

## **ANÁLISE SUPERFICIAL NO POLIMENTO DE AÇOS USADOS EM MOLDES E MATRIZES**

**Jorge Augusto Marques, marquesmec@gmail.com**  
**Carlos Henrique Lauro, caiquelauro@gmail.com**  
**Denison Baldo, denison\_db@yahoo.com.br**  
**Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br**

Universidade Federal de São João del Rei - Praça Frei Orlando, 170 - Centro,

**Resumo:** *O polimento de moldes e matrizes é a última e mais importante fase na linha de produção de ferramentas de estampagem/injeção. A qualidade dos produtos, como por exemplo, os produtos plásticos injetados dependem da rugosidade gerada no polimento. Entretanto, o processo de polimento ainda é caracterizado por um fraco conhecimento dos mecanismos influentes e sendo ainda dependente de atividades de pesquisas. Neste trabalho um estudo específico do processo de polimento foi realizado em amostras de aço AISI H13 tradicionalmente empregado na fabricação de moldes de matrizes variando-se a força de polimento, o tempo de polimento e a velocidade de polimento. Corpos de prova com dureza de 47 HRC com 25 mm de diâmetro e 5 mm de espessura foram fixados em um dispositivo especial e polidos com faixas de variação da força, tempo e velocidade sendo essas as variáveis de entrada. Como variáveis de saída foram consideradas a rugosidade e a taxa de remoção do material. Foram realizadas análises das interações entre a força, tempo e a velocidade de polimento com a rugosidade dos corpos de prova e a taxa de remoção de material. Os resultados mostram que a rugosidade é mais influenciada pela velocidade de polimento e em seguida pela força de polimento. Considerando a taxa de remoção de material observou-se uma influência significativa relacionada apenas com a força de polimento.*

**Palavras-chave:** *Polimento, Moldes e Matrizes, Rugosidade, Taxa de Remoção de Material.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos a demanda da qualidade dos produtos tem aumentado em grande escala no Brasil e no mundo. Os processos de fabricação conseguem através de equipamentos modernos usados na atualidade produzirem componentes com grande precisão e qualidade. Considerando esta precisão, o processo de polimento vem sendo exigido cada vez mais, devido a posição de destaque que ocupa dentro da linha de produção de determinados componentes. O polimento é empregado nas indústrias de componentes aeroespaciais, indústrias automotivas e de componentes médicos, sendo a qualidade destes produtos ligada diretamente a eficiência deste processo.

No setor automotivo, podemos citar a necessidade do uso do processo de polimento na fabricação de peças para transmissão de veículos, fabricação de rolamentos e principalmente na indústria de moldes e matrizes. O setor de moldes e matrizes devido às exigências na textura superficial dos componentes é diretamente influenciado pelo processo de polimento. A qualidade de um produto conformado a frio em uma matriz ou injetado em um molde terá sua eficiência diretamente ligada ao grau de acabamento que o polimento proporcionou a estas ferramentas de moldagem.

Entretanto, o processo de polimento é ainda em grande parte demorado, pelo fato de ser um processo quase artesanal, dependendo do “feeling” dos polidores. O processo consome cerca de 38% do custos totais de produção de um molde (Rigby, 1993). Utilizando o polimento manual este tempo não pode, na maioria das vezes, ser diminuído devido a complexidade das partes que compõem um molde e/ou uma matriz. Além disto, a qualidade destes componentes é empírica e depende única e exclusivamente do conhecimento dos profissionais. Assim, o conhecimento e domínio do processo de polimento saindo da avaliação empírica para uma definição de padrões técnicos e conhecendo-se a influência das suas variáveis, proporcionará uma melhoria da qualidade dos produtos industrializados e uma significativa diminuição dos tempos do processo.

Pode-se citar que a indústria de moldes de injeção de plásticos, por exemplo, faz parte de cadeias de produção de extraordinário valor na competitividade industrial brasileira e já possui presença marcante dentro da comunidade mundial. Porém, necessita de esforços coordenados para ultrapassar o estágio de relativa insuficiência tecnológica quando é feita comparação com o panorama internacional desse segmento. Uma destas deficiências está ligada ao tempo e acabamento das superfícies polidas. O processo de polimento na indústria brasileira está abaixo do patamar internacional quando são consideradas as variáveis como acabamento, tensão residual, tempo, entre outras.

Tecnicamente o polimento é um tipo de processo mecânico para a remoção de material ou desgaste por abrasão da superfície da peça, em que a ferramenta e a peça se movimentam uma em relação à outra com um composto abrasivo aplicado livremente na interface peça-ferramenta. Este composto consiste de finos grãos abrasivos suspensos em um fluido que os desloca de um ponto a outro sobre a superfície da peça à base de óleo mineral. Durante o polimento os grãos se quebram em decorrência das cargas mecânicas. Isto resulta em decréscimo da taxa de remoção do metal e em uma constante melhora do acabamento superficial, já que a quebra dos grãos implica menor granulometria (Porto et al., 2004).

O polimento com abrasivos pode ser considerado uma das mais antigas tecnologias de manufatura e é comumente usado no acabamento de componentes óticos (Komanduri, Lucca e Tani, 1997). Geralmente a textura superficial destes componentes é menos de 1nm e a precisão de forma no polimento de superfícies planas, esféricas e superfícies de forma livre podem atingir também a escala nanométrica. De acordo com Brinksmeier, Riemer e Gessenharer (2006), o tamanho dos grãos abrasivos usados no processo de polimento está em uma escala de 3 µm a 10 µm minimizando a rugosidade e também apresentando baixa taxa de remoção de material.

O mais empregado método de polimento de superfícies na atualidade é denominado AFM (abrasive flow machine) ou usinagem com fluxo abrasivo. Gorana, Jain e Lal (2004) estudaram as influências do controle das variáveis deste processo como pressão de extrusão, concentração de abrasivo e tamanho de grão na influência da taxa de remoção de material, forças de corte, rugosidade e densidade dos grãos, demonstrando a complexidade neste processo em função da dinâmica e das variáveis envolvidas neste processo. Rajendra & Jain (2001) estudaram a energia específica e a determinação da temperatura no processo de fluxo abrasivo onde foram encontrados valores da ordem de 10 a 110 Joules e esses valores de energia foram quase constantes dentro destes intervalos, não ocorrendo grandes variações proporcionais à dureza dos corpos de prova utilizados.

Nos trabalhos desenvolvidos por Rajendra & Jain (1999) onde foi simulada a superfície gerada, utilizando modelos matemáticos, algumas considerações precisaram ser observadas na usinagem com fluxo abrasivo. Inicialmente, o risco traçado individualmente pelo grão é exatamente uma linha reta, o material é removido na forma de cavacos através de deformações plásticas, os grãos abrasivos são considerados com o formato esférico e finalmente a distribuição dos grãos abrasivos é homogênea dentro da região a ser polida. Com esta simulação foi possível prever a textura superficial e a taxa de remoção de material proporcional à concentração do abrasivo que influenciou diretamente nos valores de rugosidade à medida que a taxa de concentração era crescente.

Outras técnicas de polimento tem sido proposta por autores como Biing-Hwa et al. (2007), que desenvolveram um método de acabamento usando o polimento espiral de furos. Neste trabalho os autores propõem utilizar um equipamento com um fuso rotativo que conduz o meio abrasivo para dentro do furo forçando-o a executar o polimento do corpo-de-prova através da força centrífuga. As variáveis monitoradas foram a rotação do fuso, a concentração do abrasivo, as distâncias entre a parede do furo, o diâmetro externo do fuso e o tempo de usinagem. Valores como a rugosidade e a taxa de remoção foram as variáveis de controle no experimento. Os resultados, baseados em modelos estatísticos, mostraram que existe uma grande melhoria na rugosidade dos furos quando é aumentada a rotação do fuso e a medida que se varia a concentração do abrasivo.

O processo produziu superfícies com qualidade superior aos processos convencionais de usinagem como; furação, alargamento, incluindo a retificação empregando rotações muito pequenas da ordem de 1000 rpm, podendo ser adaptado em diversos equipamentos industriais. Segundo Peters (2006), que também estudou a taxa de remoção de material e analisou as interações entre o processo de polimento e a textura superficial de diversos aços da área de moldes e matrizes, foi observada que não foi a dureza dos aços empregados, mas a deformação do material dos corpos de prova que determinou o nível de resistência para a remoção de material.

Estes métodos demonstram que o acabamento dos produtos usinados pode ser melhorado enormemente com a técnica de polimento. O polimento proporciona remover efetivamente os fragmentos das etapas de produção dos processos de usinagem anteriores, reduzindo a rugosidade para valores de níveis muito pequenos. Entretanto, ainda é preciso desenvolver estudos de polimento que monitorem as variáveis como, por exemplo, o acabamento superficial proporcionado por este processo nas “free forms” encontradas em matrizes e moldes. Moldes e matrizes apresentam superfícies complexas que limitam o uso de técnicas como as citadas anteriormente exigindo o uso do polimento manual. O desenvolvimento de técnicas que melhorem o controle do processo de polimento e possam levar a substituição das técnicas manuais são primordiais para a melhoria e qualidade destas superfícies.

O conhecimento das forças normais realizadas sobre as superfícies dos moldes e matrizes quando submetidos ao polimento, proporcionará um melhor entendimento do comportamento da textura superficial, controlando as tensões residuais que são as principais responsáveis pela formação de trincas e micro trincas e que diminuem a vida de um molde ou matriz. O estudo do processo de polimento proporcionará um melhor entendimento de suas variáveis, podendo torná-lo um processo de usinagem mais técnico e difundido dentro das empresas, deixando de ser um processo quase artesanal, como é reconhecido atualmente, para tornar-se um processo industrial de grande potencial produtivo.

## 2. METODOLOGIA

Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 25 mm de diâmetro e 5 mm de espessura em aço AISI H13, Fig. (1). A composição média desse aço segundo o fabricante é de 0,40% de C, 1,00% de Si, 0,35% de Mn, 5,20% de Cr, 1,30% de Mo, 1,05% de V.

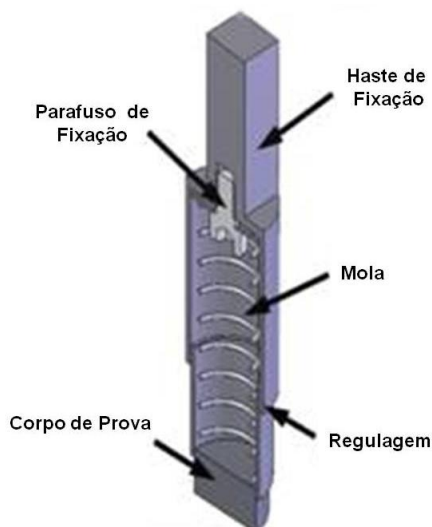


**Figura 1. Detalhe do corpo-de-prova**

Foi realizado tratamento térmico nos corpos de prova para elevar sua dureza de 25 HRC para 47 HRC. Foram submetidos à temperatura de 1050°C por 1 hora e resfriado em salmoura e gelo, em seguida fez-se o revenimento a uma temperatura de 650°C. Inicialmente os corpos de prova foram lixados começando com lixa Nº 240 até a lixa Nº 1000, onde deste ponto em diante foram realizados os experimentos de polimento. Para polir os corpos de prova, foi utilizada uma plaina limadora marca ROCCO modelo 450, com velocidade de deslocamento 37 a 120 golpes/min, Fig. (2). Ao cabeçote da plaina, foi fixado um dispositivo para aplicação da força e fixação dos corpos de prova. A Figura (3) mostra um detalhe do dispositivo desenvolvido para essa finalidade.



**Figura 2. Plaina Limadora Rocco 450.**



**Figura 3. Dispositivo para a aplicação de força.**

Foram definidas as variáveis de influência do polimento como a velocidade de polimento em golpes por minutos, a força de polimento em Newtons e o tempo de polimento em minutos. Para cada parâmetro foi aplicado três níveis diferentes e foram replicados três vezes. Na Tabela (1) estão dispostos os valores e ordem de realização dos experimentos.

**Tabela 1. Valores e ordem de realização dos experimentos.**

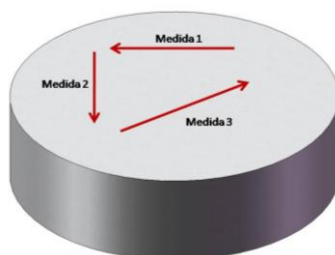
Veloc. de polimento. (GPM)	Tempo (min)								
	5			10			20		
	Força (N)			Força (N)			Força (N)		
	5	10	18	5	10	18	5	10	18
50	15°	23°	26°	12°	7°	22°	4°	1°	10°
74	13°	3°	14°	24°	27°	20°	6°	5°	8°
120	18°	21°	11°	2°	25°	16°	17°	19°	9°

O deslocamento do movimento de polimento foi mantido constante. Como abrasivo foi utilizado Alumina com granulometria de 0,3  $\mu\text{m}$ . A vazão de abrasivo foi mantida constante, por gotejamento de 20 ml/min. Foi realizado um teste de histerese da mola para definir o “set-up” das forças resultantes do deslocamento. Uma balança, com exatidão de  $\pm 1\text{g}$ , foi apoiada na mesa da plaina e aplicada uma pré-carga de 300 gramas. Depois foi deslocado com um avanço gradual em 0,2 mm até uma força de 3,5 quilogramas e depois o retornou-se o cabeçote até o deslocamento inicial, Fig. (4).



**Figura 4. Disposição do teste de histerese.**

Para determinar a taxa de massa removida, MMR, os corpos de prova foram pesados antes e após o polimento, calculando o percentual de remoção. Para isso, foi utilizado uma balança marca Kern modelo 410-11 com exatidão de 0,0001 grama e carga máxima de 40 gramas. A rugosidade foi medida antes e após o polimento em um rugosímetro SJ-401 da Mitutoyo<sup>TM</sup>, sendo avaliados os parâmetros Ra e Rz. Os parâmetros de medição de acordo com o tamanho do comprimento de amostragem ( $l_e$ ) de 0,25mm, com o percurso de medição ( $l_m$ ) de 1,25mm e range de 80. Para a medição após o polimento, foram realizadas três medidas em cada corpo de prova com sentidos variados, após a primeira medição, a peça era girada 90° e 45° após a segunda, conforme a Fig. (5).



**Figura 5. Esquema do procedimento das medições de Rugosidade**

Avaliar a rugosidade superficial tem uma influência direta no escoamento de um material plástico injetado dentro de um molde ou no dobramento de um determinado detalhe de uma chapa em uma matriz. A taxa de remoção de material está ligada às tensões residuais que são introduzidas no material polido, podendo ocorrer propagação de trincas e micro trincas.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos dados, os resultados foram divididos em duas partes: análise da taxa de remoção de massa e análise do acabamento superficial.

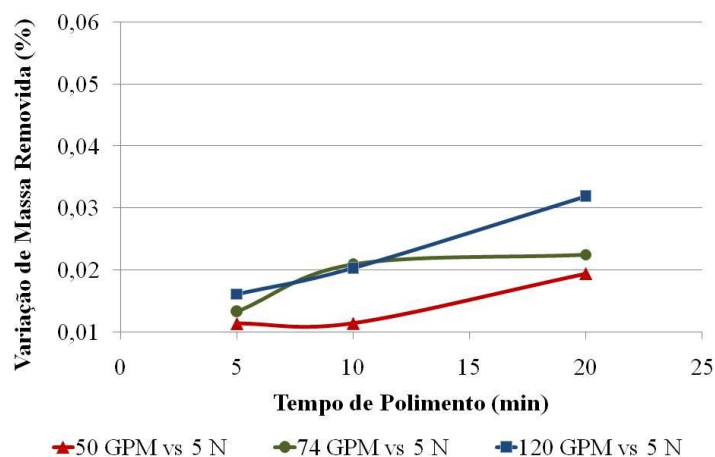
#### 3.1. Taxa de Remoção de Massa.

Com as massas dos corpos de prova antes e depois de serem polidos, foram determinadas as variações das massas. Na Tabela (2) são apresentados os resultados das médias das taxas de remoção de massa.

**Tabela 2. Percentuais médios das taxas de remoção de massa.**

Velocidade de polimento. (GPM)	Tempo (min)								
	5			10			20		
	Força (N)			Força (N)			Força (N)		
	5	10	18	5	10	18	5	10	18
50	0,0113	0,0137	0,0184	0,0114	0,0259	0,0250	0,0194	0,0253	0,0313
74	0,0133	0,0141	0,0148	0,0209	0,0189	0,0257	0,0225	0,0348	0,0329
120	0,0161	0,0194	0,0170	0,0204	0,0182	0,0322	0,0319	0,0363	0,0500

De posse dos dados coletados foram plotados gráficos, onde foi observado o comportamento da variação das massas. As Figuras (6), (7) e (8) mostram os gráficos da variação da massa de acordo com o tempo de polimento para os as forças de 5, 10 e 18 N, onde se observou que a variação da massa tem relação diretamente proporcional com a velocidade de polimento. Dessa forma, pode-se notar que a maior remoção de material ocorreu com a força de 18 N e com o tempo de polimento de 20 minutos utilizando a velocidade de 120 golpes por minuto. A mesma proporcionalidade se manteve para a velocidade de 50 golpes por minuto



**Figura 6. Variação de Massa removida com variação da velocidade e força constante a 5 N.**

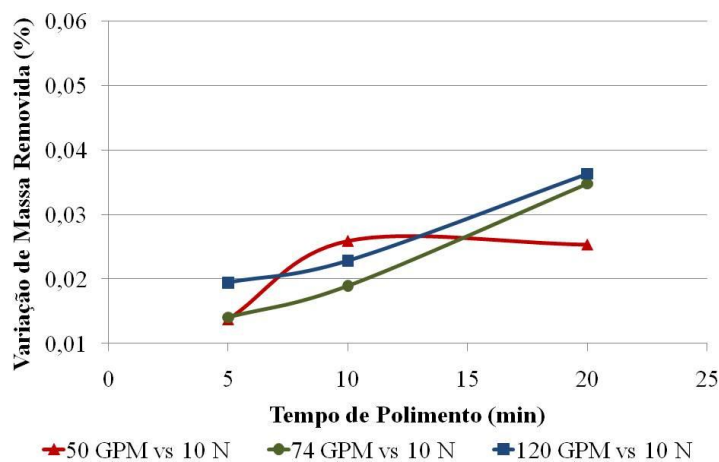


Figura 7. Variação de Massa removida com variação da velocidade e força constante a 10 N.

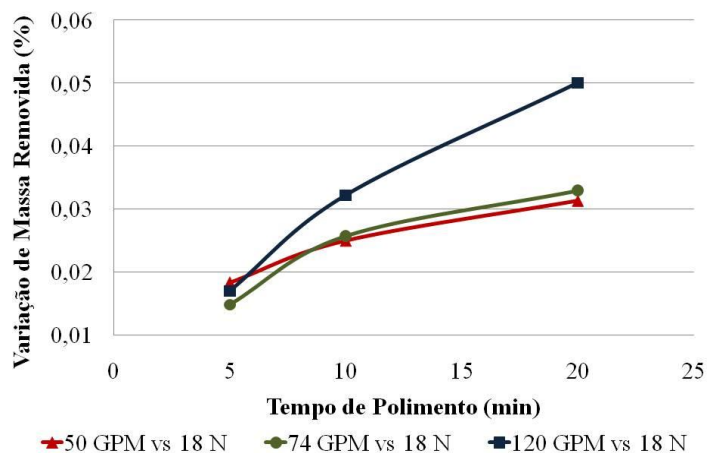


Figura 8. Variação de Massa removida com variação da velocidade e força constante a 5 N.

Nas Figuras (9), (10) e (11), foram plotados os gráficos que correspondem à variação da massa com velocidade de polimento constante e variação da força de polimento, onde se percebeu que a massa removida está diretamente proporcional à força de polimento. Para estes experimentos a maior remoção de material aconteceu empregando-se também a maior velocidade de polimento de 120 golpes por minuto e maior força de polimento de 18 N.

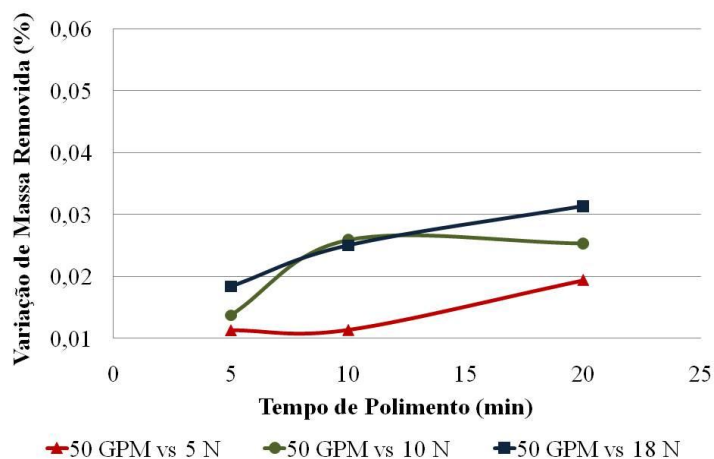


Figura 9. Variação de Massa removida com variação da força e velocidade constante a 50 GPM.

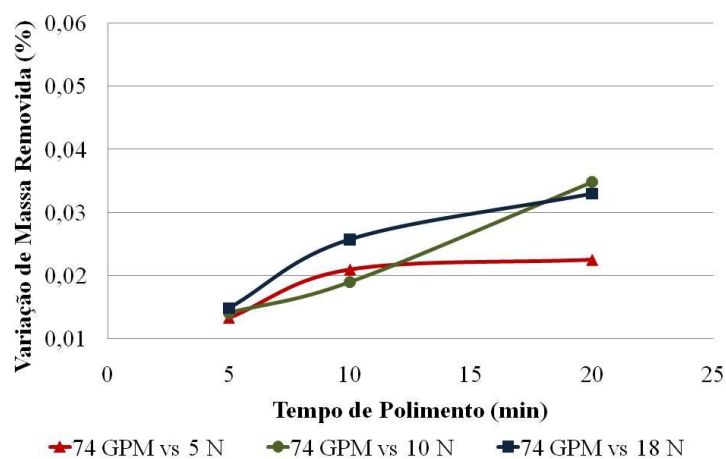


Figura 10. Variação de Massa removida com variação da força e velocidade constante a 74 GPM.

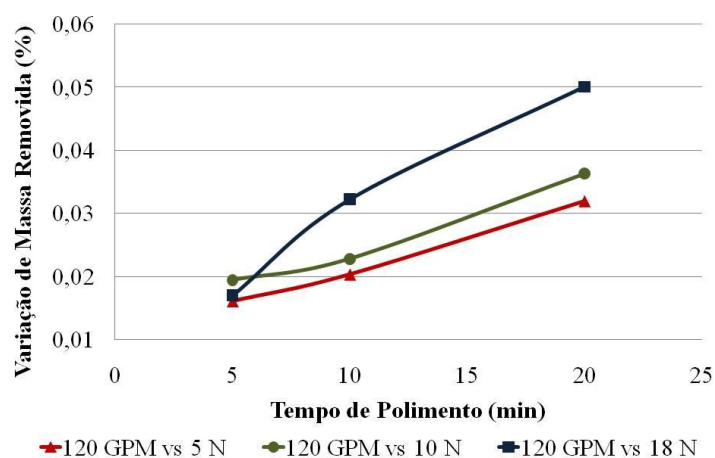


Figura 11. Variação de Massa removida com variação da força e velocidade constante a 120 GPM.

Nas Figuras (12), (13) e (14), foram plotados os gráficos que correspondem à variação da massa com velocidade de polimento constante a 50, 74 e 120 golpes por minuto, respectivamente e com a variação do tempo de polimento. Pode-se notar que a massa removida está diretamente proporcional ao tempo de polimento. Para estes experimentos a maior taxa de remoção ocorreu com a força de 120 golpes por minuto e força de 18 Newtons e a menor taxa de remoção de material ocorreu com a força de 74 Newtons e a força de polimento de 5 Newtons.

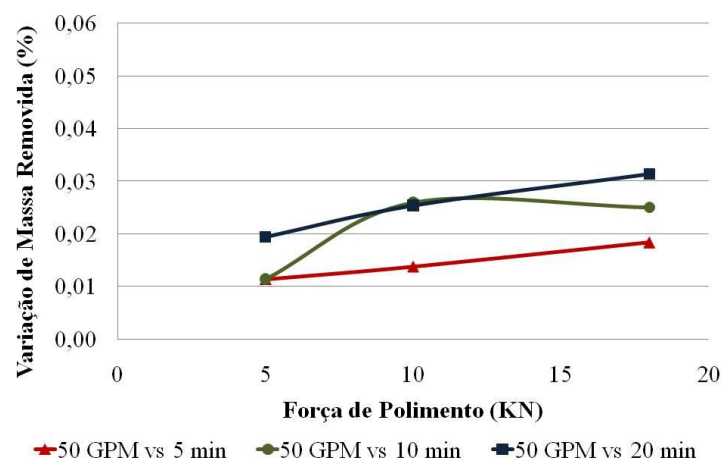


Figura 12. Variação de Massa removida com variação do tempo e velocidade constante a 50 GPM.

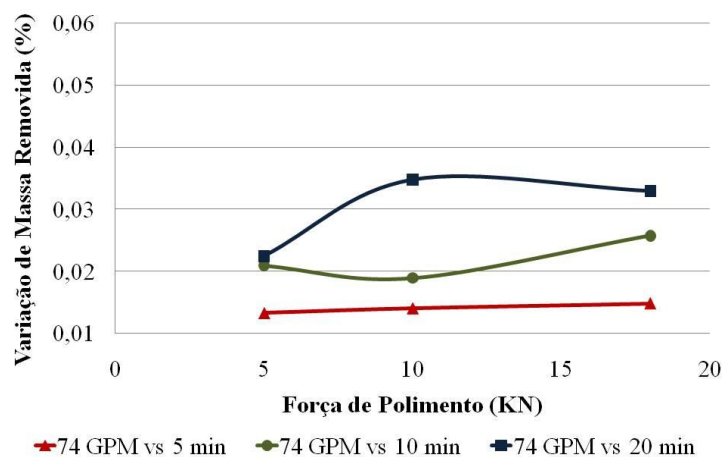


Figura 13. Variação de Massa removida com variação do tempo e velocidade constante a 74 GPM.

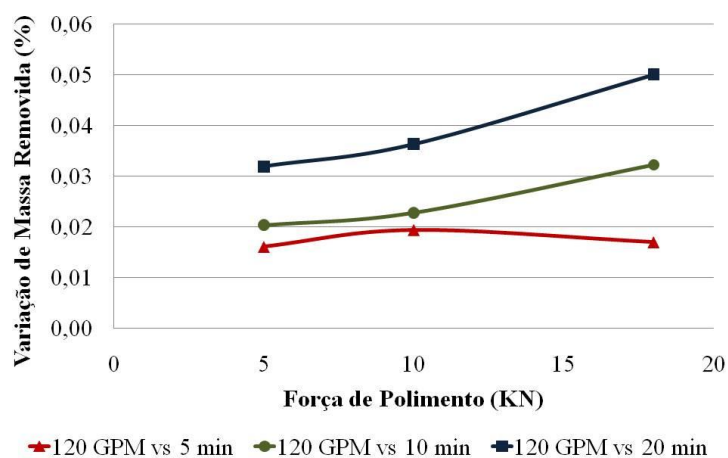


Figura 14. Variação de Massa removida com variação do tempo e velocidade constante a 120 GPM.

Os gráficos apresentam maior remoção de massa para a variável de velocidade, porém, por tratamento estatístico da análise de variância de planejamento fatorial, observa-se que a interações das variáveis são mais significantes na influencia da remoção de massa do processo de polimento do que cada variável isolada.

### 3.2. Análise da Rugosidade.

A rugosidade Ra e Rz dos corpos de prova foram medidas antes e após o polimento, e analisada a variação desses resultados. Os valores dos percentuais de melhoria da rugosidade Ra podem ser visto na Tab. (3), e da rugosidade Rz na Tab. (4).

Tabela 3. Percentuais de melhoria da rugosidade Ra após polimento.

Velocidade de polimento. (GPM)	Tempo (min)								
	5			10			20		
	Força (N)			Força (N)			Força (N)		
	5	10	18	5	10	18	5	10	18
50	55,45%	65,25%	66,94%	69,97%	71,22%	40,62%	76,61%	73,83%	46,06%
74	63,83%	76,80%	71,81%	60,10%	57,11%	65,71%	66,50%	76,26%	62,07%
120	64,07%	65,86%	56,73%	59,09%	49,62%	59,53%	75,63%	57,35%	43,38%



**Tabela 4. Percentuais de melhoria da rugosidade Rz após polimento.**

Velocidade de polimento (GPM)	Tempo (min)								
	5			10			20		
	Força (N)			Força (N)			Força (N)		
	5	10	18	5	10	18	5	10	18
50	63,75%	78,50%	76,94%	79,45%	79,82%	55,06%	80,47%	81,36%	64,32%
74	65,34%	80,16%	77,28%	78,56%	66,87%	79,10%	71,28%	84,17%	70,49%
120	77,21%	71,21%	70,91%	82,64%	66,80%	74,03%	84,84%	78,08%	54,47%

Para a análise da rugosidade, foi utilizado somente o tratamento estatístico, pois a rugosidade não apresentou um comportamento que pudesse estabelecer uma tendência. Pela análise de variância de Planejamento Fatorial observou-se que a rugosidade Rz sobre maior influencia pela força de polimento e as suas interações. Já para a Rugosidade Ra, ambas variáveis e interações não influenciam.

#### 4. CONCLUSÕES

Através deste trabalho, pode se concluir sobre o estudo de polimento em moldes e matrizes que:

- ✓ Para a remoção de massa, as três variáveis são diretamente proporcionais, ou seja, o aumento independente da força, velocidade ou tempo aumenta a remoção de material;
- ✓ Porém, as interações entre as variáveis são mais significativas na influência da taxa de remoção de material do que cada variável analisada isoladamente.
- ✓ A rugosidade Ra varia independente da variável Força, Tempo e Velocidade aplicada;
- ✓ Entretanto, a rugosidade Rz sofre mais influência da força de polimento e das suas interações com as outras variáveis, porém sem mostrar uma tendência significativa.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Sr. Luiz Cláudio Colembegue Kluzco da Gerdau Aços Finos Piratini pelo fornecimento das amostras do aço AISI H13 e FAPEMIG – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Biing-Hwa, Y.; Tzeng, H.J.; Huang, F.Y.; Lin, Y.C.; Chow, H.M. 2007, "Finishing effects of spiral polishing method on micro lapping surface", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, pp. 920-926.
- Brinksmeier, E.; Riemer, o.; Gessenharter, A. 2006, "Finishing of structured surfaces by abrasive polishing", *Precision Engineering*, v. 30, pp. 325-336.
- Gorana, V.K.; Jain, V.K.; Lal, G.K. 2004, "Experimental investigations into cutting force and active grains density during abrasive flow machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 44, pp. 201-211.
- Komanduri, R., Lucca, D.A; Tani, Y. 1997, "Technological advances in fine abrasive process", *Annals of CIRP*, v. 46 (2), pp. 545-596.
- Peters, J, 2006, "Surface interactions in steel polishing for the precision tool making". *Annals of CIRP*, v. 55(1), pp. 1-4
- Porto, A.J.V. (Org.) 2004, "Usinagem de Ultraprecisão". São Carlos. RiMa, FAPESP.
- Rajendra, K.J.; Jain, V.K. 2001, "Specific energy and temperature determination in abrasive flow machine process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 41, pp. 1689-1704.
- Rigby, P. 1993, "High speed milling in the mold and die making industries". In: *Diamond and CBN ultrahard materials Symposium*. Ontário, Canadá.

#### 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste artigo.

## SURFACE ANALYSIS ON POLISHING OF STEEL USING IN MOULDS AND DIES

Jorge Augusto Marques, marquesmec@gmail.com  
Carlos Henrique Lauro, caiquelauro@gmail.com  
Denison Baldo, denison\_db@yahoo.com.br  
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br

Federal University of São João del Rei - Praça Frei Orlando, 170 - Centro,

**Abstract.** *The polishing of moulds and dies is the last and the more important stage in the manufacturing production chain. The quality of the products e.g. plastic injected products depends on the roughness surface generated in polishing. However, the polishing process is still characterized by a poor knowledge of the relevant mechanisms and dependent on research activities. In this work, polishing tests were carried out on AISI H13 steel used in manufacturing of moulds and die steel with variation of polishing force, polishing time, and polishing speed. Hardened workpieces with 47 HR, 25 mm of diameter and 5 mm thickness were fixed into special device and polishing with range of force, time, and speed used as input parameters. Surface roughness and material removal rate were considered as the output parameters. Interactions among the polishing force, time of polishing, speed of polishing were carried out, and they were related to the surface roughness and the material removal rate. The results demonstrated that the surface roughness is more influenced by polishing speed and polishing force. The variation of the material removal rate has a relation with polishing force only.*

**Keywords:** *Polishing, Moulds and Dies, Roughness, Material Removal Rate.*