2011].

O torneamento de materiais endurecidos, acima de 45 HRC (\cong 455 HB), tem sido estudado frequentemente com o intuito de substituir o processo de retificação cilíndrica – mais lento e menor flexível. O “torneamento duro” oferece benefícios quando comparado à retificação, tais como produção de peças mais complexas em uma única etapa, maior taxa de remoção de material, menor tempo de usinagem e redução do consumo de energia [Dogra *et al.*, 2010].

Devido à contínua necessidade de aumento de produção associado com a redução de custos, o estudo da influência dos parâmetros de usinagem é indispensável. A correta combinação destes parâmetros pode trazer benefícios tanto para o produto final quanto para a máquina operatriz, principalmente pelo fato de que o processo de corte é resultado de uma interação física entre a aresta de corte da ferramenta e a peça [Denkena *et al.*, 2012]. Machado *et al.*, 2011, explica que o trabalho realizado e, conseqüentemente, o calor gerado, depende das propriedades do material da peça e da ferramenta, da geometria da ferramenta e das condições de corte. O calor gerado no corte aumenta com a taxa de remoção de material Q [cm^3/min] (Eq. 1), seja por meio do aumento da velocidade de corte v_c [m/min], do avanço f [mm/volta] ou da profundidade de corte a_p [mm].

$$Q = a_p \cdot f \cdot v_c \text{ [cm}^3/\text{min]} \quad (1.1)$$

Diferentes autores citam que v_c é o parâmetro que mais influencia a geração de calor nas regiões de corte, seguido por f [Abukhshim *et al.*, 2006; Korkut *et al.*, 2007].

Na usinagem de materiais endurecidos, o aumento da temperatura causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, além de gerar o desgaste da ferramenta por abrasão, também acelera a ocorrência de outros fenômenos de desgaste entre a peça e a ferramenta, tais como a difusão e a oxidação. Além disso, a temperatura é um dos principais fatores que influenciam e é influenciado pelo desgaste de ferramentas [Souza, 2011].

Existem trabalhos que apresentam a variação da temperatura em função dos parâmetros de entrada. Entretanto, todos eles têm como foco principal a melhoria de sistemas e métodos para medição da temperatura não apresentando resultados diretos da influência dos parâmetros sobre a temperatura. Ainda, diversos autores [Abukhshim *et al.*, 2006, Trent e Wright, 2000, Brinksmeier *et al.*, 1982] afirmam a extrema dificuldade de correlacionar os parâmetros com a temperatura devido as inúmeras formas de geração de calor no processo de torneamento. Além disso, é raro encontrar trabalhos que utilizem o aço inoxidável martensítico como material. Isto faz com que o trabalho tenha uma parte inovadora.

O presente trabalho analisa qualitativamente a influência de parâmetros de entrada na variação da temperatura no processo de torneamento longitudinal externo no aço inoxidável martensítico AISI 420C. O aço inoxidável é um dos principais materiais que vem sendo usados na construção de peças e equipamentos críticos por combinar propriedades mecânicas favoráveis e boa resistência à corrosão, conforme Jang, 1995. Além disso, o aço inoxidável martensítico apresenta excelente temperabilidade e elevada dureza depois de temperado e revenido [Porto, 2012].

2 OBJETIVO

Analisar a variação de temperatura medida na face inferior do inserto de metal duro tipo W em função da combinação de parâmetros de entrada (três velocidades de corte e dois avanços para uma mesma profundidade de corte) durante o processo de torneamento cilíndrico externo em peças de aço inoxidável AISI 420C endurecido a 48 HRC (\cong 455 HB).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo far-se-á uma breve explanação sobre o material utilizado nos experimentos, o processo de usinagem envolvido e a temperatura gerada neste processo – incluindo os métodos de medição (com destaque para o sensor utilizado no trabalho).

3.1 Aço Inoxidável AISI 420C

O AISI 420C é um aço inoxidável martensítico com alta temperabilidade [quando endurecido pode chegar a 55 HRC (\cong 560 HB)]. Apresenta elevados teores de elementos de liga e sua resistência à corrosão é moderada, mas satisfatória a meios não muito agressivos. São magnéticos, apresentam alta resistência mecânica e elevada resistência à abrasão ou erosão [Porto, 2012].

O AISI 420C não apresenta boa conformabilidade a frio, sendo necessário um pré-aquecimento entre 200 e 400°C. Deve-se evitar revenimento na faixa de temperatura entre 425 e 525°C, onde ocorre a fragilização do material. Esse aço é geralmente utilizado em peças tais como moldes de injeção de plásticos, instrumentos cirúrgicos e dentários, lâminas de corte, válvulas para água ou vapor, turbinas a gás, engrenagens, eixos, dentre outros [Favorit, 2014].

3.2 Torneamento

O torneamento é um processo mecânico de fabricação por usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução (cilíndricas, cônicas ou de perfil) com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes [Souza, 2011]. No corte cilíndrico externo (Fig. 3.1), a peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta de corte realiza o movimento de avanço longitudinal [Machado *et al.*, 2011].

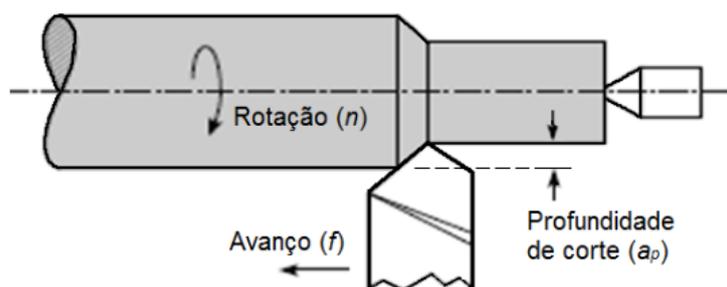


Figura 3.1: Torneamento longitudinal externo.

Pode-se classificar o processo de torneamento quanto à finalidade em operações de desbaste e acabamento. A primeira visa obter na peça a forma e as dimensões próximas da final; a segunda é destinada a obter as dimensões finais ou um acabamento específico. Como regra geral, os parâmetros para uma operação de acabamento são definidos por um baixo avanço (f) devido a sua influência na rugosidade, uma pequena profundidade de corte (a_p) e uma alta velocidade de corte (v_c). Assim, a taxa de remoção de material Q (volume de material removido por unidade de tempo) é razoável sem que haja influência significativa da vibração no processo [Souza, 2011].

O trabalho contempla usinagem a seco, ou seja, sem o uso de fluidos de corte. Esse processo está tornando-se popular devido à redução do custo envolvido no processo e por ser menos agressiva ao meio ambiente. Sreejith *et al.*, 2000, afirmam que os lubrificantes e refrigerantes usados nos processos e usinagem representam de 16 a 20% do custo de fabricação. Além disso, as vantagens da usinagem a seco incluem: não poluente para a atmosfera e para a água, não perigosa à saúde e redução de custos na usinagem.

3.3 Temperatura em Usinagem

Define-se temperatura como o grau de agitação das moléculas; calor é energia em trânsito ou a forma de energia que é transferida através da fronteira de um sistema em virtude da diferença de temperatura, [IOPE, 2014].

O processo de torneamento envolve uma grande quantidade de deformação plástica. Apenas cerca de 10% do trabalho gerado no processo é armazenado em energia elástica e o 90% restante é convertido em calor entre o cavaco, ferramenta e peça. A parcela de trabalho convertido em calor na interface cavaco/ferramenta se transfere para a ferramenta causando um aumento da temperatura nas vizinhanças da ponta. Com isso, a dureza e a resistência ao cisalhamento do material da ferramenta diminuem [Machado *et al.*, 2011], reduzindo bastante o tempo de vida da ferramenta de corte; além disso, o excesso de calor gerado tem influência na tensão residual de forma danosa, gerando tensões residuais trativas na superfície da peça, [Brinksmeier *et al.*, 1982].

A energia térmica da formação do cavaco é percebida na forma de três regiões distintas na área de formação de cavacos: na zona do plano de cisalhamento (zona primária de deformação); na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (zona secundária de deformação); e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta (zona terciária de deformação). O calor na zona primária provém do trabalho de cisalhamento interno do material, enquanto nas outras duas zonas o calor vem do atrito e do cisalhamento interno provocado pela aderência entre as superfícies em contato [Machado *et al.*, 2011]. Além disso, o calor na zona primária de cisalhamento pode ser benéfico para o processo de usinagem, pois o aumento da temperatura nas zonas primárias e secundárias diminui a resistência mecânica do material que está sendo usinado [Abukhshim *et al.*, 2006]. O calor gerado na zona secundária de cisalhamento tem influência direta sobre o desempenho da ferramenta e é o fator limitante para a taxa de remoção de material. Ele representa de 20 a 30% do calor gerado na zona primária [Trent e Wright, 2000]. O calor gerado na zona terciária pode ocorrer mesmo que a ferramenta não apresente desgaste. Ele também contribui para o aumento da temperatura da ferramenta e da peça devido à deformação imposta pela pressão da linha de corte sobre a superfície usinada [Fleischer *et al.*, 2007].

O calor gerado durante o processo de usinagem depende das propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte. Com o enfoque dado à melhor eficiência no processo com baixo custo, o estudo da influência dos parâmetros de corte é indispensável. Além disso, a velocidade de corte (v_c) é o parâmetro que mais influencia a geração de calor nas regiões de corte [Abukhshim *et al.*, 2006; Korkut *et al.*, 2007]. Conforme v_c aumenta, o processo de corte torna-se mais adiabático e o calor gerado na zona primária devido à deformação plástica não é conduzido para a ferramenta e para a peça devido o pequeno tempo de contato das partes com o cavaco (milissegundos), sendo essa energia dissipada através do cavaco; já a energia térmica gerada na zona secundária e terciária apresenta um fluxo de calor que ocorre em um tempo maior de contato e é responsável pela elevação da temperatura na ferramenta e na peça [Machado *et al.*, 2011].

A Figura 3.2 (a) representa as três regiões onde o calor é percebido, a Figura 3.2 (b) apresenta esquematicamente a transferência de calor entre o cavaco, a ferramenta e a peça.

3.3.1 Métodos de Medição de Temperatura

Medir temperatura e prever a distribuição de calor no processo de usinagem é extremamente difícil devido à estreita área de cisalhamento, aos obstáculos impostos pelos cavacos e devido ao contínuo movimento relativo entre inserto e a peça [Liang *et al.*, 2013].

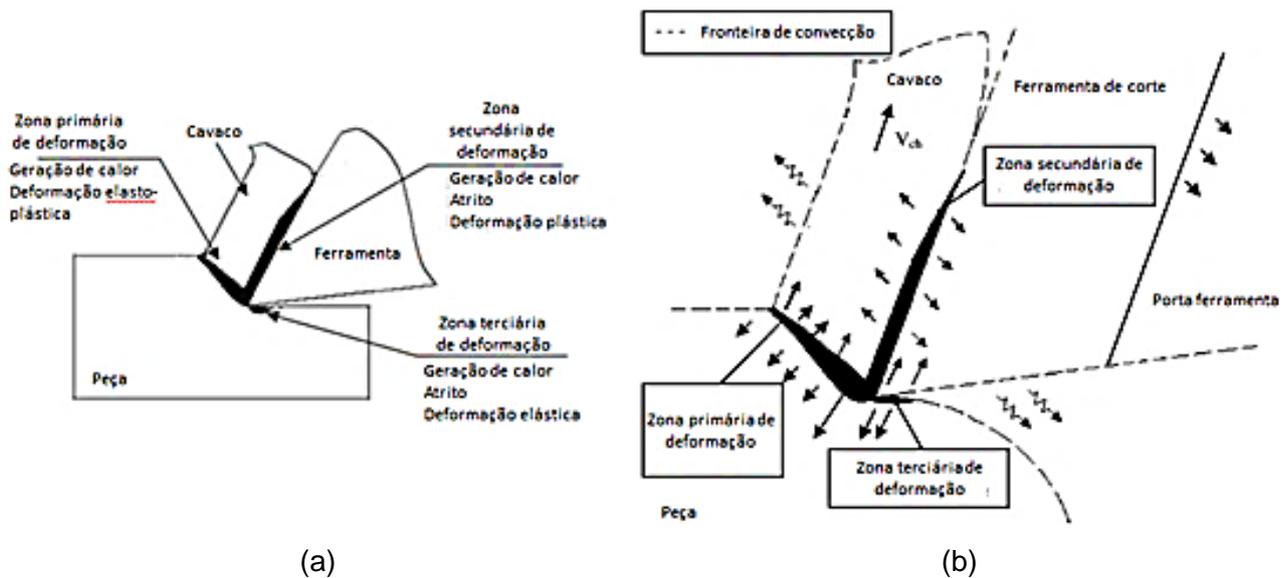


Figura 3.2: Fontes geradoras de calor numa peça sujeita à usinagem [Abukhshim *et al.*, 2006].

Os métodos de medição são divididos em: medição por termopar inserido, termopar ferramenta/peça, medição de calor através de radiação térmica, medição por vernizes termosensíveis, medição por propriedades metalográficas, medição usando pó químico e medição usando método do filme PVD [Machado *et al.*, 2011]. Porém, de acordo com Abukhshim *et al.*, 2006, os métodos do termopar inserido, termopar ferramenta/peça, radiação térmica e metalográfico são os mais utilizados.

- **Termopar inserido.** O método usa um termopar inserido dentro da ferramenta de corte através de um furo. Porém, a localização do termopar é fundamental para obtenção da temperatura na região do corte. O furo atrapalha o fluxo de calor, além de prejudicar a resistência da ferramenta de corte. O tempo de resposta é baixo e a usinagem do furo em insertos de metal-duro ou de cerâmica é difícil.
- **Termopar ferramenta/peça.** Baseia-se na formação de um termopar dinâmico entre o material da peça e o material da ferramenta – desde que sejam diferentes. A área de contato entre peça/ferramenta forma a junta quente a qual produz uma força eletromotriz que pode ser medida por equipamentos e transformada em temperatura. Esse método capta a média da temperatura e não registra temperatura local dada em um pequeno intervalo de tempo. Não permite o uso de fluido lubrificante. A peça e a ferramenta devem ser materiais condutores. O processo de calibração é complicado, pois produz significativo ruído e precisa ser refeito para qualquer combinação diferente de materiais de peça e ferramenta, além de todo o conjunto peça/ferramenta ter de estar isolado da máquina.
- **Sensor infravermelho.** O método não exige contato físico e mede a temperatura da superfície de um corpo baseado na radiação térmica que o mesmo emite. A técnica tem vantagens como resposta rápida, não interfere no fluxo de calor ou na resistência dos componentes, permite medir a temperatura de um objeto de difícil acesso e permite registrar o resfriamento da superfície. Porém, a posição de medição tem que ser corretamente selecionada. A formação de cavaco obstrui a medição. Faz-se necessário saber a exata emissividade da superfície em questão, sendo que essa propriedade varia com a temperatura devido à oxidação.
- **Metalográfico.** A medição da temperatura envolve a análise da microestrutura e da microdureza da zona afetada pelo calor com a utilização da ferramenta de corte. São necessárias curvas de calibração as quais fornecem a dureza do material em função da temperatura e do tempo de aquecimento. A técnica é limitada para materiais metálicos que sofrem variação microestrutural quando submetidos a uma temperatura entre 600 e 1000°C. Não permite registrar a temperatura do processo de usinagem em função do tempo permitindo apenas a mediação da temperatura máxima atingida no processo.

3.3.2 Termopar

São dispositivos usados para medição de temperatura a partir da aquisição da diferença de potencial (tensão elétrica ou força eletromotriz) gerada pela imposição de uma diferença de temperatura entre os extremos (juntas) de pares de fios com composições específicas [Schneider, 2012]. O princípio de funcionamento do termopar se deve ao efeito de Seebeck. Esse efeito se produz pelo fato de a densidade dos transportadores de carga (elétrons) de um metal diferir de um condutor para outro e depender da temperatura, ou seja, quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas juntas e estas são mantidas em temperaturas diferentes, a difusão dos transportadores de cargas nas junções se produz a ritmos também diferentes. Tem origem, então, um movimento dos transportadores de carga como se fossem impulsionados por um campo não eletrostático e a integral curvilínea desse campo ao longo do par termoelétrico é a *F.E.M.* (força eletromotriz) de Seebeck [Machado *et al.*, 2011]. A correspondência entre a variação de *F.E.M.* lida no equipamento e a diferença de temperatura lida entre as juntas do termopar é encontrada em tabelas que obedecem a ITS-90, Escala Internacional de Temperatura 1990 que propõe normas de calibração utilizando diferentes escalas de temperatura, (Celsius, Kelvin, Rankine, Fahrenheit, entre outras). Essa correspondência é não linear e o polinômio pode ser de ordem superior a 7 [Schneider, 2012].

$$F.E.M. \propto \Delta T = T_{quente} - T_{fria} \quad (3.1)$$

Em que a *F.E.M.* é a variação de tensão, T_{quente} é a temperatura da junta quente e T_{fria} é a temperatura da junta fria.

A temperatura T_{quente} é obtida através da variação da *F.E.M.* e do conhecimento da T_{fria} . A junta fria pode ter a sua temperatura lida com o auxílio de um sensor auxiliar ou estabelecida em um banho estável de alguma substância. O mais comum é empregar água destilada em um banho de fusão. Porém, muitos instrumentos digitais utilizados para leitura de temperatura já possuem uma tabela de correção embutida em sua memória. Assim, basta selecionar o tipo de sensor em uso para obter a temperatura da junta quente, sem que seja necessário construir uma junta fria.

A constante de tempo para termopares define-se como o tempo necessário, em segundos, para o termopar detectar 63,2% da temperatura em que o mesmo está submetido e o tempo total para o sensor responder a 100% da temperatura experimentada é de aproximadamente 5 vezes a constante de tempo [Schneider, 2012].

4 METODOLOGIA

O experimento se caracteriza pelo torneamento longitudinal externo a seco de 12 amostras de aço inoxidável martensítico AISI 420C tratados termicamente. O planejamento é composto por 6 combinações de parâmetros de entrada e uma repetição gerando as duplicadas dos parâmetros anteriormente utilizados. A ferramenta utilizada foi um inserto de metal duro com geometria tipo W e a máquina-ferramenta o torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II conforme apresenta a Figura 4.1.

4.1 Corpo de Prova

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram preparados seis corpos de prova de aço inoxidável martensítico AISI 420C endurecidos a 48 HRC (\cong 455 HB). A Figura 4.2 apresenta as dimensões dos corpos de prova. Esta geometria tem por objetivo facilitar a combinação dos seis diferentes parâmetros de corte utilizando um corpo de prova para cada parâmetro e a sua respectiva duplicada, assim é garantido que a usinagem de cada parâmetro (1) e a sua duplicada (2) seja executada com as mesmas condições – inclusive de corpo de prova.



Figura 4.1: Torno CNC Mazak QTN 100-II.

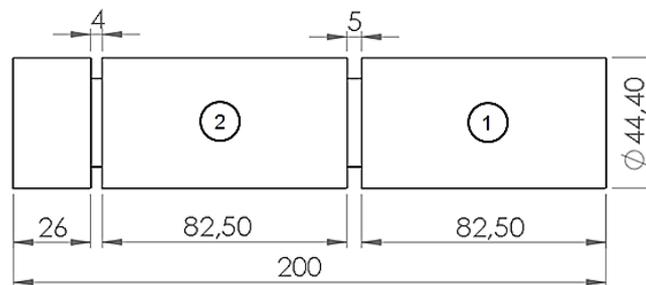


Figura 4.2: Dimensões do corpo de prova.

A Tabela 4.1 apresenta a composição química do aço AISI 420C utilizado para os corpos de prova dada em percentual de massa.

Tabela 4.1: Composição Química do Aço AISI 420 C.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
Massa [%]	0,37	0,34	0,36	0,04	0,009	12,28	0,48	0,07	0,09	0,0303
Dureza original		Limite de resistência				Limite de escoamento				
177 HB (\cong 8 HRC)		638 MPa				333 MPa				

A preparação dos corpos de provas para chegar à dureza de 48 HRC (\cong 455 HB) se deu através do processo de têmpera ao óleo e revenimento realizado na empresa Metaltécnica – Cachoeirinha, RS. Todos os experimentos foram iniciados com a mesma temperatura (temperatura ambiente).

4.2 Ferramenta de Corte

Para a realização da usinagem das amostras, utilizaram-se dois insertos de metal-duto Seco modelo WNMG 060404 MF1 TS2000 (seis arestas de corte) e porta-ferramenta Sandvik modelo MWLNR 2020K06, com ângulo de posição $\chi_r = 95^\circ$. O inserto possui quebra-cavaco (MF1) recomendado para a usinagem de acabamento de aços inoxidáveis, superligas e liga de titânio. Sua classe (TS2000) se caracteriza por apresentar microgrãos de alta dureza, apresenta elementos de liga tais como tungstênio, cobalto, cromo e carbono e sua cobertura PVD é formada por uma camada de (Ti, Al)N e por uma de TiN. A Figura 4.3 apresenta a geometria do inserto.

De modo a isolar a interferência do desgaste da ferramenta com o desenvolvimento do experimento, uma aresta de corte diferente foi utilizada em cada amostra.

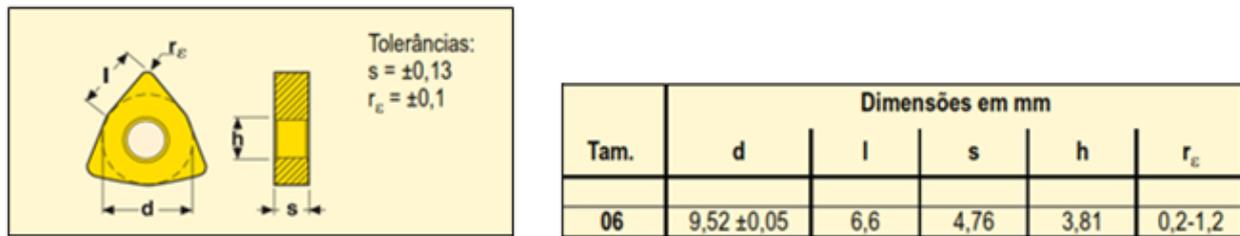


Figura 4.3: Dimensões do inserto SECO WNMG [SECO, 2014].

4.3 Parâmetros de Corte

Para o desenvolvimento deste trabalho estudou-se o comportamento da variação da temperatura nas amostras ao se realizar o torneamento longitudinal externo, respeitando as seis combinações distintas mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Parâmetros de corte utilizados no experimento.

a_p	A	v_{c1} [m/min] 60	f_1 [mm/volta] 0,1	B	v_{c1} [m/min] 60	f_2 [mm/volta] 0,2
	C	v_{c2} [m/min] 80	f_1 [mm/volta] 0,1	D	v_{c2} [m/min] 80	f_2 [mm/volta] 0,2
	E	v_{c3} [m/min] 100	f_1 [mm/volta] 0,1	F	v_{c3} [m/min] 100	f_2 [mm/volta] 0,2

A profundidade de corte (a_p) foi mantida constante em 0,5 mm. Os parâmetros apresentados na Tabela 4.2 foram estabelecidos com base nos dados recomendados pelo fabricante e optou-se por utilizar-se um maior número de velocidades de corte (v_c), uma vez que as referências bibliográficas indicam que ela tem maior influência na temperatura durante o processo de torneamento que o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p).

4.4 Aquisição de Dados de Temperatura

A aquisição de temperatura deu-se através de um sensor termopar tipo J, que tem como termoelemento positivo o Ferro puro e como termoelemento negativo o Constantan. A leitura e a coleta dos dados foram feitas através de um módulo de aquisição e registro de dados *FieldLogger*. Este é um módulo de leitura e registro de variáveis analógicas e digitais, com grande resolução e velocidade. É um equipamento de alto desempenho e alta conectividade. Além disso, possui um software próprio que gerencia suas funções. Toda a coleta de dados ocorreu em com um intervalo de aquisição de 100 ms entre pontos, ou 10 pontos por segundo.

Os erros associados aos termopares são definidos pelo máximo desvio que este pode apresentar em relação a um padrão absoluto. A Tabela 4.3 fornece o limite de erro para o termopar tipo J conforme recomendação da norma ANS MC 96.1, 1992.

Tabela 4.3: Faixa de utilização e limites de erro para termopar tipo J.

Tipo de Termopar	Faixa de Temperatura	Limites de Erro		Constante de Tempo
		Standard (escolher o maior)	Especial (escolher o maior)	
J	0 a 750°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,40%	0,5 s

O tempo de resposta do termopar está diretamente ligado ao sistema em que ele está inserido e está apresentado no item 4.4.1.

O sensor termopar foi inserido no porta-ferramenta através de um orifício que possibilitou o contato do sensor termopar com a superfície inferior do inserto. A Figura 4.4 apresenta o posicionamento do termopar.

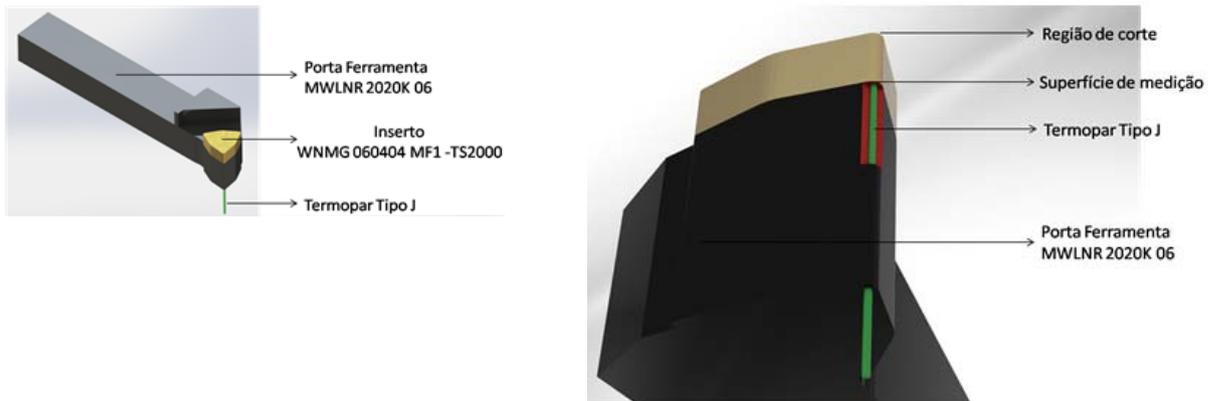


Figura 4.4: Imagem ilustrativa do conjunto porta ferramenta, inserto e termopar indicando a região de contato termopar/inserto.

A Figura 4.5 apresenta um esquema da ligação do sistema de aquisição de dados entre o termopar tipo J, o módulo de coleta de dados FielLogger e o notebook.

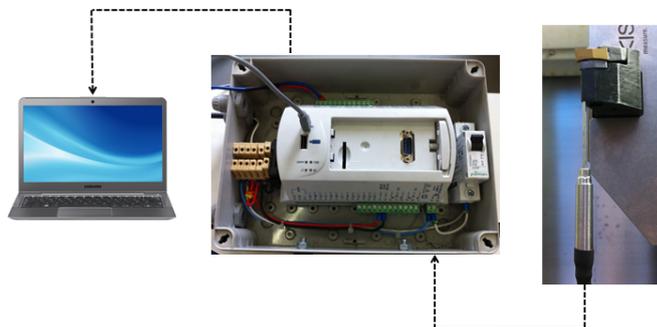


Figura 4.5: Esquema de ligação para aquisição de temperatura através do termopar tipo J.

4.4.1 Tempo de Resposta do Sistema

O tempo de resposta do termopar tipo *J* com isolamento mineral inserido no sistema porta ferramenta/ferramenta/peça foi obtido através de forma experimental torneando uma amostra do corpo de prova (vide Fig. 4.2) com a combinação **A** (vide Tab. 4.2) – menores valores de velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min) e avanço ($f = 0,1$ mm/volta.) –, uma vez que esta apresenta a menor taxa de crescimento da temperatura no sistema.

Com a definição do tempo de resposta, em segundos, é possível verificar a correta aplicação do sensor para os demais parâmetros calculando o tempo de corte (t_c) para um comprimento usinado $L = 82,5$ mm através da equação (4.1) [Souza, 2011]:

$$t_c \text{ [s]} \cong \frac{675}{f \cdot v_c} \quad (4.1)$$

O tempo de corte t_c [s] para cada combinação de parâmetros está apresentado na Tabela 4.4, juntamente com a taxa de remoção de material Q [cm³/min].

Tabela 4.4: Tempo de corte para cada combinação

Combinação	a_p [mm]	f [mm/volta]	v_c [m/min]	Q [cm ³ /min]	t_c [s]
A	0,5	0,1	60	3,0	112,5
C			80	4,0	84,4
E			100	5,0	67,5
B		0,2	60	6,0	56,3
D			80	8,0	42,2
F			100	10,0	33,8

Como todas as combinações de parâmetros utilizadas têm um tempo de corte superior a 2,5 s (tempo necessário para que o termopar leia 100% da temperatura), o sensor é adequado para os experimentos de forma qualitativa uma vez que desconsidera o efeito de capacitância do inserto e a respectiva constante de tempo.

4.5 Área da Seção Transversal do Cavaco

A área da seção transversal do cavaco foi medida através do microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT com auxílio do software DinoCapture 2.0. O microscópio possui resolução de 1,3 Megapixels e ampliação total de 200x. O cavaco foi fixado em uma base com massa de modelar permitindo ajustar o paralelismo entre a seção transversal do cavaco com o plano do microscópio. Com o DinoCapture, determinou-se a área do polígono (PG) traçado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados foram analisados avaliando a influência dos parâmetros de usinagem na temperatura gerada na superfície inferior do inserto. O primeiro dado analisado foi o tempo de resposta do sistema e a validação do uso do termopar tipo J para todos os experimentos, posteriormente foi analisada a variação de temperatura para cada uma das seis combinações de parâmetros observando a temperatura registrada no instante de tempo entre 20 e 30 segundos e a máxima temperatura do processo no final do passe.

5.1 Período de Estabilização do Sistema Termopar, Inserto e Peça.

Com o intuito de determinar se a temperatura iria crescer e se estabilizar em tempo hábil para um comprimento usinado $L = 82,5$ mm foi analisado o comportamento dos gráficos gerados para os valores médios de temperatura relativos às seis combinações de parâmetros (Fig. 5.1). Foram analisadas duas situações: Fig. 5.1 (a) do início do corte até a estabilização térmica do sistema; Fig. 5.1 (b) da estabilização térmica do sistema até um tempo inferior a 33,8 s (menor tempo de corte).

Na Figura 5.1(a), observa-se que as curvas apresentam crescimento logarítmico até aproximadamente 20 s para todas as combinações. A partir desse instante foi admitido que o sistema porta ferramenta/inserto/peça entra em equilíbrio térmico. Já a Figura 5.1(b) mostra um crescimento considerado linear da temperatura no intervalo de 20 a 30 s. Acredita-se que em algum momento a temperatura chegará a um patamar e desse valor não passará, porém seria necessário um corpo de prova muito comprido e a utilização de uma combinação de parâmetros de corte que permitisse um tempo de corte longo a fim de visualizar esse acontecimento, fugindo da disponibilidade de material e equipamento para o experimento.

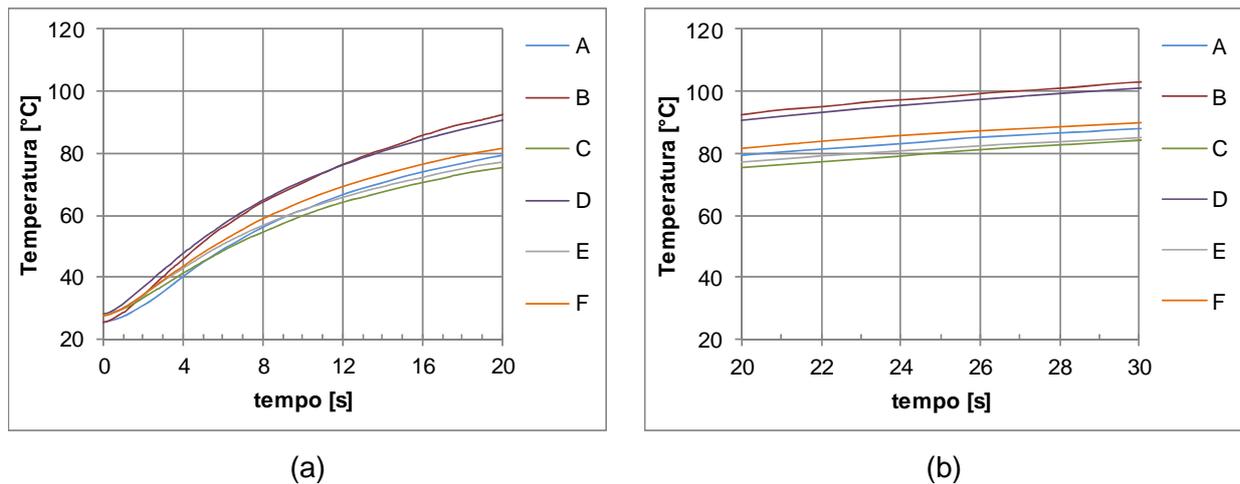


Figura 5.1: Curvas para análise do tempo de resposta do sistema

5.2 Influência dos Parâmetros de Corte na Variação de Temperatura

A Figura 5.2 apresenta a variação da temperatura atingida no processo no intervalo de tempo de 20 a 30 s de usinagem para cada combinação de parâmetros. A média e a incerteza expandida (confiança de 95%, $t = 2,09$) de cada temperatura foram tomadas a partir de 10 pontos coletados para cada extremo (de 19,5 a 20,5 s e de 29,5 a 30,5 s) em cada ensaio realizado sob as mesmas condições de usinagem.

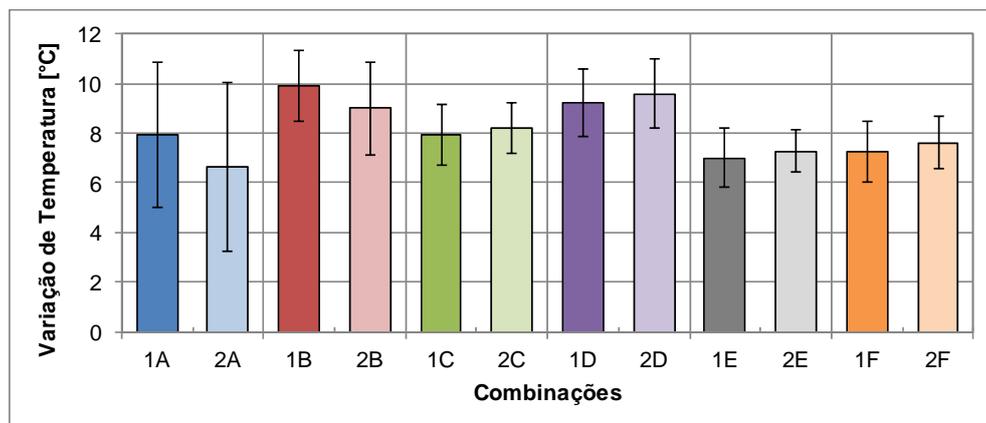


Figura 5.2: Variação da temperatura no intervalo de tempo de 20 a 30 s para cada combinação de parâmetros.

A Figura 5.3 apresenta a variação percentual da temperatura quando o avanço (f) passa de 0,1 mm/volta para 0,2 mm/volta para uma mesma velocidade de corte (v_c). Pode-se observar que houve um aumento da temperatura com o incremento do avanço de 30%, 17% e 4% para as velocidades de corte $v_c = 60, 80$ e 100 m/min respectivamente. Isto ocorre, pois quanto maior o avanço (f), maior é a taxa de remoção de material (Q) e maior é a energia térmica gerada [Trent e Wright, 2000]. Além disso, conforme Machado *et al*, 2011, a quantidade de calor gerada na usinagem aumenta diretamente com a força de corte. Como a força de corte aumenta conforme aumenta o avanço, um aumento do avanço aumenta o calor gerado.

A Figura 5.4 apresenta a variação percentual da temperatura quando a velocidade de corte (v_c) passa de 60 para 80 m/min e de 80 para 100 m/min para um mesmo avanço (f). Para o avanço $f = 0,1$ mm/volta, o aumento da velocidade de corte de 60 para 80 m/min (incremento de 33,3%) causa um aumento de 11% na temperatura medida, enquanto que o aumento da velocidade de corte de 80 para 100 m/min (incremento de 25%) causa uma redução na

temperatura de 11,5%. Já para $f = 0,2$ mm/volta, o primeiro caso gera uma redução na temperatura de 0,5% e o segundo uma diminuição de 21%.

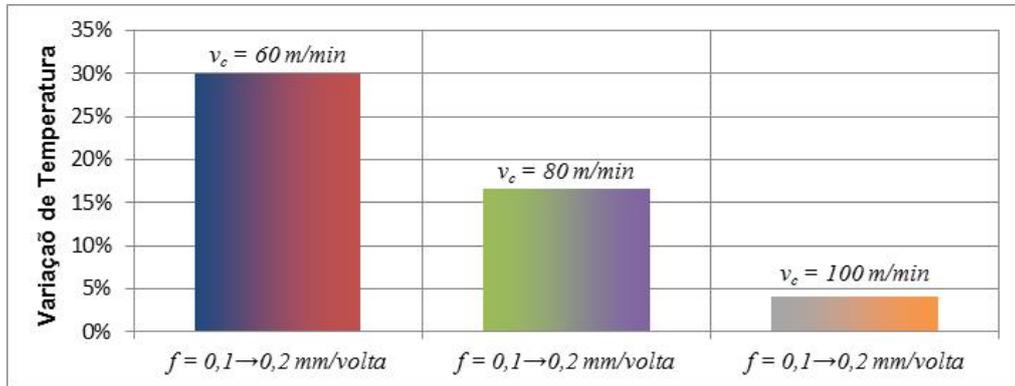


Figura 5.3: Variação percentual da temperatura para as três velocidades de corte quando o avanço é incrementado em 100%.

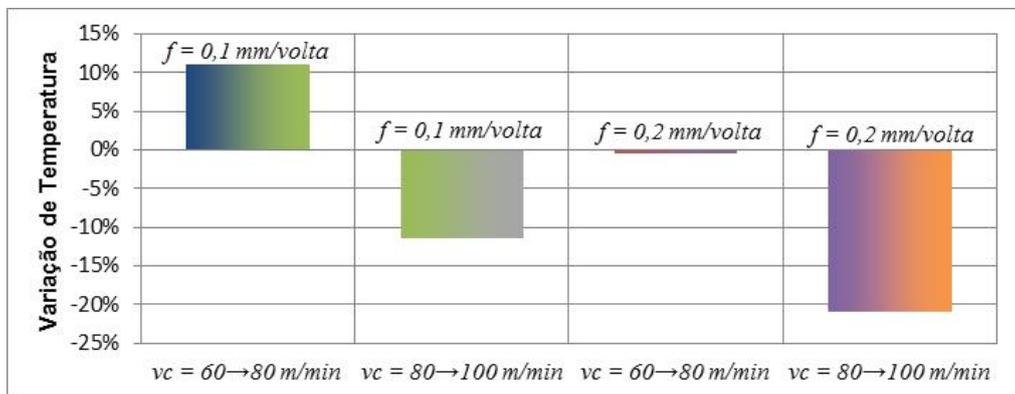


Figura 5.4: Variação percentual da temperatura para os dois avanços quando a velocidade de corte é incrementada de 33,3% e 25%

Conforme Diniz *et al*, 2010, a porcentagem de calor total que é dissipado pelo cavaco aumenta com o aumento da velocidade de corte, ou seja, o aumento da velocidade de corte diminui a quantidade de calor que vai para a ferramenta, conseqüentemente a temperatura. Além disso, o aumento da velocidade de corte promove uma diminuição do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, fazendo com que o cavaco deslize com mais facilidade pela superfície de saída da mesma. Conseqüentemente, uma diminuição da velocidade de corte faz com o coeficiente de atrito aumente, promovendo um aumento do calor gerado com o aumento do atrito entre o cavaco e a ferramenta (zona secundária). Este atrito faz com que o material da peça se acumule na zona de aderência dessa superfície. A Figura 5.5 comprova esta situação, mostrando a menor aderência do material com o aumento da velocidade de corte.

Outra hipótese para a diminuição da temperatura é a provável redução da deformação do cavaco com o aumento da velocidade de corte: quanto menor a deformação do material na zona primária, menor o calor gerado. A figura 5.6 apresenta a imagem da seção transversal do cavaco gerado para o avanço $f = 0,2$ mm/volta nas três situações de velocidade de corte.

Sabe-se que a área da seção transversal de corte é dada por $A = a_p \cdot f = 0,1 \text{ mm}^2$. Sendo assim, a deformação pode ser quantificada pelo quociente entre a área da seção transversal do cavaco (medida) e a área calculada (A). Portanto, conclui-se que maior energia de deformação é gerada para $v_c = 60$ m/min ($R_{60} = 2,24$) – conseqüentemente maior calor gerado – e a menor para $v_c = 100$ m/min ($R_{100} = 1,17$).

A partir das hipóteses descritas acima, pode-se dizer que mesmo tendo uma maior geração de calor devido o aumento da taxa de remoção de material (Q), não necessariamente

o inserto esteve suscetível a uma maior temperatura, pois os mecanismos de remoção de calor, principalmente o cavaco, tiveram grande influência na dissipação do calor gerado.

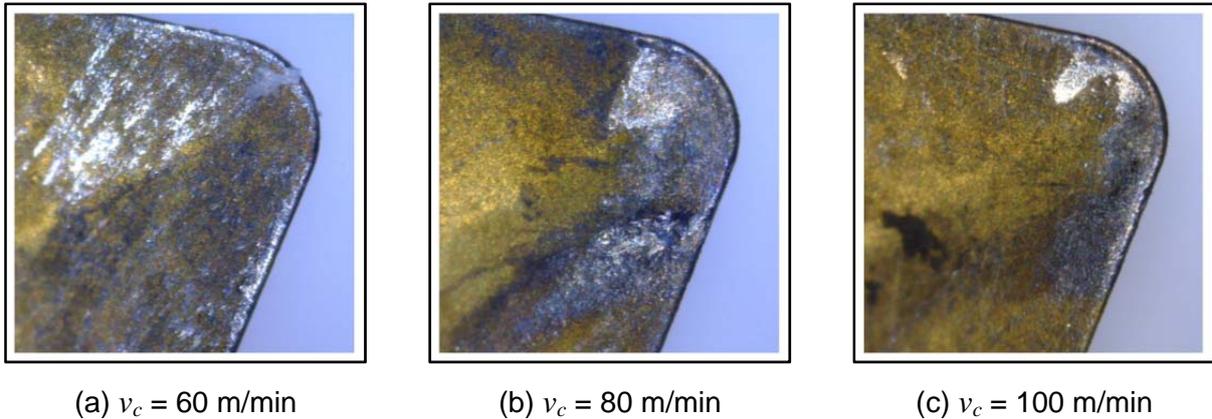


Figura 5.5: Imagens da superfície de saída da ferramenta de corte captadas pelo microscópio digital AM-413ZT mostrando a aderência de material da peça no inserto (ampliação 200x).

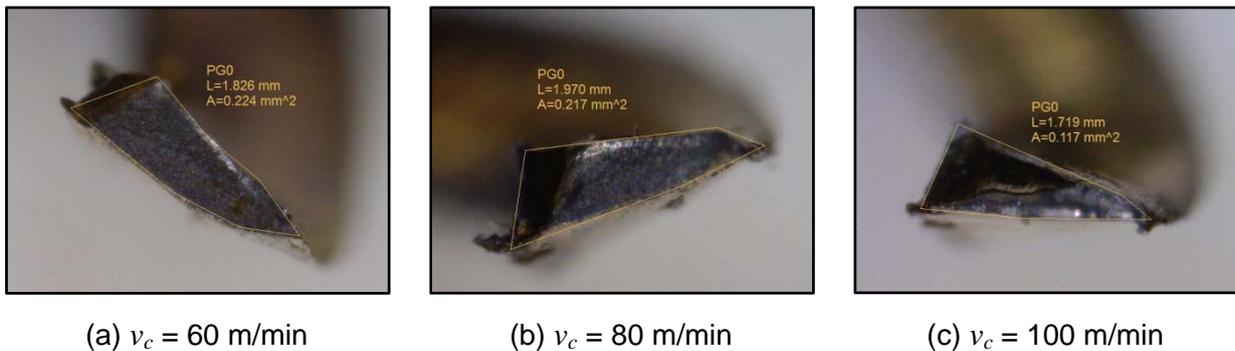


Figura 5.6: Imagens das seções transversais dos cavacos captadas pelo microscópio digital AM-413ZT e processadas pelo software DinoCapture (ampliação 200x).

A Figura 5.7 apresenta o percentual de influência da velocidade de corte, do avanço e da combinação entre ambos na variação da temperatura para o instante entre 20 e 30 s. Para a variação de temperatura observada entre os instantes 20 e 30 s o avanço foi o parâmetro de entrada com maior influência (20,2%). A velocidade de corte apresentou uma influência moderada de 9,5% e o efeito combinado (v_c e f) a menor influência (4,7%).

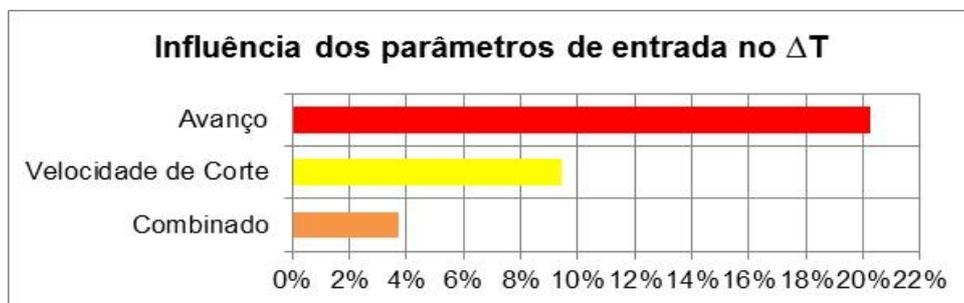


Figura 5.7: Percentual da influência das variáveis de entrada na variação de temperatura para o intervalo de 20 a 30 s.

A Figura 5.8 apresenta a variação da temperatura atingida no processo no intervalo de tempo de 20 s até o tempo de corte t_c , ou seja, a variação entre a temperatura máxima atingida

no processo e a temperatura inicial do processo para cada combinação de parâmetros (Tab. 4.4). A média e a incerteza expandida (confiança de 95%, $t = 2,09$) de cada temperatura foram tomadas a partir de 10 pontos coletados em cada extremo para cada ensaio realizado sob as mesmas condições de usinagem.

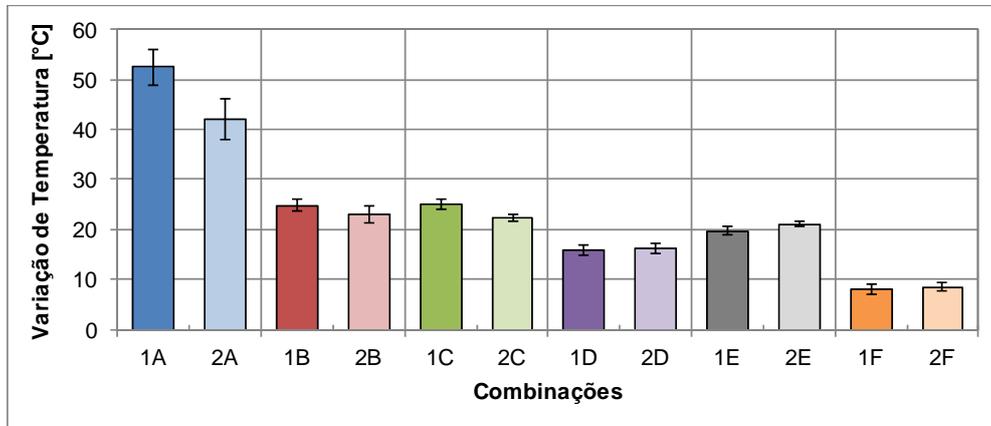


Figura 5.8: Variação da temperatura no intervalo de tempo de 20 s a t_c (Tab. 4.4) para cada combinação de parâmetros.

Observa-se em todas as combinações da Figura 5.8 que quanto maior a velocidade de corte (v_c) menor a variação da temperatura medida pelo sistema – com exceção da combinação **D**. Além disso, é possível também perceber que quanto maior o avanço menor a variação da temperatura. Uma suposição é que conforme o avanço aumenta, o tempo de usinagem diminui significativamente (ver Tabela 4.3), tornando menor o tempo de contato entre a ferramenta e a peça e, conseqüentemente, diminuindo a temperatura máxima medida.

A Figura 5.9 apresenta a média dos valores registrados de temperatura relativos às amostras 1 e 2 para cada combinação de parâmetros num comprimento torneado $L = 82,5$ mm.

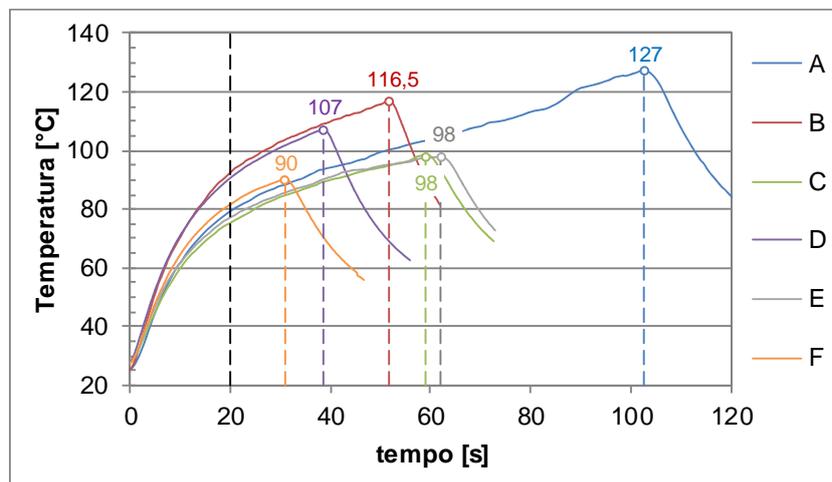


Figura 5.9: Temperatura em função das seis combinações de parâmetros utilizadas.

Analisando os resultados para o instante de tempo entre 20 e 30 s (Fig. 5.2), juntamente com a variação de temperatura entre 20 s e o tempo de corte (t_c) para cada combinação (Fig. 5.8), foi notada uma contradição na variação de temperatura quando variado o avanço. No primeiro caso, quanto maior o avanço maior a temperatura. Já no segundo caso quanto maior o avanço menor a temperatura máxima. Na Figura 5.9 é possível visualizar esse acontecimento, onde as combinações **B**, **D** e **F** atingiram uma temperatura maior mais rapidamente, porém, não chegaram a patamares tão elevados quando comparadas com as combinações **A**, **C**, e **E** respectivamente, pois o processo de torneamento foi concluído em menor tempo. Ressaltando

que a temperatura medida não reflete necessariamente a temperatura na interface inserto/peça.

Isso sugere que utilizando o avanço máximo permitido pelo inserto tem-se uma maior taxa de crescimento da temperatura, ou seja, a temperatura atinge patamares mais altos em um menor intervalo de tempo. Porém, como todas as peças usinadas tinham o mesmo comprimento ($L = 82,5$ mm), a variação máxima temperatura diminuiu conforme diminuiu o tempo de corte t_c .

Comparando os dois extremos, combinações **A** ($v_c = 60$ m/min e $f = 0,1$ mm/volta) e **F** ($v_c = 100$ m/min e $f = 0,2$ mm/volta) pode-se ver uma redução no tempo de corte de 112,5 para 33,8 s, ou seja, uma redução de 232,8%. Além disso, tem-se um aumento na taxa de remoção de material Q de 233,3% com uma redução na variação de temperatura de aproximadamente 47°C em **A** para 8°C em **F**, ou seja, uma redução de 487,5%.

6 CONCLUSÃO

O trabalho conseguiu com sucesso conclusões a respeito da variação de temperatura durante o processo de torneamento do aço AISI 420C endurecido.

Dentre as combinações de parâmetros utilizadas, aquela que apresentou os melhores resultados nos experimentos foi a Combinação **F** (profundidade de corte fixa $a_p = 0,5$ mm, maior velocidade de corte $v_c = 100$ m/min e maior avanço $f = 0,2$ mm/volta). Com essa, foi obtida a menor variação de temperatura aliada com a maior taxa de remoção de material e o menor tempo de usinagem. Ademais, concluiu-se pelo teste de variância que o parâmetro de avanço tem maior impacto na variação da temperatura do que a velocidade de corte.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a correlação dos parâmetros de corte com a tensão residual gerada pelo processo de torneamento e a medição da temperatura da peça durante o processo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abukhshim, N. A.; Mativenga, P. T.; Sheikh, M. A.; **“Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 46, n.7-8, p.782-800, 2006.

Brinksmeier, E.; Cammett, J.T.; Köning, W.; Leskovar, P.; Peters, J.; Tönshoff, H. K.; **“Residual Stresses – Measurement and causes in machining processes”**, CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 31, n.2, p. 491-510, 1982.

Denkena, B.; Köhler, J.; Mengesha, M. S.; **“Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces and cutting temperature”**, Production Engineering – Research and Development, v. 6, n. 4-5, p. 329-338, 2012.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. **“Tecnologia da usinagem dos materiais”** São Paulo: Editora Artliber, 7 ed, 2010, 268 p.

Dogra, M.; Sharma, V. S.; Sachdeva, A.; Suri, N. M.; Dureja, J. S.; **“Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review”**, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v. 11, n. 2, p. 341-358, 2010.

Favorit, **“Aços inoxidáveis: Aço AISI 420C”**. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-420-c>>. Acesso em 29/09/2014.

Fleischer J.; Pabst R.; Kelemen S. **“Heat Flow Simulation for Dry Machining of Power Trains Castings”**, CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.56, n.1, p. 117-122, 2007.

IOPE, **“Literatura de Termopares”**. Disponível em: <http://www.iope.com.br/3ia1_termopares.htm>. Acesso em 20/08/2014.

Jang, D. Y.; Watkins, T. R.; Kozaczek, K. J.; Hubbard, C. R.; Cavin, O. B.; **“Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel”**, Wear, v.194, n. 1-2, p.168-173, 1996.

Korkut, I.; Boy, M.; Karacan, I.; Seker, U.; **“Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters”**, Materials & Design, v. 28, n. 8, p. 2329–2335, 2007.

Liang, L.; Xu, H.; Ke, Z.; **“An improved three-dimensional inverse heat conduction procedure to determine the tool-chip interface temperature in dry turning”**, International Journal of Thermal Sciences, v. 64, p. 152-161, 2013.

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B.; **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, São Paulo: Edgard Blücher, 2.ed, 2011, 400 p.

Porto, J. P. S. **“Aços Inoxidáveis Planos”**, Editora Unisinos, 2012, 168 p.

Schneider, P.S. **“Termometria e Psicrometria”**, Energia & Fenômenos de Transporte, Medidas Térmicas – ENG03108, 2012, 36 p.

SECO, **“MN2012 - Torneamento”**. Disponível em: <http://www.secotools.com/pt-BR/Global/Services--Support/Machining-Navigator/>. Acesso em 02/10/2014.

Souza, A.J.; **“ENG03343 – Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1: Fundamentos da usinagem dos materiais”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS /Apostila/, 2011, 89 p.

Sreejith P.S.; Ngoi B.K.A. **“Dry machining: Machinin of the future”**, Journal of Materials Processing Technology, v.101, n. 1-3, p. 287-291, 2000.

Trent E.M.; Wright P.K.; **“Metal Cutting”**, Butterworth-Heinemann, 2000, 464 p.