

AVALIAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES RESIDUAIS NO FRESAMENTO DO AÇO VP100 PARA MOLDES

Flavio Henrique Manarelli, flaviomanarelli@gmail.com¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Adriana Bruno Norcino, adriananorcino@gmail.com²

Haroldo Cavalcanti Pinto, haroldo@sc.usp.br²

¹Universidade Estadual Paulista (Unesp), Av. Brasil Centro 56, CEP 15.385-000, Ilha Solteira -SP

²Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos -SP

Resumo: A usinagem pode modificar o estado de tensões interna do material da peça, estão relacionados à rota de fabricação e as propriedades físicas do componente. As tensões residuais podem variar em campo (tração ou compressão), magnitude (alta ou baixa) e profundidade (rasa ou profunda). O seu efeito na vida do produto, pode retardar ou intensificar uma falha. Este artigo determina a magnitude, campo e a profundidade das tensões residuais do aço VILLARES para moldes e matrizes VP 100, após fresamento de topo CNC, com ferramenta de metal duro. As variáveis de entrada foram a dureza da peça, o avanço por dente e a velocidade de corte. A tensão residual superficial foi analisada através do método de sen²y usando difração de raios-X; já a tensão residual subsuperficial foi medida, por meio da técnica do furo-cego, padronizada pela norma ASTM E837. Verificou-se que o fresamento de topo induz a geração de tensões residuais de tração na superfície fresada. Na subsuperfície da peça houve inversão do campo trativo para o compressivo, influenciado pelo aumento do avanço por dente da fresa para as peças com menor nível de dureza. Para as peças com nível de dureza maior, a inversão ocorreu para maior velocidade de corte.

Palavras-chave: fresamento, tensão residual, difração de raios-X, método do furo-cego

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por peças plásticas em diversas áreas tem impulsionado a indústria de moldes e matrizes. Albano (2008) destaca que uma das etapas mais importante da produção de um molde é a usinagem de cavidade, que além de ser complexa, deve oferecer qualidade superficial adequada para obtenção de um bom produto injetado. De acordo com Masmiahi et al (2016), a usinagem por fresamento pode afetar a integridade superficial e subsuperficial dos moldes usinados, principalmente devido aos efeitos provocados pelo cisalhamento do material removido. De acordo com mesmo autor, a integridade superficial tem correlação com os parâmetros de usinagem adotado.

A interação do par peça e ferramenta de corte na usinagem, geram deformações plástica e mudanças no volume do material, que associadas a gradientes térmicos e deformações metalúrgicas promovem à peça, um estado interno de tensões, conhecido como tensões residuais (Nikpa et al, 2016).

As tensões podem ser de tração ou compressão e o maior valor é o limite de escoamento do material (Song et al, 2010). As tensões residuais de tração são geralmente indesejáveis pois podem contribuir para uma falha por fadiga ou trincas térmicas. Já as tensões residuais de compressão são usualmente benéficas por minimizar falhas por fadigas ou minimizar a propagação ou nucleação de uma trinca (Masmiahi et al, 2016).

A tensão residual pode ser classificada quanto a sua área de abrangência (Liscic e Totten, 2007): as tensões macroscópicas (Tipo I) são de longo alcance, se estende por vários grãos e afeta um volume considerável de material. As deformações originadas por ela são praticamente uniformes para alguns grãos; as tensões microscópicas (Tipo II) atuam em uma distância de um grão ou em parte de um grão, com isso a região de equilíbrio destas tensões se restringe a um pequeno número de grãos; as tensões submicroscópicas (Tipo III), abrangem distância interatômicas no interior do grão e são resultantes de imperfeições cristalinas, ocorrendo principalmente em regiões de discordâncias.

A tensão residual existente próximo à superfície usinada reduz gradualmente com aumento da profundidade a partir da superfície usinada, até atingir um valor estável nas camadas mais interiores do material. Além disso, são auto-equilibrantes e a resultantes das forças que produzem valem zero (Nikpa et al, 2016).

Durante o processo de fresamento, o material está sujeito a consideráveis deformações plásticas, tendendo a ter tensões residuais de compressão (Ghanem et al, 2016). Estudos feitos por Sun e Guo (2009), para o fresamento de uma liga de titânio, a tensão máxima de compressão foi alcançada com uma velocidade de corte em torno de 80 m/min ao passo que a tensão residual tende a ser menos compressiva com o aumento da velocidade de corte. Mas conforme Capello (2006), além dos parâmetros de corte, as propriedades do material influem no processo de geração de tensão residual. Isso pode ser observado no trabalho Chen, Jing e Li (2007), onde o processo de fresamento gerou além das tensões residuais compressivas, tensões residuais trativas. Assim, este trabalho objetivou quantificar o efeito do fresamento, relacionando a velocidade de corte, avanço por dente e dureza do material da peça nas tensões residuais macroscópicas e microscópicas do aço para moldes e matrizes VP100.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A operação de usinagem foi realizada em um centro de usinagem CNC modelo Discovery 560 (comando Siemens) sem aplicação de fluido lubrificante e, com os parâmetros geométricos da ferramenta mantidos constantes. Os parâmetros utilizados como variáveis de entrada nos ensaios de fresamento foram o avanço por dente (f_z) 0,1 e 0,2 mm/z, velocidade de corte (v_c) 200 e 450 m/min e tratamento térmico do material da peça (beneficiados que passaram apenas pelo processo de alívio de tensão (32 HRC) e temperados/revenidos, cuja dureza alcançou 43 HRC).

A profundidade de usinagem (a_p) e a largura de usinagem (a_e) foram mantidas constantes em todos os ensaios, sendo 0,5 mm e 17,5 mm, respectivamente. A condição de corte discordante foi adotada nos ensaios por ser mais representativa em análises anteriores. A ferramenta utilizada durante a usinagem é composta por dois insertos de metal duro com cobertura de TiAlN e diâmetro de 25mm (R390-025A25-11L).

Os corpos de prova foram obtidos de um aço fornecido pela Villares Metals, comercialmente chamado de VP100 sem similares normatizados (100x30x24). A Fig. (1a) apresenta a microestrutura do material na condição beneficiado. É possível observar que o aço possui bainita inferior, na forma de ferrita lenticular com placas finas de cementita. A Fig. (1b) apresenta a montagem experimental e as direções de corte.

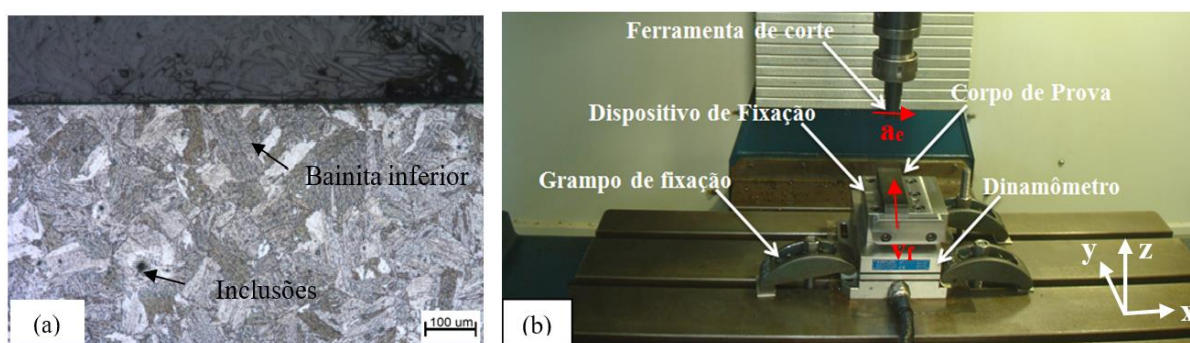


Figura 1. (a) Fotomicrografia do aço VP100 e (b) montagem experimental no centro de usinagem CNC.

As tensões residuais microscópicas foram analisadas através do método de $\sin^2\psi$ usando a difração de Raios-X no difratômetro da marca PANalytical, modelo MRD-XL. Foi utilizada radiação de Co-K α e o reflexo (211) da ferrita foi analisado. As tensões residuais foram determinadas nas direções de corte, transversal e a 45° usando um intervalo de 0 a 0,9 e passo de 0,15 em $\sin^2\psi$. E as tensões residuais macroscópicas foram obtidas pelo método do furo cego de acordo com as recomendações da norma ASTM E837 (Fig. 2(a)). O furo foi feito com incremento de 0,099 mm, com leitura da deformação a cada avanço, sem que a fresa com corte ao centro ($\varnothing$ 3mm, 3 arestas de corte e cobertura de TiAlN) fosse retirada do mesmo. As leituras de deformação foram feitas até a profundidade de 2 mm aproximadamente. Em ambas as técnicas utilizadas, a tensão residual foi medida na superfície usinada, num ponto localizado no centro do corpo de prova em relação a largura de 30mm e a 24mm do topo.

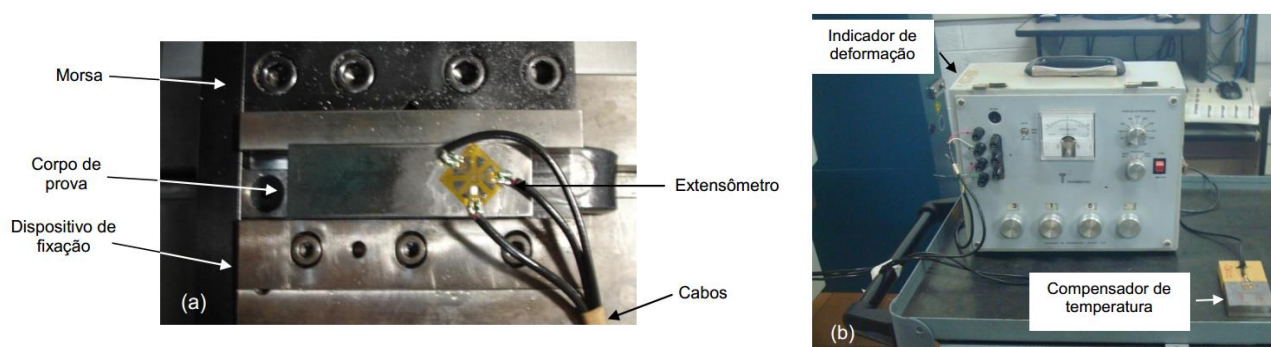


Figura 2. Extensômetro posicionado no corpo de prova (a) e indicador de deformação (b).

Todos os corpos de prova foram submetidos ao alívio de tensões antes da usinagem de forma a permitir que no processo de medição de deformação residual apenas o efeito da usinagem sobre o material fosse obtido. Vale ressaltar que os procedimentos que envolvem tratamentos térmicos foram executados segundo recomendações do catálogo da Villares Metals. A seguinte nomenclatura, independentemente do tratamento térmico do material da peça, foi adotada na apresentação dos resultados: V200-F01, V200-F02, V450-F01 e V450-F02, onde V denota velocidade de corte e F avanço por dente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. (3) apresenta a comparação entre as tensões residuais principais máximas (S_{11}) medidas experimentalmente pelo método do Furo Cego e difração de Raios-X. Os métodos são complementares, já que a menor profundidade medida abaixo da superfície fresada pelo método do Furo Cego é de 99 μm ao passo que via Raios-X é de 5 μm da superfície usinada. As Fig. 3(a) a 3(d) mostram as tensões residuais de tração na superfície da peça beneficiada e as linhas tracejadas indicam o provável comportamento da tensão residual entre as profundidades de 5 e 99 μm . Observa-se que houve uma inversão das tensões residuais do campo compressivo ao de tração, ao se considerar o menor avanço por dente, independentemente da velocidade de corte empregada. Para a condição de usinagem de maior avanço da fresa, manteve-se a tendência de tensão residual de tração medida pelo método do Furo Cego.

A soma das áreas abaixo das tensões residuais de tração e acima das de compressão, que deve ser nula, é um indicativo da propriedade das tensões residuais serem autoequilibrantes. Essas áreas não foram calculadas com exatidão mas sugerem que o fresamento com menor avanço por dente gerou um comportamento mais uniforme quando comparado ao se empregar o maior avanço da ferramenta.

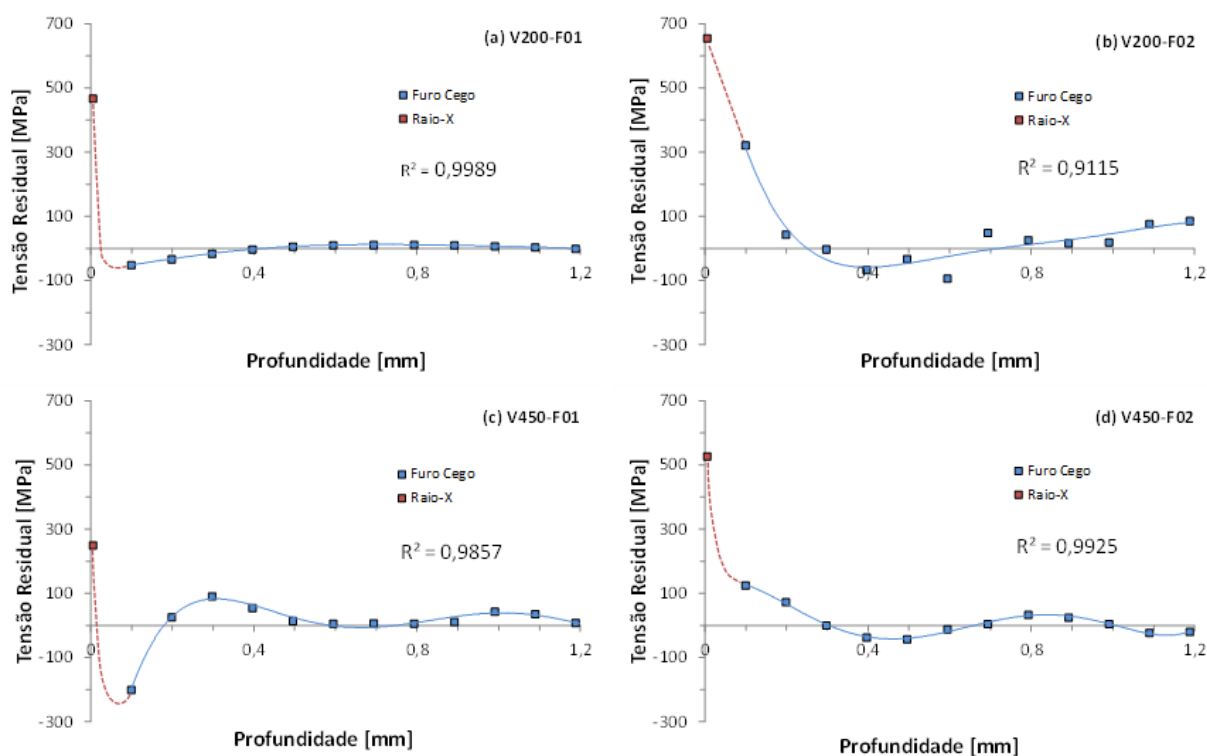


Figura 3. Comparação entre tensões residuais principais máximas (S_{11}) medidas pelo método da difração de Raios-X a 5 μm abaixo da superfície usinada e pelo método do Furo Cego para a peça beneficiada.

A Fig. (4) ilustra o comportamento da tensão residual na profundidade de 5 a 99 μm para as peças temperadas. A inversão dos campos de compressão para tração, diferentemente das peças beneficiadas, ocorreu agora para a maior velocidade de corte, e não para o menor avanço da ferramenta. Isso provavelmente ocorreu em função da combinação da maior velocidade de corte e maior dureza da peça, por contribuírem com o efeito térmico e minimizarem o efeito mecânico, os quais favorecem a geração de tensões de tração.

Para a condição de usinagem de menor velocidade de corte, a tensão residual medida pelo método de difração de Raios-X manteve-se a tendência de tração. Por fim, a propriedade de auto equilíbrio das tensões residuais demonstra estar mais uniforme para o menor avanço da ferramenta, similarmente às peças beneficiadas.

As inversões de tensão residual próximas da superfície da peça, do campo compressivo ao de tração e vice-versa, são plenamente possíveis de ocorrerem, tal como ilustra. Este comportamento pode ocorrer, inclusive, para atender à condição de auto equilíbrio das tensões residuais. Dessa forma, como as linhas tracejadas nas Fig. (3) e Fig. (4) são hipóteses do comportamento das tensões residuais no intervalo 5-99 μm , pode ser que os casos onde as áreas abaixo das tensões de tração e acima das tensões compressivas estejam menos uniformes tenham ainda mais mudanças de amplitude ou inversões (Fig. (3), Fig. (4b) e Fig.(4c)).

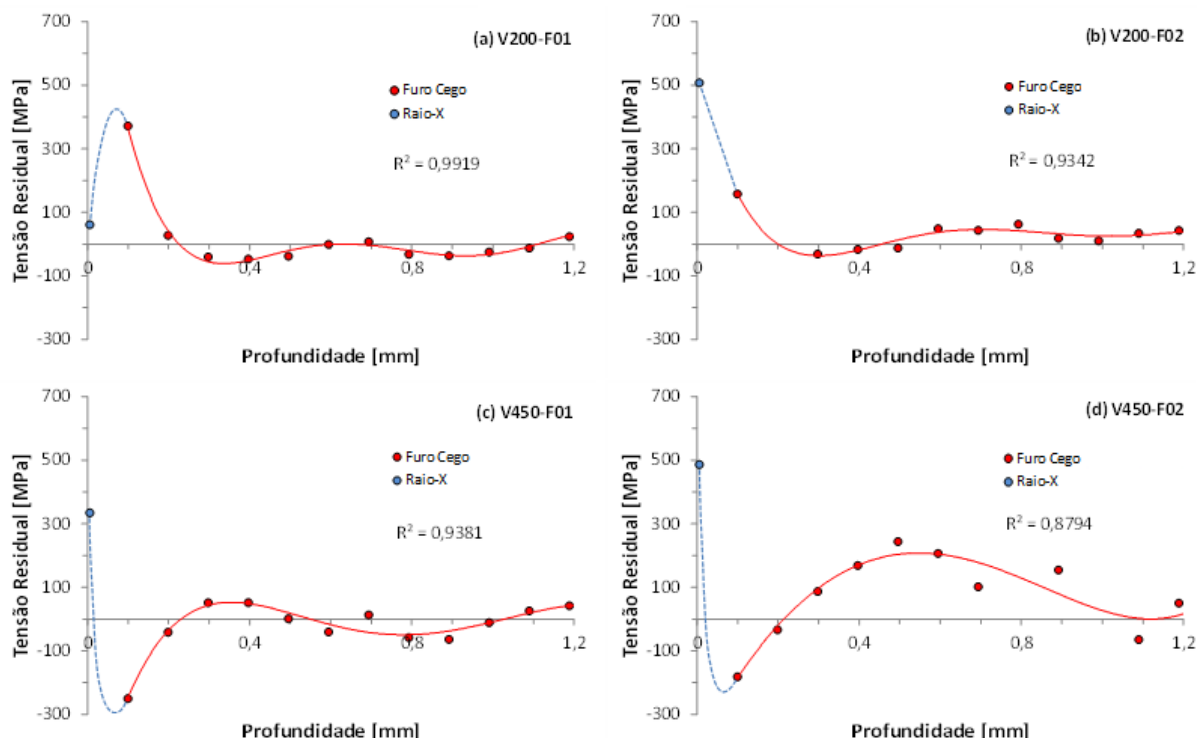
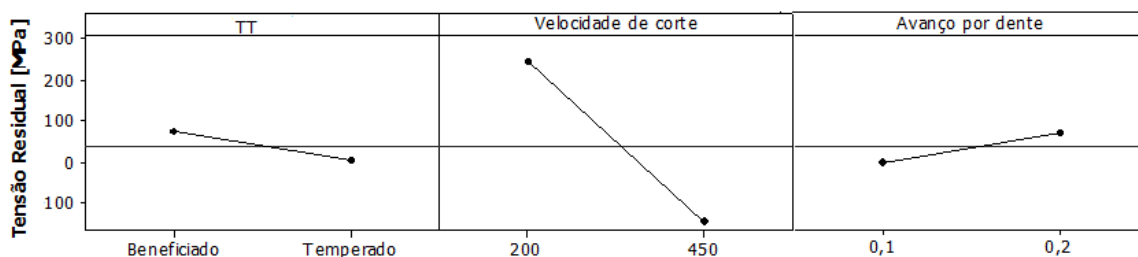


Figura 4. Comparação entre tensões residuais principais máximas (S_{11}) medidas pelo método da difração de Raios-X a 5 μm abaixo da superfície usinada e pelo método do Furo Cego para a peça temperada.

Vale frisar que as condições de ensaio para os dois trabalhos foram idênticas, isto é, condições de usinagem, material da peça, tratamentos térmicos, ferramentas de corte, máquina-ferramenta e sistemas de fixação da peça e da ferramenta. Além disso, as constantes elásticas necessárias para o cálculo das tensões residuais também foram iguais para ambos os métodos de medição aplicados.

Visando validar estatisticamente os resultados de tensão residuais fez-se a análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais (velocidade de corte, avanço por dente e material da peça) sobre a resposta (tensão residual). A ANOVA trata da análise da tensão residual principal para os dois métodos utilizados, Raio-X e Furo Cego. A Tab. (1) mostra os efeitos principais no método do Furo Cego.

Tabela 1. Influência dos efeitos principais na tensão residual aplicando o método do Furo Cego.



É possível observar que o avanço da ferramenta apresenta uma relação diretamente proporcional com a tensão residual, ao passo que a dureza do material da peça e a velocidade de corte têm um efeito inversamente proporcional. A análise é validada quantitativamente, ao comparar o valor de probabilidade (P-Valor) com o nível de significância. Dessa forma, apresenta-se na Tab. (2) o quadro ANOVA entre os fatores de controle e a resposta da tensão residual. Apenas a velocidade de corte influi na tensão residual da peça após o fresamento, dado que o P-Valor de 3,6% é menor que o nível de significância adotado na concepção da Análise de Variância ($\alpha = 5\%$). O Coeficiente de Correlação de Pearson (CP) mostra que a correlação é inversamente proporcional atingido o valor de 62,3%.

Tabela 2. Quadro ANOVA do efeito da velocidade de corte, avanço por dente e tratamento térmico do material da peça (dureza) na tensão residual principal após o fresamento do aço VP100 para o método do Furo Cego.

Fator de Controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
TT	1	970	970	0,01	0,916
v_c	1	494958	502488	6,05	0,036
f_z	1	32896	28310	0,34	0,574
Erro	9	747465	83052		
Total	12	1276289			

Da Tab. (2) apenas a velocidade de corte influi na tensão residual da peça após o fresamento, dado que o P-Valor de 3,6% é menor que o nível de significância adotado na concepção da Análise de Variância ($\alpha = 5\%$). O Coeficiente de Correlação de Pearson (CP) mostra que a correlação é inversamente proporcional atingido o valor de 62,3%.

Analizando a sensibilidade da tensão residual principal, no método de difração de Raio -X, a Tab. (3) mostra o quadro ANOVA com suas variáveis de entrada e suas interações de primeira ordem. Nota-se que nenhum dos fatores de controle ou a combinação entre eles influenciaram na orientação das tensões residuais principais dado que os níveis de significância são maiores que 5%.

Tabela 3. Quadro ANOVA dos fatores de controle tratamento térmico (TT), velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z) sobre o ângulo (ϕ) entre a direção de corte e a direção da tensão principal máxima.

Variável	GL	SQ	QM	F	P
TT	1	138,1	138,1	0,23	0,642
v_c	1	1072,6	1072,6	1,79	0,213
f_z	1	855,6	855,6	1,43	0,262
TT $\times$ v_c	1	126,6	126,6	0,21	0,656
TT $\times$ f_z	1	85,6	85,6	0,14	0,714
$v_c \times f_z$	1	473,1	473,1	0,79	0,397
Erro	9	5383,1	598,1		
Total	15	8134,4			

4. CONCLUSÕES

O fresamento de topo do aço VP100 tende a gerar tensões residuais de tração na superfície usinada inferior a 5 μm . Para a faixa analisada a tensão residual principal não foi sensível a variação dos parâmetros de corte e dureza do material da peça.

Para a camada usinada superior a 99 μm , o processo de fresamento gera tensões residuais compressivas ou trativas, dependendo da combinação de parâmetros de corte e da dureza do material da peça. Além do campo de tensões, os parâmetros de corte governam a magnitude, a profundidade e a direção das tensões principais na superfície da peça usinada.

Tensões compressivas podem ocorrer onde o efeito mecânico supera o efeito térmico. Neste caso, baixas velocidades de corte e avanço da ferramenta contribuem com a diminuição das tensões de tração ou até geração de tensões compressivas. O aumento do avanço tende a gerar tensões de tração em peças pré-endurecidas, ao passo que tensões compressivas são obtidas com o aumento da velocidade de corte em peças endurecidas.

Duas técnicas de medição das tensões residuais principais foram utilizadas: difração de Raios-X e Furo Cego. A combinação das técnicas permitiu discretizar o campo e magnitude das tensões residuais principais ao longo de uma camada micrométrica até uma camada de aproximadamente 2mm. Dois tipos de tensões residuais microscópicas e macroscópicas foram obtidos. As tensões residuais principais medidas por difração de Raios-X sinalizam estarem

corretas, quando se utiliza o critério do auto equilíbrio das tensões residuais (áreas iguais abaixo do campo de tração e acima do campo de compressão).

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsas de pesquisa, à Villares Metals pela doação do material da peça utilizado nos ensaios, ao Grupo de Pesquisa em Usinagem (GPU) da UNESP Campus de Ilha Solteira, ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) e Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, por disponibilizarem a infraestrutura para o desenvolvimento de parte deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Albano, A.E., 2008, “Análise comparativa entre os processos de fresamento 3 e 5 eixos para a fabricação de moldes”. Dissertação (Mestrado), Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville.
- CAPELLO, E., 2006, “Residual stresses in turning - Part I Influence of process parameters”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 160, n. 2, p. 221-228, Mar 20 2005.
- CAPELLO, E., 2006, “Residual stresses in turning - Part II. Influence of the machined material”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, n. 3, p. 319-326.
- CHEN, M. and JING, L.-L.; LI, X.-K., 2007, “The surface integrity in machining hardened steel SKD11 for die and mold”. *Machining Science and Technology*, v. 11, n. 1, p. 99-116.
- GHANEM, F. et al., 2002, “Effect of near-surface residual stress and microstructure modification from machining on the fatigue endurance of a tool steel”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 11, n. 6, p. 631-639.
- LISCIC, B. and TOTTEN, G. E., 2007, “Steel Heat Treatment-Metallurgy and Technologies”. 2 ed. Taylor & Francis Group. U.S, p 289-426.
- MASMIATI, N. et al., 2016, “Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel”. *Measurement*, v. 86, p. 253-265.
- NIKPA, N. M. et al., 2016, “Novel uses of SiO₂ nanolubrication in end milling of medium carbon steel for higher compressive residual stress measured by high-energy X-ray diffraction data”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*, v. 230, n. 6, p. 697-708.
- SONG, G. et al., 2010, “The Influence of Milling Parameters on Surface Residual Stresses during Milling AF1410 Ultrahigh Strength Steel”. *Machining and Advanced Manufacturing Technology*, v. 431-432, p. 209-212.
- SUN, J. and GUO, Y. B. A., 2009, “Comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 8, p. 4036-4042.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

RESIDUAL STRESS EVALUATION WHEN END MILLING VP100 MOLD STEEL

Flavio Henrique Manarelli, flaviomanarelli@gmail.com¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Adriana Bruno Norcino, adriananorcino@gmail.com²

Haroldo Cavalcanti Pinto, haroldo@sc.usp.br²

¹Universidade Estadual Paulista (Unesp), Av. Brasil Centro 56, CEP 15.385-000, Ilha Solteira -SP

²Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos -SP

Abstract: *Machining can modify the internal stress of the part material and is related to the manufacturing route and the physical properties of the component. The residual stresses can vary in field (tensile or compression), magnitude (high or low) and depth (shallow or deep). Its effect on the life of the product can delay or intensify a failure. This paper determines the magnitude, field and depth of the residual stresses of VILLARES steel for molds and dies VP 100 after CNC end milling with carbide tool. The input variables were hardness, feed per tooth and cutting speed. Surface residual stress was analyzed using the $\sin^2\psi$ method using X-ray diffraction and the subsurface residual stress was measured using the deep hole drilling (ASTM E837). Top milling induces tensile residual stresses on the milled surface. A change from tensile to compressive stress took place in softer part as tool feed increased whereas this same inversion behavior occurred for both harder workpiece and cutting speed.*

Keywords: *milling, residual stress, X-ray diffraction, hole drilling method*