

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

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO DA FACE DE UMA PEÇA DE AÇO-CARBONO GERADO  
PELO PROCESSO DE SANGRAMENTO RADIAL EM FUNÇÃO DA LARGURA DE CORTE

por

Maurício Rudi Peiter

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 2015.

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO DA FACE DE UMA PEÇA DE AÇO-CARBONO GERADO  
PELO PROCESSO DE SANGRAMENTO RADIAL EM FUNÇÃO DA LARGURA DE CORTE

por

Maurício Rudi Peiter

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. André João de Souza

Coorientador: Eng. Elias Samuel Cristo Espindola

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 26, junho de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor doutor André João de Souza, pela orientação.

Ao mestrando e coorientador, Elias Samuel Cristo Espindola, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Guilherme Vargas Schirmer, por sua participação principalmente durante o desenvolvimento experimental.

Ao Arsenal de Guerra General Câmara (AGGC), pelas ferramentas de corte cedidas para testes.

À empresa Bondmann Química pela doação do fluido biolubrificante BD-Fluid B90.

À empresa Quimatic®-Tapmatic®, pela doação do fluido de corte Quimatic Jet e do dispositivo Nebulizador IV para aplicação do fluido por névoa através da técnica MQF.

À empresa Aços Favorit, pelo material necessário ao desenvolvimento do trabalho.

PEITER, M. R. **Avaliação do acabamento da face de uma peça de aço-carbono gerado pelo processo de sangramento radial em função da largura de corte.** 2015. 22p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## RESUMO

Sangramento radial é um processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea e perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, e visa obter um entalhe circular em uma peça. Durante o processo podem ocorrer vibrações causadas pela interação da geometria da ferramenta com os esforços de corte. Como consequência, estas vibrações podem deteriorar o acabamento da superfície usinada. Diante disso, realizou-se a avaliação da influência dos parâmetros de corte nesta vibração. Consideraram-se duas situações de lubrificação (em abundância e em mínima quantidade “MQF”), duas velocidades de corte ( $v_c$ ) e três larguras de corte ( $a_e$ ) no faceamento de acabamento do aço ABNT 1045. O avanço por volta ( $f$ ) foi considerado constante. Para essa avaliação, realizou-se a análise da rugosidade da face com um rugosímetro portátil, da ondulação da superfície através de uma máquina de medição por coordenadas e da imagem da face captada por meio de um microscópio digital. Assim, intencionou-se verificar se “ $a_e$ ” tem influência significativa na variação da força longitudinal à peça ( $F_z$ ) e na qualidade da superfície faceada de forma isolada ou combinada a “ $v_c$ ” e ao meio lubrificante. Os resultados mostraram que o método MQF apresentou os menores valores das forças em relação ao método em abundância e o aumento de “ $a_e$ ” e de “ $v_c$ ” geram maiores valores das forças. No acabamento da face verificou-se que o fluido em abundância originou valores de rugosidades um pouco menores que por MQF. Constatou-se também que com  $a_e = 2,5$  mm, o método MQF apresentou valores de rugosidade cerca de 3 vezes maior que em abundância. Com a alteração da inclinação do bico aspersor de  $90^\circ$  para  $45^\circ$  demonstrou-se que a posição da aplicação do spray influencia diretamente na capacidade de lubrificação. No caso, as forças foram reduzidas e o acabamento superficial melhorado significativamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** sangramento radial, faceamento, mínima quantidade de fluido.

PEITER, M. R. **Evaluation on the steel finish facing by grooving tool in function of groove width**. 2015. 22p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## ABSTRACT

Grooving is a turning process in which the tool moves in a straight trajectory and perpendicularly to the main axis of the spindle machine, and it aims to make a circular notch on the workpiece. Vibrations caused by the interaction between the tool geometry and the shear stress may occur during the process. Consequently, these vibrations can damage machined surface finishing. Therefore, it was performed the evaluation of the cutting parameters influence on this vibration. Two cutting fluid applications (abundant and minimum quantity fluid “MQF”), two cutting speeds ( $v_c$ ) and three groove widths ( $a_e$ ) was considered in the ABNT 1045 finish facing. A feed-rate ( $f$ ) was maintained fixed. The surface roughness with a portable rugosimeter, the waves on machining face via coordinate-measuring machine and the workpiece face image by a digital microscope was carried out for this study. Therefore it was aimed to verify if “ $a_e$ ” has significant influence on the longitudinal force variation ( $F_z$ ) and the facing surface quality isolate or combined way with “ $v_c$ ” and cutting fluid. The results showed that the MQF method had the lowest values of the forces in relation to the cutting fluid in abundance and the increase “ $a_e$ ” and “ $v_c$ ” generate higher values of the forces. In the face finishing it was found that the cutting fluid in abundance gave slightly lower roughness values than MQF. It was also found that with  $a_e = 2.5$  mm, the MQF method produced roughness values about 3 times higher than the cutting fluid in abundance. By changing the sprinkler nozzle tilt from 90 to 45 degrees, it was observed that the spray application position influences the cutting fluid capacity directly. In this case, the forces have been reduced and significantly improved surface finishing.

KEYWORDS: grooving, facing, minimum quantity fluid.

## SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO .....	1
2.OBJETIVOS .....	2
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
3.1 Forças de Usinagem .....	2
3.2 Acabamento Superficial .....	3
3.3 Lubrificação .....	4
4.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	4
4.1 Preparação dos Corpos de Prova .....	4
4.3 Preparação e Execução dos Experimentos .....	5
4.4 Mensuração das Forças .....	6
4.5 Medição de Rugosidade .....	7
4.6 Imagens das Superfícies Usinadas .....	7
4.7 Medida das Alturas dos Corpos de Prova .....	7
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	8
5.1 Avaliação das Forças de Usinagem .....	8
5.2 Avaliação das Rugosidades .....	10
5.3 Análise dos Desvios (Oscilações) na Superfície dos Corpos de Prova .....	12
5.4 Alteração do Ângulo de Aplicação do Bico Aspessor de MQF .....	12
6.CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
APÊNDICE .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O sangramento radial (Fig. 1a) é um processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea e perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, e visa obter um entalhe circular em uma peça [Ferraresi, 1995].

Este processo é muito utilizado para produzir um canal na superfície cilíndrica da peça. As ferramentas de corte são lâminas finas que realizam cortes de pequena largura que podem ter grande profundidade. Quando a largura do canal for maior que a largura da ferramenta de corte ( $b$ ) existirá a possibilidade da ferramenta de corte se desviar para o lado devido à falta de apoio lateral [Fitzpatrick, 2013]. Essa tendência de desvio para o lado causa vibrações na superfície das peças e, como consequência, estas podem deteriorar o acabamento usinado.

No caso de um processo sangramento em que não há um apoio lateral e cuja largura de corte ( $a_e$ ) é menor ou igual à largura da ferramenta, tem-se assim um processo de faceamento com ferramenta de sangrar (Fig. 1b).

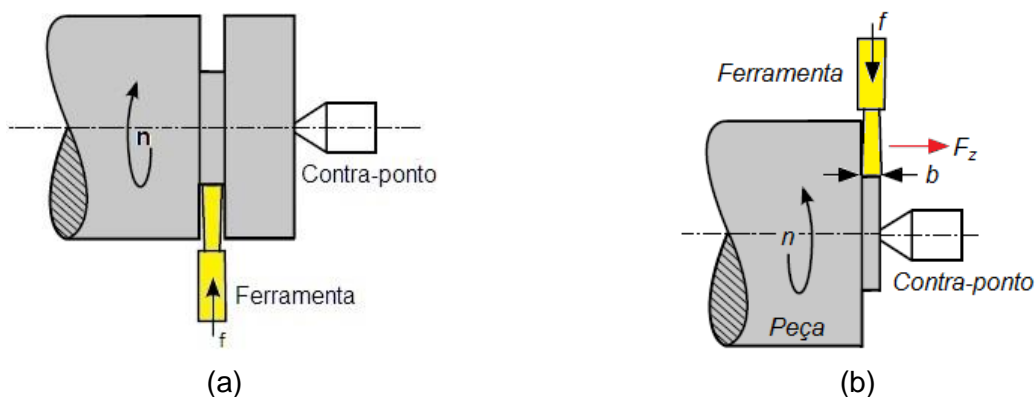


Figura 1: Torneamento radial com ferramenta de sangrar: (a) corte de canal; (b) faceamento.

O faceamento é um processo que se obtêm quando se desloca a ferramenta em sentido normal ao eixo de rotação da peça. O objetivo do faceamento é fazer no material uma superfície plana perpendicular ao eixo da máquina [Ferraresi, 1995].

Para reduzir a vibração é recomendada por Witte, 1998, a correta fixação da peça à máquina, de modo que a força de fixação seja maior que a força de corte e, além disso, alguns parâmetros de corte devem ser devidamente ajustados. Entre estes parâmetros destacam-se a velocidade de corte ( $v_c$ ), o avanço por volta ( $f$ ), a largura de corte ( $a_e$ ) e o meio lubrificante [Fitzpatrick, 2013]. As condições de corte citadas anteriormente afetam a pressão específica de corte ( $k_s$ ) e, em decorrência, estas afetam a força de usinagem.

Segundo Machado *et al.*, 2011, os valores de  $k_s$  tendem a diminuir com o aumento da  $v_c$  e, conseqüentemente, pelo aumento da temperatura gerada pelo incremento de  $v_c$  devido à diminuição da deformação e da natureza do cavaco e dos coeficientes de atrito nas interfaces peça/ferramenta/cavaco. Por outro lado, Ferraresi, 1995, menciona que somente em baixas velocidades de corte que os fluidos de corte contribuem para a redução da força de usinagem. Esta diminuição é tanto maior quanto mais eficiente for a penetração do fluido e quanto maior for o efeito lubrificante na zona de contato ferramenta/cavaco.

Muito se tem estudado na última década com o objetivo de evitar ou minimizar a utilização de fluidos de corte no processo de usinagem, tentando não perder ganhos alcançados principalmente com relação à vida da ferramenta e à qualidade da peça. Uma alternativa para a substituição do fluido de corte é conhecida como MQF (mínima quantidade de fluido) [Diniz *et al.*, 2013]. A utilização da técnica MQF é, sob o ponto de vista ecológico, mais adequada que o uso de fluido por inundação, e oferece riscos menores à saúde dos operadores (desde que os aspectos relativos à coleta de resíduos sejam considerados). As máquinas devem possuir vedação adequada e sistemas de aspiração e coleta de cavacos e da névoa atomizada. Com isso, a redução da utilização de fluidos de corte permite ganhos de preservação do meio ambiente, redução de custos e melhores condições de trabalho no ambiente fabril [Zeilmann *et al.*, 2009].

## 2. OBJETIVOS

Verificar no processo da faceamento com ferramenta de sangrar (vide Fig. 1b) se a largura de corte ( $a_e$ ) influi de maneira significativa na variação da força axial ( $F_z$ ) e na qualidade da superfície faceada de forma combinada ou isolada à velocidade de corte ( $v_c$ ) e ao meio lubrificante. Além disso, espera-se determinar se a utilização do meio de lubrificação por MQF é viável sem perdas de qualidade superficial frente à lubrificação tradicional.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Forças de Usinagem

A força de usinagem ( $F_u$ ) é a força total que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem [Ferraresi, 1995]. Em torneamento, a  $F_u$  pode ser decomposta em suas componentes ortogonais, sendo  $F_x$  a componente radial,  $F_y$  a componente tangencial e  $F_z$  a componente axial da força. Assim, a intensidade de  $F_u$  pode ser calculada pela Equação (3.1):

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.1)$$

Cada uma das componentes da  $F_u$  varia no tempo (dinâmica do processo) e podem ser expressas como  $F = \bar{F} \pm \Delta F$ , onde  $\bar{F}$  é a média da força e  $\Delta F = Re$  é a variação de amplitude da força (Fig. 2a). No sangramento radial, o sentido do movimento de avanço é perpendicular à peça, dessa forma as componentes ortogonais da  $F_u$  assumem as direções representadas na Figura 2b. Dessa forma, a componente axial  $F_z$  pode caracterizar as deformações, os esforços e as vibrações que a ferramenta de sangrar sofre durante o movimento de corte na operação de faceamento (vide Fig. 1b).

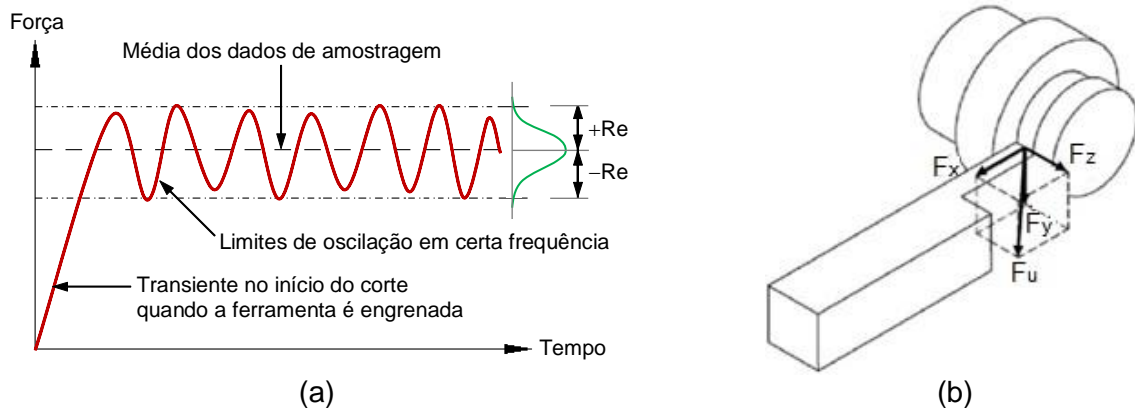


Figura 2: (a) Esquema do sinal da força vs. tempo; (b) Força de usinagem e suas componentes em um processo de sangramento radial.

A componente tangencial da força de usinagem pode ser expressa pela Equação (3.2):

$$F_c = k_s \cdot A \quad (3.2)$$

Onde  $k_s$  é a pressão específica de corte e  $A$  é a área da seção transversal de corte.

A pressão específica de corte diminui com a área da seção de corte (no caso,  $A = a_e \cdot f$ ). Essa diminuição de  $k_s$  é devida ao aumento do avanço por volta ( $f$ ). Durante o processo de formação do cavaco, parte do volume de material deformado da peça não se transforma em cavaco, mas sim escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, gerando o chamado fluxo lateral de cavaco. A força consumida por esse fenômeno é relativamente



grande quando se tem  $f$  (ou espessura de corte  $h$ ) pequeno, pois o volume de material que se transforma em cavaco não é muito maior que o volume de material que flui lateralmente. À medida que  $f$  ou  $h$  crescem, o fluxo lateral de cavaco é relativamente menor, pois quase todo o material deformado se transforma em cavaco, fazendo com que  $k_s$  diminua. Outro fator que causa a diminuição de  $k_s$  com o crescimento de  $f$  é que a velocidade de avanço ( $v_f = f \cdot n$ ) também aumenta e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito diminui, pois o corte torna-se mais dinâmico [Diniz *et al.*, 2013].

As modificações das condições de atrito entre peça e ferramenta e entre ferramenta e cavaco influem sobre  $k_s$ . Assim sendo, quanto mais eficiente for a penetração do fluido e quanto maior for o seu efeito lubrificante, maior será a diminuição das componentes da força de usinagem. Entretanto, se o resfriamento também for muito eficiente poderá ocorrer o aumento das componentes das forças [Ferraresi, 1995].

### 3.2 Acabamento Superficial

As combinações da rugosidade superficial, ondulações, marcas e falhas irão determinar a qualidade geral de uma superfície usinada [Juneja e Swkhon, 1987; Shaw, 1984].

As ondulações consistem em erros geométricos ou irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas como rugosidades [Nunes, 2011]. Essas ondulações podem ser causadas por vibrações e deflexões da ferramenta ou da peça [Machado *et al.*, 2011]. Já marcas e falhas são interrupções na topografia típica da superfície de uma peça. Podem ser causadas por problemas inerentes ou podem surgir durante o processo de corte [Machado *et al.*, 2011].

Rugosidade são erros microgeométricos causados por um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície [ISO 4287, 2002]. A rugosidade de uma superfície é influenciada por diversos parâmetros; para a determinação da contribuição de cada parâmetro podem ser usados métodos estatísticos [Whitehouse, 1997].

O parâmetro de amplitude mais utilizado é a rugosidade média ( $R_a$ ); entretanto, segundo Machado *et al.*, 2009,  $R_a$  é um parâmetro que não recebe influência de efeitos ocasionais. Portanto, ela não deve ser analisada isoladamente. Conforme a Norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, o parâmetro de rugosidade  $R_a$  é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dentro do comprimento de medição  $L$ , conforme a Figura 3 e pode ser calculada pela Equação (3.3).

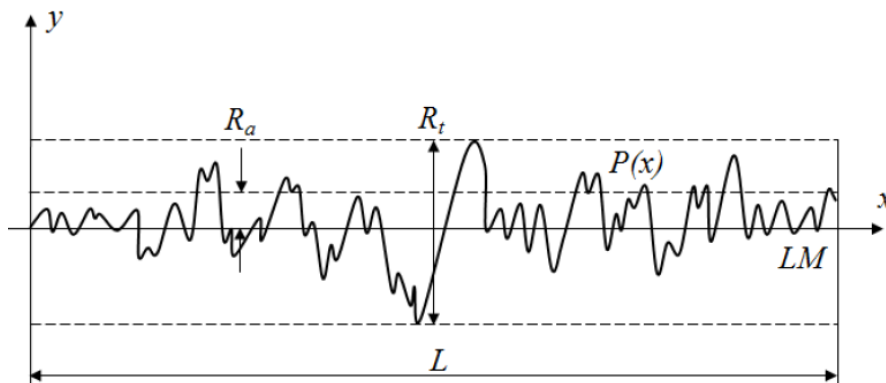


Figura 3: Rugosidades  $R_a$  e  $R_t$  em um perfil de superfície  $P(x)$  de uma amostra de comprimento  $L$  [Mello *et al.*, 2012].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |P(x)| dx \quad (3.3)$$

Para complementar a análise da rugosidade, o parâmetro da rugosidade total  $R_t$  pode ser empregado. Este é influenciado diretamente por qualquer irregularidade da superfície. A rugosidade  $R_t$  é definida pela Norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, como sendo a diferença entre a maior altura (pico) e a maior profundidade (vale) do perfil dentro do comprimento  $L$ .

### 3.3 Lubrificação

A lubrificação tem a função de introduzir uma melhoria no processo de usinagem, esta evolução pode ser de caráter funcional, proporcionando uma melhora de desempenho; ou de caráter econômico, proporcionando economia no processo [Diniz *et al.*, 2013].

Entre as funcionalidades destacam-se a redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, expulsão do cavaco da região de corte, refrigeração da ferramenta e da peça em usinagem e melhor acabamento da superfície usinada. Como realces no caráter econômico é possível citar a redução do consumo de energia de corte, redução do custo de ferramenta na operação e proteção da corrosão da peça em usinagem [Ferraresi, 1995].

Uma alternativa que vem sendo estudada nos últimos anos é a utilização do corte com Mínima Quantidade de Fluido (MQF). Este nome é dado ao procedimento de se pulverizar uma quantidade entre 20 e 500 ml/h de fluido em um fluxo de ar comprimido [Avelino, 2009]. A mistura de ar e óleo não possui alta capacidade de refrigeração, mas muitas vezes possui alta capacidade de lubrificação na região de corte [Diniz *et al.*, 2013]. Comparativamente, Teixeira Filho, 2006, cita que sistemas por MQF colocam o lubrificante em contato apenas com a área de corte definida nas interfaces cavaco/ferramenta e ferramenta/peça, enquanto o método tradicional de lubrificação causa uma inundação intensa na superfície usinada.

Entre os aspectos positivos da usinagem com sistemas MQF estão: a obtenção de cavaco seco e pronto para ser reciclado; a diminuição de lascamentos (principalmente no corte interrompido); e a diminuição do choque térmico e das trincas [Klocke e Eisenblätter, 1997].

Em contrapartida, para a instalação de sistemas MQF deve ser previsto os custos para pressurizar o ar, transportar o cavaco e recolher a névoa de óleo gerada [Silva, 2003]. Durante a operação do sistema MQF é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente; devido à saída turbulenta do ar no bocal, gera-se um ruído que geralmente ultrapassa os limites admitidos pela legislação [Machado e Diniz, 2000].

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As análises partem de ensaios preliminares realizados no aço ABNT 1045 os quais mostraram que as menores vibrações causadas pela interação da geometria da ferramenta com os esforços de corte ocorreram para o avanço por volta  $f = 0,05$  mm/volta, com velocidades de corte  $v_{c1} = 175$  m/min e  $v_{c2} = 200$  m/min.

Fixando esses parâmetros ( $f$  e  $v_c$ ) no processo de faceamento, estabeleceu-se adotar três larguras de corte  $a_{e1} = 0,5$  mm;  $a_{e2} = 1,5$  mm;  $a_{e3} = 2,5$  mm utilizando uma ferramenta de sangrar com largura  $b = 3$  mm. Como meio lubrificante foram adotadas duas situações distintas: em abundância e em MQF.

Para analisar os corpos de prova optou-se em coletar os parâmetros de rugosidade média ( $R_a$ ), total ( $R_t$ ), componentes ortogonais da força de usinagem (radial  $F_x$ , tangencial  $F_y$  e axial  $F_z$ ), análise da variação dinâmica da força axial ( $\Delta F_z$ ), e a mensuração dos comprimentos dos corpos de prova e suas variações na superfície usinada.

### 4.1 Preparação dos Corpos de Prova

A fim de padronizar os ensaios foram confeccionados seis corpos de prova (CPs) em aço ABNT 1045 no torno mecânico Romi modelo I20 do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC-DEMEC-UFRGS). O desenho dos CPs pode ser visualizado na Figura 4a. Como o contraponto rotativo foi posicionado com o intuito de reduzir a vibração do CP, o faceamento não será em toda a superfície dos CP. Portanto, para que não haja contato do inserto ou do suporte do inserto com o contraponto foi previsto um ressalto na face do corpo de prova com diâmetro de 10 mm (Fig. 4b).

A Figura 5a mostra a microestrutura ferrítica-perlítica do material do corpo de prova e a Figura 5b o esquema para a medição da dureza.

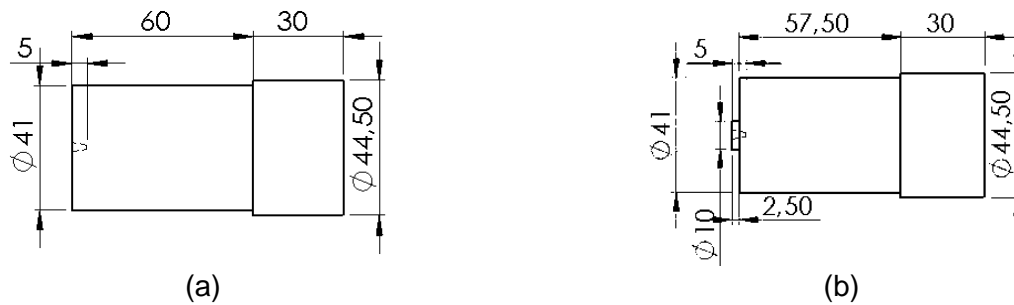


Figura 4: (a) Esquema do corpo de prova (dimensões em mm); (b) representação de um corpo de prova após uma etapa de faceamento (dimensões em mm).

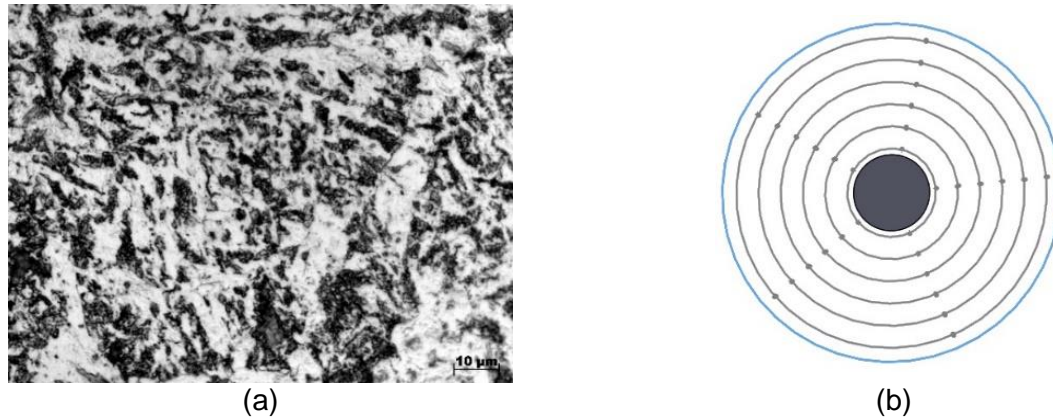


Figura 5: (a) Microestrutura ferrítica-perlítica do aço ABNT 1045 (ampliação 1000x); (b) Esquema para medição da dureza dos CPs (os pontos indicam os locais de medição).

A imagem apresentada na Figura 5a foi obtida após o metal ser submetido ao ataque com Nital 2% (2% ácido nítrico e 98% de álcool etílico). É possível visualizar duas regiões distintas: a região escura é composta por perlita e a região clara é composta por ferrita.

Para verificar se haveria variação considerável da dureza do material ao longo da seção transversal foram traçados seis circunferências e em cada circunferência foram feitos 5 ensaios de dureza. Vale realçar que os seis corpos de prova foram extraídos da mesma barra, ou seja, tem a mesma origem. Nas análises em um corpo de prova foi verificado que a dureza do material vale  $(100,0 \pm 0,5)$  HB e que não há variação significativa ao longo da face transversal da amostra. Com isso, desconsidera-se a hipótese de que as forças podem variar devido à diferença de dureza do material.

### 4.3 Preparação e Execução dos Experimentos

A máquina-ferramenta utilizada para os experimentos foi o torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-DEMEC-UFRGS), Figura 6a.

Para as operações de corte utilizou-se um inserto de metal duro Sandvik modelo N123F2-0250-0002-CM 4125, que possui largura de 3 milímetros e um suporte Sandvik tipo LF123F20 2020B, Figura 6b.

Nos experimentos com lubrificação em abundância foi empregado o sistema que acompanha o próprio torno, o qual gera a inundação do fluido de corte em toda a área de corte com uma vazão de aproximadamente 720 l/h. O fluido selecionado foi o biolubrificante BD-Fluid B90 fabricado pela Bondmann Química diluído em água a 5%.

Nos ensaios com lubrificação pelo método MQF utilizou-se o Nebulizador IV fornecido pela Tapmatic do Brasil com o bico injetor de fluido fixado a 20 mm da aresta de corte da ferramenta. Foi aplicado o fluido integral sintético à base de água Quimatic Jet a uma vazão de 240 ml/h. A pressão na linha de ar comprimido foi mantida em 2 kPa.



Figura 6: (a) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (b) Ferramenta de corte usada nos experimentos.

Para cada velocidade de corte e tipo de lubrificação foi produzido um lote de seis amostras (três larguras e uma repetição). Após as análises em um lote os mesmos CPs foram utilizados para novos parâmetros, até um total de 24 amostras. A Tabela 1 mostra os parâmetros utilizados nos ensaios, onde o avanço  $f = 0,05$  mm/volta foi mantido constante.

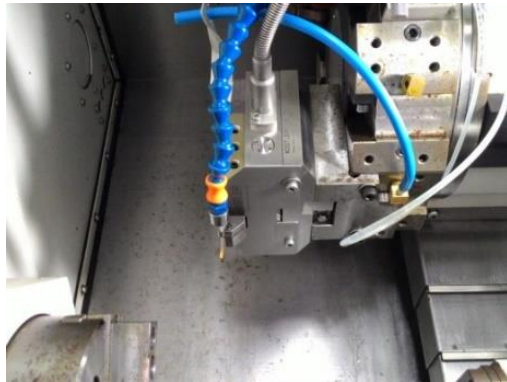
Tabela 1: Parâmetros de corte e identificação dos corpos de prova.

Ensaio	Amostras	Lubrificação	$v_c$ [m/min]	$a_e$ [mm]
1	1 e 2	Abundância	175	0,5
2	3 e 4	Abundância	175	1,5
3	5 e 6	Abundância	175	2,5
4	7 e 8	Abundância	200	0,5
5	9 e 10	Abundância	200	1,5
6	11 e 12	Abundância	200	2,5
7	13 e 14	MQF	175	0,5
8	15 e 16	MQF	175	1,5
9	17 e 18	MQF	175	2,5
10	19 e 20	MQF	200	0,5
11	21 e 22	MQF	200	1,5
12	23 e 24	MQF	200	2,5

#### 4.4 Mensuração das Forças

Para mensurar as componentes ortogonais da força de usinagem foi utilizado o dinamômetro piezoeletrico Kistler modelo 9129A juntamente com o condicionador de sinais Kistler modelo 5070A e um sistema monitor através de um computador com software LabVIEW™ para processar e armazenar os dados para posterior análise em MS Excel. A taxa de aquisição dos dados de força foi de 1000 pontos por segundo (1 KS/s). A Figura 7 mostra o sistema experimental: dinamômetro, nebulizador, amplificador de carga e sistema monitor.

Para a determinação da força média ( $\bar{F}$ ) e da variação da força ( $\pm \Delta F$ ) foi utilizado o programa MS Excel, para  $\bar{F}$  foi calculada a média sobre 5700 pontos coletados e  $\pm \Delta F$  foi calculada como sendo a repetibilidade ( $Re = \Delta F$ ), isto é, o desvio-padrão da amostra dos mesmos 5700 pontos multiplicado por 1,96 (confiança de 95%). Como houve repetição dos ensaios, os valores considerados nesse trabalho são as médias dos valores calculados entre os pares de amostras.



(a)



(b)

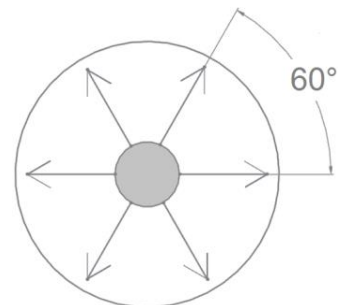
Figura 7: Sistema de aquisição de sinais de força em torneamento: (a) dinamômetro Kistler 9129A e Nebulizador IV Tapmatic; (b) sistema monitor com software LabVIEW™ e condicionador de sinais Kistler 5070A.

#### 4.5 Medição de Rugosidade

Nas medições de rugosidade foram escolhidos para análise os parâmetros de rugosidade média ( $R_a$ ) e total ( $R_t$ ). Nas medições foi utilizado o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ 201P (Fig. 8a). Para comprimento de amostragem foi utilizado  $\lambda = 0,8$  mm e um comprimento de medição  $5 \cdot \lambda = 4$  mm. O apalpador do rugosímetro foi posicionado no sentido radial conforme mostra o esquema da Figura 8b. Para cada CP foram feitas seis leituras separadas a  $60^\circ$ . Nas análises foram consideradas as médias calculadas das leituras.



(a)



(b)

Figura 8: Medição de rugosidade: (a) procedimento realizado com o SJ-201P; (b) esquema de medição da rugosidade, onde as flechas representam as direções das medições.

#### 4.6 Imagens das Superfícies Usinadas

Para realizar a comparação visual das superfícies usinadas foram captadas imagens das superfícies dos corpos de prova com a utilização do microscópio digital Dino-Lite Pro modelo AM-413ZT mostrado na Figura 9. O microscópio foi ajustado para ampliar a imagem em 200 vezes e foi fixado em um suporte com regulação de altura (útil para ajustar o foco).

#### 4.7 Medida das Alturas dos Corpos de Prova

Para medir os desvios (oscilações) nas superfícies dos corpos de prova foi utilizada a máquina de medição tridimensional Mitutoyo de modelo QM-Measure 353 (resolução de  $3 \mu\text{m}$ ). Na mesa desta máquina os CPs foram posicionados na posição vertical e com a superfície



faceada para cima. Foram tomados 20 valores de alturas em 20 pontos diferentes e escolhidos aleatoriamente.

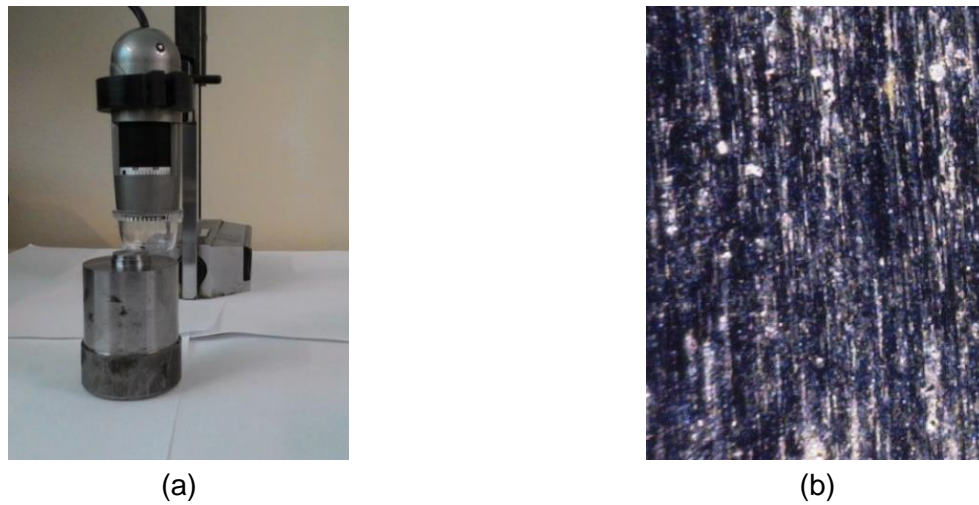


Figura 9: Imagem da superfície: (a) procedimento realizado com o microscópio AM-413ZT; (b) exemplo de imagem captada para a amostra 3 (ampliação 200x).

A foto da máquina e o procedimento de medição podem ser visualizados na Figura 10. Após todas as medições foram calculadas as variações das alturas (comprimentos  $\Delta L$ ) em cada amostra para um nível de confiança de 95%.



Figura 10: Medição dos desvios: (a) Mitutoyo QM-353; (b) procedimento de medição.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de avaliar a influência da largura de corte, velocidade de corte e meio lubrificante foram coletados os dados das componentes das forças de usinagem, as rugosidades e a variação das alturas ( $\Delta L$ ) das peças experimentalmente.

### 5.1 Avaliação das Forças de Usinagem

A Tabela A1 (Apêndice) apresenta os valores das forças (componente radial  $\bar{F}_x \pm \Delta F_x$ , componente tangencial  $\bar{F}_y \pm \Delta F_y$  e componente axial  $\bar{F}_z \pm \Delta F_z$ ) gerados para duas situações de lubrificação, duas velocidades de corte e três larguras de corte.

A Figura 11 apresenta os gráficos dos valores médios da componente radial ( $\bar{F}_x$ ) e a sua variação ( $\pm \Delta F_x$ ) e a Figura 12 os gráficos da componente axial ( $\bar{F}_y$  e  $\pm \Delta F_y$ ) conforme Tab. A1.

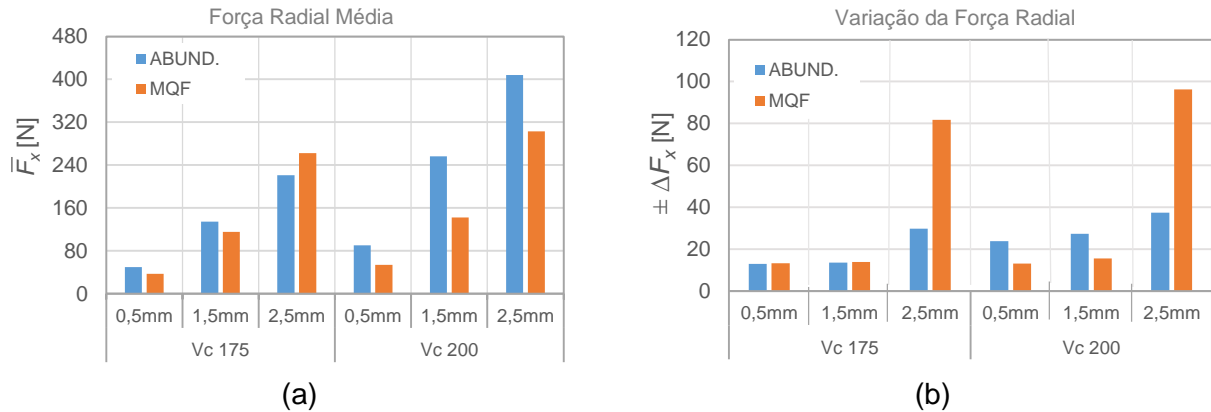


Figura 11: Valores da força radial  $F_x$ : (a) valor médio; (b) variação da força.

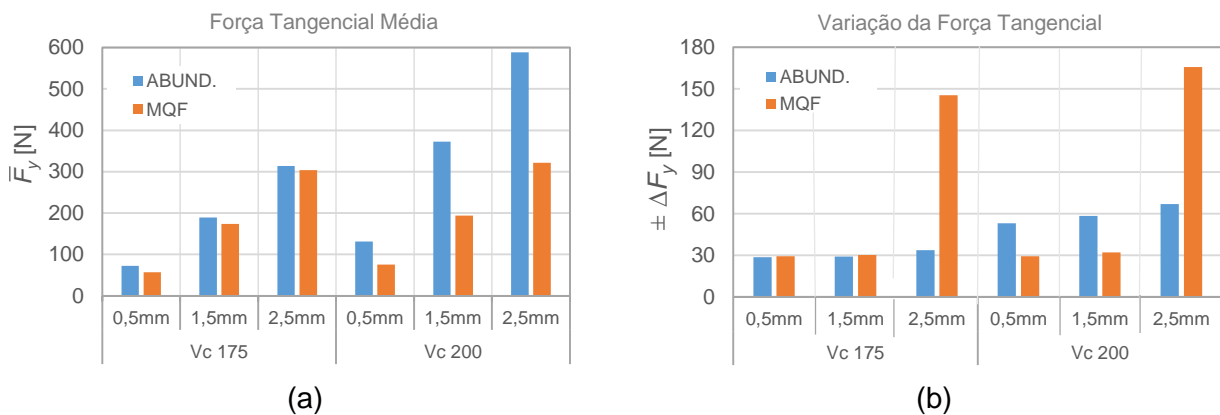


Figura 12: Valores da força tangencial  $F_y$ : (a) valor médio; (b) variação da força.

Através da Figura 11a, pode-se constatar que o método de lubrificação por MQF apresentou os menores valores das forças (exceção para a componente radial na situação com  $v_{c1} = 175$  m/min e  $a_{e3} = 2,5$  mm, onde  $\bar{F}_x$  foi 16% maior para o método por MQF). Já para a velocidade de corte  $v_{c2} = 200$  m/min, pode-se verificar que há uma maior disparidade entre as componentes das forças, sendo que para  $a_{e2} = 1,5$  mm a componente  $\bar{F}_x$  medida com lubrificação por MQF foi 43% menor que o valor medido pela componente no método de lubrificação abundante.

Da mesma forma, a componente  $\bar{F}_y$  (Fig. 12a) para MQF e  $a_{e2} = 1,5$  mm foi 48% menor do que pelo método tradicional de lubrificação.

As Figuras 11b e 12b mostram que os valores das variações das componentes radial e tangencial (respectivamente  $\pm \Delta F_x$  e  $\pm \Delta F_y$ ) para  $a_{e3} = 2,5$  mm assumem valores superiores para as duas velocidades de corte.

As diferenças constatadas se devem ao fato de que o sistema de lubrificação em abundância apresenta maior capacidade refrigerante (em relação ao MQF) elevando, desta forma, a tensão de cisalhamento do material. Também é importante salientar que o uso do sistema MQF gera uma atomização do fluido lubrificante permitindo a inserção do fluido na zona de corte (interface) e, pela ação das propriedades lubrificantes do fluido, tem-se uma redução do atrito gerado na interface peça/cavaco/ferramenta.

Como supracitado, no processo de faceamento com ferramenta de sangrar, a largura do canal é maior que a largura da ferramenta de corte. Assim, existe a possibilidade de a ferramenta de corte se desviar para o lado devido à falta de apoio lateral. Deste modo, a variação da componente axial da força  $\Delta F_z$  ilustra a vibração causada por este desvio.

A Figura 13 ilustra os gráficos dos valores médios da componente axial ( $\bar{F}_z$ ) da força de usinagem e da variação da componente axial ( $\Delta F_z$ ) conforme os dados da Tabela A1.

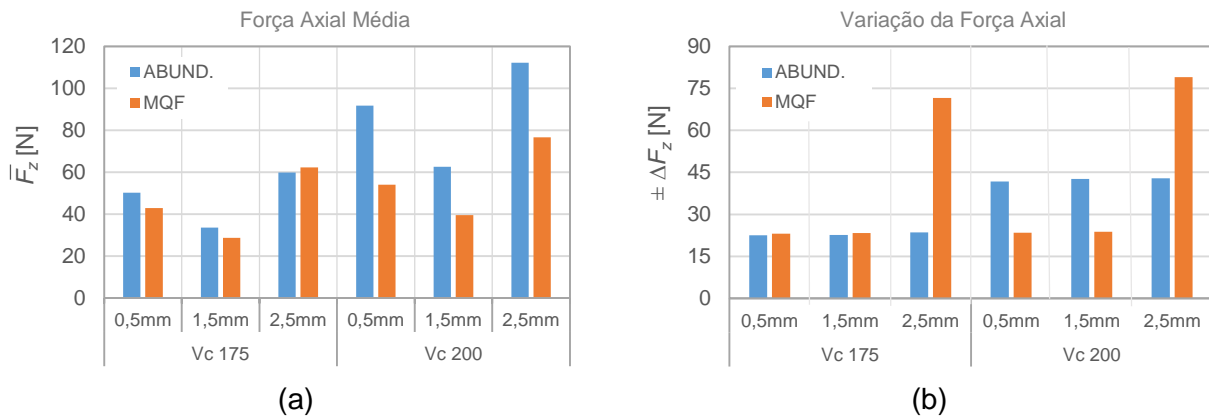


Figura 13: Valores da força axial  $F_z$ : (a) valor médio; (b) variação da força.

Analisando a Figura 13a constata-se que não houve um padrão crescente das forças médias com o aumento da largura de corte. Entretanto, com o aumento da  $v_{c1} = 175$  m/min para  $v_{c2} = 200$  m/min, houve uma elevação na componente axial da força. No geral, as forças geradas com lubrificação por MQF apresentaram menores valores em comparação às obtidas com fluido abundante, pois a temperatura gerada na interface peça/cavaco/ferramenta é mais elevada, o que reduz os esforços necessários para cisalhar o material. Como já citado, o aquecimento provoca a redução do coeficiente de atrito na interface e assim, a maior capacidade lubrificante do MQF gera uma redução no coeficiente de atrito.

Conforme mostrado na Figura 13b, a componente  $\Delta F_z$  (que está relacionada diretamente com a vibração transversal à ferramenta de corte) variou muito pouco conforme foram alteradas as larguras de corte para o meio de lubrificação por MQF. Entretanto, há um acréscimo médio de 85% com o aumento de  $v_c$ , mas somente no meio de lubrificação tradicional. Isto ocorreu previsivelmente devido à aplicação de uma  $v_c$  maior, ocasionando uma menor penetração do fluido na zona de corte, gerando uma redução da capacidade de lubrificação do fluido. Com isso, houve maior atrito entre a aresta de corte e a superfície da peça. Já para MQF, o aumento da velocidade de corte proporcionou um aumento médio de apenas 0,17% no valor de  $\Delta F_z$ .

Examinando a maior largura de corte ( $a_{e3} = 2,5$  mm) e com lubrificação por MQF, verifica-se que houve um aumento de 222% sobre a média das variações da componente  $\Delta F_z$  comparando com as menores larguras de corte e lubrificação por MQF. Maiores detalhes na Seção 5.4 (alteração do ângulo de aplicação do bico aspersor).

## 5.2 Avaliação das Rugosidades

A Tabela A2 (Apêndice) exibe os valores das rugosidades média ( $R_a$ ) e total ( $R_t$ ) para as diferentes combinações de parâmetros analisadas. Os valores apresentados nesta tabela foram determinados utilizando o valor médio de suas amostras (original e réplica) e os desvios foram calculados sobre a média das duas amostras.

A Figura 14 apresenta os gráficos dos valores médios das rugosidades  $R_a$  e  $R_t$  conforme os dados da Tabela A2.

Como se observa na Figura 14, as rugosidades para  $a_{e1} = 0,5$  mm e  $a_{e2} = 1,5$  mm apresentam pouca variação quando comparadas para a mesma velocidade de corte e condições de lubrificação diferentes. De modo geral, o método MQF apresentou os maiores valores (evidenciado para  $v_{c1} = 175$  m/min). Comparando as velocidades de corte, constata-se que o aumento da velocidade de corte causa uma ligeira elevação das rugosidades para ambas as situações de lubrificação. No caso da aplicação da largura  $a_{e3} = 2,5$  mm houve grande diferença entre os valores de  $R_a$  e  $R_t$  com a mudança do meio de lubrificação. Por exemplo, para  $v_{c2} = 200$  m/min, a mudança do fluido de abundante para MQF causou um aumento de 3,5 vezes no valor obtido para  $R_a$  e 3,1 vezes para  $R_t$ . Uma hipótese para essa grande diferenciação dos valores é que durante a usinagem o cavaco pode



ter provocado uma barreira ao jato de MQF. Com isso, a lubrificação da aresta foi prejudicada e provocou atrito e vibração da ferramenta.

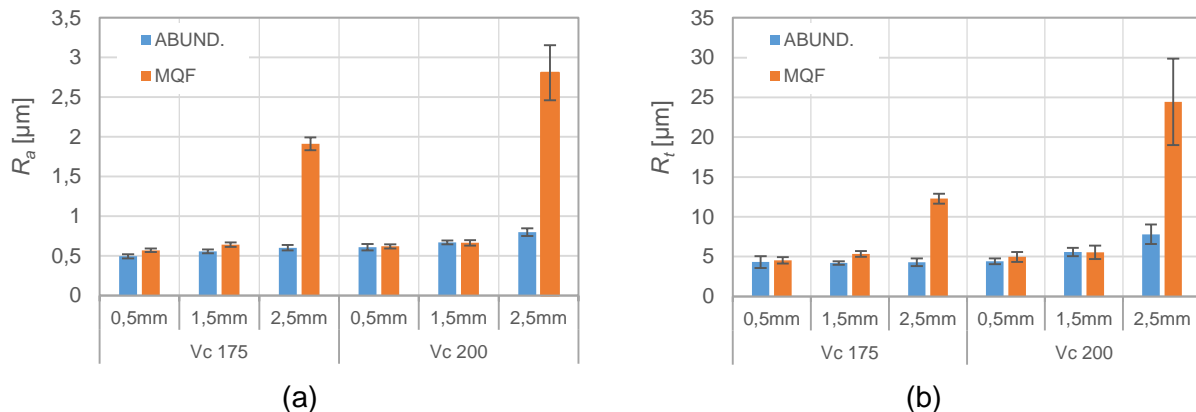


Figura 14: Valores medidos de rugosidade: (a) rugosidade média; (b) rugosidade total.

A comparação entre a melhor superfície (Ensaio 1) e a pior (Ensaio 12) pode ser visualizada na Figura 15.

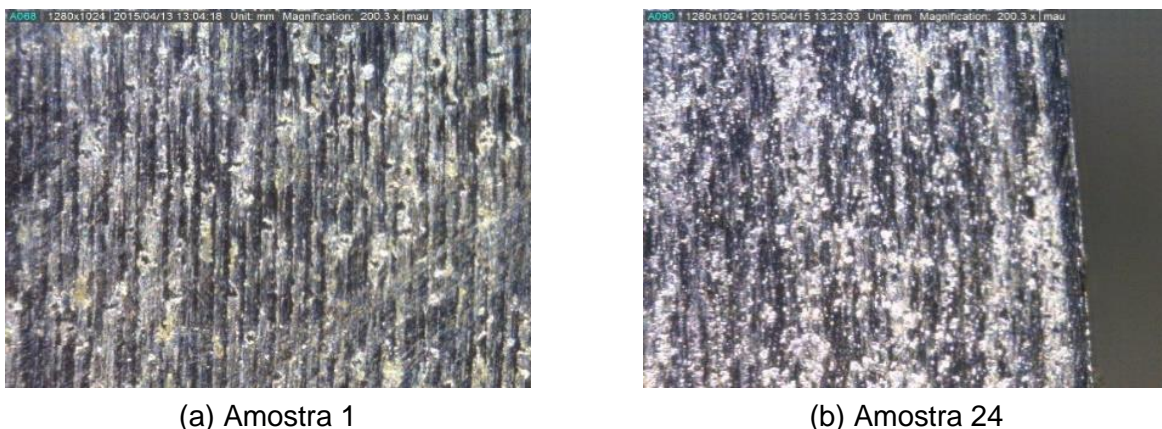


Figura 15: Superfícies das amostras (ampliação 200x) obtidas com: (a)  $v_{c1} = 175$  m/min,  $a_{e1} = 0,5$  mm, fluido em abundância; (b)  $v_{c2} = 200$  m/min,  $a_{e3} = 2,5$  mm, com MQF.

Na Amostra 1 (Fig. 15a) fica possível visualizar as marcas causadas pelo avanço e, aparentemente, há menos resquícios de cavaco aderido à superfície em comparação à Amostra 24, possibilitando a visualização das marcas de avanço. Já para os valores mais altos de  $R_a$  e  $R_t$  encontrados nas medições (Fig. 15b), fica difícil a visualização das marcas provocadas pelo avanço e há bem mais cavaco aderido à superfície da amostra.

Uma possível explicação para as diferenças entre os perfis de rugosidade apresentados na Figura 15 é que no Ensaio 1, a combinação de uma menor largura de corte ( $a_{e1} = 0,5$  mm) com fluido em abundância proporcionou menor atrito entre a ferramenta e a peça em comparação à situação mais crítica (Ensaio 12), gerando melhor acabamento na Amostra 1. No caso da Amostra 24 ( $a_{e3} = 2,5$  mm,  $v_{c2} = 200$  m/min e MQF), houve uma maior vibração da ferramenta e possivelmente um maior coeficiente de atrito na interface peça/cavaco/ferramenta e isso causou a deterioração da superfície. Este fato se deu principalmente por causa de a posição do bico aspersor de MQF estar perpendicular ( $90^\circ$ ) à face da peça, impedindo a correta aplicação do lubrificante na interface peça/cavaco/ferramenta.

Como as amostras que apresentaram os maiores valores de rugosidade (Ensaio 9 e 12) coincidem com as que apresentaram as maiores variações de  $\Delta F_z$  (Fig. 13b), e como a diferença entre as rugosidades em relação às demais foi elevada, optou-se pela realização de mais quatro ensaios (incluindo as repetições) com a modificação da posição do bico aspersor. Os novos ensaios e os resultados serão apresentados na Seção 5.4.

### 5.3 Análise dos Desvios (Oscilações) na Superfície dos Corpos de Prova

A Tabela A2 (Apêndice) mostra os valores dos desvios (oscilações)  $\Delta L$  das alturas (comprimentos) para as diferentes combinações de parâmetros avaliados e a Fig. 16 exibe o gráfico dos valores dos desvios  $\Delta L$  tabelados. Os valores tabelados foram calculados através da média dos desvios-padrões para 40 pontos (20 para a amostra original e 20 para a réplica).

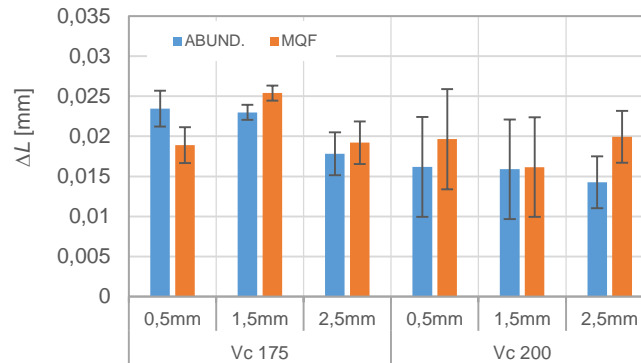


Figura 16: Desvios (oscilações) na superfície dos corpos de prova (95% de confiança).

Observando a Figura 16 constata-se que não é possível afirmar que há diferença de  $\Delta L$  conforme se altera a velocidade de corte ( $v_c$ ) e/ou a largura de corte ( $a_e$ ), pois as dispersões dos valores em torno da média foram elevadas e não há predominância de nenhum fator. No entanto, ao considerar somente a análise dos valores médios para a situação com fluido abundante, os desvios tendem a diminuir com os aumentos de  $v_c$  e  $a_e$ . Outra constatação que pode ser notada é uma maior incidência de valores superiores para a lubrificação por MQF, sendo que a maior diferença entre os meios se deu com  $v_{c2} = 200$  m/min e  $a_{e3} = 2,5$  mm. Neste caso, a diferença foi de 28,4%. Uma hipótese para isso é que as oscilações podem estar sujeitas a um maior aquecimento da superfície da peça ocasionado por uma menor capacidade refrigerante do fluido MQF, acarretando desta forma uma dilatação térmica do material durante o processo de usinagem, gerando assim erros macrogeométricos na superfície usinada.

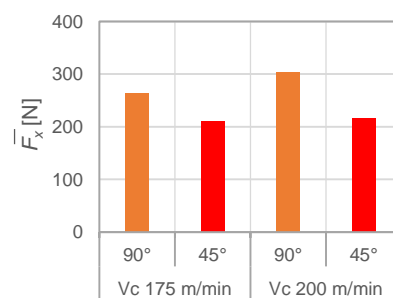
### 5.4 Alteração do Ângulo de Aplicação do Bico Aspersor de MQF

Em virtude da discrepância nas medições das rugosidades nas superfícies dos CPs (Fig. 14) e das grandes oscilações da ferramenta de corte (Fig. 13b) para  $a_{e3} = 2,5$  mm com lubrificação por MQF, optou-se em uma investigação dos motivos.

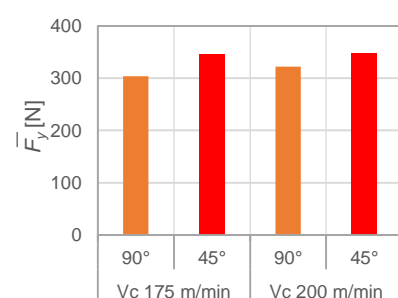
Os ensaios 9 e 12 foram repetidos ( $a_{e3} = 2,5$  mm com MQF) com o bico aspersor posicionado a  $45^\circ$ , conforme mostra a Figura 17a. Os dados obtidos nestes ensaios podem ser vistos nas Tabelas A1 e A2 (Apêndice). A distância do bico aspersor para a ferramenta de corte foi mantida em 20 mm. As Figuras 17b e 17c mostram os resultados comparativos para as médias das componentes tangencial ( $\bar{F}_x$ ) e radial ( $\bar{F}_y$ ) em função do ângulo ( $90^\circ$  e  $45^\circ$ ).



(a)



(b)



(c)

Figura 17: (a) Bico aspersor posicionado a  $45^\circ$  da posição inicial; (b) componente radial da força; (c) componente tangencial da força.

Pelas Figuras 17b e 17c, nota-se que houve alterações nas médias das componentes tangencial e radial com a mudança do ângulo de aplicação do bico aspersor: na Figura 17b,  $\bar{F}_x$  diminuiu para as duas velocidades de corte; na Figura 17c,  $\bar{F}_y$  aumentou. Isto se deve provavelmente à melhor inserção do fluido na zona de corte, pois a inclinação do bico aspersor proporciona uma melhor lubrificação da interface peça/ferramenta. Da mesma forma que a inclinação do bico aspersor proporciona melhor lubrificação, ela proporciona melhor refrigeração da interface, e como já citado, menores temperaturas causam aumento de esforços devido ao aumento da força necessária para ocorrer o cisalhamento do material.

A Figura 18 mostra os resultados comparativos para a força axial em função do ângulo.

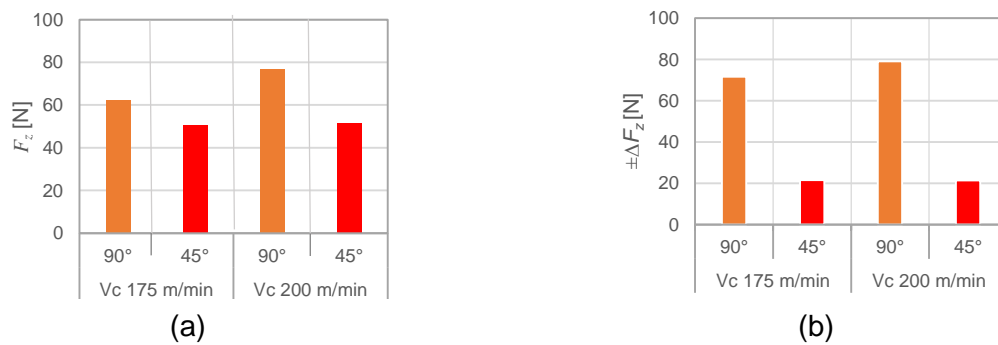


Figura 18: Valores da força axial  $F_z$  em função da inclinação do bico aspersor: (a) valor médio; (b) variação da força.

Analisando a média da componente axial de força e sua variação, verifica-se uma queda para ambas as velocidades de corte com a mudança de inclinação de 90° para 45°: para  $\bar{F}_z$  (Fig. 18a), a redução foi próxima de 19% para  $v_{c1} = 175$  m/min e 32% para  $v_{c2} = 200$  m/min; já para  $\Delta F_z$  (Fig. 18b), a diminuição foi cerca de 70% para as duas velocidades.

A Figura 19 mostra a avaliação da qualidade da superfície faceada em função da inclinação do bico aspersor.

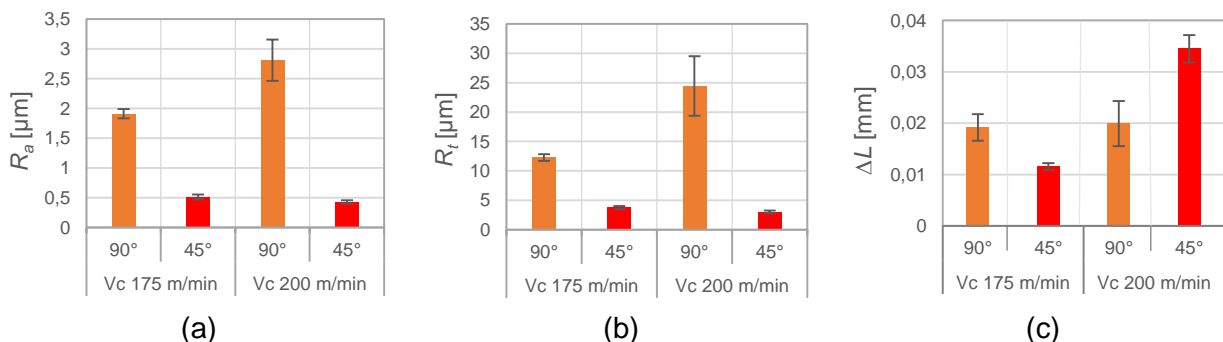


Figura 19: Avaliação da qualidade superficial em função da inclinação do bico aspersor: (a) rugosidade média; (b) rugosidade total; (c) desvios na superfície dos corpos de prova.

Assim como na Figura 18, com a alteração da posição do bico aspersor, a rugosidade média (Fig. 19a) apresentou decréscimo de 73% para  $v_{c1}$  e 85% para  $v_{c2}$ . Já a rugosidade total (Fig. 19b) apresentou uma redução de 70% para  $v_{c1}$  e 88% para  $v_{c2}$ . Estas quedas deram-se possivelmente devido à melhor lubrificação e, por conseguinte, menor atrito das interfaces peça/ferramenta/cavaco. Comparando todas as amostras, constatou-se que os valores de  $R_a$  e  $R_t$  encontrados para  $v_{c2} = 200$  m/min com o bico aspersor a 45° foram os menores. Isto sugere que a inclinação do bico tem influência significativa sobre a eficácia do método por MQF.

Na análise das oscilações (Fig. 19c), as amostras para  $v_{c1} = 175$  m/min apresentaram menores valores de  $\Delta L$ , enquanto que para  $v_{c2} = 200$  m/min foi observado um acréscimo nos valores dos desvios. Essas diferenças são possivelmente causadas pela diferença de aquecimento das amostras.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos dados coletados nos experimentos, conclui-se que para o processo de sangramento radial do aço ABNT 1045, a aplicação do meio de lubrificação por MQF gera as menores forças de usinagem em comparação ao meio tradicional de lubrificação (exceto quando  $a_{e3} = 2,5$  mm e  $v_{c1} = 175$  m/min). Também se observa que a menor força de usinagem ocorre quando  $a_{e2} = 1,5$  mm,  $v_{c1} = 175$  m/min e lubrificação por MQF (neste caso,  $F_u = 32$  N).

As análises do gráfico das oscilações da componente axial da força mostraram que para  $v_{c1} = 175$  m/min,  $a_{e1} = 0,5$  mm e  $a_{e2} = 1,5$  mm há pouca diferença entre os valores e que ocorreram valores pouco superiores para a lubrificação por MQF. O mesmo gráfico ainda mostrou que para as mesmas larguras de corte, mas com  $v_{c2} = 200$  m/min, o método MQF apresentou menores oscilações da força axial.

Considerando o acabamento da superfície faceada, conclui-se que a utilização do método MQF não apresenta significativa perda de qualidade. Além disso, pelas oscilações nas alturas nas peças, constata-se que é preferível a utilização da velocidade  $v_{c2} = 200$  m/min em relação à  $v_{c1} = 175$  m/min.

Com a alteração da inclinação do bico aspersor foi possível demonstrar que a posição de aplicação do fluido atomizado influencia diretamente na sua capacidade de lubrificação. A modificação de sua posição permitiu que o fluido atingisse de forma eficiente a zona de corte, executando assim a sua função de lubrificante e uma melhor remoção do cavaco. Dessa forma, as forças foram reduzidas e o acabamento superficial foi melhorado significativamente. Entretanto, na medição das oscilações dos comprimentos ( $\Delta L$ ), a inclinação do bico resultou em uma piora para  $v_{c2} = 200$  m/min e uma melhora para  $v_{c1} = 175$  m/min. Posto isso, na prática deve ser preferível selecionar  $v_{c1}$ .

Assim, pode-se concluir que a utilização da técnica de lubrificação por MQF na operação de faceamento com ferramenta de sangramento radial do aço ABNT 1045 é viável, demonstrando uma redução nas forças de usinagem e atingindo um nível de qualidade da superfície usinada similar ao gerado com o uso de fluido em abundância. Desta forma, tem-se um menor impacto ambiental devido à eliminação da lubrificação em abundância e um menor consumo de energia elétrica no processo de usinagem.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se analisar o comportamento das variáveis referentes ao acabamento superficial conforme a variação do ângulo do bico aspersor. Nessa análise poderia se incluir diferentes larguras de corte para verificar se a tendência de melhor acabamento se confirma.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avelino, E., B., “**Estudo do comportamento da vida de ferramentas de metal duro revestidas durante torneamento de aços**”, XV Seminário de Iniciação Científica da UFJF, 2009.

Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L.. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”, 8 ed., São Paulo: Artliber, 2013.

Ferraresi, D.. “**Fundamentos da usinagem dos metais**”, 9 ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

Fitzpatrick, M.. “**Introdução aos processos de usinagem**”. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Juneja, B.L.; Swkhon, G.S. “**Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools**”, John Wiley & Sons, New Delhi, Índia, 1987, 462p., ISBN 0 – 470 – 20860 – 0.

Klocke, F., Eisenblätter, G.. “Dry cutting”, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Vol. 46, no. 2, pp. 519-526, 1997.

Machado, A. R., Diniz, A. E., **“Vantagens e Desvantagens do Uso (ou não) de Fluidos de Corte”**, Congresso de Usinagem 2000, São Paulo – SP, 2000.

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

Mello, M. S., Souza, A. J., Geier, M. **“Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade Re reaplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140”**, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul. – 03 Ago., São Luís, MA, 2012.

NBR ISO 4287, Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade. ABNT, 2002.

Nunes, Luciano Tadeu. **“Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5”**. 144 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

Shaw, M. C. **“Metal Cutting Principles”**, Oxford Science Publication, New York, 1984, 594 pags, ISBN, 0 – 19 – 859002 – 4.

Silva, L.R. *et al*, **“Influências da Mínima Quantidade de Lubrificante no torneamento do Inconel 718 usando alta velocidade de corte”**, Segundo Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003.

Teixeira Filho, F., **“A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5ph.”**. 230 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

Whitehouse, D. J., **“Review Article: Surface Metrology”**, Meas. Sci. Technol., n 8, pp 955 – 972, 1997.

Witte, H., **“Máquinas ferramenta: elementos básicos de máquinas e técnicas de construção”**, 7 ed., Curitiba: Hemus, 1998.

Zeilmann, R. P.; Vacaro, T.; Bordin, F. M.; Sonda, V.. **“Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte”**, XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 16-17 set., São Paulo, SP, 2009.

## APÊNDICE

A Tabela A1 exibe os valores obtidos nos experimentos e suas variações enquanto que a Tabela A2 mostra os valores das variáveis referentes ao acabamento.

Para os experimentos padrões foi considerado o ângulo do bico aspersor com sendo 90°, nos experimentos complementares o ângulo foi de 45°.

Os valores mostrados nas Tabelas A1 e A2 foram determinados utilizando o valor médio de suas amostras (original e réplica) e os desvios foram calculados sobre a média das duas amostras.

Tabela A1: Valores das forças e variação da força e seus erros.

Ensaio	$F_x$ [N]	$\Delta F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$\Delta F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$\Delta F_z$ [N]
1	49,5	13,0	72,3	28,7	50,2	22,5
2	134,3	13,6	189,2	29,1	33,5	22,6
3	220,9	29,8	313,7	33,8	59,9	27,5
4	90,25	23,8	131,2	53,0	91,7	41,8
5	256,3	27,4	372,7	58,4	62,6	42,7
6	407	37,4	588,7	67,0	112,2	42,9
7	37,0	13,3	56,8	29,3	42,9	23,1
8	115,5	13,9	173,8	30,3	28,6	23,3
9	262,6	81,7	303,7	145,3	62,3	71,6
10	54,0	13,1	75,4	29,4	53,9	23,4
11	142,2	15,6	194,0	32,1	39,6	23,7
12	303,2	96,3	321,8	165,7	76,6	79,0
9 (45°)	209,4	25,0	344,6	29,6	50,6	21,5
12 (45°)	215,6	21,5	346,8	28,8	51,5	21,4

Tabela A2: Rugosidades e variações do comprimento.

Ensaio	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta L$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,50 $\pm$ 0,03	4,3 $\pm$ 0,7	23 $\pm$ 2
2	0,56 $\pm$ 0,02	4,1 $\pm$ 0,2	23 $\pm$ 1
3	0,60 $\pm$ 0,03	4,3 $\pm$ 0,5	17 $\pm$ 2
4	0,61 $\pm$ 0,04	4,4 $\pm$ 0,3	16 $\pm$ 6
5	0,67 $\pm$ 0,02	5,6 $\pm$ 0,5	15 $\pm$ 6
6	0,80 $\pm$ 0,04	7,8 $\pm$ 1,2	14 $\pm$ 3
7	0,57 $\pm$ 0,02	4,5 $\pm$ 0,4	18 $\pm$ 5
8	0,64 $\pm$ 0,03	5,3 $\pm$ 0,4	25 $\pm$ 2
9	1,91 $\pm$ 0,08	12,3 $\pm$ 0,6	19 $\pm$ 2
10	0,62 $\pm$ 0,02	5,0 $\pm$ 0,6	19 $\pm$ 1
11	0,66 $\pm$ 0,03	5,5 $\pm$ 0,8	16 $\pm$ 4
12	2,81 $\pm$ 0,34	24,4 $\pm$ 5,4	19 $\pm$ 4
9 (45°)	0,52 $\pm$ 0,04	3,7 $\pm$ 0,3	12 $\pm$ 1
12 (45°)	0,43 $\pm$ 0,03	3,0 $\pm$ 0,2	34 $\pm$ 2