

# INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA USINABILIDADE DE AÇOS PARA MOLDES DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO

**Marcelo Bertolete Carneiro**

**Rosemar Batista da Silva**

**Álison Rocha Machado**

Faculdade de Engenharia Mecânica — Universidade Federal de Uberlândia/MG Campus Santa Mônica, CEP 38408-902, [marcelo@mec.ufu.br](mailto:marcelo@mec.ufu.br), [rsilva@mecanica.ufu.br](mailto:rsilva@mecanica.ufu.br), [alissonm@mecanica.ufu.br](mailto:alissonm@mecanica.ufu.br);

**Celso Antônio Barbosa**

Villares Metals, Sumaré/SP, CEP 13177-900, [celso.barbosa@villaresmetals.com.br](mailto:celso.barbosa@villaresmetals.com.br);

**Carlos Alberto Domingos Ramos**

Departamento do Curso de Mecânica — Centro Federal de Educação Tecnológica Araxá/MG, [ramos@araxa.cefetmg.br](mailto:ramos@araxa.cefetmg.br).

**Resumo:** *O objetivo deste trabalho é avaliar a usinabilidade de dois tipos de aços inoxidáveis o martensítico (VP 420) e o endurecido por precipitação (VP 80) que são utilizados na fabricação de moldes para injeção de plásticos. Em um trabalho anterior o VP 420 no estado temperado e revenido foi comparado com o VP 80 em diferentes níveis de envelhecimento. No presente trabalho é feita à análise do comportamento do VP 420 no estado recozido, que é o procedimento normalmente adotado em matrizarias, onde o tratamento de endurecimento é feito após usinagem. Os resultados são comparados com aqueles obtidos no estudo anterior. Foram utilizadas ferramentas de metal duro na operação de fresamento de topo, sem fluido de corte. Variou-se a velocidade de corte, o avanço por dente e a profundidade de corte. Os parâmetros de saída utilizados para avaliar a usinabilidade foram o desgaste da ferramenta, a potência efetiva de corte, o acabamento superficial e os sinais vibração. Em geral, os resultados mostraram que o aço VP 420 no estado recozido apresentou maior usinabilidade em termos de vida da ferramenta do que nos materiais testados anteriormente, e quando comparado com o material envelhecido de dureza similar ele foi apenas um pouco inferior quanto à potência efetiva de corte.*

**Palavras-chave:** *usinabilidade, fresamento, aço inoxidável martensítico, desgaste, metal duro.*

## 1. INTRODUÇÃO

Acompanhando o desafio dos fabricantes de peças de plástico em atender o diversificado e exigente mercado consumidor a procura de novos e diferenciados produtos. Foi proposto este estudo com a intenção de melhorar o tempo de concepção do material para a confecção de moldes metálicos para a injeção de plástico e a sua disponibilidade ao consumidor com baixo custo de produção e excelência em qualidade.

Assim, é de vital importância que o molde possua ou se aproxime de todas as características de uma peça pronta, abreviando outras etapas, como a retificação do produto, por exemplo.

Entre os diferentes tipos de plástico para a moldagem, os termoplásticos clorados, os acetatos e os termofixos em geral, são os que apresentam maiores problemas com relação a desgaste de matriz a quente, segundo Ferreira<sup>(1)</sup>. Assim, o material para fabricação de tais moldes deve apresentar uma combinação de propriedades mecânicas adequadas, especialmente elevada dureza a quente e

resistência à corrosão química. Por isso, esse estudo se baseia nos aços inoxidáveis martensíticos, pois além de apresentar tais características possuem boa temperabilidade e resistência mecânica.

O aço inoxidável martensítico PH (Precipitation Hardened) estudado aqui, apresenta-se como uma nova liga endurecida por precipitação, Mesquita et al.<sup>(2)</sup>, denominada de VP 80, a qual se aproxima da mesma dureza final dos aços inoxidáveis martensíticos (VP 420) tratados termicamente por têmpera e revenido (de 35 a 48 HRc). A Figura 1 facilita a compreensão da obtenção da dureza dos materiais.

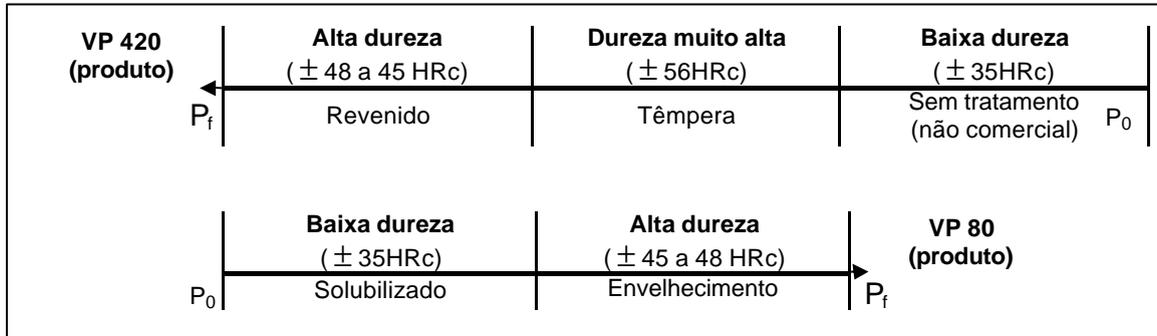


Figura 1: Obtenção da dureza dos aços VP420 e VP 80, sendo ( $P_0$ ) início do processo e ( $P_f$ ) fim do processo.

Com isso, a princípio seria possível contar com a vantagem da facilidade de se trabalhar com o aço VP 80 antes do tratamento térmico final de envelhecimento ou mesmo após este tratamento, com abreviação do processo de têmpera.

Neste aço uma larga faixa de propriedades mecânicas incluindo a dureza pode ser desenvolvida dependendo da temperatura de envelhecimento, Villares Metals S.A.<sup>(3)</sup>. Ver Figura 2.

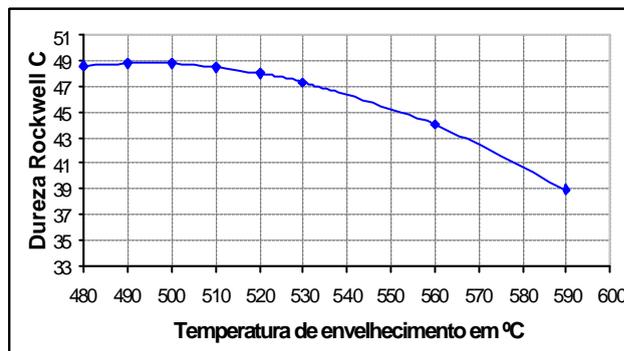


Figura 2: Dureza Rockwell C em função da temperatura de envelhecimento do aço VP 80.

Existe, portanto, a possibilidade coerente de verificar uma variante deste aço em função da dureza, com o melhor desempenho de usinabilidade e acabamento.

Este trabalho visa, então, o estudo das diferenças entre os aços inoxidáveis VP 420 e VP 80 para a confecção de moldes por processo de usinagem, quanto à vida da ferramenta, a potência efetiva de corte, ao acabamento superficial, a vibração e a um possível estreitamento das tolerâncias no mesmo.

## 2. PROCEDIMENTOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem — LEPU — da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Foi utilizado um planejamento experimental que pôde determinar os parâmetros de maior influência na usinagem dos materiais.

A usinagem foi realizada por fresamento de topo sem a presença de fluido de corte em uma fresadora ROMI INTERACT IV CNC, potência de 7,5 CV.

Os materiais utilizados neste ensaio estavam na forma de blocos de largura de 250 mm, comprimento de 350 mm e altura de 150 mm. Os aços inoxidáveis eram o VP 420 (ABNT 420) comercial e um não comercial (apenas recozido), além, de três versões do aço PH VP 80, em conformidade com a ISO/R 683-3 ( $\approx$  AISI 1020).

A ferramenta de corte utilizada possuía 32 mm de diâmetro, com capacidade para receber três insertos [referência R390 – 032A32 – 11M conforme fornecedor Sandvik, 1999]. Os insertos de metal duro foram escolhidos considerando o material e a severidade do processo de usinagem, fresamento de topo e faceamento de canto a 90 graus com ângulo de rampa de  $\alpha = 3,6^\circ$  [referência R390 – 11T308M – MM 2030 conforme fornecedor Sandvik, 1999].

O desgaste da ferramenta, potência efetiva de corte, rugosidade superficial e vibração, foram monitorados para cada condição de corte apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de corte utilizadas.

Testes	Vc[m/min]	f[mm/dente]	ap[mm]	n[rpm]	av. mesa[mm/min]
1	94,46	0,083	0,67	939,65	234,91
2	140,00	0,083	0,67	1392,61	348,15
3	94,46	0,120	0,67	939,65	338,28
4	140,00	0,120	0,67	1392,61	501,34
5	94,46	0,083	1,50	939,65	234,91
6	140,00	0,083	1,50	1392,61	348,15
7	94,46	0,120	1,50	939,65	338,28
8	140,00	0,120	1,50	1392,61	501,34
9	115,00	0,100	1,00	1143,93	343,18
10	115,00	0,100	1,00	1143,93	343,18
11	115,00	0,100	1,00	1143,93	343,18
12	115,00	0,100	1,00	1143,93	343,18
13	87,07	0,100	1,00	866,13	259,84
14	151,88	0,100	1,00	1510,83	453,25
15	115,00	0,077	1,00	1143,93	265,18
16	115,00	0,129	1,00	1143,93	444,12
17	115,00	0,100	0,56	1143,93	343,18
18	115,00	0,100	1,77	1143,93	343,18

Foi usado um critério de fim de vida da ferramenta recomendado pela norma ISO 8688-1 de 1989 com desgaste de flanco uniforme ( $VB_B$ ) igual a 0,35 mm em qualquer um dos dentes. Este desgaste foi medido com o auxílio de um microscópio ferramenteiro dotado de um micrômetro com precisão de um centésimo de milímetro.

A aquisição de potência foi feita através do monitoramento da corrente elétrica do motor do eixo-árvore da fresadora utilizando um sensor de corrente por efeito Hall, da marca Newtronic, modelo NW – SCD – 50 – R, cuja faixa de amperagem é de 0 a 50 A, a tensão de alimentação é de  $\pm 9$  VDC e o sinal de saída na faixa de 0 a 5 VDC. O sinal é enviado à placa de conversão analógica digital e de aquisição de sinais da PowerDAQ modelo PD2 – MFS – 8 – 500/14. E este sinal é gerenciado por um computador utilizando o software LabView 5.1 da National Instruments.

Também houve o acompanhamento da vibração durante o processo de corte por um acelerômetro acoplado próximo ao eixo principal da fresadora, este sinal também foi gerenciado pelo software LabView 5.1.

A qualidade da superfície foi determinada pelo parâmetro de rugosidade  $R_a$ , utilizando um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SurfTest 211, com cut-off de 0,8 mm.

Os materiais utilizados foram nomeados quanto à dureza em Vickers e Rockwell C, conforme a Tabela 2, para facilitar a elucidação nos gráficos.

Tabela 2: Nomes e durezas dos materiais.

<b>Materiais</b>		<b>Durezas [HV]/[HRc]</b>
Aço Inoxidável Martensítico VP 420 (Temperado e Revenido)	Material A	419/42,6
Aço Inoxidável Martensítico PH VP 80 (Envelhecido)	Material B	410/41,8
Aço Inoxidável Martensítico PH VP 80 (Solubilizado)	Material C	336/34,0
Aço Inoxidável Martensítico PH VP 80 (Envelhecido)	Material D	366/37,2
Aço Inoxidável VP 420 (Recozido)	Material E	201/—

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Parâmetro: Desgaste da Ferramenta

A seguir os resultados da vida das ferramentas são apresentados na Tabela 3 em função do volume de material removido (VRM).

Tabela 3: Resultado dos ensaios para a vida da ferramenta.

Número do teste	Vida da ferramenta VRM (cm <sup>3</sup> ) para cada material				
	A	B	C	D	E
1	548	312	1271	761	1191
2	87	91	799	746	1051
3	548	251	792	373	1409
4	65	30	320	266	911
5	639	239	835	954	2004
6	136	170	375	426	1777
7	468	239	188	290	2631
8	68	68	256	239	1255
9	119	171	364	613	1766
10	114	159	352	716	2195
11	125	125	420	580	2405
12	125	171	375	557	1255
13	613	273	875	761	1673
14	45	80	477	204	1498
15	131	114	602	636	941
16	80	114	159	239	2300
17	293	146	1024	337	937
18	131	121	322	563	1707
<b>Média Total</b>	<b>241</b>	<b>160</b>	<b>545</b>	<b>515</b>	<b>1606</b>

A visualização gráfica da Tabela 3 está representada logo abaixo pela Figura 3.

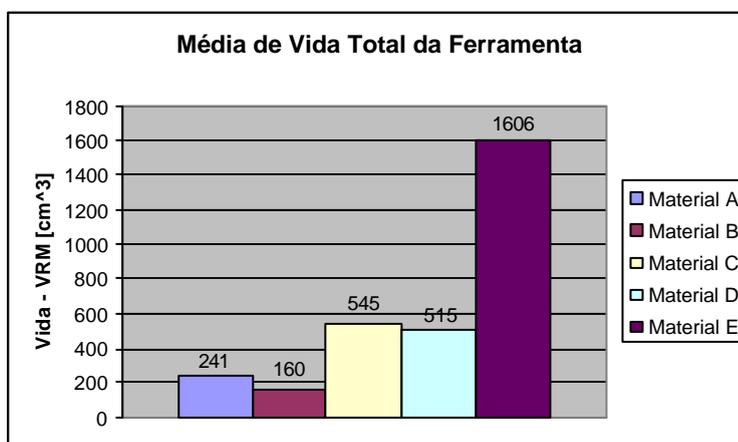


Figura 3: Média de vida total da ferramenta.

Dela pode-se concluir que o material que possibilitou melhor desempenho em termos de média de vida das ferramentas nas diferentes condições de corte imposta em cada teste foi o material E. Sendo mais de três vezes superior ao segundo colocado, material C. Ao fresar materiais de dureza semelhante (A e B) também se verificou um melhor desempenho do VP 420, cerca de 50%.

A Figura 4 representa a vida da ferramenta obtida para cada material nas diferentes velocidades de corte empregadas mantendo fixo o avanço e a profundidade de corte.

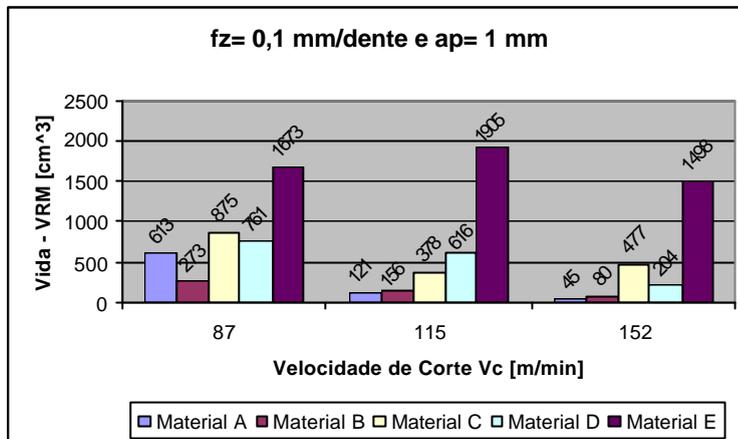


Figura 4: Vida da ferramenta em função da velocidade de corte.

Conforme os conceitos de usinagem, Machado e da Silva<sup>(4)</sup>, a figura mostra que o aumento da velocidade de corte, mantendo-se constante os outros parâmetros, provoca um aumento da geração de calor, que por sua vez acelera a degradação da ferramenta. Porém, para o material C na mudança de 115 para 152 m/min observou-se o contrário. Como o teste na velocidade 115 m/min foi repetido quatro vezes (teste 9 ao 12) para controle estatístico, despreza-se a hipótese de desgaste prematuro nesta condição, pois os resultados se assemelharam. Então, a hipótese a ser formada seria que na condição em que a velocidade é de 152 m/min houve uma geração de calor tal que provocou uma diminuição da resistência do material, e assim favoreceu o corte em relação à condição anterior. No entanto, esse aumento da quantidade de calor não foi suficiente para acelerar a degradação da ferramenta. Algo semelhante aconteceu também com o material E entre as condições de velocidade de 87 e 115 m/min.

A Figura 5 apresenta o resultado da vida da ferramenta para os diferentes materiais variando-se a profundidade de corte.

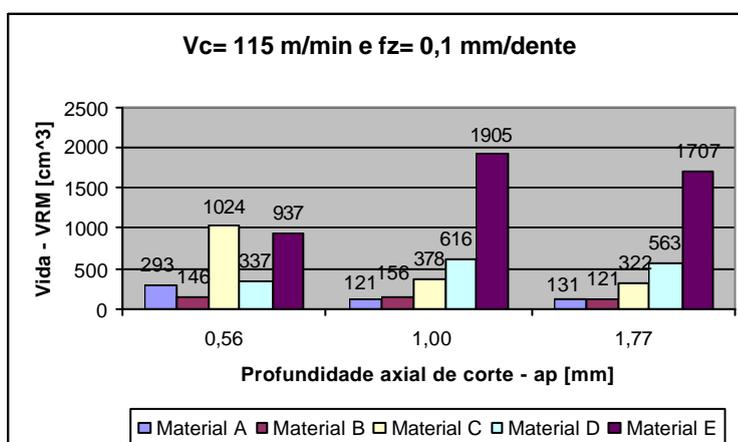


Figura 5: Vida da ferramenta em função da profundidade de corte.

Nesta figura observa-se uma queda na vida da ferramenta de mais de 170% no material C, quando se aumenta a profundidade de corte de 0,56 para 1,00 mm e de 17% quando se aumenta de 1,00 para 1,77 mm a profundidade de corte. Isso se deve principalmente ao aumento dos esforços ao

realizar o corte. No entanto, no material E observa-se um aumento da vida da ferramenta de 103% ao variar a profundidade de corte de 0,56 para 1,00 mm. Neste caso, o aumento do volume de material removido, devido ao aumento da profundidade de corte sobrepôs ao aumento do desgaste da ferramenta indicando uma otimização.

### 3.2. Parâmetro: Potência de corte

Os resultados médios obtidos nas aquisições de potência de corte para todos os testes e materiais, através do monitoramento da corrente elétrica do motor do eixo-árvore, podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4: Resultado dos ensaios para potência efetiva de corte.

Número do teste	Potência efetiva de corte (W) para cada material				
	A	B	C	D	E
1	407	478	364	390	545
2	534	560	471	532	587
3	447	476	430	470	507
4	624	519	626	639	519
5	685	845	613	682	661
6	1076	1140	877	977	972
7	908	1028	774	872	926
8	1431	1416	1294	1493	1134
9	653	760	673	640	691
10	710	740	660	764	752
11	723	750	647	729	671
12	724	750	660	740	622
13	494	552	543	592	602
14	942	921	833	910	799
15	671	766	522	653	634
16	777	870	730	848	709
17	434	540	374	480	475
18	1361	1447	1098	1131	1023
<b>Média total</b>	<b>756</b>	<b>809</b>	<b>677</b>	<b>752</b>	<b>713</b>

A Figura 6 apresenta a potência média efetiva de corte consumida na usinagem dos diversos materiais. Pode-se observar que o material que consumiu a menor potência no seu corte, nas diferentes condições impostas por cada teste, foi o material C, 677 W. E o segundo melhor o material E.

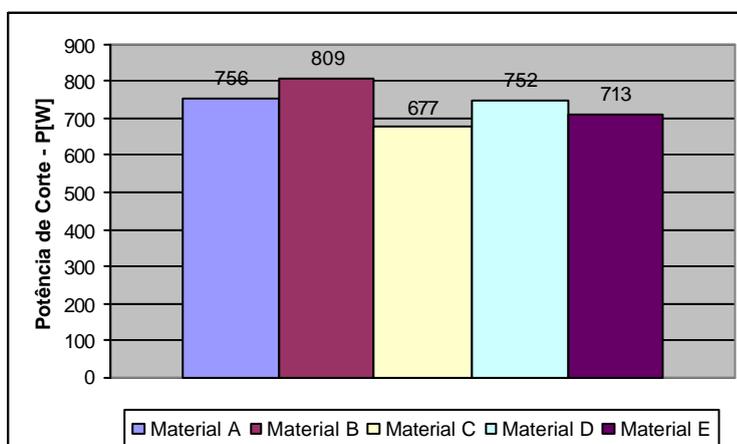


Figura 6: Potência efetiva média de corte.

Observa-se que o material E, de menor dureza, foi superado pelo material C, que possui o segundo menor valor (ver tabela 2). Como a energia para formar o cavaco depende de força, o material mais resistente deveria apresentar maior consumo de energia. Entretanto, a força depende também da área de contato cavaco-ferramenta, o que geralmente é maior em materiais dúcteis (menos duros). Sendo assim, os resultados indicam que o efeito da área de contato cavaco-ferramenta alterou a tendência baseada na maior dureza.

### 3.3. Parâmetro: Acabamento da superfície

O parâmetro Ra foi considerado como indicativo de acabamento superficial. Ele é o valor médio de todos os desvios do perfil de rugosidade de uma linha média, dentro do comprimento de medição. A Tabela 5 apresenta os resultados de rugosidade.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de rugosidade superficial.

Número do teste	Rugosidade superficial, Ra ( $\mu\text{m}$ ), para cada material				
	A	B	C	D	E
1	0,57	0,36	0,48	0,61	0,44
2	0,77	0,64	0,41	0,57	0,60
3	0,51	0,57	0,77	0,68	0,74
4	2,00	0,64	0,62	0,61	0,54
5	0,90	0,76	0,42	0,78	0,58
6	0,58	0,59	0,53	0,63	0,58
7	0,88	0,71	0,84	0,70	0,61
8	0,71	0,43	0,75	0,57	0,31
9	0,69	0,48	0,50	0,62	0,63
10	0,56	0,31	0,52	0,67	0,65
11	0,49	0,45	0,9	0,55	0,53
12	1,01	0,33	0,57	0,40	0,56
13	0,42	0,64	0,48	0,77	0,53
14	0,86	0,40	1,19	0,65	0,48
15	0,63	0,45	0,36	0,71	0,31
16	0,57	0,36	0,48	0,61	0,40
17	0,77	0,64	0,41	0,57	0,67
18	0,51	0,57	0,77	0,68	0,49
<b>Média total</b>	<b>0,75</b>	<b>0,52</b>	<b>0,61</b>	<b>0,63</b>	<b>0,54</b>

Estes valores médios apresentaram grande dispersão com coeficiente de correlação baixo, quando se tentou estimar parâmetros para uma equação de estimativa da rugosidade superficial.

A Figura 7 apresenta a média das rugosidades das superfícies obtidas em cada material testado.

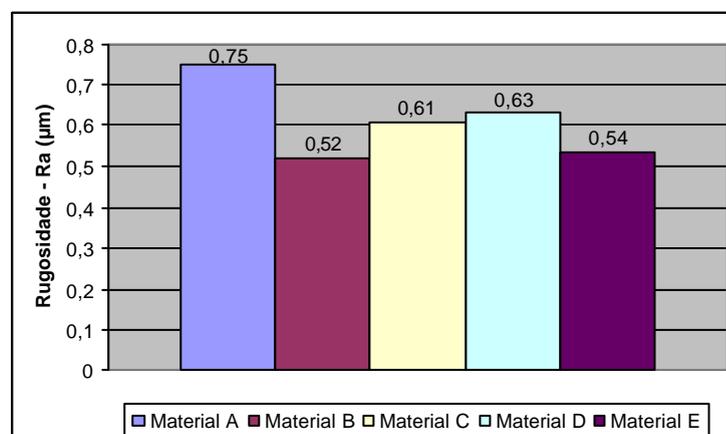


Figura 7: Rugosidade superficial média para os materiais testados.

Observa-se que o melhor desempenho médio foi obtido pelo material B, porém o material E teve um desempenho muito semelhante.

Quanto à variação da velocidade de corte para avanço por dente e profundidade de corte constantes, ver Figura 8, destaca-se o aumento da rugosidade na superfície do material C de quase 92%, ao aumentar a velocidade de 115,00 para 151,88 m/min. E para a maior velocidade de 151,88 m/min observa-se que os dois melhores desempenhos foram para os materiais B e E.

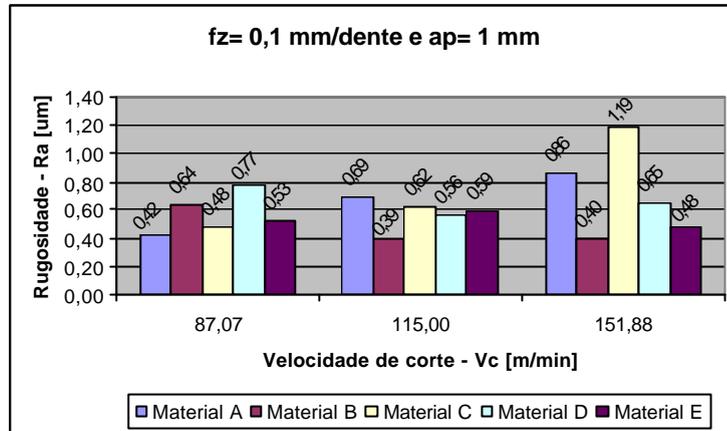


Figura 8: Rugosidade em função da velocidade de corte.

Abaixo, tem-se a Figura 9. Dela destaca-se uma melhora contínua no acabamento superficial do material A e E com o aumento da profundidade de corte. Também se observa os melhores desempenhos para os materiais C e E para o menor e maior valor de profundidade de corte, respectivamente.

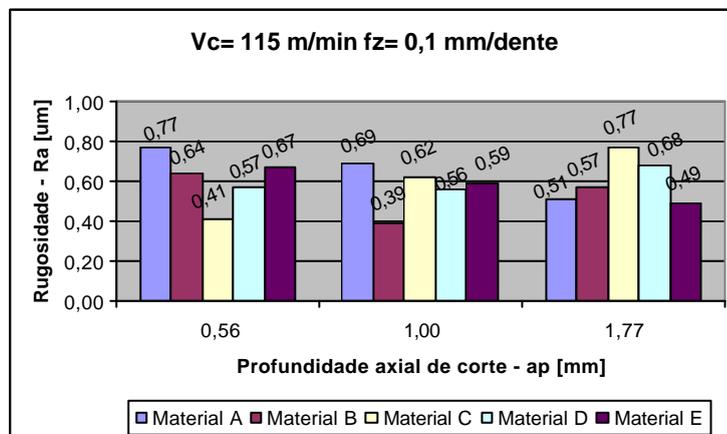


Figura 9: Rugosidade em função da profundidade de corte.

### 3.4. Parâmetro: Vibração

Os resultados obtidos na análise da amplitude de vibração do cabeçote da fresadora durante o corte dos materiais podem ser visto na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados dos ensaios de amplitude de vibração.

Número do teste	Vibração ( $m/s^2$ ) para cada material				
	A	B	C	D	E
1	0,063	0,063	0,044	0,058	0,047
2	0,057	0,055	0,042	0,033	0,062
3	0,071	0,072	0,098	0,076	0,063
4	0,063	0,056	0,049	0,066	0,064
5	0,085	0,102	0,082	0,067	0,158
6	0,082	0,194	0,139	0,086	0,106
7	0,076	0,220	0,171	0,124	0,229
8	0,084	0,170	0,269	0,103	0,113
9	0,118	0,117	0,076	0,073	0,058
10	0,083	0,119	0,122	0,116	0,106
11	0,063	0,123	0,100	0,067	0,069
12	0,082	0,120	0,120	0,085	0,079
13	0,192	0,116	0,134	0,069	0,101
14	0,223	0,134	0,171	0,078	0,091
15	0,199	0,097	0,108	0,050	0,141
16	0,280	0,173	0,153	0,100	0,110
17	0,169	0,038	0,065	0,043	0,054
18	0,104	0,175	0,197	0,205	0,116
<b>Média total</b>	<b>0,116</b>	<b>0,119</b>	<b>0,119</b>	<b>0,083</b>	<b>0,098</b>

O monitoramento da vibração durante a vida da ferramenta mostra que, na medida em que a ferramenta se aproxima do final da vida os níveis de vibração aumentam. O que permite correlação com o desgaste da ferramenta. Pela análise dos resultados, observou-se também que a influência da velocidade de corte é pequena. Sendo que o avanço por dente e a profundidade de corte tem relação mais direta com a amplitude da vibração para todos os materiais, Ramos<sup>(5)</sup>.

#### 4. CONCLUSÕES

Em geral, os resultados mostraram que o aço VP 420 no estado recozido (Material E) apresentou maior usinabilidade em termos de preservação da vida da ferramenta em função do volume de material removido do que nos demais materiais testados.

Quando se compara o aço VP 420 recozido (Material E) com o aço VP 80 solubilizado (Material C), o primeiro material apresenta maior usinabilidade em termos de vida da ferramenta. Observa-se que este último material é ligeiramente superior quanto à potência efetiva de corte dentre todos os parâmetros analisados. Também, é notável citar, que são os dois materiais com os menores índices de dureza.

Ao se comparar o aço inoxidável martensítico VP 80 com dureza de 410 HV (Material B) com o aço inoxidável martensítico VP 420 com dureza de 419 HV (Material A), ou seja, materiais com dureza aproximadamente iguais, tem-se uma melhor usinabilidade do VP 420 quanto à vida da ferramenta, à potência efetiva de corte e à vibração.

Finalmente, as vantagens do aço VP 80 em relação ao VP 420 consistem na facilidade de se trabalhar com o material antes do tratamento de endurecimento e da abreviação do processo de tratamento térmico de têmpera. Então, cabe aos fabricantes de moldes a escolha da melhor estratégia de usinagem em relação ao uso das ferramentas e dos materiais nos seus processos de fabricação.

## 5. REFERÊNCIAS

1. FERREIRA, L., WAGNER, T. (2001). Brazil: plastics production machinery. **Corporate Information**. <http://www.corporateinformation.com./data/statusa/brazil/plasticmachinery.html>
2. MESQUITA, R.A., BARBOSA, C.A, Desenvolvimento de Um Aço Inoxidável Endurecível por Precipitação para Moldes de Plástico, In: **Anais do VII Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável**, São Paulo, 23 a 25 de Novembro de 2004, CDROM.
3. Villares Metals S.A., 2000; **Catálogo de produtos**.
4. MACHADO, A.R., da SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais**, Apostila da Faculdade Federal de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia/MG, 2004. 257p.
5. RAMOS, C.A.D. **Usinabilidade de aços inoxidáveis para matrizes ABNT 420 e VP 80 no fresamento de topo usando superfícies de resposta**. 2004. 233f. Tese de doutorado, COPEM/FEMEC/UFU.

## INFLUENCE OF HEAT TREATMENT IN THE MACHINABILITY OF STAINLESS USED IN MOLDS FOR PLASTIC INJECTION

**Marcelo Bertolete Carneiro**

**Rosemar Batista da Silva**

**Álison Rocha Machado**

School of Mechanical Engineering — Federal University of Uberlândia/MG Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, [marcelo@mec.ufu.br](mailto:marcelo@mec.ufu.br), [rsilva@mecanica.ufu.br](mailto:rsilva@mecanica.ufu.br), [alissonm@mecanica.ufu.br](mailto:alissonm@mecanica.ufu.br);

**Celso Antonio Barbosa**

Villares Metals, Sumaré/SP, CEP 13178-902, [celso.barbosa@villaresmetals.com.br](mailto:celso.barbosa@villaresmetals.com.br);

**Carlos Alberto Domingos Ramos**

Department of the Mechanics Course — Federal Center of Technological Education Araxá/MG [ramos@araxa.cefetmg.br](mailto:ramos@araxa.cefetmg.br).

**Abstract:** *The objective of this work is to evaluate the machinability of two kinds of stainless steels, the martensitic (VP 420) and the PH – precipitation hardening steel grade (VP 80) used in the production of molds for plastic injection. In a previous work, the VP 420 in the tempered and quenched state was compared with the VP 80 in different hardness levels obtained by varying the heat treatment. In the present work an analysis of the behavior of the VP 420 in the annealed state, which is the normal condition used to manufacture mold cavities, is done. The results are compared with those obtained in the previous study. Carbide inserts were used in the milling operation at dry condition. The cutting speed, the feed per tooth and depth of cut were varied. Tool wear, effective power consumption, surface roughness and vibration signals were the parameters used to evaluate machinability. In general, the VP 420 steel in the annealed state presented better results than its counterparts, and when compared with the PH steel with similar hardness only the effective power consumption was a little better for the latter.*

**Keywords:** *machinability, milling operation, martensitic stainless steel, wear of cemented carbide.*