

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DO ACABAMENTO GERADO EM OPERAÇÃO DE FACEAMENTO COM FERRAMENTA DE SANGRAMENTO RADIAL PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE

Elias Samuel Cristo Espindola, elias.espindola@ufrgs.br
Maurício Rudi Peiter, mauricio.peiter@gmail.com
André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)
Rua Sarmento Leite, nº 425 – Cidade Baixa – Porto Alegre, RS – Brazil

Resumo: Sangramento radial é uma operação de torneamento no qual a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea e perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina visando obter um entalhe circular na peça. Durante a operação 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 nessa 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. Realizou-se então a análise da rugosidade da face da peça 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 com o intuito de verificar se “ a_e ” influencia significativamente a variação da força longitudinal à peça (F_z) e a qualidade da superfície faceada de forma isolada ou combinada à “ v_c ” e à lubrificação. Os resultados mostraram que a lubrificação em MQF gerou menores valores de força que em abundância, e os aumentos de “ a_e ” e “ v_c ” geram maiores valores de força. No acabamento da face verificou-se que o fluido em abundância originou valores de rugosidades ligeiramente menores que em MQF. Constatou-se também que com maior “ a_e ”, o método MQF proporcionou valores de rugosidade cerca de três vezes maiores que em abundância. Alterando a inclinação do bico aspersor de 90° para 45° foi possível demonstrar que a posição da aplicação do spray influencia diretamente na capacidade de lubrificação. No caso, as forças foram reduzidas e o acabamento melhorado significativamente.

Palavras-chave: Usinagem, Sangramento radial, Faceamento, Mínima quantidade de fluido.

1. INTRODUÇÃO

O sangramento radial é uma operação 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 (Fig. 1a) (Ferraresi, 1995). As ferramentas de corte são lâminas finas que realizam cortes de pequena largura que podem ter grande profundidade. Segundo Fitzpatrick (2013), quando a largura do canal for maior que a largura da ferramenta de corte (b) existirá a possibilidade de esta se desviar para o lado devido à falta de apoio lateral. Essa tendência 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 (b), tem-se assim um processo de faceamento (Fig. 1b). Como descrito por Ferraresi (1995), o faceamento é um processo que se obtém quando se desloca a ferramenta em sentido normal ao eixo de rotação da peça.

Para reduzir a vibração, Witte (1998) recomenda 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. Conforme Fitzpatrick (2013), 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. As condições de corte citadas anteriormente afetam a pressão específica de corte (k_s) e, em decorrência, estas afetam a força de usinagem.

Do acordo com Machado *et al.* (2011), os valores de k_s tendem a diminuir com o aumento da v_c e, consequentemente, 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),

menção 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. Conforme Diniz *et al.* (2013), a lubrificação tem a função de introduzir uma melhoria no processo de usinagem de caráter funcional, proporcionando uma melhora de desempenho, ou de caráter econômico, proporcionando economia no processo.



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

Segundo Ferraresi (1995), a força de usinagem (F_u) é a força total que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem. 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.

Cada uma das componentes varia no tempo (dinâmica do processo) e pode ser expressa como $F = \bar{F} \pm \Delta F$, onde $\bar{F}$ é o valor médio e $\Delta F = Re$ é a variação de amplitude (Fig. 2a). No caso, Re é a repetitividade da medição.

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 Fig. (2b). Dessa forma, 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.

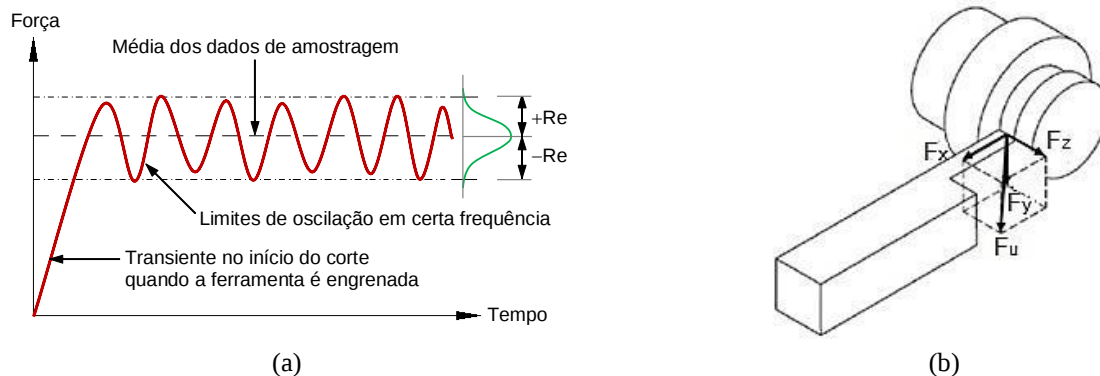


Figura 2: (a) Esquema do sinal da força vs. tempo; (b) Força de usinagem e suas componentes em um processo de sangramento radial.

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 quão maior for o seu efeito lubrificante, maior será a diminuição das componentes da força de usinagem. Entretanto, como citado por Ferraresi (1995), se o resfriamento também for muito eficiente poderá ocorrer o aumento das componentes das forças. Pois como citado por Santos (2007) o aquecimento da peça durante a usinagem é considerado, na maioria das vezes, benéfico, pois reduz a tensão de cisalhamento do material.

Como demonstrado por Juneja e Swkhon (1987) e Shaw (1984) as combinações de rugosidade, ondulações, marcas e falhas irão determinar a qualidade geral de uma superfície usinada. Segundo Nunes (2011) as ondulações consistem em erros geométricos ou irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas como rugosidades. Conforme Machado *et al.* (2011), essas ondulações podem ser causadas por vibrações e deflexões da ferramenta ou da peça, já marcas e falhas são interrupções na topografia típica da superfície de uma peça, estas podem ser causadas por problemas inerentes ou podem surgir durante o processo de corte.

De acordo com a Norma NBR ISO 4287 (2002), rugosidades são erros microgeométricos causados por um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Como descrito por Whitehouse (1997) a rugosidade de uma superfície é influenciada por diversos parâmetros; para a determinação da contribuição de cada parâmetro podem ser usados métodos estatísticos. O parâmetro de amplitude mais utilizado é a rugosidade média (R_a); entretanto, de acordo com Machado *et al.* (2011), R_a é um parâmetro que não recebe influência

de efeitos ocasionais. Portanto, não deve ser analisada isoladamente. Para complementar a análise, o parâmetro da rugosidade total R_t pode ser empregado.

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. Segundo Diniz *et al.* (2013), uma alternativa para a substituição do fluido de corte é conhecida como MQF (mínima quantidade de fluido). Conforme Avelino (2009), 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. 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). Zeilmann *et al.* (2009) explicam que 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.

De acordo com Diniz *et al.* (2013), a mistura de ar e óleo não possui alta capacidade de refrigeração, mas muitas vezes possui alta capacidade de lubrificação na região de corte. Comparativamente, Teixeira Filho (2006), cita que sistemas por MQF colocam o lubrificante em contato apenas com a área de corte definida nas interfaces ferramenta/peça e cavaco/ferramenta, enquanto que o método tradicional de lubrificação causa uma inundação intensa na superfície usinada. Klocke e Eisenblätter (1997) mencionam que, dentre os aspectos positivos dos sistemas MQF estão: a obtenção de cavaco seco e pronto para ser reciclado; a diminuição de lascamentos; e a diminuição do choque térmico e das trincas. Hadad e Sadeghi (2013) verificaram para o torneamento do aço AISI 4140 que a aplicação de MQF permite benefícios através da redução das forças e das temperaturas, e de um melhor acabamento da superfície usinada principalmente devido a um menor desgaste da ferramenta. Byrne *et al.* (2003) citam que a técnica MQF apresenta melhor poder lubrificante em relação ao fluido em abundância quando se utiliza uma maior velocidade de corte. No caso, as partículas atomizadas de óleo atingem a região de corte com maior eficiência, reduzindo o atrito nas interfaces peça/cavaco/ferramenta e gerando uma redução nas forças.

Assim, pretende-se verificar no processo da faceamento com ferramenta de sangrar se a largura de corte (a_e) influi de maneira significativa na variação da força axial ($\pm \Delta F_z$) 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 MQF é viável sem perdas de qualidade superficial frente à lubrificação tradicional.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ensaio preliminares realizados no aço ABNT 1045 mostraram que as menores vibrações causadas pela interação da geometria da ferramenta com os esforços de corte ocorreram para um avanço $f = 0,05$ mm/volta combinado com as 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), as componentes ortogonais da força de usinagem (radial F_x , tangencial F_y e axial F_z), análise da variação dinâmica da força axial ($\pm \Delta F_z$), e a mensuração dos comprimentos dos corpos de prova e suas variações na superfície usinada.

Para cada v_c 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

2.1. Materiais e Equipamentos

A fim de padronizar os ensaios foram confeccionados seis corpos de prova (CPs) em aço ABNT 1045 em um torno mecânico. Como o contraponto rotativo foi posicionado com o intuito de reduzir a vibração do CP, o faceamento não foi realizado 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. 3a).

Nas análises em um corpo de prova verificou-se 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.

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), Fig. (3b). Para as operações de corte utilizou-se um inserto de metal duro Sandvik modelo N123F2-0250-0002-CM 4125, que possui largura de 3 mm e um suporte Sandvik tipo LF123F20 2020B. A Figura (3c) mostra a ferramenta posicionada no torno CNC.



Figura 3: (a) Esquema representativo de um corpo de prova após uma etapa de faceamento (dimensões em mm); (b) Torno CNC Mazak QTN 100-II; (c) Ferramenta de corte utilizada nos experimentos.

Nos experimentos com lubrificação em abundância foi empregado o sistema do 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 fixado a 20 mm da aresta de corte da ferramenta, paralelo à face da peça. Foi aplicado o fluido integral sintético à base de água Quimatic Jet a uma vazão de 240 ml/h. Manteve-se a pressão na linha de ar comprimido em 2,0 kPa.

Para mensurar as componentes ortogonais da força de usinagem foi utilizado o dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9129A juntamente com o condicionador de sinais Kistler modelo 5070A e um sistema monitor através de um computador com software LabVIEW™ que visa 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 (1,0 kS/s).

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), isto é, o desvio-padrão da amostra destes 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.

Para avaliar a qualidade da textura da superfície usinada foram escolhidos os parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t). Nas medições foi utilizado o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ 201P (Fig. 4a) com comprimento de amostragem ($cutoff$) $\lambda = 0,8$ mm e comprimento de medição $5 \cdot \lambda = 4$ mm. O apalpador do rugosímetro foi posicionado no sentido radial à peça; para cada CP foram feitas seis leituras separadas a 60° . A barra de erros foi calculada para uma confiança de 95% a partir da amostra de 12 pontos (seis de cada amostra).

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 modelo AM-413ZT. O microscópio foi ajustado para ampliar a imagem em 200 vezes e foi fixado em um suporte com regulagem de altura (Fig. 4b).

A medição dos desvios (oscilações) nas superfícies dos corpos de prova foi utilizada a máquina de medição por coordenadas tridimensional Mitutoyo de modelo QM-Measure 353 (resolução de 3 μ 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 (Fig. 4c). Após todas as medições foram calculadas as variações das alturas (comprimentos ΔL) em cada amostra para um nível de confiança de 95%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

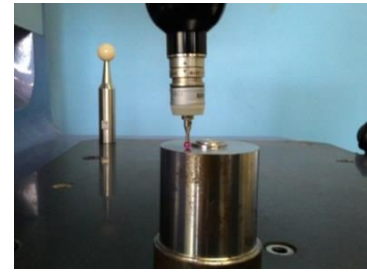
Nos resultados serão apresentadas as avaliações das forças de usinagem, da qualidade da superfície faceada e da influência do ângulo de aplicação do bico aspersor de MQF.



(a)



(b)



(c)

Figura 4: (a) Rugosímetro portátil Mitutoyo SJ 201P; (b) microscópio digital Dino-Lite AM-413ZT; (c) máquina de medição tridimensional Mitutoyo QM-Measure 353.

3.1. Avaliação das Forças de Usinagem

A Figura (5) apresenta os gráficos dos valores médios das componentes radial ($\bar{F}_x$), tangencial ($\bar{F}_y$) e axial ($\bar{F}_z$).

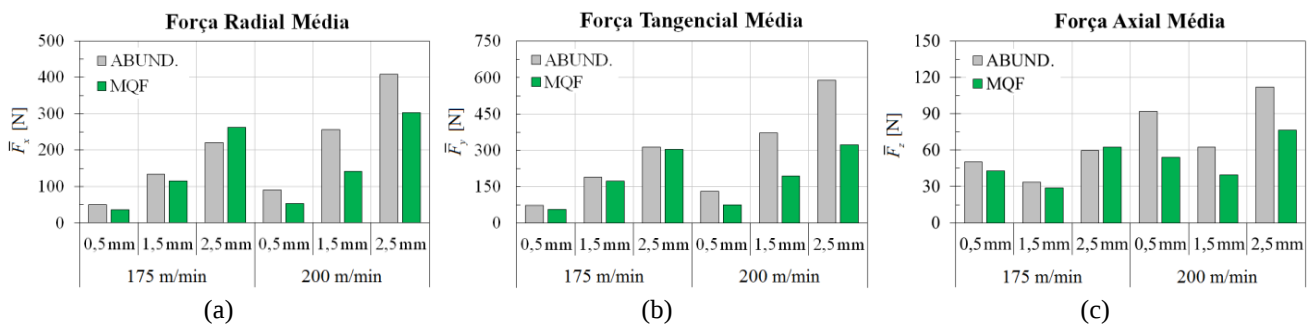


Figura 5. Valores médios das forças: (a) radial; (b) tangencial; (c) axial.

Através da Fig. (5a) e Fig. (5b), pode-se constatar que a 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 19% maior para a condição com MQF). Já para a velocidade $v_{c2} = 200$ m/min, pôde-se verificar que há uma maior disparidade entre as forças, sendo que para $a_{e2} = 1,5$ mm, os valores de $\bar{F}_x$ e $\bar{F}_y$ gerados com MQF foram, respectivamente, 44% e 48% menores que os valores obtidos com lubrificação abundante. Como esperado, observou-se um aumento das forças com o aumento da largura de corte, pois os esforços estão associados com a área da seção de corte.

Analisando a Fig. (5c) constata-se que não houve um padrão crescente de $\bar{F}_z$ com o aumento da largura de corte (a_e). Esperava-se que $\bar{F}_z$ apresentasse um comportamento semelhante ao encontrado em $\bar{F}_x$ e $\bar{F}_y$, mas verificou-se que a lubrificação por MQF gerou os menores valores das forças (exceção para a componente axial na situação com $v_{c1} = 175$ m/min e $a_{e3} = 2,5$ mm, onde $\bar{F}_z$ foi 3,8% maior para a condição com MQF). Entretanto, com o aumento da velocidade de $v_{c1} = 175$ m/min para $v_{c2} = 200$ m/min, houve uma elevação na componente axial da força.

Quando aplicada $v_{c1} = 175$ m/min com $a_{e1} = 0,5$ mm e $a_{e2} = 1,5$ mm os valores das forças $\bar{F}_z$ geradas com MQF foram aproximadamente 14% menores que os obtidos com lubrificação abundante. Já com $v_{c2} = 200$ m/min, a diminuição da componente axial foi mais significativa quando usado MQF; as reduções foram de 41% ($a_{e1} = 0,5$ mm), 37% ($a_{e2} = 1,5$ mm) e 32% ($a_{e3} = 2,5$ mm). No geral, as forças geradas com MQF apresentaram valores menores em comparação às obtidas com fluido em abundância. A ausência de fluido em abundância no MQF leva a uma elevação da temperatura na região do corte (interfaces peça/cavaco/ferramenta), pois se perde a excelente propriedade refrigerante. Esse aumento da temperatura na região de corte do material é a provável causa da redução dos esforços de cisalhamento do material. Conforme descrito por Santos (2007) o aquecimento provoca a redução da tensão de cisalhamento do material. E segundo Byrne *et al.* (2003) a capacidade lubrificante do MQF gera uma redução no coeficiente de atrito nas interfaces peça/cavaco/ferramenta.

A Figura (6) ilustra os gráficos das variações das componentes radial ($\pm\Delta F_x$), tangencial ($\pm\Delta F_y$) e axial ($\pm\Delta F_z$) das forças para as duas condições de lubrificação.

Na comparação com a aplicação de fluido em abundância, a utilização de MQF com $v_{c1} = 175$ m/min, $a_{e1} = 0,5$ mm e $a_{e2} = 1,5$ mm não mostrou diferenças nas amplitudes das variações das componentes ortogonais ($\pm\Delta F_x$, $\pm\Delta F_y$ e $\pm\Delta F_z$). Tais diferenças ficaram abaixo dos 4,1%. Quando se aplicou $v_{c2} = 200$ m/min, $a_{e1} = 0,5$ mm e $a_{e2} = 1,5$ mm, o MQF gerou reduções nas amplitudes das componentes, as quais oscilaram entre 43% e 45%. Entretanto, para $a_{e3} = 2,5$ mm, houve um grande acréscimo nas amplitudes das variações das componentes ortogonais com o uso da lubrificação por MQF: para $v_{c1} = 175$ m/min, os aumentos foram de 174% ($\pm\Delta F_x$), 330% ($\pm\Delta F_y$) e 160% ($\pm\Delta F_z$); para

$v_{c2} = 200$ m/min, os aumentos foram de 158% ($\pm\Delta F_x$), 147% ($\pm\Delta F_y$) e 84% ($\pm\Delta F_z$). Esta elevação das componentes ortogonais para $a_{e3} = 2,5$ mm se deve à dificuldade da inserção do fluido atomizado na zona de corte devido à posição o bico aspersor de MQF, resultando desta forma numa lubrificação insuficiente. Constatou-se ainda que a inclinação de aplicação do bico afeta significativamente os valores de força e rugosidade. Maiores detalhes na **Seção 3.3**.

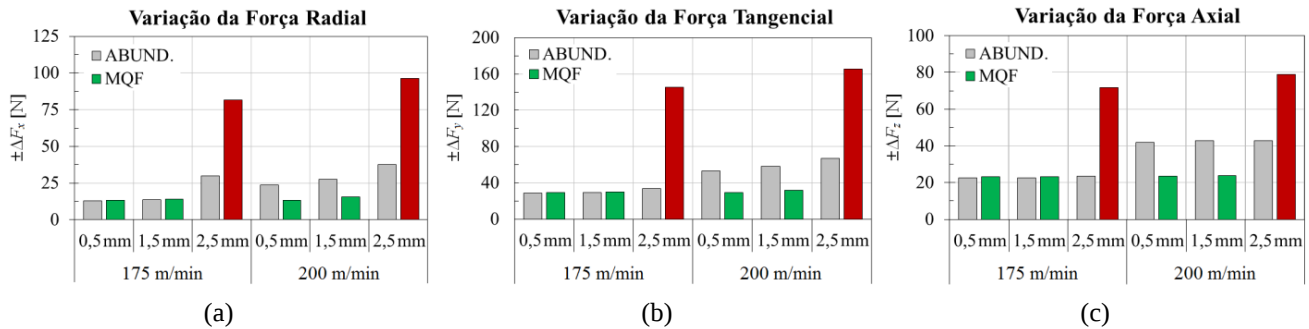


Figura 6: Variações das forças (95% de confiança): (a) radial; (b) tangencial; (c) axial.

Os destaques nos gráficos da Fig. (6) mostram que os valores das variações das componentes radial, tangencial e axial (respectivamente $\pm\Delta F_x$, $\pm\Delta F_y$ e $\pm\Delta F_z$) para $a_{e3} = 2,5$ mm assumem valores discrepantes para as duas velocidades de corte. Estas diferenças constatadas se devem a lubrificação insuficiente devido a posição do bico aspersor que não permitia uma correta aplicação do fluido na zona de corte, parte do jato atomizado era perdido sobre a superfície bruta da peça e sobre o cavaco. 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, conforme Byrne *et al.* (2003).

3.2. Avaliação da Qualidade da Superfície Faceada

As Figuras (7a) e (7b) apresentam, respectivamente os gráficos dos valores das rugosidades média (R_a) e total (R_t) para as diferentes combinações de parâmetros da Tab. 1. Os valores foram determinados utilizando o valor médio de suas amostras (original e réplica) e os desvios foram calculados sobre a média das duas amostras.

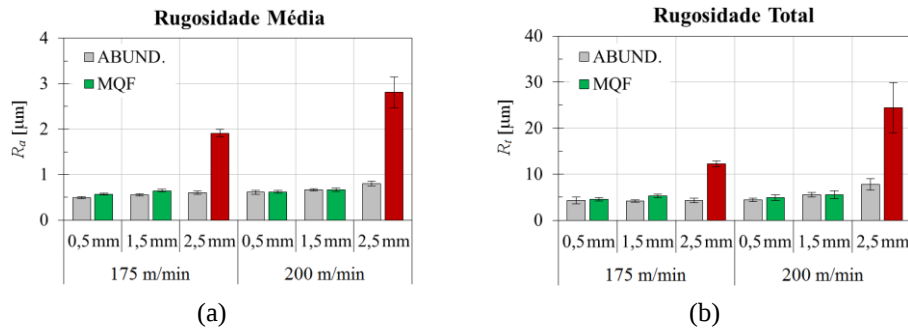


Figura 7: Valores de rugosidade: (a) média R_a [μm]; (b) total R_t [μm].

Como se observa na Fig. (7), 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, pode-se constatar que o aumento da v_c 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.

A comparação entre a melhor superfície (Ensaio 1) e a pior (Ensaio 12) pode ser visualizada na Fig. (8). Na Amostra 1 (Fig. 8a) 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 destas. Já para os valores mais altos de R_a e R_t encontrados nas medições (Fig. 8b), fica difícil a visualização das marcas provocadas pelo avanço e há bem mais cavaco aderido à superfície da amostra (rebarbas). Uma possível explicação para as diferenças entre os perfis de rugosidade apresentados é que no Ensaio 1 ($v_{c1} = 175$ m/min, $a_{e1} = 0,5$ mm, fluido em abundância), a combinação do menor a_e com fluido em abundância proporcionou menor atrito entre a ferramenta e a peça em comparação ao Ensaio 12 ($v_{c2} = 200$ m/min, $a_{e3} = 2,5$ mm, MQF), gerando melhor acabamento na Amostra 1. No caso da Amostra 24

(Ensaio 12), houve maior vibração da ferramenta e possivelmente maior coeficiente de atrito nas interfaces 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°) à face da peça, impedindo a correta aplicação do lubrificador na interface peça/cavaco/ferramenta.

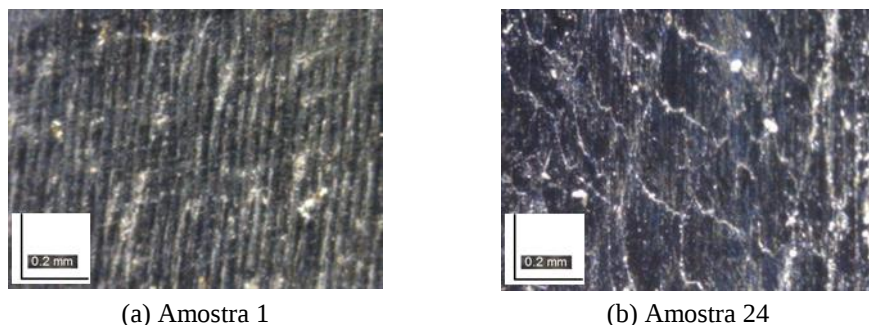


Figura 8: Superfícies das amostras (ampliação 200x) obtidas no: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 12.

Como as amostras que apresentaram os maiores valores de rugosidade (Ensaio 9 e 12) coincidem com as que apresentaram as maiores variações $\pm\Delta F_z$ (Fig. 8b), e como os valores de rugosidade em relação às demais amostras foram elevados, optou-se pela realização de mais dois ensaios (e suas repetições) modificando a posição do bico aspersor. Detalhes na **Seção 3.3**.

A Figura (9) exibe os gráficos dos valores dos desvios (oscilações) $\pm\Delta L$ das alturas (comprimentos) para as diferentes combinações de parâmetros da Tab. (1). Os valores foram calculados através da média dos desvios-padrões para 40 pontos (20 para a amostra original e 20 para a réplica).

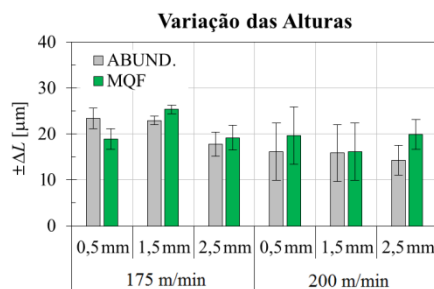


Figura 9: Desvios (oscilações) na superfície dos corpos de prova (95% de confiança).

Observando a Fig. (9) constata-se que não é possível afirmar que há diferença de $\pm\Delta L$ 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, as variações das alturas 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 métodos se deu com $v_{c2} = 200$ m/min e $a_{e3} = 2,5$ mm. Neste caso, a diferença foi de 28%. 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.

As exceções ocorreram com $v_{c1} = 175$ m/min e $a_{e1} = 0,5$ mm e com $v_{c2} = 200$ m/min e $a_{e2} = 1,5$ mm, ambos para refrigeração em MQF, onde a variação foi menor para o primeiro caso e apresentaram valores similares para o segundo.

3.3. Alteração do Ângulo de Aplicação do Bico Aspersor de MQF

Em virtude das grandes oscilações da ferramenta de corte (Fig. 6) e das discrepâncias nas medições das rugosidades nas superfícies dos corpos de prova (Fig. 7) para $a_{e3} = 2,5$ mm com lubrificação por MQF, optou-se em repetir os Ensaios 9 e 12 com o bico aspersor posicionado a 45° , conforme mostra a Fig. (10). A distância do bico para a ferramenta de corte foi mantida em 20 mm.

A Figura (11) mostra os resultados comparativos para as amplitudes das variações das componentes ortogonais ($\pm\Delta F_x$, $\pm\Delta F_y$ e $\pm\Delta F_z$) em função da inclinação do bico aspersor e a Fig. (12) ilustra a avaliação comparativa da qualidade da superfície faceada para a mesma situação (90° e 45°).

Analisando a Figura (11), observa-se que o comportamento da variação de cada componente com a nova inclinação do bico aspersor segue a tendência da Fig. (6) com lubrificação em MQF, ou seja, praticamente não há alteração de $\pm\Delta F$ com o aumento de a_e e/ou incremento de v_c . No caso, os valores de $\pm\Delta F_x$, $\pm\Delta F_y$ e $\pm\Delta F_z$ ficaram estáveis em torno de 15 N, 30 N e 22 N respectivamente, valores estes inferiores aos obtidos quando o bico foi posicionado a 90° .

Esta redução na amplitude das forças se deve à maior estabilidade da operação de corte originária de uma maior eficiência lubrificante obtida com o bico aspersor posicionado a 45°.

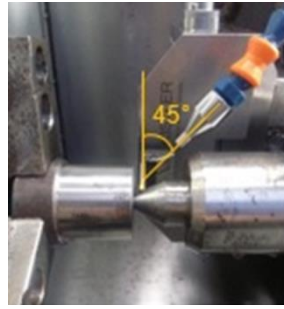


Figura 10: Bico aspersor posicionado a 45° da posição inicial.

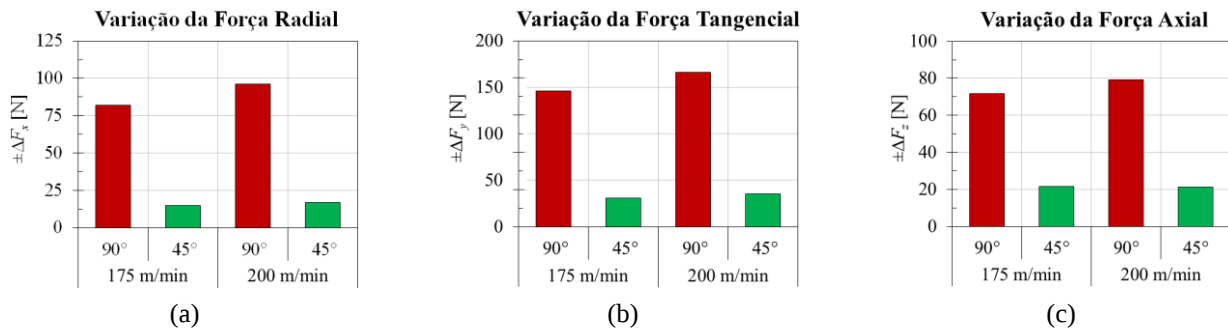


Figura 11: Variações das forças (95% de confiança) em função da inclinação do bico aspersor: (a) radial; (b) tangencial; (c) axial.

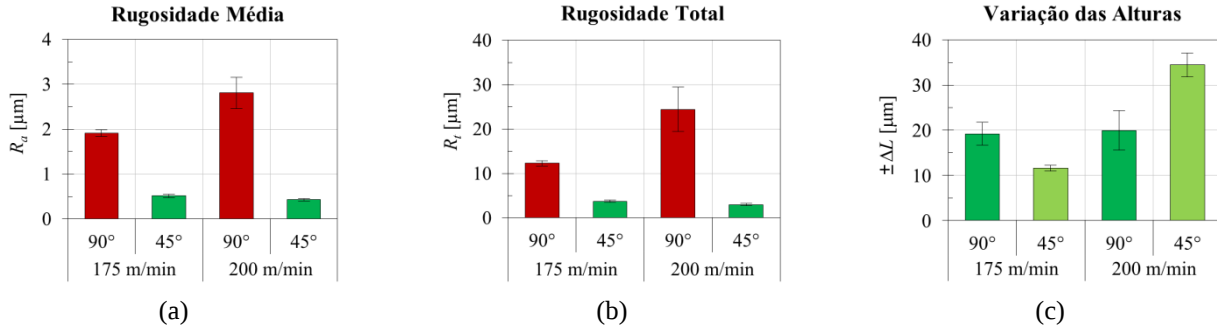


Figura 12: Acabamento em função da inclinação do bico aspersor: (a) rugosidade média R_a [μm]; (b) rugosidade total R_t [μm]; (c) desvios na face dos corpos de prova $\pm\Delta L$ [μm].

Assim como na Fig. (11), com a alteração da posição do bico aspersor, a rugosidade média (Fig. 12a) apresentou redução de 73% para v_{c1} e de 85% para v_{c2} . Já a rugosidade total (Fig. 12b) apresentou uma redução de 70% para v_{c1} e de 88% para v_{c2} . Estas quedas deram-se possivelmente devido à melhor lubrificação e, por conseguinte, menor atrito das interfaces peça/ferramenta/cavaco. Além disso, os valores de R_a e R_t encontrados para $v_{c2} = 200$ m/min com o bico aspersor a 45° foram os menores dentre todos os valores mensurados $R_a = (0,43 \pm 0,03) \mu\text{m}$ e $R_t = (3,0 \pm 0,2) \mu\text{m}$. Isto sugere que a inclinação do bico tem influência significativa sobre a eficácia do método por MQF.

Na análise das oscilações (Fig. 12c), as amostras para $v_{c1} = 175$ m/min com aplicação a 45° apresentaram os menores valores de $\pm\Delta L$ (12 ± 1) μm dentre todos os ensaios, enquanto que para $v_{c2} = 200$ m/min foi observado um acréscimo de 75% nos valores dos desvios em relação à aplicação a 90°. Essas diferenças são possivelmente causadas pela diferença de aquecimento das amostras.

4. 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.

As análises do gráfico das oscilações da componente axial da força mostraram que para $v_{cl} = 175$ 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 $v_{cl} = 175$ 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 foi melhorado significativamente. Mas, na medição das oscilações dos comprimentos ($\pm \Delta L$), a inclinação do bico resultou em uma piora nos resultados para $v_{c2} = 200$ m/min e uma melhora para $v_{cl} = 175$ m/min. Posto isso, na prática é preferível selecionar v_{cl} .

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.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- 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.
- Byrne, G.; Dornfeld, D.; Denkena, B.. “Advancing cutting technology”. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.52, n.2, p.483-507, 2003.
- 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: Blucher, 1995.
- Fitzpatrick, M.. “Introdução aos Processos de Usinagem”. Porto Alegre: AMGH, 2013, 506p.
- Hadad, M.; Sadeghi, B.. “Minimum quantity lubrication – MQL turning of AISI 4140 steel alloy”. Journal of Cleaner Production, v.54, p.332-343, 2013.
- Juneja, B.L.; Swkhon, G.S. “Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools”, New Delhi: John Wiley & Sons, 1987, 462p.
- Klocke, F.; Eisenblätter, G.. “Dry cutting”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.46, n.2, p.519-526, 1997.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B.. “Teoria da Usinagem dos Materiais”, 2 ed., São Paulo: Blucher, 2011.
- NBR ISO 4287, Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade. ABNT, 2002.
- Nunes, L. T. “Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5”. 144 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2011.
- Santos, S. C.; Sales, W.F. “Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”, 1ª Ed., São Paulo: Artliber. 2007
- Shaw, M. C. “Metal Cutting Principles”, New York: Oxford Science Publication, 1984, 594p.
- 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., “Surface metrology”, Measurement Science and Technology, v.8, n.9, p.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.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION ON THE STEEL FINISH FACING BY GROOVING TOOL IN FUNCTION OF GROOVE WIDTH

Elias Samuel Cristo Espindola, elias.espindola@ufrgs.br

Maurício Rudi Peiter, mauricio.peiter@gmail.com

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)
Rua Sarmento Leite, nº 425 – Cidade Baixa – Porto Alegre, RS – Brazil

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 major a_e , the MQF method produced roughness values about three 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: Machining, Grooving, Facing, Minimum quantity fluid