

## ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO E VAZÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA

**Eduardo Carlos Bianchi**  
**Rodrigo Daun Monici**  
**Eraldo Jannone da Silva**  
**Paulo Roberto de Aguiar**  
**Ivan De Domenico Valarelli**

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: [bianchi@bauru.unesp.br](mailto:bianchi@bauru.unesp.br).

### **Resumo**

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência a intensidade de pressão e vazão do fluido de corte no comportamento do processo de retificação do tipo tangencial plana. Para a análise do resultados, foram mantidas constantes as condições de usinagem e variados os valores de pressão e vazão do fluido de corte. Os ensaios foram realizados com um rebolo convencional de óxido de alumínio retificando, como corpo de prova, o aço VC 131 com dureza média de 60 HRc. Dos resultados obtidos pode-se verificar que com o aumento dos valores de pressão e vazão do fluido de corte a força tangencial de corte tendeu a aumentar, o rebolo desgastou diametralmente menos (consequentemente, com maior valor obtido de relação **G**). os valores de rugosidade média aritmética da peça e temperatura tenderam a diminuir.

**Palavras-chave:** Fluido de corte, retificação profunda, refrigeração

### **1. INTRODUÇÃO**

A dinâmica e a velocidade de transformações em nossa sociedade estão rompendo padrões de qualidade e de exigências dos consumidores com uma intensidade inusitada, culminando com o freqüente surgimento de produtos que já estão obsoletos poucos dias após o seu próprio lançamento. Esta é a realidade que tem-se presenciado em diversos segmentos de consumo tanto se bens físicos como de serviços.

A globalização é, hoje um fato consumado na ordem mundial. Através dela, um grande número de trocas comerciais, culturais, tecnológicas e financeiras, ocorre entre países numa velocidade sem precedentes na história humana.

Na economia globalizada os processos de usinagem passam por constante evolução, para atender ao seu mercado que vem ficando cada vez mais exigente.

Dentro das condições de usinagem, devido à crescente velocidade de corte que as máquinas operam, e conseqüentemente com maior quantidade de calor gerado, o fluido de corte e a forma de aplicação no processo passam a ter uma maior relevância.

Há disponível no mercado uma grande diversidade de óleos e fluidos de corte para os diferentes processos de usinagem, nos quais se desejam usá-los. Diversos fatores influem na escolha do melhor fluido, como viscosidade, características técnica, custo etc., e mesmo após a escolha do mesmo, ainda existem outras considerações que devem ser feitas para o melhor aproveitamento desse fluido. Entre destacam-se a geometria do bocal pelo qual o fluido será introduzido na operação, a intensidade de pressão e a vazão na saída do bocal, qual a melhor posição que se deve colocar o bocal, entre outras, sendo todas de substancial importância para a melhoria da qualidade final da peça.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo comparativo do desempenho de um rebolo convencional de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), submetido a uma condição de usinagem para dois valores de pressão e vazão do fluido de corte, denominadas por máxima e mínima, de forma a obter-se subsídios para análise do comportamento do processo de retificação.

Para a realização dos ensaios um bocal foi especialmente projetado e construído para que a vazão de fluido de corte fosse direcionada com o mínimo atrito entre o fluido e suas paredes internas, para o melhor escoamento do mesmo.

Através de ensaios laboratoriais, onde as condições de usinagem (penetração do rebolo na peça " $a$ " [ $\mu m$ ], velocidade da peça " $v_w$ " [m/s] e velocidade de corte " $v_s$ " [m/s]) foram mantidas constantes. Assim foram avaliadas as variáveis de saída do processo de retificação (força tangencial de corte  $F_{tc}$  [N], rugosidade média aritmética  $R_a$  [ $\mu m$ ], relação  $G$  [--] e temperatura  $T$  [ $^{\circ}C$ ]) com relação aos valores de pressão e vazão do fluido de corte.

## 2. EFEITOS DA ALTA VELOCIDADE DO FLUIDO DE CORTE

Segundo KOVACEVIC e MOHAN (1995), fluidos de corte tem sido tradicionalmente usados para a refrigeração e lubrificação na interface entre o rebolo e a peça. O desempenho do fluido de corte pode ser melhorado aumentado se for utilizada uma maior velocidade de saída do bocal pois isso pode superar a força centrífuga do rebolo e penetrar as redondezas do envelope de ar. A taxa de volume de fluxo também pode ser grande suficiente para providenciar a efetiva refrigeração/lubrificação para a zona de usinagem.

A remoção de material em retificação ocorre em forma de cavacos finos, que é feito por grande quantidade de arestas de corte distribuídos e orientadas ao acaso na superfície de corte do rebolo. Contudo, a remoção deste material é acompanhado por um alto consumo de energia. Junto com a presença da deformação plástica, atrito e geração de energia calorífica, a maior parte desta energia é convertida em calor, causando altas temperaturas localizadas na zona de usinagem. Isto resulta em vários danos térmicos para a superfície da peça na forma de fissuras, distorções, tensões residuais e incerteza dimensional e geométrica. Estes efeitos indesejáveis são acompanhados pela aderência de partículas da peça (cavacos) nos poros do rebolo.

Fazendo uma comparação da aplicação do fluxo e do fluido de corte à alta velocidade, em todo o raio de ação da velocidade do jato, tanto as componentes da força tangencial de corte quanto o da força normal de corte são reduzidos mais do que 50% com a aplicação do jato de alta velocidade. As vantagens oferecidas pela alta velocidade do fluido de corte foram em termos de melhora da refrigeração/lubrificação da zona de usinagem, reduzindo o uso de rebolo e a carga do mesmo, e melhorando o efeito da direção em mais de 50% pela redução do  $R_a$  (rugosidade média aritmética). Então, o desempenho total do processo de usinagem foi melhorado pelo fluido de corte à alta velocidade.

Conforme GUO e MALKIN (1995), a energia gasta pelo processo de usinagem pode causar temperaturas muito altas e danos térmicos para a peça. Fluidos são aplicados principalmente para providenciar lubrificação e refrigeração, e principalmente com a efetividade do fluido de corte como refrigerante. O processo de usinagem requer alta energia por unidade de volume de material o qual é virtualmente todo convertido em calor na zona de usinagem. Isto resulta em elevadas temperaturas e possíveis riscos térmicos para a peça. Fluidos são aplicados para remover calor na peça de trabalho.

Segundo Malkin (1989), a retificação ocorre através de interações entre os grãos abrasivos e a peça a ser retificada. De acordo com o modelo de análise dos mecanismos de geração do cavaco, a energia total de retificação ( $u$ ) inclui as energias referentes a remoção do cavaco propriamente dita ( $u_{ch}$ ), ao deslizamento dos grãos abrasivos de áreas de topo de grãos desgastadas com a peça ( $u_{sl}$ ), e a energia referente ao deslocamento de material por deformação plástica (sulcagem) sem a remoção do mesmo ( $u_{pl}$ ).

Conforme MARIANI e TREBING (sd), fluidos sintéticos tem uma viscosidade menor do que os óleos. Para aplicar corretamente um sintético e adequado lubrificante para operações de usinagem com diamante e CBN, é necessário aumentar o volume de refrigerante ou velocidade ou rearranjar o bocal do refrigerante para capturar o quanto mais fluido possível para a peça de trabalho. Um rebolo à alta velocidade forma uma turbulenta camada com alta pressão do ar próxima à superfície do mesmo. Usinagem a altas velocidades requerem aplicação de refrigerante à alta velocidade para penetrar nesta camada. Desde que os sintéticos são mais solventes que os óleos, eles necessitarão de uma velocidade ainda maior. Um volume grande de refrigerante também é necessário para efetivamente resfriar a interface entre o rebolo e a peça de trabalho e jogar os cavacos da área de usinagem. Desde que os sintéticos tenham uma viscosidade menor, pode-se também querer usar um volume de fluido maior. O arranjo do bocal de refrigerante pode se maximizar lubrificação e a refrigeração, ajustando o bocal para a parte crítica da interface entre o rebolo e a peça de trabalho para o refrigerante ser continuamente jogado.

De acordo com WEBSTER e CIU (1995), a aplicação do fluido em processos de usinagem está se tornando mais importante devido a alta taxa de remoção, alta qualidade e longa vida do rebolo. Seleção de um eficiente modo de aplicar isso é um método signficante de encontrar metas de produtividade e pode ser tão importante quanto a seleção das especificações do rebolo de usinagem. O papel do fluido em operações de usinagem são de refrigerar a peça de trabalho, retirar os cavacos, lubrificar a zona de usinagem, refrigerar o rebolo, e limpar o rebolo. Geralmente a energia de usinagem é dissipada no cavaco, na peça, no rebolo e no fluido.

Segundo GUO e MALKIN (1995), apud WEBSTER e CIU (1995), a energia gasta pelo processo de usinagem pode causar temperaturas muito altas e danos térmicos na peça. A utilização de fluidos propicia a retirada de calor, minimizando os danos térmicos que poderiam criar tensões indesejáveis na superfície da peça, além de comprometer a fixação dos grãos abrasivos na superfície de corte.

### 3. METODOLOGIA

Visando a realização deste trabalho, foram realizados 02 ensaios laboratoriais mantendo constantes as condições de usinagem ( $v_s$ ,  $v_w$  e  $a$ ), alterando-se os valores pressão e vazão do fluido de corte. Foram medidos os parâmetros de saída força tangencial de corte, rugosidade média aritmética da peça, temperatura e relação  $G$ .

Para a medição da força tangencial de corte optou-se, pela determinação, em tempo real, da mesma através da rotação  $n$  da ferramenta e da potência elétrica  $P_c$  consumida pelo motor de acionamento da ferramenta abrasiva, durante o corte. Para tanto, utilizou-se um circuito

condicionador de sinais, o qual permite a aquisição e transformação dos valores de corrente elétrica, tensão elétrica e rotação do motor em sinais de tensão elétrica compatíveis, para serem enviados à uma placa de aquisição de dados A/D. Utilizando-se o software de aquisição de dados LabView 4.1, equações de calibração previamente determinadas e os valores de tensão lidos pela placa de aquisição de dados pôde-se então calcular a força tangencial de corte  $F_{tc}$ .

O material utilizado para a realização dos ensaios foi o aço VC 131, temperado e revenido, com dureza média de 60 HRc. As dimensões dos corpos de prova foram: 263,5 mm de comprimento, 40 mm de altura e 5 mm de espessura.

Inicialmente o corpo de prova era fixado sobre a mesa da máquina retificadora e posteriormente eram acertadas todas as condições de usinagem (velocidade de corte, velocidade da mesa e penetração do rebolo na peça). Posteriormente dava-se início aos ensaios medindo-se a força tangencial de corte, em tempo real, rugosidade média aritmética da peça e o desgaste diametral do rebolo no final de cada ensaio.

Os valores de temperatura na peça foram medidos com dois termopares que foram inseridos em pequenos furos transversais nas peças, espaçados de 5 mm na direção vertical. Assim, o corpo de prova era retificado até que o próprio termopar também o fosse. Neste momento, o termopar desprendia-se naturalmente da peça e o segundo termopar continuava a registrar a temperatura até que fosse retificado, de forma similar ao anterior. Os valores de temperatura também eram registrados via software.

A rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) dos corpos de prova era medida periodicamente (a cada número pré-determinado de passadas do rebolo sobre a peça, dependendo da condição de usinagem), utilizando-se um rugosímetro marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ (com cut-off de 0,8 mm e filtro 2CR (ISO)), em três posições distintas do corpo de prova (laterais e centro) e quatro vezes consecutivas em cada posição. Posteriormente era feita a média dos valores obtidos e anotadas para posterior utilização.

Os ensaios foram realizados utilizando-se a metade da largura (altura) do rebolo. Desta forma, a metade não utilizada no ensaio servia como referência para a medição da perda diametral do rebolo. No final de cada ensaio o perfil geométrico do rebolo era marcado sobre uma chapa metálica (aço com baixo teor de carbono) para posterior medição do desgaste do rebolo. Como o volume de material removido era constante para cada ensaio, a determinação da relação  $G$  era direta.

A operação de dressagem foi realizada através de um dressador de ponta única, com grau de recobrimento de dressagem ( $U_d$ ) igual a 1, para a obtenção da máxima agressividade da superfície de corte do rebolo.

As condições de usinagem utilizadas foram: penetração do rebolo na peça  $a = 185 \mu\text{m}$ , velocidade de corte do rebolo  $v_s = 33 \text{ m/s}$  e velocidade da peça  $v_w = 1,1 \text{ m/min}$ .

Os valores de pressão do fluido de corte foram medidos através de um orifício, existente no bocal, fixo a uma mangueira ligada a um tubo em U contendo mercúrio. Variava-se a válvula de controle do fluido até que se obtivesse a pressão desejada (máxima ou mínima), que era verificada com o desnível da coluna de mercúrio.

A medição da vazão do fluido corte foi feita, através da tomada de tempo para encher um recipiente graduado em 5 litros. Foram feitas três medidas antes de cada ensaio para se obter um valor médio confiável.

Os valores de pressão e vazão utilizados nos ensaios foram  $P_{m\acute{a}x.} = 28.417 \text{ Pa}$  com  $Q_{m\acute{a}x.} = 0,33 \text{ l/s}$  e  $P_{m\acute{i}n.} = 2.935 \text{ Pa}$  com  $Q_{m\acute{i}n.} = 0,0735 \text{ l/s}$ .

Para se obter os valores de pressão e vazão foi projetado e construído um bocal com perfil de bico arredondado, baseado em WEBSTER e CIU (1995), conforme mostrado na figura 1. Isto foi realizado pois os bicos tradicionais, geralmente, tem uma ou duas paredes internas convexas, proporcionam um nível alto de turbulência, o que afeta significativamente

a coerência do jato. Em contraste o novo bocal arredondado tem paredes internas côncavas, o que impede o crescimento da turbulência.

onde:

$D = 4,8 \text{ mm}$  é o diâmetro da tubulação de entrada

$D_n = 3,2 \text{ mm}$  é o diâmetro de saída do bico

$C_r (D/D_n) = 1,5$  é a razão de contração.

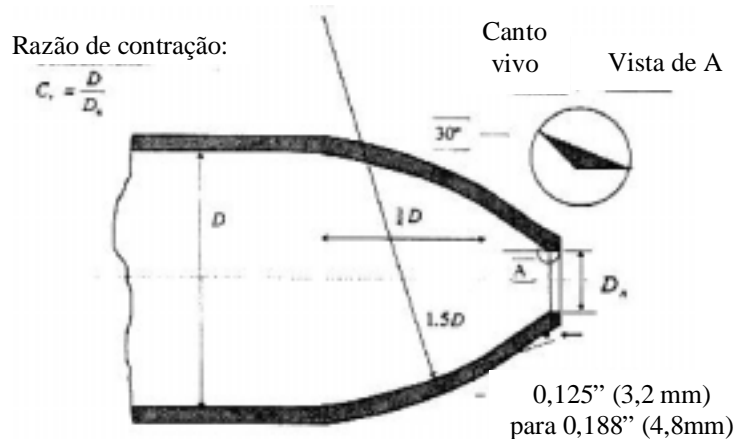


Figura 1: Bico de refrigeração baseado em Webster (1995)

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na forma de gráficos figuras de força tangencial de corte, temperatura e rugosidade média aritmética da peça em função do volume de material removido e relação  $G$ .

##### 4.1. Resultados de força tangencial de corte

Na figura 2 são apresentados os valores obtidos de força tangencial de corte.

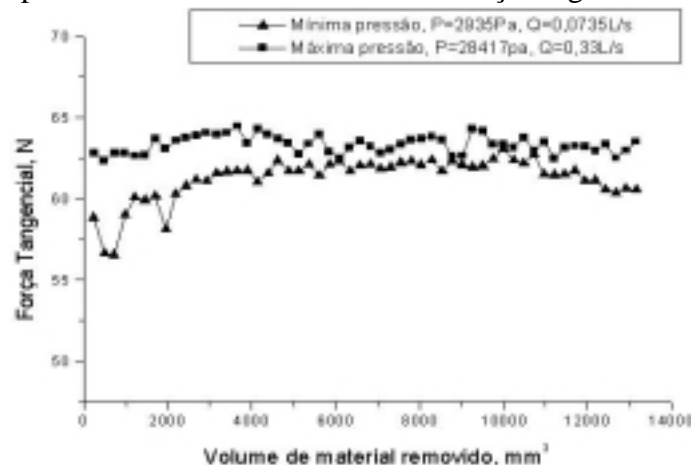


Figura 2: Resultados obtidos de força tangencial em função do volume de material removido

Pode-se verificar que quando os valores de pressão e vazão foram maiores, a magnitude da força tangencial de corte foi maior. Isto ocorre pelo fato de que, neste caso, a capacidade de refrigeração do fluido de corte é maior (pela diminuição da temperatura na região de corte), acarretando numa menor deterioração do ligante. Desta forma a grão abrasivo permanece aderido por mais tempo na superfície de corte do rebolo. Desta forma, há um maior aumento na área de contato do rebolo com a peça que, conseqüentemente, proporciona um aumento na força tangencial de corte.

No caso onde a refrigeração ocorreu com os menores valores de pressão e vazão, houve uma maior degradação do ligante (pelo aumento da temperatura na região de corte) fazendo com que os grãos abrasivos se desprendessem mais rapidamente da superfície de corte do

rebolo. Desta forma, os novos grãos abrasivos (que são mais afiados do que os já desgastados) possuem maior capacidade de remoção de material, o que implica em valores menores de força tangencial de corte.

#### 4.2. Resultados de temperatura

Para a constatação da influência da temperatura no desempenho do processo de retificação, são apresentados, nas figuras 3 e 4, os valores obtidos de temperatura medidas com os dois termopares.

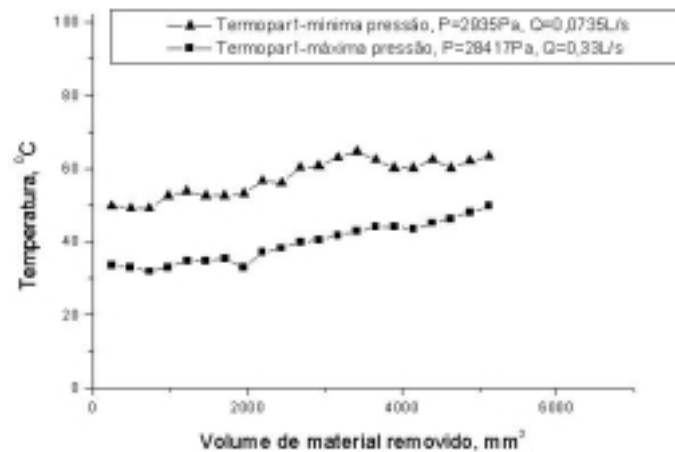


Figura 3: Resultados de temperatura obtidos em relação ao volume de material removido, referente ao termopar 1

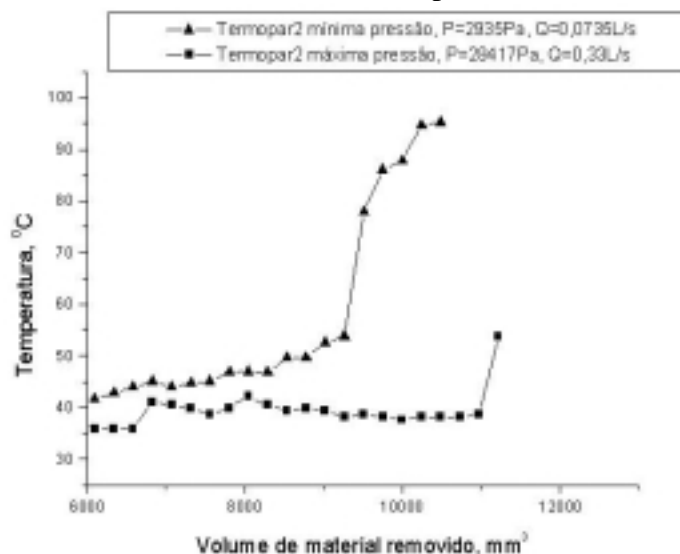


Figura 4: Resultados de temperatura obtidos em relação ao volume de material removido, referente ao termopar 2

Pela análise destas figuras, pode-se verificar tanto para o termopar 1 quanto para o termopar 2 a temperatura é mais elevada quando a pressão de saída foi mínima.

Estes resultados já eram esperados pois quando a vazão e a pressão são menores há uma menor refrigeração na área de contato entre o rebolo e a peça de trabalho. Devido a essa menor capacidade de refrigeração e o constante atrito entre o rebolo e a peça, a quantidade de calor gerado é relativamente grande; portanto, a temperatura medida para este caso é maior.

Na situação onde os valores de pressão e vazão foram máximos, verificou-se que a ação da refrigeração foi mais eficiente, os valores de temperatura foram menores pela redução da ação do constante atrito entre o rebolo e a peça; ou seja, não é gerada a mesma quantidade de energia em forma de calor do que o gerado pela pressão e vazão menores.

Maris e Snyes (1973) concluíram, após um extenso levantamento bibliográfico que em torno de 60 a 90% do calor gerado no processo de retificação fluía para a peça, quando da utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Estes valores foram experimentalmente comprovados por Malkin e Anderson (1974), os quais utilizaram calorímetros para a determinação desta partição de energia. Desta forma, a redução da geração de calor promovida pelo melhor refrigeração da região de corte proporciona a manutenção da capacidade de corte do rebolo durante tempos maiores diminuindo o desgaste dos mesmos, reduzindo as parcelas de energia relativas ao “plowing” ( $u_{pl}$ ) e ao deslizamento de grãos cegos ( $u_{sl}$ ).

#### 4.3. Resultados de Relação G

A relação **G** é definida como sendo a relação do volume de material removido e o volume ferramenta gasta durante do tempo de usinagem. Na figura 5 são apresentados os valores de relação **G** obtidos nos ensaios.

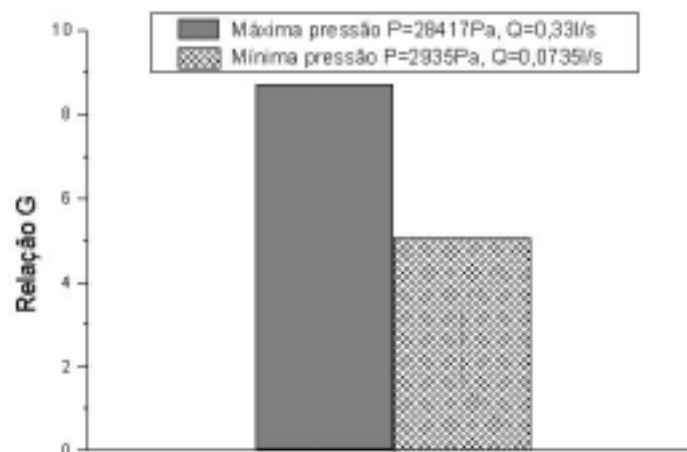


Figura 5: Resultados de relação **G** em função da pressão e vazão

Pode-se verificar que quando os valores de pressão e vazão são maiores a relação **G** (8,73) é maior. Isto ocorre pela melhor refrigeração na interface entre o rebolo e a peça, conforme comentários realizados anteriormente. Portanto, os grãos abrasivos permanecem mais tempo fixo a superfície de corte do rebolo, proporcionando um menor desgaste diametral do rebolo (consequentemente com um aumento da relação **G**).

No caso dos valores de pressão e vazão serem menores, devido a menor refrigeração, os grãos abrasivos apresentam menor capacidade de fixação pelo ligante, devido a deterioração térmica do ligante, o que proporciona o maior desgaste diametral do rebolo. Neste caso o valor de relação **G** obtido foi menor (5,07).

#### 4.4. Resultados de rugosidade média aritmética da peça

Com a maior retenção dos grão abrasivos na superfície de corte do rebolo, que ocorreu no caso onde os valores de pressão e vazão foram maior, há um maior desgaste no topo dos grão abrasivos. Isto faz com que o material sofra um menor riscamento e, consequentemente, a rugosidade média aritmética da peça é menor.

Pela análise da figura 6 pode-se verificar que a rugosidade média aritmética obtida, em cada passada do rebolo sobre a peça, foi menor quando foram utilizados os valores máximos de pressão e vazão.

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para a força tangencial de corte e da relação  $G$ , devido aos grãos abrasivos se manterem ligados aos rebolos por mais tempo para a máxima pressão devido a maior refrigeração, a área de contato é maior pois os topos dos grãos em contato durante a usinagem acabam ficando com o diâmetro relativamente maior, o que ocasiona em menores valores de rugosidade. Já quando a pressão é mínima o diâmetro dos topos dos grãos abrasivos serão relativamente menores, o que ocasionará maior valor para a rugosidade.

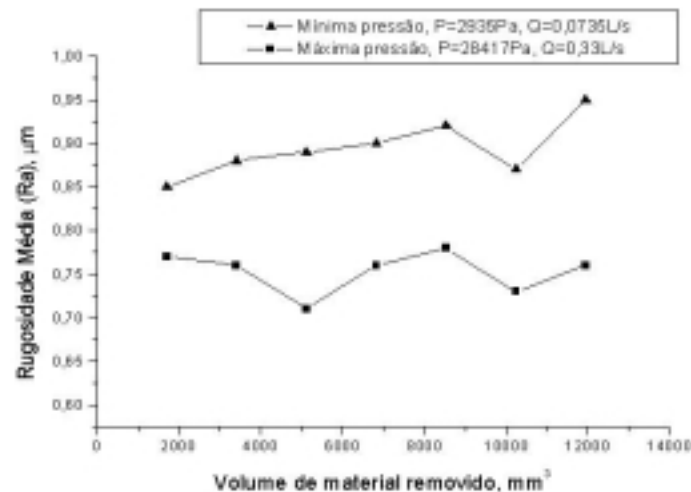


Figura 6: Resultados obtidos dos valores de rugosidade em relação ao volume removido

## 5. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos pode concluir que, de uma maneira geral, quando o fluido de corte foi utilizado com valores de pressão e vazão mais elevados, o desempenho do rebolo foi melhorado. Neste caso, apesar da força tangencial de corte ter se elevado, o calor gerado na zona de corte foi menor, a relação  $G$  maior, a rugosidade média aritmética encontrada é menor. Estes resultados mostram que a instalação de um bocal adequado, que melhora a refrigeração na interface entre o rebolo e a peça, a máxima vazão é mais eficaz.

## 6. REFERÊNCIAS

- GUO, C.; MALKIN, S. "Effectiveness of Cooling in Grinding". CIRP Annual Convention, STG, Enschede, 1995.
- MARIANI, G. and TREBING, C. "Synthetic Coolants Cut It in Superabrasive Grinding"
- KOVACEVIC, R. and MOHAN, R. "Effect of High Speed Grinding Fluid on Surface Grinding Performance", 1ª Conferência Internacional de Usinagem, Setembro de 1995.
- WEBSTER, J.A., CIU, C. "Flow Rate and Jate Velocity Determination for Design of a Grinding Cooling System", 1ª Conferência Internacional de Usinagem, Setembro de 1995.
- MARIS, M.; SNOYES, R. "Heat affected Zone in Grinding Operations" Proceedings of the 14th International Machining Tool Design and Research Conference, 1974, p. 659-669.
- MALKIN, S.; ANDERSON, R. B. "Thermal Aspects of Grinding, Part 1 - Energy Partition" ASME Journal of Engineering for Industry Vol. 96, 1974, p. 1177-1183.
- MALKIN, S. "Grinding Mechanisms" e "Grinding Temperatures and Thermal Damage", In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989. Cap. 5 e 6, p.108 a 171.