

Special Issue on Polymers and Composites

## Influência do tratamento térmico no empenamento de latão durante o processo de usinagem por fresamento de topo

*Influence of heat treatment on warping during machining of brass by end milling*

Mário Márcio Wilborn<sup>a,\*</sup>, Felipe Dalla Vecchia<sup>b</sup>, Halston Mozetic<sup>a,c</sup>, Eduardo Luis Schneider<sup>a</sup>, Cláudia Trindade Oliveira<sup>a</sup>, Lírio Schaeffer<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II, RS 239, 2755 – CEP 93352000 – Novo Hamburgo – RS – Brasil

<sup>b</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Av. Ipiranga, 6681 – CEP 99619900 – Porto Alegre – RS – Brasil

<sup>c</sup>Laboratório de Transformação Mecânica, Depto Metalurgia, PPGEM, UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501970, Porto Alegre, RS, Brasil

### Resumo

Ligas de latão contendo chumbo têm sido utilizadas em processo de usinagem, sendo empregadas na fabricação de peças para uso em processo de “Hot Stamping”. Porém, após o processo de usinagem, as peças empenam e são desempenadas manualmente com aplicação de carga pontual diretamente sobre as partes usinadas, gerando perdas e refugo, pois as peças empenam para o lado oposto. Tratamentos térmicos para alívio de tensões reduzem as tensões internas nas ligas, sendo uma alternativa ao empenamento. Este trabalho propõe um tratamento alternativo ao utilizado industrialmente para eliminar o empenamento das peças. Para tal, foram estudadas ligas de latão com e sem chumbo, com e sem tratamento térmico antes e após usinagem. O tratamento térmico foi de alívio de tensões, a 250 °C. Foram realizadas medidas de empenamento e variação dimensional, análises de microestrutura, e microanálise química. O empenamento e a variação dimensional foram observados somente em amostras usinadas não tratadas termicamente, o que pode ter causado o aumento do tamanho dos grãos após o processo de usinagem. Observou-se que o empenamento pode estar relacionado com a composição química da liga, somado ao processo de laminação anterior a usinagem, podendo ser eliminado por meio de tratamento térmico.

© 2013 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

*Palavras chave:* latão; usinagem; empenamento; tratamento térmico.

### Abstract

The brass alloys containing lead have been used in the machining process, and are used in manufacturing parts for use in "Hot Stamping" process. However, after machining processes, the pieces warp and are manually straightened with local load application directly on machined parts, generating scrap and losses of pieces because they warp to the opposite side. Heat treatments for stress relief reduce internal stresses in the alloys, been an alternative to the warping of this alloy. This work purpose an alternative treatment to that industrially used to eliminate the warping of the pieces. Therefore, it was studied brass alloys with and without lead, with and without heat treatment before and after machining. The heat treatment was stress relieving at 250 °C. Measurements of warpage and dimensional variation, analysis of microstructure and chemical microanalysis were made. The warpage and dimensional change was observed only in samples machined not heat treated, this may have caused the increased grain size after the machining process. It was observed that the warpage can be related to the chemical composition of alloy added to the lamination process used to obtain the material to be machined and can be eliminated by thermal treatment.

© 2013 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

*Keywords:* brass; machining; warpage; heat treatment.

\* Corresponding author.

E-mail address: [mwilborn@feevale.br](mailto:mwilborn@feevale.br) (M.M. Wilborn)

## 1. Introdução

O cobre e suas ligas são o terceiro metal mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas dos aços e do alumínio e suas ligas. Os latões são ligas basicamente formadas de cobre e zinco, com percentual de zinco que pode variar de 5 a 50 %, constituindo uma importante família de ligas não ferrosas. Os latões possuem uma importante combinação de propriedades, como por exemplo, boa resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica e boa resistência ao desgaste. Dessa forma, são largamente utilizados na área industrial na produção de componentes elétricos, automotivos, válvulas e acessórios para tubulações, entre outras aplicações. Além disso, a adição de outros elementos de liga pode facilitar alguns processos de produção de peças em latão, como por exemplo, a adição de chumbo no processo de usinagem [1].

De acordo com estudos, a adição do chumbo promove aumentos efetivos de usinabilidade até a adição de 3%, sendo que acima deste percentual não se obtém nenhuma melhora significativa. O chumbo se distribui aleatoriamente na microestrutura na forma de partículas, possibilitando a quebra do cavaco, reduzindo as forças de corte, atuando como lubrificante da ferramenta, reduzindo o desgaste e aumentando as taxas de produção [2].

As ligas de latão contendo chumbo têm sido utilizadas industrialmente na obtenção de peças para estampagem conhecidas como clichês para uso em processo de *Hot Stamping* (estampagem à quente). Esse processo possibilita um acabamento metalizado bastante utilizado em diversos segmentos de embalagens e produtos, tais como: cosméticos, fármacos, alimentos, plásticos, etc. Os clichês devem apresentar boa resistência ao desgaste, alta condutividade térmica e devem ser perfeitamente retos (sem empenamento) sendo necessário paralelismo da extremidade superior com a inferior do material.

No entanto, durante o processo de usinagem, as peças de latão contendo chumbo apresentam empenamento. Este fato é agravado quando o material usinado, fixado por meio de pinças, é retirado dos elementos de fixação da máquina. Por outro lado, as peças usinadas de latão sem chumbo não apresentam problema de empenamento, porém, são de difícil usinabilidade, o que justifica o seu baixo emprego na fabricação de clichês.

Para resolver este problema de empenamento causado durante o processo de usinagem, industrialmente

utiliza-se uma prensa com aplicação manual de carga concentrada, o que, muitas vezes, causa uma deformação pontual na peça, resultando em enorme dificuldade de ajuste no processo de estampagem. De acordo com Heymès e Jeanmart [3,4], o empenamento em peças usinadas tem sido sistematicamente relacionado a dois fatores principais: variáveis do processo de usinagem e variáveis do material.

Os parâmetros de usinagem foram os mesmos utilizados nas duas ligas, uma contendo chumbo e a outra sem adição de chumbo e só foi verificado empenamento na liga contendo chumbo. Portanto, neste trabalho foi comparado o comportamento de ligas de latão usinadas e não usinadas com e sem adição de chumbo e verificada a influência de tratamento térmico no comportamento do latão, que apresenta empenamento com o processo de usinagem.

## 2. Parte experimental

### 2.1. Obtenção de amostras das ligas C 268 e C 360

Neste trabalho foram avaliadas duas ligas de latão: liga C 268, contendo Cu e Zn (Tabela 1) e liga C 360, contendo Cu, Zn e Pb (Tabela 1). Optou-se por estudar estas ligas, pois a C 268 não apresentou empenamento, enquanto a liga C 360 apresentou empenamento após a usinagem por fresamento de topo. As ligas de latão utilizadas neste trabalho contêm espessura de ¼ polegada (6,35mm), possuem têmpera ½ duro, e apresentam especificações técnicas, de acordo com fornecedor, conforme Tabela 1. A liga C 268 é comercializada em chapas e a liga C 360, em barras. Para posterior tratamento térmico e usinagem, as amostras foram cortadas nas dimensões 310x100 mm.

Tabela 1. Composição química e propriedades mecânicas das ligas C 268 e C 360.

	Composição Química			Propriedades Mecânicas			
	Cu	Zn	Pb	Limites de Resistência (kgf/mm <sup>2</sup> )	Limites de Escoamento (kgf/mm <sup>2</sup> )	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
<b>Liga C 268</b>							
Mín.	65,50	31,50	-	43	33	8	120
Máx.	68,50	34,50	-	53	48	30	145
<b>Liga C 360</b>							
Mín.	60,00	33,30	2,50	44	30	12	115
Máx.	63,00	37,50	3,70	52	45	25	135

### 2.1.2. Tratamento térmico da liga C 360

Como a liga C 268 não apresentou empenamento após usinagem, somente a liga C 360 foi submetida a tratamento térmico.

Para o processo de tratamento térmico foi utilizada uma prensa com duas chapas planas contendo resistências em seu interior que possibilitam o seu aquecimento. As amostras foram colocadas entre as duas chapas planas e foi aplicada uma carga de uma tonelada na temperatura de 250 °C por 90 min, sendo posteriormente resfriadas ao ar.

### 2.1.3. Usinagem da liga C 268 sem tratamento térmico e da liga C 360 com e sem tratamento térmico

A usinagem foi feita em amostras da liga C 268 sem tratamento térmico e da liga C 360 com e sem tratamento térmico. Para tanto, foi utilizado um centro de usinagem CNC de marca Hass, Modelo DT1, com potência de 15HP. As amostras foram colocadas em cima de uma mesa auxiliar de alumínio que foi fixada ao centro de usinagem. Esta mesa foi previamente usinada com pequenos orifícios em que foram colocadas pinças para fixação das amostras.

No processo de usinagem foram utilizadas fresas de topo de 3 e 10 mm, da marca Dormer, e aplicados parâmetros de usinagem, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Composição química e propriedades mecânicas das ligas C 268 e C 360.

Ferramenta (ø mm)	Rotação (RPM)	Passe lateral (mm)	Passe profundidade (mm)	Profundidade final (mm)	Avanço XY (mm/min.)	Avanço Z (mm/min.)
Paralela 3,0	12000	1,50	0,40	1,20	35	5
Paralela 10,0	10000	4,00	1,20	1,20	20	5

## 2.2. Caracterização das amostras

### 2.2.1. Medidas de empenamento e variação dimensional

As medidas de empenamento foram feitas somente na amostra C 360, pois a C 268 não apresentou empenamento durante a usinagem.

A medida de empenamento da amostra C 360 foi feita em uma peça de 157 x 100 mm com uso de um braço de medição de Marca Sigma – Romer, Modelo 3191. Os dados foram obtidos por meio de um software, Marca Hexagon, Modelo PC DMIS 4.2.

A peça foi fixada com uma fita dupla face em uma superfície plana (mesa de granito). Na região da peça em que foi feita a medida foi colocada uma fita para que fosse possível obter uma linha reta (um guia) ao longo da peça, Figura 1.



Fig. 1. Medição de empenamento.

Para verificar a variação dimensional do material (alongamento), foram usinadas as superfícies dos dois lados do material, de uma peça de 157 x 100 mm de comprimento. A medição foi realizada com um paquímetro digital centesimal de 200 mm.

### 2.2.2. Análise de microdureza

Para a análise da microdureza foi utilizado um microdurômetro Vickers de Marca Shimadzu, Modelo HMV-2T. A carga aplicada foi de 100g com tempo de aplicação de carga de 15 segundos. Para cada medida de dureza foram feitas 6 penetrações.

### 2.2.3. Análise microestrutural e microanálise química

Para as análises de microestrutura e microanálise química, amostras foram cortadas das peças com dimensões de 20 x 30 mm e foram lixadas até SiC #1200 e polidas. As amostras foram submetidas a ataque metalográfico em solução de HNO<sub>3</sub> 65%.

A análise microestrutural foi realizada por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com uso de equipamento da Marca Jeol, Modelo MEV: JSM-6510LV, com utilização do programa JSM-6510LV – Scanning Electron Microscope disponível no Laboratório de Estudos Avançados em Materiais da Universidade Feevale.

Para as microanálises químicas foi utilizado o modo de funcionamento do Espectrômetro de raios-X por Dispersão de Energia ou EDS (Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy), acoplado ao MEV.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Análise de empenamento e variação dimensional das peças de latão com chumbo (C 360) com e sem tratamento térmico

As análises de empenamento foram realizadas somente na liga C 360, pois a liga C 268 não apresentou empenamento.

A seguir são mostradas fotografias das peças da liga C 360 não usinadas sem tratamento térmico, Figura 2a, e com tratamento térmico, Figura 2b. Observa-se que não houve empenamento nas peças após o tratamento térmico.

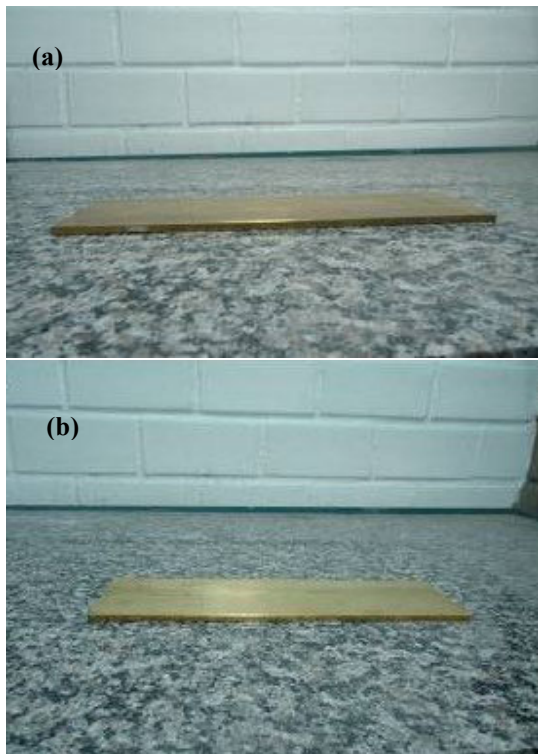


Fig. 2. Peças de latão da liga C 360 não usinadas. (a) com tratamento térmico e (b) sem tratamento térmico.

A Figura 3 mostra fotografias das peças da liga C 360 usinadas (a) sem tratamento térmico e (b) com tratamento térmico.

Observa-se que a peça sem tratamento térmico (Figura 3a) apresentou empenamento após a usinagem. O empenamento foi medido em uma peça com dimensões 157 x 100 mm, e foi de 1,127 mm, com um aumento de 0,3 mm na parte superior da peça (próximo à superfície da usinagem), sendo que a parte inferior (base da peça) se manteve inalterada. É importante ressaltar que se verifica na prática, que o

grau de empenamento pode variar de acordo com o volume de usinagem e com a quantidade de material retirado da peça com a mesma profundidade de corte. Quanto maior for a quantidade de material removido, maior será o grau de empenamento obtido na peça.

Por outro lado, a peça tratada termicamente (Figura 3b) não apresentou empenamento após a usinagem

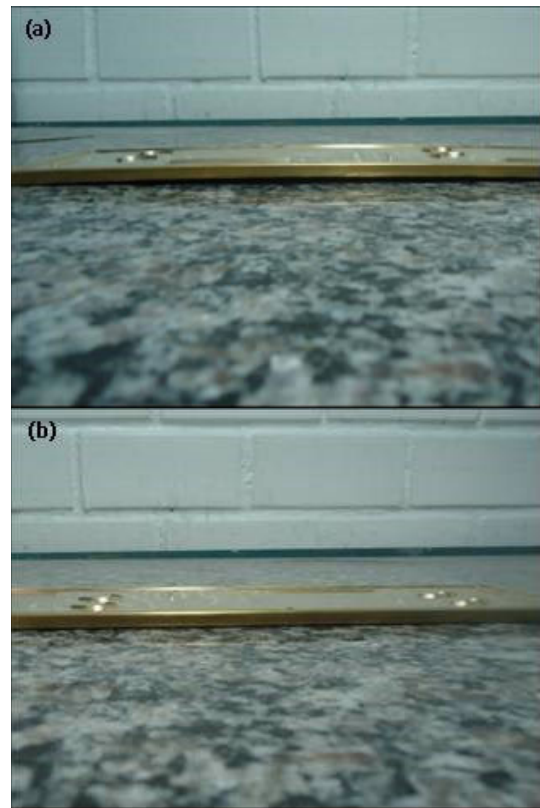


Fig. 3. Peças de latão C 360 usinadas. (a) sem tratamento térmico e (b) com tratamento térmico.

Como a peça não usinada e não tratada termicamente está laminada e provavelmente com tensões normais oriundas deste processo, a usinagem pode ter provocado aumento destas tensões. No entanto, o tratamento térmico pode ter minimizado as tensões oriundas da laminação, o que pode explicar o comportamento diferente frente ao empenamento das peças tratadas e não tratadas após a usinagem.

Teoricamente, o empenamento pode ocorrer devido a uma deformação plástica com a retirada do material e o arrasto da ferramenta de corte tendo por consequência uma deformação residual (tensões) [5].

#### 3.1.1. Análise de microdureza

Devido ao empenamento observado nas peças, esperava-se que tivesse ocorrido encruamento nas

peças após usinagem, ocasionando uma diferença de dureza nas mesmas.

Através da análise de microdureza realizada nas peças de latão C 360 não foi encontrada uma diferença significativa entre as amostras usinadas e não usinadas sem tratamento térmico, Tabela 3. No entanto, as amostras tratadas termicamente apresentaram dureza menor (tanto usinadas quanto não usinadas) comparativamente às amostras não tratadas termicamente. Para efeito de comparação, amostras sem chumbo, as quais não apresentaram empenamento significativo, também foram analisadas quanto à microdureza. Observa-se que as amostras tratadas termicamente apresentam valores de dureza semelhante às da liga sem chumbo (C 268). Sabe-se que adições de chumbo na liga de latão facilitam o processo de usinagem, pois diminuem o tamanho do grão facilitando a quebra do cavaco, e atuando como lubrificante da ferramenta de corte.

Tabela 3. Resultados de análise de microdureza em HV.

	Liga de latão C 360				Liga de latão C 268	
	Sem tratamento térmico		Com tratamento térmico		Sem tratamento térmico	
	Não usinado	Usinado	Não usinado	Usinado	Não usinado	Usinado
Média	148,00	156,00	121,50	123,00	121,80	131,70
Desvio	4,75	5,78	2,60	1,40	3,00	5,10

De acordo com Vilarinho et al. [6] a usinagem da liga de latão sem a presença de chumbo apresenta taxas de produção severamente limitadas, o que foi verificado na prática e o que vem ao encontro do que diz García et al [1], que quando são necessários operações de usinagem, é recomendado a adição de uma certa quantidade de chumbo. Neste caso, observa-se que o chumbo aumenta a dureza do latão, podendo ser decisivo no empenamento da liga. Por outro lado, esse efeito pode ser minimizado pelo tratamento térmico.

### 3.2. Análise do latão sem chumbo (C 268)

#### 3.2.1. Microestrutura e composição química

A Figura 4 apresenta micrografias de topo de uma liga de latão sem chumbo (C 268), não usinada (Figura 4a) e usinada (Figura 4b) sem tratamento térmico, obtidas ao MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Esta liga apresenta apenas cobre (Cu) e zinco (Zn), de acordo com o EDS, (Figura 4c) o que está de acordo com a Tabela 1. De acordo com as micrografias é possível observar que as amostras usinada e não usinada apresentam microestrutura semelhante, com grãos equiaxiais de tamanho da ordem de micron e distribuídos aleatoriamente.

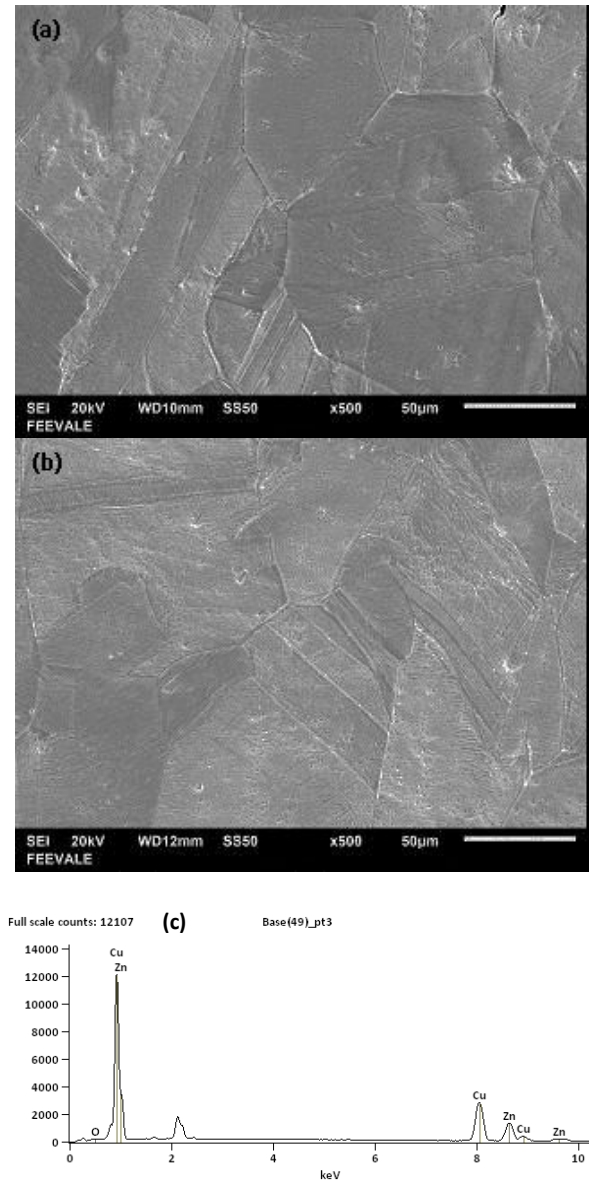


Fig. 4. Micrografias da liga de latão C 268. (a) Não usinada e (b) usinada. (c) Microanálise química por EDS.

Como o processo de usinagem provoca deformações plásticas no material e consequente encruamento [5], esperava-se que não houvesse uma diferença significativa na morfologia dos grãos entre as amostras não usinadas e usinadas, o que está de acordo com as micrografias. Neste caso, sugere-se que as tensões introduzidas durante o processo de usinagem não tiveram tanta influência nesta liga a ponto de modificar a microestrutura.

### 3.3. Análise do latão com chumbo (C 360)

#### 3.3.1. Composição química

A seguir estão apresentados os resultados obtidos em análises por EDS da amostra de latão com chumbo (C 360), Figura 5. As análises de EDS mostram que esta liga apresenta em sua composição cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb), formando uma liga ternária. Os elementos Sr e Al não são significativos nas análises de EDS.

O EDS foi realizado em diferentes pontos da micrografia, com o intuito de verificar a composição química da liga. Com esta análise é possível verificar que nos contornos dos grãos existe alto índice de partículas de chumbo, as quais também se apresentam aleatoriamente distribuídas. O chumbo é totalmente insolúvel no cobre e precipita no final do processo de solidificação [1]. Conforme Vilarinho et al. [6] a solubilidade do chumbo na liga de cobre é muito pequena e por essa razão são encontrados glóbulos dispersos deste elemento em todo o material. Este fato, no processo de usinagem, resulta em diminuição do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material, cria descontinuidade que resulta em fragmentação do cavaco, reduz as forças de corte e o desgaste da ferramenta.

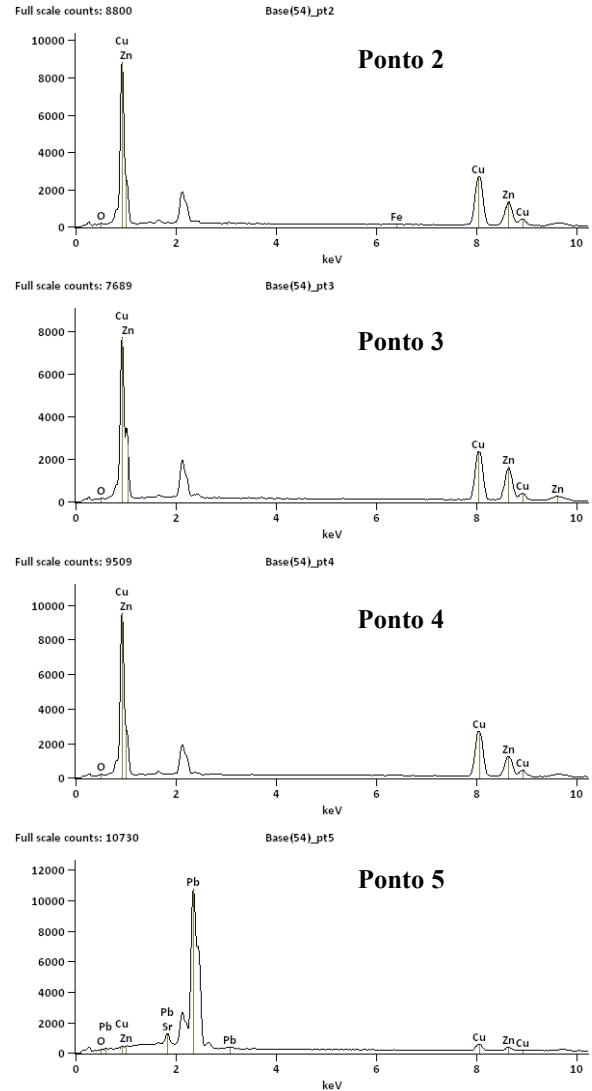
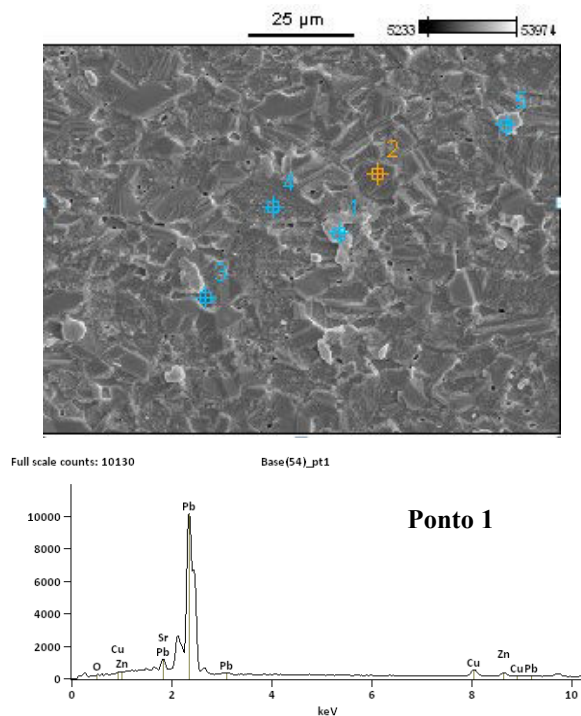


Fig. 5. Microanálise química por EDS da liga C 360.

A Figura 6 apresenta o formato do cavaco obtido no processo de usinagem da liga C 360. Estes cavacos estão de acordo com a literatura [1], em que esta liga apresenta descontinuidade e fragmentação do cavaco devido a presença do chumbo.



Fig. 6. Cavacos obtidos no processo de usinagem da liga C 360.

### 3.3.2. Análise de microestrutura sem tratamento térmico

A Figura 7 mostra micrografias em vista de topo de amostras de latão C 360 sem tratamento térmico. A amostra (a) não é usinada e (b) usinada.

Comparando as amostras em vista de topo não usinadas da liga C 360 (Figura 7a) com a liga C 268 (Figura 4a) observam-se diferenças na estrutura dos grãos. Na amostra C 360, os grãos são menores e parecem conter poros ao longo do material comparativamente à amostra C 268, em que os grãos são maiores e não apresentam poros em sua microestrutura. Isto está de acordo com Fontaine e Keast [7], que verificou que a adição de chumbo na liga muda significativamente a microestrutura do material, sendo a principal diferença no tamanho do grão, que reduz em torno de dez vezes em relação ao latão sem chumbo.

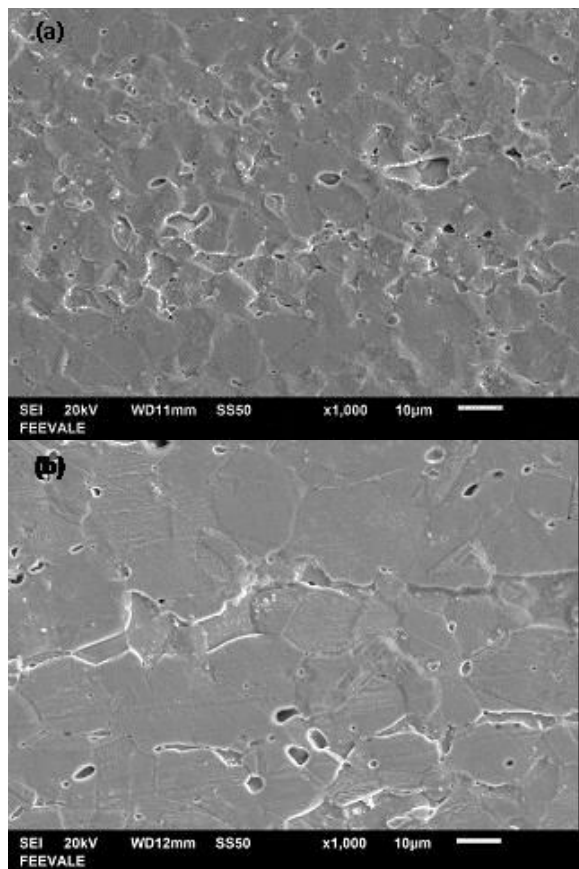


Fig. 7. Micrografias da liga C 360 sem tratamento térmico. (a) não usinada e (b) usinada.

A interação entre Zn e Pb acontece de forma repulsiva, enquanto que Cu e Zn é altamente atrativa e facilmente forma uma solução sólida. O sistema

binário de Cu-Pb mostra uma lacuna grande de mistura, tanto no estado líquido quanto no sólido e a adição do Zn aumenta ainda mais essa lacuna [8].

Analisando as amostras não usinadas, Figura 7a e usinadas, Figura 7b, da liga C 360, observa-se uma diferença na forma dos grãos, causada após o processo de usinagem. Portanto, a modificação na forma dos grãos pode ser devido ao empenamento ocorrido nesta amostra, em que se verificou um aumento de três décimos na superfície usinada em relação à superfície não usinada (Figura 2a).

Para Callister [9], uma deformação plástica generalizada corresponde à distorção de grãos individuais devido ao escorregamento. Durante a deformação, a união e a integridade mecânica são mantidas ao longo dos contornos dos grãos (os contornos dos grãos geralmente não se separam ou se abrem). Diante disso, cada grão individual está restrito, em determinado grau, à forma que ele pode assumir devido a seus grãos vizinhos, se tornando alongados na forma que o material foi estendido.

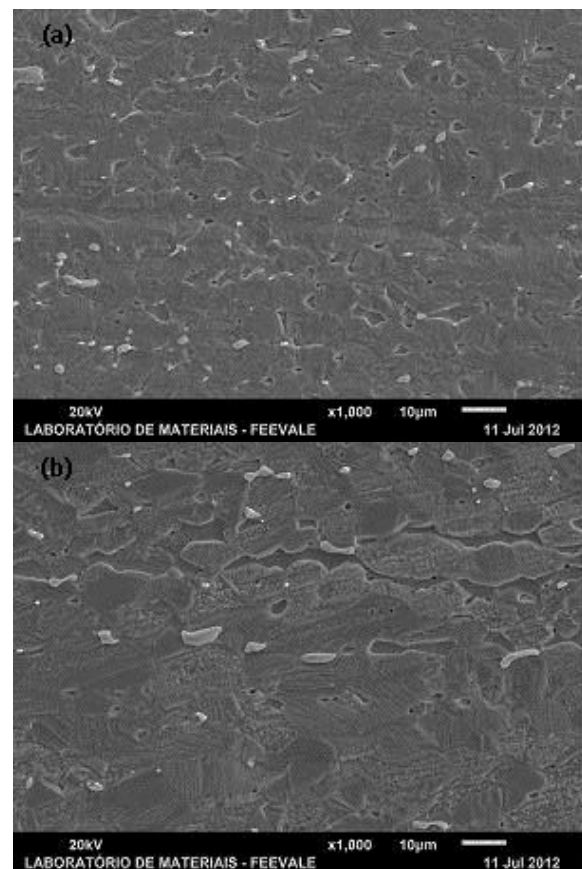


Fig. 8. Micrografias em seção transversal de amostras da liga C 360 sem tratamento térmico. (a) não usinada e (b) usinada.

Ainda de acordo com Callister [9], mesmo que um único grão possa estar orientado favoravelmente em relação à tensão aplicada para o escorregamento, ele não irá se deformar até que seus grãos próximos, e orientados de maneira menos favorável, também sejam capazes de sofrer escorregamento, exigindo dessa forma uma tensão mais elevada. A Figura 8 mostra micrografias da seção transversal de amostras de latão C 360 sem tratamento térmico.

Na seção transversal da amostra usinada (Figura 8 b) verifica-se um alongamento dos grãos, o que está de acordo com o empenamento observado.

### 3.3.3. Análise de microestrutura com tratamento térmico

A Figura 9 apresenta micrografias em vista de topo de amostras de latão C 360 com tratamento térmico, realizados a 250 °C, durante 90 minutos. A amostra (a) é não usinado e a amostra (b) é usinada.

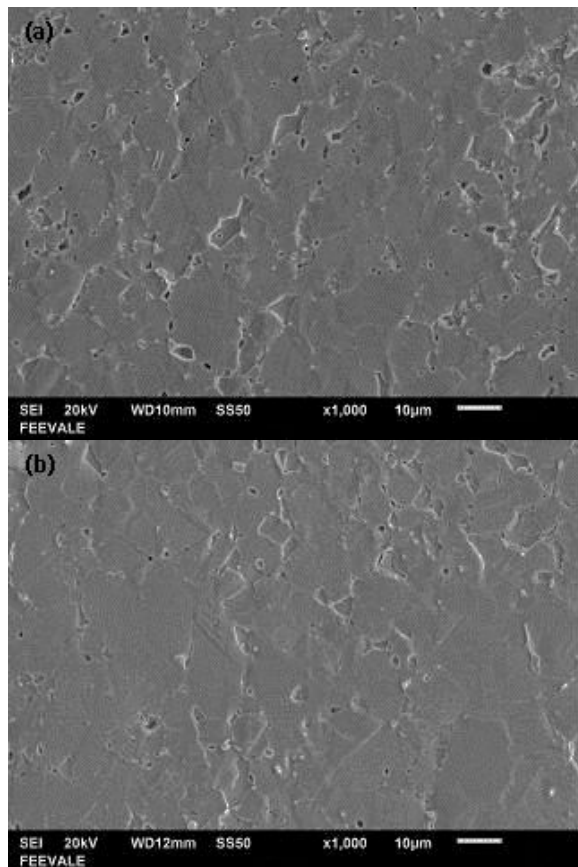


Fig. 9. Micrografias da liga C 360 com tratamento térmico. (a) não usinado e (b) usinado.

A amostra não usinada com tratamento térmico, Figura 9a, apresenta uma mudança significativa na estrutura dos grãos em relação à amostra não usinada sem tratamento térmico, Figura 7a. Este comportamento não era esperado uma vez que a temperatura usada para este tratamento térmico foi de 250 °C, abaixo da temperatura de recristalização, onde apenas acontece o rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura [10]. Neste caso, pode-se supor que o processo de laminação na liga com adição de chumbo introduz tensões severas no material, o que ocasiona o seu empenamento durante a usinagem.

A usinagem na amostra com tratamento térmico não provocou efeito significativo na microestrutura (Figura 9b), sendo que o resultado obtido com o processo de tratamento térmico fez com que as peças produzidas ficassem dentro dos parâmetros necessários para o processo de estampagem, além da eliminação de problemas durante o processo de usinagem.

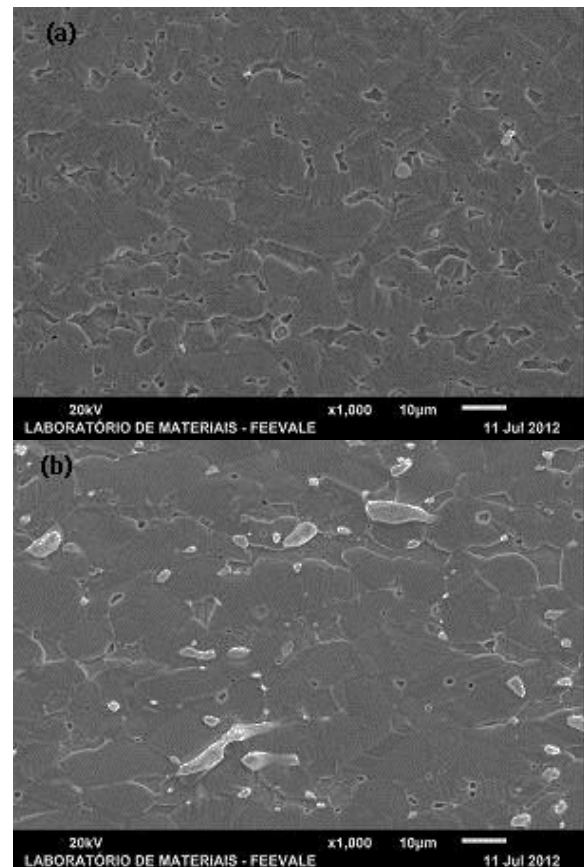


Fig.10. Micrografias em vista de seção transversal de amostras da liga C 360 com tratamento térmico, não usinado e usinado.



De acordo com a Figura 10, verifica-se que os grãos estão alongados, não ocorrendo mudança significativa com o processo de usinagem. Isso mostra que a alteração da microestrutura aconteceu com o processo de tratamento térmico, sendo que não houve mudança aparente com o processo de usinagem.

Observa-se que as amostras da liga C 360 (Figuras 7, 8, 9 e 10) apresentaram poros, enquanto as amostras C 268 não apresentam poros, o que está de acordo com a inserção de chumbo na liga.

#### 4. Conclusões

Sabe-se que a liga de latão C 360, apesar de ser bastante utilizada em clichês obtidos pelo processo de usinagem devido ao percentual de chumbo, apresenta empenamento. Por isso, nesse trabalho foi avaliado o latão com chumbo (C 360) e sem chumbo (C 268) antes e após o processo de usinagem e submetidos a tratamento térmico.

Conforme a pesquisa realizada observou-se que:

O empenamento que ocorre na liga C 360 durante o processo de usinagem se deve principalmente às tensões existentes no material com o processo de laminação aliado a fragilização da microestrutura devido à presença do chumbo;

A adição de chumbo na liga de latão diminui significativamente o tamanho dos grãos. O chumbo se distribui nos contornos dos grãos, fragilizando a microestrutura e melhorando expressivamente a usinabilidade. As partículas dispersas de chumbo promovem a descontinuidade do cavaco durante a usinagem e também atuam como lubrificante da ferramenta de corte, diminuindo o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material, possibilitando excelentes taxas de produção;

O tratamento térmico de alívio de tensões praticamente elimina as tensões do latão com chumbo, tendo efeito significativo na resolução do problema encontrado.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade, ICET/ FEEVALE/RS e as instituições de apoio financeiro, como FAPERGS e CAPES e ao Laboratório de Estudos Avançados em Materiais da Universidade Feevale.

#### Referências

- [1] P. García, S. Rivera, M. Palacios, J. Belzunce, *Eng. Fail. Anal.* **17**, 771 (2010).
- [2] S. Kumar, T.S.N. Narayanan, A. Manimaran, M.S. Kumar, *Mater. Chem. Phys.* **106**, 134 (2007).
- [3] F. Heymes, B. Commet, B. Du Bost, P. Lassince, *Proceed. 1st Int. Non-Ferrous Process. Technol. Conf.*, St. Louis Missouri, 1997.
- [4] P. Jeanmart, J. Bouvaist, *Mater. Sci. Technol.*, **1**, 765 (1995).
- [5] Metals Handbook. Machining, Ed. ASM, v. 16, p. 1089. (1989).
- [6] C. Vilarinho, J.P. Davim, D. Soares, F. Castro, J. Barbosa, *J. Mater. Process. Technol.* **170**, 441 (2005).
- [7] A. Fontaine, V.J. Keast, *Mater. Charact.* **57**, 424 (2006).
- [8] R. Goswami, K. Chattopadhyay, P. L. Ryder, *Acta Mater.* **46**, 12 (1998).
- [9] W.D. Callister, *Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução*, 5 ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002.
- [10] C. Barbosa, *Handbook: Metais & Ligas, Cobre*. Disponível em: <[http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod\\_secao=12](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod_secao=12)>. Acesso em: 23 set. 2012.