

CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS

ESTUDO DO ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS, EM PEÇA ESTAMPADA,
PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho

Guaratinguetá
2011

S237e Santos, Carlos Henrique dos
Estudo do alívio das tensões residuais, em peça estampada, pela técnica de vibrações mecânicas / Carlos Henrique dos Santos. – Guaratinguetá : [s.n.], 2011
100 f. : il.
Bibliografia: f. 83-88

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011
Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho

1. Estampagem (Trabalhos em metal) 2. Vibrações mecânicas I. Título

CDU 621.98.043

CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM CIÊNCIAS”

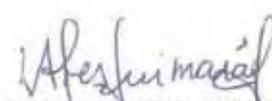
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

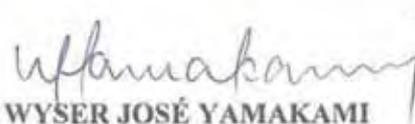
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Unesp-Feg


Prof. Dr. WYSER JOSÉ YAMAKAMI
Unesp-Ilha Solteira

Agosto de 2011

DADOS CURRICULARES

Carlos Henrique dos Santos

NASCIMENTO	29.07. 1971 – CRUZEIRO / SP
FILIAÇÃO	Geraldo dos Santos Leonina Maria Vital dos Santos
2004/2006	Curso de Graduação Faculdades Integradas de Cruzeiro Tecnólogo em Mecânica (Processos de Produção)
2008/2011	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – UNESP.

Dedico este trabalho à minha esposa Silmara,
e às minha filhas Carla e Caroline, que nesses anos
não faltaram com apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por me ter dado fé para concluir este trabalho, agradeço pela vida e pela família que tem me dado.

à minha mãe que apesar das dificuldades por nós vividas, sempre me passou confiança e perseverança.

ao meu orientador *Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho* pela amizade e incentivo na conclusão deste trabalho, se não fosse por ele não teria chegado até aqui hoje.

ao senhor *Marcos Bessa* e à *Heloísa* pela preparação das amostras destinadas ao ensaio de tração.

ao pessoal da pós e da biblioteca na pessoa do *Sidney* e *da Rosana*, que sempre me ajudaram quando os procurei.

Não poderia esquecer o meu amigo *Fabício Campos Caetano*, pelo apoio prestado na implementação deste trabalho,

"TUDO POSSO NAQUELE QUE ME FORTALECE"

Filipenses 4:13

Santos, C. H. **Estudo do Alívio das tensões residuais, em peça estampada, pela técnica de vibrações mecânicas**. 2011. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

A estampagem de chapas metálicas é importante e se destaca entre os processos de conformação, pois, é possível de se obter vários produtos com alta produtividade e baixo custo. No entanto, como todo processo de conformação pode haver alguns inconvenientes, como as tensões residuais, que são geradas devido ao aumento da resistência mecânica do material resultante da deformação plástica a frio ou devido à geometria complexa da peça, com regiões de tração e compressão. Algumas medidas são realizadas dentro da área fabril para minimizar o problema e assim as peças irem para a etapa seguinte de conformação. Uma delas é a realização de tratamento térmico de alívio das tensões residuais de forma manual. O problema é que esse processo não garante nenhum controle da microestrutura e também não há garantia que as tensões foram aliviadas e como consequência peças são sucateadas na etapa seguinte de conformação, acarretando um aumento maior dos custos de fabricação. Neste trabalho foi realizado um estudo do alívio das tensões residuais através de vibrações mecânicas abaixo da frequência de ressonância em uma peça estampada a frio. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos das vibrações mecânicas abaixo da frequência de ressonância no alívio das tensões residuais, de tal forma que possa ser uma opção ao tratamento térmico. Os resultados mostram que houve redução nas tensões residuais, porém novos estudos devem ser realizados para garantir a eficácia deste processo.

PALAVRAS-CHAVE: Estampagem. Tensão residual. Alívio tensão por vibrações.

Santos, C. H. **Study of residual stress relief, in drawing by mechanical vibration.** 2011. 100f. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The stamping of sheet metal is important and stands out among the forming processes, therefore it is possible to obtain various products with high productivity and low cost, however, the whole process of conformation can bring some drawbacks, such as residual stresses, that are generated due the rigidity of the material against cold plastic deformation or due the geometry complex of the piece, with areas on tension and compression. Some processes are carried out within the factory area to minimize the problem and so the pieces go to the next step of forming, for instance perform heat treatment relief residual stresses. The problem is that this process does not guarantee any control of the microstructure and also there is not guarantee that the tensions were reduced and failure pieces in the next step of conformation, resulting in a greater increase in manufacturing costs. In this paper has been studied relief residual stress by mechanical vibrations, with carry out of treatment relief from vibrations below the resonant frequency in component cold drawn. The objective of this study is to evaluate the effects of mechanical vibration below the resonant frequency to relieve residual stresses, so that might be an option to heat treatment. The results show a reduction in residual stress; however, we have to compare them with other treatments for which they can ensure the effectiveness of mechanical vibrations.

KEYWORDS: Drawing. Residual stress. Vibratory stress relief.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estrutura de um ônibus.....	17
FIGURA 2 – aquecimento de peças para alívio das tensões residuais.....	19
FIGURA 3 – Estampagem profunda de um copo cilíndrico.....	21
FIGURA 4 – Parâmetros do processo de estampagem.....	22
FIGURA 5 – Regiões do processo de corte.....	24
FIGURA 6 – Atuação de forças no dobramento.....	24
FIGURA 7 – Etapas de produção de um produto.....	25
FIGURA 8 – Fórmulas para calcular o diâmetro do blank.....	26
FIGURA 9 – Relação para porcentagem de redução possível.....	27
FIGURA 10 – Valores médios da eficiência dos lubrificantes na estampagem...	29
FIGURA 11 – Elementos principais de uma prensa.....	30
FIGURA 12 – Mudanças das propriedades com o aumento da deformação.....	31
FIGURA 13 – Alteração dos grãos devido a deformação a frio.....	32
FIGURA 14 – Processo de laminação que da origem à anisotropia.....	32
FIGURA 15 – Escoamento do aço.....	35
FIGURA 16 – Círculo de Mohr.....	36
FIGURA 17 – Elemento de um material retirado de um corpo de prova.....	36
FIGURA 18 – Elipse de Von Mises.....	37
FIGURA 19 – Ferramenta para execução do ensaio Marciniak.....	39
FIGURA 20 – Ferramenta para execução do ensaio Nakazima.....	40
FIGURA 21 – Simulação de diversos modos de deformação para construção da CLC.....	41
FIGURA 22 – Curvas CLC's para diversos materiais.....	42
FIGURA 23 – Tensões e deformações na estampagem.....	43
FIGURA 24 – Principais tensões atuantes na estampagem.....	43

FIGURA 25 – Esquema de medição das tensões com o equipamento portátil....	48
FIGURA 26 – Amostra com solda de reparo. Malha utilizada no método magnético.....	49
FIGURA 27 – Resultado do mapeamento da solda de reparo.....	50
FIGURA 28 – Esquema do funcionamento do sensor magneto-anisotrópico.....	51
FIGURA 29 – Efeito do carregamento cíclico no alívio das tensões na superfície.....	54
FIGURA 30 – Energia vibracional região sub-harmonica.....	56
FIGURA 31 – Movimento da curva para a esquerda.....	56
FIGURA 32 – Estabilização da curva com o alívio total das tensões.....	57
FIGURA 33 – Travessa pré-forma.....	59
FIGURA 34 – Travessa forma final.....	59
FIGURA 35 – Direção de extração do cdp.....	60
FIGURA 36 – Dimensões do cdp.....	60
FIGURA 37 – Máquina de ensaio universal Instron 8801.....	61
FIGURA 38 – Áreas de retiradas das amostras para ensaio da dureza.....	62
FIGURA 39 – Equipamento portátil para alívio das tensões residuais.....	62
FIGURA 40 – Esquema de fixação da peça para vibração.....	63
FIGURA 41 – Equipamento portátil STRESSVISION.....	64
FIGURA 42 – Malhas para mapeamento área 1.....	65
FIGURA 43 – Malhas para mapeamento área 2.....	65
FIGURA 44 – Malhas para mapeamento área 3.....	66
FIGURA 45 – Malhas para mapeamento área 4.....	66
FIGURA 46 – Equipamento portátil RAYSTRESS.....	67
FIGURA 47 – Medição das tensões através de raios-X.....	68
FIGURA 48 – Preparação com polimento eletrolítico.....	68
FIGURA 49 – Posicionamento da amostra para medição.....	69
FIGURA 50 – Curvas da etapa inicial de vibração.....	71
FIGURA 51 – Curvas da etapa final de vibração.....	73
FIGURA 52 – Mapa das tensões área 1 antes do tratamento.....	74
FIGURA 53 – Mapa das tensões área 1 após o tratamento.....	75

FIGURA 54 – Mapa das tensões área 2 antes do tratamento.....	75
FIGURA 55 – Mapa das tensões área 2 após o tratamento.....	76
FIGURA 56 – Mapa das tensões área 3 antes do tratamento.....	76
FIGURA 57 – Mapa das tensões área 3 após o tratamento.....	77
FIGURA 58 – Mapa das tensões área 4 antes do tratamento.....	77
FIGURA 59 – Mapa das tensões área 4 após o tratamento.....	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais técnicas de medição das tensões residuais.....	46
TABELA 2 – Requisitos da composição química, segundo NBR 6656.....	58
TABELA 3 – Requisitos das propriedades mecânicas, segundo NBR 6656.....	58
TABELA 4 – Análise química.....	70
TABELA 5 – Propriedades mecânicas.....	70
TABELA 6 – Dureza Vickers.....	71
TABELA 7 – Resultado das etapas de vibração.....	72
TABELA 8 – Resultado das etapas de vibração.....	73
TABELA 9 – Valores absoluto das tensões.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
NBR	Norma Brasileira
MAS	Magnetic Anisotropic Sensor
VRS	Vibratory Relief Stress

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	21
2.1 ESTAMPAGEM.....	21
2.2 LUBRIFICAÇÃO.....	27
2.3 PRENSAS PARA ESTAMPAGEM.....	29
2.4 TRABALHO A FRIO.....	30
2.5 ANISOTROPIA.....	32
2.6 CRITÉRIO DE ESCOAMENTO.....	34
2.6.1 TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA – TRESKA.....	35
2.6.2 ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA – VON MISES.....	37
2.7 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO.....	38
2.8 TENSÃO RESIDUAL.....	42
2.9 MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	42
2.9.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	46
2.9.2 MÉTODO MAGNÉTICO.....	48
2.10 ALÍVIO DA TENSÃO RESIDUAL ATRAVÉS DE VIBRAÇÃO.....	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 MATERIAL DA ANÁLISE.....	59
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	60
3.3 DUREZA VICKERS.....	61
3.4 PROCESSO DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	62
3.5 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	70
4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES.....	71

4.3 RESULTADOS DO MAPEAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO MAGNÉTICO.....	74
4.4 RESULTADO DAS MEDIÇÕES DAS TENSÕES ATRAVÉS DE RAIOS-X.....	78
4.5 DISCUSSÃO.....	79
5 CONCLUSÕES.....	81
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
REFERÊNCIAS.....	83
ANEXOS.....	89
I. Curvas tensão deformação.....	89
II. Relatório do ensaio de vibração.....	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES

As montadoras de caminhões para transporte de cargas têm cada vez mais agregado tecnologia e utilizado materiais estruturais que reduzam o peso do veículo para aumentar a quantidade de carga transportada mantendo-se a economia de combustível, porém, sem que a estrutura perca resistência.

Há aproximadamente trinta anos, as longarinas e travessas que compunham a estrutura dos veículos de transporte como onibus e caminhões, Figura 1, eram estampadas com chapas de aço com espessura superiores às utilizadas nos dias de hoje. Entretanto, isso mudou com o desenvolvimento da indústria brasileira ao longo dos anos e através de pesquisas de novos materiais de boa resistência mecânica sem a perda da estampabilidade.



Figura 1- Estrutura de um onibus (VOLKSBUS, 2011).

O processo de estampagem consiste em transformar uma chapa plana de metal laminado em um produto, procedendo com uma ou mais operações de conformação por deformação plástica. Então a importância deste processo industrial por um meio rápido, econômico e podem ser produzidos componentes das mais variadas geometrias

e tamanhos, favorecendo muitas empresas que buscam excelência na fabricação de produtos de qualidade e baixo custo a fim de manterem-se mais competitivas.

Na operação de estampagem podem ocorrer ao mesmo tempo estiramento, dobra e embutimento que conforme as propriedades mecânicas de um determinado material, somado com a complexidade geométrica da peça e o atrito na interface ferramenta produto, pode vir a interferir no estado de tensões do elemento em trabalho, sendo que, um pico de tensão elevado pode ocasionar uma trinca ou ruptura do componente quando estiver exposto a qualquer força externa.

Como as tensões residuais são auto-equilibradas, ou seja, basta qualquer força externa agir sobre o corpo que causa a sua redistribuição, torna-se importante conhecer o estado das tensões internas de um corpo e como ela pode reagir a carregamentos externos, e assim evita-se danos materiais e econômicos.

As tensões residuais são inconvenientes inerentes dos vários processos de fabricação, e que no caso da estampagem quando um metal está sendo deformado plasticamente, frequentemente são criadas tensões internas devidas primeiramente à incompatibilidade da deformação, que são os diferentes níveis de deformação experimentado em diferentes localizações ao mesmo tempo.

Esta diferença nos atuais níveis de deformação em diferentes localizações pode ser causada por diversas razões, incluindo as propriedades mecânicas do material, diferenças das deformações atuais acomodadas em diferentes localizações devido à geometria do punção/matriz ou da força aplicada pelo sujeitador, ou prensa-chapas na peça em trabalho, e o possível gradiente de temperatura em diferentes localizações. Essas tensões internas podem permanecer nos materiais depois da conformação, na forma de tensões residuais.

As tensões residuais podem ser benéficas ou nocivas, sendo dependentes do sinal à qual o componente ou uma estrutura pode estar exposto. Por exemplo, o *shot peening* induz tensões compressivas na superfície de uma peça, aumentando a resistência à fadiga. Porém, na estampagem a peça terá regiões exposta a tensões trativas, que podem afetar uma conformação posterior ou mesmo esta peça pode vir a falhar se for submetida a cargas cíclicas quando o veículo estiver em campo.

O ideal seria que sobre peças estampadas estivessem agindo tensões compressivas, porque assim há um ganho no limite de resistência à tração do material, ao passo se sobre uma região da peça estiverem com pico de tensões trativas elevadas, esta poderá estar próxima do limite de resistência à tração do material e assim comprometer a integridade estrutural do mesmo.

No decorrer de muitos anos foram surgindo vários métodos para medição das tensões residuais, e cada qual com a sua particularidade e aplicabilidade podendo ser destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos. Neste caso utilizamos o método não destrutivo, com o mapeamento das tensões através do método magnético e medição das tensões absolutas com difração de raios-X.

Na pratica essas tensões residuais podem ser eliminadas por tratamento térmico como recozimento ou alívio de tensões, também conhecido como (TSR) *Thermal Stress Relief*. Porém, esses tratamentos são custosos e consomem tempo porque é uma operação extra. Com o intuito de reduzir as tensões residuais, algumas empresas utilizam certos artifícios, como o aquecimento de peças de maneira manual, Figura 2, que não garante o real alívio das tensões residuais ou mesmo pode haver alteração no pico das tensões trativas, e não se tem qualquer controle da microestrutura da peça em trabalho.



Figura 2 – Aquecimento das peças para alívio das tensões residuais.

O alívio das tensões residuais através do método das vibrações, conhecido como (VSR), *Vibratory Stress Relief*, que é um termo em geral utilizado para que um corpo seja exposto a vibrações mecânicas para alívio das tensões residuais. Há artigos que relatam a eficiência deste processo em relação ao tratamento térmico, sendo eficaz e evitando-se as desvantagens do tratamento térmico, como as distorções, incrustações e degradação das propriedades mecânicas, (WALKER et al., 1994).

Portanto, é de suma importância o estudo de métodos de alívio das tensões residuais, para que seja realizado de maneira prática e vantajosa para as empresas que assim se interessarem.

1.2OBJETIVOS

E este trabalho tem o objetivo de conhecer a eficácia do alívio das tensões residuais pelo método de vibrações em peça estampada a frio e a comparação das medições através do método magnético e da difração de raios-X, antes e depois do tratamento de vibrações.

A justificativa para a realização deste trabalho está na busca por novos meios eficazes na redução das tensões residuais, como uma alternativa ao tratamento térmico, porque maioria dos artigos científicos descreve a eficiência do método de vibrações nas suas diversas formas em componentes soldados, e nenhum foi encontrado que forneça informações sobre peças estampadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTAMPAGEM

O processo de estampagem também denominado embutimento profundo ou repuxo é obtido através de chapas metálicas trabalhadas por ferramentas rígidas que, através de esforços de compressão e tração, é obtido um determinado produto, e a grande vantagem da fabricação de componentes a partir de chapas metálicas é o baixo custo e a alta produtividade originado pela minimização do uso de matéria prima aliado à baixa necessidade de usinagem (SCHAEFFER, 2006). Na Figura 3 verifica-se esquematicamente uma ferramenta para estampagem profunda de um copo cilíndrico.

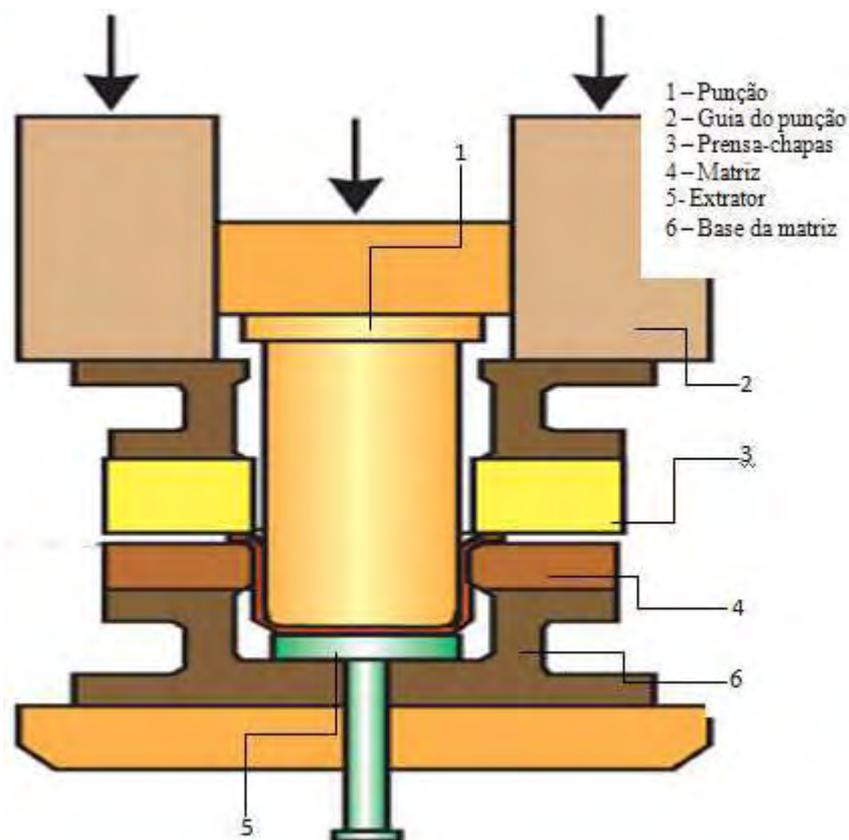


Figura 3 – Estampagem profunda de um copo cilíndrico (Adaptado da SCHULER, 1998).

Segundo Schaeffer (2004) atualmente o desenvolvimento dos materiais é grande, e conseqüentemente tem se conseguido a fabricação de peças das mais variadas formas e tamanhos, podendo a produção de alguns componentes chegar até 1000 peças por

hora, reduzindo-se assim os custos com o aumento da produtividade. A produção em série teve início no fim do século XIX com a construção das primeiras prensas e ferramentas de corte e embutimento e com o desenvolvimento da indústria automobilística.

Ainda segundo Schaeffer (2006) o controle de vários parâmetros na estampagem são importantes para otimização do processo, Figura 4, pois, temos que considerar atualmente os aumentos da velocidade de deformação e a introdução de novos materiais, principalmente os de maiores resistência mecânica.

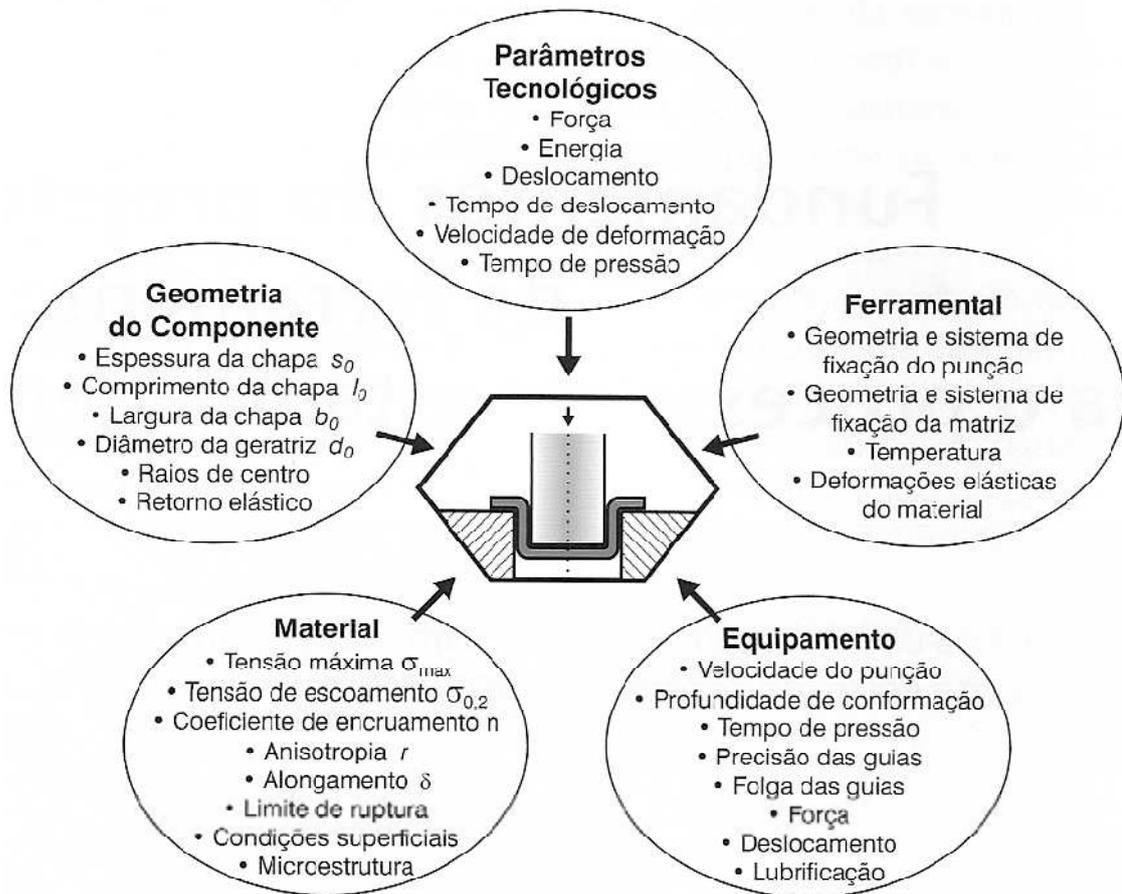


Figura 4 - Parâmetros do processo de estampagem (SCHAEFFER, 2004)

Dentre os parâmetros que interferem na estampagem podemos destacar a geometria do componente, que dependendo das regiões críticas de estampagem, o fator metalúrgico do material pode interferir no escoamento na interface punção/matriz. Por exemplo, elementos com geometrias complexas e material de difícil escoamento, o

ideal é que seja processado em prensas hidráulicas, onde a velocidade das deformações são menores e assim o material venha a fluir de maneira mais lenta.

O ferramental também interfere nos parâmetros do processo de estampagem, podemos citar a confecção dos punções e matrizes. Estes componentes atualmente são revestidos superficialmente para garantir menor atrito entre as partes no momento da conformação e como consequência há uma redução na força para a estampagem, e somando-se a tudo é gerado aumento na resistência ao desgaste, já que um ferramental é desenvolvido para produzir grandes lotes de peças.

Podemos afirmar que os parâmetros que interferem no processo de estampagem são todos interligados, ou seja, um dependente do outro e que o esforço da área de engenharia seja considerar cada parâmetro para o desenvolvimento de um processo enxuto e econômico.

Segundo Guidi (2009) o processo de conformação por estampagem pode ser dividido em três partes:

1. Corte — corresponde à obtenção de diversas formas geométricas determinadas, a partir de chapas, que são submetidas à ação de ferramentas de corte superior e inferior, as quais são acionadas por uma prensa que comprime a chapa apoiada entre as ferramentas, sendo que a força de compressão se transforma em força de cisalhamento, causando a separação brusca de uma porção da chapa. Após a separação entre o blank e a chapa pode ser notada três áreas distintas, que são dependentes da folga e afiação das ferramentas superiores e inferiores. Na Figura 5 podem ser entendidas esquematicamente as três regiões no final do corte. São elas:
 - ✓ Área de deformação: Região onde houve deformação plástica, deformada pela navalha superior:
 - ✓ Área de cisalhamento: Região onde o esforço de compressão se transforma em esforço cisalhante, com a união de várias trincas o material se rompe na superfície que se encontra em contato com as navalhas;

- ✓ Área de rompimento: Região onde houve a separação do material de maneira brusca, esta área apresenta uma fratura dúctil com alta rugosidade;

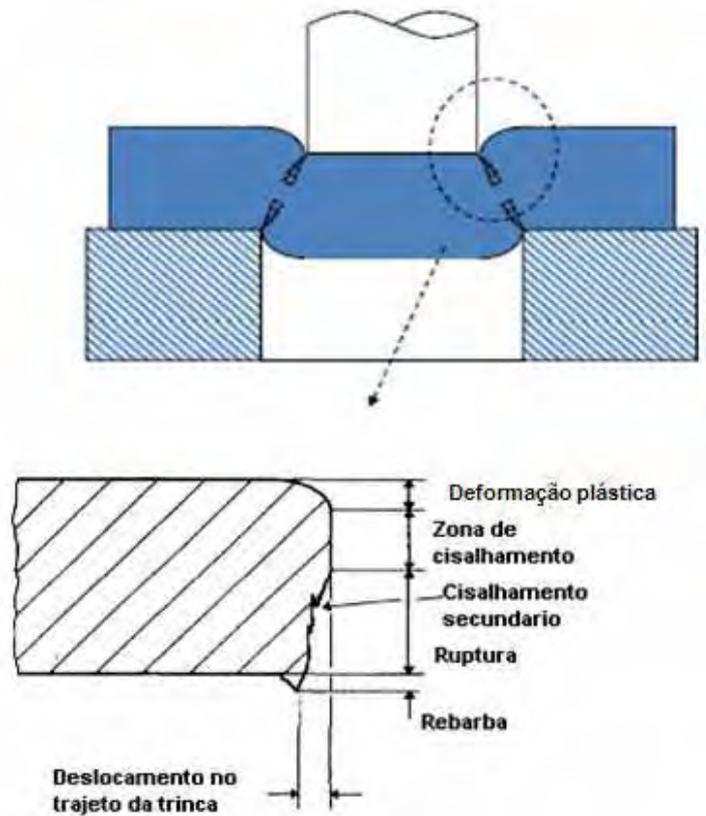


Figura 5 – Regiões do processo de corte (adaptado MARTINS, 2004).

2. Dobramento e encurvamento — o material é submetido a forças aplicadas em duas direções para realizar a flexão e a deformação plástica mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, Figura 6.

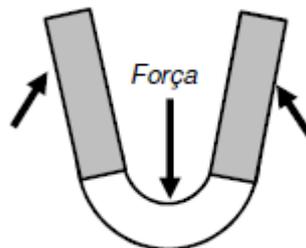


Figura 6 – Atuação de forças no dobramento.

3. Estampagem profunda — esta operação também pode ser chamada de embutimento, em que uma chapa é forçada a entrar em uma cavidade (matriz), sem que haja o aparecimento de rugas, neste processo ocorrem forças radiais de tração e forças tangenciais de compressão. O processo de estampagem profunda pode ter uma ou várias etapas, que irá depender da complexidade do produto e do limite de conformação da chapa, Figura 7.



Figura 7 – Etapas de produção de um produto (METALFORMING HANDBOOK SCHULER, 1998).

O diâmetro do blank pode ser calculado em função do diâmetro e altura do produto na sua forma final. Na Figura 8, constam alguns exemplos de formas geométricas que podem ser conformadas, e os cálculos para o desenvolvimento do blank.

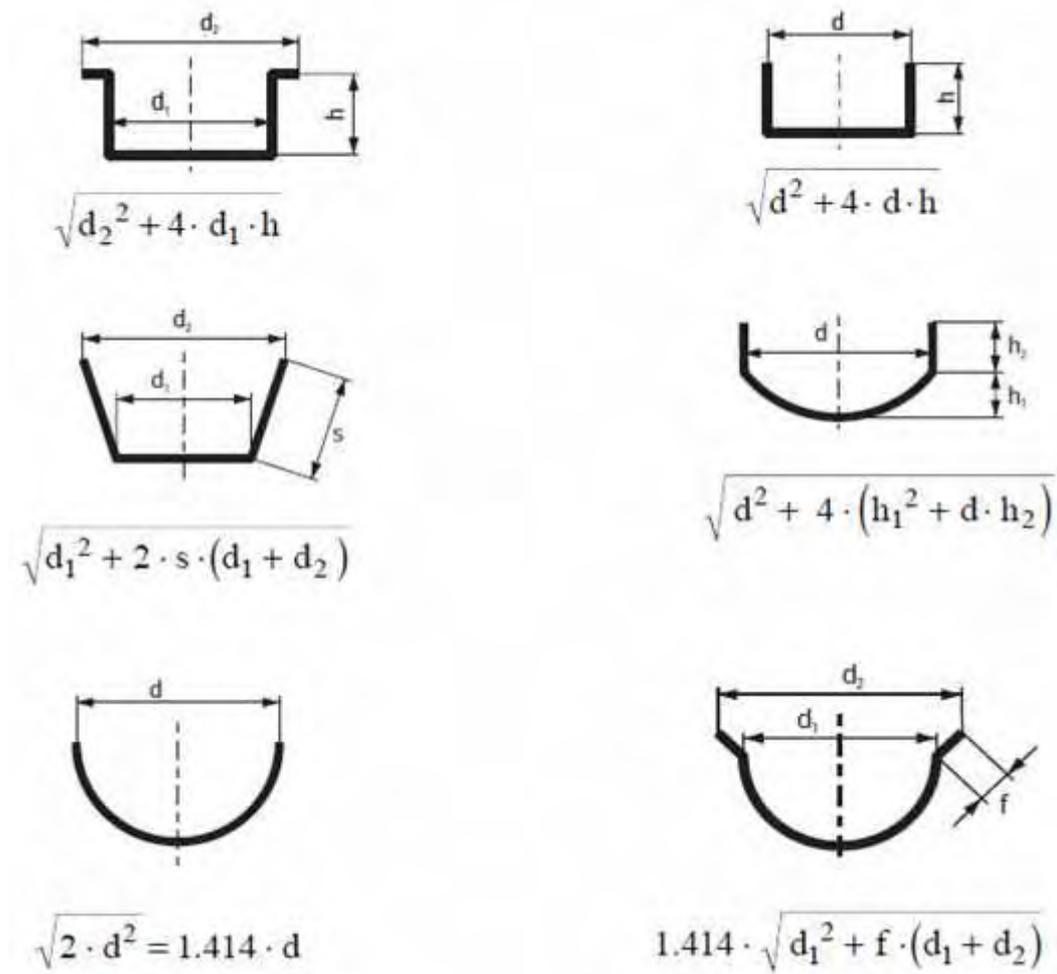


Figura 8 – Fórmulas para calcular o diâmetro do blank (METALFORMING HANDBOOK SCHULER, 1998).

A transformação de uma chapa plana em um produto só é possível dentro de certos limites. Esta análise é precedida através do cálculo da relação da estampagem, definida pelo quociente do diâmetro da geratriz, pelo diâmetro do punção ou do produto. E quando não é possível estampar somente em uma etapa, pelo fato de se ultrapassar a relação de estampagem admissível, deve-se produzir o produto em quantas etapas forem necessárias, (SCHAEFFER, 2004). Sendo que as etapas podem ser definidas em função da relação diâmetro do copo, diâmetro do disco ou do copo anterior e porcentagem de redução possível, Figura 9.

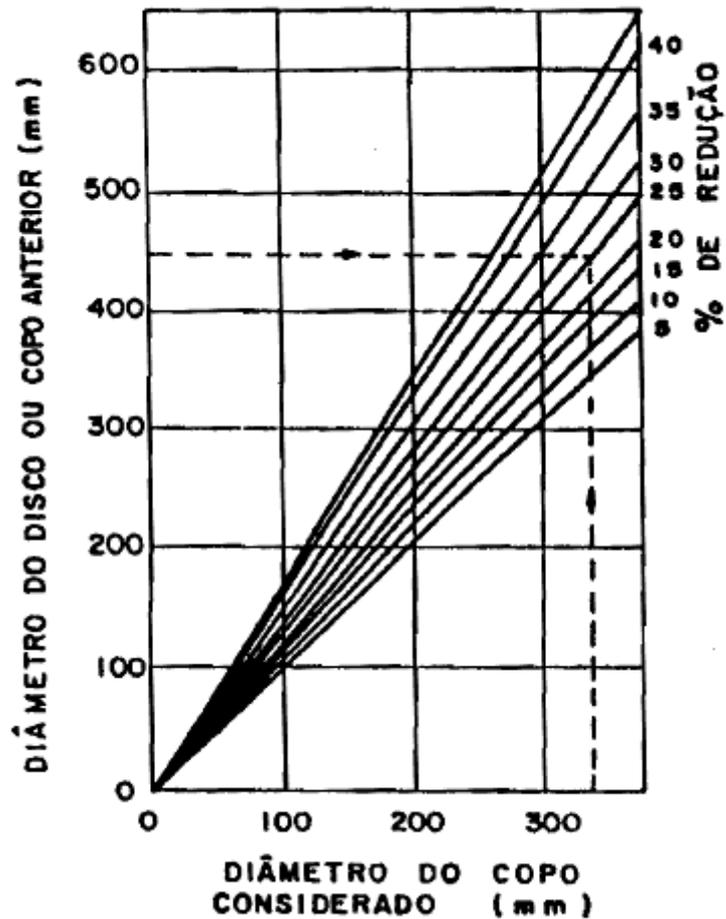


Figura 9 Relação para porcentagem de redução possível. (BRESCIANI et al., 1997).

2.2 LUBRIFICAÇÃO

A lubrificação no processo de estampagem é uma das variáveis que interfere no processo de estampagem, sendo que, a escolha do lubrificante adequado para interagir entre as superfícies de contato ferramenta e chapa promove a redução dos esforços de conformação melhora a distribuição das tensões e deformações e reduz o desgaste da ferramenta.

Yang (2010) investigou a distribuição das deformações com lubrificação durante a estampagem profunda, através de um modelo de elementos finitos, concluiu que quanto maior a espessura da película de lubrificação resulta em baixo atrito e mais uniformidade da distribuição das deformações.

Darendeliler et al (2002) estudaram o efeito do coeficiente de atrito na estampagem de chapas metálicas, utilizando um modelo de elementos finitos. O modelo foi verificado pela comparação dos resultados numéricos obtidos com deformações radiais e circunferências com os resultados experimentais. Os resultados mostraram que as tensões radiais e circunferenciais são afetadas pelo coeficiente de atrito em torno do punção e da matriz.

Reddy et al (2010) estudaram o efeito do coeficiente de atrito na estampabilidade, os resultados mostraram que a razão do limite de estampabilidade decresce proporcionalmente com o aumento do coeficiente de atrito, reduzindo acentuadamente a estampabilidade a partir de 0,3 do coeficiente de atrito, e no estudo também foi possível concluir que os aspectos tribológicos, como a rugosidade atrito e diferentes lubrificantes, tem um profundo efeito na estampabilidade dos materiais.

Silva (2007) estudou a eficiência do uso de lubrificantes na estampagem profunda, ficou evidenciado que a lubrificação reduz a força de embutimento comparando-se com os resultados de ensaios sem a utilização de lubrificantes. Nesse trabalho, como se verifica na Figura 10, o Extrudoil foi o lubrificante de melhor desempenho, possibilitando aplicação de menor força de embutimento e maior deformação do raio no fundo das amostras.

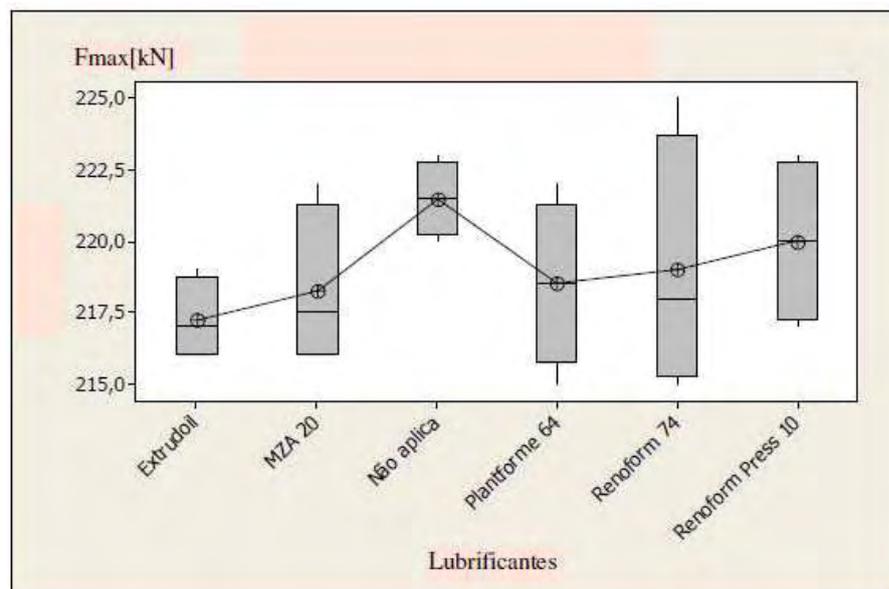


Figura 10 – Valores médios da eficiência dos lubrificantes na estampagem (SILVA, 2007).

2.3 PRENSAS PARA ESTAMPAGEM

As prensas são ferramentas mecânicas para trabalho com chapas, e podem ser de diversos tipos, podendo variar conforme a dimensão das peças que serão produzidas e do ferramental concebido.

No processo há sempre um martelo, cujo movimento pode ser acionando por um sistema hidráulico (cilindro hidráulico) ou mecânico (o movimento rotativo é transformado em linear pela ação de um sistema de bielas, manivelas ou fusos).

As prensas hidráulicas são ideais para o processo de estampagem profunda, por ser possível o controle de variáveis dentro do processo como por exemplo, as deformações podem ocorrer de maneira mais lenta. Já as prensas mecânicas utilizam energia acumulada em um volante, portanto, o curso é mais limitado. Os elementos básicos presentes em uma prensa, Figura 11 são:

Cadeia cinemática - Conjunto de todas as peças que geram o movimento para ser aplicado no martelo. Fazem parte da cadeia cinemática as peças: volantes, engrenagens, eixos, guias, correias entre outras.

Biela - Peça que faz a conexão entre o conjunto de tração e o martelo.

Martelo - Peça à qual, numa extremidade, fixa-se o estampo e que aplica a força necessária para fazer a conformação da peça.

Zona de prensagem - Espaço entre o martelo e a mesa da prensa, onde se coloca o ferramental. É a área onde o martelo aplica a força e na qual o operador deve concentrar toda a sua atenção, pois é onde realiza seu o trabalho ou atividade.

Comando bimanual - Dispositivo de segurança da prensa que exige que o operador mantenha as duas mãos nos botões de acionamento para que a máquina comece a funcionar.

Estrutura – Armação da prensa que pode ser fabricada em ferro fundido, aço fundido ou chapa de aço soldada.

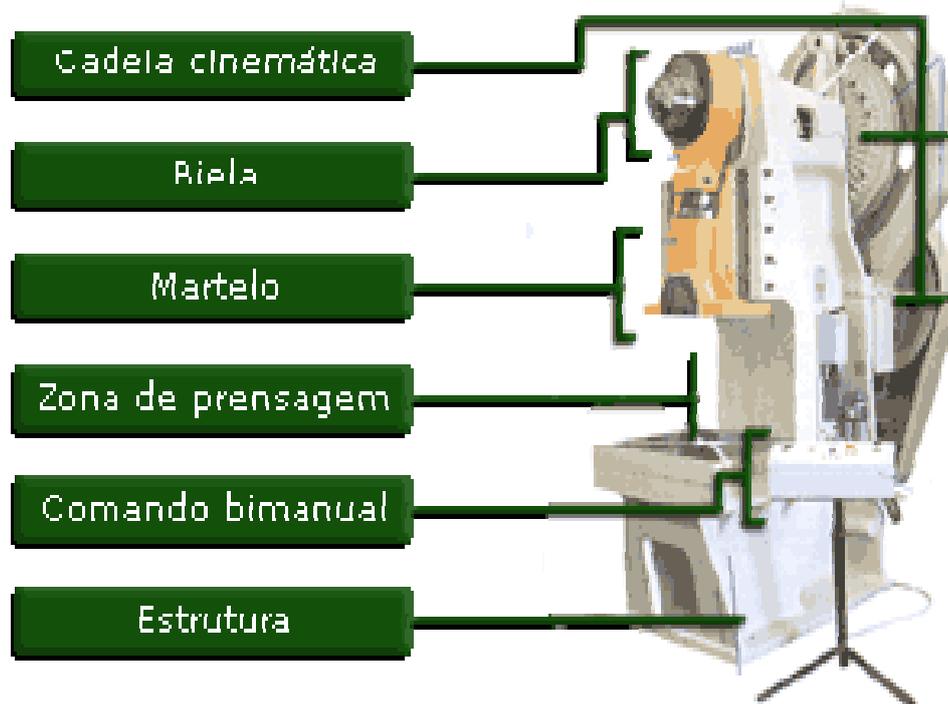


Figura11 – Elementos principais de uma prensa.

2.4 TRABALHO A FRIO

A estampagem é um dos processos em que se pode obter elementos através do trabalho a frio, onde as deformações plásticas ocorrem na temperatura ambiente. O trabalho a frio é interessante, pois é possível de se produzir componentes com excelente qualidade dimensional, e quase não requer .operação de usinagem.

Segundo Bresciani et al. (1997) as propriedades mecânicas são alteradas com o trabalho a frio, no ensaio de tração o material tem seu limite de escoamento e resistência alterados, também há um aumento na dureza, menor alongamento e extricção, sendo que, à medida que se aumenta a resistência pelo encruamento a ductilidade decresce, Figura 12.

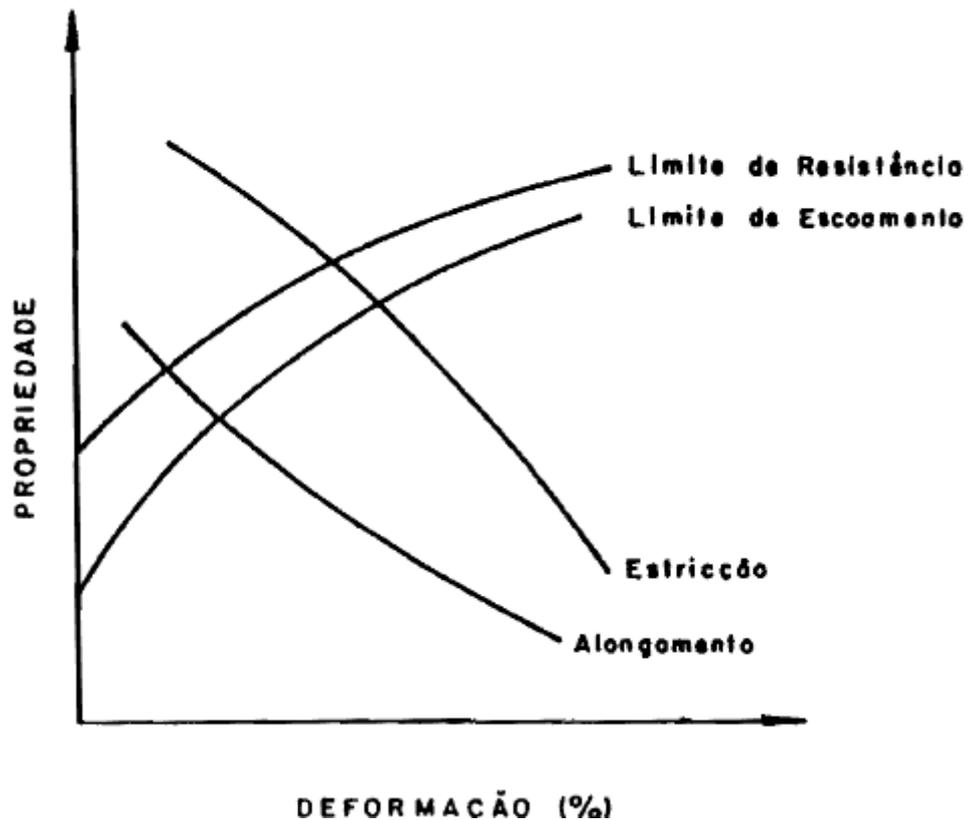


Figura 12 – Mudança das propriedades com o aumento da deformação (BRESCIANI et al., 1997).

Este comportamento de aumento de dureza através da deformação plástica é chamado de encruamento. A deformação plástica ocorre com o movimento das discordâncias, no entanto, o trabalho a frio gera aumento na densidade das discordâncias de modo que elas passam a se interagir restringindo umas às outras, ou seja aumentado a dureza do material.

O trabalho a frio também gera grãos que antes eram equiaxiais, em grãos alongados, que adquirem uma textura cristalográfica preferencial de acordo com o sentido da deformação, Figura 13. As alterações na estrutura cristalina também alteram o estado da tensão interna do material conforme a complexidade das deformações e aumento da resistência mecânica do metal.

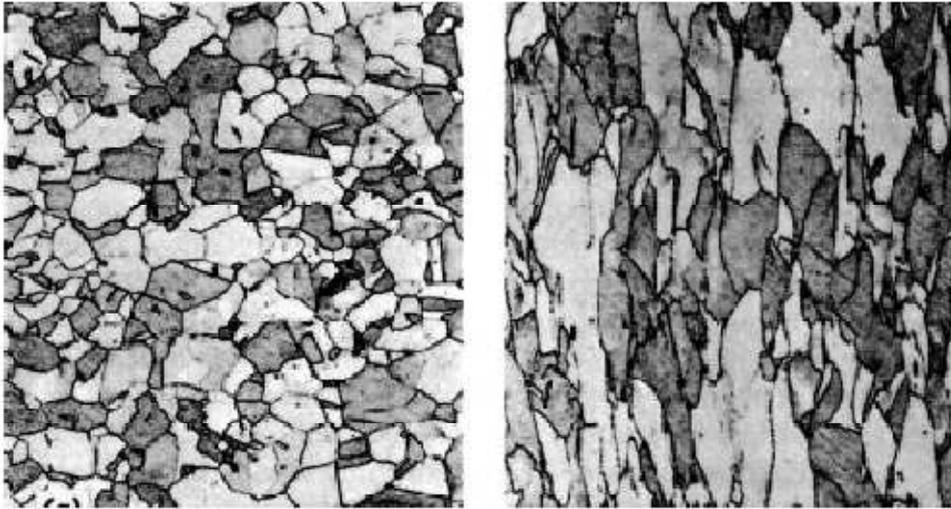


Figura 13 - Alteração dos grãos devido a deformação a frio

2.5 ANISOTROPIA

As propriedades mecânicas de um material podem variar quando trabalhado mecânicamente, conforme a direção em que se retira o corpo de prova para ensaio, sendo esse fenômeno conhecido como anisotropia.

A anisotropia surge conforme a orientação preferencial dos grãos após uma grande deformação plástica, alinhamento de inclusões, ou alinhamento de uma segunda fase precipitada devido ao trabalho mecânico, Figura 14.

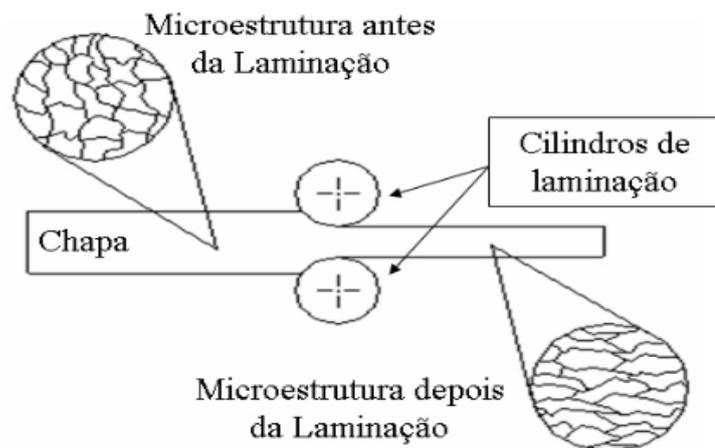


Figura 14 - Processo de laminação que da origem à anisotropia (SCHAEFFER, 2004).

A anisotropia plástica pode ser avaliada através do índice de anisotropia r , que é definido como a relação entre a deformação real na largura, δ_w , dividida pela deformação real na espessura, δ_e , da amostra durante o ensaio real. Retira-se a medida da largura e da espessura em vários pontos do corpo de prova antes do ensaio e depois que se atinge uma carga específica que de uma deformação qualquer. Com os valores obtidos calculam-se as deformações atingidas δ_w e δ_e , colocando-se essas deformações em um gráfico, onde δ_w em ordenadas e δ_e em abscissas, obtendo-se assim a inclinação da reta. O valor de r também pode ser obtido através da equação:

$$r = \ln \left(\frac{wf}{wo} \right) / \ln \left(\frac{tf}{to} \right); \quad (1)$$

onde w_o e t_o são as largura e espessura iniciais antes do ensaio, e wf e tf , a largura e espessura finais após uma carga Q especificada. Como a medida da espessura pode ocasionar erros grandes, pode ser substituída pela seguinte expressão, que é válida pela constância de volume após a deformação plástica.

$$r = \ln \left(\frac{wo}{wf} \right) / \ln \left(\frac{l_f wf}{l_o wo} \right); \quad (2)$$

onde l_o e l_f são os comprimentos inicial e final, respectivamente.

Os valores de r podem variar sendo os corpos de prova retirados em diferentes posições, é chamado de anisotropia planar (Δ_r), que é um valor importante para estudos sobre a estampagem de metais. Sendo o calculo da anisotropia planar dada pela equação 3:

$$\Delta_r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}, \quad (3)$$

onde os sub-índices de r representam os valores de r dos corpos de prova retirados a 0° , 90° e 45° da direção de laminação da chapa. No caso de um material isotrópico o valor de r deverá se igual a 1, no caso do valor de $\Delta_r > 1$, o material estará sujeito à formação de orelhas 0° e 90° da direção de laminação, e para valores de $\Delta_r < 1$ podem surgir orelhas a 45° .

Pode ser que a anisotropia ao longo da espessura chapa seja diferente ao longo do plano. Então podemos definir outra equação para calcular o R_m , conhecido como anisotropia normal:

$$R_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (4)$$

Segundo Malavolta (2008) a anisotropia normal é um parâmetro de formabilidade do material, e esta associada à capacidade do material resistir ao afinamento quando for submetido a carregamentos em seu plano. Portanto, quando $R_m < 1$ a chapa terá maior capacidade de afinamento, e maior tendência de ruptura no decorrer do processo. Quando $R_m > 1$ a chapa oferece maior resistência ao afinamento ao longo da espessura.

2.6 CRITÉRIO DE ESCOAMENTO

Os componentes estruturais produzidos com materiais dúcteis devem ser dimensionados, sendo material dúctil, não venha a escoar caso ocorra algum carregamento. Portanto, o projetista deve estar atento quando elaborar um projeto de um determinado material, partir da premissa que se for um material dúctil a falha será especificada pelo início do escoamento do material, ou caso seja um material frágil, será pela fratura.

Segundo Buffoni (2011) na prática estudam-se quatro teorias para se prever a ruptura de um material quando submetido a um estado de tensões multiaxial. Duas teorias para materiais dúcteis Tresca e Von Mises, e duas para materiais frágeis, Rankine e critério de falha de Mohr. Neste trabalho é discutido as teorias para materiais dúcteis.

2.6.1 TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA - TRESCA

Este critério assume que o escoamento ocorre quando a tensão cisalhante atinge um valor máximo em um ensaio de tração uniaxial. O critério de escoamento de Tresca é menos complicado matematicamente que o critério de Von Mises, e por isso é mais utilizado na área de engenharia de projetos

O deslizamento ocorre ao longo dos planos em contato dos cristais aleatoriamente ordenados, sendo que se for realizado um ensaio de tração em um corpo de prova em formato de uma tira fina e polida, poderá ser visto como a tensão provoca o escoamento a 45°, Figura 15.

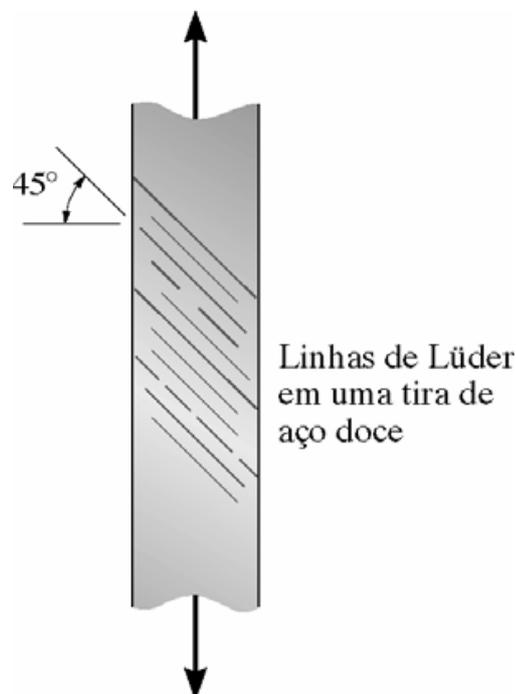


Figura 15 – Escoamento do aço (BUFFONI)

A tensão de cisalhamento máxima pode ser obtida através do círculo de Mohr, Figura 16. Desta forma tem-se.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_e}{2} \quad (5)$$

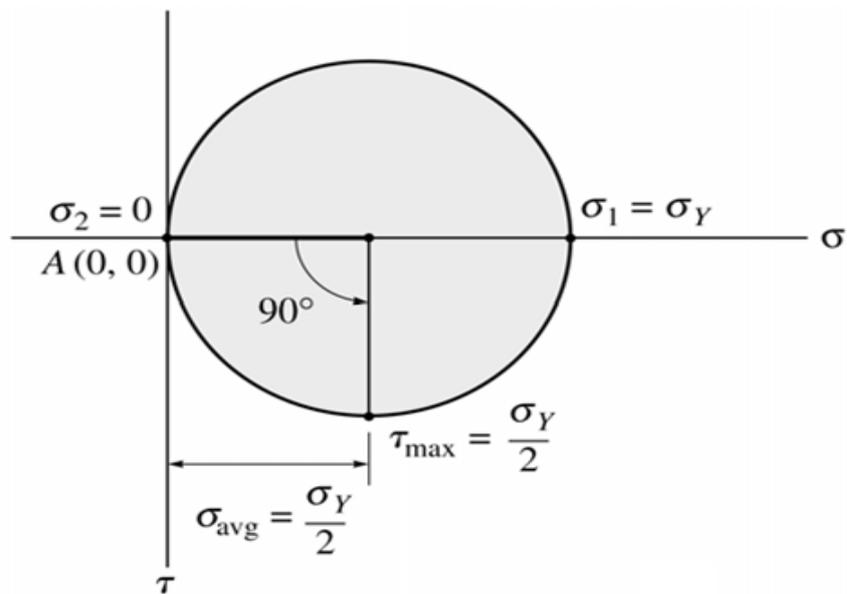


Figura 16 – Círculo de Mohr (BUFFONI).

A tensão de cisalhamento atua nos planos a 45° a partir dos planos da tensão principal, Figura 17. Os planos têm as mesmas direções das linhas de Lüder, evidenciando que a ruptura ocorre por cisalhamento.

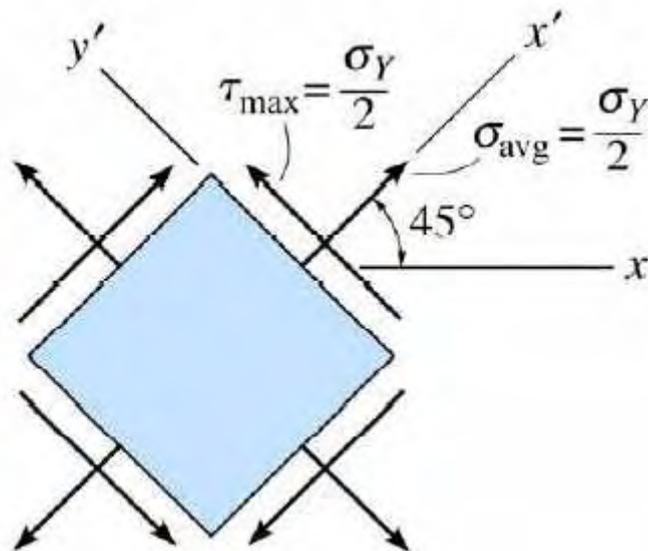


Figura 17 – Elemento de um material tirado de um corpo de prova (BUFFONI).

Sendo também a tensão de cisalhamento máxima dada por:

$$\tau_{\max} \equiv \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 - \sigma_{90}}{2}\right)^2 + \tau_{0,90}^2} \quad (6)$$

onde $\tau_{0,90} = \sigma_{45} - 0.5(\sigma_0 + \sigma_{90})$.

2.6.2 ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA – VON MISES

Um material quando deformado por carregamento externo tende a armazenar energia internamente em todo o seu volume. O critério de Von Mises é fundamentado no princípio que o escoamento inicia quando as tensões de cisalhamento octaédricas atingem um valor crítico K, (DIETER, 1981). Da equação 7 temos:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} J_2 = \frac{\sqrt{2}}{3} K \quad (7)$$

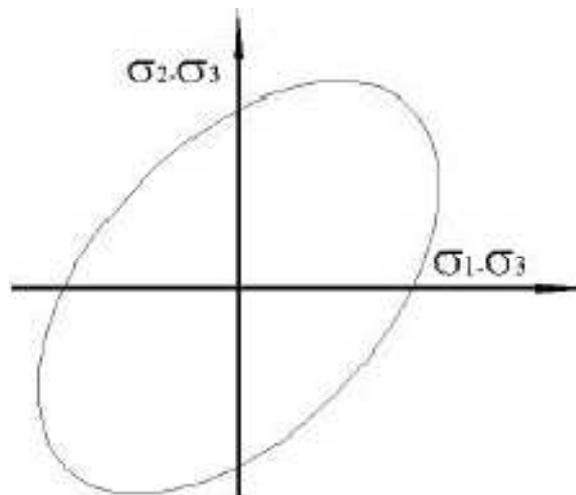


Figura 18 – Elipse de Von Mises (COSTA, 2003).

Reduzindo à forma simples, temos a função de escoamento:

$$f(J_2) = J_2 - K^2 = 0 \quad (8)$$

ou pode ser escrita em termos de tensões principais:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6K^2 \quad (9)$$

onde K é a tensão de escoamento em cisalhamento puro. A tensão de escoamento irá ocorrer em uma tensão uniaxial quando:

$$\sigma_1 = \sigma_0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (10)$$

Substituindo estes valores na equação 11, encontra-se:

$$K = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

O critério de escoamento de Von Mises para estado de tensões biaxiais é representado pela intersecção de um cilindro com a coordenada do plano $\sigma_3 = 0$, e:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_0^2 \quad (12)$$

que dá uma elipse da Figura 18, a intersecção da superfície de Von Mises no espaço geral das tensões com o plano $\sigma_x - \tau_{xy}$ é também uma elipse dada por:

$$\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 = \tau_0^2 \quad (13)$$

2.7 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A curva limite de conformação é muito utilizada na estampagem, pois determina as deformações que o material pode vir a sofrer. Segundo Lora (2009) a curva limite de conformação é muito utilizada como uma análise de falhas dos materiais, sendo que levam em conta as deformações no processo de estampagem. Dentre os ensaios para

levantamento da CLC temos o Marciniak e o Nakazima. O ensaio Nakazima é muito utilizado para pesquisa e pelas empresas com o auxílio de um ferramental simples e corpos de prova de várias larguras.

De acordo com Bastos (2009) o ensaio Marciniak difere do ensaio Nakazima principalmente na deformação do corpo de prova e de um *dummy blank* (espaçador) posicionado na superfície, que impede que ocorra contato direto entre o punção e a chapa. Outra diferença está no formato das chapas que são circulares com entalhes circulares de raios variados, Figura 19.

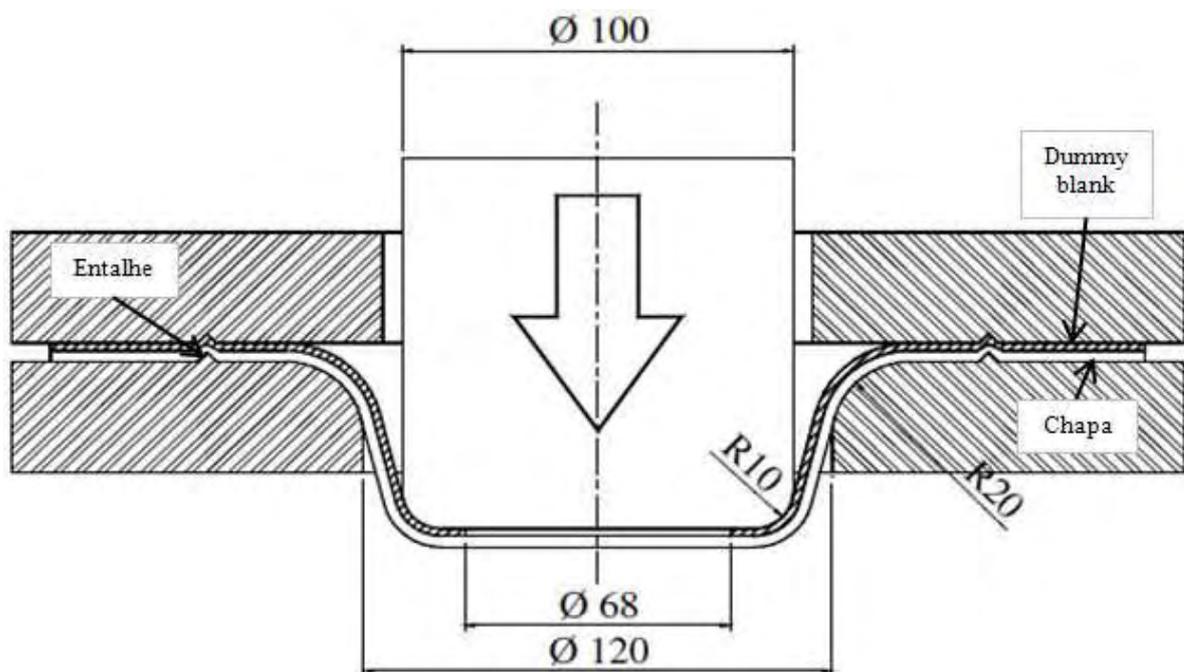


Figura 19 – Ferramenta para execução do ensaio Marciniak (adaptado SANTOS, 2007).

No ensaio Nakazima é permitido com uma única ferramenta reproduzir estado de tensões uniaxiais e biaxiais, por meio de deformações impostas por punções semi-esféricos em chapas metálicas retangulares que variam de largura e são fixadas por prensa-chapas, Figura 20.

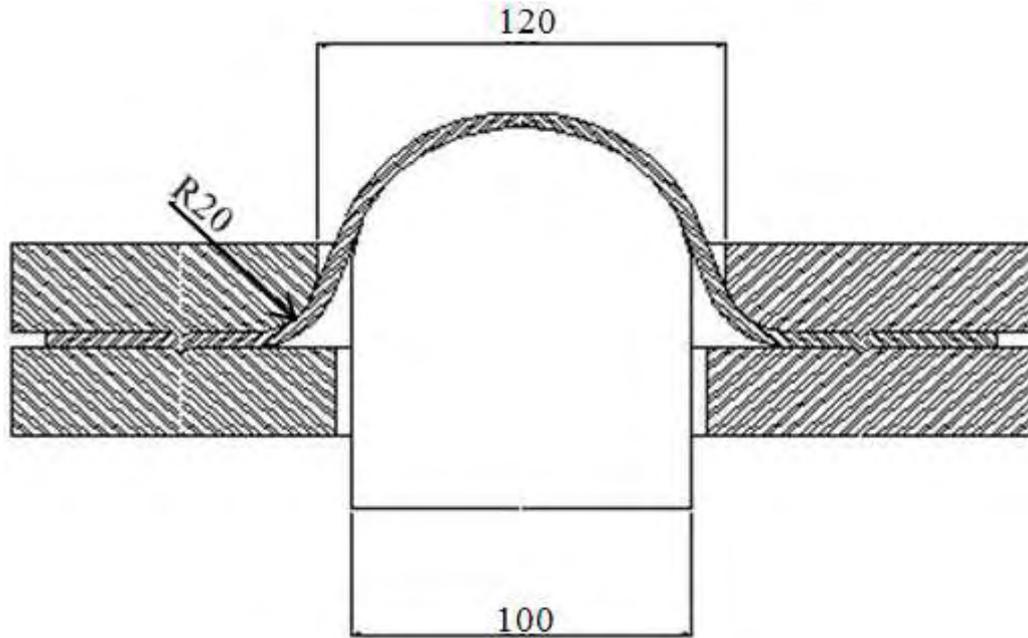


Figura 20 – Ferramenta para execução do ensaio Nakazima (SANTOS, 2007).

Santos et al (2007) realizaram uma comparação entre o ensaio Marciniak e o Nakazima, para a avaliação de uma chapa de alta estampabilidade. Chegaram á conclusão que, para o ensaio Marciniak é inviável de trabalhar com *dummy blank* de pequenas espessuras, pois, rompem durante o ensaio. A condição que mais se aproximou ao ensaio Nakazima foi quando utilizaram o *dummy blank* com 2mm de espessura e furo de 50mm. O *dummy blank* são chapas com furo central colocadas entre o punção e o corpo de prova, para que se reduza o atrito com a face frontal do punção. Entre o corpo de prova e o *dummy blank* não há lubrificação nenhuma, para aumentar o atrito e impedir o movimento relativo, enquanto que, entre o punção e o *dummy blank* há lubrificação, para diminuir o atrito e facilitar o escoamento. E a finalidade do furo do *dummy blank* é que o punção não passe por ele, e assim não entre em contato com o corpo de prova. Nos dois ensaios os modos de deformação são simulados, variando-se a largura dos corpos de prova. A simulação é mais adequada com o estiramento equi—biaxial à medida que se aumenta a largura dos corpos de prova, Figura 21.

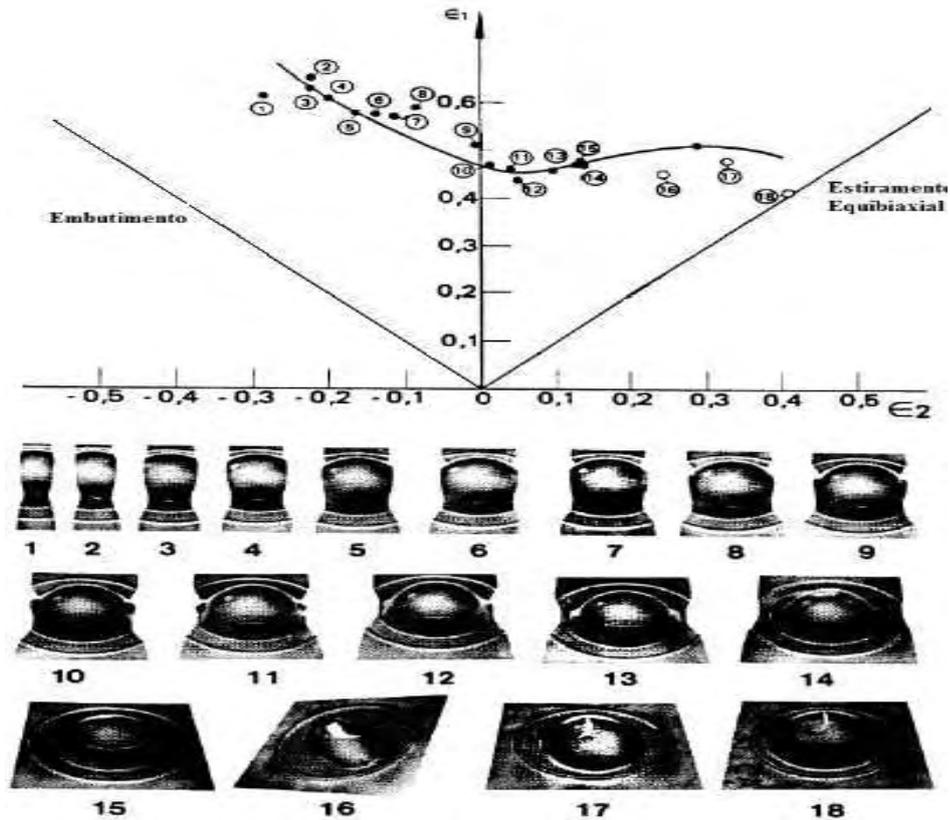


FIGURA 21 – Simulação de diversos modos de deformação para a construção da CLC (SANTOS, 2007).

A curva limite de conformação nada mais é de que um diagrama empírico que descreve as deformações sofridas por um corpo no momento da estampagem. A curva CLC permite avaliar as condições das deformações para diversos materiais, e assim conhecer a influência do atrito e da lubrificação ideal para diversos materiais com comportamento mecânicos diferentes, Figura 22.

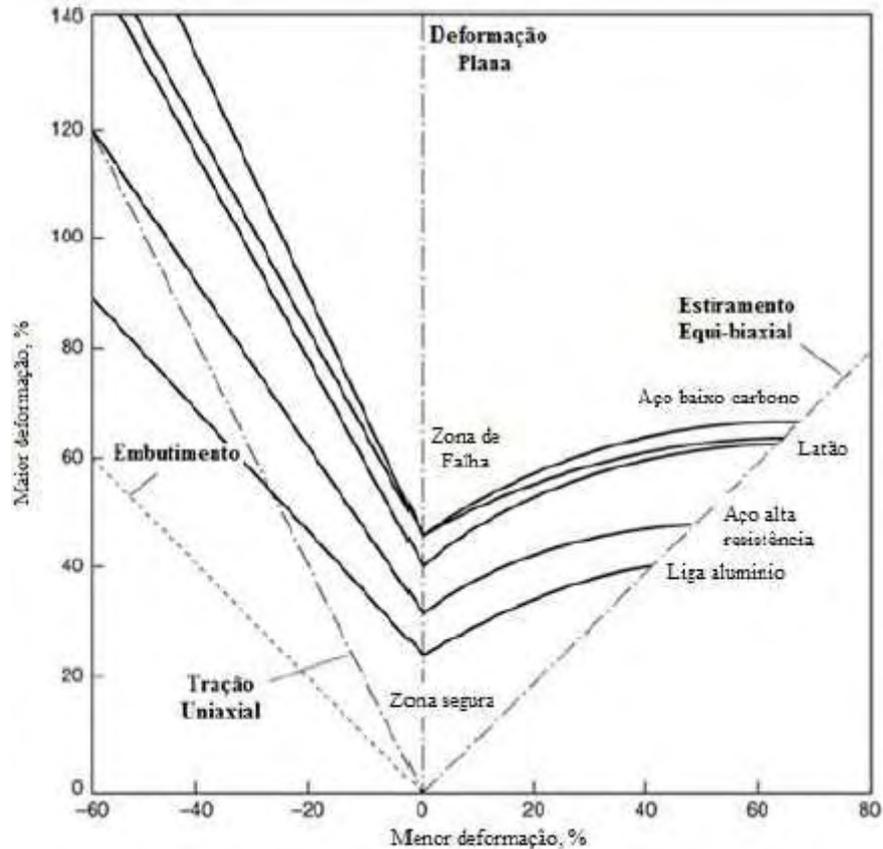


Figura 22 – Curvas CLC's para diversos materiais (BASTOS, 2009).

2.8 TENSÃO RESIDUAL

Tensões residuais são tensões internas que permanecem em um corpo mesmo que o carregamento externo seja retirado. Segundo Amoros (2008) as tensões residuais são uma resposta elástica do material a uma distribuição não homogênea de deformações não elásticas, como por exemplo, as deformações plásticas no processo de conformação, sendo assim todos os processos de manufatura podem ocasionar tensões residuais. As Figuras 23 e 24 representam esquematicamente, respectivamente as tensões e as deformações desenvolvidas em um copo metálico submetido à estampagem profunda.

O processo de estampagem pode submeter uma chapa plana em um estado complexo de tensões e deformações, sendo dependentes da geometria complexa da peça e da resistência à conformação do material. As tensões podem variar conforme a

retirada do elemento para a devida análise, conforme as peças cilíndricas podem ter três estado de tensões, no flange, no fundo e na lateral.

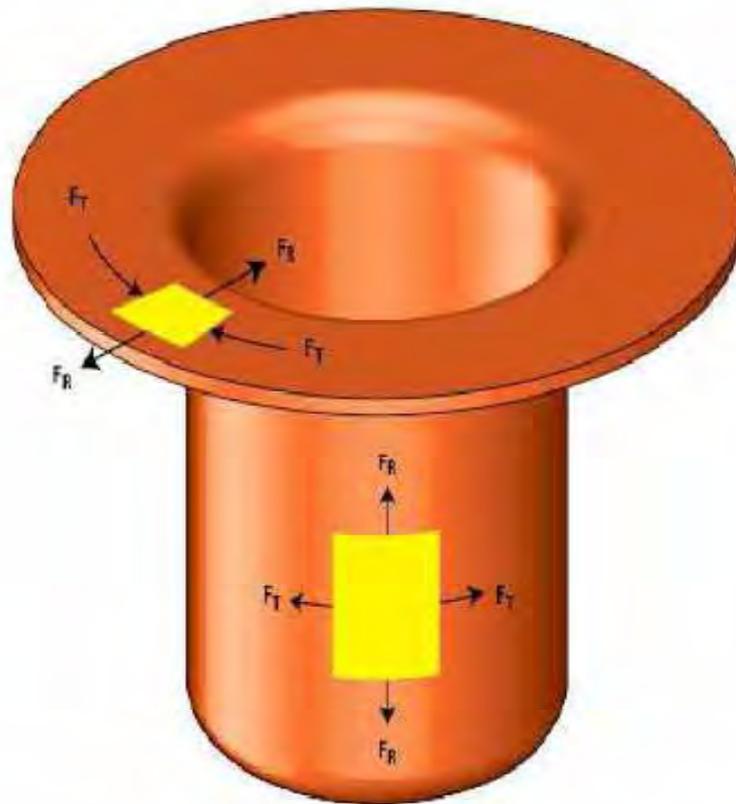


Figura 23 – Tensões e deformações na estampagem (METAL FORMING SCHULER, 1998).

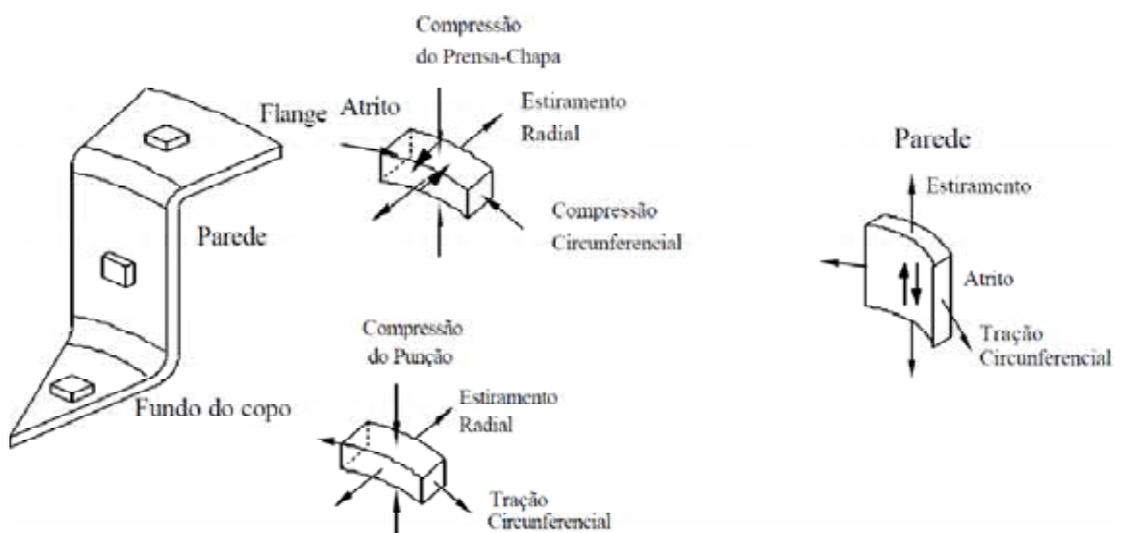


Figura 24 – Principais tensões atuantes na estampagem.

Pela análise da Figura 24 entende-se que no flange do copo ocorrem tensões de compressão circunferencial e tensões de estiramento radial, sendo assim, as tensões compressivas são maiores, pois, o punção força o material para dentro da matriz. Com o avanço do punção aumentam as forças compressivas, e para evitar o enrugamento do material utiliza-se prensa-chapas, que produz tensões compressivas que evitam o aumento da espessura sem evitar que o material escoe para dentro da matriz. Na parede do copo temos tensões trativas no sentido radial, devido ao estiramento uniforme e deformação plana. Já no fundo do copo ocorrem tensões trativas no sentido circunferência e radial, caracterizando uma zona de estiramento biaxial, em decorrência do contato produto punção e matriz.

Todos os produtos metálicos estão sujeitos a desenvolver tensões residuais nas operações de conformação do metal, e todos os processos de conformação tem um objetivo em comum, obter a forma desejada (HANDBOOK , 2002).

As tensões residuais podem ser divididas em macrotensões e microtensões, de acordo com as distâncias que elas se apresentam significantes variações. A primeira varia de forma contínua e suave ao longo de grandes porções volumétricas do corpo, e a última mantém uma distribuição acentuada ao longo de um grão ou partículas. Essas duas condições das tensões residuais são consequência de deformações plásticas heterogêneas causadas por forças externas, e no processo de conformação a frio são referidas principalmente como macrotensões (HANDBOOK, 2002; RODRIGUES, 2007).

Segundo Rodrigues (2007) as tensões residuais são autoequilibrantes, isto quer dizer que qualquer perturbação externa como remoção de material ou aplicação de carregamentos térmicos ou mecânicos, altera o seu estado e causa redistribuição das tensões de modo que se equilibrem novamente.

Zolotorevsky e Krivonosova (1995) analisaram o efeito da anisotropia plástica nas tensões residuais na rede de cristais CCC, no caso arames de aço trefilados severamente. De acordo a análise, tensões laterais se desenvolveram dentro de cristais individuais da ferrita resultante da anisotropia plástica. Os resultados mostraram microtensões agindo dentro dos cristais individuais da ferrita, tensões de tração ao

longo do eixo [111] e tensões compressivas ao longo do eixo $[\bar{1}\bar{1}0]$, sendo os resultados baseados na anisotropia plástica em condições de deformação assimétrica.

Martins et al., (2005) analisaram o efeito das tensões residuais em válvulas estampadas através da difração de raios-x e também por elementos finitos. Os resultados se mostraram bem próximos, evidenciando a efetividade dos dois métodos, tanto da operação de corte por estampagem como para a cunhagem.

Rabag e Orban (1998) fizeram um trabalho experimental no qual avaliaram o efeito da modificação da matriz de estampagem, na magnitude e distribuição das tensões residuais na estampagem profunda. Os resultados evidenciaram que as propriedades mecânicas têm influência nos níveis das tensões residuais. A maior magnitude das tensões pode ser explicada pela maior taxa de encruamento, sendo que maior taxa de encruamento dará maior variação das tensões durante a deformação.

2.9 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Há vários métodos para medição das tensões residuais, que foram se desenvolvendo ao longo de muitos anos, e cada qual com a sua particularidade e aplicabilidade podendo ser destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos.

Os métodos destrutivos são aqueles que descartam a utilização da amostra analisada, ou seja, a peça deverá ser sucateada, no semi-destrutivos a peça de amostra poderá ser recuperada após a medição, e no método não destrutivo não ocorre nenhum dano na amostra analisada, podendo ser utilizada normalmente após a medição.

Dentre os métodos destrutivos podemos destacar a remoção de camadas do material para alívio das tensões residuais, no método semi-destrutivo destacamos a utilização do furo cego e dos métodos não destrutivo a utilização da difração de raios-X para a medição das tensões residuais.

Na Tabela 1 se encontra um resumo das principais técnicas de medição das tensões residuais.

Tabela 1- Principais técnicas de medição das tensões residuais (Adaptado AMOROS, 2008).

Descrição	Furo cego	Seccionamento	Deflexão	Raios-X	Difração de Nêutrons	Ultrassom	Magnético
Tipos de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Microscópica; Microscópica	Microscópica; Microscópica	Macroscópica; Microscópica; Submicroscópica	Macroscópica; Microscópica; Submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deflexão	Mudança do espaçamento interplanar do material cristalino	Mudança do espaçamento interplanar do material cristalino	Varição da velocidade da onda ultrassônica	Amplitude do ruído Barkhausen Ou Permeabilidade magnética
Área de análise mínima	0,5mm ²	100mm ²	1000mm ² ; 100mm ² Strain gages	0,5mm ²	4mm ²	0,1mm ² alta frequência e 30mm ² no método convencional	1mm ² Barkhausen e 100mm ² com permeabilidade magnética
Mínima profundidade de análise	20µm	1 a 2mm	20µm	Dezenas de micrômetros	1mm	15 a 300 µm	100 µm
Incerteza típica	+20MPa	+10MPa	+30MPa	+20MPa	+30MPa	+10 a +20MPa	+10 a +20MPa
Tempo de preparação	2h	5 a 200h	8h	8h	1 semana	20 minutos	10 minutos
Tempo de medição	40min	40 min	30min	20 min	2h	Poucos minutos	Instantâneo
Custo do equipamento \$	10 a 50000	15000	1000	100.000 a 200.000	Centenas de milhões	40000 a 200000	10.000 a 60.000

2.9.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A medição das tensões através da difração de raios-x foi aplicada pela primeira vez em 1925, e os resultados eram gravados em filmes fotográficos.

Vieira et al. (2008) estudaram a distribuição do campo das tensões residuais em solda de reparo através da difração de raios-X. Segundo os resultados encontrados, o campo das tensões tinha quatro pontos críticos de concentração das tensões conforme critério de escoamento de Tresca, onde a tensão cisalhante máxima tinha valores extremos.

Esta técnica se baseia na teoria de difração de raios-X para materiais cristalinos, e também na elasticidade do corpo sólido. As tensões são definidas a partir da deformação da estrutura cristalina do material causadas pelas tensões residuais.

As deformações são medidas conforme a lei de Bragg: $\lambda = 2d \sin\theta$, através do deslocamento da linha de difração. Os princípios da técnica de dupla exposição estão baseados na determinação de duas componentes de deformação: $\varepsilon_{\varphi, \psi_1}$, e $\varepsilon_{\varphi, \psi_2}$. Sendo a deformação medida através da equação:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \text{sen}^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (14)$$

Então a diferença entre as duas componentes da deformação é:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi_2} - \varepsilon_{\varphi, \psi_1} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} (\text{sen}^2 \psi_2 - \text{sen}^2 \psi_1), \quad (15)$$

sendo E e ν as constantes elásticas do material, ψ e φ são os ângulos polar e azimutal, σ_{φ} - componente medida de tensão, σ_1 e σ_2 são as tensões principais. Da equação 15 a componente, σ_{φ} é igual a:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\varepsilon_{\varphi, \psi_2} - \varepsilon_{\varphi, \psi_1}}{\text{sen}^2 \psi_2 - \text{sen}^2 \psi_1}, \quad (16)$$

Derivando a lei de Bragg:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} = - \text{ctg} \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0), \quad (17)$$

onde $d_{\varphi, \psi}$, d_0 e $\theta_{\varphi, \psi}$, $-\theta_0$ são distâncias interplanares e os ângulos de difração para materiais com e sem tensões respectivamente. Usando as equações (16) e (17), temos:

$$\sigma_{\varphi} = - \frac{E}{1+\nu} \frac{- \operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_{\varphi}, \psi_2 - \theta_{\varphi}, \psi_1)}{\operatorname{sen}^2 \psi_2 - \operatorname{sen}^2 \psi_1}. \quad (18)$$

Desta maneira, para determinar qualquer componente de tensão é necessário medir os ângulos de difração correspondentes às reflexões dos planos cristalinos com normais caracterizadas pelos ângulos ψ_1 e ψ_2 .

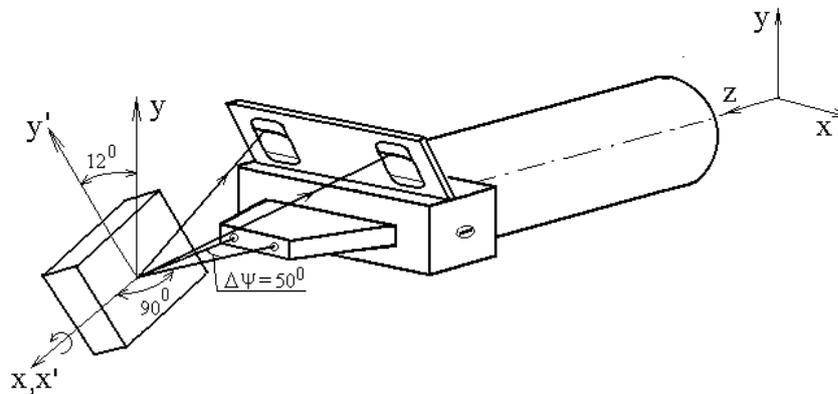


Figura 25 - Esquema de medição das tensões com o equipamento portátil (VIEIRA et al., 2008).

Os ângulos usados no equipamento são $\psi_1 = 0^\circ$ e $\psi_2 = 50^\circ$ e para se medir as tensões é usada geometria de “ ψ – goniômetro” Figura 25. Sendo a precisão de medição do valor absoluto da tensão deste equipamento de aproximadamente 10Mpa.

Esta técnica é limitada para estado de tensões uniaxial e biaxial. Para muitas aplicações, onde a falha por fadiga está envolvida isto não é uma séria desvantagem, pois a maioria das falhas ocorrem na superfície do material. O raios-X têm a vantagem de ser um método não destrutivo, portanto, não envolve corte ou remoção de camadas do componente que deverá ser medido, e não é sempre necessário medições do corpo de prova isento de tensões (DIETER, 1961).

2.9.2 MÉTODO MAGNÉTICO

É entendido que a magnetização de materiais ferromagnéticos como o aço-carbono tem uma interação com a deformação elástica. Esta interação é chamada de

magnetoestricção, deformação da rede resultante do alinhamento dos momentos magnéticos atômicos com as regiões magneticamente ordenadas chamada domínios, assim sendo, esse recurso tem sido utilizado para medir as tensões (ROSKOSZ e GAWRILENKO, 2008).

O método magnético permite localizar a posição dos pontos onde as tensões são críticas. O método mapeia a diferença dos valores das tensões principais, cujo módulo é proporcional à tensão cisalhante máxima.

Vieira et al. (2008) fizeram um estudo para a avaliação das tensões residuais em solda de reparo fazendo mapeamento em tempo real do estado das tensões residuais através do método magnético, Figura 26. Os pontos 1 e 5 resultaram no valor mínimo para tensões, e os pontos 7 e 3 para os valores máximos, Figura 27. Assim sendo, o método se mostrou eficiente para a medição das tensões residuais em materiais ferromagnéticos.

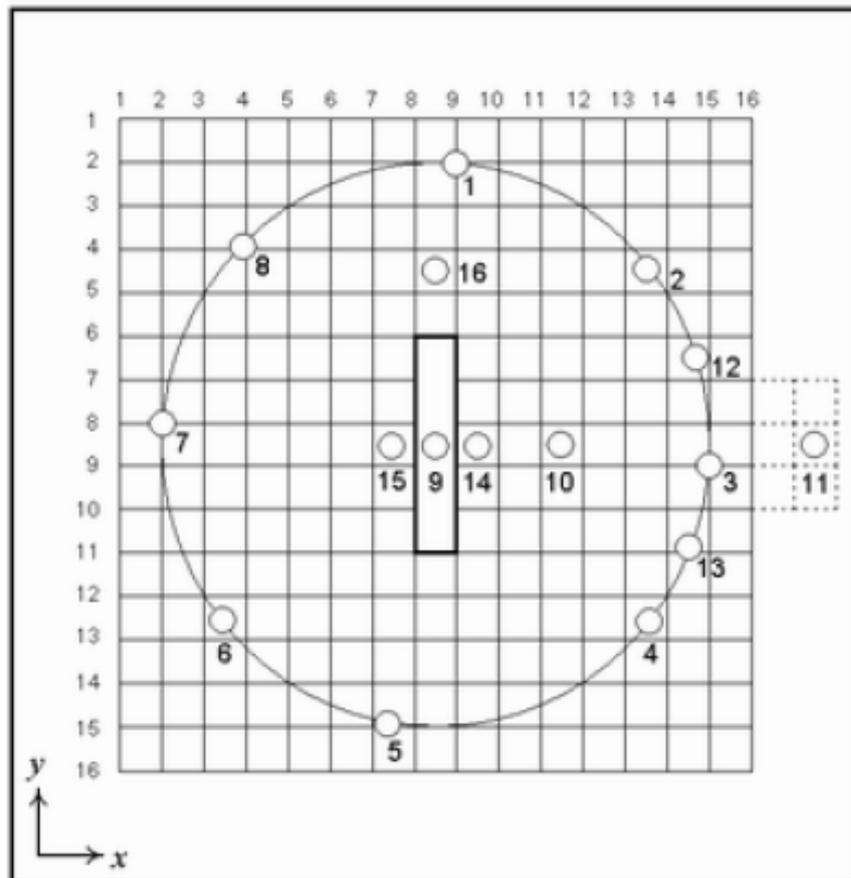


Figura 26 – Amostra com solda de reparo. Malha utilizada no método magnético (VIEIRA et al., 2008).

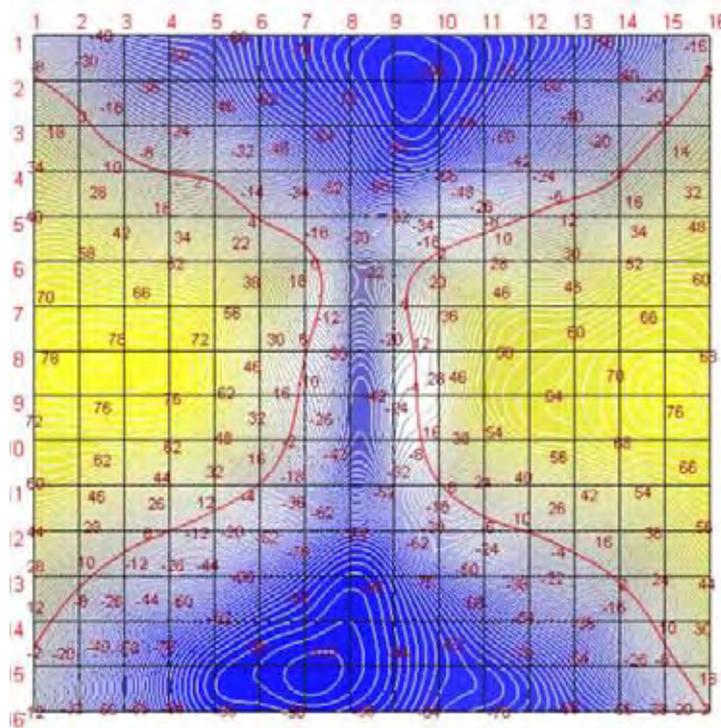


Figura 27 - Resultado do mapeamento da solda de reparo (VIEIRA et al., 2008).

Han et al. (2001) desenvolveram um modelo para a medição das tensões através da magnetoestricção do aço carbono sob campos magnéticos ortogonais. Este modelo permitiu calcular tensões residuais biaxiais e uniaxiais, e também este método tem a possibilidade de monitorar a integridade de uma estrutura contra os danos da fadiga.

Pulnikov et al. (2004) investigaram as tensões residuais através de medição magnética, e concluíram que o estudo pode ser utilizado para definir as tensões no material devido à deformação plástica, sendo que, as medidas magnéticas mostraram diminuição na permeabilidade, e que isto está atribuído ao aumento da densidade das discordâncias.

Roskosz e Gawrilenko (2008) analisaram o campo magnético residual em amostras com entalhes, sendo que, o campo magnético residual de um material ferromagnético pode ser afetado por diversos fatores físicos. Estes são: o efeito magneto-mecânico, o efeito de fuga do campo magnético gerado por uma descontinuidade macroscópica ou uma heterogeneidade estrutural do material, e os processos de interação mútua de campos magnéticos com deslocamentos e sua acumulação.

Para o mapeamento das tensões neste trabalho neste trabalho foi utilizado um equipamento magnético portátil, que emprega o efeito inverso da magnetoestricção, com sensor do tipo MAS (sensor magneto-anisotrópico). O efeito inverso da magnetoestricção consiste em variação de magnetização do material ferromagnético sujeito a tensões mecânicas devido a mudanças na estrutura dos domínios magnéticos.

O sensor MAS utilizado tem duas bobinas na forma de U posicionadas entre si nas direções ortogonais. Uma delas é a da indução (magnetização), e a outra da detecção, Figura 28. A bobina de indução produz uma onda eletromagnética que, passando pela material, gera uma onda refletida, captada pela bobina de detecção. Seja uma onda senoidal com intensidade do campo magnético H_0 e frequência ω transmitida na direção do eixo z ortogonal a superfície do metal. Para semi-espço ferromagnético com permeabilidade magnética μ temos a intensidade do campo magnético H na profundidade z :

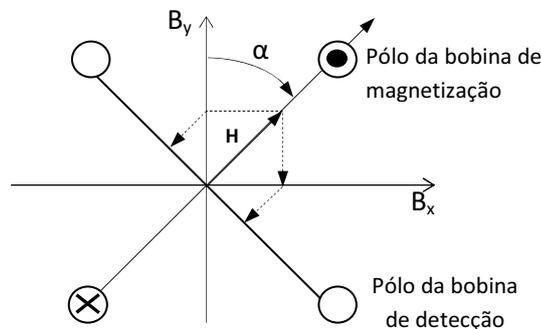


Figura 28 - Esquema do funcionamento do sensor magneto-anisotrópico (VIEIRA et al., 2008).

$$H = H_0 \cdot \exp(ikz) \quad (20)$$

onde $k = \frac{i+1}{\delta}$ e $\delta = C\sqrt{2\pi\mu\omega}$. Considerar que o ângulo α entre a direção do H e uma das direções de tensão mecânica principal é de 45° . O fluxo magnético registrado pela bobina de detecção é proporcional à projeção do vetor da indução magnética B na

direção entre os pólos da bobina. A força eletromotriz induzida na bobina de detecção fica:

$$dU = M(B_X - B_Y) \exp(2ikz) dz, \quad (19)$$

Sendo M é um coeficiente que caracteriza as propriedades do metal analisado. Integrando com relação à espessura h da camada, encontra-se o sinal captado pela bobina de detecção:

$$U = \frac{MH}{2} \int_0^h \left(\mu_x(z) - \mu_y(z) \right) \exp(2ikz) dz, \quad (20)$$

Com variação da tensão mecânica σ variam também as permeabilidades magnéticas na direção longitudinal μ_x e transversal μ_y . Esta variação é proporcional a σ , ou seja: $\mu_x - \mu_y = \beta \cdot \sigma$, onde β é constante do material. Assim, para voltagem captada pelo sensor temos:

$$U = A \int_0^h \sigma(z) \cdot \exp(2ikz) dz, \quad (21)$$

onde A – é uma constante específica do sensor. Desta maneira o sensor registra valor σ_{reg} da desmodulação em amplitude da onda com frequência ω . Utilizada posteriormente para encontrar a diferença entre os valores das tensões principais, cujo módulo é igual ao dobro do valor da tensão cisalhante máxima, utilizada diretamente no critério do escoamento de Tresca.

$$\sigma_{reg} = \frac{\int_0^h \sigma(z) \exp(2ikz) dz}{\int_0^h \exp(2ikz) dz}. \quad (22)$$

2.10 ALÍVIO DA TENSÃO RESIDUAL ATRAVÉS DE VIBRAÇÕES

O alívio das tensões residuais utilizando-se de vibrações mecânicas, como uma alternativa ao tratamento térmico para a redução das tensões residuais em estruturas e componentes, tem sido discutida nos últimos de 66 anos.

O processo de vibrações mecânicas pode ser uma opção ao tratamento térmico para aliviar tensões residuais, pois, as empresas realizam tratamentos térmicos de maneira inadequada, sem nenhum controle da microestrutura do produto.

Crisi e Mendonça (2006) fizeram um estudo para comparar o alívio das tensões residuais em componentes soldados, pelo tratamento térmico e vibração mecânica. Eles concluíram que nas amostras tratadas termicamente houve uma redução na resistência a tração e aumento no alongamento, ao contrário da amostra tratada através de vibrações, a qual não houve nenhuma alteração nessas propriedades, e também a energia no teste de impacto para os dois casos praticamente foram as mesmas. A dureza resultante para ambos os tratamentos foram similares, provando assim a redução das tensões residuais.

Dentre os métodos para alívio das tensões por tratamento térmico podem ser destacados dois métodos, o aquecimento parcial da estrutura e o alívio pelo aquecimento total da estrutura. Sendo que, a primeira opção é difícil de controlar a temperatura ao longo das faixas localizadas aquecidas, tornando a eficácia do processo questionável (BERGAMO, 2006).

Walker et al. (1994) fizeram uma investigação do alívio das tensões residuais pelo processo de vibração com a atuação de cargas cíclicas, em chapas de aço laminadas, Figura 29, com a necessidade de validação do VSR, para fornecer uma explanação racional de seus efeitos para oferecer confiança para ser usado de maneira quantitativa e controlada. Nos estudos eles sugerem devido às evidências que o mecanismo em que se dá o alívio das tensões residuais ao que ocorre na difusão.

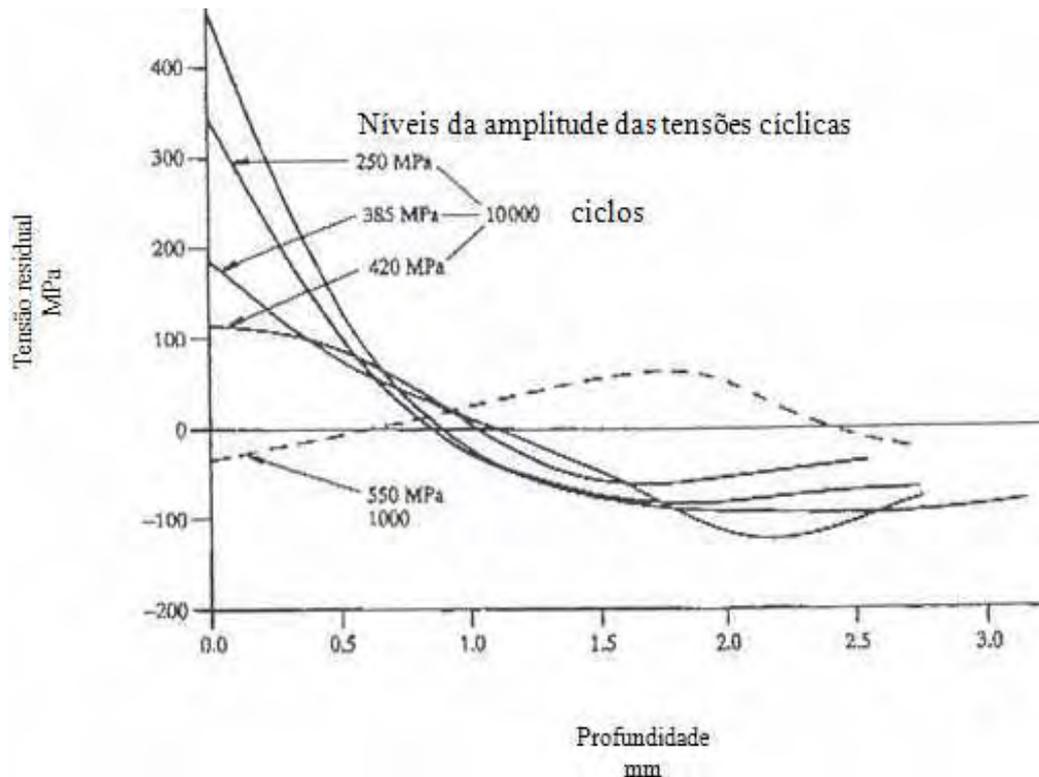


Figura 29 – Efeito do carregamento cíclico no alívio das tensões na superfície (WALKER et al., 1994).

Lara et al (2011) investigaram os efeitos dos vários tratamentos térmicos sobre as tensões residuais em peças forjadas a frio. Neste estudo ficou confirmado que tratamentos de recozimento e normalização não é recomendado quando a intenção é o aumento de resistência à fadiga de peças forjadas, no entanto, a têmpera seguida do revenimento mostraram-se favoráveis.

De acordo com Hornsey (2004) a aplicação de vibrações para alívio das tensões residuais não é para ser um substituto dos tratamentos térmicos, sendo que, cada tratamento tem a suas vantagens e desvantagens. O alívio das tensões residuais através de vibrações pode ser usado em qualquer fase do processo de fabricação, eliminando os inconvenientes dos tratamentos térmicos como incrustações e alteração dimensional, e dispensa longos tempos de consumo de energia.

Ainda segundo Hornsey o processo envolve a vibração de estruturas metálicas em condições de ressonância e sub-ressonância utilizando excitadores de força elevada. O período dos tratamentos são curtos com frequência entre 10-230hz, usando

apenas 220V e tempo do tratamento de aproximadamente de 30min. Sendo assim, por se tratar de um processo rápido, e pela ausência de embasamento teórico, impede alguns engenheiros de aceita-lo como um tratamento viável.

Yang (2007) desenvolveu um modelo de elementos finitos para prever tensões residuais em solda e simular o alívio através de vibrações. Na simulação foram estudadas as vibrações ressonantes e sub-ressonantes para entender o mecanismo de alívio das tensões. Verificou-se que para vibração não ressonante a redução das tensões depende muito da amplitude da vibração, e para vibração ressonante, a frequência da vibração é essencial na redução das tensões. E também em ambos os modos de vibração desejado na redução das tensões residuais, a frequência de vibração deve ser perto da frequência natural da estrutura.

Luh e Hwang (1998) aplicaram o alívio das tensões através de vibrações com a utilização de frequência ressonante em uma liga de alumínio 6061- T6, sendo as amostras soldadas pelo processo TIG. Nos estudos eles sugerem que o mecanismo em que se dá o alívio das tensões residuais, é em função do movimento das discordâncias.

Dawson e Moffat (1980) estudaram o efeito do alívio das tensões pela técnica de vibrações ressonantes, os estudos mostraram a eficiência do processo na eliminação das tensões residuais na superfície da amostra de aço médio carbono estirado a frio.

Pelo processo de vibrações utilizado pela Bonal Technologies por meio da tecnologia Meta-Lax, no processo de alívio das tensões residuais de origem térmica, o processo funciona com alta energia de vibração na região de sub-harmônicos ou sub-ressonante, diz-se que todos os metais possuem um comportamento harmônico e não harmônico, Figura 30. Com a aplicação de vibrações há redistribuição das tensões, levando a curva harmônica ou ressonante a se movimentar, Figura 31. Quando o corpo está livre das tensões residuais ocorre a estabilização da curva na localização de sua frequência natural, Figura 32.

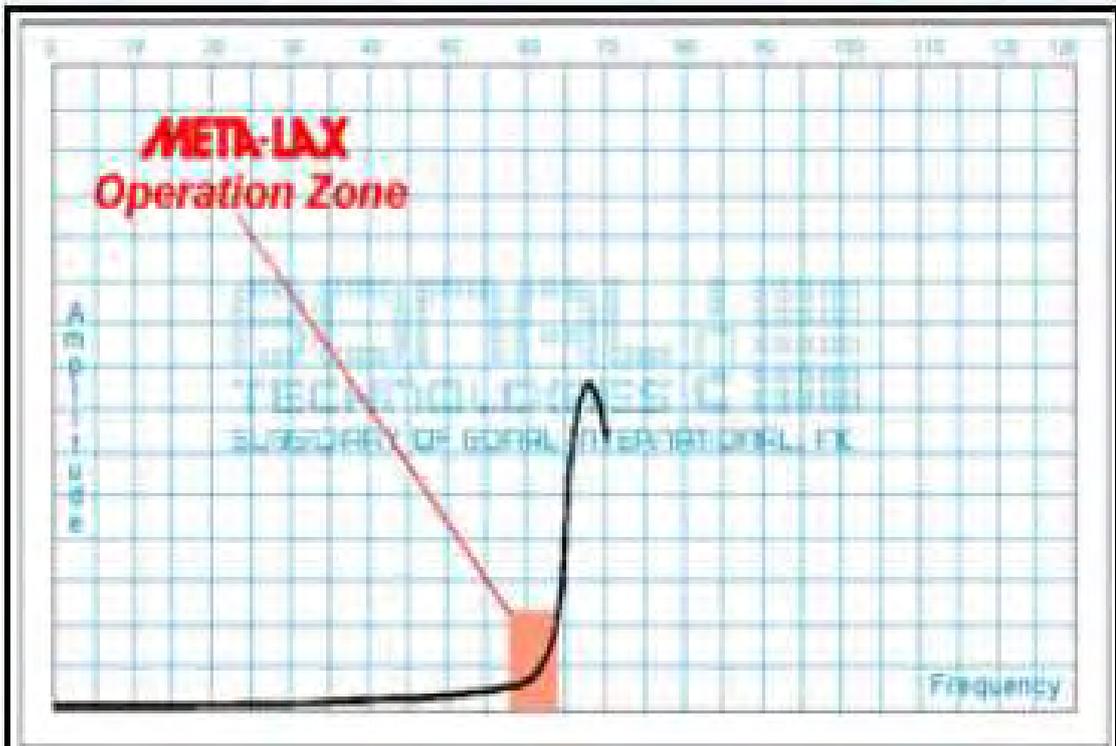


Figura 30 - Energia vibracional região sub-harmônica (BONAL TECHNOLOGIES).

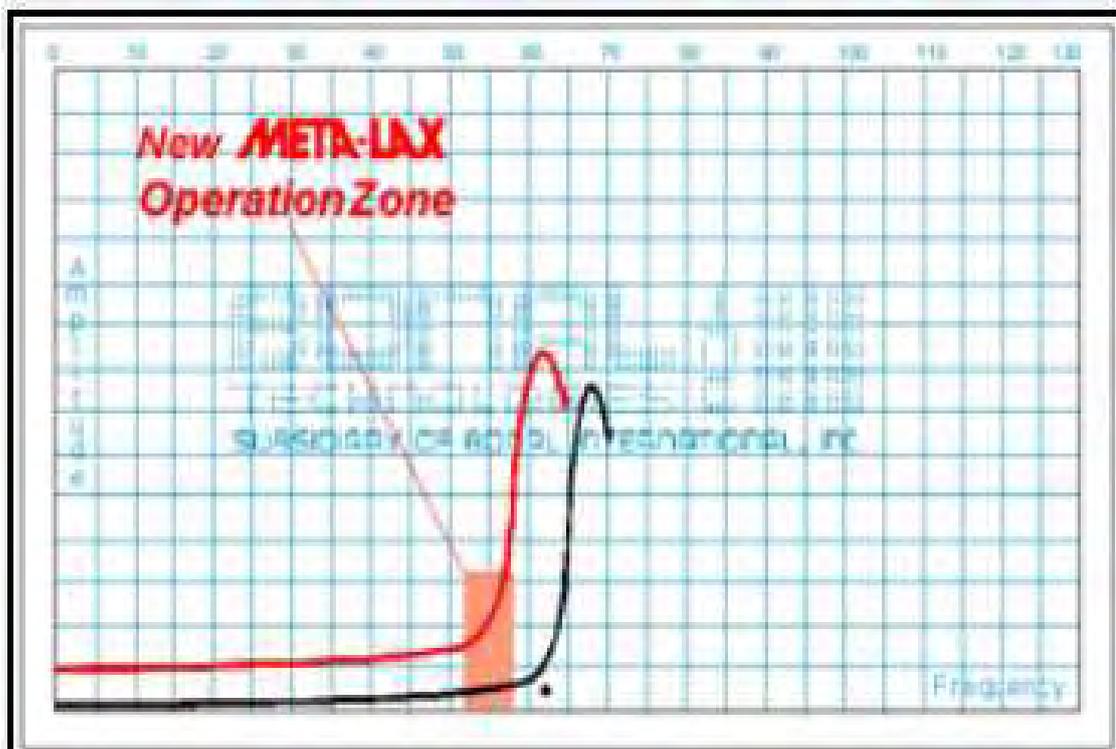


Figura 31 – Movimento da curva para a esquerda (BONAL TECHNOLOGIES).

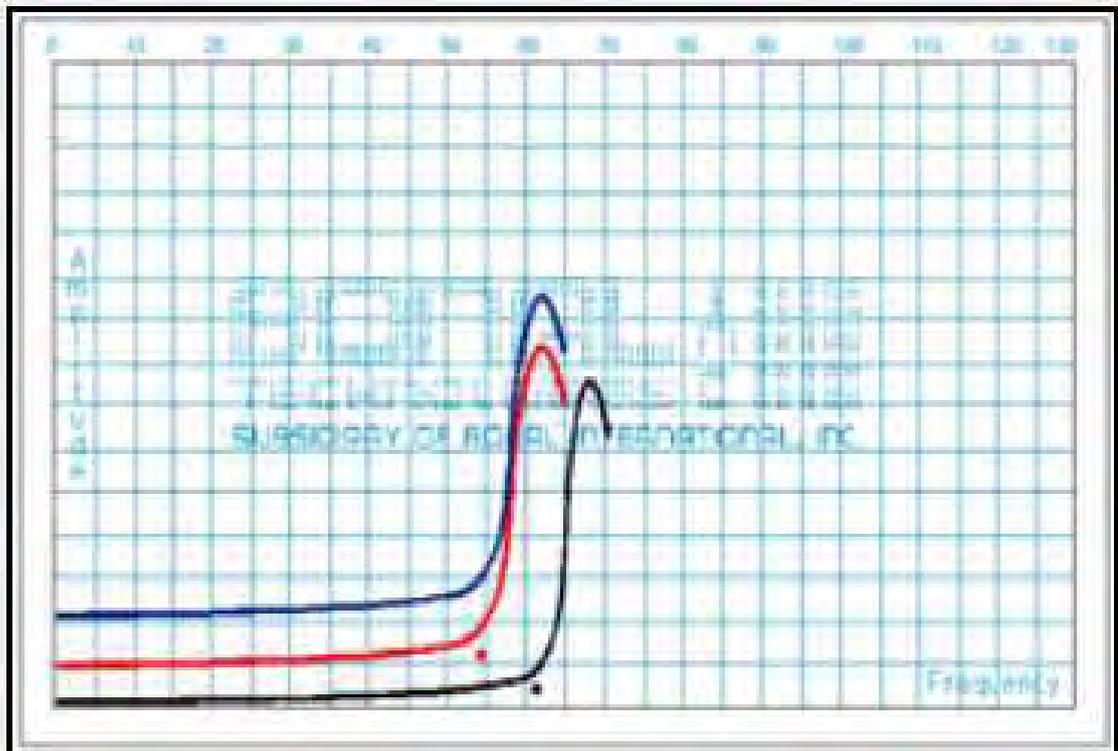


Figura 32 - Estabilização da curva com o alívio total (BONAL TECHNOLOGIES).

Outro processo de alívio das tensões residuais é realizado com o equipamento Fórmula 62, que é fornecido pela Stress Relief Engineering Company. Esta empresa utiliza vibrações ressonantes para alívio das tensões residuais, de acordo com a empresa o método de vibração na frequência de ressonância oferece redistribuição mais acentuada das tensões se comparada com outros métodos, como alívio das tensões na região sub-ressonante.

No processo do Fórmula 62 são introduzidas vibrações de alta frequência e baixa amplitude, por um período curto de tempo com base no peso da peça. Garantindo a manutenção da resistência a tração, ponto de escoamento e limite de resistência à fadiga.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL DA ANÁLISE

O material utilizado neste trabalho trata-se de uma travessa estrutural estampada a frio por meio de chapa de aço laminada a quente com 5mm de espessura conforme a norma NBR 6656 LNE-38, fornecido pela CSN. Trata-se de um aço estrutural acalmado ao alumínio para estampagem de longarinas travessas e suportes, sendo a composição química e as propriedades mecânicas constam nas Tabelas 2 e 3 respectivamente.

Tabela 2 – Requisitos da composição química, segundo NBR 6656

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	V
0,12	1,10	0,35	0,030	0,015	0,020/0,081	0,12	0,20	0,12

Tabela 3 – Requisitos das propriedades mecânicas, segundo NBR 6656

Propriedades	NBR-6656	Valor desejado
Limite escoamento (MPa)	380/530	400/440
Limite resistência (MPa)	460/600	
Alongamento mínimo $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ (%)	23	

O componente para estudo das tensões residuais foi conformado a frio. A prensa mecânica utilizada para o processo tem capacidade de 800 toneladas e a força necessária para a conformação da referida travessa é de aproximadamente 750 toneladas, sendo que no embutimento foi utilizado lubrificante comum sem especificação, no entanto, não especifica para esta operação. Na Figura 33 pode ser visualizada a operação de pré-forma e na Figura 34 a operação final de conformação do produto.



Figura 33 – Travessa pré- forma.

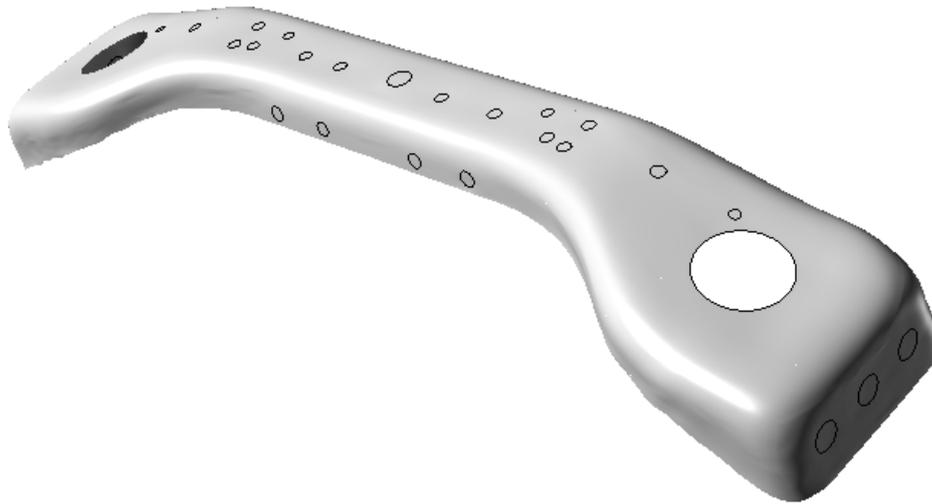


Figura 34 – Travessa forma final.

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Foram usinados corpos-de-prova para a execução do ensaio de tração, para cada condição de retirada da amostra da chapa para realização do ensaio, no sentido de laminação da chapa, 45° e 90°.

A representação da direção de extração das amostras está na Figura 35.

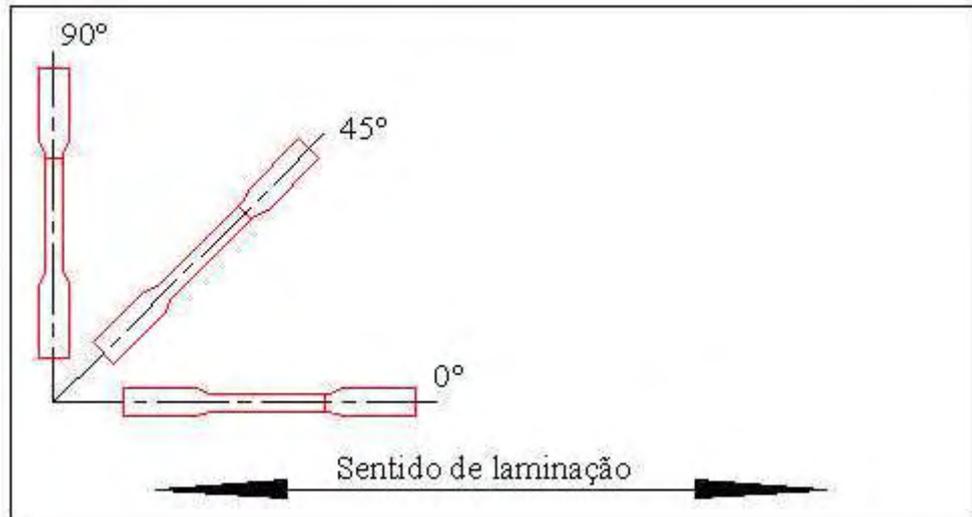


Figura 35 – Direção de extração do CDP

As dimensões para a confecção do CDP obedecem à Norma ASTM E8M, CDP tipo 1, Figura 36. Os ensaios de tração foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia na FEG/UNESP, em um equipamento servo-hidráulico universal da marca INSTRON modelo 8801, Figura 37.

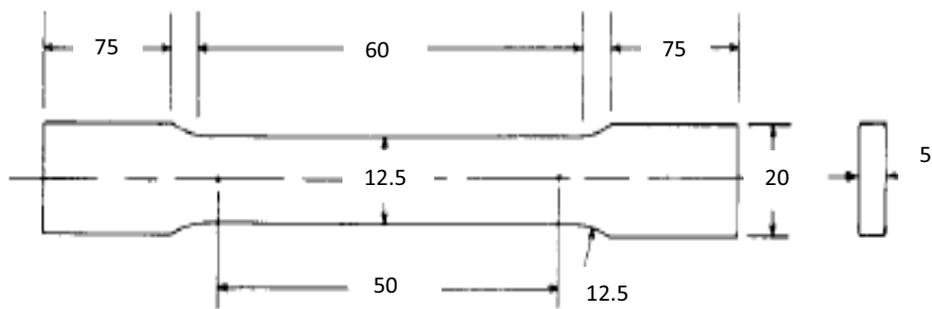


Figura 36 – Dimensões do cdp



Figura 37 – Máquina de ensaio universal INSTRON 8801

3.3 DUREZA VICKERS

Com a finalidade de verificar o aumento da resistência mecânica em função do encruamento pelo trabalho realizado a frio, foi realizado ensaio de dureza Vickers. Na Figura 38 é possível visualizar os dois pontos em vermelho, (a) área sem deformação plástica e (b) área com deformação plástica. O ensaio foi realizado no Departamento de Materiais e Tecnologia, sendo a carga utilizada de 98N com duração de 10s.

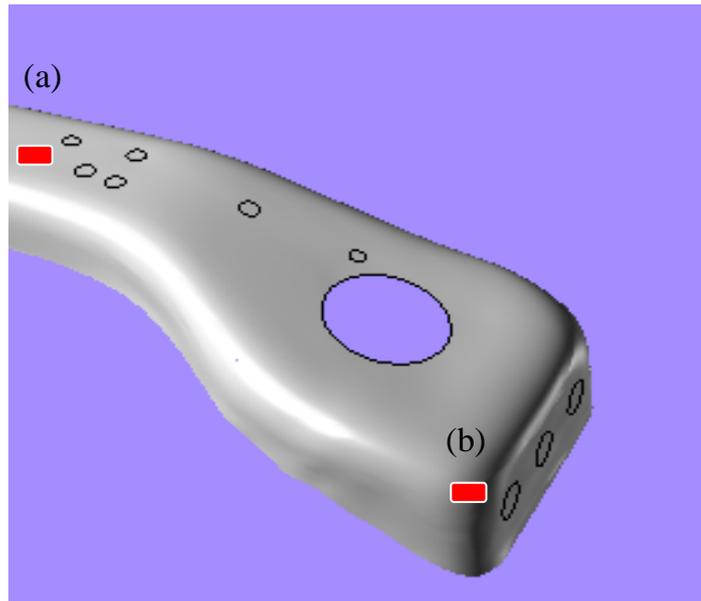


Figura 38 – Áreas de retirada das amostras para análise da dureza.

3.4 PROCESSO DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS

No processo de alívio das tensões residuais foi utilizado o equipamento portátil Meta-Lax. O sistema de vibração é composto por: 1 - indutor de força 2A para estruturas com peso de 70 a 9000kg e capacidade de energia de 350Kgf, com a finalidade de fornecer energia de vibração para a estrutura, 2 - console de controle Series 2700-CC, responsável pela interface e controle do indutor e armazenamento de dados, 3 - transdutor de força, responsável pela leitura e envio dos resultados ao console de controle, 4 – Lap Top com programa para aquisição dos dados, Figura 39.



Figura 39 – Equipamento portátil Meta-Lax para alívio das tensões residuais.

O equipamento de vibração trabalha com frequência de vibrações compreendidas entre 0 e 100Hz. Como a peça é relativamente leve em relação à faixa da carga de vibração, a peça foi fixada na mesa com um bloco de aço para compensar o peso de toda estrutura. Para que toda a estrutura pudesse vibrar livremente a mesa foi calçada com borrachas, Figura 40.

A frequência foi aumentada até atingisse o ponto de sua ressonância, então foi gerada a curva de frequência natural. A vibração foi mantida por um determinado tempo levando-se em consideração a dimensão, peso e material do componente em tratamento.

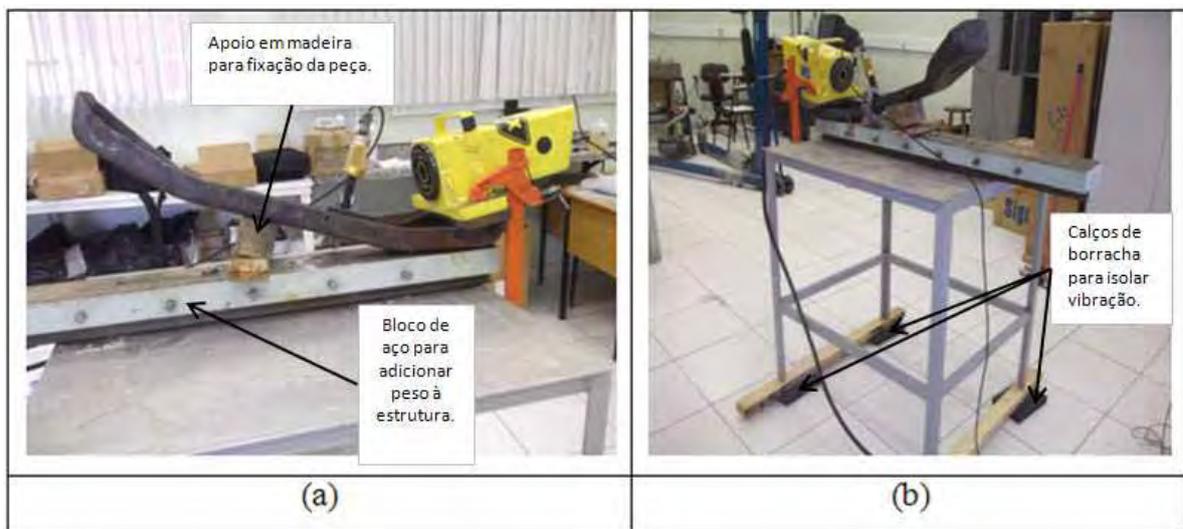


Figura 40 – Esquema de fixação da peça para vibração.

3.5 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Para a medição das tensões residuais da peça estampada a frio antes e após o tratamento de alívio das tensões residuais foram utilizados dois métodos, através do mapeamento dos valores relativos da tensão cisalhante máxima, utilizando o método magnético, e medição dos valores absolutos das tensões residuais, pela técnica de difração de raios-X.

As análises das tensões residuais foram realizadas com o equipamento portátil STRESSVISION utilizado para mapeamento da distribuição do valor relativo da tensão cisalhante máxima através do método magnético, Figura 41.



Figura 41 – Equipamento portátil STRESSVISION.

O equipamento utilizado é composto por: (1) – Sensor de tipo MAS ($\text{Ø}40\text{mm}$), (2) – Unidade de controle, (3) – Computador portátil para visualização dos resultados em tempo real.

As áreas de mapeamento da peça foram devidamente preparada por meio de malhas com passo uniforme de 10mm, assim sendo, a peça foi dividida em quatro áreas para mapeamento das tensões residuais, Figuras 42, 43, 44 e 45.

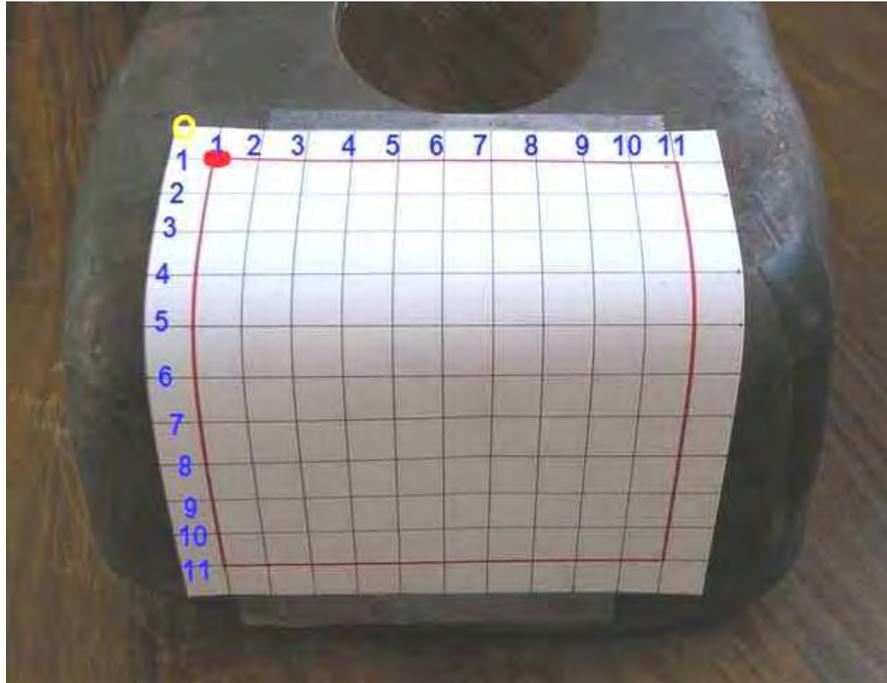


Figura 42 – Malhas para mapeamento área 1.

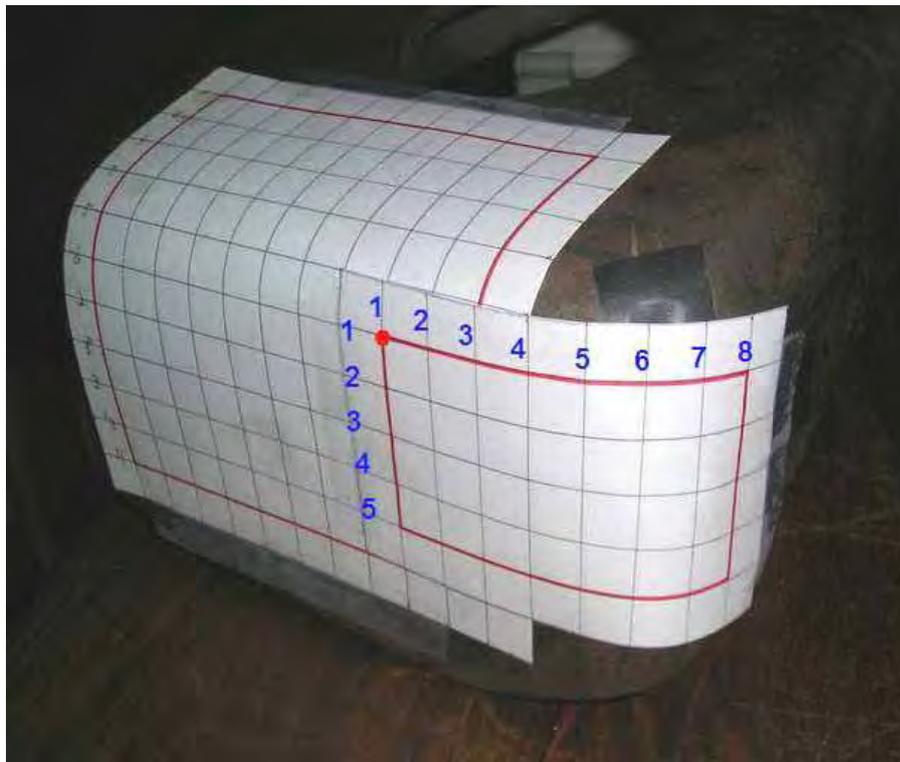


Figura 43 – Malhas para mapeamento área 2.

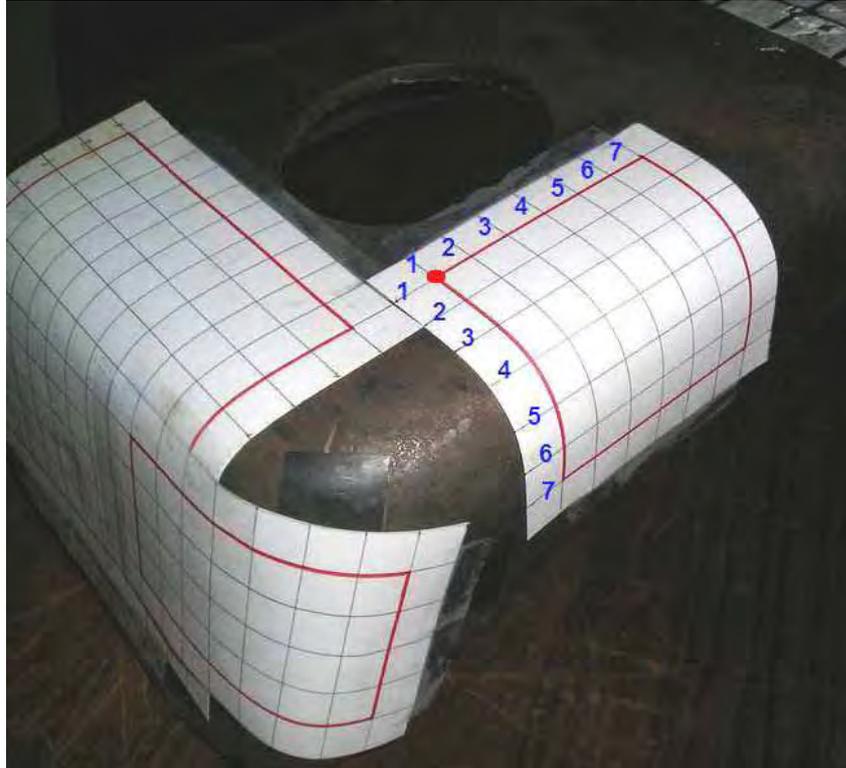


Figura 44 – Malhas para mapeamento área 3.

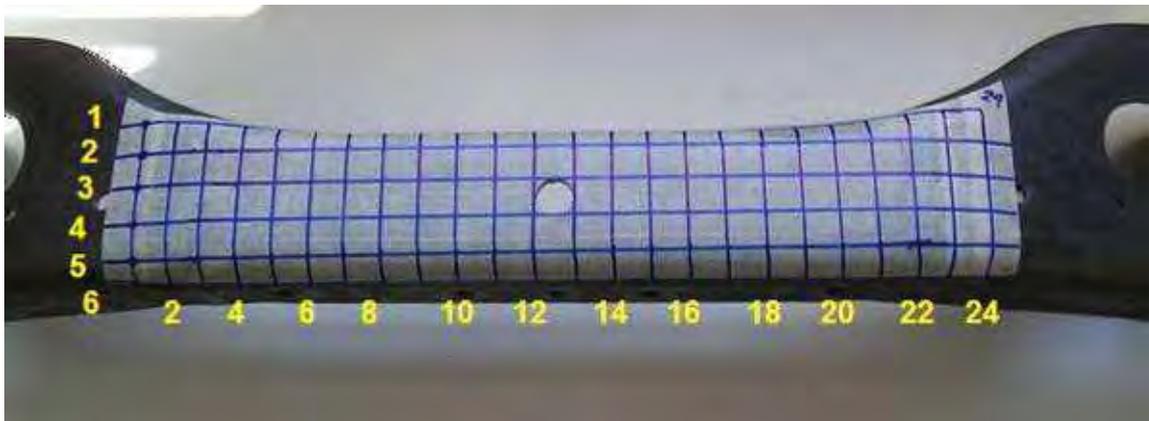


Figura 45 – Malhas para mapeamento área 4.

Para a medição dos valores absolutos das tensões residuais através da técnica de difração dos raios-X que utiliza o método de dupla exposição com radiação $K\alpha$ de Cr e plano difratante {211}, foi utilizado o equipamento portátil RAYSTRESS, Figura 46, com esta técnica a precisão é de $\pm 10\text{MPa}$.



Figura 46 – Equipamento portátil RAYSTRESS.

Os seguintes componentes fazem parte do equipamento portátil RAYSTRESS, Figura 46. (1) – Unidade de controle com fonte de alta tensão, que permite monitoramento e o ajuste do nível potência de alimentação do tubo de raios-X; (2) – Fonte de alta tensão e tubo de raios-X; (3) – Base magnética que permite instalar o equipamento diretamente na peça a ser analisada e ajustar o equipamento na posição de exposição; (4) – O Colimador com cassete para filme de raios-X. Duas janelas no cassete permitem captar partes das linhas difratadas no intervalo angular de 2θ de 148° a 164° .

Foram escolhidos três pontos para a realização das medições dos valores absolutos das tensões residuais, Figura 47, em cada ponto foi realizada uma medição em cada direção, duas nas direções ortogonais (direção 0° e 90°) e uma na direção diagonal em relação às duas primeiras (direção 45°).

A escolha da localização para as medições foram feitas considerando-se onde houve deformação plástica acentuada e também na borda da peça onde podem surgir trincas devido ao corte por cisalhamento do blank.

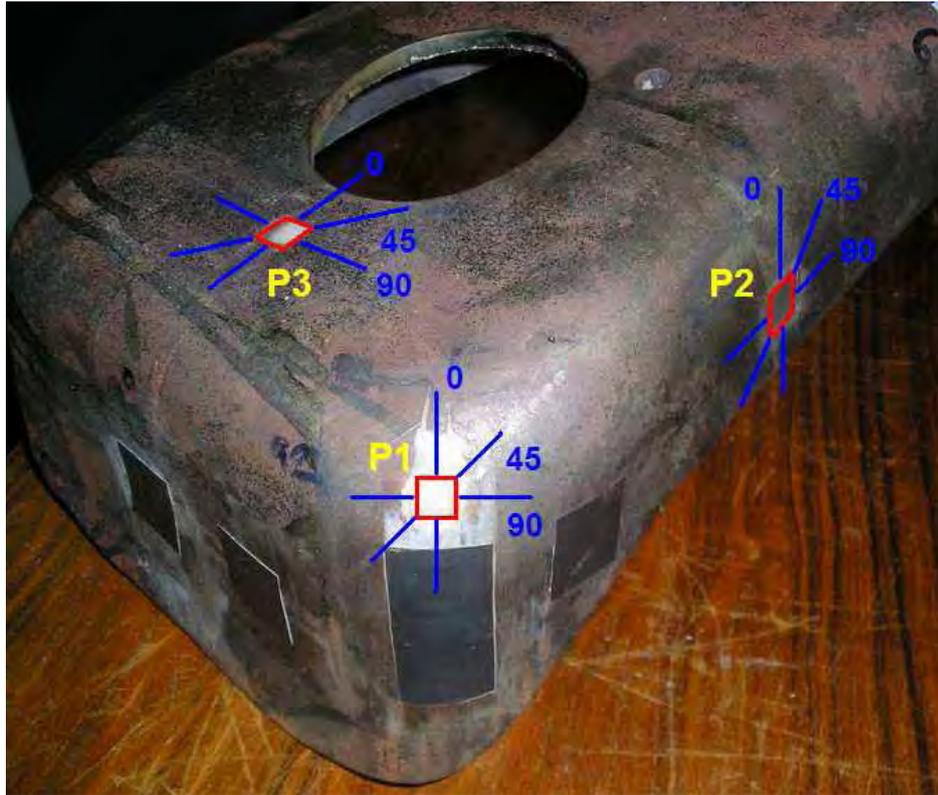


Figura 47 – Medição das tensões através de raios-X.

Os pontos de medição foram preparados com polimento eletrolítico com remoção de camada aproximadamente 0,2mm, para a retirada de aranhões ou marcas que pudessem mascarar os resultados, Figura 48. Na Figura 49 a amostra se encontra na posição para a medição dos valores absolutos das tensões residuais utilizando o equipamento RAYSTRESS.

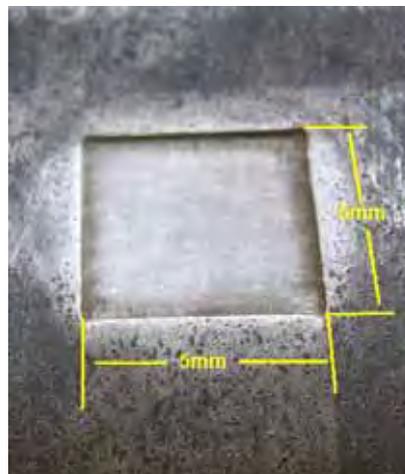


Figura 48 – Preparação com polimento eletrolítico



Figura 49 – Posicionamento da amostra para medição

Com base nos resultados das medições do valor absoluto das tensões residuais nas três direções em cada ponto, foram calculados os valores absolutos da tensão cisalhante máxima conforme critério de escoamento de Tresca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A análise química do material foi realizada no laboratório metalúrgico da IOCHPE Maxion. O material fornecido pela CSN está dentro dos requisitos da norma, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Os resultados dos ensaios de tração estão apresentados na Tabela 5. Todos os valores encontrados estão de acordo com a norma, trata-se de um material de boa estampabilidade, apesar da porcentagem de manganês presente na composição química, que confere ao material aumento da resistência mecânica, porém, sem diminuir a ductilidade, (Souza, 1989). Ainda segundo Souza o alumínio age como um desoxidante para evitar a evolução dos gases durante a solidificação.

Tabela 4 – Análise química.

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	V
0,08	0,92	0,016	0,018	0,005	0,049	0,024	0,001	0,001

Tabela 5 – Propriedades mecânicas.

Módulo elasticidade (GPa)	Limite escoamento (MPa)	Limite resistência (MPa)	Alongamento (%)
171	434	508	41

Como era de se esperar o trabalho a frio realizado pela estampagem realmente aumenta a resistência do material. No ensaio de dureza Vickers ficou evidente o aumento da dureza na região deformada em relação à região isenta de deformação plástica. Na tabela 6 constam os valores da dureza, já que foram analisados cinco pontos equidistantes.

Tabela 6 – Dureza Vickers.

Amostra com deformação		Amostra sem deformação	
Dureza	HV	Dureza	HV
Média	237	Média	218

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES

Em virtude da geometria da travessa no que diz respeito à sua fixação, houve diversas tentativas de fixação durante o processo de vibração, e gerou certa dificuldade no início do processo. Na Figura 50 podem ser observadas as curvas das cinco etapas de vibração, e na Tabela 7 os resultados das etapas, com destaque para as curvas um e cinco onde atingimos uma condição semelhante de fixação, as demais curvas ficaram difíceis de serem analisadas, assim as demais se tornaram difíceis de serem avaliadas, não dando assim nenhum respaldo quantitativo no alívio das tensões residuais.

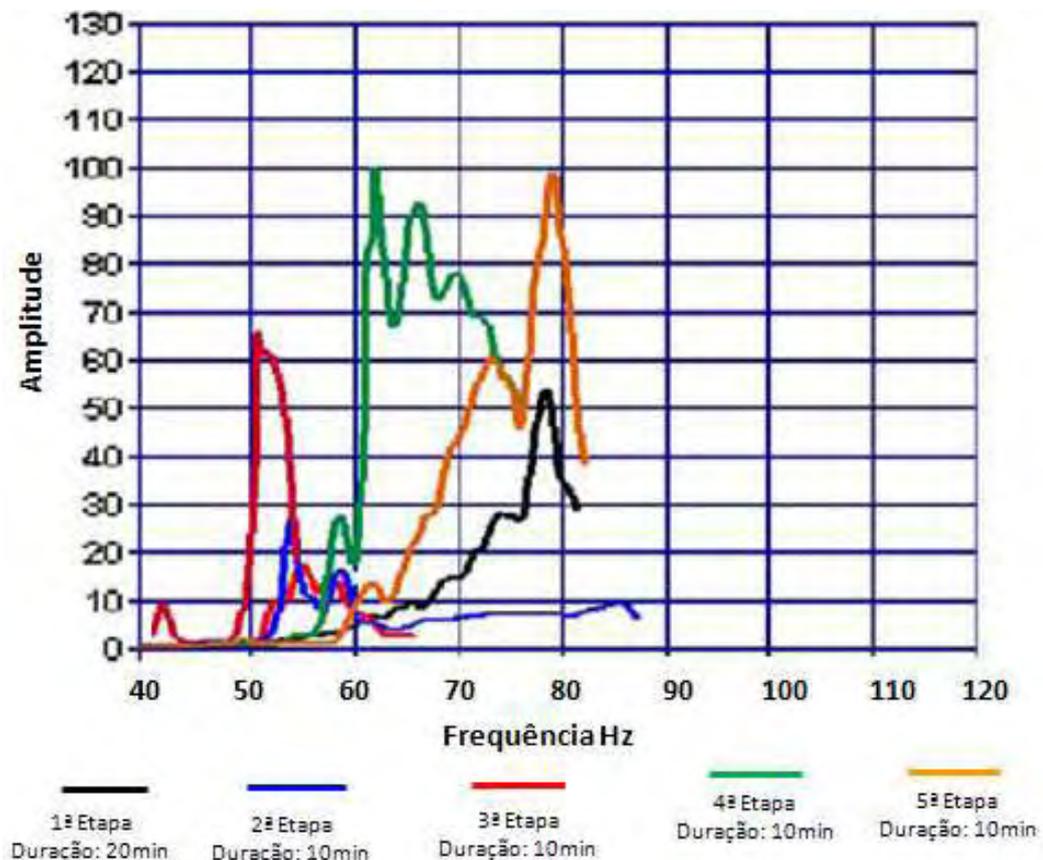


Figura 50 – Curvas da etapa inicial de vibração.

Tabela 7 – Resultado das etapas de vibração.

Resultado das etapas				
Total	1 etapa	5 etapa	Resultado das etapas	
Frequência harmônica	78,9 Hz	79 Hz	Dif. Frequência harmônica	0,7 Hz
Pico amplitude	54,0	98,6	Dif. Pico amplitude	44,6
Frequência sub-harmônica	67,6 Hz	66,2	Tempo 1º etapa	20min
			Tempo demais etapas	50min

Considerando-se a mesma condição de fixação do início ao fim do tratamento, as curvas da Figura 51 para as três etapas do tratamento deixam claro através do pico de ressonância a mudança do estado das tensões iniciais. Comparando-se com as curvas um e cinco da Figura 50 podemos verificar o processo de alívio das tensões residuais de acordo com a diferença da frequência harmônica entre as etapas do alívio das tensões.

Este processo de alívio das tensões residuais realizadas pela Aremas é semelhante ao processo comercial da Bonal Technologies, com o equipamento Meta – Lax, sendo que o princípio de alívio das tensões se dá pelas vibrações sub-harmônicas e o movimento das curvas para a esquerda. Assim afirma-se que o alívio das tensões residuais está na alteração da frequência natural do sistema.

Na Figura 51 nota-se uma pequena mudança na curva da segunda etapa de vibração deslocada para a esquerda, e alteração na sua frequência natural.

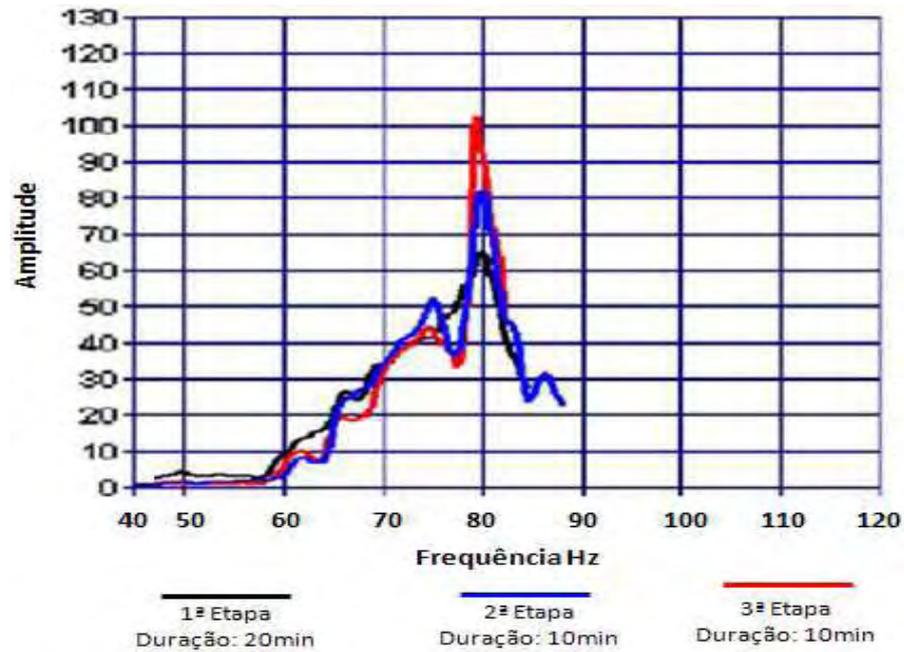


Figura 51 – Curvas da etapa final de vibração.

Na tabela 8 constam os valores pós-tratamento de alívio das tensões residuais, que permite verificar as condições de frequência, amplitude e tempo do tratamento. A diferença de 0,1Hz entre a primeira e ultima etapa dada pela frequência harmônica, indica que a peça não tem mais tensões que possam ser aliviadas pelo processo de vibrações, assim as tensões que ainda permanecem na peça são devidas às deformações plásticas sofridas no processo de estampagem.

Tabela 8 – Resultado das etapas de vibração.

Resultado das etapas				
Total	1 etapa	3 etapa	Resultado das etapas	
Frequência harmônica	79,7 Hz	79,8 Hz	Dif. Frequência harmônica	0,1 Hz
Pico amplitude	65,0	81,9	Dif. Pico amplitude	16,9
Frequência sub-harmônica	65,3 Hz	68,5	Tempo 1º etapa	20min
			Tempo demais etapas	20min

4.3 RESULTADOS DO MAPEAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO MAGNÉTICO

Os resultados do mapeamento Figuras 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 e 59 com os valores relativos das tensões cisalhante máxima, antes e após o tratamento de alívio das tensões residuais nas áreas 1, 2, 3 e 4, exprime claramente a distribuição das tensões na região em amarelo, onde houve deformações plásticas.

Pelas linhas de nível das tensões antes e após o tratamento de vibração é possível de verificar uma pequena distribuição das tensões, mesmo com a condição desfavorável de fixação da peça. Tomando como exemplo os pontos 5,5 da Figura 52 a tensão é de 700MPa, e os mesmos pontos da Figura 53, a tensão é de 500MPa.

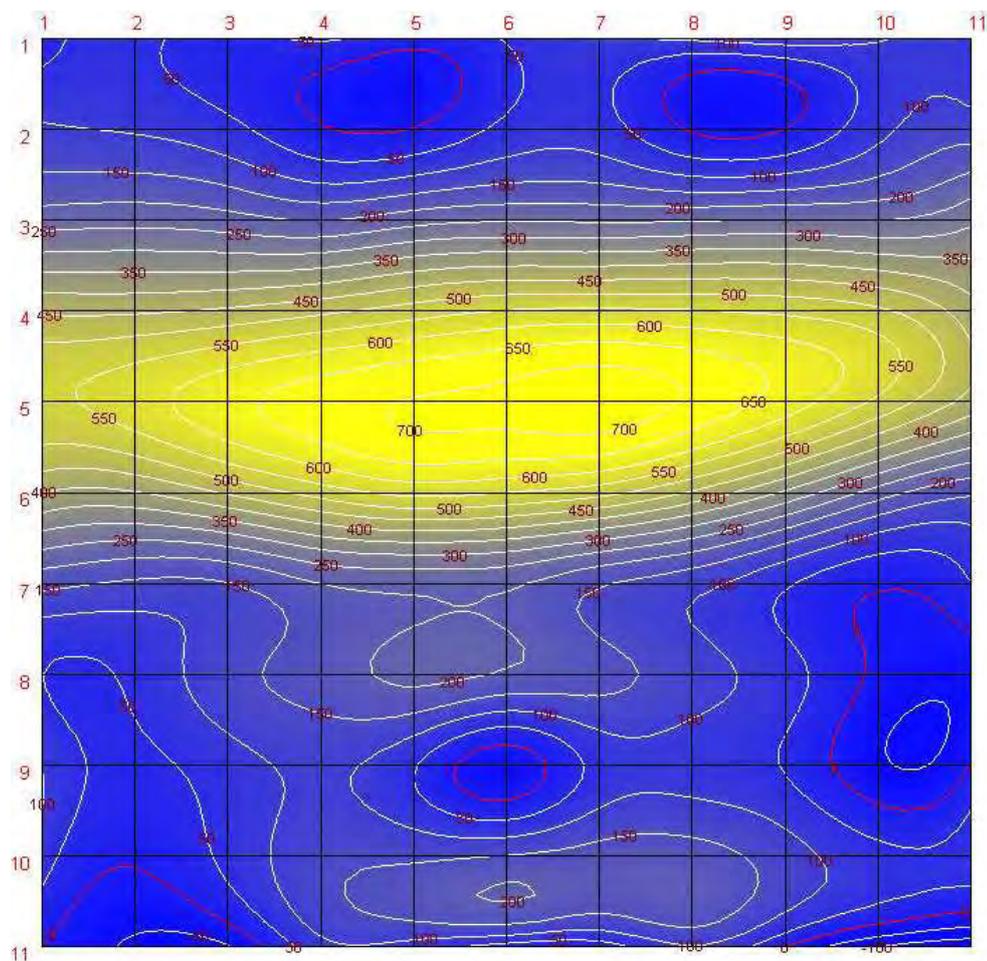


Figura 52 – Mapa das tensões área 1 antes do tratamento

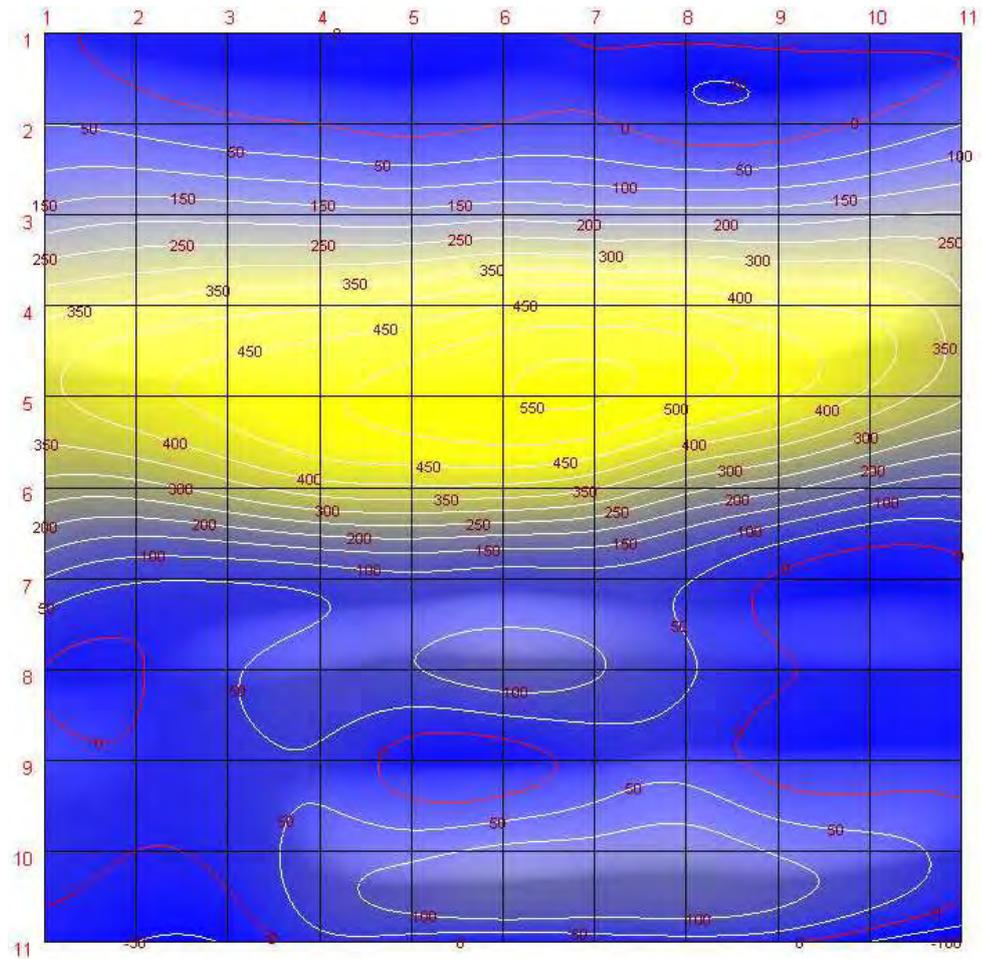


Figura 53 – Mapa das tensões área 1 após o tratamento.

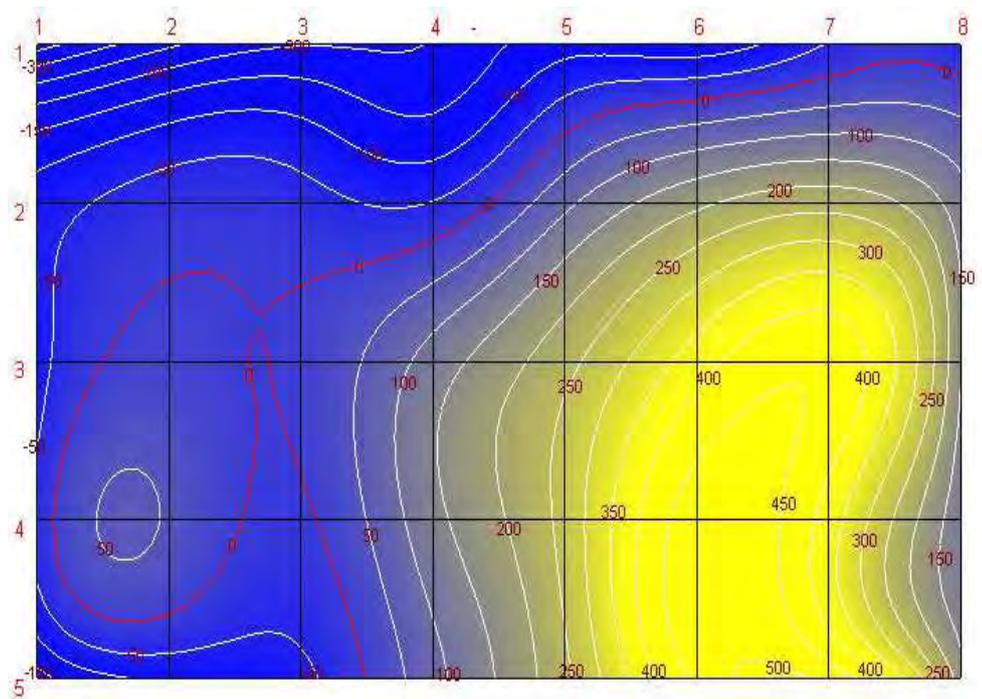


Figura 54 – Mapa das tensões área 2 antes do tratamento.

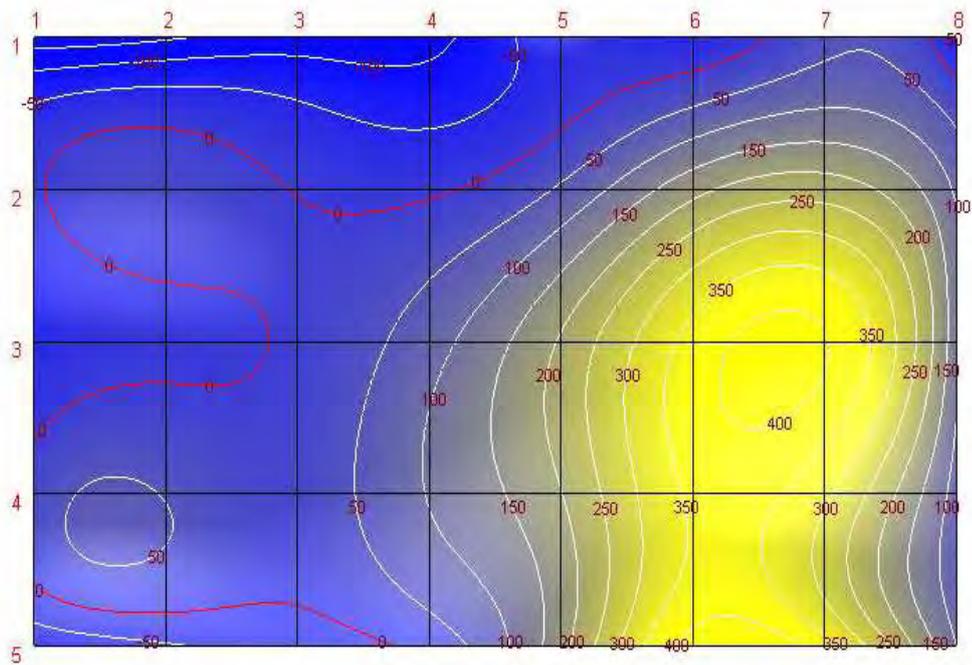


Figura 55 – Mapa das tensões área 2 após o tratamento

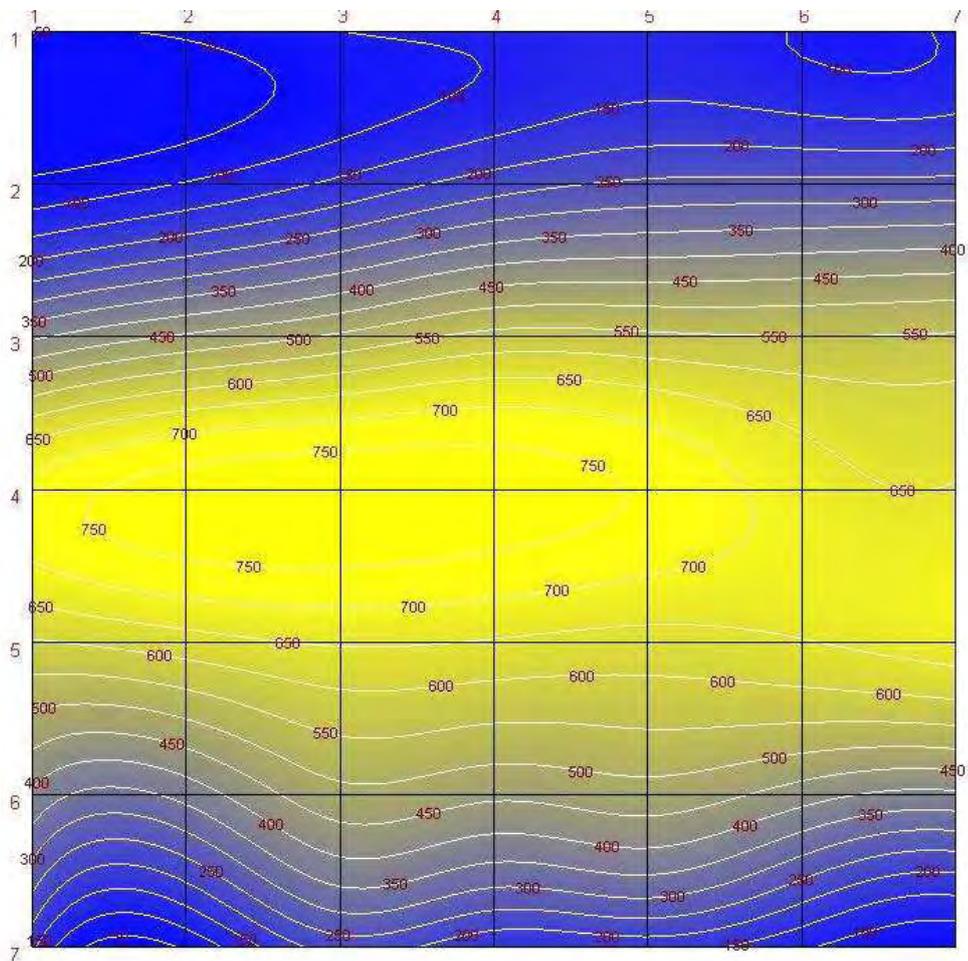


Figura 56 – Mapa das tensões área 3 antes do tratamento.

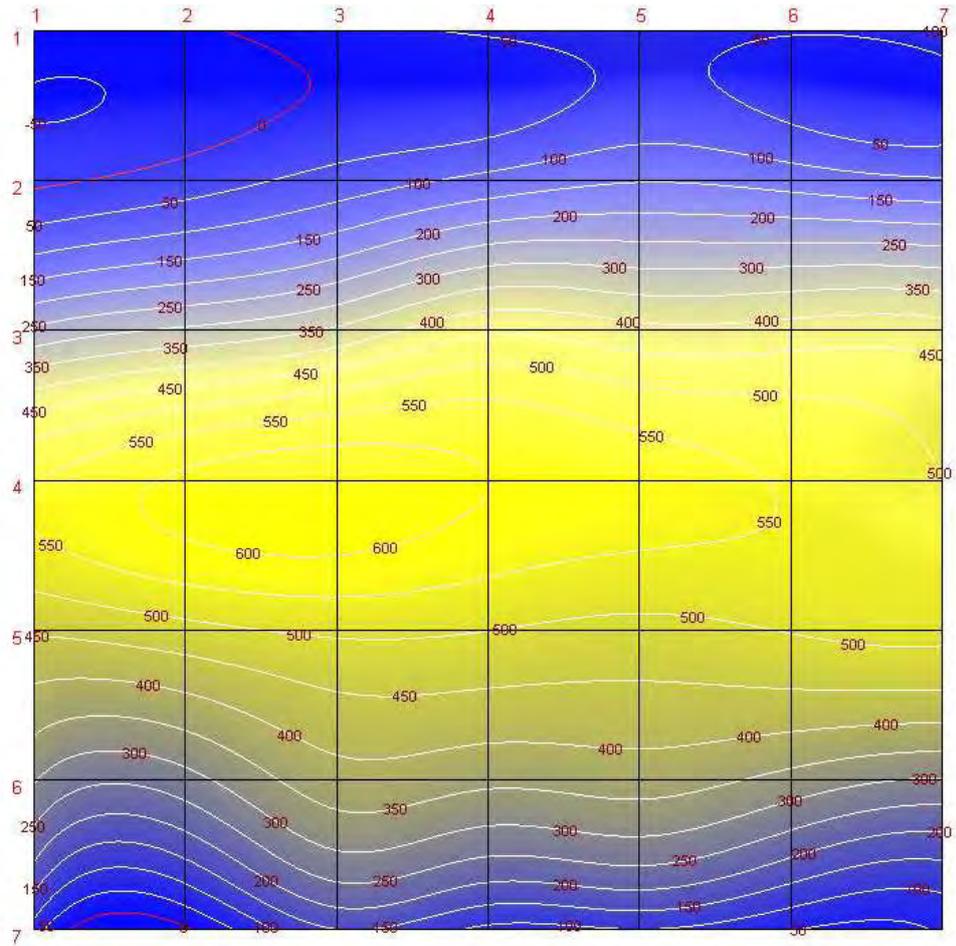


Figura 57 - Mapa das tensões área 3 após o tratamento.

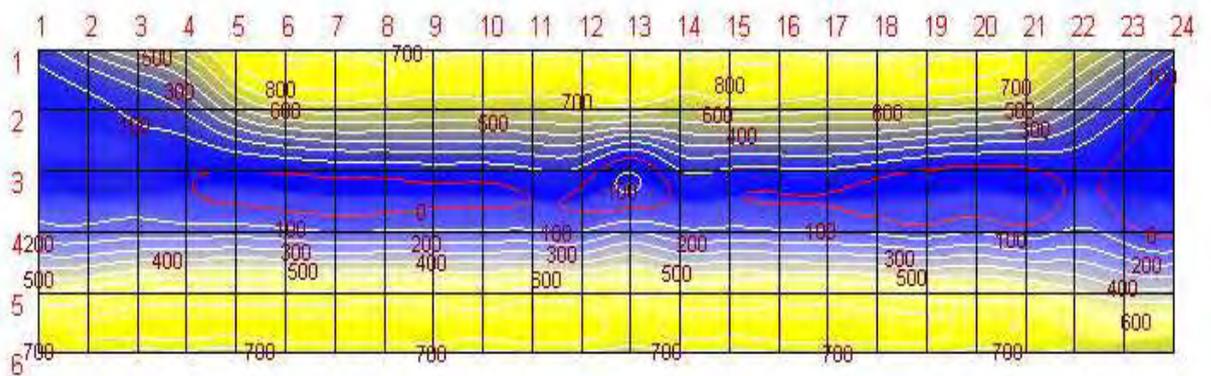


Figura 58 – Área de mapeamento 4 antes do tratamento.

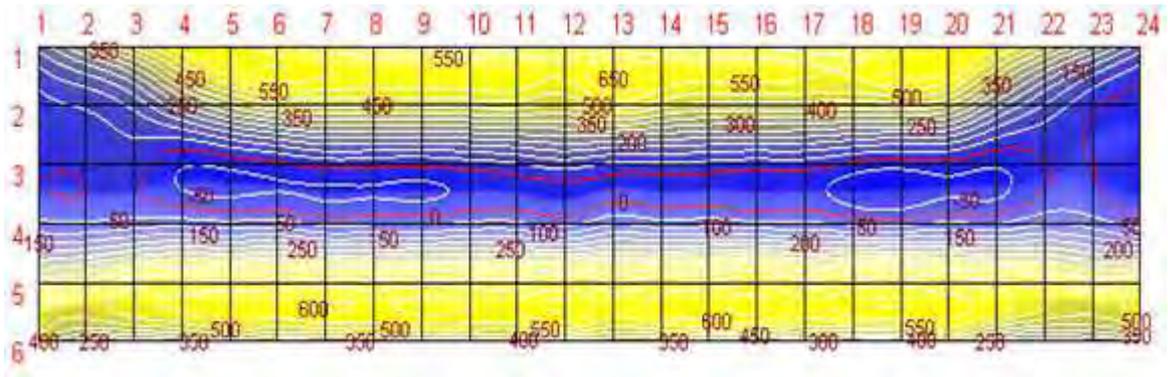


Figura 59 – Área de mapeamento 4 após o tratamento.

4.4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS TENSÕES ATRAVÉS DE RAIOS-X

Na tabela 9 constam os valores das medições dos valores absoluto das tensões residuais através da difração de raios-X, antes e após o tratamento de alívio através de vibrações mecânicas abaixo da frequência de ressonância da estrutura.

O sinal positivo refere-se a tensões trativas e o sinal negativo a tensões compressivas, então podemos afirmar que as tensões que atuam na peças são tensões residuais compressivas, tensões que são nocivas à estrutura. E como foi comentado anteriormente, se um componente ou uma estrutura estiver sob ação de tensões trativas e vier a sofrer uma sobrecarga de tração, as tensões poderão ficar próxima do limite de resistência, e consequentemente ficar exposto à ruptura e trincas.

Tabela 9 – Valores absolutos das tensões.

no	Direção	Valor da tensão medido (σ MPa)		Tensão cisalhante máxima calculada (σ_{max} , MPa)		Redução (%)
		Antes do tratamento	Após o tratamento	Antes do tratamento	Após o tratamento	
1	0°	-130	-130			
	45°	+90	+85	163	155	5
	90°	+160	+40			
2	0°	+190	+150			
	45°	+190	+180	124	108	13
	90°	+15	+30			
3	0°	+300	+180			
	45°	+325	+75	94	84	11
	90°	+195	+130			

No ponto 1 foi encontrado a menor redução das tensões, devido neste ponto se encontra a maior deformação plástica, e a redução das tensões através das vibrações mecânicas contemplam alívio das tensões residuais no regime elástico, e, portanto, alívio das tensões residuais originadas de deformações plásticas provocadas por trabalho a frio não é possível através desta técnica.

No ponto 3 está a maior redução nas medidas das tensões residuais, no entanto, a porcentagem na redução das tensões não foi tão elevada. Isso é decorrente do cálculo da tensão cisalhante máxima, que utiliza o critério de escoamento de Tresca, em que as tensões mais se aproximam da realidade.

4.5 DISCUSSÃO

Os resultados das medições das tensões residuais tanto pela difração de raios-X como pelo método magnético mostram que é possível a redução das tensões residuais em componentes deformados plasticamente pelo trabalho realizado a frio, em que não tínhamos nenhuma referência a respeito para dar um respaldo teórico.

O processo de alívio das tensões residuais através de vibrações mecânicas pode ser realizado de várias maneiras, com processos comerciais oferecidos por diversas empresas. Neste trabalho foi utilizado um processo comercial que utiliza vibrações que trabalham na região de frequência sub-ressonante, mas, há possibilidade de que se faça tratamento de vibrações com frequência na faixa de ressonância ou com a combinação da mudança da faixa de amplitude.

O processo mais utilizado para alívio das tensões internas de uma peça é o tratamento térmico. O mecanismo pelo qual ocorre o alívio das tensões interna é o fornecimento de energia térmica, e a movimentação atômica através da difusão, de maneira que a estrutura cristalina fique mais estável. Assim sendo, o alívio das tensões residuais pelo processo de vibrações mecânicas é possível pela energia fornecida por altas cargas cíclicas, conforme afirmou Walker et al. (1994).

Sabe-se que as partículas atômicas estão em constante vibração e que a parada da vibração acontece quando se atinge o zero absoluto, assim sendo, quanto mais

energia for fornecida ao sistema, mais as partículas irão vibrar, ocasionando acomodação nas tensões internas do material.

A medição das tensões residuais pelo método magnético é ideal para ser utilizada em conjunto com a difração de raio-X, para fornecer dados quantitativos em relação aos pontos críticos das tensões residuais. Os dois métodos de medição das tensões foram satisfatórios antes e após o tratamento de alívio das tensões residuais, com uma ressalva para o ponto 3, onde foi realizada a medição das tensões residuais pela difração de raios-X. No ponto 3 o valor da redução da tensão foi significativa, porém, a tensão máxima de cisalhamento o valor não foi tanto assim, pelo fato de ter sido utilizado o critério de escoamento de Tresca, que se faz de uma estimativa mais conservadora.

Outros estudos são importantes para se comparar a eficácia desse processo com outros processos, como por exemplo, o tratamento térmico que algumas vezes é realizado de maneira inadequada, e assim este processo ser uma alternativa viável e lucrativa para várias empresas.

O processo de alívio das tensões através das vibrações mecânicas que se deu na faixa de frequência sub-harmonica foi simples e não demandou muito tempo, a não ser pelo trabalho de fixação da peça, que pela sua geometria ficou difícil a sua fixação, sendo que se tivesse um dispositivo a fixação seria imediata.

5 CONCLUSÕES

O mapeamento das tensões residuais pelo método magnético não pode ser usado como um comparativo entre a técnica de difração de raios-X, pois, como a peça analisada sofreu deformações angulares não homogênea, possui variação das tensões na camada superficial e sub-superficial, e neste caso o mapeamento ocorre em uma profundidade sub-superficial na qual não é possível de classificar como um estado plano de tensões, como é o caso da medição através de raios-X. Sendo assim o mapeamento das tensões residuais através do método magnético pode ser usado como um complemento, para que inicialmente seja determinado onde se encontra os maiores níveis das tensões de um elemento para que posteriormente seja realizada a medição das tensões absolutas através da difração de raios-X.

O método magnético também é útil caso seja realizado algum outro tratamento de alívio das tensões, como o tratamento térmico ou outros processos de alívio das tensões residuais por meio de vibrações mecânicas.

O material da peça utilizada neste trabalho refere-se a um aço para estampagem de boa resistência mecânica em comparação com outros aços para estampagem de componentes estruturais, e como sofreu deformação plástica satisfatória o trabalho a frio aumentou a dureza e os níveis das tensões internas do material, somando-se com outros parâmetros como a lubrificação e a condição do ferramental para a estampagem.

O ponto três da medição dos valores absolutos das tensões pela técnica de difração de raios-X foi o que teve maior porcentagem de redução, no entanto, devemos considerar o resultado da tensão cisalhante máxima, na qual as tensões mais se aproximam da realidade e nessa medição foi considerado o critério de escoamento de Tresca. Também é possível que a remoção de camada pelo processo de polimento eletrolítico tenha interferido nos resultados, pois a medição através da difração de raios-X atinge camadas em micrômetros.

Assim sendo, o tratamento de alívio das tensões residuais pelas vibrações mecânicas se mostrou satisfatório em um primeiro momento em que não era possível nenhuma certeza de quanto seria os valores do alívio das tensões residuais.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria importante o estudo de alívio das tensões residuais com a técnica comercial de alívio das tensões utilizando a vibração mecânica na faixa de frequência de ressonância para conhecer seus efeitos quanto à integridade estrutural de um elemento trabalhado a frio.

Comparar o alívio das tensões residuais por meio de vibrações mecânicas com o processo de tratamento térmico no que diz respeito às propriedades mecânicas em peças estampadas.

REFERÊNCIAS

ALAWODE, A. J.; ADEYEMI, M. B.; Effects of degrees of deformation and stress-relief temperatures on the mechanical properties and residual stresses of cold drawn mild steel rods. **Journal of Materials Processing Technology**, n.160, p.112–118, April, 2004.

AMOROS, R. T. **Avaliação de tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar**. 2008. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2008.

AXINTE, C.; IORDACHE, M. Determination of residual stress distribution within the formed part. **Fascicle of Management and Technological Engineering**, v. 7, 2008. ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY.

BASTOS, A. J. ; **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**. 2009. 148f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BERGAMO, R. T. **Avaliação da eficácia do martelamento para o alívio para o alívio de tensões em soldas de aço**. Dissertação. 2006. 107f (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2006.

BUFFONI, S. **Critério de falha**. Escola de Engenharia industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense. Universidade Federal Fluminense, 12p. Disponível em: < <http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula141.pdf>> Acesso em 28 ago. 2011.

BRESCIANI, E. , et al. *Conformação plástica dos metais*. 4ªed. Editora Unicamp, 1997.

CHIPANGA, T., **Determination of the accuracy of non-destructive residual stress measurement methods**. Thesis Master Degree. Cape Peninsula University of Technology. Bellville, 2009. Disponível em :

<http://dk.cput.ac.za/cgi/viewcontent.cgi?article=1100&context=td_cput>Acesso em: 10 jun. 2011.

CRISI, G. S.; MENDONCA D. P.; Stress relief of welds by heat treatment and vibration: a comparison between the two methods. **The Library Vibratory Stress Relief**. p. 1 – 8, 2006.

DAWSON, R.; MOFFAT, D. G.; Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v.102, p. 169-176, april, 1980.

Darendeliler, H. , et al. Effect of variable friction coefficient on sheet metal drawing. **Tribology International**, Turkey. n. 35, p. 97–104, oct., 2001.

DIETER, G. E.; **Mechanical Metallurgy**. Mcgraw-Hill book company, 615p. USA, 1961.

FOLLE, L. F. et al; Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva limite de conformação. **Revista corte e conformação de Metais**, p. 64-76, abril 2008.

GUIDI, E. S.; **Desenvolvimento de um programa paramétrico para simulação do processo de estampagem utilizando elementos finitos**. Dissertação. 2009. 110f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

GUPTA, R. K.; et al. Investigation of cracks generated in columbium alloy (C-103) sheets during deep drawing operation. **Journal Failure. Analls. and Prevent.** n.10, p.228–232, april, 2010.

HANDBOOK of residual stress and deformation of steel, Materials Park. **ASM International**, 499p., 2002.

HEROLD. T. G. et al. An investigation of springback stresses in AISI-1010 deep drawn cups. **Materials Science and Engineering A** 399. p. 26–32, 2005.

HORNSEY, J. S. Vibratory stress relieving – It's advantages as an alternative to thermal treatment. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/14428134/VSR-an-Alternative-to-Thermal-Treatment>>. Acesso em 31/07/2011.

LORA, F. A. **Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH180 e BH220 utilizado na indústria automobilística.** Dissertação. 2009. 81f (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LUH, G. C.; HWANG, R. M.; Evaluating the effectiveness of vibratory stress relief by a modified hole-drilling method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer-Verlag. Taiwan, n.14, p.815-823, 1998.

MALAVOLTA, A. T. **Metodologia para determinação dos parâmetros utilizados em uma nova superfície de escoamento anisotrópica para conformação de chapas metálicas.** Tese. 2008. 194f. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MARTINS, C. O D., et al. Comparação entre as técnicas de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. **Revista Matéria**, Brasil, v. 9, n. 1, p. 20 – 28, 2004.

MARTINS, J. A. **Análise de tensões residuais em válvulas estampadas por meio de difração de raios-X e do método de elementos finitos**. Tese. 2004. 201f (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MUNSI, A. S. M. Y.; et al. The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: A comparison with thermal stress relief. **The British Society for Strain Measurement**, v. 37, n.4, p. 141-149, 2001.

OLIVEIRA, T. L. L. et al. Efeito do tratamento térmico sobre tensões residuais em produtos de aços forjados a frio. **6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação**, Caxias do Sul, 2011. Disponível em: <http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0399>. Acesso em julho 2011.

META-LAX VIBRATION STRESS RELIEF. **Bonal technologies**. Disponível em: <http://www.meta-lax.com/>. Acesso em julho 2011.

METAL FORMING HANDBOOK. **SCHULER**, Springer, Germany, 563p., 1998.

EQUIPAMENTO FÓRMULA 62. Stress Relief engineering. Disponível em: <http://www.stressreliefengr.com/>, acesso em julho 2011.

PULNIKOV, A.; et al. Investigation of residual stresses by means of local magnetic Measurement. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2004.

RAGAB, M. S.; ORBAN, H. Z. Effect of ironing on the residual stresses in deep drawn cups. **Journal of Materials Processing Technology**, Egypt, n.99, p.54 – 61, June, 2000.

RAVINDRA, P. V. R.; et al. A study on the effect of blank thickness on residual

stresses in deep drawing. **International Journal of Engineering Studies**, ISSN 0975-6469 v. 2, n. 1, p. 49–58, 2010.

REDDY. P. V. R. R., et al. A study on the effect of blank thickness on residual stresses in deep drawing, **International Journal of Engineering Studies**, ISSN 0975- 6469 v.2, n.1, India, p.49–58, 2010.

RODRIGUES, L. D. **Medição de tensões residuais em tubos visando a determinação de esforços em dutos enterrados**. Dissertação. 2007. 152f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

ROSKOSZ, M., GAWRILENKO, P. Analysis of changes in residual magnetic field in loaded notched samples. **NDT&E International**, Poland, n.41, p.570– 576, april, 2008.

SANTOS, R. A. **Avaliação de estampabilidade do aço DC05 (DIN 10152) e validação das deformações verdadeiras obtidas via simulação numérica**. Dissertação. 2007. 97f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**, Porto Alegre, imprensa livre, 167p., 2004.

SCHAEFFER, L. Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem. **Ferramental** ano 1, n°5 Março/Abril 2006. Disponível em:< <http://www.ufrgs.br/ldtm>>. Acesso em: 9 março 2011.

SILVA, M. F. L. P., **Influência do uso de lubrificantes no processo de estampagem profundas com chapas espessas e aço**. Dissertação. 2007. 135f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2007.

SOUZA, S. A., **Ensaio mecânicos de materiais metálicos** – Fundamentos teóricos e práticos, 5 ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 286p., 1982.

SOUZA, S. A., **Composição química dos aços**, Editora Edgard Blucher Ltda., 134p., 1989. SP.

STEFEN, S. F., et al, Efeito de redistribuição das tensões residuais de soldagem. 11º **Conferência de tecnologia de equipamentos**. ABENDI, 2011. Disponível em: <http://www.gurteq.com>

VIEIRA, D. L., et al, Nova técnica de avaliação do estado das tensões de soldagem. **26º Congresso nacional de ensaios não destrutivos e inspeção**. Disponível em: <http://www.gurteq.com>

WALKER, C. A.; et al.; Vibratory stress relief – an investigation of the underlying processes. **The Library Vibratory Stress Relief**, UK , august, 1994.

YANG, T. S., Investigation of the strain distribution with lubrication during the deep drawing process. **Tribology International**, Taiwan, n.43, p.1104–1112, December, 2010.

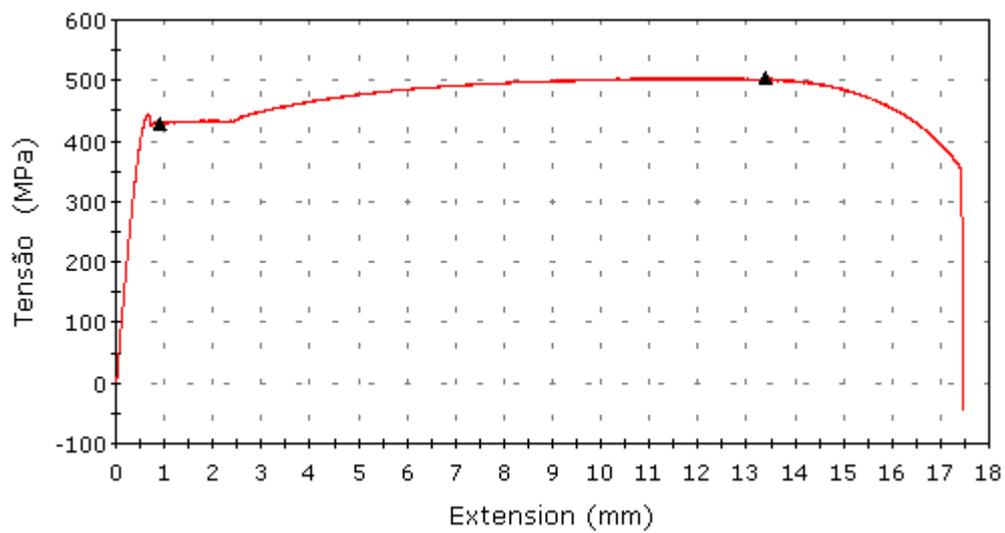
YANG, Y. P.; Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling. **Journal of Materials Engineering and Performance**, V. 18, p.856-862, October, 2008.

ZOLOTOREVSKY, N. Yu. KRIVONOSOVA, N. Yu. Effect of ferrite crystals plastic anisotropy on residual stresses in cold-drawn steel wire. **Materials Science and Engineering A205** ,Russia, p.239-246, April, 1996.

ANEXOS

CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Amostra longitudinal 1



Tensão máxima aplicada: 504.36 MPa

Tensão limite de escoamento: 429.36MPa

Módulo de elasticidade: 170923.44MPa

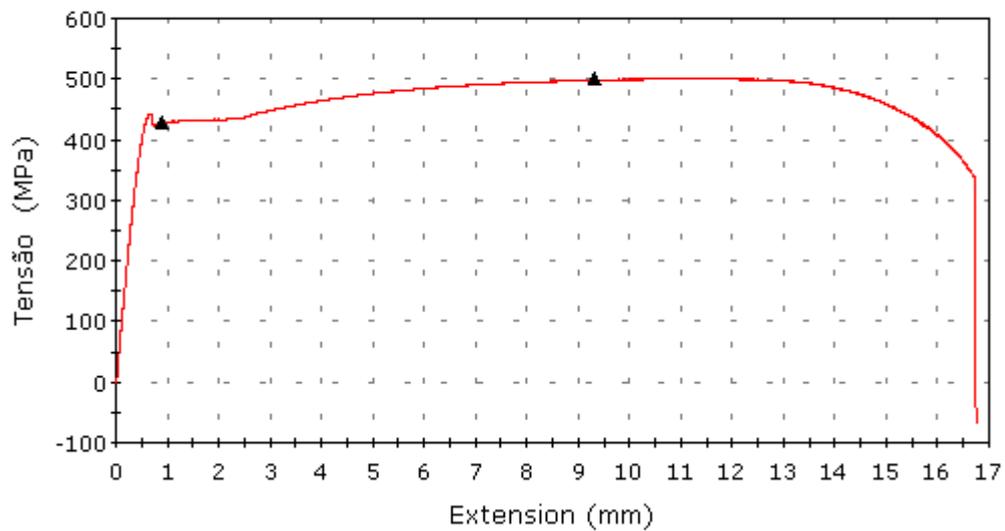
Carga de escoamento: 26649.89N

Energia de escoamento 17.17J

Carga de fratura: 18020.92N

Amostra 2

Longitudinal



Tensão máxima aplicada: 500.76MPa

Tensão limite de escoamento: 427.57MPa

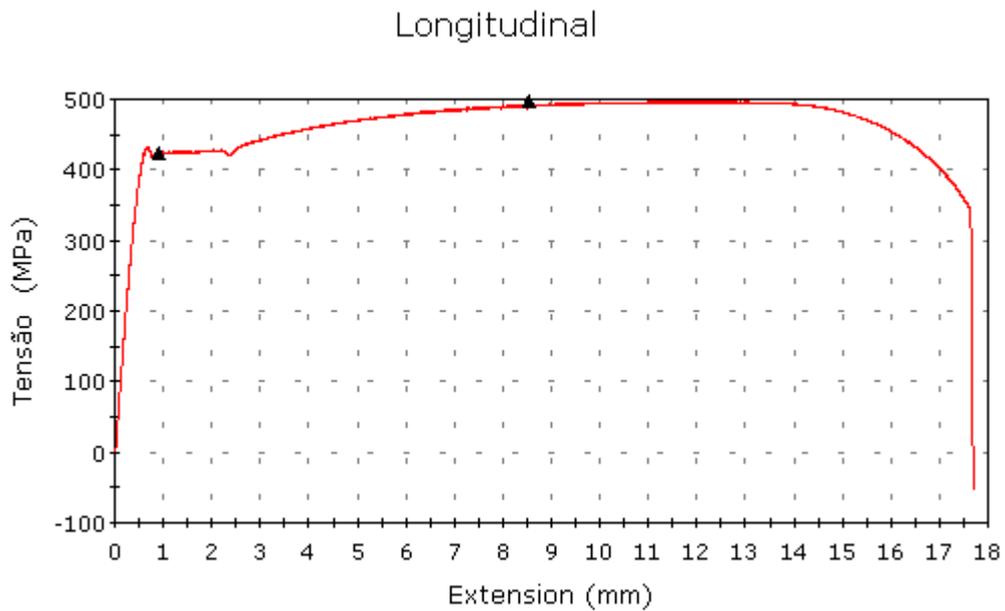
Módulo de elasticidade: 171259.33MPa

Carga de escoamento: 26876.18N

Energia de escoamento 17.28J

Carga de fratura: 21174.27N

Amostra 3



Tensão máxima aplicada: 496.51MPa

Tensão limite de escoamento: 423.78MPa

Módulo de elasticidade: 166370.32MPa

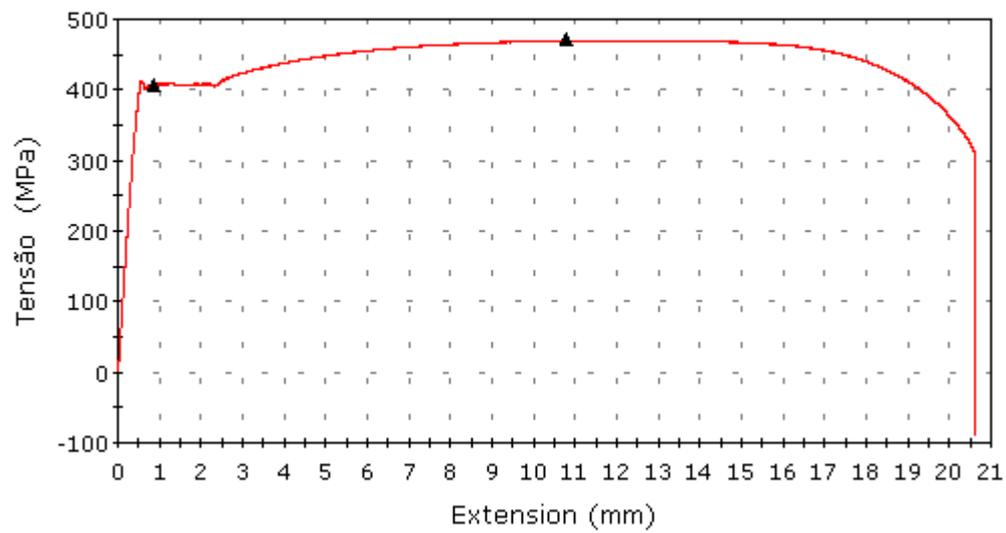
Carga de escoamento: 26428.92N

Energia de escoamento 17.03J

Carga de fratura: 16738.15N

Amostra 2 -45°

quarenta e cinco grau



Tensão máxima aplicada: 472.11MPa

Tensão limite de escoamento: 407.88MPa

Módulo de elasticidade: 167814.09MPa

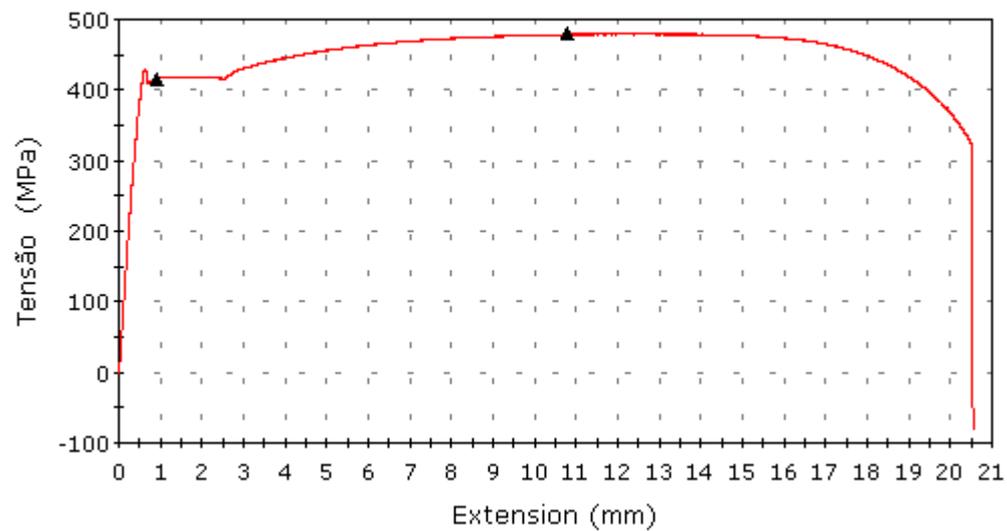
Carga de escoamento: 25584.23N

Energia de escoamento 16.25J

Carga de fratura: 19601.27N

Amostra 3

quarenta e cinco grau



Tensão máxima aplicada: 480.29MPa

Tensão limite de escoamento: 416.44MPa

Módulo de elasticidade: 160785.40MPa

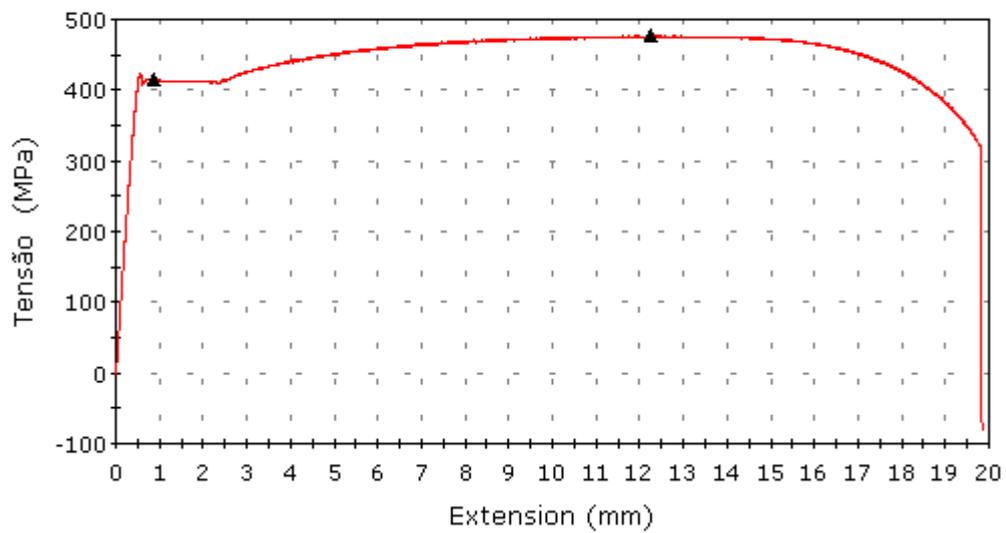
Carga de escoamento: 26099.49N

Energia de escoamento 16.98J

Carga de fratura: 20100.47N

Amostra 4

quarenta e cinco grau



Tensão máxima aplicada: 476.27MPa

Tensão limite de escoamento: 414.86MPa

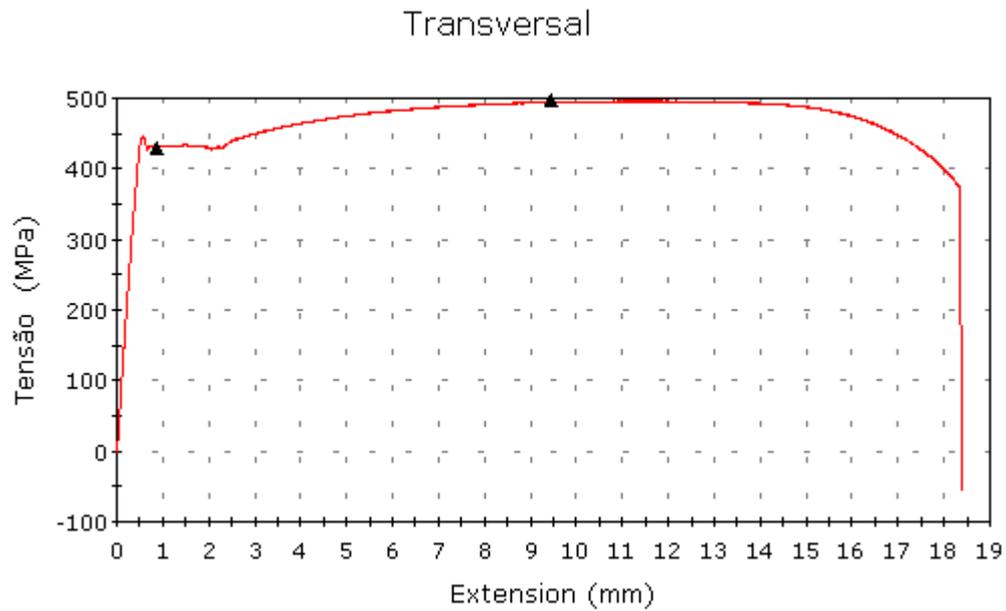
Módulo de elasticidade: 172839.75MPa

Carga de escoamento: 25563.88N

Energia de escoamento 16.22J

Carga de fratura: 19631.23N

Amostra 2 Transversal



Tensão máxima aplicada: 496.48MPa

Tensão limite de escoamento: 429.77MPa

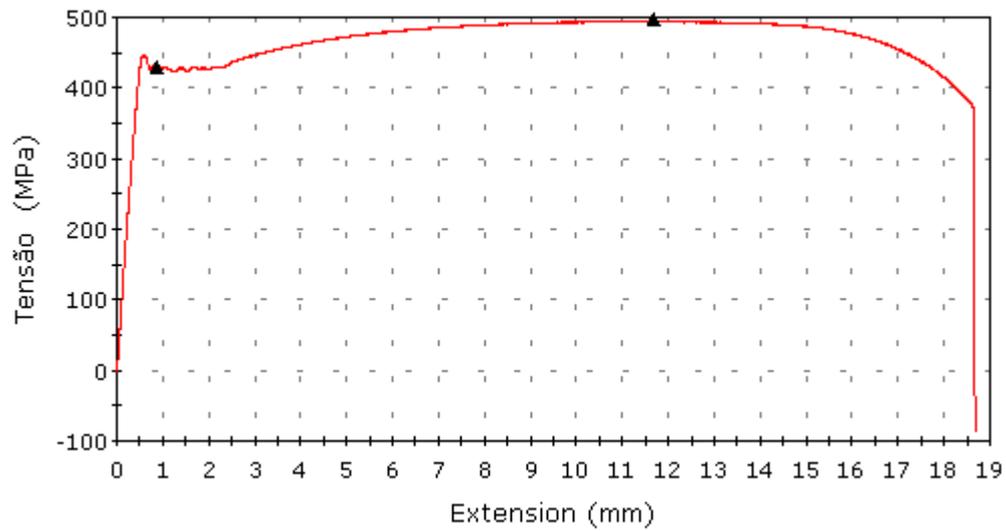
Módulo de elasticidade: 183723.10MPa

Carga de escoamento: 26234.04N

Energia de escoamento 16.61J

Carga de fratura: 22081.74N

Amostra 3



Tensão máxima aplicada: 496.410MPa

Tensão limite de escoamento: 429.19MPa

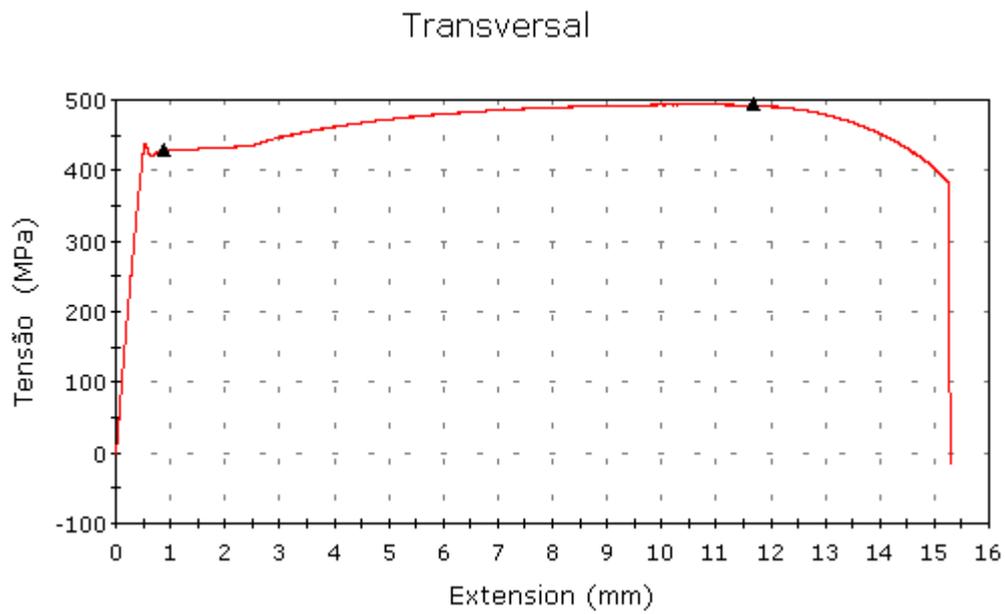
Módulo de elasticidade: 179657.82MPa

Carga de escoamento: 26398.88N

Energia de escoamento 16.89J

Carga de fratura: 21600.42N

Amostra 4



Tensão máxima aplicada: 493.61MPa

Tensão limite de escoamento: 428.50MPa

Módulo de elasticidade: 177613.98MPa

Carga de escoamento: 26544.14N

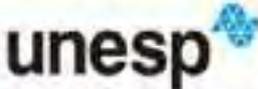
Energia de escoamento 16.86J

Carga de fratura: 22996.54N

Relatório do Ensaio de Vibração



RELATÓRIO DE CONSULTORIA/SERVIÇOS		CONSULTORIA/SERVIÇOS	
Responsável Comercial:	Michael Machado	Data:	16/03/2011
Responsável Técnico:	Luis Norberto da Fonseca	Revisão:	01
		Data:	16/03/2011
		Tópicos alterados:	

Cliente:					
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO" Campus de Guaratinguetá Guaratinguetá/SP - Brasil Av. Dr. Áriberto Pereira da Cunha, 333 CEP: 12.516-410	 unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO" Campus de Guaratinguetá				
Parte(s)	Parâmetros				
Identificação: Travessa estampada - Chassi Maxion Tipo do material: Aço LNE 38 - Baixo Carbono Dimensões: 1,5 x 1,0 x 1,0 m Contato: Carlos Henrique dos Santos Telefone: (12) 3143-1584	Indutor de força: 2ª Classe do material: A Peso do conjunto: 110 kg Módulo: Manual Stress Relief Excentricidade: 20 % Duração da primeira etapa: 20 min Duração das demais etapas: 10 min				
Resultado das etapas:					
Total de etapas: Completadas:	6	1ª Etapa:	Última Etapa:	Resultado das etapas:	
Frequência Harmônica:	78,3 Hz		79 Hz	Dif. Frequência Harmônica:	0,7 Hz
Pico de Amplitude:	54,0		98,6	Dif. Pico de amplitude:	44,6
Frequência Sub-Harmônica:	67,6 Hz		66,2 Hz	Tempo total de 1ª Etapa:	20 Min
Data/Horário de início:	25/01/2011 - 11:34 h			Tempo total demais etapas:	50 Min
		AREMAS - Reliability Engineering Solutions Rua: Regente Fajó, n.221 - Sala 92 (9º Andar) Campinas/SP - Brasil - 13013-050 Telefone: +55 19 3308-7833 / FAX: +55 19 3308-7855			





RELATÓRIO DE CONSULTORIA/SERVIÇOS		CONSULTORIA/SERVIÇOS	
Responsável Comercial: Michael Machado	Data: 16/03/2011	Revisão: 01	Data: 16/03/2011
Responsável Técnico: Luis Norberto da Fonseca	Data: 16/03/2011	Tópicos alterados:	

Cliente:			
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO" Campus de Guaratinguetá Guaratinguetá/SP - Brasil Av. Dr. Arriberto Pereira da Cunha, 333 CEP: 12.516-410		 UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO" Campus de Guaratinguetá	
Parte(s)		Parâmetros	
Identificação: Travessa estampada - Chassi Maxion Tipo do material: Aço LNE 35 - Baixo Carbono Dimensões: 1,5 x 1,0 x 1,0 m Contato: Carlos Henrique dos Santos Telefone: (12) 3143-1554		Indutor de força: 2° Classe do material: A Peso do conjunto: 110 kg Módulo: Manual Stress Relief Excentricidade: 20 % Duração da primeira etapa: 20 min Duração das demais etapas: 10 min	
Resultado das etapas:			
Total de etapas: Completadas:	3	1ª Etapa:	Última Etapa:
Freqüência Harmônica:	79,7 Hz	79,8 Hz	Dif. Freqüência Harmônica:
Pico de Amplitude:	65,0	61,9	Dif. Pico de amplitude:
Freqüência Sub-Harmônica:	65,3 Hz	68,5 Hz	Tempo total de 1ª Etapa:
Data/ Horário de início:	25/01/2011 - 12:41 h		Tempo total demais etapas:
		AREMAS - Reliability Engineering Solutions Rua: Regente Feijó, n.221 - Sala 92 (9º Andar) Campinas/SP - Brasil - 13013-050 Telefone: +55 19 3308-7833 / FAX: +55 19 3308-7855	



RELATÓRIO DE CONSULTORIA/SERVIÇOS		CONSULTORIA/SERVIÇOS	
Responsável Comercial:	Michael Machado	Data:	16/03/2011
Responsável Técnico:	Luis Norberto da Fonseca	Data:	16/03/2011
		Revisão:	01
		Data:	16/03/2011
		Tópicos alterados:	

Observações importantes para análise e interpretação dos resultados:

1. O processo de alívio de tensões residuais por vibração não é eficiente em tensões residuais originadas em trabalhos de conformação a frio (Ex: Estamparia, dobramento, forjamento, etc...). Tendo como restrição somente aplicação no alívio de tensões residuais de regime elástico.
2. O processo de alívio de tensões residuais por vibração não substitui tratamentos que tem por objetivo mudar a microestrutura do material.
3. O processo térmico de alívio de tensões não é eficiente no alívio e equilíbrio de tensões residuais em regime plástico. Embora tal processo, possa promover algumas alterações microestruturais desejadas ou não.
4. A peça submetida ao procedimento de alívio de tensão por vibração foi confeccionada por processo de estamparia a frio, portanto, desta maneira, tanto deformações de regime plástico quanto de regime elástico.
5. O resultado do mapeamento de tensões residuais, realizado pela empresa Gurteq, não deve ser utilizado com o objetivo de avaliar a eficiência do método vibracional de alívio de tensões residuais, uma vez que as restrições do processo foi apresentada antes da realização dos testes.
6. Para que seja efetuada a comparação com outros métodos de alívio de tensões, conforme sugerido no Item 7 – "Das observações importantes e interpretação dos resultados", elaborado pela empresa Gurteq – Ensaio Não Destrutivo, todos os benefícios, vantagens e desvantagens dos métodos devem ser estudadas e levadas em consideração. Tais como:
 - a. Medições de deformações após tratamentos de tensões residuais;
 - b. Análise de alterações microestruturais;
 - c. Análise das alterações de propriedades mecânicas importantes (Dureza, tenacidade, etc...);
 - d. Análise da deterioração da superfície tratada (Formação de camadas de óxidos);
 - e. Limitações dos processos em relação a tipos de materiais, componentes compostos com materiais diferentes, forma e dimensões de componentes;
 - f. Tempo de processamento;
 - g. Custos dos tratamentos em termos de equipamentos (CAPEX – Custos de aquisição de equipamento) e de consumo de energia (OPEX – Custos de operação).
7. Porém, tratando-se de um trabalho científico, baseado em uma situação real de uma empresa, e em virtude dos resultados obtidos com o tratamento das tensões residuais pelo processo vibracional, embora realizado desconsiderando algumas premissas importante do processo, sugerimos, visando o enriquecimento do material elaborado, que o processo de alívio das tensões residuais atualmente empregado (Aquecimento por maçarico), seja mensurado e que seus resultados sejam comparados com o processo de alívio de tensões. Podendo ou não, posteriormente, ser sugerido a empresa, com uma alternativa de substituição ao processo empregado atualmente.