

UNIVERSIDADE FEEVALE

MÁRIO MÁRCIO WILBORN

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES DO LATÃO
DEVIDO A PROBLEMAS DE EMPENAMENTO DURANTE O PROCESSO DE
USINAGEM

Novo Hamburgo

2012

MÁRIO MÁRCIO WILBORN

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES DO LATÃO
DEVIDO A PROBLEMAS DE EMPENAMENTO DURANTE O PROCESSO DE
USINAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica
com ênfase em Gerenciamento Industrial pela
Universidade Feevale.

Professora Orientadora: Dra. Claudia Trindade Oliveira

Novo Hamburgo
2012

MÁRIO MÁRCIO WILBORN

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Mecânica, com título “Influência do tratamento térmico nas propriedades do latão devido a problemas de empenamento durante o processo de usinagem”, submetido ao corpo docente da Universidade Feevale e da PUC/RS, como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica, com ênfase em Gerenciamento Industrial.

Aprovador por:

Professora Dra. Claudia Trindade Oliveira (Orientadora)
Universidade Feevale

Professor Dr. Eduardo Luís Schneider (Banca Examinadora)
Universidade Feevale

Professor Dr. Felipe Dalla Vecchia (Banca Examinadora)
PUC/RS

Professor Me. Halston Mozetic (Banca Examinadora)
Universidade Feevale

Novo Hamburgo, junho de 2012.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo apoio ao longo de todo o curso na busca deste objetivo.

A minha orientadora Dra. Claudia Trindade Oliveira, pela paciência, dedicação e pelos conhecimentos transmitidos ao longo de todo o curso e principalmente na concretização deste trabalho.

Ao professor Dr. Felipe Dalla Vecchia, pela parceria ao longo do curso e o apoio na realização deste trabalho.

A empresa Climaq Industrial Ltda, pela disponibilização de amostras e equipamentos necessários para o acontecimento deste trabalho.

Aos laboratoristas do Laboratório de Estudos Avançados em Materiais e os técnicos da Oficina Tecnológica da Univesidade Feevale.

Aos colegas e professores, que ao longo do curso tornaram-se grandes parceiros, com troca de idéias e conhecimentos.

“O único lugar onde o sucesso vem
antes do trabalho é no dicionário”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Uma empresa da região do Vale do Sinos emprega o latão na fabricação de clichês, os quais são utilizados no processo de *Hot Stamping* em indústrias gráficas e precisam estar perfeitamente retos. No entanto, observa-se que durante o processo de usinagem, as peças de latão contendo chumbo sofrem empenamento, o que inviabiliza o seu uso. Para sanar este problema, a empresa aplica uma carga concentrada na peça empenada por meio de uma prensa. Com isso, este trabalho propõe uma alternativa de tratamento térmico para reduzir o problema de empenamento ocorrido durante a usinagem de latão para obtenção dos clichês. Para tanto, foi feito um estudo comparativo entre ligas de latão com e sem chumbo. Observou-se que o empenamento pode estar relacionado com a composição química da liga, somado ao processo de laminação utilizado na obtenção do material a ser usinado, podendo ser eliminado por meio de tratamento térmico.

Palavras chaves: Latão, usinagem, empenamento, tratamento térmico.

ABSTRACT

A company from Vale do Sinos Region employees brass for making cliches, which are used in the process of Hot Stamping in the printing industry and need to be perfectly straight. However, it is observed that during the machining process, the brass pieces with lead suffer warping, that unfeasible their use. To solve this problem, the company applies a concentrated load with a press on the warping piece. Therefore, this work proposes an alternative of heat treatment to reduce the problem of warping that occurred during machining brass for obtaining the cliches. For this, it was made a comparative study between brass alloys with and without lead. It was observed that the warping can be related with the chemical composition from the alloy, added to the lamination process used to obtain the material to be machined, that can be eliminated by heat treatment.

Keywords: Brass, machining, warping, heat treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Cu-Zn.....	18
Figura 2 – Imagem metalográfica de uma liga de latão com chumbo.....	19
Figura 3 – Forças e tensões presentes na região de corte.....	21
Figura 4 – Desenho esquemático com detalhe da peça e ferramenta. (a) Peça com detalhe. (b) Utilização de ferramenta de ângulo. (c) Material empenado, no qual a ferramenta tira material além do necessário.....	25
Figura 5 – Influência da temperatura do tratamento térmico na resistência e ductilidade de um latão.....	27
Figura 6 – Aumento da resistência à tração e diminuição da ductilidade de chapas de cobre-zinco após encruamento.....	28
Figura 7 – Fissuramento típico devido a tensões internas nas ligas de cobre.....	31
Figura 8 – Dados para tratamento térmico de alívio de tensão.....	31
Figura 9 – Fluxograma das etapas de análise realizado na liga C 360.....	34
Figura 10 – Fluxograma das etapas de análise realizado na liga C 268.....	34
Figura 11 – Pontos de análise nas amostras.....	37
Figura 12 – Medição de empenamento.....	37
Figura 13 – Peças de latão C 360. (a) Como recebido. (b) Com tratamento térmico. (c) Sem tratamento térmico e usinado. (d) Com tratamento térmico e usinado.....	41
Figura 14 – Micrografias ópticas de amostras de latão C 360. (a) e (b) Amostras não usinadas. (c) e (d) Amostras usinadas.....	43
Figura 15 – Micrografias de amostras de latão sem chumbo (liga C 268) e o respectivo EDS.....	44
Figura 16 – Microanálise química por EDS da liga C 360.....	46
Figura 17 – Cavacos obtidos no processo de usinagem da liga C 360.....	47
Figura 18 – Micrografias em vista de topo de amostras da liga C 360 sem tratamento térmico, não usinada e usinada.....	48
Figura 19 – Micrografias em vista de seção transversal de amostras da liga C 360 sem tratamento térmico, não usinada e usinada	50
Figura 20 – Micrografias em vista de topo de amostras da liga C 360 com tratamento térmico, não usinada e usinada.....	51

Figura 21 – Micrografias em vista de seção transversal de amostras da liga C 360 com tratamento térmico, não usinada e usinada	52
Figura 22 – Micrografias de amostras em seção transversal no sentido da laminação, com tratamento térmico e sem usinagem	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de ligas de latão, conforme ASTM.....	17
Tabela 2 – Temperaturas de recozimento para ligas de latão.....	29
Tabela 3 – Composição química e propriedades mecânicas da liga C 268	35
Tabela 4 – Composição química e propriedades mecânicas da liga C 360	35
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem aplicados nas amostras.....	36
Tabela 6 – Parâmetros utilizados para a metalização.....	39
Tabela 7 – Resultados de análise de microdureza em HV.....	42

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 OBJETIVOS	14
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CARACTERÍSTICAS DO LATÃO	15
2.1.1 Latão C 360	16
2.1.2 Latão C 268	16
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS LATÕES	17
2.3 PROCESSO DE USINAGEM	20
2.3.1 Usinagem do latão	22
2.3.2 Influência do chumbo na usinabilidade do latão	24
2.3.3 Problemas durante a usinagem do latão	24
2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE LIGA DE COBRE	25
2.4.1 Reozimento	26
2.4.2 Alívio de tensões	30
2.4.3 Homogeneização	32
2.4.4 Tratamento de solubilização e endurecimento por precipitação	32
2.4.5 Têmpera e revenido	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 PREPARAÇÕES DAS AMOSTRAS	34
3.1.1 Especificações técnicas das ligas C 268 e C 360	34
3.1.2 Tratamento térmico	35
3.1.3 Usinagem	36
3.1.4 Obtenção das amostras	36
3.2 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS	37
3.2.1 Medidas de empenamento e alongamento	37
3.2.2 Análise de microdureza	38
3.2.3 Microscopia óptica	38
3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura	38

3.2.5 Microanálise química por EDS	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 ANÁLISE DE EMPENAMENTO E ALONGAMENTO DAS PEÇAS DE LATÃO COM CHUMBO (C 360) COM E SEM TRATAMENTO TÉRMICO	40
4.2 MEDIDAS DE MICRODUREZA.....	42
4.3 ANÁLISE ÓPTICA	43
4.4 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA LIGA SEM CHUMBO (C 268)	44
4.5 ANÁLISES DA LIGA COM CHUMBO (C 360).....	45
4.5.1 Composição elementar.....	45
4.5.2 Análise de microestrutura sem tratamento térmico.....	48
4.5.3 Análise de microestrutura com tratamento térmico.....	51
5 CONCLUSÕES.....	56
6 ATIVIDADES FUTURAS	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICES.....	61
ANEXOS.....	64

INTRODUÇÃO

O Cobre e suas ligas é o terceiro metal mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas dos aços e do alumínio e suas ligas.

Os latões são ligas basicamente formados 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.

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.

Uma empresa da região do Vale do Sinos, objeto de estudo deste trabalho, utiliza ligas de latão contendo chumbo na obtenção de peças para estampagem conhecidas como clichês para uso em processo de *Hot Stamping* (estampagem a quente). O processo de *Hot Stamping* consiste em aquecer o clichê e pressionar contra uma fita de material sintético com uma fina camada de metal. Com o calor, esta camada de metal derrete e se fixa na superfície a ser estampada, gerando um acabamento metalizado. Esse processo de estampagem necessita de peças com boa resistência ao desgaste, alta condutividade térmica e perfeitamente retas (sem empenamento) sendo necessário paralelismo da extremidade superior com a inferior do material.

No entanto, observou-se que, após o processo de usinagem, as peças de latão contendo chumbo apresentaram empenamento. Este fato é agravado quando o material usinado, que estava fixado através de pinças é retirado dos elementos de fixação da máquina. Por outro lado, as peças usinadas de latão sem chumbo apresentam menor problema de empenamento do que as que contêm chumbo, porém, é de difícil usinabilidade, o que justifica o seu baixo emprego na empresa.

Para resolver este problema de empenamento causado durante o processo de usinagem, a empresa atualmente usa 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.

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 da aplicação de tratamento térmico no comportamento do clichê de latão o qual apresenta empenamento durante o processo de usinagem.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

Identificar as prováveis causas de empenamento ocorrido durante a usinagem de clichês na empresa do Vale do Sinos e propor alternativa para solucionar o problema.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar amostras de latão com e sem adição de chumbo quanto ao empenamento e variação dimensional, dureza, microestrutura e composição elementar.
- Identificar a influência do tratamento térmico no comportamento das ligas de latão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DO LATÃO

As ligas de latão são basicamente constituídas dos elementos cobre e zinco, contendo até 50% de zinco. Algumas ligas de latões possuem outros elementos em sua composição, como: chumbo, estanho, alumínio e níquel. Variações na composição química apresentam influência sobre a resistência mecânica, ductibilidade, usinabilidade, resistência à corrosão e também sobre a coloração do material.

As designações do cobre e das ligas de cobre seguem a numeração americana UNS (Unified Numbering System – ASTM / SAE) (BRESCIANI FILHO, 1997).

Os latões são divididos, quanto a sua composição química, em três grupos:

- Latão binário: é a liga constituída unicamente de cobre e zinco, sendo que outros elementos presentes são considerados impurezas;

-Latão com adição de chumbo: é a liga que contem cobre, zinco e chumbo;

-Latão especial: é a liga de cobre e zinco com outros elementos secundários ou sem chumbo.

Os latões com até 37% de zinco são monofásicos e são denominados genericamente de latões alfa (α), sendo indicados para trabalho a frio onde a conformabilidade plástica é elevada. Os latões com maior percentual de zinco são indicados somente para o trabalho a quente.

Os latões com aproximadamente 37 a 45% de zinco são bifásicos, devido à precipitação de outra fase, constituída também de uma solução sólida de zinco em cobre (como a fase alfa - α), sendo denominados de latões alfa-beta ($\alpha+\beta$). Os latões com 45 a 50% são denominados latões beta (β) (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

O aumento da adição de zinco ao cobre puro ocasiona um efeito inicial de aumento progressivo da resistência à tração, dureza e porcentagem de alongamento do metal, acompanhado de uma mudança gradativa da cor avermelhada do cobre para o amarelo dourado do latão. Com aproximadamente 30% de zinco, observa-se o aumento máximo das propriedades mecânicas do latão. Acima desse valor, a resistência mecânica decresce ligeiramente até aproximadamente 38% de zinco quando há uma mudança íngreme nas características da liga, tornando-se mais dura e menos dúctil a frio (BIRD, 1975).

Os latões amarelos contêm um percentual maior de zinco, normalmente de 20 a 36%. Estes materiais combinam boa resistência com alta ductibilidade e são portanto adequados para operações críticas de trabalho a frio. São também sujeitos a corrosão localizada chamada de dezincificação (perda de zinco em altas temperaturas ou em meio corrosivo) e à trinca por tensão-corrosão (corrosão no contorno do grão em ligas trabalhadas a frio), fragilizando a estrutura e facilitando a distorção do material. Isto leva à dissolução da liga e uma subsequente deposição de cobre poroso não aderente. Neste caso, pequenas quantidades de estanho ou antimônio minimizam a dezincificação em latões amarelos. A melhor resistência à corrosão é obtida em latões com adição de alumínio (76Cu -22Zn- 2Al). Os latões vermelhos por sua vez, apresentam um teor maior de cobre na sua composição, contendo entre 5 a 20% de zinco. Geralmente, apresentam melhor resistência à corrosão do que os latões amarelos e não são suscetíveis à dezincificação.

Os latões mais comuns são representados pelas ligas 90Cu-10Zn, 80Cu-20Zn e 70Cu-30Zn, mas também existe o latão 61Cu-36Zn-3Pb, conhecido como metal Muntz de corte fácil, o qual possui alta usinabilidade (DIAS, 2000).

No caso deste trabalho, foram utilizadas as ligas de latão C 360 e C 268 e por isso será feito um breve comentário sobre estes materiais.

2.1.1 Latão C 360

De acordo com Barbosa [20??] o latão C 360 (61 % de cobre, 36 % de zinco e 3 % de chumbo) apresenta uma coloração amarelada com estrutura bifásica (fases α e β) e com partículas dispersas de chumbo. Esta liga é conhecida como latão de usinagem fácil (*free cutting brass*), sendo muito utilizada na forma de barras extrudadas que são posteriormente usinadas para a fabricação de diversos produtos.

2.1.2 Latão C 268

A liga de latão C 268 apresenta propriedades mecânicas levemente inferiores às do latão C 260, porém seu custo de fabricação é menor, sendo utilizada como alternativa ao uso

daquela liga, em aplicações nas quais os requisitos de propriedades mecânicas não são tão importantes e o custo de fabricação é um fator determinante. A liga C 260 é uma liga monofásica, podendo apresentar problemas de dezincificação, dependendo do ambiente na qual está sendo utilizada. Por outro lado, apresenta a mais favorável combinação de resistência mecânica e ductilidade (elevadas) entre todos os latões, razão pela qual é muito indicada para processos de conformação em geral, particularmente a estampagem e o embutimento profundo (BARBOSA, [20??]).

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS LATÕES

As propriedades mecânicas, resistência à corrosão e de fabricação nas ligas de latão variam de acordo com a composição química, sendo o fator principal o percentual de zinco contido no material (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

Na Tabela 1, são apresentadas algumas propriedades mecânicas de algumas ligas de latão, de acordo com a ASTM.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de ligas de latão, conforme ASTM

Liga (ASTM)	Composição química	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
C210	95Cu 5Zn	270-550	100-380	45-3	65-120	-
C220	90Cu 10 Zn	270-570	90-420	50-4	55-125	70-160
C230	85Cu 15Zn	310-600	100-420	50-4	60-135	105-170
C240	80Cu 20Zn	310-640	120-480	52-3	65-155	100-185
C260	70Cu 30Zn	330-850	120-540	62-3	65-160	75-200
C268	66Cu 34 Zn	340-860	130-550	60-3	65-165	85-155
C 270	65Cu 35Zn					
C272	64Cu 36Zn	340-860	130-550	56-5	65-165	95-210
C280	60Cu 40Zn	380-600	160-450	40-4	85-145	110-130
C340	65Cu34Zn1Pb	330-550	120-460	45-8	65-135	-
C353	62Cu36Zn2Pb	340-700	150-460	45-2	70-125	100-195
C360	61Cu36Zn3Pb	360-520	150-450	40-12	75-135	140
C370	61Cu38Zn1Pb	380-580	180-520	40-8	80-150	-
C442	71Cu28Zn1Sn	340-400	130-180	65-50	65-85	160-185
C464	61Cu38Zn1Sn	395	160-390	40-20	90-145	150-230

Fonte: Barbosa, [20??].

Na Figura 1 é apresentado o diagrama de equilíbrio das ligas de Cu-Zn. Os latões mais empregados industrialmente contém entre 5 a 50% de zinco e podem ter pequenas quantidades de outros elementos (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

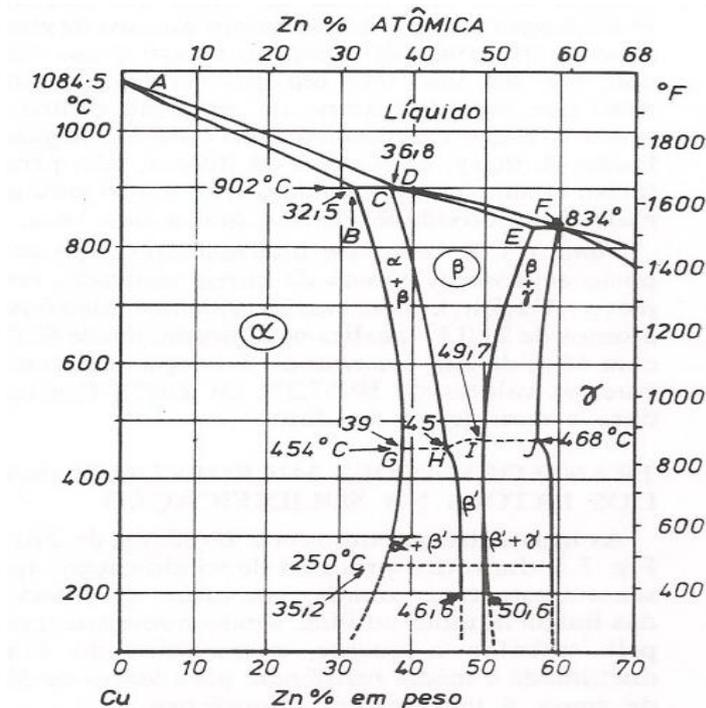


Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Cu-Zn
Fonte: Coutinho, 1980

Na parte esquerda do diagrama de equilíbrio existe uma só fase, uma solução sólida primária chamada alfa (α), com aproximadamente 0 a 39% de zinco, estável até a um máximo de 454 °C, que mantém a estrutura cristalina do cobre cúbica de faces centradas (CFC). Isto significa que os átomos ocupam posições no cristal correspondente aos oito cantos de um cubo imaginário, mais os seis correspondentes ao centro de cada face. No caso dos latões ricos em cobre, os átomos de zinco substituem os de cobre, produzindo uma certa distorção na rede cristalina, resultando em aumento de propriedades mecânicas, como resistência de tensão de escoamento e dureza.

Quando se alcança uma determinada quantidade de zinco, dependendo da temperatura, precipita uma nova fase, chamada beta (β). É uma solução sólida, com estrutura denominada cúbica de corpo centrado (CCC), no qual os átomos de cobre e zinco posicionam-se aleatoriamente e continuam ocupando os vértices de um cubo imaginário, mas não mais os centros de cada face e sim o centro do próprio cubo, no intervalo de 454 a 468 °C, resultando

numa estrutura mais dura e menos dúctil a frio do que a CFC (BIRD, 1975; COUTINHO, 1980).

A fase beta linha (β') é uma fase intermediária, e no caso de Cu-Zn, também apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) porém agora ordenada, com 45 a 49,7% de zinco na faixa de temperatura entre 454 a 468 °C, e com 46,6 a 50,6% de zinco a 200 °C, existindo possibilidade de pequeno aumento à temperatura ambiente. Nessa configuração ordenada, os átomos de cobre ou de zinco posicionam-se nos vértices do cubo, de modo que formam uma sistemática de cubos entrelaçados. Por exemplo, se os vértices apresentam átomos de zinco, haverá um átomo de cobre no centro desse cubo, que por sua vez será um dos vértices de outro cubo que terá um átomo de zinco no centro. Esta fase não permite ser trabalhada a frio e apresenta maior condutividade elétrica do que a fase beta (COUTINHO, 1980).

A Figura 2 mostra uma imagem metalográfica de uma liga de latão com chumbo, feita durante um estudo comparativo dos parâmetros que influenciam a usinabilidade de latão com chumbo realizado na Universidade de Oviedo na Espanha (GARCÍA et al., 2010).

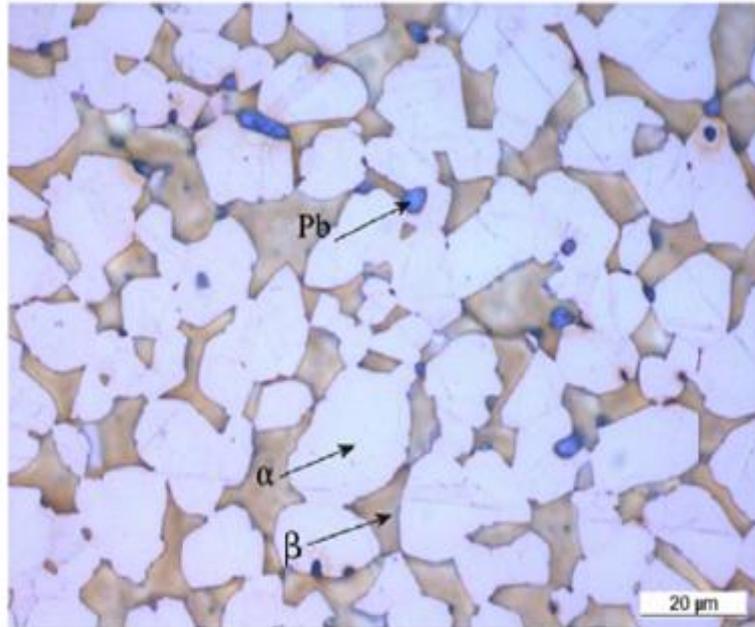


Figura 2 - Imagem metalográfica de uma liga de latão com chumbo
Fonte: García et al., 2010

Observa-se claramente como os elementos se distribuem dentro da liga bem como as fases presentes. Além disso, também é possível determinar o tamanho dos grãos.

As adições de zinco melhoram as propriedades de resistência à tração e alongamento das ligas de Cu-Zn. A resistência à tração aumenta ligeiramente a ductibilidade até o volume de 30% de zinco o que coincide aproximadamente com a fronteira entre as regiões de fase α e fase $\alpha+\beta'$, em que o latão torna-se bifásico. A partir de 37% de zinco, com a presença da fase beta, o material torna-se menos dúctil e mais resistente. Com o aumento do conteúdo de zinco para 45-47%, a resistência à tração aumenta e depois reduz bruscamente. A conformabilidade plástica é elevada para as ligas monofásicas (particularmente com 30% de zinco) no trabalho a frio e para as ligas bifásicas (com 40% de zinco) no trabalho a quente.

Na medida em que aumenta o teor de zinco, a resistência à corrosão é sensivelmente reduzida em ambientes corrosivos, facilitando o surgimento do mecanismo de dezincificação (DIAS, 2000; GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976; BRESCIANI FILHO, 1997).

Como neste trabalho o latão foi utilizado em processo de usinagem para obtenção de clichês, a seguir será mostrado o processo de usinagem do latão, a influência do chumbo e o problema decorrente deste processo.

2.3 PROCESSO DE USINAGEM

A usinagem é um processo de fabricação para obtenção de peças por meio da remoção de material, na forma de cavacos. Este processo pode ser aplicado em peças fundidas, forjadas, ou blocos pré-formados de metais originando peças de formas desejadas, com grande precisão, tamanho e acabamento especificado para cumprir exigências do projeto. Outro ponto importante da usinagem que deve ser verificado são as propriedades mecânicas desejadas, pois durante o processo ocorre uma deformação plástica da peça com a retirada do material e o arrasto da ferramenta de corte. Dessa forma, cada superfície usinada terá uma deformação residual (tensões), variando de acordo com o material usinado (METALS HANDBOOK, v. 16).

Os parâmetros de usinagem são estabelecidos de forma aproximada através de cálculos para cada tipo de material, ferramenta e para cada operação de usinagem, sendo que estes parâmetros muitas vezes são ajustados na prática de forma empírica. O avanço e a velocidade de corte são limitados pelo atrito e pela deformação plástica do cavaco. Quanto melhor for a usinabilidade do material e a resistência ao desgaste do material da ferramenta, maiores podem ser os avanços e as velocidades de corte. A profundidade de corte limita o

avanço e a velocidade de corte. É importante levar em consideração os fluidos de corte (óleo solúvel misturado com água) que exercem ação lubrificante e refrigerante, sendo estes quimicamente especificados para cada tipo de material. Para cortes com pouca profundidade e velocidades não muito elevadas, algumas ligas de latão podem ser usinadas a seco (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976; BIRD, 1975).

A ação rápida do corte e as cargas normais da ferramenta sobre a superfície, as quais geram atrito, aumentam a temperatura do material da ferramenta, o que acelera ainda mais os processos físicos e químicos associados com o desgaste da ferramenta. Para remover o material não desejado, na forma de cavacos, são necessárias essas forças e movimentos de corte. Durante a fase de planejamento do processo, a avaliação deve ser feita de acordo com o material a ser usinado, levando-se em conta a ferramenta correta para a usinagem da superfície selecionada, o material de ferramenta apropriado e o tipo de fluido de corte necessário (METALS HANDBOOK, v. 16).

A Figura 3 mostra um desenho esquemático do processo de corte, incluindo as forças e as tensões presentes em determinados pontos de uma operação de usinagem.

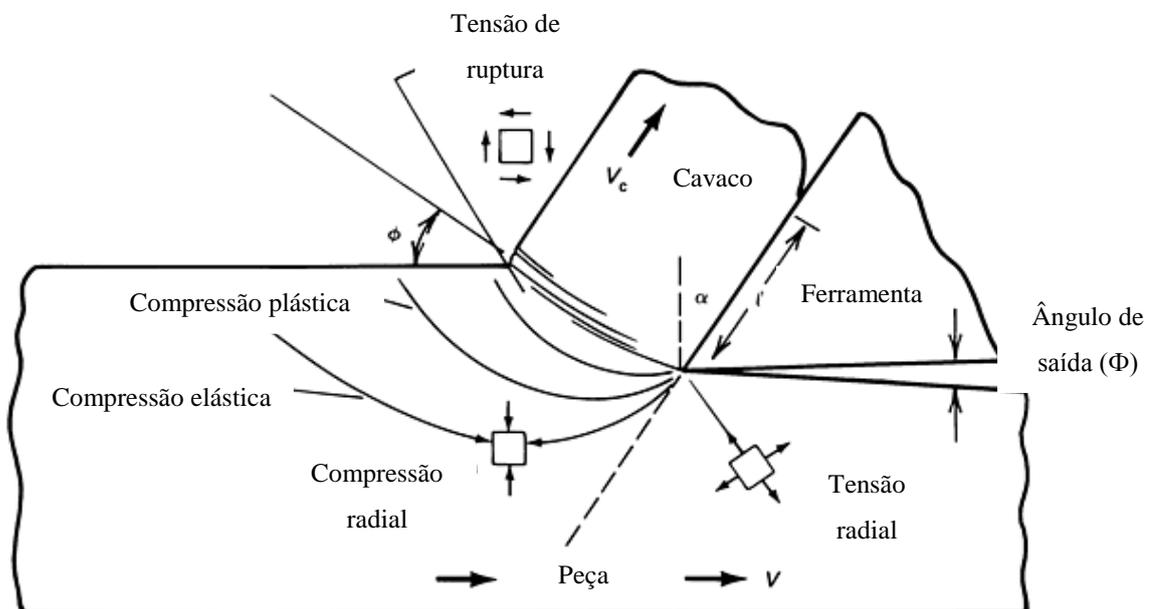


Figura 3 - Forças e tensões presentes na região de corte
Fonte: Metals Handbook, v. 18 (adaptado pelo autor)

As ferramentas de corte são normalmente projetadas para realizar operações específicas, e assim, a geometria da ferramenta (ângulos) é selecionada para realizar funções específicas de usinagem. Quanto maior a precisão necessária do processo, melhor deve ser a

geometria da ponta da ferramenta. Quanto mais rápida a velocidade de corte e quanto maior a temperatura de corte, menor será a vida útil da ferramenta (METALS HANDBOOK, v. 16).

Os materiais das ferramentas utilizados na usinagem tem grande influência na sua durabilidade. Os metais duros apresentam maior resistência ao desgaste e podem operar com velocidades de corte mais elevadas que os aços rápidos (HSS), mas são menos resistentes a impactos devido a sua estrutura molecular (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

Como o estudo apresentado neste trabalho trata da usinagem do latão, a seguir é apresentada uma breve revisão sobre usinagem desta liga.

2.3.1 Usinagem do latão

As ligas de cobre, particularmente o latão, apresentam diferentes características de usinabilidade, de acordo com a sua composição química. Algumas ligas são muito difíceis de serem usinadas, pois o material apresenta uma característica de ser mais “pastoso” durante a usinagem. Mesmo com a aplicação de pequenos avanços de corte, materiais “pastosos” originam um cavaco dúctil e contínuo que tem uma elevada ação abrasiva sobre a ferramenta e com isso, diminuindo a sua vida útil e levando à quebra da mesma. Por outro lado, existem ligas que são fáceis de serem usinadas, em que o material apresenta característica de ser mais quebradiço, sendo que neste caso, a remoção de cavacos ocorre facilmente (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

Estudos comparativos de taxa de produção (peças/hora) mostraram que a liga C360 (latão com 3% chumbo) mostrou o melhor desempenho frente à usinagem em comparação às ligas C 340 (latão com 1% chumbo), AA 2011-T3 (alumínio), C 46400 (Cu, 0,2% Pb, Fe, Sn) e aço carbono (THIELE et al., [20??]).

Para se estabelecer um índice de comparação, quanto à facilidade de usinagem entre os materiais cuprosos (ligas de cobre), é utilizada uma escala de usinabilidade, onde se conferiu o índice de 100 aos latões de usinagem fácil, que possuem chumbo em sua composição química, os quais são mais adequados quando se exige grande usinabilidade. Quanto à usinabilidade, o cobre e suas ligas são divididos em três grupos: (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

- Grupo A - Metais e ligas de baixa usinabilidade (índice 20): neste grupo estão envolvidos diversos tipos de cobre e ligas de cobre dúcteis, como por exemplo, latões com menos de 20% de zinco, cobre-cromo, cobre-níquel, bronzes sem chumbo, entre outros.

As dificuldades de se usinar estas ligas provêm principalmente de suas altas deformações plásticas. O material antes de ser cizalhado se deforma plasticamente sob a pressão da ferramenta, absorvendo energia e gerando calor. Além disso, produz um cavaco contínuo que exerce constantemente um atrito na ferramenta de corte, aumentando seu desgaste e conseqüentemente reduzindo a vida útil da ferramenta. Este cavado produzido pode levar a uma situação ainda mais agravante, pois o mesmo tende a se soldar na extremidade da ferramenta provocando as arestas postiças de corte, que aumentam o atrito e dificultam ainda mais o corte.

- Grupo B - Ligas de razoável usinabilidade (índice de 20 a 70): a este grupo pertencem as ligas dúcteis: latões com mais de 20% de zinco, latões com estanho, ligas de cobre-silício, por exemplo; e as ligas para fundição: entre elas bronze com zinco e sem chumbo e latões especiais.

Essas ligas apresentam uma resistência mecânica mais elevada, o que exige um esforço de corte maior na usinagem. Porém o cavaco formado não é contínuo, pois o material é quebradiço e acaba facilitando a usinagem.

- Grupo C - Ligas de alta usinabilidade (índice de 70 a 100): no grupo C aparecem as melhores ligas para serem usinadas, no caso dos cobs e ligas dúcteis, como os cobs ligados de alta usinabilidade e condutividade elétrica, pode-se citar o cobre-telúrio, ou cobre-chumbo ou cobre-enxofre e ainda os latões com mais de 1% de chumbo, entre outros.

O telúrio e o enxofre para o caso do cobre, e o chumbo para o caso das ligas de latão são adicionados para aumentar a usinabilidade. As ligas de latão tornam-se então uma liga de cobre-zinco-chumbo (Cu-Zn-Pb). (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

A taxa de adição ótima de chumbo é de 1 a 3%, pois acima disso nenhuma melhora significativa é alcançada. Este valor depende da fração volumétrica e das fases presentes na microestrutura (BARBOSA, [20??]).

2.3.2 Influência do chumbo na usinabilidade do latão

A solubilidade do chumbo no latão é elevada no estado líquido, porém quase nula no estado sólido. O chumbo não se combina com o cobre, com o zinco e nem com qualquer outro elemento de liga secundário presente nessas ligas. Ele aparece sob a forma de partículas que se distribuem aleatoriamente no contorno do grão (BARBOSA, [20??]).

As partículas dispersas de chumbo promovem uma fragilização localizada quebrando a continuidade 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. Como consequência disso, ocorre o aumento significativo da usinabilidade em relação ao cobre e as suas principais ligas (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

Estudos realizados na Universidade de Oviedo (Espanha) compararam parâmetros de usinagem que influenciam o desempenho do latão com chumbo. Os benefícios conferidos pela presença de chumbo foram identificados na facilidade da fratura do cavaco, reduzindo as forças de corte, aumentando a taxa de usinagem e a produtividade, reduzindo o desgaste da ferramenta e melhorando o acabamento da superfície. O estudo também mostrou que amostras de uma mesma liga de latão com chumbo podem apresentar diferentes características de usinagem, devido à dispersão aleatória do chumbo no material e a inclusão de diferentes elementos na liga (GARCÍA et al., 2010).

2.3.3 Problemas durante a usinagem do latão

Um fato empírico que se verifica nas ligas de latão, principalmente as que contêm chumbo em sua composição química, é o elevado grau de empenamento após a usinagem da peça. Este pode ser observado até mesmo durante a usinagem quando a fixação da peça na máquina não é eficiente (com poucos elementos de fixação). Neste caso já é possível perceber que está ocorrendo o empenamento. Este fato também está relacionado ao tipo de conformação mecânica na qual o material é submetido para sua fabricação e o grau de empenamento varia de acordo com a composição química da liga (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

De forma empírica verifica-se que o empenamento é um grave problema quando se faz usinagens em peças para estampagem que necessitam de riqueza de detalhes, onde a

“parede” (relevo) final da peça usinada apresenta espessura de aproximadamente 0,1 mm, por exemplo, Figura 4A. Neste caso, para tornar esta “parede” mais resistente à compressão durante a estampagem por meio do uso de uma ferramenta fina e mecanicamente mais resistente na usinagem, usam-se ferramentas de ângulo que proporcionam paredes mais espessas, conforme Figura 4B. No entanto, durante a usinagem de fresamento, a ocorrência de qualquer empenamento, o mínimo que seja, pode danificar a peça, pois tira material além do necessário, Figura 4C.

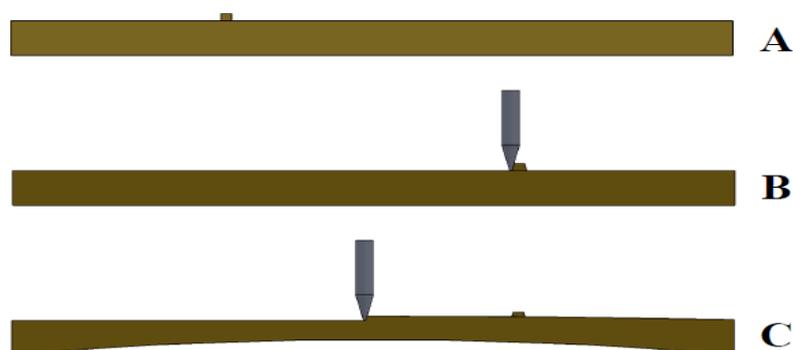


Figura 4 - Desenho esquemático com detalhe da peça e ferramenta. (A) Peça com detalhe. (B) Utilização de ferramenta em ângulo. (C) Material empenado, no qual a ferramenta tira material além do necessário
Fonte: Elaborado pelo autor

Tentando minimizar o problema de empenamento, tema deste trabalho, foi aplicado processo de tratamento térmico de alívio de tensões nas peças antes do processo de usinagem. A seguir é mostrado um breve comentário sobre tratamentos térmicos, incluindo alívio de tensões em peças de latão.

2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE LIGA DE COBRE

Para aumentar o campo de aplicações e melhorar as propriedades das ligas de latão é essencial a aplicação de tratamentos térmicos. Os tratamentos térmicos são ciclos de aquecimento e resfriamento, que alteram a microestrutura dos materiais. Essas mudanças modificam as propriedades e o comportamento dos materiais em sua aplicação.

As propriedades mecânicas e o desempenho em serviço de um metal e em especial das ligas, dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, da forma de processamento e dos tratamentos térmicos realizados.

Os fatores determinantes dos tipos de tratamentos térmicos são: temperatura, taxas de aquecimento e resfriamento e tempo de permanência em uma determinada temperatura. A seleção adequada desses dados está inteiramente relacionada com a microestrutura das ligas (MACHADO, [20??]).

O cobre e suas ligas podem ser submetidos a tratamentos de recozimento, alívio de tensões, homogeneização, endurecimento por precipitação (envelhecimento), têmpera e revenido (CHIAVERINI, 2003; METALS HANDBOOK, v. 4).

2.4.1 Recozimento

A finalidade do recozimento é diminuir a dureza de um material encruado em consequência do trabalho mecânico (onde são alteradas as dimensões e a microestrutura do material) e aumentar a ductibilidade, sendo aplicado em geral ao metal no processo de fabricação após trabalho a frio. A maior parte da energia gasta nos processos de conformação a frio é perdida na forma de calor e apenas 2 a 10% dessa energia é armazenada na forma de defeitos cristalinos, os quais podem causar um aumento importante na dureza do material (MACHADO, [20??]).

É o tratamento térmico mais aplicado ao cobre e as ligas de cobre, principalmente em materiais dúcteis e trabalhados a temperaturas que provocam a recristalização (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

Para tanto, é necessário colocar o material em uma temperatura acima da temperatura de recristalização por períodos de tempo que vão de minutos a poucas horas. O esquema da Figura 5 ilustra o que ocorre durante o tratamento térmico de recozimento (MACHADO, [20??]).

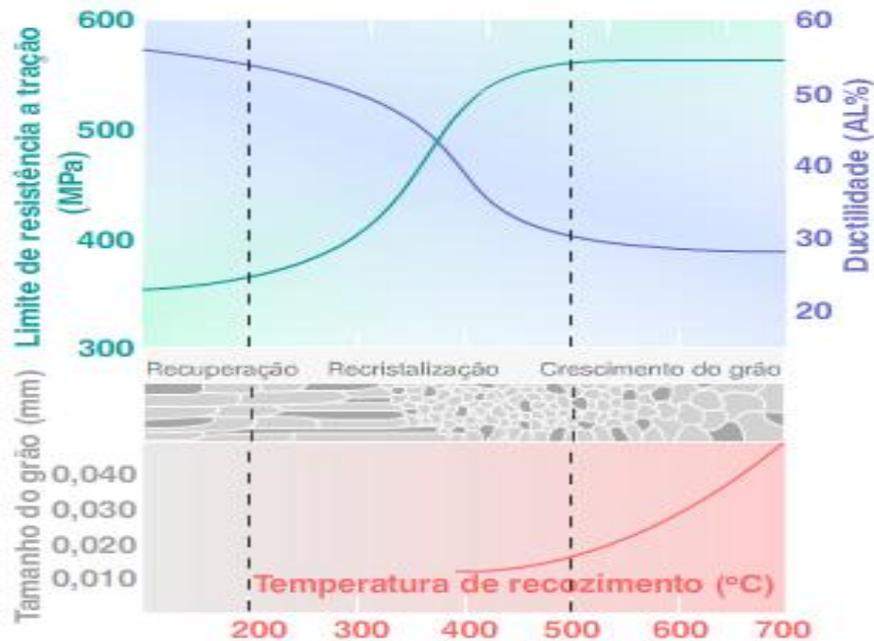


Figura 5 - Influência da temperatura do tratamento térmico na resistência e na ductilidade de um latão
 Fonte: CETEC: Laboratório de Material Didático Multimídia (LMDM), [20??]

Na Figura 5, recuperação está relacionada ao rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura, mas com restauração parcial das propriedades do material. Na recristalização ocorre eliminação de defeitos cristalinos pela migração de contornos de grão e crescimento de grão (MACHADO, [20??]).

O tratamento de recozimento confere a liga uma estrutura de equilíbrio físico-químico para as seguintes condições: após a solidificação na fundição (recozimento de homogeneização); após o tratamento mecânico de encruamento (recozimento de recristalização) e após um determinado tratamento térmico (recozimento de regeneração) (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

Os materiais metálicos também podem ser deformados a quente. Durante o processo de deformação a quente os defeitos são criados e logo após são rearranjados e/ou eliminados. De forma bastante simplificada é possível dizer que se pode obter durante o processo de deformação a quente uma microestrutura semelhante à microestrutura do material que não sofreu deformação plástica. A deformação a quente é caracterizada por ser realizada acima da temperatura de recristalização (MACHADO, [20??]).

Portanto, a temperatura de recristalização separa a deformação a quente da deformação a frio. O recozimento é definido em diferentes graus (têmperas) de acordo com o tamanho de grão nominal definido em micrômetro: 100, 70, 50, 35, 25 e 15. Têmperas de

laminação ou trefilação (trabalho a frio): 1/8 duro, 1/4 duro, 1/2 duro, duro, extra duro, mole e extra mole (BARBOSA, [20??]).

A Figura 6 mostra os efeitos do encruamento (deformação plástica) na resistência mecânica e na ductibilidade de algumas ligas de latão.

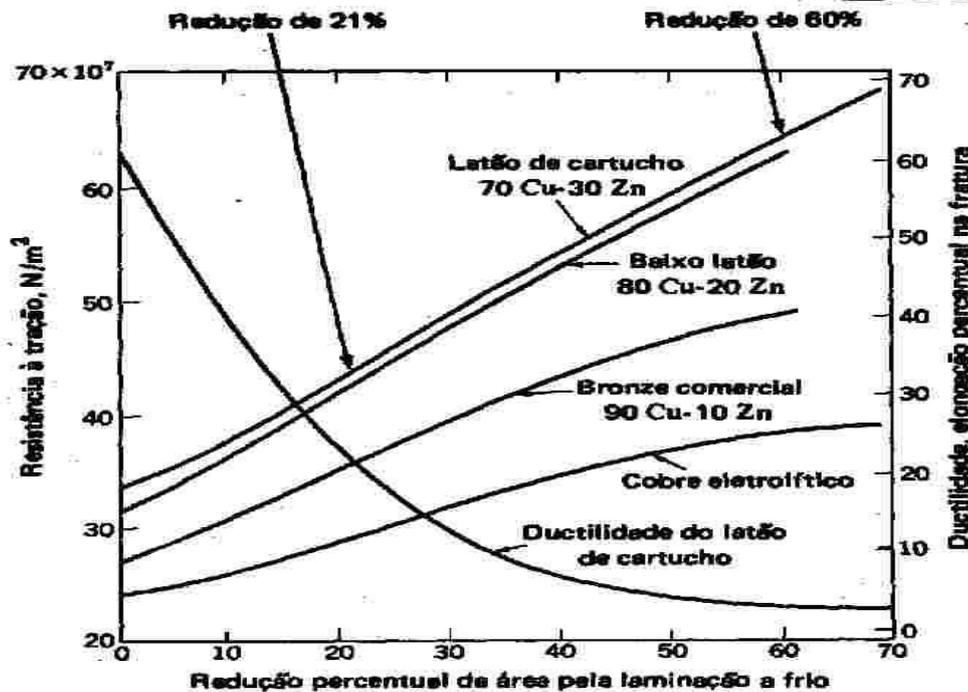


Figura 6 - Aumento da resistência à tração e diminuição da ductibilidade de chapas de cobre-zinco após encruamento

Fonte: Machado, [20??]

Encruamento é o mecanismo de endurecimento encontrado na maioria das ligas de cobre, sendo que o grau de empenamento depende principalmente do % de trabalho a frio, do tipo de material e da quantidade de elementos na liga e se o elemento de liga permanece em solução sólida ou permanece de forma disperso (METALS HANDBOOK, DESK EDITION).

O encruamento diferencia-se de duas formas durante o processo: conformação sem ou com pouco encruamento, normalmente abaixo da temperatura de recristalização e conformação com alteração permanente do estado de encruamento acima da temperatura de recristalização (SCHAEFFER, 1983).

No recozimento, além da recuperação inicial resultar em recristalização e produzir diferentes graus de amolecimento, dependendo do tempo e da temperatura nos quais este material é tratado, quanto maior a temperatura e mais longo o tempo, maior o amolecimento

obtido. Os tempos de tratamento dependem do estado de encruamento inicial, das dimensões da peça e do tamanho do grão final desejado (BARBOSA, [20??]).

O parâmetro mais utilizado para avaliar o grau de amolecimento obtido pelo recozimento é a mensuração do tamanho de grão. A Tabela 2 apresenta valores de temperaturas de recozimento para as ligas de latão mais utilizadas na prática industrial.

Tabela 2 - Temperaturas de recozimento para ligas de latão

Nome da liga	Composição química nominal (%)	Temperatura de recozimento (°C)
Tomback 95-5	95 Cu – 5 Zn	425 – 790
Tomback 90-10	90 Cu – 10 Zn	425 – 790
Latão vermelho 85-15	85 Cu – 15 Zn	425 – 730
Latão vermelho 80-20	80 Cu – 20 Zn	425 – 705
Latão para cartuchos	70 Cu – 30 Zn	425 – 760
Latão amarelo	65 Cu – 35 Zn	425 – 705
Metal Muntz	60 Cu – 40 Zn	425 – 595
Latão comercial com chumbo	89 Cu – 1,75 Pb – 9,25 Zn	425 – 650
Latão com baixo chumbo (tubo)	67 Cu – 0,5 Pb – 32,5 Zn	425 – 650
Latão com baixo chumbo	64,5 Cu – 0,5 Pb – 35 Zn	425 – 595
Latão com médio chumbo	64,5 Cu – 1Pb – 34,5 Zn	425 – 595
Latão com alto chumbo (tubo)	67 Cu – 1,6 Pb – 31,4 Zn	425 – 595
Latão com alto chumbo	62,5 Cu – 1,75 Pb – 35,75 Zn	425 – 595
Latão com chumbo extra alto	62,5 Cu – 2,5 Pb – 35 Zn	425 – 595
Latão de corte fácil	61,5 Cu – 3Pb – 35,5 Zn	425 – 595
Metal Muntz com chumbo	60 Cu – 0,5 Pb – 39,5 Zn	425 – 595
Metal Muntz de corte fácil	60,5 Cu – 1,1 Pb – 38,4 Zn	425 – 595
Latão para forjamento	60 Cu – 2Pb – 38 Zn	425 – 595
Latão arquitetônico	57 Cu – 3Pb – 40 Zn	425 – 595
Latão almirantado	71 Cu – 1 Sn – 28 Zn	425 – 595
Latão naval	60 Cu – 0,75 Sn – 39,25 Zn	425 – 595
Latão naval com chumbo	60 Cu – 1,75 Pb – 0,75 Sn – 37,5 Zn	425 – 595
Latão com manganês	58,5 Cu – 1 Fe – 1 Sn – 0,3 Mn – 39,2 Zn	425 – 595
Latão com alumínio	76 Cu – 2 Al – 22 Zn	425 – 595

Fonte: Barbosa, [20??].

Nos latões, o chumbo pouco afeta o amolecimento inicial, porém retarda consideravelmente o crescimento de grão destas ligas, mesmo para teores baixos como 0,06 %. Como o limite de solubilidade do chumbo no latão é muito baixo em diferentes temperaturas, inferior a 0,02 %, a restrição ao crescimento de grão se deve às partículas de chumbo que atuam como obstáculos ao movimento dos contornos de grãos (BARBOSA, [20??]).

2.4.2 Alívio de tensões

A combinação das forças de tração e compressão exercidas sobre o metal durante o processo de fabricação produz forças internas no material. Com isso, a premissa básica de um método de alívio de tensão é a produção de rearranjo de átomos ou moléculas de sua momentânea posição de equilíbrio (maior estado de tensão residual) para posições mais estáveis, associada com menor energia potencial. (METALS HANDBOOK, v. 20).

As tensões internas nos materiais apresentam dois fatores inconvenientes. No primeiro momento, podem provocar o fissuramento espontâneo da peça após um determinado tempo (*season cracking*). O outro fator é a distorção do material durante a usinagem (BIRD, 1975). No caso empírico observado neste trabalho, observou-se o empenamento da liga durante o processo de usinagem.

Para verificar se a peça sofrerá ou não o fissuramento, é realizado um ensaio químico para verificar as tensões internas no latão. Neste ensaio, as peças de latões trabalhadas e limpas são imersas por 30 segundos em uma solução de 40% de ácido nítrico à temperatura ambiente, sendo em seguida, lavadas em água corrente. Ainda úmidas, devem ser colocadas em uma solução com 1 g de cristais de nitrato mercurioso com 1 cm³ de ácido nítrico e 100 cm³ de água destilada, deixando estas amostras nessa solução por 5 minutos. Após este período, as amostras devem ser removidas, lavadas em água e acetona e colocadas para secar. Após 24 horas os latões com tensões apresentam trincas, e caso não apresentem, são considerados livres de tensões internas. (COUTINHO, 1980).

O método de ensaio é indicado na Recomendação ISO R 196 (BIRD, 1975).

A Figura 7 mostra o fissuramento típico das ligas de cobre. Os latões com baixo teor de cobre são os mais suscetíveis a essas trincas. Nos latões alfa a ruptura é sempre intercrystalina e nos latões beta é transcrystalina, sendo que a fratura em geral ocorre de forma não uniforme, em zig-zag (SANTIAGO; PEREIRA, 1978).

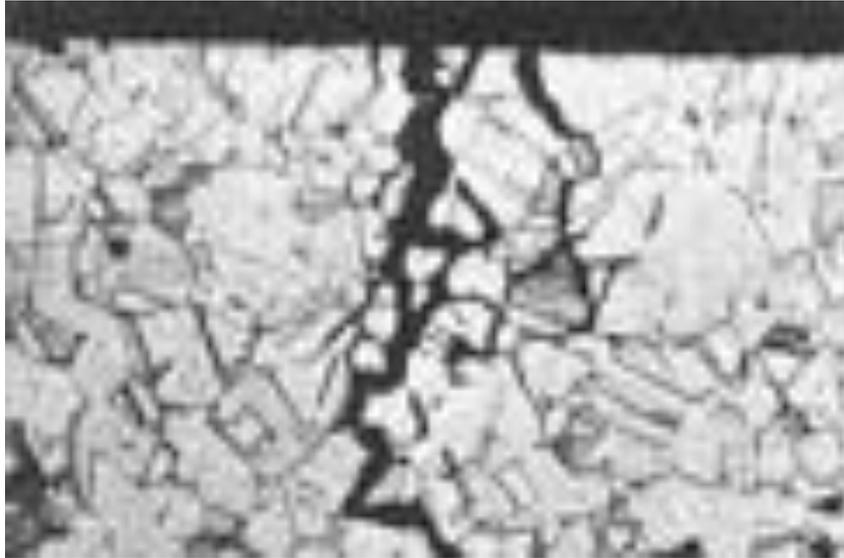


Figura 7 - Fissuramento típico devido a tensões internas nas ligas de cobre
Fonte: Metals Handbook, Desk Edition

Essas tensões podem ser eliminadas por um tratamento térmico a baixas temperaturas, inferiores à temperatura de recristalização. Este tratamento é feito de preferência em uma atmosfera inerte a fim de proteger o aspecto brilhante da superfície (BIRD, 1975).

O tempo e a temperatura variam conforme o tipo do latão. Na Figura 8 estão expostos as temperaturas e os tempos mais indicados para tratar um latão com aproximadamente 60% de cobre.

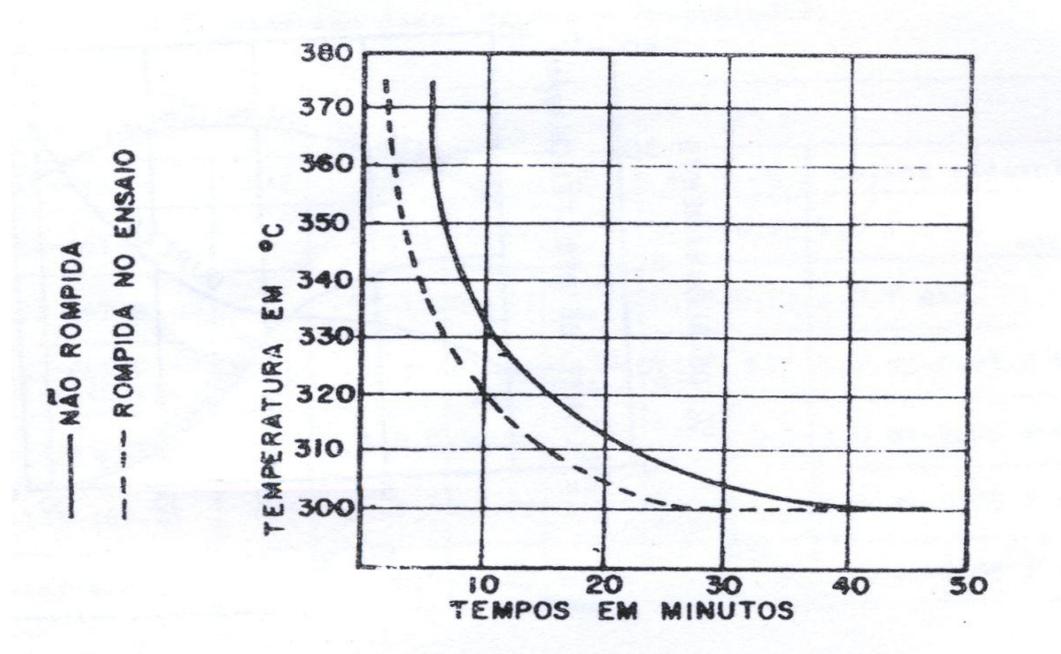


Figura 8 - Dados para tratamento térmico de alívio de tensão
Fonte: Santiago; Pereira, 1978

Normalmente uma combinação de aquecimento e de ação mecânica é o método mais efetivo para aliviar tensões. O aquecimento para alívio de tensões é feito de maneira lenta e uniforme e em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização da liga. A flexão mecânica é feita ao se submeter o material encruado ao endireitamento ou achatamento em máquinas que realizam esses tipos de operação em vergalhões, tubos, placas e chapas (BARBOSA, [20??]).

2.4.3 Homogeneização

Neste processo o material é aquecido a temperaturas elevadas por longo tempo (horas), a fim de reduzir as segregações químicas ou metalúrgicas através da difusão de átomos.

O tempo e a temperatura variam de acordo com o tipo de liga, o seu tamanho de grão e o grau desejável de homogeneização. O tempo varia de 3 a 10 horas e a temperatura é geralmente superior à faixa de recozimento de até 50 °C da temperatura do sólido. A homogeneização muda as propriedades mecânicas de resistência à tração, dureza e resistência ao escoamento, sendo que o alongamento e a estrição aumentam (CHIAVERINI, 2003).

Os latões comuns acima de 70 % de cobre não apresentam segregação significativa, porém os latões entre 58 e 70 % de cobre apresentam razoável quantidade de fases secundárias segregadas nos produtos fundidos. Sendo que neste caso, é necessário um rigoroso tratamento de homogeneização destas ligas por várias horas a 760 °C antes de submeter estes materiais fundidos ao trabalho a frio, de modo que seja evitado o surgimento de trincas. Durante o trabalho a frio de latões comuns são necessários repetidos recozimentos até se chegar ao produto acabado. Estes recozimentos repetidos removem qualquer traço de segregação no produto final (BARBOSA, [20??]).

2.4.4 Tratamento de solubilização e endurecimento por precipitação

Aplicam-se a um determinado grupo de ligas de cobre, as ligas cobre-berílio (Cu-Be). Estas ligas contêm até 2 % de berílio e podem apresentar também pequenos teores de

níquel, cobalto ou cromo. Este processo também é muito comum em diversos tipos de ligas de alumínio (GOMES; BRESCIANI FILHO, 1976).

2.4.5 Têmpera e revenido

Em razão das transformações microestruturais que apresentam, alguns latões alfa-beta podem ser temperados em água a uma temperatura de 850 °C, sendo posteriormente normalmente revenidos a 300 °C para melhorar a dureza e a uniformidade da microestrutura (COUTINHO, 1980).

As designações de têmperas seguem uma indicação que está associada ao grau de encruamento obtido nos processos de conformação (principalmente trefilação e laminação) e ao grau de endurecimento por tratamento térmico (normalmente de solubilização e precipitação).

Devido à elevada variedade de composições e aos diversos tratamentos aplicáveis aos materiais cuprosos, foi desenvolvida uma norma, ASTM B601, “Prática padrão das denominações de têmpera de cobre e ligas de cobre forjado e fundido” (METALS HANDBOOK, DESK EDITION).

Esta norma estabeleceu um código alfa numérico que pode ser atribuído a cada uma das designações padrão de têmpera, obedecendo ao seguinte sistema: (BRESCIANI FILHO, 1997).

- ✓ H00 e H86 indicam o grau de encruamento obtido por trabalho a frio;
- ✓ HR01 a HR50 para encruamento seguido de tratamento térmico de alívio de tensões;
- ✓ M01 a M45 para condição de como foi fabricado (fundido ou forjado);
- ✓ O10 a O82, para tratamento térmico de recozimento destinado a produzir uma determinada propriedade mecânica;
- ✓ OS005 a OS200, para tratamento térmico de recozimento destinado a provocar um determinado tamanho de grão;
- ✓ TB00, TD00 a TD 04, TF00, TH01 a TH04 e TL00 a TL10 para as diversas combinações de tratamentos mecânicos, encruamentos e tratamentos térmicos de solubilização e precipitação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 9 e na Figura 10 estão apresentados os fluxogramas das etapas e das análises realizadas nas ligas de latão C 360 e C 268. Este Trabalho de Conclusão de Curso está descrito com as normas estabelecidas por Prodanov e Freitas (2009).



Figura 9 - Fluxograma das etapas de análise realizadas na liga C 360
 Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 10 - Fluxograma das etapas de análise realizadas na liga C 268
 Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.1 Especificações técnicas das ligas C 268 e C 360

As ligas de latões C 268 e C 360 utilizadas na realização deste trabalho apresentam especificações técnicas, de acordo com fornecedor (Irmãos Galeazi Ltda), conforme Tabela 3 e Tabela 4. Tanto a liga C 268 quanto a liga C 360 possuem têmpera $\frac{1}{2}$ duro, sendo que a liga C 268 é comercializadas em chapas e a liga C 360 em barras.

Tabela 3 - Composição química e propriedades mecânicas da liga C 268

Composição Química			Propriedades Mecânicas			
	Cu	Zn	Limites de Resistência (Kgf/mm ²)	Limites de Escoamento (Kgf/mm ²)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
Mínimo	65,50	31,50	43	33	8	120
Máximo	68,50	34,50	53	48	30	145

Fonte: Irmãos Galeazi Ltda.

Tabela 4 - Composição química e propriedades mecânicas da liga C 360

Composição Química				Propriedades Mecânicas			
	Cu	Zn	Pb	Limites de Resistência (Kgf/mm ²)	Limites de Escoamento (Kgf/mm ²)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
Mínimo	60,00	33,30	2,50	44	30	12	115
Máximo	63,00	37,50	3,70	52	45	25	135

Fonte: Irmãos Galeazi Ltda.

3.1.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico efetuado neste trabalho foi o de alívio de tensões, com o intuito de eliminar as tensões internas da liga de latão decorrentes da conformação mecânica e eliminar, ou ao menos reduzir drasticamente, o empenamento do latão durante o processo de usinagem.

Para a realização deste experimento foi utilizada uma prensa com duas chapas planas e com resistências em seu interior que possibilitam o seu aquecimento. Um pedaço de latão foi colocado entre as duas chapas e foi aplicada uma carga de uma tonelada. Após, foram ligadas as resistências até que se atingiu uniformemente a temperatura de 250 °C. A chapa permaneceu nesta temperatura por 90 minutos e em seguida foram desligadas as resistências. A amostra foi retirada das chapas após atingir a temperatura ambiente.

3.1.3 Usinagem

As ligas C 268 e C 360 foram usinadas em um centro de usinagem CNC de marca Hass, Modelo DT1. Para tanto, foram utilizadas fresas de topo de 3 e 10 mm, da marca Dormer, no processo com seus respectivos parâmetros de usinagem, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem aplicados nas amostras

Ferramenta (\varnothing 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

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Obtenção das amostras

As chapas de latão utilizadas neste trabalho contém espessura de $\frac{1}{4}$ polegada (6,35 mm). Destas, foram cortadas amostras na serra fita de dimensões 2 x 3 cm. Estas amostras foram lixadas manualmente sobre uma superfície plana com lixas de SiC (carbeto de silício) até granulometria 1200, com água corrente. Foram secas com jato de ar e foram polidas com algodão e com massa Maxi Rubber de granulometria n° 2.

As amostras com chumbo (C 360) foram analisadas quanto à microestrutura em vista de topo e seção transversal de acordo com a Figura 11, enquanto que as amostras sem chumbo (C 268) foram analisadas apenas em vista de topo. As análises foram feitas em mais de uma parte da seção transversal das amostras, de acordo com a distância da superfície usinada, sendo identificados como parte de cima, meio e baixo. Para tanto, as amostras foram submetidas a ataque metalográfico em solução de ácido nítrico concentrado: 65% de ácido nítrico (HNO_3) e 35% de água (H_2O). As partes analisadas das amostras foram imersas por poucos segundos, sendo em seguida lavadas com álcool e posteriormente secadas sob jato de ar.

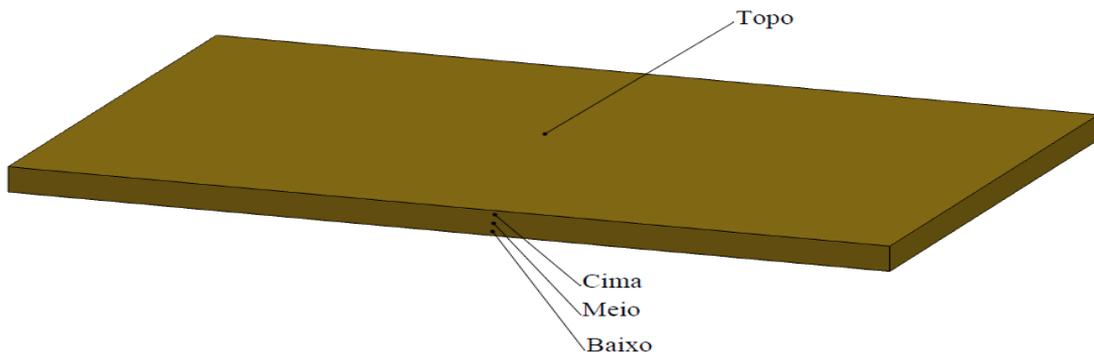


Figura 11 - Pontos de análise nas amostras
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.2.1 Medidas de empenamento e alongamento

O empenamento foi medido na amostra (liga C 360) que apresentava visível empenamento com o processo de usinagem, o qual não possuía tratamento térmico. Para medir este empenamento foi utilizado 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 amostra foi fixada com uma fita dupla face em uma superfície plana (mesa de granito) e na parte a ser medida foi colocada uma fita para que fosse possível ter uma linha reta (um guia) ao longo da peça para efetuar as medições, Figura 12.



Figura 12 - Medição de empenamento
Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar alguma alteração no comprimento do material (alongamento) durante o tratamento térmico, foi usinado o topo dos dois lados do material para que fosse possível verificar as dimensões deste material. A medição foi realizada com um paquímetro digital centesimal de 200 mm da Marca Starett, Modelo 727.

3.2.2 Análise de microdureza

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

3.2.3 Microscopia óptica

Para a análise de microscopia óptica foi utilizado um microscópio óptico binocular com câmera de Marca Union, Modelo MCB-1, com aplicação de diferentes escalas de aumentos nas amostras. A captura das imagens foi obtida através do software de Marca Metalab, Modelo Digimet Plus 4.0.

3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

A análise microestrutural realizada por meio das técnicas da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada num equipamento da Marca Jeol, Modelo MEV: JSM-6510LV, com utilização do programa JSM-6510LV – Scanning Electron Microscope. Foram cortadas na serra fita amostras de aproximadamente 1 cm², das amostras que originalmente foram analisadas no microscópio óptico.

A amostra foi montada (colada) com fita condutora de carbono em um suporte metálico e metalizada para ser observada no microscópio eletrônico de varredura. A metalização consiste num processo de recobrimento metálico visando tornar as amostras condutoras de modo a gerar imagens com boa resolução no MEV, porém, é preciso um

controle da espessura depositada a fim de evitar artefatos na imagem que podem mascarar a superfície real da amostra. O recobrimento utilizado foi por deposição de íons metálicos de ouro (Au), com uso da máquina metalizadora de Marca Desk V (Jeol) e Modelo Denton Vacuum, com utilização dos parâmetros da Tabela 6.

Foram realizadas imagens com aumento de 1000X e com aplicação de tensão de aceleração 20 kV.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a metalização

Tensão (%)	Corrente (mAmp)	Espessura do filme (Å)	Taxa de deposição (Å/seg.)	Tempo (min.)
78	28	2040	1,70	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.5 Microanálise química por EDS

Para as microanálises foi utilizado o modo de funcionamento do Espectrômetro de raios-X por Dispersão de Energia ou EDS (*Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy*). A análise por EDS é uma ferramenta muito importante do MEV para a caracterização de materiais metálicos e semicondutores, pois permite identificar a composição química de uma amostra, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem (DEDAVID, 2007). Este procedimento possibilita a identificação de precipitados e mesmo de variações de composição química dentro de um grão (MALISKA, [20??]).

A microanálise eletrônica consiste na medida de raios-X característicos emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X característicos são específicas do número atômico da amostra e, o seu comprimento de onda ou sua energia podem ser utilizados para identificar o elemento que está emitindo a radiação. Com exceção do hidrogênio, espectros de raios-X podem ser obtidos para todos os elementos da tabela periódica.

Os raios-X característicos em microscopia eletrônica podem ser utilizados também para a formação de imagens, que apresentam uma aplicação do mapeamento por elementos. (DEDAVID, 2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estão apresentados neste capítulo os resultados e discussão de empenamento e alongamento, dureza, microestrutura e composição química, verificadas em amostras de latão com e sem tratamento térmico, usinadas e não usinadas.

4.1 ANÁLISE DE EMPENAMENTO E ALONGAMENTO 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 significativo.

As peças da Figura 13 são de uma mesma barra de latão C 360, cortadas no mesmo tamanho (310x100 mm) e usinadas com os mesmos parâmetros de usinagem, descritos em materiais e métodos, Tabela 5. A Figura 13 (a) ilustra a peça sem nenhum tipo de tratamento térmico, conforme o material recebido. Na Figura 13 (b) é apresentada a peça que passou pelo processo de alívio de tensões. Comparando estas duas peças, observa-se que não há empenamento nas mesmas. Porém, verifica-se uma mudança de coloração, que pode ser devido à oxidação que ocorreu na peça submetida ao tratamento térmico. Neste caso, devido às condições em que o trabalho foi desenvolvido não foi possível fazer o tratamento térmico em uma atmosfera inerte a fim de proteger o aspecto brilhante da superfície (BIRD, 1975).

Na Figura 13 (c), é apresentada a peça usinada sem ter sido submetida ao tratamento térmico, é possível visualizar o empenamento ocorrido com o processo de usinagem. No entanto, a peça tratada termicamente não sofreu empenamento após a usinagem, Figura 13 (d).

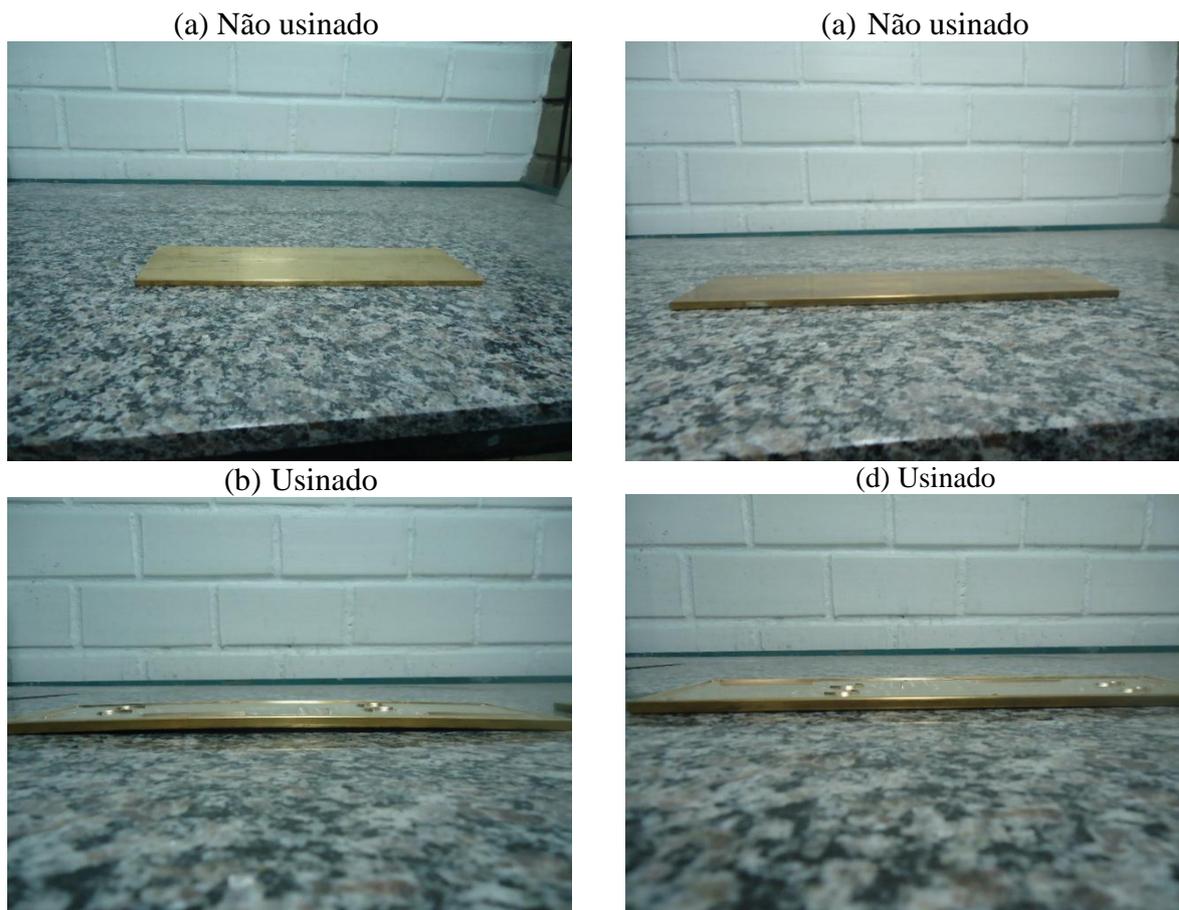


Figura 13 - Peças de latão C 360. (a) Como recebida. (b) Com tratamento térmico. (c) Sem tratamento térmico e usinada. (d) Com tratamento térmico e usinada

Fonte: Elaborado pelo autor

O empenamento medido através do braço de medição na peça usinada sem tratamento térmico foi de 1,127 mm, conforme dados disponíveis no Apêndice A. De acordo com uma análise realizada em uma peça de latão com comprimento de 157 mm, observou-se que o material teve variação na dimensão após ser usinado, apresentando um aumento de 3 décimos na parte superior da peça (próximo a 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 a quantidade de material removido, maior será o grau de empenamento obtido na peça.

Também foi realizada uma análise de possível variação na dimensão do material com tratamento térmico. Esta análise não apresentou nenhuma mudança na dimensão, tanto na parte superior quanto na parte inferior da peça.

Isto indica que o tratamento térmico teve influência na redução do empenamento da peça. Como a peça recebida está laminada e provavelmente com tensões oriundas deste

processo, a usinagem talvez tenha provocado maior tensionamento nas peças. No entanto, o tratamento térmico pode ter minimizado as tensões causadas na 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) (METALS HANDBOOK, v. 16).

4.2 MEDIDAS 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 encontrado uma diferença significativa entre as amostras usinadas e não usinadas sem tratamento térmico, Tabela 7. 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 7 - 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

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Vilarinho et al. (2005) 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 (2010), que quando são necessárias 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.

4.3 ANÁLISE ÓPTICA

A Figura 14 apresenta imagens feitas em amostras da liga C 360. As amostras foram analisadas por microscopia óptica no material não usinado e usinado sem tratamento térmico.

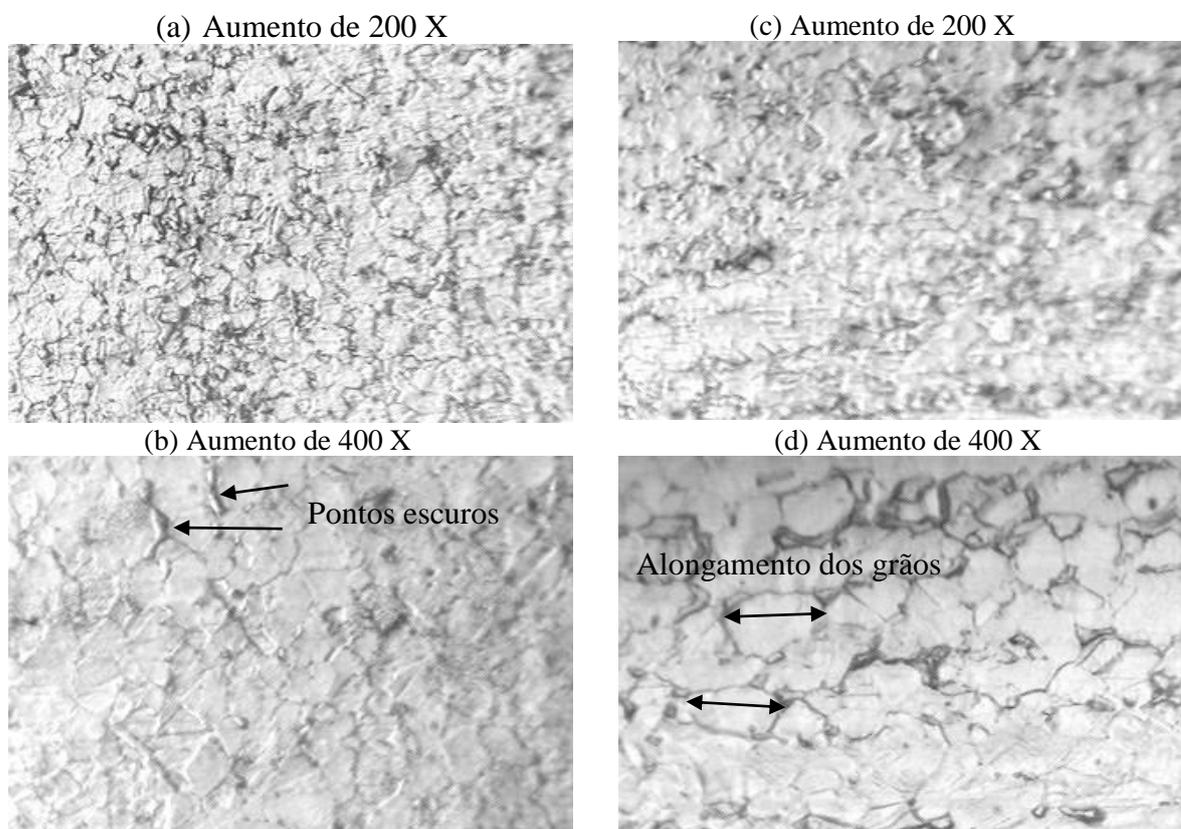


Figura 14 -Micrografias ópticas de amostras de latão C 360. (a) e (b) Amostras não usinadas. (c) e (d) Amostras usinadas

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando as imagens da Figura 14 observa-se um alongamento dos grãos nas amostras que foram submetidas ao processo de usinagem (d). Também é possível identificar alguns pontos mais escuros nos contornos dos grãos distribuídos aleatoriamente ao longo do material, o que de acordo com García et al. (2010) podem ser da fase β , ou também podem ser devido à intensidade do ataque químico para revelação dos grãos.

Devido a pouca definição dos resultados de microscopia óptica e diante da necessidade de dados mais completos e precisos, a amostra da liga C 268 não foi analisada por microscopia óptica. Com isso, foram feitas análises ao Microscópio Eletrônico de Varredura. As análises de microestrutura foram feitas em amostras com e sem chumbo, usinadas e não usinadas, a fim de identificar a influência do chumbo no comportamento da liga.

4.4 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA LIGA SEM CHUMBO (C 268)

A Figura 15 apresenta micrografias de topo de uma liga de latão sem chumbo (C 268), não usinada (a) e usinada (b) sem tratamento térmico, obtidas ao MEV. Esta liga tem a presença apenas de cobre (Cu) e zinco (Zn), de acordo com o EDS, Figura 15 (c), também já identificado pelo fornecedor, Tabela 3.

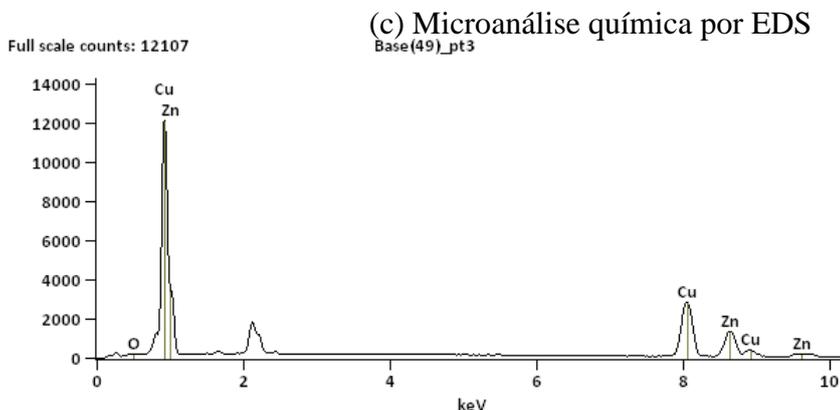
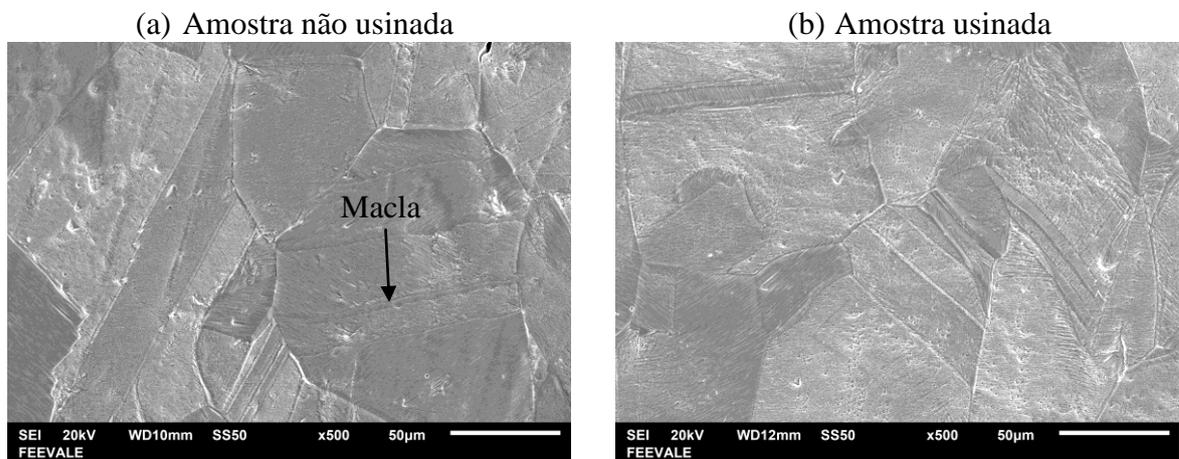


Figura 15 - Micrografias da amostra de latão sem chumbo (liga C 268) e o respectivo EDS
Fonte: Elaborado pelo autor

As análises de EDS foram feitas em várias partes da micrografia e os resultados foram semelhantes, por isso é apresentado somente o EDS de um ponto.

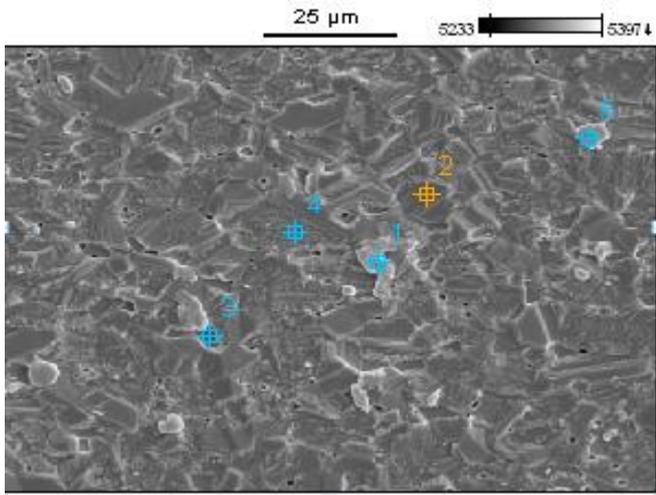
De acordo com as micrografias é possível observar que a amostra usinada e não usinada apresentam microestrutura semelhante, com grãos equiaxiais de tamanho da ordem de microns e distribuídos aleatoriamente. Também foi possível identificar a presença de maclas, as quais podem ser produzidas por uma força de cisalhamento, causando deslocamentos atômicos de tal modo que em um dos lados de um plano (contorno de macla) os átomos estejam localizados em posições de imagem em espelho dos átomos do outro lado (CALLISTER, 2002).

Como o processo de usinagem provoca deformações plásticas no material e conseqüente encruamento, de acordo com Metals Handbook (v. 16), esperava-se que houvesse uma diferença de morfologia nos grãos significativa entre as amostras não usinadas e usinadas, o que não foi observado. Neste caso, sugere-se que as tensões introduzidas durante o processo de usinagem não tenham tido tanta influência nesta liga a ponto de modificar a microestrutura, porém influenciam na microdureza, e por conseqüência influenciando no encruamento da peça.

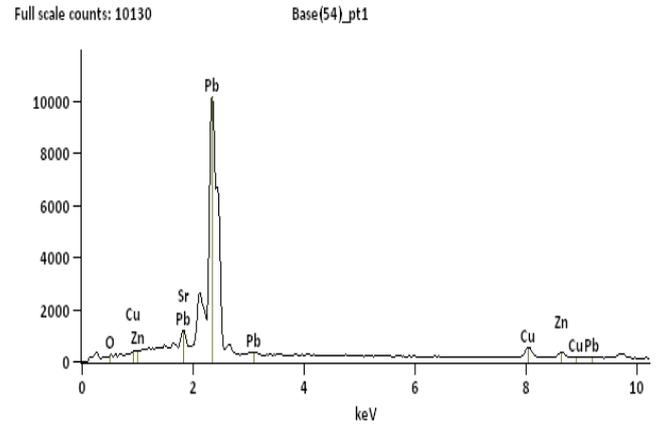
4.5 ANÁLISES DA LIGA COM CHUMBO (C 360)

4.5.1 Composição elementar

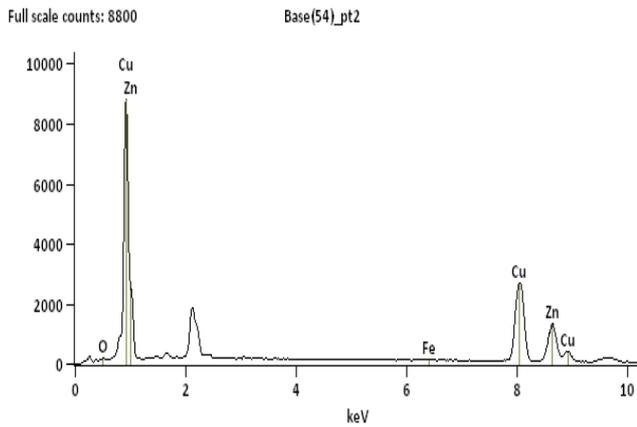
A seguir estão apresentados os resultados obtidos em análises de amostras de latão com chumbo (C 360). As análises de EDS (Figura 16) mostram que esta liga apresenta em sua composição cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb), formando uma liga ternária. Os elementos Sr e Al não são significativos nas análises de EDS.



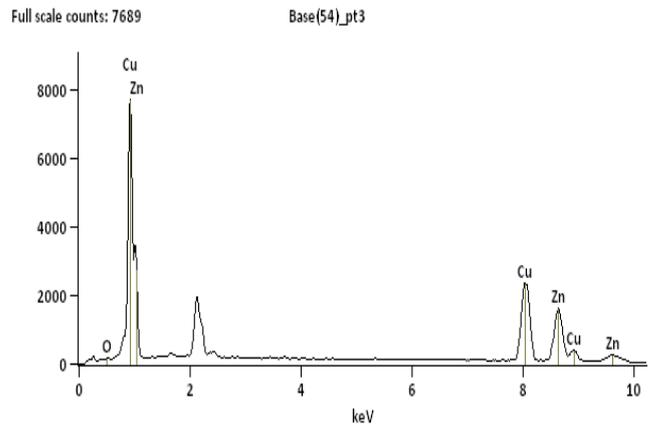
Ponto 1



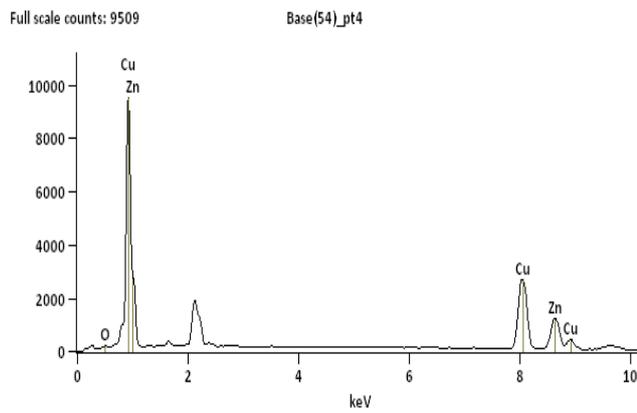
Ponto 2



Ponto 3



Ponto 4



Ponto 5

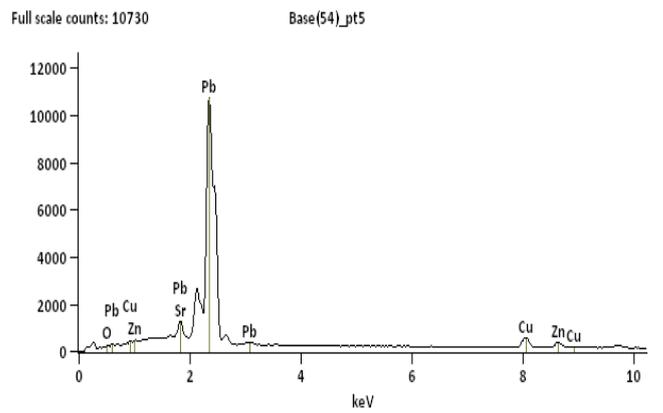


Figura 16 - Microanálise química por EDS da liga C 360
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com García et al. (2010), latões com mais de 36% de Zn, possuem duas fases de liga: fases α e β' , sendo caracterizados como tendo boa trabalhabilidade a quente acima de 450 °C, quando β' se transforma em β .

O EDS foi realizado em diferentes pontos da liga, 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 (GARCÍA et al., 2010). Conforme Vilarinho et al.(2005) 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.

A Figura 17 apresenta o formato do cavaco obtido no processo de usinagem da liga C 360. Estes cavacos estão de acordo com a literatura (GARCÍA et al., 2010), que diz que esta liga apresenta descontinuidade e fragmentação do cavaco devido a presença do chumbo.



Figura 17 - Cavacos obtidos no processo de usinagem da liga C 360
Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2 Análise de microestrutura sem tratamento térmico

As amostras da liga C 360 foram analisadas em vista de topo e em seção transversal. A Figura 18 mostra micrografias em vista de topo de amostras de latão C 360 sem tratamento térmico. A amostra (a) não é usinada e (b) usinada.

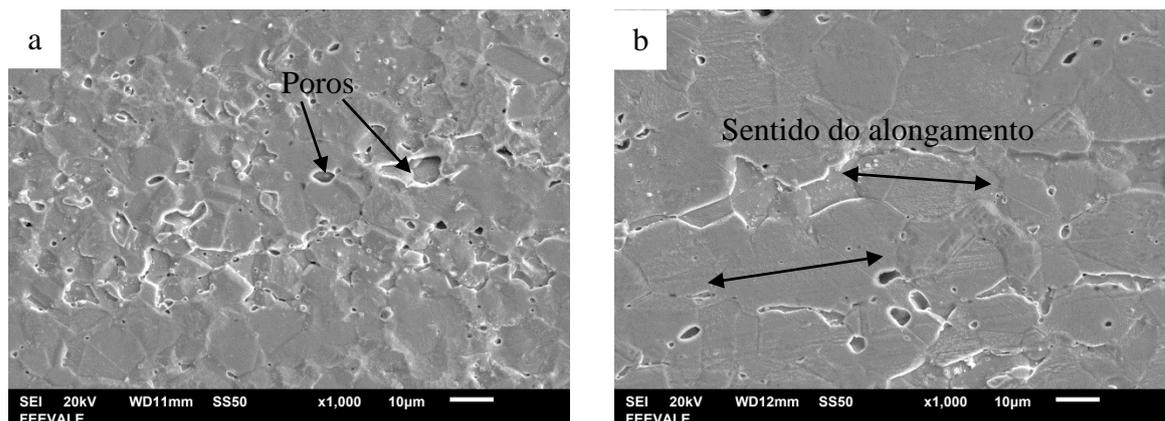


Figura 18 - Micrografias em vista de topo de amostras da liga C 360 sem tratamento térmico, não usinada e usinada

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando as amostras em vista de topo não usinadas da liga C 360 (figura 18a) com a liga C 268 (figura 15a) observam-se diferenças na estrutura dos grãos. Na amostra C 360 é possível observar que os grãos são menores e parecem estar com poros ao longo do material comparativamente à amostra C 268 (sem chumbo), Figura 15 (a), em que os grãos são grandes e não apresentam poros em sua microestrutura. Isto está de acordo com Fontaine e Keast (2006), 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.

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 possui uma lacuna grande de mistura, tanto no estado líquido quanto no sólido e a adição do Zn aumenta ainda mais essa lacuna (GOSWAMI; CHATTOPADHYAY e RYDER, 1998).

Analisando as amostras não usinadas, Figura 18(a) e usinadas, Figura 18(b) de topo da liga C 360 é possível verificar uma diferença significativa nos grãos. A amostra usinada (b) que apresentou empenamento apresenta seus grãos alongados provavelmente no sentido da laminação, conforme indicado na Figura 18.

Para Callister (2002), 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. Antes da deformação, os grãos são axiais (mesma dimensão em todas as direções). Esse tipo de deformação caracteriza uma amostra policristalina.

Ainda de acordo com Callister (2002), 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 19 mostra micrografias da seção transversal (cima, meio e baixo) de amostras de latão C 360 sem tratamento térmico. As micrografias a, b, c são de amostras não usinadas e as micrografias d, e, f são de amostras usinadas, respectivamente dos pontos de cima, meio e baixo da seção transversal.

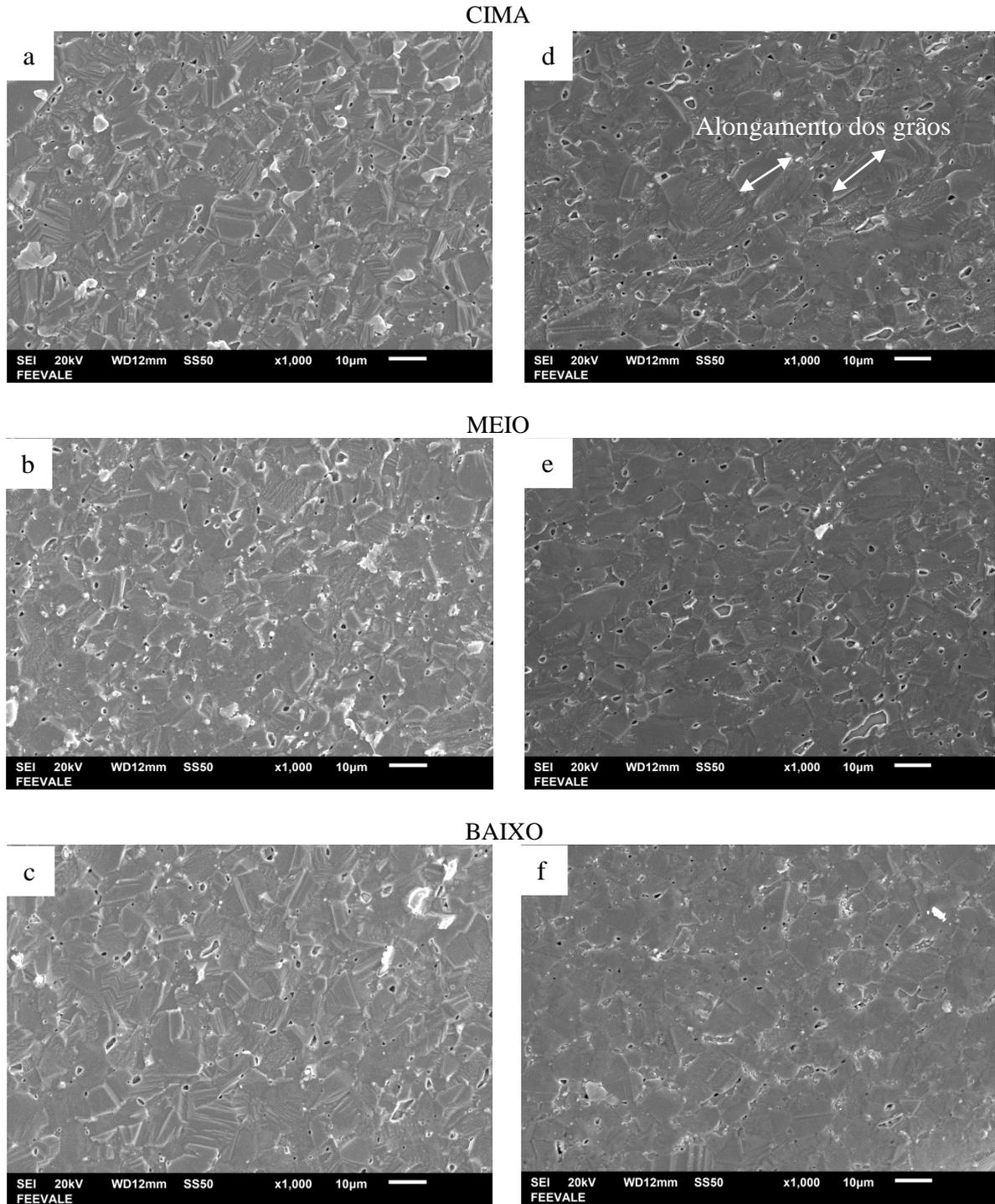


Figura 19 - Micrografias em vista de seção transversal de amostras da liga C 360 sem tratamento térmico, não usinado e usinado
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando as amostras da seção transversal, não usinado (figura 19a, b, c), se verifica que os grãos apresentam uma distribuição semelhante e com tamanhos de grãos semelhantes.

Na seção transversal das amostras usinadas (figura 19d, e, f) verificou-se um alongamento dos grãos de baixo para cima (da base para a parte usinada), o que está de

acordo com o empenamento observado e de acordo com Machado [20??], onde diz que o processo de deformação mecânica não só altera as dimensões do material, mas também a microestrutura resultante no material deformado.

4.5.3 Análise de microestrutura com tratamento térmico

A Figura 20 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 usinado.

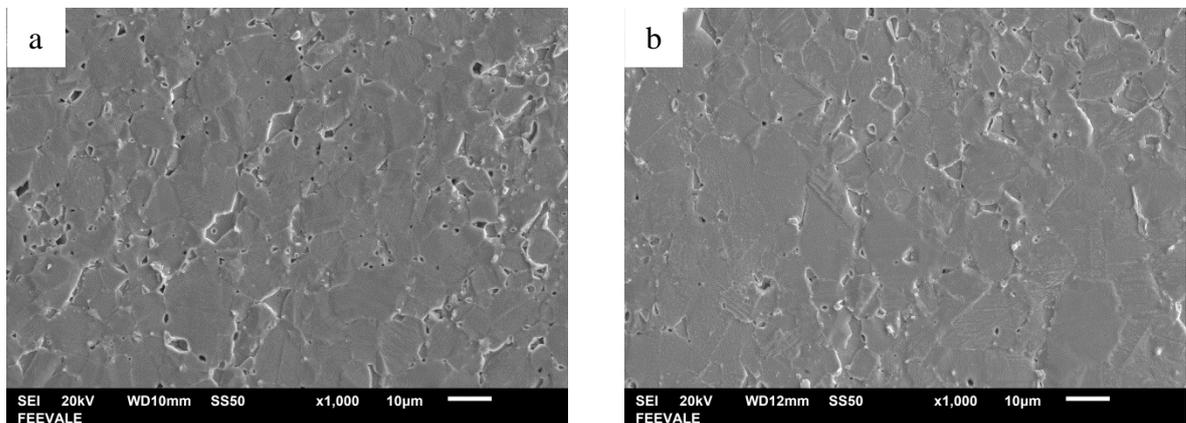


Figura 20 - Micrografias em vista de topo de amostras da liga C 360 com tratamento térmico, não usinado e usinado

Fonte: Elaborado pelo autor

A estrutura granular da amostra não usinada com tratamento térmico em vista de topo (figura 20a) apresenta grãos aparentemente semelhantes em tamanho do que a amostra usinada com tratamento térmico em vista de topo (figura 20b). As amostras também apresentaram poros, assim como todas as amostras da liga C 360 (latão com chumbo), Figuras 16, 18, 19, 20, 21 e 22.

A Figura 21 mostra micrografias da seção transversal (cima, meio e baixo) de amostras de latão C 360 com tratamento térmico. As micrografias a, b, c são de amostras não usinadas e as micrografias d, e, f são de amostras usinadas, respectivamente dos pontos de cima, meio e baixo da seção transversal.

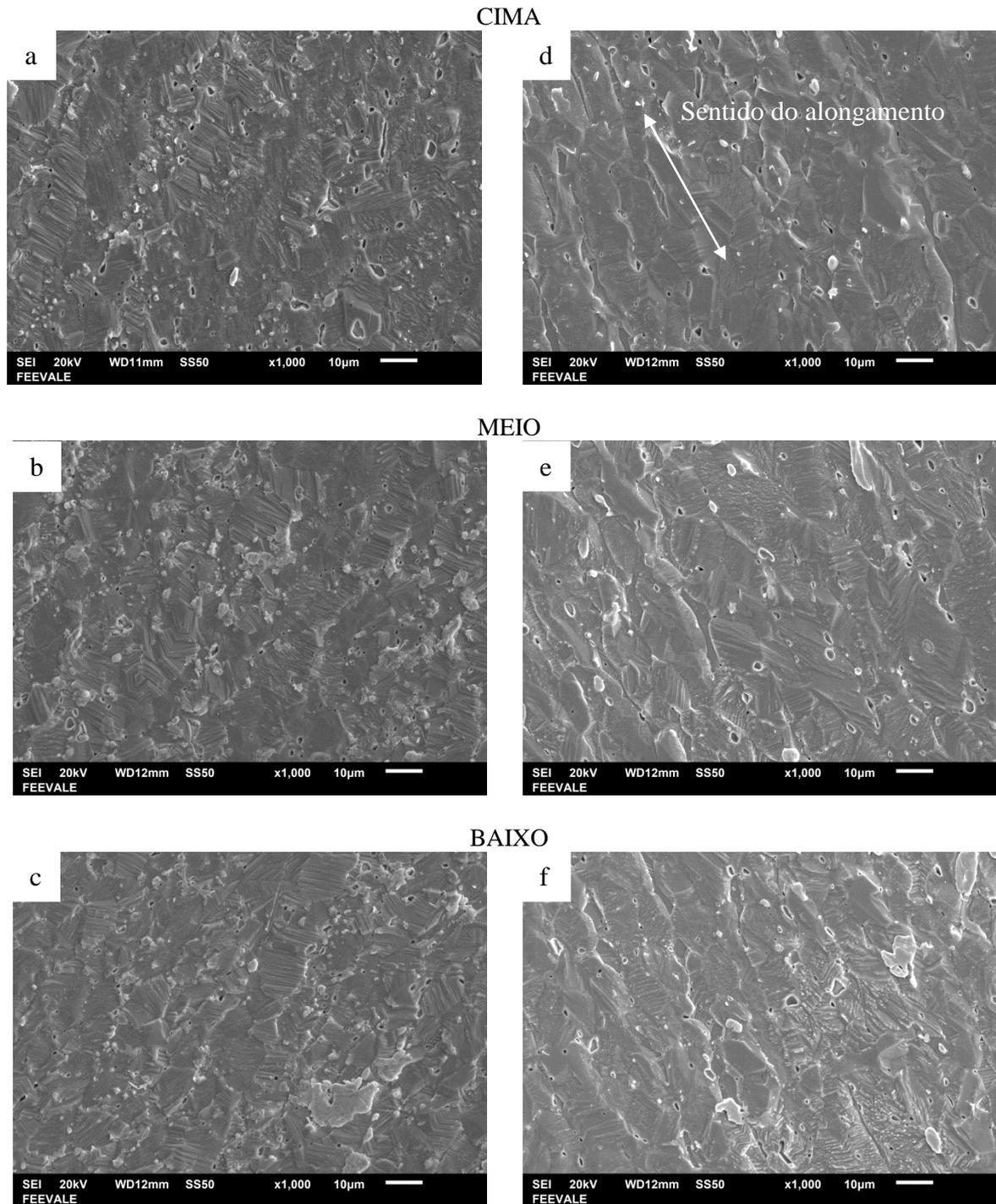


Figura 21 - Micrografias em vista de seção transversal de amostras da liga C 360 com tratamento térmico, não usinado e usinado
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que a seção transversal da amostra não usinada (figura 21 a, b, c) mostra grãos de tamanho menor do que a amostra usinada (figura 21 d, e, f). Além disso, os grãos das amostras não usinadas não parecem estar alongados como os das amostras usinadas. Como as amostras em vista de topo (figuras 20a e 20b) apresentaram grãos alongados com e sem o

processo de usinagem, esperava-se neste caso, que em seção transversal, os grãos da amostra não usinada estivessem alongados. Como o local de análise das amostras em seção transversal foi escolhido de modo aleatório, a micrografia apresentada com a amostra não usinada na Figura 21 pode estar relacionada ao lado perpendicular ao sentido da laminação. Para tanto, esta amostra foi analisada no sentido contrario ao verificado na Figura 21, apresentada na Figura 22.

A microestrutura granular em seção transversal da amostra não usinada com tratamento térmico (figura 22) apresenta uma mudança significativa na estrutura dos grãos em relação à amostra não usinada sem tratamento térmico (figura 19 a, b, c). 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 a recuperação com o rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos sem alteração da microestrutura (MACHADO, [20??]; BIRD, 1975). Além disso, com o tratamento térmico realizado no material, esperava-se que houvesse um rearranjo de átomos para a posição de equilíbrio, do maior estado de tensão residual para posições mais estáveis (METALS HANDBOOK, v. 20). 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.

Um fato que se verificou na microestrutura da seção transversal das amostras usinadas, foi a diferença de aspecto dos grãos, quanto mais próximo da área da usinagem parece que os grãos estão mais nítidos (lisos). De acordo com Barbosa [20??], durante a deformação a frio os grãos do metal tornam-se mais alongados e progressivamente mais distorcidos. Assim, quando o grau de deformação é elevado a visualização em microscópio se torna complicada por causa da pequena variação do efeito do ataque metalográfico. Quando ocorre o contato entre a superfície da ferramenta e a superfície do metal, esta torna-se lisa, porém quando não ocorre esse contato, pode haver uma certa rugosidade na mesma, porque cada cristal individual deforma-se de um modo diferente, sendo que o grau de rugosidade depende do tamanho do grão.

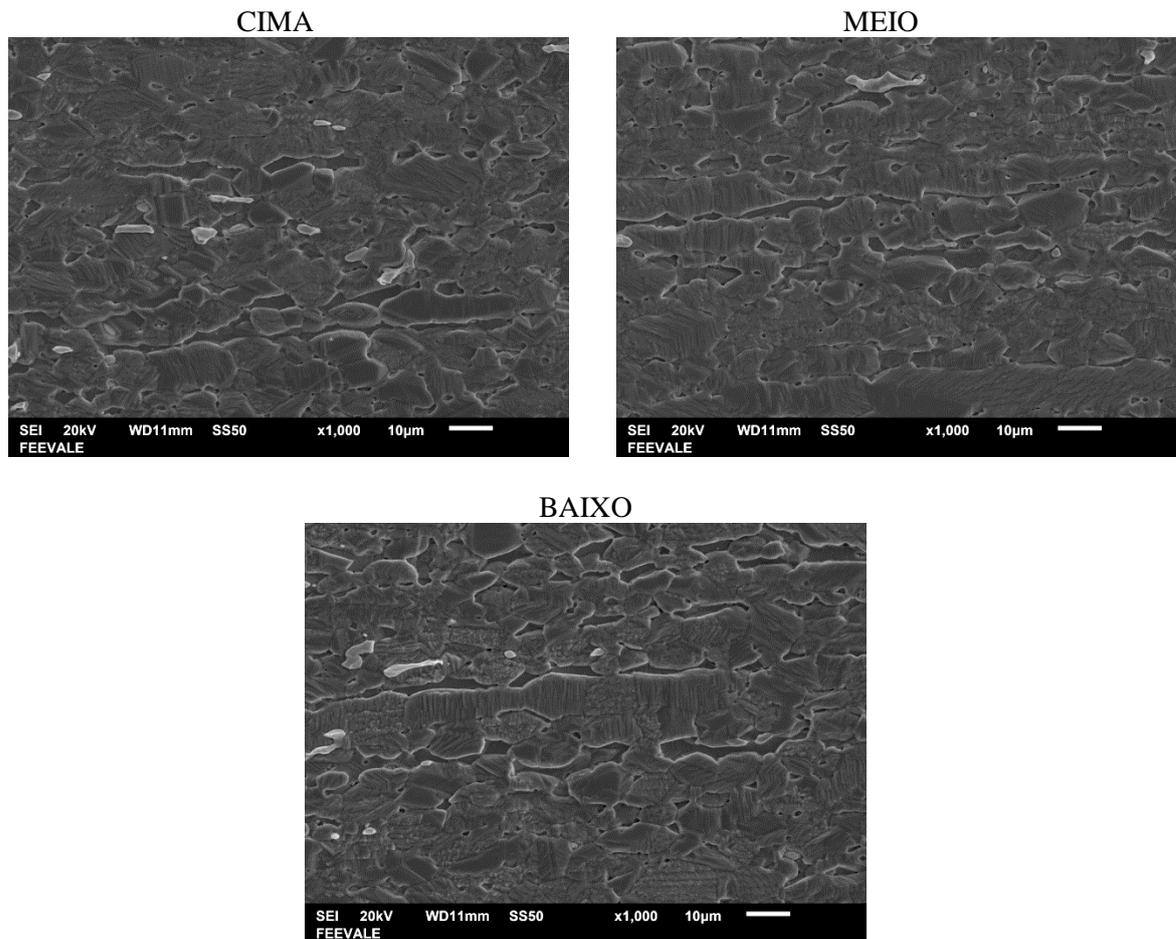


Figura 22 - Micrografias de amostras em seção transversal no sentido da laminação, com tratamento térmico e sem usinagem
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando as imagens da seção transversal no sentido da laminação, com tratamento térmico e sem usinagem (figura 22) verifica-se que os grãos estão alongados, concordando com as imagens da seção transversal no sentido da laminação das amostras com tratamento térmico e com usinagem (figura 21d, e, f). 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.

O fato de ter havido crescimento dos grãos com o processo de tratamento térmico de alívio de tensão talvez possa ser explicado de acordo com a teoria de Callister (2002), que diz que o crescimento dos grãos não precisa ser precedido por processos de recuperação e recristalização, ele pode ocorrer em todos os materiais policristalinos, onde os grãos livres de deformação continuarão a crescer se a amostra do metal for deixada a temperatura elevada. O crescimento dos grãos ocorre pela migração de contorno dos grãos. À medida que os grãos aumentam de tamanho, a área total dos contornos diminui, produzindo uma conseqüente

redução da energia total, sendo que os grãos maiores crescem a custa dos menores, que encolhem. O tamanho médio do grão aumenta ao longo do tempo e em cada momento específico existira uma faixa de tamanho do grão.

Portanto, o tratamento térmico de alívio de tensões realizado neste trabalho, apesar de ter sido realizado abaixo da temperatura de recristalização, pode ter influenciado na microestrutura e no rearranjo de átomos, o que explica a diferença da microestrutura. Isto vem ao encontro do que foi observado na prática com o processo de usinagem, em que o grau de empenamento teve significativa redução, conforme Figura 13, 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 pelo fato de serem utilizadas na usinagem ferramentas em ângulo, e na medida em que ocorre o empenamento, a ferramenta tira material além do especificado no programa de usinagem.

5 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. Observou-se que:

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

- A dureza da liga C 360 não apresenta mudança com o processo de usinagem. Porém, o tratamento térmico de alívio de tensão reduz a dureza da liga, tanto usinado quanto não usinado com valores semelhantes a da liga sem chumbo (C 268). A liga C 268 apresenta aumento de dureza com o processo de usinagem e por conseqüência provável encruamento da peça.

- A adição de chumbo na liga de latão aumenta a dureza do material e diminui significativamente o tamanho dos grãos. O chumbo se distribui de forma aleatória 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 na produção de clichês da empresa do Vale do Sinos. Dessa forma, o objetivo proposto pelo trabalho foi alcançado.

6 ATIVIDADES FUTURAS

- Estudo de elementos de liga alternativo a adição de chumbo na liga de latão com a finalidade de facilitar o processo de usinagem e reduzir o grau de empenamento.
- Estudar a aplicação de diferentes temperaturas no processo de tratamento térmico.
- Verificar a influência dos parâmetros de usinagem no problema de empenamento.
- Analisar o comportamento da liga com o uso de diferentes volumes dos elementos da composição química.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, Cássio. **Handbook: metais & ligas, cobre**, [20??]. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod_secao=12>. Acesso em: 23 set. 2011.
- BIRD, Arthur W.; Centro Brasileiro de Informação do Cobre. **Os latões de corte fácil**. São Paulo: CEBRACO, 1975. 23 p.
- BRESCIANI FILHO, Ettore. **Seleção de metais não ferrosos**. 2 ed. Campinas: Unicamp – Faculdade de Educação, 1997. 161 p.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.
- CETEC - LABORATÓRIO DE MATERIAL DIDÁTICO MULTIMÍDIA (LMDM). **Mudança de estrutura e crescimento do grão (I)**. Minas Gerais, [20??]. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21&top=290>>. Acesso em: 27 mar. 2012.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003. 272 p.
- COUTINHO, Telmo de Azevedo, **Metalografia de não ferrosos: Análise Prática** - São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1980. 128 p.
- DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.
- DIAS, Arão de Matos. Utilização do Latão Produzido por Metalurgia do Pó. **Technologia: revista de centro de tecnologia Ulbra**, v.1, n.1, p. 41-47, 2000.
- FONTAINE, A. La; KEAST, V.J. Compositional distributions in classical and lead-free brasses. **Materials characterization**, Australia, v. 57, p. 424-429, 2006.
- GARCÍA, P. et al. Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses. **Journal of Engineering Failure Analysis**, Spain, v. 17, n. 11, p. 771-776, 2010.

GOMES, Mário Rennó; BRESCIANI FILHO, Ettore. **Propriedades e usos de metais não ferrosos**: alumínio, chumbo, cobre, estanho, zinco. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1976. 280 p.

GOSWAMI, R.; CHATTOPADHYAY, K.; RYDER, P. L. Melting of Pb particles embedded in Cu-Zn matrices. **Acta Mater**, Germany and India, v. 46, n. 12, p. 4257-4271, 1998.

MACHADO, Isabel F. Tratamentos Térmicos e de Superfície. **Introdução a Manufatura Mecânica**. São Paulo, [20??]. Disponível em:
<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/Tratamento_termico_e_superficial.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2012.

MALISKA, Ana Maria. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, [20??]. Disponível em:
<http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2012.

METALS HANDBOOK. **Desk Edition**. Editora ASM. 2571 p.

METALS HANDBOOK. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. Editora ASM. v. 18. 1879 p.

METALS HANDBOOK. **Heat Treating**. Editora ASM. v. 4. 2173 p.

METALS HANDBOOK. **Machining**. Editora ASM. v. 16. 1089 p.

METALS HANDBOOK. **Materials Selection and Design**. Editora ASM. v. 20. 2005 p.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2009. 288 p.

SANTIAGO, Augusto Vianna; PEREIRA, Rubens Lima. **Metais não ferrosos e suas ligas**. São Paulo: USP – Fundação Instituto de Administração, 1978. 200 p.

SCHAEFFER, Lirio. **Introdução à conformação mecânica dos metais**. 1 ed. Porto Alegre, RS: UFRGS, 1983. 125 p.

THIELE, Eugene W. et al. Comparative Machinability of Brasses, Steels and Aluminum Alloys: CDA's Universal Machinability Index. **Copper Development Association Inc.** New York, [20??]. Disponível em: <http://www.copper.org/publications/pub_list/machined_rod_products.html>. Acesso em: 26 mar. 2012.

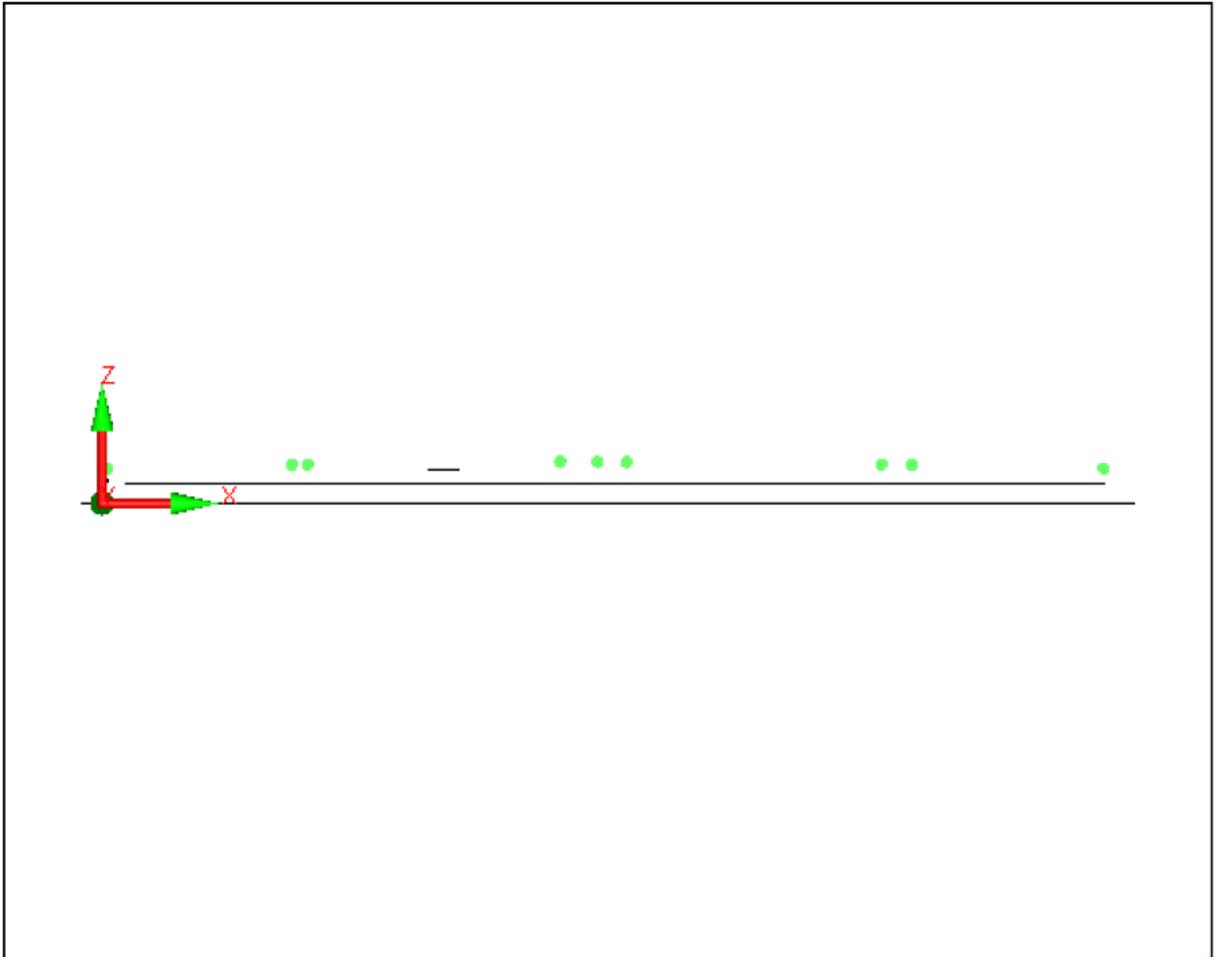
VILARINHO, C. et al. Influence of the chemical composition on the machinability of brasses. **Journal of Materials Processing Technology**, Portugal, v. 170, p. 441-447, 2005.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DAS MEDIDAS DE EMPENAMENTO

		NOME DA PEÇA : Latão C 360					maio 11, 2012	16:41
		NÚM REV : 1		NÚMERO DE SÉRIE : 1		CONTAGEM ESTATÍSTICA : 1		
⊕	MM	LOC1 - PNT2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.384	0.100	0.100	5.384	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC2 - PLN2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC3 - PNT12						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		6.043	0.100	0.100	6.043	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC4 - PLN2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC5 - PNT13						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		6.094	0.100	0.100	6.094	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC6 - PLN2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC7 - PLN2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC8 - PNT18						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		6.506	0.100	0.100	6.506	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC9 - PNT19						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		6.516	0.100	0.100	6.516	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC10 - PLN2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC11 - PNT20						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		6.486	0.100	0.100	6.486	0.000	0.000	
⊕	MM	LOC12 - PLN2						
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL	
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000	

⊕	MM	LOC13 - PNT24					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		6.119	0.100	0.100	6.119	0.000	0.000
⊕	MM	LOC14 - PLN2					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000
⊕	MM	LOC15 - PNT25					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		6.053	0.100	0.100	6.053	0.000	0.000
⊕	MM	LOC16 - PLN2					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000
⊕	MM	LOC17 - PNT33					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		5.499	0.100	0.100	5.499	0.000	0.000
⊕	MM	LOC18 - PLN2					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		5.389	0.100	0.100	5.389	0.000	0.000
⊕	MM	LOC19 - PLN1					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Z		0.000	0.100	0.100	0.000	0.000	0.000
⊕	MM	LOC20 - LIN3					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Y		48.398	0.100	0.100	46.325	-2.073	1.973
⊕	MM	LOC21 - PNT1					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
X		0.000	0.100	0.100	0.000	0.000	0.000
⊕	MM	LOC22 - LIN4					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
X		0.739	0.100	0.100	0.739	0.000	0.000
Y		46.695	0.100	0.100	46.695	0.000	0.000
Z		5.385	0.100	0.100	5.385	0.000	0.000
⊕	MM	LOC23 - LIN2					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
X		0.739	0.100	0.100	0.739	0.000	0.000
Y		46.695	0.100	0.100	46.695	0.000	0.000
Z		5.385	0.100	0.100	5.385	0.000	0.000
⊕	MM	LOC24 - LIN1					
AX		NOMINAL	TOL+	TOL-	MED	DESV	FORATOL
Y		0.000	0.100	0.100	0.000	0.000	0.000

APÊNDICE B – PERFIL DO EMPENAMENTO DA LIGA C 360 SEM TRATAMENTO TÉRMICO



ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA LIGA C 360



IRMÃOS GALEAZI LTDA
 Rua João Brufatto, 45 - Bairro Navegantes - Cep: 90.240-380 - Porto Alegre / RS
 Telefone: (51) 2104-1066 - Fax: (51) 2104-1080
 Site: www.galeazi.com.br - E-mail: galeazi@galeazi.com.br

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

Informamos que os materiais constantes em nossa nota fiscal abaixo mencionada, obedecem conforme nosso fornecedor, as seguintes normas técnicas de fabricação:

Especificação n°:	34333	Nota Fiscal n°:	37135
Cliente:	ClimaQ Industria Ltda	Data de Emissão:	03/08/2011
Norma Correspondente:	ASTM-B-16 LIGA C 360 – TÊMPERA 1/2DURO	Material:	BARRA LATÃO RETANG 101,60 x 6,35 MM

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Limites de Resist. (kgf/mm ²)		Limites de Esco. (kgf/mm ²)		Alongamento (%)		Dureza Brinell (HB)		Condução Elétrica (%)	
Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
44	52	30	45	25	12	115	135	-	-

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Mo	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	P	Na	Zr	Outros
Mín.	60,00	-	-	-	-	-	-	33,30	-	-	-	-	2,50	-	-	-	-	-
Máx.	63,00	-	-	-	-	-	-	37,50	-	-	-	-	3,70	-	-	-	-	-

Porto Alegre, 22 de agosto de 2011.

 Jorge I. J. Carvalho

ANEXO B –ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA LIGA C 268



IRMÃOS GALEAZI LTDA
 Rua João Brufatto, 45 - Bairro Navegantes - Cep: 90.240-380 - Porto Alegre / RS
 Telefone: (51) 2104-1066 - Fax: (51) 2104-1080
 Site: www.galeazi.com.br - E-mail: galeazi@galeazi.com.br

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

Informamos que os materiais constantes em nossa nota fiscal abaixo mencionada, obedecem conforme nosso fornecedor, as seguintes normas técnicas de fabricação:

Especificação n°:	34332	Nota Fiscal n°:	37314
Cliente:	Climaqa Industria Ltda	Data de Emissão:	08/08/2011
Norma Correspondente:	ASTM-B-36 LIGA C 268 – TÊMPERA 1/2DURO	Material:	CHAPA LATÃO M/DURA 1200 X 600 X 1,82 MM

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Limites de Resist.(kgf/mm ²)		Limites de esco.(kgf/mm ²)		Alongamento (%)		Dureza Brinell (HB)		Condut. Elétrica (%)	
Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
43	53	33	48	8	30	120	145	-	-

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Mo	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	P	Na	Zr	Outros
Mín.	65,50	-	-	-	-	-	-	31,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Máx.	68,50	-	-	-	-	-	-	34,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Porto Alegre, 22 de agosto de 2011.

 Jorge I. J. Carvalho