

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS AUGUSTO PEREIRA MARTINS

**ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES: ANÁLISE E
PARAMETRIZAÇÃO**

SANTOS/SP

2014

CARLOS AUGUSTO PEREIRA MARTINS

**ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES: ANÁLISE E
PARAMETRIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação de:

Prof. Dr. José Carlos Morilla

SANTOS/SP

2014

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Martins, Carlos Augusto Pereira
Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes -
Análise e parametrização / Carlos Augusto Pereira
Martins. 09 2014.
121 f.

Orientador: José Carlos Morilla.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,
SP, 2014.

1. Vibrações sub-ressonantes. 2. Alívio de tensões. 3.
Condicionamento de solda. I. Morilla, José Carlos, orient.
II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, pedra fundamental de minha origem e formação, e à minha esposa e filhos que sempre incentivaram a continuação dos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à empresa ENGEBASA MECÂNICA E USINAGEM LTDA, através de seus diretores, por ter me confiado a responsabilidade de trazer esta tecnologia para o Brasil, com o curso em Detroit, Estados Unidos, em 1998, e continuar apostando em meu potencial na realização deste curso e deste trabalho.

Agradeço à Universidade Santa Cecília – UNISANTA, representada pelo Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco Coordenador Geral da Pós-Graduação Stricto Sensu e particular agradecimento ao Prof. Dr. José Carlos Morilla, pela sua valiosa contribuição na orientação desta dissertação.

Agradeço ao Centro Universitário da FEI, representado pelo Prof. Dr. Sergio Delijaicov, pelo apoio e realização do tratamento térmico e dos ensaios de furo cego e difração de raios-X nos corpos de prova, necessários para a análise das tensões residuais, objeto deste trabalho.

Agradecimento especial ao Prof. Dr. Paulo Villani Marques, docente da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG por incentivar, apoiar e sempre nortear as pesquisas de modo objetivo, desde o início do projeto em 2008.

Agradeço à Universidade do Estado de São Paulo – UNESP Unidade São Vicente, representada pelo Sr. Dirceu Semighini, pela ajuda nas pesquisas bibliográficas realizadas em 09/04/2012 e em 09/04/2013.

Por fim, agradecimentos especiais ao Sr. Irineu Penha da Ressurreição, responsável pela retífica dos corpos de prova realizada na UNISANTA, ao Sr. Wilson Roberto de Oliveira Santos por realizar o polimento e tratamento térmico dos mesmos na UNISANTA. Também aos funcionários da Engebasa que cortaram e usinaram os referidos corpos de prova, ao Sr. Juliano Rodrigo Supptitz da Tramontina pelo Alívio de Tensões por vibrações e à Sra. Sandra Helena Aparecida de Araújo por secretariar de modo exemplar este curso de mestrado.

RESUMO

A indústria mundial utiliza a técnica de alívio de tensões e condicionamento de soldas por vibrações sub-harmônicas, ou sub-ressonantes, há mais de vinte anos. No Brasil esta técnica é utilizada há cerca de quinze anos, com resultados comprovados por clientes, através de serviços específicos, realizados pela empresa metal-mecânica nacional Engebasa – Mecânica e Usinagem Ltda. Nos últimos anos, com a busca por processos alternativos, que visam a economia de energia com consequente redução do aquecimento global, esta técnica pode tornar-se muito mais atrativa do que as que usam processos térmicos. Além disso, a redução do tempo do alívio de tensões por vibração em relação ao processo térmico é em torno de 80%, possibilitando maior agilidade na recuperação de peças, fator primordial no atendimento em paradas para manutenção com prazos exíguos. Este trabalho tem por objetivo comparar o alívio de tensões obtido pelo processo de vibrações sub-harmônicas com o conseguido pelo tratamento térmico convencional e parametrizar os resultados obtidos na redução das tensões com a diminuição da frequência do pico de ressonância, antes e após o alívio. Este trabalho apresenta alguns exemplos de tratamentos realizados com sucesso na indústria de bens de capital, sua aplicação direta em indústrias de base e também apresenta uma pesquisa experimental para quantificar as tensões residuais, antes e após o tratamento de alívio de tensões por vibração, comparando-o ao tratamento térmico convencional. Estas pesquisas ocorreram numa parceria entre a Universidade Santa Cecília - UNISANTA, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Centro Universitário da FEI e a empresa Engebasa - Mecânica e Usinagem Ltda, que adquiriu em 2011 o Equipamento Metalax série 2400, o qual possui apurada precisão de remoção de tensões residuais.

Palavras Chave: tensões residuais, alívio de tensões, vibração mecânica

ABSTRACT

The worldwide industries use the sub-resonant vibration stress relief and welding conditioning since beginning of nineties and in Brazil, since ending nineties, with practical results satisfactorily proved by customers through specific services held by metal-mechanics Brazilian Industry Engebasa – Mecânica e Usinagem Ltda. In the last years, with the searching of new alternatives process aiming energy economy with consequently the Global Heating reduce, the use of this technique can be very interesting. Moreover, the time reduction between vibration and thermal stress relief processes is around 80%, allowing a faster repairing pieces, which is prime factor to make a maintenance stop in a short time. Meanwhile, the scientific literature is rare about the use and the efficacy of this system. This work has the propose of comparing the results of sub-harmonic stress relief process with conventional thermal process and correlate them to the decrease of the resonance peak frequencies, before and after treatments. This work introduces some examples of successful works made at capital goods industry, its direct application at basis industry and also presents an experimental research to measure the residual stress, before and after the treatment, comparing to conventional heat treatment results. These researches were done through an association between Santa Cecília University, Minas Gerais Federal University – UFMG, FEI University Center and Engebasa – Mecânica e Usinagem Ltda, that have acquired series 2400 Metalax equipment in 2011, which has accurate precision for relieving the residual stress.

Key words: residual stress, stress relief, mechanical vibration

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comportamento das tensões residuais em uma junta soldada.....	20
Figura 2 – Diagrama esquemático para descrição das tensões térmicas.....	22
Figura 3 - Variação de tensão em função da temperatura da barra central.....	22
Figura 4 - Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras.....	24
Figura 5 - Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem.	25
Figura 6 - Distribuição típica de tensões residuais.....	25
Figura 7 - Distribuição de tensões em um componente com uma solda de topo submetido a carregamentos crescentes.....	26
Figura 8 - Exemplos de Extensômetros.....	31
Figura 9 - Representação dos Raios-X difratados pelos planos AA' e BB'.....	34
Figura 10 - a) Distância interplanar em um material não tensionado. b) Distâncias interplanares de grãos com diferentes orientações, de um corpo tensionado.	35
Figura 11 - Variação das distâncias interplanares de um material tensionado	36
Figura 12 - Porção de superfície de um material tensionado.	36
Figura 13 - Gráfico de $2\theta_{\psi}$ em função de $\sin^2\psi$ fornecido diretamente pelo difratômetro.....	38
Figura 14 – Alívio de tensões residuais em função da temperatura e tempo do TTAT	43
Figura 15 – Curva típica de ressonância.....	45
Figura 16 – Zona sub-harmônica ou sub-ressonante	46
Figura 17 – Estudo do efeito das vibrações na dissipação de energia.....	47
Figura 18 – Curva de ressonância da peça obtida através do equipamento Meta-lax	49

Figura 19 – Alívio de tensões por vibrações em peça apoiada sobre o solo.....	50
Figura 20 – Alívio de tensões por vibrações em peça apoiada sobre a mesa.....	51
Figura 21 – Segunda leitura da curva de alívio de tensões após o tratamento.....	53
Figura 22 – Alteração e estabilização da curva de ressonância após a aplicação da frequência sub-harmônica de alívio de tensões	53
Figura 23 – Condicionamento de solda por vibrações sub-ressonantes	58
Figura 24 – Corpos de prova Aço ABNT-4140	61
Figura 25 – Usinagem de acabamento dos corpos de prova.....	64
Figura 26 – Gráfico esquemático do ciclo térmico da têmpera.....	65
Figura 27 – Equipamento de furo cego.....	66
Figura 28 – Esquema do sistema integrado para medição das tensões residuais	66
Figura 29 – Montagem da roseta no corpo de prova.....	67
Figura 30 – Equipamento de difração de Raios-X.....	67
Figura 31 – Corpos de prova sendo aliviados por ATVS.....	68
Figura 32 – Gráfico esquemático do tratamento térmico de alívio de tensões.....	69
Figura 33 – Forno para tratamento térmico de alívio de tensões.....	70
Figura 34 – Tensões residuais no CP 1 antes e após o alívio no plano X-Y.....	72
Figura 35 – Tensões residuais no CP 2 antes e após o alívio no plano X-Y.....	72
Figura 36 – Tensões residuais no CP 3 antes e após o alívio no plano X-Y.....	73
Figura 37 – Tensões residuais no CP 4 antes e após o alívio no plano X-Y.....	73
Figura 38 – Tensões residuais no CP 5 antes e após o alívio no plano X-Y.....	74
Figura 39 – Tensões residuais no CP 6 antes e após o alívio no plano X-Y.....	74
Figura 40 – Tensões residuais no CP 7 antes e após o alívio no plano X-Y.....	75
Figura 41 – Tensões residuais no CP 8 antes e após o alívio no plano X-Y.....	75
Figura 42 – Tensões residuais no CP 9 antes e após o alívio no plano X-Y.....	76
Figura 43 – Tensões residuais no CP 10 antes e após o alívio no plano X-Y.....	76
Figura 44 – Tensões residuais no CP 11 antes e após o alívio no plano X-Y.....	77

Figura 45 – Tensões residuais no CP 12 antes e após o alívio no plano X-Y.....	77
Figura 46 – Análise matemática dos parâmetros encontrados para o eixo X.....	88
Figura 47 – Análise matemática dos parâmetros encontrados para o eixo Y.....	89

LISTAS DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais (Modenesi, 2012).....	28
Quadro 2 – Métodos para aliviar tensões residuais (Okimura & Taniguchi, 1982). (Modenesi, 2012).....	41
Quadro 3 – Tempos Necessários para o alívio de tensões por vibrações. (Meta-lax, 2013).....	52
Quadro 4 – Composição química do material dos corpos de prova (Adaptado de Spikovic, 2012).....	60
Quadro 5 – Relação dos tratamentos e testes de furo cego e difração de raios-X que foram executados nos corpos de prova.....	62
Quadro 6 – Parâmetros de corte utilizados na operação de desbaste (Adaptado de Spikovic, 2012).....	63
Quadro 7 – Parâmetros de corte utilizados na operação de acabamento (Adaptado de Spikovic, 2012).....	64
Quadro 8 – Tensões residuais obtidas por difração de raios-X, antes e após os alívios.....	78
Quadro 9 – Diferenças de frequência entre os picos de ressonância, antes e após os alívios.....	79
Quadro 10 – Tensões residuais obtidas nos ensaios de furo cego, antes e após os alívios na profundidade de 0,2 mm.....	80
Quadro 11 – Tensões residuais obtidas, antes e após os alívios de tensões por vibrações.....	81
Quadro 12 – Tensões residuais obtidas, antes e após os alívios de tensões por tratamento térmico.....	82

Quadro 13 – Tensões residuais obtidas com os alívios de tensões por vibrações e por tratamento térmico dos corpos de prova usinados.....	82
Quadro 14 – Tensões residuais obtidas com os alívios de tensões por vibrações e por tratamento térmico dos corpos de prova temperados.....	83
Quadro 15 – Tensões máximas registradas antes dos alívios: eixo, profundidade e respectivas tensões após o alívio.....	84
Quadro 16 – Tensões máximas registradas após os alívios: eixo, profundidade e respectivas tensões antes do alívio.....	85
Quadro 17 – Tensões residuais registradas antes e após os alívios por difração de raios-X.....	86
Quadro 18 – Correlação entre as tensões residuais removidas e a diferença de frequência entre os picos de ressonância.....	87

LISTAS DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATT – Alívio de Tensões Térmico

ATVS – Alívio de Tensões por Vibrações Sub-Ressonantes

C P – Corpo de Prova

Fbr – Frequência antes da ressonância

Fml – Frequência sub-ressonante

Frp – Frequência do pico de ressonância

TTAT – Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 TENSÕES RESIDUAIS.....	19
2.1.1 Tipos de Tensões.....	19
2.1.2 Mecanismo Básico Gerador de Tensões Residuais de Origem Térmica....	21
2.1.3 Consequências das Tensões Residuais.....	26
2.1.4 Determinação Experimental das Tensões Residuais.....	27
2.1.4.1 Técnicas destrutivas.....	29
2.1.4.2 Técnicas semidestrutivas.....	30
2.1.4.2.1 Método do Furo Cego.....	30
2.1.4.3 Técnicas não destrutivas.....	33
2.1.4.3.1 Difração de Raios-X.....	33
2.2 CONTROLE E ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	40
2.2.1 Alívio de Tensões Térmico.....	42
2.2.2 Alívio de Tensões por Vibrações.....	44
2.2.2.1 Origem da Utilização.....	44
2.2.2.2 Desenvolvimento da Tecnologia.....	46
2.2.2.3 Aplicações.....	49
2.2.2.4 Abrangência, Resultados e Limitações.....	54
2.2.2.5 Aplicações Práticas Industriais no Brasil.....	55
2.3 CONDICIONAMENTO DE SOLDA POR VIBRAÇÕES.....	57
3. OBJETIVOS.....	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	60
4.1.1 Distribuição dos Corpos de Prova.....	62
4.1.2 Processo de Confecção dos Corpos de Prova Usinados.....	63
4.1.3 Processo de Confecção dos Corpos de Prova Temperados.....	64
4.2 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS ANTES DOS TRATAMENTOS.....	65

4.3 ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES.....	68
4.4 ALÍVIO DE TENSÕES POR TRATAMENTO TÉRMICO.....	69
4.5 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS APÓS TRATAMENTOS.....	70
5. RESULTADOS.....	71
5.1 TENSÕES RESIDUAIS ANTES E APÓS OS ALÍVIOS DE TENSÕES.....	71
5.1.1 Medições com a Técnica do Furo Cego.....	71
5.1.2 Medições com a Técnica de Difração de Raios-X.....	78
5.2 RESULTADOS DOS ALÍVIOS DE TENSÕES POR VIBRAÇÃO.....	79
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	80
6.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FURO CEGO.....	80
6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	86
6.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS ATVS.....	87
7. CONCLUSÃO.....	90
8. CONSIDERAÇÃO FINAL.....	91
9. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXO A.....	97
ANEXO B.....	98
APÊNDICE A.....	100
APÊNDICE B.....	113
APÊNDICE C.....	119

1. INTRODUÇÃO

É comum o aparecimento de tensões mecânicas nos metais em geral, ao sofrerem algum tipo de conformação, como dobra, estiramento ou prensagem. Na soldagem, usinagem ou quando são gerados altos gradientes térmicos, com a têmpera, o surgimento de tensões é bastante acentuado, podendo levar a distorções dimensionais, resultantes da expansão e da contração não uniformes dos materiais (MARTINS, 2012).

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Elas são acumuladas no componente como consequência dos processos de fabricação. Uma das principais causas de seu aparecimento é a ocorrência, ao longo de uma seção da peça, de deformações plásticas não uniformes, que podem ter sido originadas por efeitos mecânicos ou térmicos durante a soldagem, ou que podem também ser resultantes de transformações microestruturais não homogêneas que impliquem em alterações volumétricas, como na transformação martensítica (MODENESI, 2012). Por exemplo, se um objeto for submetido a um aquecimento e a um resfriamento homogêneo em toda sua seção, e se a sua variação dimensional decorrente das alterações térmicas ocorrerem livremente, o objeto não apresentará tensões residuais decorrentes do processo; entretanto, se a variação térmica não for uniforme ao longo do objeto ou se este não puder se dilatar e contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver. Isto é exatamente o que ocorre na soldagem, pois pelo fato do aporte de calor ser extremamente intenso e localizado, cada região se comporta de maneira diferente, com temperaturas diferentes, taxas de resfriamento diferentes, e, portanto, microestruturas diferentes (MODENESI, 2008).

As tensões residuais representam uma das principais causas potenciais para provocar falhas prematuras e distorções na peça, comprometendo o comportamento e até mesmo diminuindo a vida útil do componente, sendo fundamental o conhecimento de suas características e de medidas para a sua prevenção e controle (MODENESI, 2008).

A medição, controle ou monitoramento de tensões residuais durante toda rota de processamento do material é de vital importância para controlar os desvios de forma e dimensão previstos no projeto de engenharia em etapas subsequentes do processo de

fabricação. Existem muitas técnicas para a medição e determinação das tensões residuais, cada uma apresentando suas características e limitações. Entre elas estão a técnica de alívio de tensões e a técnica de difração de raios-X. No método pelo alívio de tensões, a tensão residual é determinada medindo-se o relaxamento da tensão elástica que ocorre no furo cego, quando uma parte do material é removida. Uma característica dessa técnica é o fato de o processo ser destrutivo. Em relação ao método de medição através da difração de raios-X, como o parâmetro de rede dos metais não tensionados é conhecido, é possível compará-lo em ambos os estados e obter o resultado, sem usinagem ou perfuração (COFIÑO, 2010).

O problema de tensões residuais é muito conhecido nas indústrias metalúrgicas e metal-mecânicas e para minimizar ou eliminar essas distorções, normalmente executa-se após a soldagem, um tratamento térmico de alívio de tensões, que geralmente envolve grande consumo de energia, em virtude da temperatura e do tempo necessários, tornando-se um processo relativamente lento e oneroso.

Em substituição ao alívio térmico de tensões, vem sendo utilizada já há algum tempo, em várias partes do mundo, uma tecnologia que utiliza a vibração mecânica, com o mesmo objetivo. Neste tipo de procedimento, a economia em tempo é cerca de 98% e em custos energéticos 90% (MARTINS, 2012).

No Brasil, esta tecnologia é utilizada desde 1998 pela empresa metal-mecânica nacional Engebasa – Mecânica e Usinagem Ltda, com resultados comprovados por clientes. Esta tecnologia, chamada de Vibrações Sub-Harmônicas, utiliza a vibração mecânica originada em um excêntrico acoplado a um motor elétrico de pequeno porte, que elimina as tensões residuais oriundas de variações de temperatura, conformação, fadiga ou usinagem dos materiais. As instituições normativas ainda não incluíram esta tecnologia em seu elenco de técnicas para alívio de tensões, por causa da falta de comprovações científicas que fundamentem os resultados práticos atingidos na indústria (MARTINS, 2012).

O presente trabalho teve como objetivo comparar o alívio de tensões obtido pelo processo de vibrações sub-harmônicas com o conseguido pelo tratamento térmico convencional. Para determinar esta comparação, foram analisados os resultados de medição das tensões residuais em corpos de prova, através dos métodos de difração de raios-X e de furo cego.

Ainda objetivou verificar a correlação existente entre os resultados obtidos nas medições das tensões residuais com as diferenças da frequência do pico de ressonância dos corpos de prova, antes e após o alívio de tensões por vibrações, com o intuito de quantificar, ou parametrizar os resultados do relatório final do alívio de tensões.

Este trabalho apresentou uma pesquisa bibliográfica sobre tensões residuais, as técnicas de medição, abordando particularmente as técnicas de furo cego e difração de raios-X, que foram utilizadas para determinação das tensões residuais existentes antes e depois do alívio de tensões. A pesquisa abordou, ainda, a teoria que fundamenta a remoção de tensões através da vibração mecânica e apresentou alguns resultados obtidos na indústria. Neste procedimento, é apresentado um estudo mais aprofundado, utilizando metodologia de pesquisa científica, para a verificação da eficácia e parametrização dos resultados do alívio de tensões por vibrações sub-harmônicas ou sub-ressonantes (ATVS), através da comparação dos resultados obtidos em corpos de provas tratados termicamente pelo processo convencional de alívio de tensões (TTAT).

Para análise das tensões residuais, foram realizados testes de difração de raios-X e de furo cego, comparando os resultados antes e após os alívios de tensões. A parametrização foi obtida através da comparação dos resultados das tensões residuais observadas em cada corpo de prova com a respectiva diminuição da frequência do pico de ressonância antes e após o alívio de tensões por vibração.

Foram analisados e discutidos os resultados dos testes realizados através de modelo matemático para obter a correlação entre a variação da frequência de ressonância e a diminuição das tensões residuais e foi sugerida para trabalhos futuros a utilização de corpos de prova de diferentes materiais, com análise metalográfica antes e após os alívios térmicos e por vibrações sub-ressonantes, para avaliar possíveis alterações em suas estruturas cristalinas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho aborda as características gerais das tensões residuais, seus tipos, mecanismo gerador, consequências, determinação experimental e seu controle. Abrange também a tecnologia do alívio de tensões por vibração, seu desenvolvimento e os resultados obtidos.

2.1 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem, frequentemente, em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera, etc.) e representam uma das principais causas potenciais para a ocorrência de formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e da tendência para a fratura frágil, diminuindo a vida útil do componente, além de comprometer seu desempenho (MODENESI, 2012).

Em geral, tensões residuais compressivas na superfície aumentam a vida de um componente mecânico quando solicitado por cargas cíclicas. O oposto ocorre com tensões residuais de tração (TOTTEN; HOWES, 2003).

As tensões residuais podem apresentar caráter elástico ou plástico. Quando elástico, as tensões residuais atingem, no máximo, a tensão de escoamento local do material. Quando plástico, as tensões podem ser aliviadas aquecendo-se o material até uma temperatura em que a tensão de escoamento seja igual ou inferior às tensões residuais presentes no material. Neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas e serão aliviadas (DONATO, 2008).

2.1.1 Tipos de Tensões

Com relação à área de abrangência, as tensões residuais são macroscópicas (tipo I), microscópicas (tipo II), ou submicroscópicas (tipo III) (GRANT, 2002). As tensões residuais são originadas devido a desajustes entre diferentes regiões.

Quando esses desajustes atravessam grandes distâncias, por exemplo, aqueles causados por deformação plástica não uniforme, ou por acentuados gradientes térmicos, como o que ocorre na soldagem, tratamento térmico ou usinagem, as tensões residuais resultantes são do tipo macroscópicas (WITHERS; BHADSHIA, 2001).

A Figura 1 apresenta um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas (tipo I), encontrado em chapas finas soldadas (RODRIGUES, 2007).

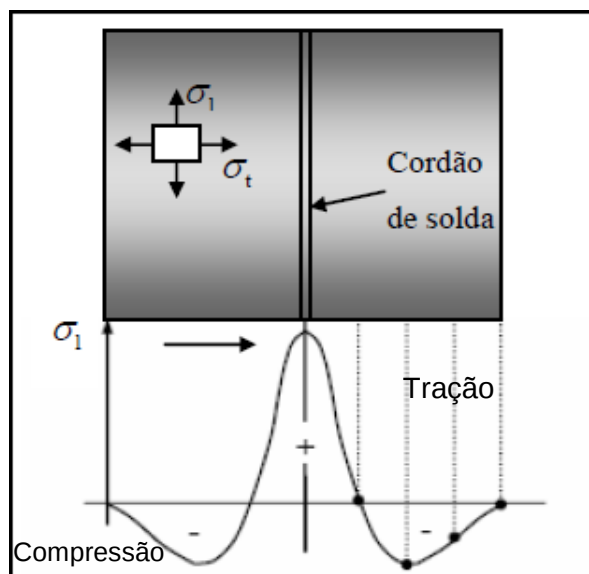


Figura 1- Comportamento das tensões residuais em uma junta soldada.

Fonte: Rodrigues (2007)

Pela figura 1 observa-se que a tensão de tração na direção do cordão de solda (σ_1) é máxima na região do cordão, mínima na região adjacente, passa a ser de compressão e se torna nula nas regiões mais afastadas, mantendo o equilíbrio dos carregamentos internos, considerando-se que as tensões são constantes ao longo da espessura.

Quanto às tensões residuais microscópicas (tipo II), estas variam de grão para grão e são chamadas de intergranulares. Um baixo nível de tensões tipo II quase sempre existe nos metais policristalinos simplesmente pelo fato de que as propriedades térmicas e elásticas de grãos vizinhos orientados diferentemente não são as mesmas, e níveis mais elevados ocorrem quando há várias fases ou quando ocorrem transformações de fases (WITHERS; BHADSHIA, 2001).

Na escala atômica (tipo III), as regiões de desajustes alcançam dimensões submicroscópicas. Esta categoria ocorre nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina como lacunas, interstícios, falhas de empilhamento, entre outros. Em um material bifásico, tensões macroscópicas são contínuas ao longo das fases, o que não ocorre com tensões microscópicas tipo II e III (RODRIGUES, 2007).

2.1.2 Mecanismo Básico Gerador de Tensões Residuais de Origem Térmica

Quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação de temperatura ($\Delta T = T - T_0$), o que é descrito pela equação de dilatação térmica linear: (Equação 1) (MODENESI, 2012).

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 * \alpha * \Delta T \quad (1)$$

sendo (Δl) a variação do comprimento inicial (l_0), e o (α) coeficiente de dilatação térmica linear.

Se um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais, estas não resultam em efeitos mecânicos, isto é, após o ciclo térmico, o objeto não deverá apresentar tensões residuais nem distorções. Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões e/ou deformações podem se desenvolver (MODENESI, 2012).

Para o entendimento desse fenômeno alguns autores, como Cabral (2011) e Modenesi (2012), propuseram modelos similares para explicar o fenômeno das tensões térmicas. O modelo consiste de três barras de aço de baixo teor de Carbono de mesmo comprimento e seção, e unidas em suas extremidades por duas bases, de forma que nenhuma pode se alongar ou contrair independentemente da outra, mostrado na Figura 2A. Primeiramente, considera-se que as tensões existentes no material na ausência de uma solicitação externa são nulas, isto é, o sistema está em auto-equilíbrio, onde a

força e o momento resultantes dessas tensões, em qualquer seção da barra, devem ser nulos (CABRAL, 2011).

Com o aquecimento da barra central (barra 2), conforme mostra a Figura 2B, haverá a tendência da mesma se dilatar. Mantendo-se as demais barras 1 e 3 e as bases a temperatura ambiente, a dilatação da barra 2 será impedida. Assim, tensões de tração aparecem nas barras laterais e tensões de compressão na barra central. Observa-se que a intensidade das tensões nas barras laterais é igual à metade da intensidade das tensões na barra central (CABRAL, 2011).

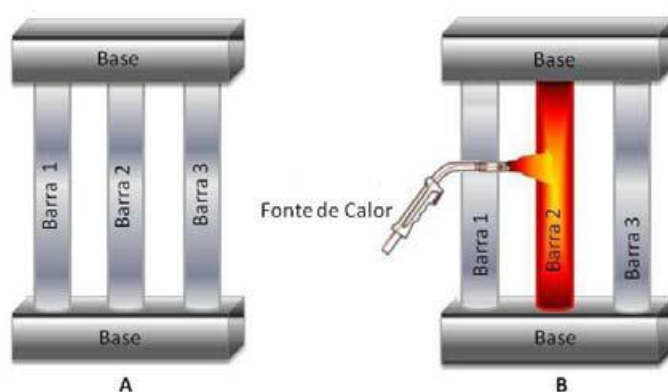


Figura 2 – Diagrama esquemático para descrição das tensões térmicas.

Fonte: Cabral (2011)

A Figura 3 ilustra a evolução da tensão longitudinal média na barra central em função de sua temperatura.

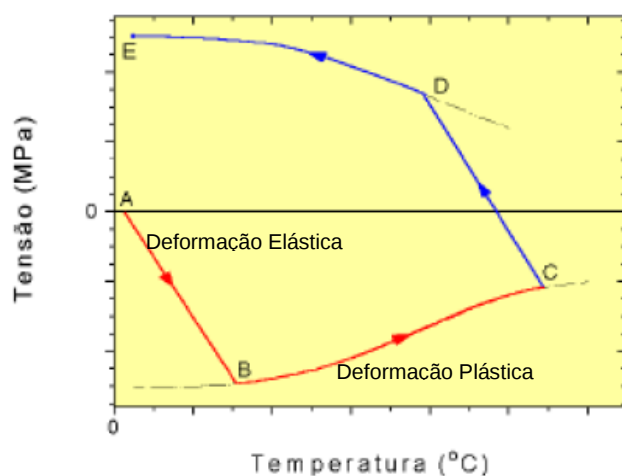


Figura 3 - Variação de tensão em função da temperatura da barra central.

Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

No início do aquecimento (trecho A-B da Figura 3), as tensões e deformações resultantes da dilatação da barra central serão elásticas. Como as barras mantêm o mesmo comprimento aproximado, a dilatação térmica tem de ser compensada por deformações elásticas, e a seguinte relação deve ser obedecida: (Equação 2)

$$\frac{\sigma_c}{E_t} = \alpha * \Delta T + \frac{\sigma_l}{E} \quad (2)$$

sendo E e E_t os módulos de elasticidade do material à temperatura ambiente e à temperatura (T) da barra central, respectivamente, e σ_c e σ_l são os valores de tensão na barra central e nas barras laterais. Como as barras têm a mesma seção, $\sigma_l = -0,5 \sigma_c$, e assim obtém-se a Equação 3:

$$\sigma_c = -\alpha * \Delta T * \frac{2E}{1+2E/E_t} \quad (3)$$

Quando a barra 2 for aquecida de forma que as tensões resultantes da dilatação térmica estejam além do seu limite de escoamento, o valor da tensão tenderá a cair à medida que sua temperatura aumenta porque as tensões compressivas provocam deformações plásticas. Como o limite de escoamento diminui com o aumento da temperatura, a barra sofre uma maior deformação plástica (curva BC, Figura 3).

Se o aquecimento no ponto C for interrompido, a barra central se contrai com a queda de temperatura, contudo ela se tornou mais curta devido às deformações plásticas que sofreu. No momento que ela resfria, tensões de tração passam a atuar sobre ela até que o limite de escoamento seja atingido no ponto D.

Como as barras estão rigidamente ligadas, as diferenças de comprimentos serão compensadas pela deformação elástica que gerarão tensões residuais. Na barra central essas tensões serão de tração e nas externas de compressão (de valor igual à metade da tensão na barra central, supondo que as seções transversais sejam as mesmas) (MODENESI, 2012).

Essa analogia pode ser utilizada para a representação de tensões de uma junta soldada, associando a região da solda com a barra central e as regiões mais afastadas do metal de base, com as barras externas. Baseado nesse raciocínio pode-se esperar, como consequência do aquecimento da junta durante a soldagem, o desenvolvimento

de tensões residuais de tração na região da solda e de tensões de compressão no metal de base. Esta analogia pode ser visualizada na Figura 4 (CABRAL, 2011).

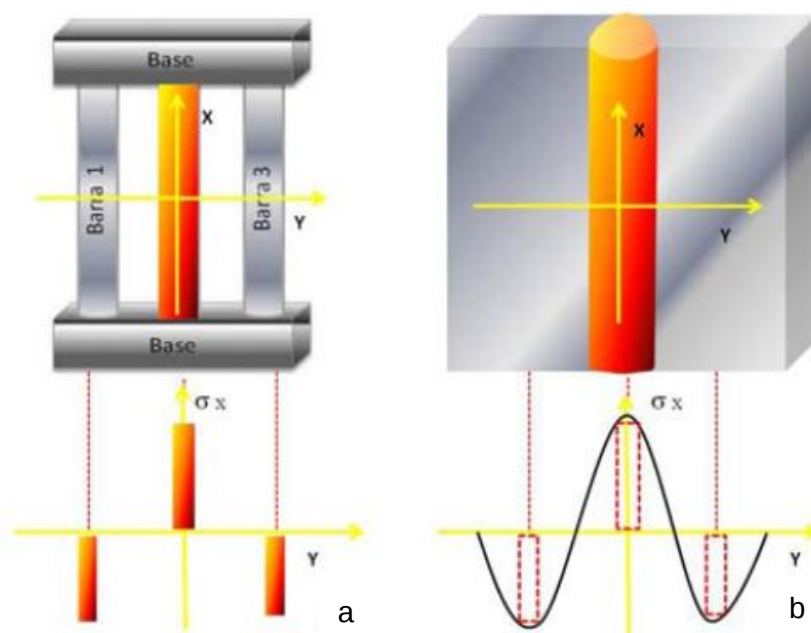


Figura 4 - Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo (b).

Fonte: Cabral (2011)

A Figura 5 ilustra o desenvolvimento de tensões devido ao aquecimento não uniforme de uma junta soldada. Na seção AA', muito distante da poça de fusão e ainda não aquecida pela fonte de calor, não existem variações de temperatura e o material ainda está isento de tensões (MODENESI, 2012).

Na seção BB', junto à poça de fusão, o material aquecido tende a se expandir sendo, contudo, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, assim, tensões de compressão em regiões próximas à zona fundida e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Quando o seu limite de escoamento é atingido, o material aquecido deforma-se plasticamente em compressão. Na poça de fusão, o material ainda está no estado líquido e as tensões são nulas.

Com o resfriamento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda.

Assim, na seção CC' surgem tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Estas tensões aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida. Após o resfriamento completo, seção DD', as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material.

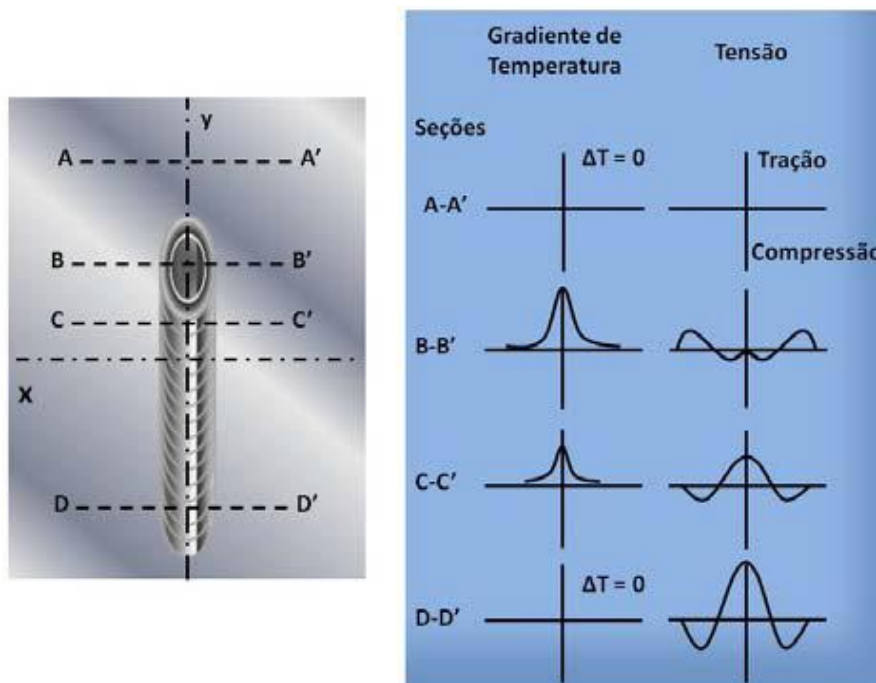


Figura 5 - Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem.

Fonte: Modenesi (2012)

A distribuição das tensões residuais devido à contração térmica da junta soldada, ao longo de uma perpendicular ao cordão de solda no centro da chapa é representada pela Figura 6. Nesta mesma figura, é ilustrada a distribuição das tensões residuais longitudinais (fig. 6A) e transversais (fig. 6B) ao longo do cordão (ARAÚJO, 2007).

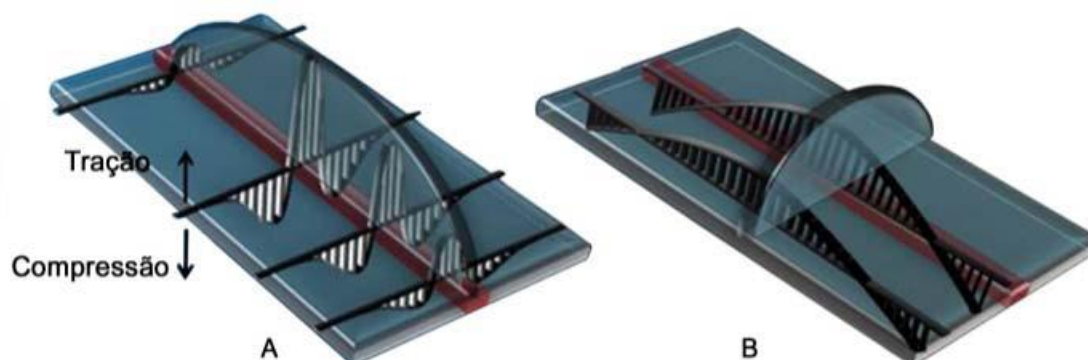


Figura 6 - Distribuição típica de tensões residuais. (A) Tensões Longitudinais e (B) Tensões Transversais.

Fonte: Araújo (2007)

2.1.3 Consequências das Tensões Residuais

Quando um componente soldado, apresentando uma distribuição inicial de tensões residuais, de acordo com a curva 0 da figura 7, é submetido a um carregamento de tração, dentro do regime elástico, as tensões residuais se somam diretamente às tensões do carregamento.

Assim, as regiões da solda, nas quais as tensões residuais de tração são mais elevadas, atingem condições de escoamento plástico antes do resto do componente, o que pode ser observado nas curvas 1, 2 e 3 da figura 7. O desenvolvimento de deformações plásticas, localizadas principalmente na região da solda, tende a diminuir as variações dimensionais responsáveis pela existência das tensões residuais. Desta forma, quando o carregamento externo é retirado, o nível dessas tensões fica reduzido, mostrado na curva 4 da figura 7. Isto é, as variações dimensionais ocorridas na soldagem e responsáveis pelas tensões residuais são, pelo menos parcialmente, removidas pela deformação plástica causada pelo carregamento posterior (AGGEN, *et al.*, 1998).

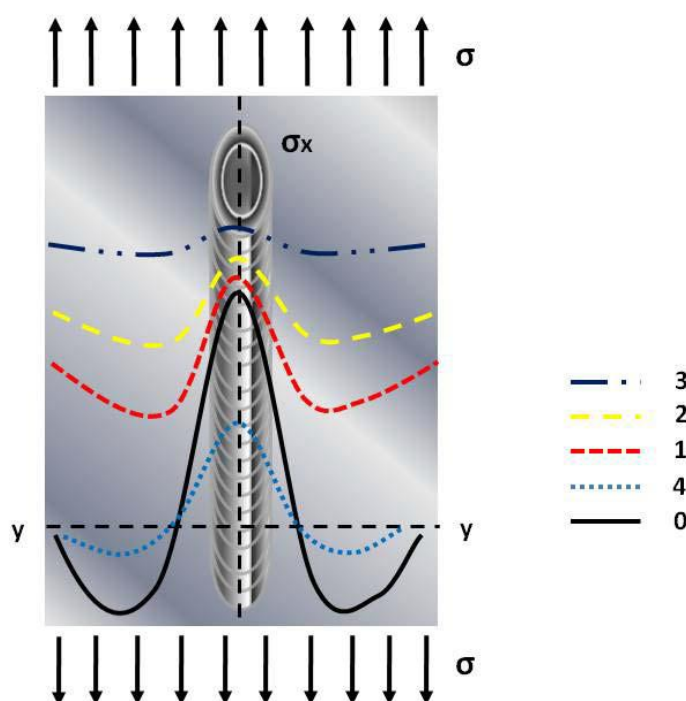


Figura 7 - Distribuição de tensões em um componente com um solda de topo submetido a carregamentos crescentes (curvas 1,2, 3) e distribuição de tensões residuais após a liberação do carregamento.

Fonte: Aggen, *et al.*, (1998)

2.1.4 Determinação Experimental das Tensões Residuais

Deve-se ter cuidado na escolha da técnica de medição de tensão residual. É necessário saber qual o tipo de tensão é importante ao projeto do componente para melhorar seu desempenho ou assegurar sua integridade estrutural. Por exemplo, em materiais metálicos, tensões tipo II e III são, geralmente, desprezíveis, e a atenção é voltada às tensões macroscópicas tipo I. Como consequência, um comportamento inesperado pode não ser resultado de medidas erradas de tensões, mas devido à medição do tipo errado de tensão pela escolha inadequada da técnica (COFIÑO, 2010).

Existem vários métodos para a medição das tensões residuais, entretanto, somente alguns são utilizados em componentes que podem apresentar pequenas ou grandes dimensões, como corpos de prova, pontes e aviões. Estes ensaios podem ser destrutivos, semi-destrutivos ou não destrutivos e, em nenhum deles, a tensão desejada é medida diretamente. A análise obtém o valor de deformação elástica do material e, através de fórmulas provenientes da teoria da elasticidade, a tensão residual correspondente é calculada (MODENESI, 2012).

Cada método apresenta suas aplicações, vantagens, desvantagens e peculiaridades, e os principais parâmetros que devem ser levados na escolha da técnica de medição são: a natureza do componente, tipo de tensões residuais, gradiente de tensões residuais, geometria do componente e o custo final da medição (COFIÑO, 2010).

As técnicas de relaxação de tensões são baseadas na medida da deformação elástica que ocorre quando é removida uma parte de um corpo de prova contendo tensões residuais (MODENESI, 2012). A mudança de forma resultante da deformação pode ser medida por diferentes sensores. Assim, dependendo do tipo de sensor usado, de sua forma de colocação e de remoção do material, diferentes técnicas são definidas. Quando sensores elétricos (extensômetros) ou mecânicos são usados, as deformações elásticas associadas à remoção de material podem ser determinadas quantitativamente. Com a aplicação de equações da teoria da elasticidade, as tensões residuais, inicialmente existentes no material, podem ser determinadas. Embora sejam

técnicas destrutivas, estas são as mais usadas para a determinação experimental de tensões residuais (MODENESI, 2012).

O quadro 1 apresenta diversas técnicas que podem ser utilizadas para a determinação de tensões residuais em soldas.

Quadro 1 - Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais.

Grupo	Técnica
Técnicas de relaxação de tensão	Técnicas com extensômetros elétricos Técnicas com extensômetros mecânicos Técnicas com revestimentos frágeis Técnicas com revestimentos fotoelásticos
Técnicas de difração de Raios X	Difração em filme Difração com difratômetro
Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão	Técnicas com ultrassom Técnicas com medidas de dureza Técnicas magnéticas
Técnicas de fissuração	Fissuração pelo hidrogênio Fissuração por corrosão sob tensão

Fonte: Modenesi (2012)

A técnica de difração de raios-X baseia-se na determinação dos parâmetros de rede da estrutura cristalina de pequenas regiões da peça. Como as deformações elásticas alteram o valor destes parâmetros, eventuais variações destes, podem ser associadas com as deformações elásticas presentes no material submetido a tensões residuais. Esta técnica permite medir deformações superficiais em pequenas áreas (3 μm de diâmetro) e não é destrutiva. Em geral esta técnica é mais demorada e menos precisa do que as técnicas de relaxação de tensões (COFIÑO, 2010).

Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão, de forma similar à anterior, medem alterações de uma propriedade qualquer do material e as associam com as deformações elásticas presentes na região de medida. São, também, técnicas

não destrutivas. Técnicas com ultrassom baseiam-se na determinação de alterações no ângulo de polarização de ondas ultrassônicas polarizadas, na taxa de absorção de ondas sonoras ou na velocidade de propagação do som para estimar o estado de tensão no material. Técnicas de dureza são baseadas em pequenas variações na dureza do material que ocorrem com a presença de tensões elásticas. Finalmente, técnicas magnéticas baseiam-se em variações de propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos (basicamente aços) com as tensões elásticas (MODENESI, 2012).

Das técnicas apresentadas no quadro 1, que se encontra na página 28, as de difração de raios-X, ultrassom, dureza e magnéticas tem aplicação fora de laboratórios, existindo dispositivos portáteis para a determinação não destrutiva de tensões residuais.

As técnicas de fissuração são baseadas na avaliação qualitativa do padrão de fissuração desenvolvido em corpos de prova colocados em ambientes capazes de formar, no corpo de prova, trincas induzidas pelo estado de tensões dos corpos de prova. As trincas são, em geral, desenvolvidas por fragilização pelo hidrogênio ou por corrosão sob tensão (RODRIGUES, 2007).

É possível seguir dois caminhos para obter o valor das tensões residuais: (RODRIGUES, 2007)

- Remover material e verificar as tensões aliviadas
- Comparar as propriedades do componente tensionado com as do componente isento de tensões.

2.1.4.1 Técnicas destrutivas

A primeira preocupação ao escolher um método destrutivo para medir as tensões é a retirada de material do componente em análise. Isso significa que uma pequena porção irá representar um ou vários componentes maiores. Não se deve esquecer, entretanto, que tensões residuais não são uniformes em qualquer direção e que há um grande gradiente de tensões entre todas elas (TOTTEN; HOWES, 2003).

O procedimento comum utilizado nestas técnicas é bastante similar e está descrito como segue:

1. Criação de um novo estado de tensões pelo alívio localizado das tensões residuais. Isto é, normalmente feito pela retirada de material tensionado, através de usinagem ou retirada de camadas deste;
2. Medição da deformação ou dos deslocamentos causados pelo alívio das tensões residuais;
3. A partir destes dados, as tensões são calculadas, relacionando tensão e deformação pela teoria da elasticidade (RODRIGUES, 2007).

Todos os processos de remoção de material, como torneamento, furação, fresagem e corte, introduzem tensões residuais de magnitude elevada, portanto, a camada superficial da amostra deve ser retirada por polimento eletrolítico ou químico com o objetivo de eliminar essas tensões residuais induzidas pelo processo de retirada de material (TOTTEN; HOWES, 2003).

2.1.4.2 Técnicas semidestrutivas

As técnicas são consideradas não destrutivas quando não altera em nada a utilização ou reduzem a resistência mecânica ou outras propriedades do componente em estudo. Entre os métodos destrutivos e não destrutivos encontram-se os semidestrutivos, os quais introduzem algum dano no componente, porém não comprometem sua integridade ou sua operação. Esses requerem a perfuração de pequenos orifícios, anéis ou recuos (TOTTEN; HOWES, 2003).

Nessa categoria, a técnica mais conhecida e empregada pela indústria é a técnica do furo-cego, que será utilizada neste trabalho. Porém, também existem outras, como por exemplo, *Spot Annealing* (recozimento pontual) e *Ring Coring* (técnica do anel usinado).

2.1.4.2.1 Método do Furo Cego

Consiste em medir a mudança na deformação superficial decorrente do alívio mecânico, realizado através da introdução de um furo de pequenas dimensões na superfície do componente. O princípio é que a remoção de material implica em reajuste

do estado de tensão do material adjacente, de modo a alcançar o equilíbrio (TOTTEN; HOWES, 2003). A figura 8 mostra um tipo de extensômetro.

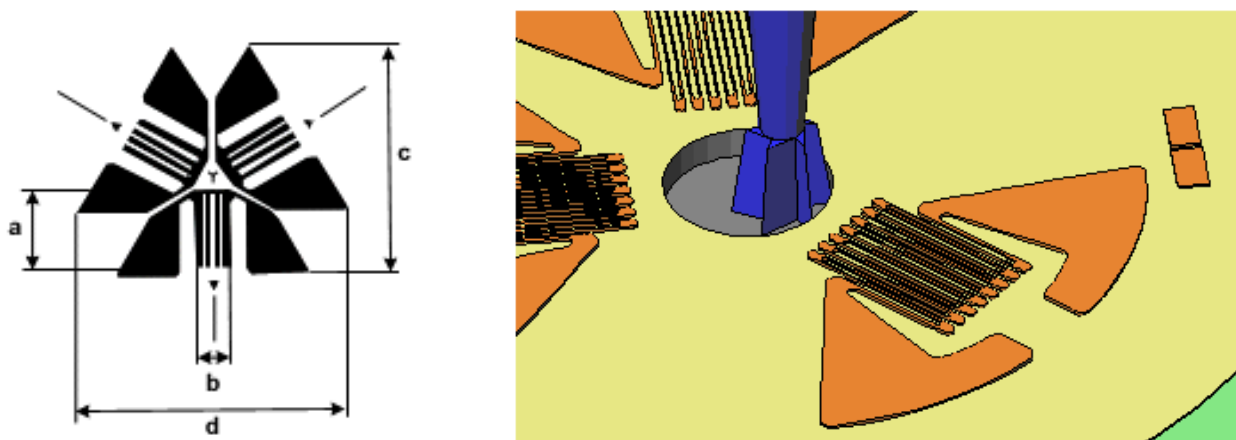


Figura 8 – Exemplos de Extensômetros.

Fonte: Nunes (2006)

Deve-se fixar uma roseta em posição adequada na superfície do componente e realizar a usinagem de um furo de pequenas dimensões no centro da roseta, um extensômetro desenhado especialmente para este fim. A avaliação deste alívio de tensões é feita por esses extensômetros, elétricos ou mecânicos, e então a tensão residual pode ser determinada por meio de diversas equações (ASTM E-837, 2009).

Na maioria dos casos, as tensões residuais não são uniformes ao longo da profundidade. Por exemplo, um material submetido a jateamento apresenta elevadas tensões compressivas próximas a superfície, e tensões de tração de magnitude muito inferior em seu interior. Em tais casos, não se pode aplicar um método que considera as tensões como uniformes (COFIÑO, 2010).

Alguns métodos matemáticos foram desenvolvidos de modo a calcular tensões residuais não uniformes em materiais de espessura considerável a partir de medidas obtidas pelo método “Furo Cego”.

Esses métodos identificam as tensões residuais interiores considerando a evolução das deformações medidas conforme a profundidade do furo aumenta. Pelo fato de que as deformações são medidas por extensômetros fixados na superfície do

material, a maior sensibilidade das tensões residuais é próxima a superfície, reduzindo rapidamente com a profundidade (COFIÑO, 2010).

Em profundidades em torno do raio da roseta a sensibilidade é nula. Essa é a limitação fundamental deste método, que implica na dificuldade de avaliar corretamente as tensões no interior do material. Pequenos erros nas medidas realizadas manualmente implicam em um grande erro no cálculo das tensões (ASTM E-837, 2009).

Existem três métodos de medições:

1. Método de tensões uniformes: é o especificado pela norma ASTM E-837 de 2009. Assume que as tensões residuais são uniformes ao longo da profundidade do material. Quando as tensões presentes no material são realmente uniformes, esse é o método adequado, pois é o menos sensível a erros experimentais.
2. Método Power Series: promove resolução limitada considerando que as tensões variam linearmente com distância a partir da superfície. É uma boa escolha quando as tensões variam pouco com a profundidade (COFIÑO, 2010).
3. Método integral: oferece uma avaliação separada das tensões residuais em cada incremento de profundidade durante as medições, assim, a resolução é a maior dos três métodos. É o método adequado quando as tensões variam rapidamente, entretanto a sensibilidade aos erros experimentais também é a mais intensa. As tensões finais são calculadas através da integração das tensões medidas em cada incremento. Este método será utilizado neste trabalho.

O método do furo cego é um dos mais utilizados na determinação de tensões residuais superficiais, pois apresenta baixo custo relativo, mobilidade do equipamento, e possibilidade de aplicação a uma vasta variedade de materiais. Entretanto, apresenta limitações por ser uma técnica semidestrutiva (COFIÑO, 2010).

Existem restrições na aplicação da técnica do furo-cego e, além da falta de sensibilidade dos “gages” com aumento da profundidade e os erros experimentais já

citados anteriormente, outra restrição refere-se ao fato de que tal método se aplica aos casos nos quais o material se comporta de modo elástico-linear. Portanto, na prática, resultados satisfatórios são obtidos quando as tensões residuais não ultrapassam 60% da tensão de escoamento do material (AGGEN *et al.*, 1998).

Um material que apresenta tensões residuais superiores a este valor, ao ser submetido ao método do furo-cego, poderá apresentar uma plastificação na borda do furo provocada pela redistribuição no estado de tensões na região onde houve a remoção de material. Desta forma, os resultados obtidos no ensaio não serão corretos, podendo superar a tensão de escoamento do material. Neste caso, os resultados obtidos pela técnica tradicional do furo cego não são confiáveis, pois o algoritmo de cálculo das tensões é baseado em teorias linear-elásticas (ASTM E-837, 2009).

2.1.4.3 Técnicas não destrutivas

Os métodos não destrutivos medem a deformação através da análise da estrutura cristalina do material metálico ou de algum parâmetro físico que sofra alteração em função do espaçamento interplanar do cristal.

Algumas técnicas que se encaixam em tal condição são: Difratometria de Raios-X, Difratometria de Nêutrons e *Magnetic Barkhausen noise* (Ruído Magnético de Barkhausen) (TOTTEN; HOWES, 2003).

2.1.4.3.1 Difração de Raios-X

Quando um material cristalino é irradiado por um feixe de raios-X monocromático com comprimento de onda λ , ocorre o espalhamento deste feixe pelos átomos que compõem o material (CULLITY, 1956).

Um feixe difratado pode ser definido como um feixe composto de um grande número de raios espalhados reforçando-se mutuamente. Devido à distribuição regular dos átomos no material, as ondas espalhadas tendem a interferir entre si de modo similar à difração de luz visível, como se pode verificar na Figura 9 da página 34 (CALLISTER, 2007).

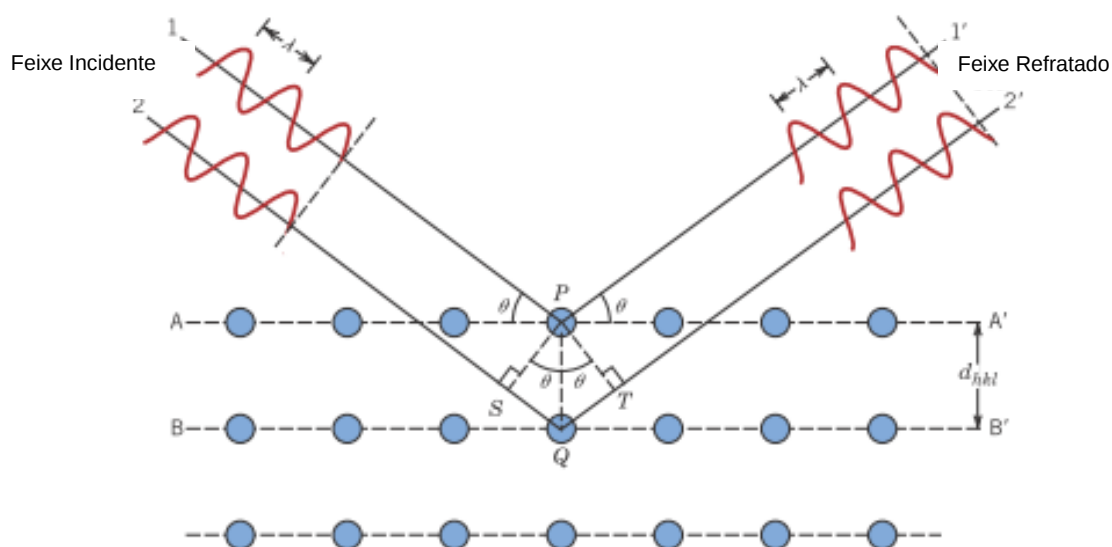


Figura 9 - Representação dos Raios-X difratados pelos planos AA' e BB'.

Fonte: Adaptado de Callister (2007)

As intensidades destas ondas se somam segundo uma interferência construtiva, se a seguinte condição, conhecida como lei de Bragg (Equação 4), for satisfeita:

$$n * \lambda = 2 * d * \sin\theta \quad (4)$$

sendo:

n = número inteiro conhecido por ordem de difração

d = distância interplanar

λ = comprimento de onda do feixe incidente

θ = ângulo de difração correspondente (PAGEL-NITSCHKE, 2009).

O método de medição e de cálculo mais conhecido é chamado de método do $\sin^2\psi$. Tal método usa alguns pressupostos em relação à condição do material, e utiliza baixa energia de radiação, o que significa baixa penetração, de forma a reduzir esforços necessários para se obter uma determinação precisa das tensões residuais. O pressuposto básico é que, em um metal policristalino, os cristais estão desordenados (PAGEL-NITSCHKE, 2009).

Em tal material, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos, entretanto quando tensionado, sendo esta tensão aplicada ou residual, o espaçamento interplanar se altera do seu valor livre de tensões, correspondente à magnitude dessas tensões. A Figura 10 ilustra este efeito. Se a tensão aplicada for de tração, as distâncias entre planos perpendiculares a estas aumentarão, enquanto para os planos paralelos ao campo de tensões, essas distâncias vão diminuir (RODRIGUES, 2007).

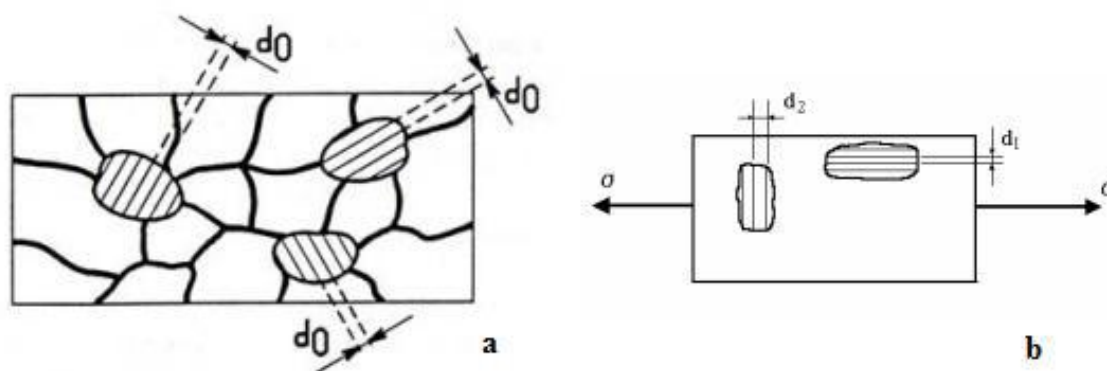


Figura 10 - a) Distância interplanar em um material não tensionado. b) Distâncias interplanares de grãos com diferentes orientações, de um corpo tensionado. As distâncias mudam de acordo com a direção relativa entre a força ou tensão e a orientação cristalina do grão.

Fonte: Rodrigues (2007)

Sob uma determinada tensão, portanto, os cristais sofrerão uma alteração no seu espaçamento, e, sendo λ constante, uma variação da distância entre planos provocada pela aplicação de uma tensão, provocará um deslocamento do ângulo de difração, como mostra a Figura 11 na página 36 (SHIMADZU, 2011).

Como a difração medida é proveniente somente dos cristais que se encontram perpendiculares à normal entre os feixes incidentes e difratados, é possível verificar 2θ pelos picos de difração.

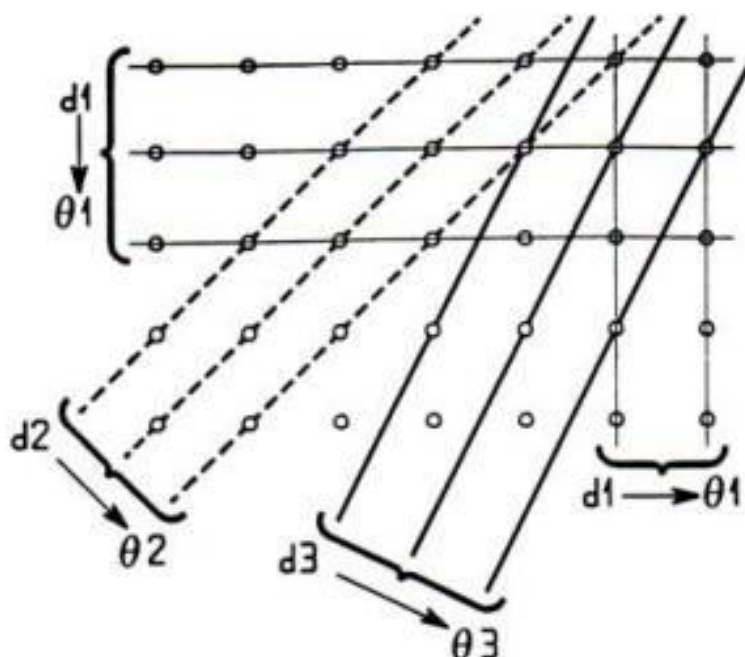


Figura 11 - Variação das distâncias interplanares de um material tensionado.

Fonte: Rodrigues (2007)

Considerando-se uma porção de superfície de metal tensionado, conforme a Figura 12, as direções 1, 2 e 3 são as principais, perpendiculares entre si e perpendiculares aos planos nos quais não há tensões de cisalhamento.

As tensões atuantes nessas direções são σ_1 , σ_2 e σ_3 , respectivamente (CULLITY, 1956).

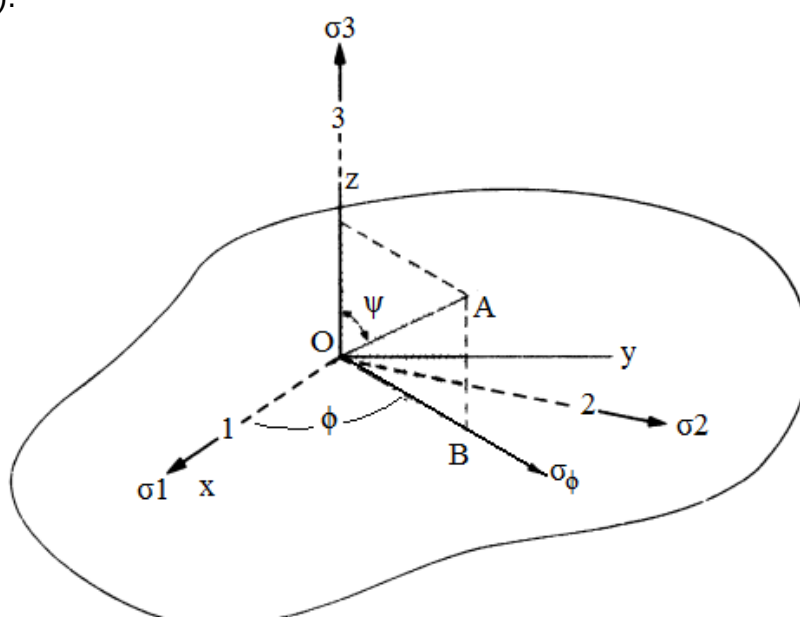


Figura 12 - Porção de superfície de um material tensionado.

Fonte: Cullity (1956)

Normalmente deseja-se medir a tensão em uma direção específica ($\sigma\varphi$), a qual está a um ângulo φ da direção principal 1 e a Ψ de 3 (CULLITY, 1956).

Pelo fato de que a difração medida é proveniente somente dos cristais que se encontram perpendiculares à normal entre os feixes incidentes e difratados, deve-se variar o ângulo Ψ (PAGEL-NITSCHKE, 2009).

A deformação em 0° corresponde à σ_3 . A teoria da elasticidade fornece a seguinte relação entre essas deformações, conforme a Equação 5:

$$\varepsilon_\psi - \varepsilon_3 = \frac{\sigma_\phi}{E} + (1 + \nu) * \Delta \sin^2 \psi \quad (5)$$

sendo:

ν = Coeficiente de Poisson do material

E = Módulo de elasticidade do material

E sabe-se também que (Equação 6):

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_i - d_0}{d_0} \quad (6)$$

Na qual d_i é o espaçamento dos planos refletidos e d_0 é a distância interplanar da rede cristalina sem tensões (SHIMADZU, 2011).

Uma vez que a posição angular (2θ) do raio difratado é obtida diretamente com o difratômetro, é mais simples escrever a deformação (equação 6) em função de 2θ , no lugar de escrevê-la em função da distância entre planos. A distância entre os planos é um vetor oposto ao ângulo e, portanto, a equação torna-se igual a Equação 7:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\sin \theta_\psi}{\sin \theta} - 1 \quad (7)$$

Derivando a equação 7, obtém-se a Equação 8 :

$$\varepsilon = \frac{\sin \theta_\psi}{\sin \theta} - 1 = -\cot g(\theta) * \Delta \theta = -\cot g(\theta) * \frac{\Delta(2\theta)}{2} \quad (8)$$

Sendo:

ε = deformação na direção perpendicular ao sistema de planos atômicos difratados

$\Delta(2\theta)$ = variação do ângulo de difração devido à tensão aplicada em relação à difração na rede cristalina não tensionada (SHIMADZU, 2011).

Substituindo as Equações 5 e 6 obtém-se, portanto, a Equação 9:

$$\sigma = - \frac{E}{2*(1+\nu)} * \cotg \theta_0 * \frac{\Delta(2\theta_\psi)}{\Delta(\sin^2\psi)} \quad (9)$$

Tendo o valor de $2\theta_\psi$, que é o ângulo entre os raios incidentes e refratados, é possível fazer um gráfico de (2θ) em função de $\sin^2\psi$, que, teoricamente, fornece uma reta, como mostra a Figura 13. A inclinação dessa reta (M) fornece o valor da parcela $\frac{\Delta(2\theta_\psi)}{\Delta(\sin^2\psi)}$ da equação (SHIMADZU, 2011).

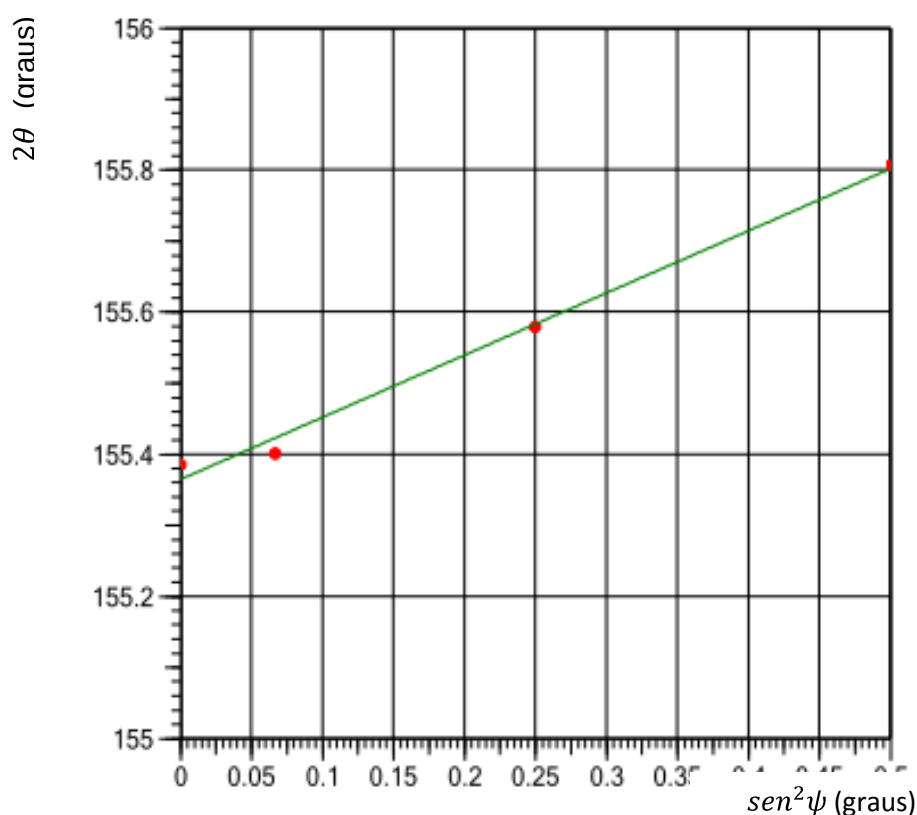


Figura 13 - Gráfico de $2\theta_\psi$ em função de $\sin^2\psi$ fornecido diretamente pelo difratômetro.

Fonte: Adaptado de Shimadzu (2011)

Deste método, tem-se na Equação 10:

$$\sigma = K * M \quad (10)$$

em que:

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} * \cot g \theta_0 \text{ e}$$

$$M = \frac{\Delta(2\theta_\psi)}{\Delta \sin^2 \psi}$$

O termo K é, portanto uma constante do material e, para aço carbono ABNT 4140, como é o caso no trabalho presente, tem valor igual a $-32.440 \text{ kgf/mm}^2/^\circ$. A área da superfície analisada depende do diâmetro do feixe de raios-X (SHIMADZU, 2011).

Os componentes das tensões residuais que efetivamente interessam são aqueles paralelos à superfície, pois interagem com as tensões mecânicas. Isso significa que, se a profundidade de penetração for pequena, usualmente alguns micrometros para a difração de Raios-X, a informação vem de uma porção de material na qual, do ponto de vista mecânico, as tensões na profundidade são iguais a zero (PAGEL-NITSCHKE, 2009).

A profundidade de penetração depende do ângulo de incidência e do comprimento de onda utilizado, o qual depende do material do tubo de Raios-X utilizado. Os materiais mais comuns dos quais são feitos esses tubos são Cromo (para aços ferríticos, perlíticos, bainíticos ou martensíticos), Cobre (para ligas a base de Alumínio, Magnésio, Titânio e Níquel), e Manganês (para aços austeníticos).

Quanto maior o ângulo de incidência, maior o deslocamento do pico de tensão, portanto, a precisão das medidas aumenta com o aumento dos ângulos de difração. Por essa razão, a radiação é escolhida de forma a tornar possível a determinação da difração com elevada intensidade e grandes ângulos (PAGEL-NITSCHKE, 2009).

As limitações do método de difração de raios-x estão intimamente atreladas a parâmetros metalúrgicos como as impurezas e lacunas que são, muitas vezes, difíceis de serem detectadas para que correções possam ser feitas, e também limitado pelo tamanho de grão. É importante, para a confiabilidade dos resultados, que o material medido tenha uma granulometria refinada, comportamento linear elástico, seja homogêneo e isotrópico, e não possua gradientes de tensão na região analisada.

Outros fatores limitantes para o emprego do método são: alto custo de seus equipamentos e a periculosidade em virtude da radiação inerente ao processo.

2.2 CONTROLE E ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS

O nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído reduzindo-se a quantidade de calor fornecido à junta ou a quantidade de metal depositado. Na prática, isto pode ser feito otimizando-se o desenho do chanfro (reduzindo-se o ângulo do chanfro ou usando-se preparações simétricas, por exemplo) e evitando-se depositar material em excesso (evitando-se reforço excessivo em soldas de topo ou minimizando-se o tamanho de soldas de filete).

A seleção de processos de maior eficiência térmica (fonte de maior intensidade) é uma possível alternativa de controle, mas difícil de ser justificável economicamente em muitos casos. Tensões residuais também podem ser reduzidas pelo uso de metal de adição com a menor resistência mecânica permissível no projeto, assim como uma redução dos vínculos externos da junta soldada (minimizando-se, assim, as tensões de reação). Para a soldagem de alguns tipos de aços, metais de adição que sofrem transformação martensítica a uma temperatura suficientemente baixa podem ser usados. Como já mencionado, a formação de martensita vem acompanhada por um aumento de volume que contrabalanceia a contração do material e, assim, reduz o nível de tensões residuais (MODENESI, 2012).

Após a soldagem, as tensões residuais podem ser aliviadas em uma peça ou estrutura por métodos térmicos ou mecânicos, conforme apresentado no quadro 2. Estes métodos baseiam-se em permitir a deformação permanente localizada do componente que possui tensões residuais reduzindo ou eliminando as variações dimensionais responsáveis pela existência das tensões residuais. No caso do uso de

métodos térmicos, a elevação da temperatura leva a uma redução do limite de escoamento do material facilitando a sua deformação plástica. Além disto, dependendo da temperatura e do tempo de tratamento, a deformação por fluência pode ocorrer no material e contribuir para o alívio de suas tensões residuais. Os métodos mecânicos se baseiam em facilitar o escoamento plástico localizado pela aplicação de alguma forma de carregamento mecânico (MODENESI, 2012).

Quadro 2 - Métodos para aliviar tensões residuais (Okimura & Taniguchi, 1982).

Procedimento		Descrição	Características	Limitações
(a)	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem.	Método simples, pode causar refino de grão.	Inadequado para materiais de baixa ductilidade.
	Encruamento	A junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração.	Bastante eficiente para tanques esféricos e tubulações.	Inadequado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicar tensões uniformes.
	Vibração	Vibrações são aplicadas na estrutura causando uma ressonância de baixa frequência o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões.	Operação simples.	Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. Alívio de tensões não é uniforme.
(b)	Recozimento para alívio de Tensões	Aquecimento a 600 - 700°C (aços ferríticos) ou 900°C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente.	Inaplicável para grandes estruturas edíficil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Recozimento a alta temperatura	Aquecimento a 900-950°C (aços ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Podem eliminar completamente as tensões residuais.	Inaplicável para grandes estruturas edíficil de ser executado no campo. Custo muito elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda a 150-200°C em uma largura total de 60 a 130mm.	Adequado para grandes estruturas	O alívio de tensões é baixo.

(a) Processos mecânicos

(b) Processos térmicos

Fonte: Modenesi (2012)

2.2.1 Alívio de Tensões Térmico

O método mais conhecido e utilizado para reduzir as tensões residuais é o tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) pós-soldagem. Há muitas opções de tratamentos térmicos que podem ser aplicadas à junta soldada com o objetivo de reduzir os níveis de tensão residual, sendo o mais comum o recozimento para alívio de tensões, mostrado no quadro 2 da página 41. Tal recozimento consiste no aquecimento da peça de maneira uniforme em um intervalo de temperatura por um período específico de tempo, seguido de resfriamento ao ar à temperatura ambiente (FUNDERBUCK, 1998).

A seleção de parâmetros (temperatura e tempo) depende principalmente das composições químicas do metal base e da solda. No entanto, devido à possibilidade de ocorrência de transformações de fase indesejáveis, mudanças microestruturais e mecanismos de precipitação de carbonetos, por exemplo, este tratamento pode prejudicar as propriedades mecânicas, particularmente a resistência ao efeito de entalhe. Tais fenômenos podem ser mais complexos quando o metal base e o metal de solda não são semelhantes, sendo necessário estabelecer os parâmetros TTAT para atender ambas as ligas (RODRIGUES, 2011).

Dependendo da temperatura de TTAT e a técnica aplicada, pode-se obter, praticamente, uma completa remoção da tensão residual. Foi verificado que à temperatura de 600° C por uma hora para cada 25 mm de espessura, o TTAT mostra-se efetivo no alívio de tensões residuais (JAMES, 2011).

A remoção da tensão residual pode vir acompanhada de alterações no limite de resistência a tração e no limite de escoamento, particularmente na zona termicamente afetada (ZTA) de aços de alta resistência e baixa liga de Carbono devido à ação do revenimento no TTAT. Em outras situações, dependendo da composição da liga, zonas frágeis podem surgir também na ZTA. Do exposto, espera-se, como uma condição ideal, a seleção da temperatura para o TTAT que leve a redução máxima dos níveis de tensão residual, sem prejudicar as propriedades mecânicas da junta soldada pela ocorrência de transformações de fase ou mudanças microestruturais (RODRIGUES, 2011).

Alguns autores têm abordado o efeito da temperatura TTAT em peças soldadas. Dou (2005) estudou os efeitos do TTAT em propriedades metalúrgicas e mecânicas das juntas soldadas da liga Inconel 718 pelo processo a laser. Kanga et al. (2007) investigaram os efeitos da tensão residual e tratamento térmico na resistência a fadiga de peças soldadas. Paradowska et al. (2010) utilizaram técnicas de furação para avaliar como TTAT locais contribuem para a redução da tensão residual e melhoria na vida de fadiga de juntas soldadas tubulares (RODRIGUES, 2011).

A Figura 14 mostra curvas de redução de tensão residual para diferentes temperaturas de TTAT em função do tempo para um aço contendo 0,21% de Carbono e 1,44% de Manganês (LINNERT, 1967).

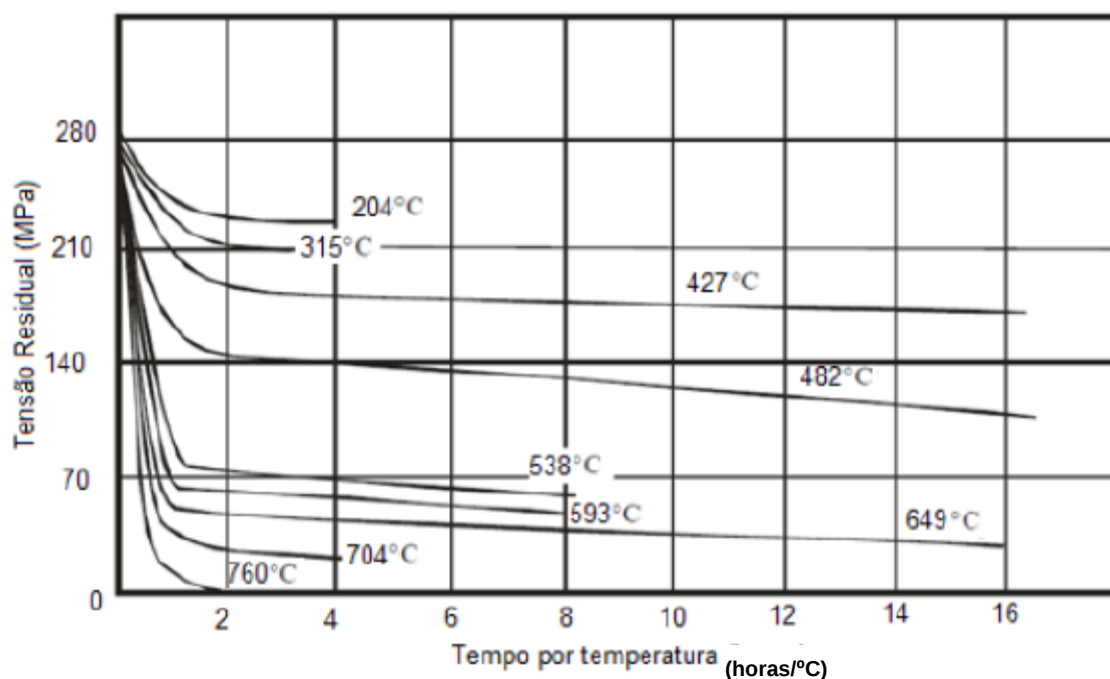


Figura 14 – Alívio de tensões residuais em função da temperatura e tempo do TTAT.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2011)

Pode ser observado que, a maior parcela do alívio de tensões ocorre na primeira hora e os principais mecanismos envolvidos são os fenômenos da recuperação e o escoamento. À baixas temperaturas a recuperação é o primeiro efeito a ser encontrado. Apesar de não haver mudanças observadas na estrutura do grão, uma

diminuição das tensões residuais pode ser obtida, sendo esta atribuída a redução da densidade das discordâncias (JAMES, 2011).

Semelhante a um fenômeno de fluência, o relaxamento efetivo pode ser obtido em temperaturas mais altas, onde o limite de escoamento do material é inferior a tensão residual imposta ao material que irá se deformar plasticamente até que a tensão seja reduzida até o valor igual ao limite de escoamento do material na temperatura de tratamento (RODRIGUES, 2011).

A deformação plástica resultante pode causar um endurecimento progressivo como o trabalho a frio durante o alívio das tensões. Quanto maior a tensão residual inicial, maior será a tensão residual após o alívio de tensão a uma dada temperatura. Em associação com a deformação plástica desenvolvida durante o alívio, outros efeitos como a recristalização, que corresponde a formação de novos grãos livres de deformação seguida pelo crescimento de grãos, pode contribuir para o efeito de relaxamento. É importante observar que a ocorrência de recristalização depende do nível de encruamento de tal modo que um mecanismo competitivo entre encruamento e a recristalização pode ocorrer (JAMES, 2011).

2.2.2 Alívio de Tensões por Vibrações

2.2.2.1 Origem da Utilização

O alívio de tensões através de vibrações teve início como um teste de fadiga na Segunda Guerra Mundial. O Departamento de Defesa da Alemanha e a Marinha dos Estados Unidos aplicavam vibração ressonante para tentar quebrar asas de aviões e cascos de navios, respectivamente. Eles achavam que, se os componentes não quebrassem nos testes, nunca quebrariam em serviço. Estes testes de fadiga levaram os cientistas e engenheiros a concluir que eles poderiam usar as vibrações para eliminar as tensões residuais de peças soldadas e fundidas de uma maneira diferente do tratamento térmico convencional (MARTINS, 2012).

As equipes aplicavam e analisavam os resultados das vibrações mecânicas nas peças. Quando da aplicação da vibração, eles encontravam a curva de ressonância e

anotavam qual a frequência correspondente ao pico de ressonância, conforme ilustrado na Figura 15. Ajustavam o equipamento para a aplicação da frequência de ressonância e a mantinham pelo tempo em que não houvesse mais alteração na curva e consequentemente redução de tensões, fazendo uma posterior análise. Após exaustivos testes eles conseguiam eliminar no máximo 40% das tensões contidas nas peças através deste método (HEBEL, 1989).

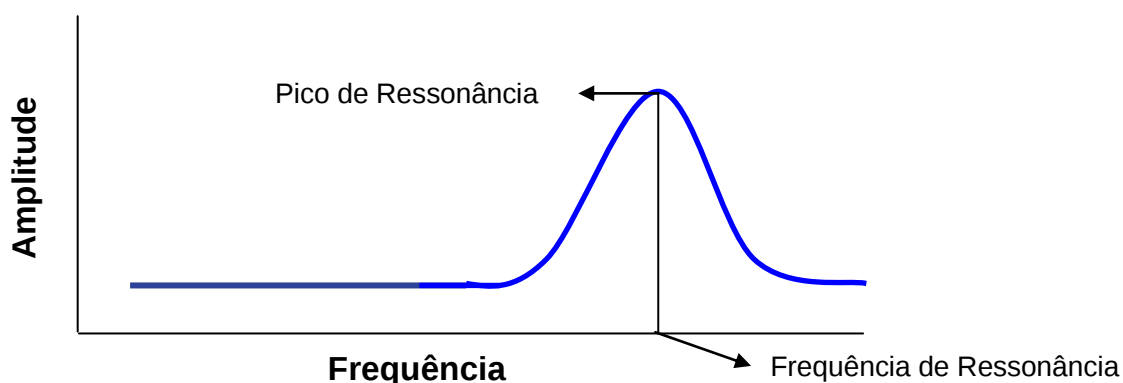


Figura 15 – Curva típica de ressonância.

Fonte: Martins (2012)

No início da década de 60 várias empresas, entre elas a Battelle Memorial e a Grumman Aerospace, investiram em pesquisas relacionadas à aplicação de vibração mecânica para eliminação de tensões. Eles sabiam que era extremamente importante a eliminação de tensões em peças fundidas e soldadas e, se conseguissem eliminá-las eficazmente pelo uso de um processo mais ágil e econômico, obteriam uma grande vantagem competitiva. As equipes continuaram as experiências aplicando a frequência de ressonância para obterem o alívio de tensões, não alcançando resultados equivalentes aos do tratamento térmico (MARTINS, 2012).

Em 1964, os engenheiros August George Hebel Jr. e August George Hebel III da empresa americana *Bonal Technologies, Inc.* também iniciaram o desenvolvimento de pesquisas neste campo. Eles chegaram à conclusão que a aplicação da frequência de ressonância não era realmente eficaz para este propósito. Atingia somente 40% dos resultados obtidos através do alívio térmico tradicional, confirmando os resultados da concorrência (HEBEL, 1989).

Em 1970, os pesquisadores conseguiram isolar os fatores críticos dos testes e formaram a base do uso efetivo da vibração para executar um alívio de tensões com resultado consistente. O primeiro fator crítico era a frequência de ressonância e o segundo era a estabilização da curva de ressonância. Descobriram que a frequência ideal para este propósito estava abaixo da frequência de ressonância e a batizaram com o nome de zona **Sub-harmônica** ou **Sub-ressonante**. A figura 16 mostra a localização desta zona no gráfico.

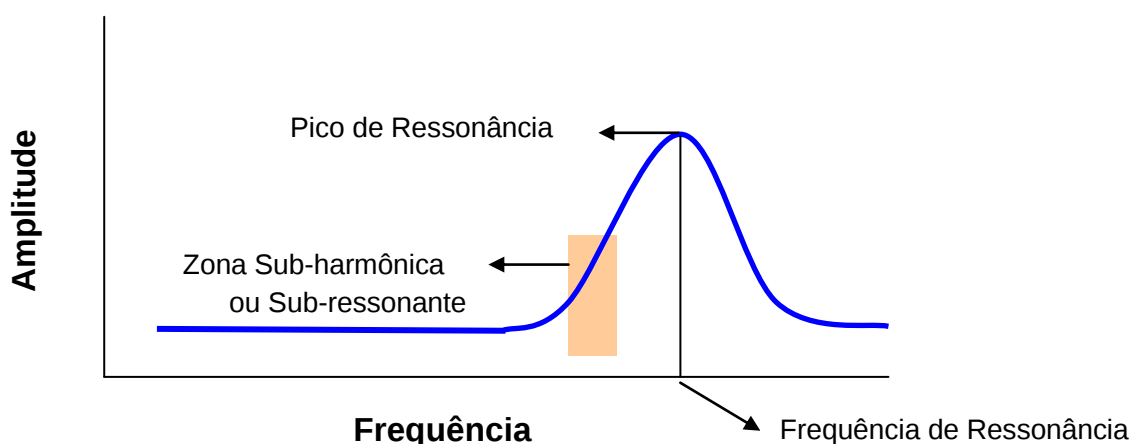


Figura 16 – Zona sub-harmônica ou sub-ressonante.

Fonte: Martins (2004)

Em segundo lugar, descobriram que a eliminação das tensões se completava quando a curva de ressonância se estabilizava, ou seja, não se alterava após a aplicação da vibração (HEBEL, 1989).

2.2.2.2

Desenvolvimento da tecnologia

O tratamento por Vibrações Sub-Ressonantes ou Sub-Harmônicas é a indução de movimento molecular acelerado em um material para a remoção de tensões internas. Esta técnica pode ser comparada ao "Envelhecimento Natural"¹ pois, em ambas, não ocorrem os efeitos nocivos da aplicação de calor, como a escamação, a perda de dureza ou a redução das propriedades mecânicas, ocorridos nos tratamentos térmicos convencionais (MARTINS, 2012).

O aprofundamento teórico desta nova tecnologia se iniciou em 1987 com o estudo de Richard Skinner, apresentado no artigo "*An Investigation into the Theory Behind Subressonant Stress Relieve*" - Um Estudo sobre a Teoria do Alívio de Tensões Sub-

¹ "Envelhecimento Natural" Tratamento de alívio de tensões por oxidação ao tempo por longo período.

ressonante. Skinner trabalhava na *Lockheed Missiles and Aerospace* e buscava o desenvolvimento da vibração como forma de alívio de tensões em peças de aço, alumínio e titânio. Neste estudo foi avaliado detalhadamente, como ocorre a dissipação da energia em função da frequência aplicada em cada parte da curva de ressonância ilustrada na figura 16 da página 46. A energia dissipada é entendida como a quantidade de tensões internas contidas na peça que pode ser removida. Sendo assim, a região sub-harmônica utilizada nesta tecnologia é a que possui maior capacidade de atuação neste sentido. Pode ser observado no gráfico da figura 17, que quanto maior a área formada entre as curvas de carga e sua respectiva histeresis², maior é a quantidade de energia dissipada (SKINNER, 1987).

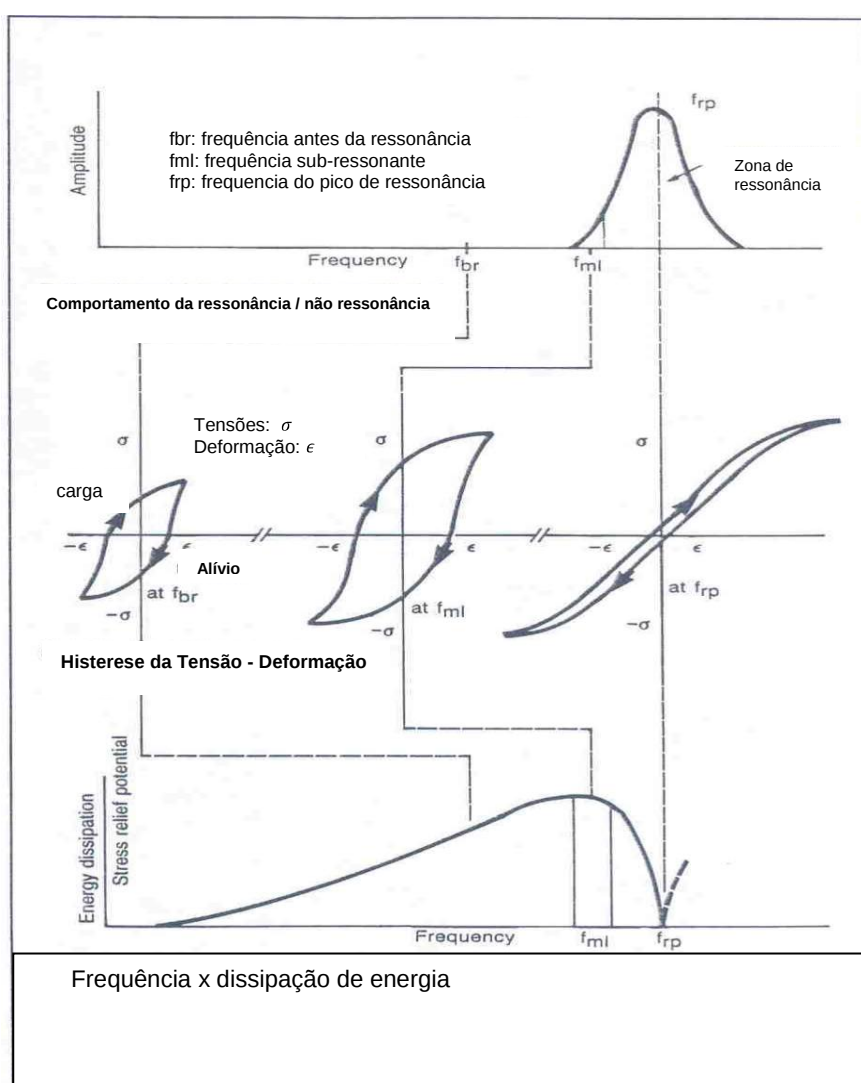


Figura 17 - Estudo do efeito das vibrações na dissipação de energia.

Fonte: Adaptado de Skinner (1987)

² Curvas de histeresis - Curva de dissipação de energia mecânica.

Através deste estudo, Skinner verificou e comprovou, matematicamente, que a energia da vibração Sub-Harmônica possuía a condição mais eficaz para absorção, redução e eliminação das tensões térmicas e mecânicas.

Na prática, o estudo de Skinner veio confirmar que quando se aplica a frequência de ressonância no intuito de remover as tensões internas de uma peça, seu resultado é praticamente nulo, se comparado à região sub-harmônica. Esta comparação pode ser observada no gráfico da figura 17 da página 47, através das áreas em "fml" e "frp" (MARTINS, 2012).

Ainda em 1987, o estudo "*Ultrasonic Evaluation of the Non-linearity of Metals from a Design Perspective*" - Avaliação Ultrassônica da Não Linearidade dos Metais a partir de um Projeto Perspectivo, dos autores Wong e Johnson, Universidade de Berkeley – Califórnia, Estados Unidos, demonstrou as características da frequência ressonante ou harmônica dos sistemas metálicos. Os autores, matematicamente, relataram que a frequência de ressonância natural se altera com a presença de tensões residuais. Ainda demonstraram com este estudo, que quanto maior for a quantidade de tensões internas contidas em peças soldadas, maior será a frequência do pico de ressonância (HEBEL, 1989).

Esse estudo forneceu o embasamento necessário para estabelecer quando os níveis de tensões estão completamente removidos de uma peça. Na prática, aplicando-se este estudo, sabemos que quando não existem mais tensões residuais na peça, sua curva de ressonância, além de não se alterar, possui a menor frequência do pico de ressonância.

Esta tecnologia oferece, portanto uma substituição prática e econômica para os tratamentos térmicos convencionais de alívio de tensões, sem os inconvenientes das alterações das propriedades metalúrgicas e mecânicas dos materiais.

Os processos térmicos produzem inconvenientes indesejáveis nos materiais. O envelhecimento, por exemplo, com seu resfriamento muito lento, reduz em até 50% a resistência original do metal. A normalização, com seu resfriamento controlado, induz

ensões térmicas. O revenimento, com suas temperaturas brandas, resulta em um alívio de tensões parcial (MARTINS, 2004).

Os objetivos do alívio de tensões, na maioria dos casos, não requerem mudanças nas propriedades mecânicas, nas dimensões e muito menos na estrutura cristalina dos grãos dos metais a serem tratados.

Neste propósito, o processo de alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes mostra-se uma técnica eficaz, comprovadamente testada, para remover as tensões internas dos materiais sem afetar suas características físico-químicas, como ocorre nos tratamentos térmicos convencionais (HEBEL, 1989).

2.2.2.3 Aplicações do ATVS

Para iniciar qualquer processo de Alívio de Tensões por Vibração é necessário, primeiramente, traçar a Curva de Ressonância da peça, conforme a figura 18.

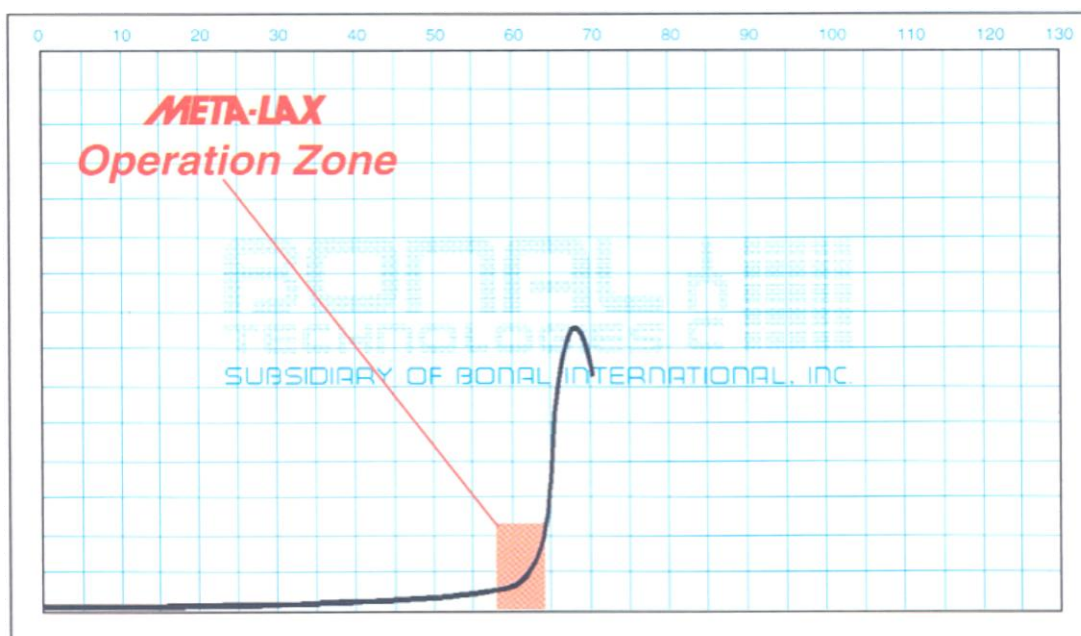


Figura 18 - Curva de ressonância da peça obtida através do equipamento Meta-lax.

Fonte: Meta-lax (2013)

Para isso, a peça a ser tratada deve estar apoiada sobre calços de borracha, para que a mesma não se movimente sobre o solo, conforme mostrado na figura 19.



Figura 19 - Alívio de tensões por vibrações em peça apoiada sobre o solo.

Fonte: Martins (2004)

Quando as dimensões da peça não permitirem esta prática, a mesma é fixada sobre uma mesa metálica, cujo tampo está apoiado sobre coxins de borracha, conforme ilustrado na figura 20 da página 51. Em seguida é fixado um motor de corrente contínua, acoplado a um excêntrico, na peça tensionada, ou no tampo da mesa, para gerar a vibração necessária. Também é fixado sobre a peça, ou sobre o tampo, um transdutor de energia mecânica, que transforma as vibrações em sinal elétrico por meio de cristais piezelétricos³, para avaliar as vibrações.

³ Cristais Piezelétricos - cristais anisotrópicos nos quais deformações mecânicas provocam polarizações elétricas, de acordo com as direções cristalográficas.

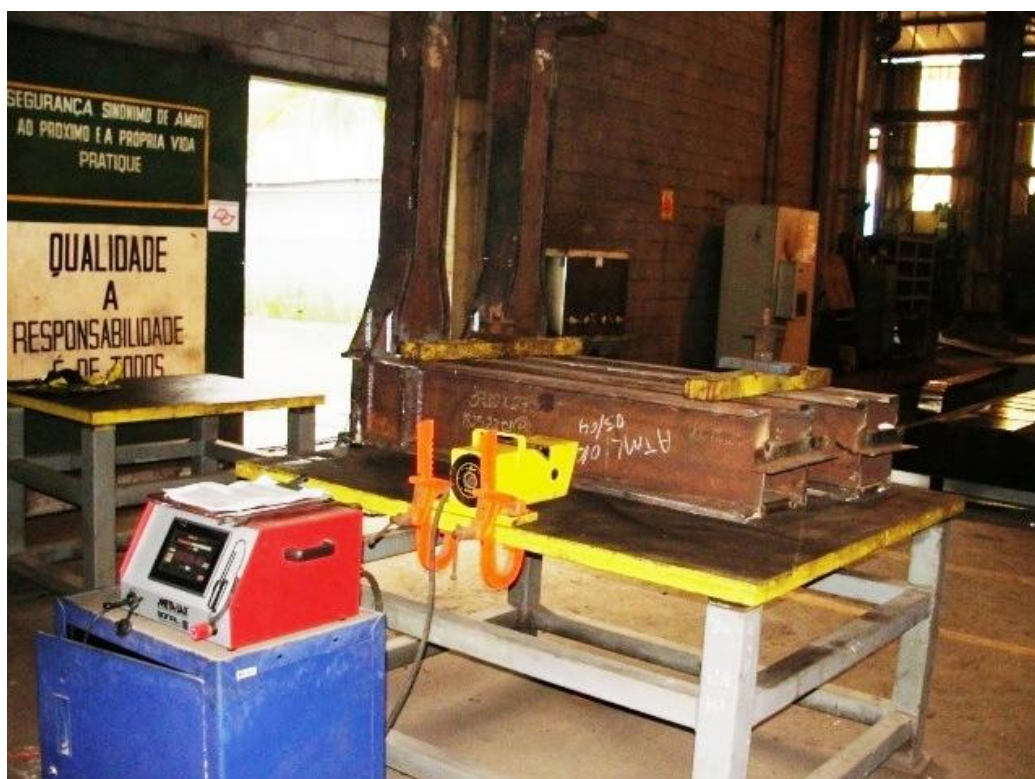


Figura 20 - Alívio de tensões por vibrações em peça apoiada sobre a mesa.

Fonte: Martins (2012)

O motor de corrente contínua e o transdutor de vibrações são ligados a um microprocessador que recebe o sinal do transdutor e envia o comando necessário ao motor para, então, se obter a curva de ressonância.

Para iniciar o processo, o operador induz um sinal elétrico crescente para o motor através do microprocessador. Um tacômetro⁴ é acoplado no motor para controle do processo.

Parte-se o motor da frequência zero até 120 Hz. Dentro desta faixa, a curva de ressonância de qualquer peça é obtida desde que não ultrapasse 40.000 kg em massa, correspondente à capacidade do equipamento. A curva de ressonância da peça é então impressa conforme ilustrado na figura 18 da página 49 (MARTINS, 2004).

⁴ Tacômetro - Instrumento para medir velocidades, especialmente as de rotação de um motor ou de um eixo; taquímetro, conta-giros, conta-voltas.

Também na figura 18 pode ser observada a região onde deve ser mantida a frequência para a obtenção do melhor resultado no alívio de tensões (região em destaque). Ajusta-se, portanto o aparelho para que se mantenha a frequência dentro dos níveis desejados. Na prática, esta região é obtida mantendo-se uma frequência tal que sua amplitude seja aproximadamente um terço da amplitude total da ressonância, baseado na teoria de Skinner demonstrada na figura 17 da página 47. Esta frequência é mantida por um determinado tempo, que varia em relação ao peso e material da peça a ser aliviada, conforme o quadro 3 (MARTINS, 2004).

Quadro 3 – Tempos necessários para alívio de tensões

AÇO CARBONO	ALUMÍNIO/ INOX	FERRO FUNDIDO	AÇO FERRAMENTA / METAIS EXÓTICOS	1ª APLICAÇÃO	2ª APLICAÇÃO
0-90 KG	0-22 KG			15 MINUTOS	5 MINUTOS
90-2265 KG	22-90 KG	0-2265 KG		20 MINUTOS	5-10 MINUTOS
2265-4530 KG	ACIMA 90 KG	2265-4530 KG		25 MINUTOS	10 MINUTOS
ACIMA 4530 KG		ACIMA 4530 KG		30 MINUTOS	15 MINUTOS
			TODOS OS PESOS	60 MINUTOS	15 MINUTOS

Fonte: Meta-lax (2013)

Em seguida é feita uma segunda leitura para se observar a variação da curva de ressonância. Uma vez que se trata da mesma peça, com o mesmo equipamento, sem alterar nenhuma das variáveis, a curva teoricamente seria a mesma se não houvesse tensões residuais na peça. Pode-se então deduzir que, quando há alteração na frequência de ressonância de uma peça é porque já houve redução de suas tensões internas, conforme estudo dos autores Wong e Johnson (1987), demonstrado no item 2.2.2.2 na página 48.

Na prática pode-se observar que a quantidade de tensões residuais contidas na peça é proporcional à redução que existe na frequência dos picos de ressonância apresentados no gráfico de alívio de tensões por vibrações.

A figura 21 na página 53 mostra a segunda leitura da curva de ressonância (curva 2).

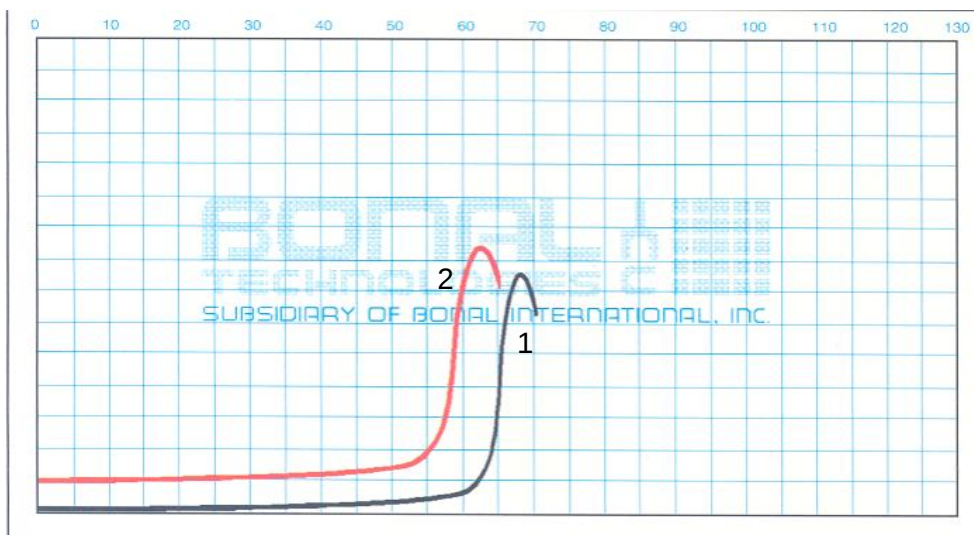


Figura 21 - Segunda leitura da curva de alívio de tensões após o tratamento.

Fonte: Meta-lax (2013)

Para a confirmação final, se as tensões residuais foram totalmente removidas, deve-se aplicar a vibração na nova frequência de tratamento (uma vez que houve alteração na curva). Ou seja, repete-se a operação anterior e executa-se em seguida a terceira leitura da curva.

Caso a terceira curva observada (curva 3) seja exatamente igual à segunda, no que se refere à frequência de pico de ressonância, pode-se afirmar que o alívio está completo, conforme demonstrado na figura 22.

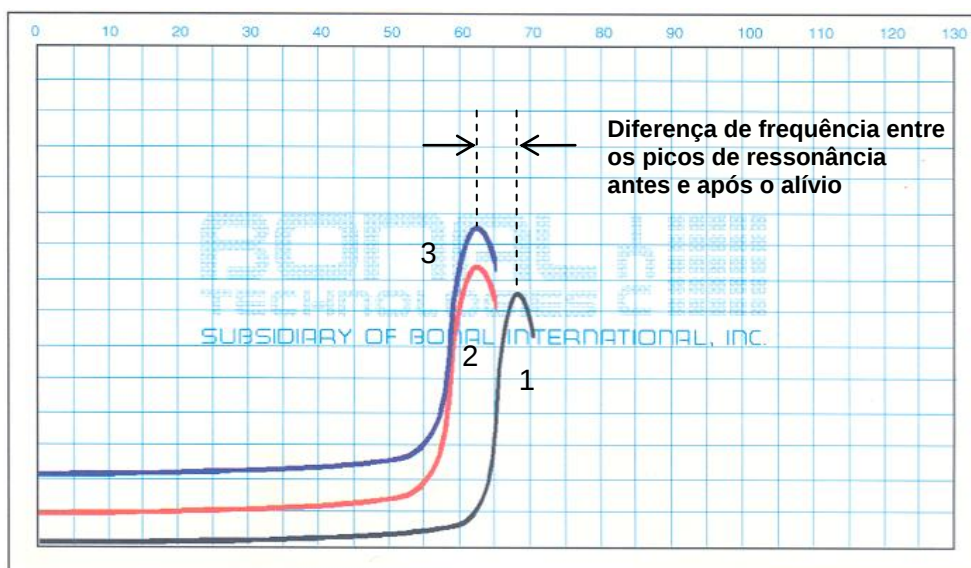


Figura 22 – Alteração e estabilização da curva de ressonância após a aplicação da frequência sub-harmônica de alívio de tensões.

Fonte: Meta-lax (2013)

Nesta etapa, caso seja repetido o ciclo de aplicação de vibrações, não mais haverá alteração da curva de ressonância. Este fato também ocorre quando não existem tensões internas em uma peça (HEBEL, 1989).

Pode ser observado no gráfico da figura 22 da página 53, o seguinte: a curva 1 representa a curva de ressonância da peça após a soldagem sem nenhum tipo de alívio de tensões. A curva 2 representa a segunda leitura da curva de ressonância após a aplicação da vibração. Observa-se que o pico de ressonância deslocou-se para a esquerda, possuindo uma frequência menor que a curva original (preta). A curva 3 da terceira leitura, (coincidindo em sua ascensão com a linha vermelha da segunda leitura), significa que, após aplicar mais vibrações para alívio, a curva não se alterou, ou seja, todas as tensões residuais que estavam presentes na peça foram removidas.

Após esta observação, pode-se aplicar indefinidamente frequências de alívio de tensões, que a curva de ressonância não se alterará, comprovando mais uma vez que o alívio está completo (MARTINS, 2004).

2.2.2.4 Abrangência, Resultados e Limitações

Os processos de Alívio de Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Harmônicas são aplicados na maioria dos metais trabalhados nas indústrias metalúrgicas e metal-mecânicas.

Dentre eles tem-se:

- 1) Os aços de baixo teor de Carbono, laminados a quente como o ABNT - 1018, ABNT - 1020, ASTM - A 36, ABNT - 8620 ;
- 2) Os aços de médio e alto teor de Carbono, como o ABNT - 1045, ABNT - 1060, ABNT - 4140, ABNT 4340 ;
- 3) Os aços-ferramenta, como os da série VW - da Villares ;
- 4) Alumínios das séries 356, 2000, 5000 e 6000 ;
- 5) Os aços inoxidáveis como os ABNT - 304, ABNT - 316, ABNT - 410 e ABNT - 416 ;
- 6) Os ferros fundidos cinzentos, brancos e nodulares ;
- 7) Metais especiais como Ouro, Prata, Titânio, Magnésio, Inconel, Monel, entre outros, com exceção do Cobre e suas ligas ;

8) Peças com revestimentos endurecidos, forjados e fundidos em geral.

As limitações deste processo, quanto ao material a ser tratado, só existem quando aplicado em Cobre e suas ligas por razões ainda não estabelecidas. Quanto à massa da peça, os maiores indutores de vibração (motores com excêntrico acoplado) são capazes de gerar vibrações em peças de até 40.000 kg de massa.

Já em relação às dimensões, não existem limitações, desde que não ultrapasse a capacidade em massa. Cada indutor é capaz de gerar as vibrações necessárias em um volume de aproximadamente cinco metros cúbicos, tendo-se como base um metro de altura, um metro de largura, pelo comprimento de cinco metros. Quando a peça ultrapassa esta metragem, devem ser realizadas tantas aplicações quanto forem necessárias, respeitando-se os cinco metros cúbicos, até completar toda a peça.

2.2.2.5 Aplicações Práticas Industriais no Brasil

A primeira verificação prática de eficácia desta tecnologia no Brasil ocorreu em Março de 1998, na empresa Engebasa – Mecânica e Usinagem Ltda., quando se decidiu aliviar rodas de pontes rolantes, que haviam sido recuperadas através de enchimento de solda e tratadas termicamente no forno. Foi feita a leitura inicial da curva de ressonância, aplicada a frequência de alívio na peça durante trinta minutos e realizada a segunda leitura. O resultado obtido foi que a presença de tensões residuais era desprezível e que o tratamento térmico no forno havia sido eficaz. Em seguida, também foi realizado um alívio em uma roda similar a anteriormente analisada, porém esta não havia sido termicamente tratada. Já o resultado obtido na segunda peça apresentou uma diferença muito significativa entre a primeira e a segunda curvas de ressonância, indicando a existência de muitas tensões residuais que foram na sua totalidade removidas através deste novo processo. Estes resultados iniciais aumentaram significativamente a confiança nesta tecnologia.

A segunda verificação foi através de análise dimensional de distorções. Foram confeccionados três corpos de prova similares, de forma bastante assimétrica e com grande volume de solda apenas de um lado, para concentrar tensões não uniformes. Tais corpos de prova foram travados antes da soldagem para não sofrerem as

distorções durante a soldagem. O primeiro foi tratado termicamente no forno, removendo todas suas tensões internas. O segundo foi deixado travado, sem nenhum, tipo de alívio. O terceiro foi aliviado através do processo de vibrações sub-harmônicas em questão. O resultado final do teste consistia em remover as travas dos três corpos de prova, e analisar dimensionalmente às distorções ocorridas nos mesmos.

Resultado: o corpo de prova não tratado sofreu grandes distorções, observadas a olho nu. Já a distorção dos outros dois foi desprezível.

Um bom resultado obtido com a utilização desta tecnologia ocorreu em Junho de 1998. Funcionários da área de Metodologia e Processos de importante empresa metal-mecânica situada em Guarulhos - São Paulo visitaram as instalações da Engebasa para a contratação de serviços. Nesta visita foi apresentado o equipamento de alívio de tensões por vibração, recém-adquirido dos Estados Unidos (MARTINS, 2004).

No mês seguinte, houve uma consulta por aquela empresa para a execução de serviços de alívio de tensões por vibração, pois a empresa alemã SMS, havia elaborado um projeto de ampliação de um setor da Usiminas (Ipatinga MG). A fabricação das peças necessariamente deveria ser executada no Brasil, por força de contrato.

A empresa metal-mecânica havia ganhado a concorrência e fabricou as peças conforme o projeto alemão. Um detalhe técnico, entretanto, não havia sido cumprido, por não haver no mercado brasileiro, vigas laminadas nas dimensões exigidas no projeto. A empresa havia substituído as tais vigas por chapas cortadas e soldadas, formando vigas caixote, sem consultar a SMS, originando assim um volume de solda duas vezes maior que o previsto em projeto. Após o término da fabricação, a empresa alemã enviou seus representantes para fiscalizar a obra. As peças encontravam-se prontas, usinadas e pintadas, aguardando apenas a inspeção final e o embarque. Os inspetores da SMS ao perceberem a substituição do material com o acréscimo de solda exigiram que fizessem um alívio de tensões por vibração para não afetar a qualidade das peças (MARTINS, 2004).

A empresa SMS aceitou a tecnologia do equipamento apresentado e o serviço foi liberado para ser executado em caráter de emergência, face à proximidade do prazo de entrega.

Em seguida, o serviço de alívio de tensões por vibrações sub-harmônicas foi executado em três dias e o equipamento foi liberado para embarque, completamente aprovado pela empresa projetista.

Inúmeros outros casos ocorreram ao longo dos anos seguintes. Cada um com suas peculiaridades, porém até hoje, dentro dos limites da máquina, todos os trabalhos obtiveram êxito, com resultados comprovados (MARTINS, 2004).

Como exemplo comprovado de reconhecimento da eficácia desta tecnologia, a Companhia Siderúrgica Nacional - CSN encomendou para uma fundição localizada em Minas Gerais a fabricação de 96 castanhas do mandril da bobinadora de chapas, peça crítica do equipamento que prende a ponta da chapa para iniciar o bobinamento.

Por ser crítica, a peça em aço fundido deve obrigatoriamente ser aliviada termicamente, antes da usinagem, porém esta etapa de fabricação foi omitida, pela fabricante, fato constatado pela CSN no recebimento das mesmas.

O tratamento térmico não podia ser realizado após a usinagem, devido ao risco de empeno e a bobinadora não poderia parar a produção por falta destas peças, que por se tratar de peças fundidas, possuem um prazo de entrega extenso.

Com o risco das peças não aguentarem a vibração causada pelo equipamento, a CSN optou em executar o Alívio de Tensões por Vibrações Sub-Harmônicas na Engebasa e após a utilização das peças, constatou que realmente o alívio executado foi eficaz, em função da durabilidade das peças, informada pelos funcionários da Companhia, um ano após a execução dos serviços.

2.3 CONDICIONAMENTO DE SOLDA POR VIBRAÇÕES

O condicionamento de solda por meio de vibrações sub-harmônicas é a aplicação do mesmo processo de alívio de tensões, executado simultaneamente com o processo de soldagem. Ou seja, primeiramente é feita a análise da curva de ressonância da peça a ser soldada. Descobre-se a frequência ideal para aliviar as tensões e esta é aplicada durante a soldagem. Desse modo, as tensões térmicas são eliminadas assim que são introduzidas na solidificação da solda. Esta aplicação produz vários benefícios

desejáveis para o metal da solda e para a zona termicamente afetada. Dois benefícios da aplicação desta técnica são a minimização das trincas de solda e a eliminação das distorções (MARTINS, 2012).

Outro benefício evidenciado é a possibilidade do aumento da corrente de soldagem e, conseqüentemente, o aumento da velocidade de solda, permitindo uma penetração maior. Metalurgicamente, o condicionamento produz uma solda com estrutura de grãos mais uniforme, com acabamento mais fino, melhorando assim as propriedades mecânicas e aumentando a resistência contra fadiga (HEBEL, 1989).

A ductilidade da solda aumenta em até 400% em relação a uma solda não condicionada. A figura 23 mostra um condicionamento de solda sendo executado. Após o término da solda com o condicionamento, a peça já se encontra com suas tensões aliviadas, não requerendo tratamento posterior.



Figura 23 - Condicionamento de solda por vibrações sub-ressonantes

Fonte: Martins (2012)

3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi verificar a eficiência da tecnologia de Alívio de Tensões por Vibrações Sub-Ressonantes na remoção das tensões residuais causadas pela usinagem e têmpera de corpos de prova, onde foram gerados altos gradientes térmicos e deformações elásticas e plásticas. Esta verificação foi realizada por meio da comparação das medições das tensões antes e após o alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes e compará-las com os resultados obtidos do tratamento térmico convencional de alívio de tensões.

Além desta verificação, os resultados obtidos na redução das tensões residuais foram parametrizados, correlacionando-os com os gráficos resultantes da aplicação da vibração. Esta parametrização é realizada através da comparação entre a diferença da frequência entre os picos de ressonância dos corpos-de-prova, antes e após o tratamento, com os níveis de remoção de tensões.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e os métodos utilizados para a confecção dos corpos de prova, assim como, os processos de introdução de tensões residuais através de usinagem e do tratamento térmico de têmpera. Apresenta também as técnicas de medição das tensões residuais antes e após os alívios, por difração de raios-X e por furo cego, assim como detalha a metodologia aplicada para o alívio de tensões térmico e por vibrações sub-ressonantes.

3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a confecção dos corpos de prova, foi utilizado um aço ABNT-4140, forjado, temperado a chama e revenido com dureza superficial de $58 \pm 2\text{HRC}$. Este material foi cedido pela empresa Prensas Schuler ao Centro Universitário da FEI. Foram utilizados 12 corpos de prova, sendo que os de número entre 1 a 6 foram utilizados na dissertação de mestrado do Prof. Ms. Marco Antonio Stipkovic intitulada “Análise da Integridade Superficial no Fresamento de Acabamento do Aço AISI 4140 Endurecido” e gentilmente cedido a este trabalho, conforme a autorização de uso dos corpos de prova constantes no Anexo A, na página 97. Os corpos de prova 7 a 12 foram confeccionados com o mesmo tipo de material.

O quadro 4 apresenta a composição química do material utilizado e o Anexo B, na página 98, mostra o laudo da análise química e metalográfica do mesmo.

Quadro 4 – Composição química dos corpos de prova.

Elementos em %												
Especificado	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V
ABNT 4140	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,15 – 0,35	MAX. 0,030	MAX. 0,040	0,80 – 1,00	-	0,15 – 0,25	-	-	-	
Amostra	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V
7284	0,413	0,842	0,241	0,013	0,012	0,904	0,045	0,181	0,030	0,063	0,002	0,004
(S)	0,004	0,022	0,003	0,001	0,002	0,022	0,001	0,010	0,000	0,001	0,000	0,000

Fonte: Adaptado de Stipkovic (2012)

As dimensões originais dos corpos de prova são 140 mm de comprimento por 100 mm de largura e 20 mm de espessura e possuem dois furos rebaixados, como mostra a figura 24. Na foto da figura 24, também, pode ser observada a mancha da têmpera à chama. A rugosidade da superfície tratada termicamente é $Ra\ 0,8\ \mu m$.

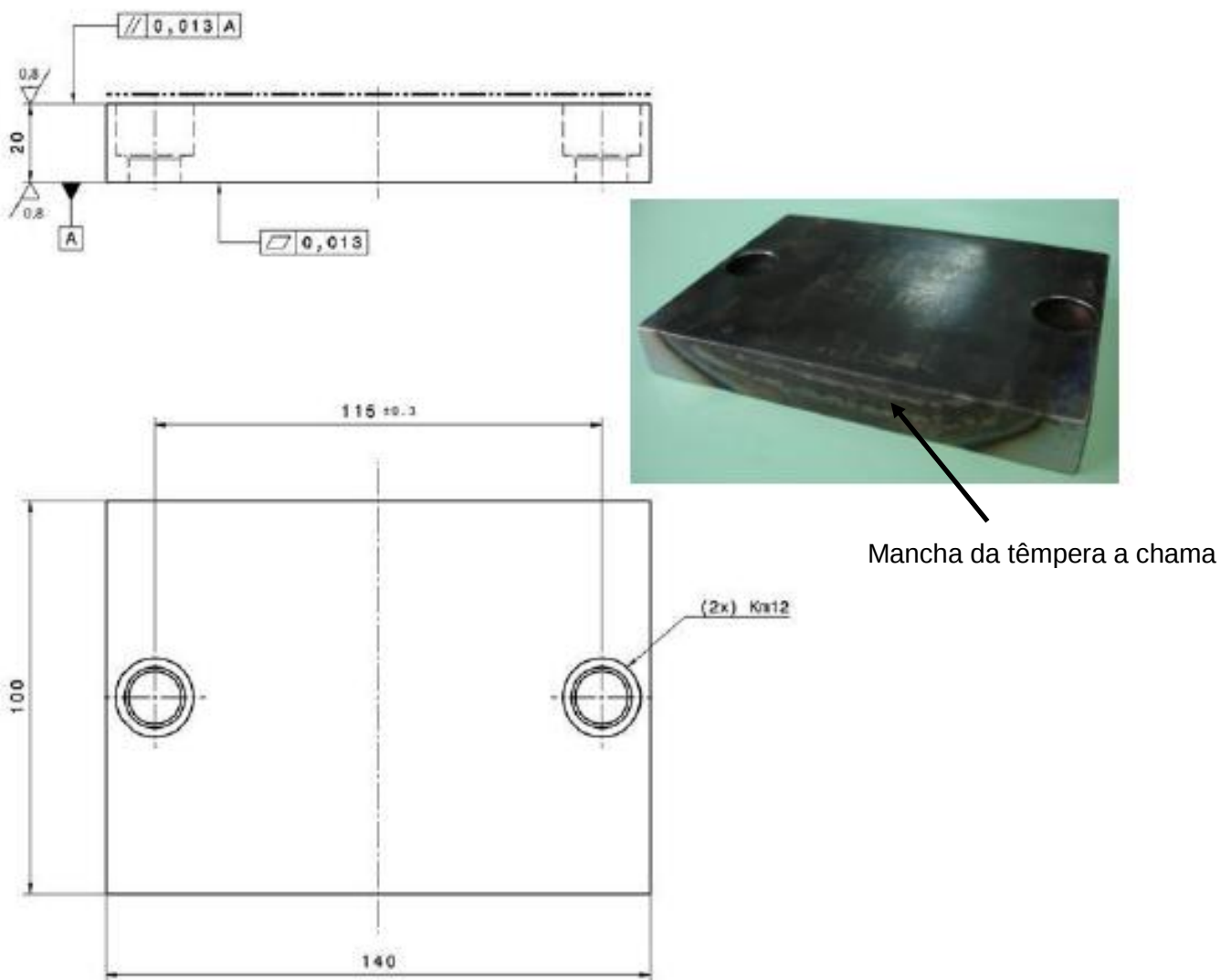


Figura 24 - Corpos de prova de aço ABNT 4140 forjado

Fonte: Adaptado de Stipkovic. (2012)

3.1.1 Distribuição dos Corpos de Prova

Foram utilizados doze corpos de prova, divididos em dois grupos. O primeiro grupo é composto por seis peças obtidas do trabalho de Stipkovic (2012). O segundo grupo também formado por seis corpos de prova, recebeu tratamento térmico posterior de têmpera no forno.

O quadro 5 apresenta os meios de introdução de tensão, os meios de alívio e os métodos de mensuração das tensões usados nos corpos de prova.

Quadro 5 – Relação dos tratamentos e testes de furo cego e difração de Raios-X que foram executados nos corpos de prova

Atividade	Introdução de Tensões Residuais		Alívio de Tensões		Medição de Tensões Residuais	
	Usinagem	Têmpera	Térmico	Vibrações	Teste de Furo Cego	Difração de Raios-X
1	•			•	•	•
2	•		•		•	•
3	•			•	•	•
4	•		•		•	•
5	•			•	•	•
6	•		•		•	•
7		•		•	•	•
8		•	•		•	•
9		•		•	•	•
10		•	•		•	•
11		•		•	•	•
12		•	•		•	•

Observa-se no quadro 5, que os corpos de prova numerados de 1 a 6 tiveram a introdução de tensões efetuada pela usinagem da superfície. Destes, os corpos de prova 2, 4 e 6 foram aliviados pelo método térmico e os corpos 1, 3 e 5 por vibrações.

Os corpos de prova numerados de 7 a 12 tiveram as tensões introduzidas por têmpera. Destes, os corpos de prova 8, 10 e 12 foram aliviados pelo método térmico e os corpos 7, 9 e 11, por vibrações.

Todos os corpos de prova tiveram suas tensões mensuradas antes e após o alívio, pela técnica de furo cego e difração de Raios-X.

3.1.2 Processo de Confecção dos Corpos de Prova Usinados

De acordo com o trabalho de Stipkovic (2012), os corpos de prova foram usinados para desbaste, com os seguintes parâmetros apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros de corte utilizados na operação de desbaste.

Velocidade de corte (v_c)	277 m/min
Rotação (n)	700 rpm
Velocidade de avanço (V_f)	250 mm/min
Profundidade de corte (a_p)	0,1 mm
Diâmetro da fresa	80 mm
Arestas de corte	6
Refrigeração	Sem uso de refrigerante
Ferramenta de corte	Coromill 245 M / Sandvik

Fonte: Adaptado de Stipkovic (2012)

Após a operação de desbaste, foram executadas as usinagens de acabamento, cujos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de penetração) estão apresentados no quadro 7 da página 64.

Quadro 7 – Parâmetros de corte utilizados na operação de acabamento.

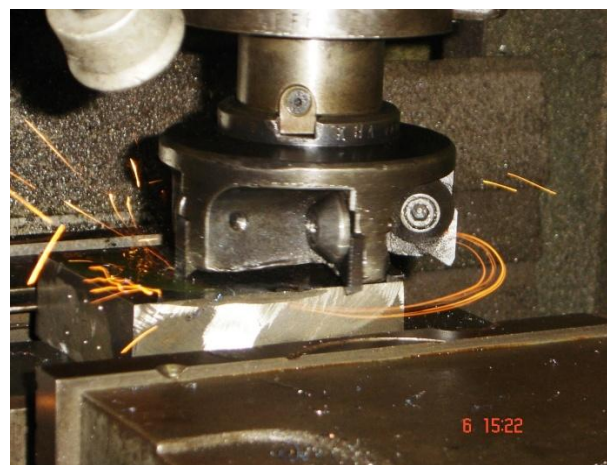
Corpo de prova	Parâmetros de Corte – Fresamento de Acabamento – Aço ABNT 4140				
	Velocidade de Corte	Avanço	Profundidade Penetração	Rotação	Velocidade de Avanço
	V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	n (rpm)	V_f (mm/min)
1	351,1	0,100	0,15	1774	867,0
2	225	0,100	0,15	1137	568,4
3	225	0,100	0,07	1137	568,4
4	225	0,100	0,23	1137	568,4
5	300	0,050	0,10	1516	378,9
6	300	0,150	0,20	1516	1136,8

Fonte: Adaptado de Stipkovic (2012)

A usinagem pode ser observada nas figuras 25 (a) e (b).



(a) Vista da fresadora



(b) Vista aproximada da usinagem

Figura 25 – Usinagem de acabamento dos corpos de prova

3.1.3 Processo de Confeção dos Corpos de Prova Temperados

Foram temperados seis corpos de prova, divididos em três grupos, seguindo ciclos térmicos semelhantes ao apresentado na figura 26 da página 65.

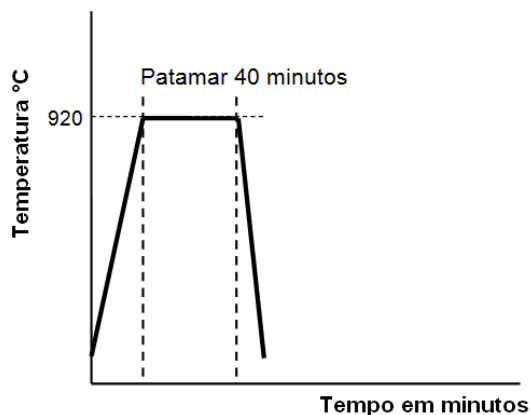


Figura 26 – Gráfico esquemático do ciclo térmico da têmpera

Corpos de prova 7 e 8 – O forno foi aquecido até a temperatura de 920° C. Após a homogeneização da temperatura, o material foi colocado dentro do forno e mantido por 40 minutos na temperatura de 920° C. Depois deste período o material foi retirado do forno e colocado em óleo, sem agitação.

Corpos de prova 9 e 10 – O forno foi aquecido até a temperatura de 920° C. Após a homogeneização da temperatura, o material foi colocado dentro do forno e mantido por 40 minutos na temperatura de 920° C. Depois deste período o material foi retirado do forno e colocado em salmoura, sem agitação.

Corpos de prova 11 e 12 – O forno foi aquecido até a temperatura de 920° C. Após a homogeneização da temperatura, o material foi colocado dentro do forno e mantido por 40 minutos na temperatura de 920° C. Depois deste período o material foi retirado do forno e colocado em fluxo de ar forçado.

3.2 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS ANTES DOS TRATAMENTOS

Após a confecção dos corpos de prova e antes dos tratamentos de alívio de tensões pelo processo térmico e por vibrações sub-ressonantes, foram medidas as tensões residuais dos doze corpos de prova, desde a superfície da peça usinada até a profundidade mínima de 0,4 mm, através do método do furo cego e na superfície por difração dos Raios-X.

Para a técnica do furo cego, foi utilizado o equipamento ilustrado na figura 27, que é composto de uma fresadora de acionamento pneumático de fixação magnética, marca Hottinger Baldwin, modelo Messtechnik de 600 Hz, velocidade máxima de 400.000 rpm, com broca de 2,2 mm, acoplada a um sistema automático de medição de tensões residuais marca Sint Technology, que transmite os dados para um computador, registrados através do software H-Drill, configurando o sistema representado na figura 28.

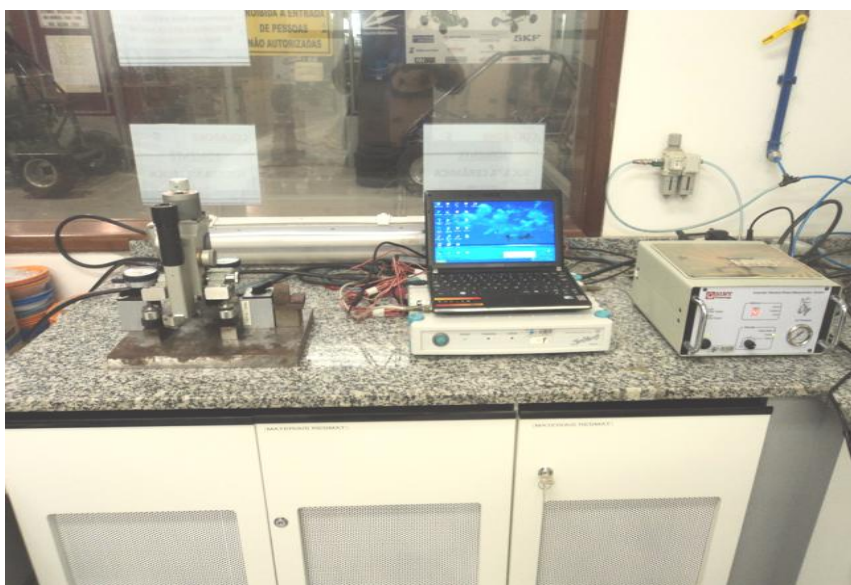


Figura 27 – Equipamento de furo cego

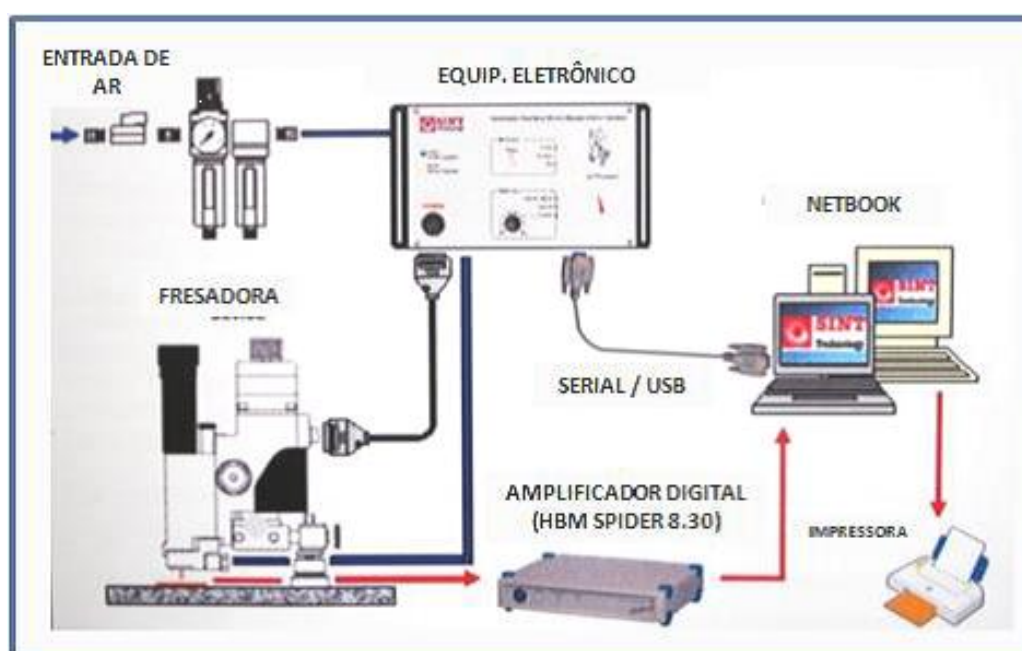


Figura 28 – Esquema do sistema integrado para medição das tensões residuais

Fonte: Adaptado de Stipkovic (2012)

Os corpos de prova foram instrumentados com rosetas tipo M062, conforme mostrado na figura 29, com a indicação dos eixos X e Y para análise das tensões.

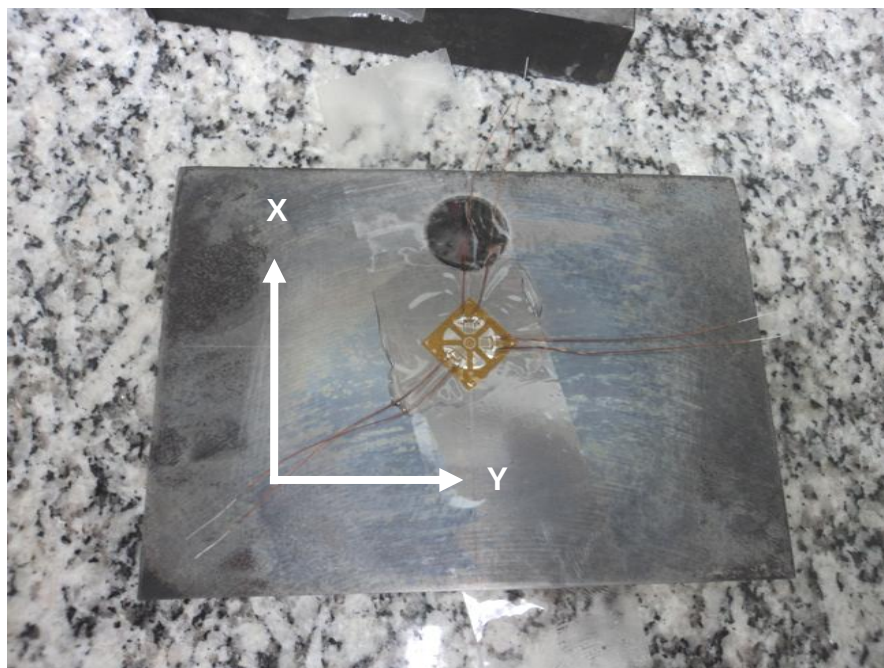


Figura 29 – Montagem da roseta no corpo de prova

Para a medição de tensões residuais através do difratômetro de raios-X, foi utilizado o equipamento Shimadzu modelo XRD-7000, mostrado na figura 30.



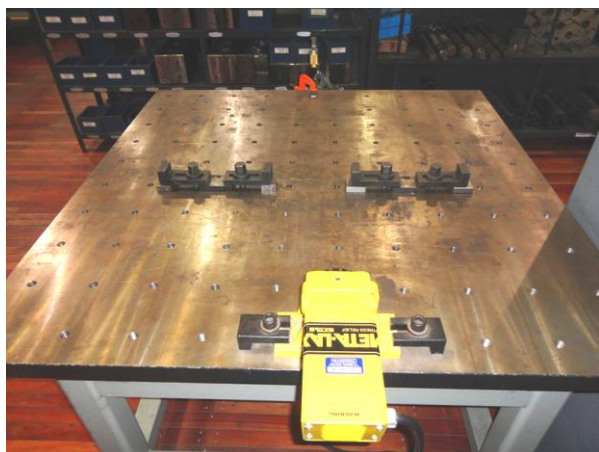
Figura 30 – Equipamento de difração de Raios-X

A área da superfície analisada é igual a 10 mm^2 , restringida por fita isolante, com o objetivo de que os raios-X não incidam fora da área de interesse da medida, e as medições foram realizadas na direção transversal à peça na região central, sendo os ângulos de incidência Ψ utilizados igual a 15, 30 e 45°.

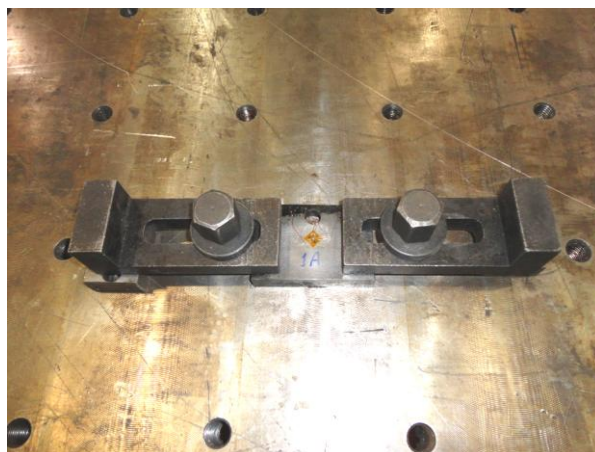
Esses parâmetros foram seguidos em todos os ensaios dos doze corpos de prova, e as superfícies das peças foram submetidas ao polimento eletrolítico, como alternativa ao lixamento, com o objetivo de não introduzir mais tensões. Nesta etapa foi realizada imersão das amostras em solução de Nital 10% por alguns segundos antes do polimento eletrolítico. O polimento eletrolítico foi realizado sob tensão de 60 V por 60 segundos, com vazão do eletrólito igual a 100% da capacidade do equipamento utilizado e este em contato com 5 cm^2 do metal.

3.3 ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES

Os corpos de prova 1, 3, 5, 7, 9 e 11 citados no quadro 5 foram aliviados através da técnica de vibrações sub-ressonantes com a utilização do equipamento Meta-lax Série 2700 automático, utilizando um indutor de força 2A, com ajuste de excêntricos a 40%. As massas dos corpos de prova são baixas em relação à capacidade do equipamento, por este motivo foram aliviados aos pares. O tempo de aplicação das vibrações foi de 20 minutos antes da segunda varredura e de 10 minutos antes da terceira. Os corpos de prova foram fixados sobre a mesa, conforme a sequência das fotos da figura 31.



(a) Mesa de Vibração



(b) Detalhe da fixação do corpo de prova

Figura 31 – Corpos de prova sendo aliviados por ATVS

Observa-se a mesa de vibração contendo o indutor de força fixado sobre a mesa na parte inferior da fotografia (a) da figura 31, as duas peças a serem aliviadas fixadas na parte central da mesa e o transdutor de força, na parte superior da mesa. Na fotografia (b) da figura 31, observa-se, em detalhe, a fixação das peças aliviadas.

3.4 ALÍVIO DE TENSÕES POR TRATAMENTO TÉRMICO

Os corpos de prova 2, 4, 6, 8, 10 e 12 citados no quadro 5 foram tratados termicamente de acordo com a norma AWS D1.1 (2004) que requer que o tratamento térmico de alívio de tensões seja realizado entre 600 °C e 650 °C por um período de 2 horas para materiais com espessura até 2 polegadas (51 mm). Neste procedimento foi utilizado um forno marca Jung modelo 1514 de 3,1 KW.

O aquecimento dos corpos de prova no forno de tratamento térmico foi livre até 300 °C. A partir desta temperatura, o aquecimento foi realizado com taxa inferior a 100 °C/h até atingir a temperatura de patamar. O resfriamento também foi controlado, e a taxa máxima também foi de 100 °C/h, até a temperatura de 300 °C. A partir daí os corpos de prova foram resfriados ao ar calmo. A Figura 32 mostra o gráfico esquemático do TTAT.

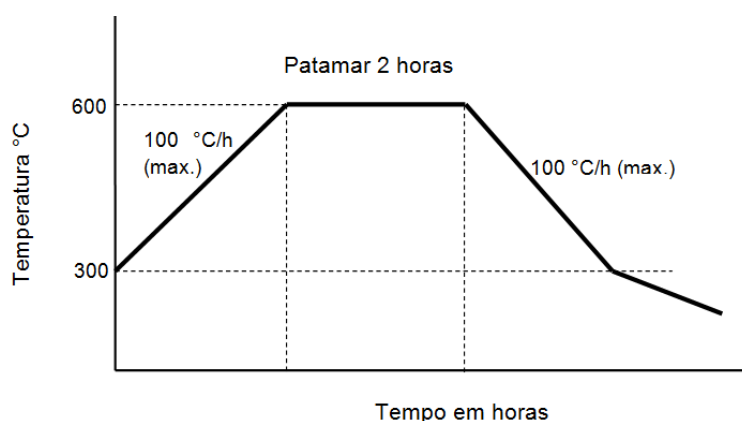


Figura 32 – Gráfico esquemático do tratamento térmico de alívio de tensões

A figura 33 da página 70 mostra um forno para tratamento térmico de alívio de tensões, controlado por termopares e painel de controle de temperatura e tempo.



Figura 33 – Forno para tratamento térmico de alívio de tensões

3.5 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS APÓS TRATAMENTOS

Após a realização de todos os alívios de tensões térmicos e por vibrações sub-ressonantes, os corpos de prova foram submetidos aos mesmos tipos de testes realizados antes dos alívios, ou seja, pela técnica de furo cego e por difração de raios-X. Isto foi realizado para possibilitar a comparação os resultados sem que exista interferência do método utilizado para a determinação da tensão residual. Nos testes foram usados os mesmos parâmetros e metodologia utilizados anteriormente.

5. RESULTADOS

Os resultados das medições de tensões residuais obtidos através dos testes realizados foram divididos conforme o tipo de ensaio antes e após a realização dos alívios, para comparação.

4.1 TENSÕES RESIDUAIS ANTES E APÓS OS ALÍVIOS DE TENSÕES

Os resultados dos testes para avaliação das tensões residuais antes e após os alívios de tensões foram os seguintes:

4.1.1 Medições com a Técnica do Furo Cego

Através dos ensaios de furo cego, foram obtidos os gráficos apresentados abaixo, cujos dados operacionais encontram-se no Apêndice A, na página 100.

CP 1 - Usinado – Aliviado por Vibrações

Pode ser observado na figura 34 (a) da página 72, que o corpo de prova 1, antes de ser aliviado, na direção X, não possui tensões residuais na sua superfície e na direção Y, a tensão residual está na ordem de 80 MPa. Na mesma figura, pode ser observado que na profundidade de 0,2 mm, foram encontrados níveis de tensões residuais de compressão na ordem de -750 MPa no eixo X e -1000 MPa no eixo Y.

Após o alívio as tensões residuais, cujo gráfico está apresentado na figura 34 (b), as tensões residuais nas direções X e Y são iguais a 40 MPa e 60MPa, respectivamente, na superfície e nulas na profundidade de 0,2 mm.

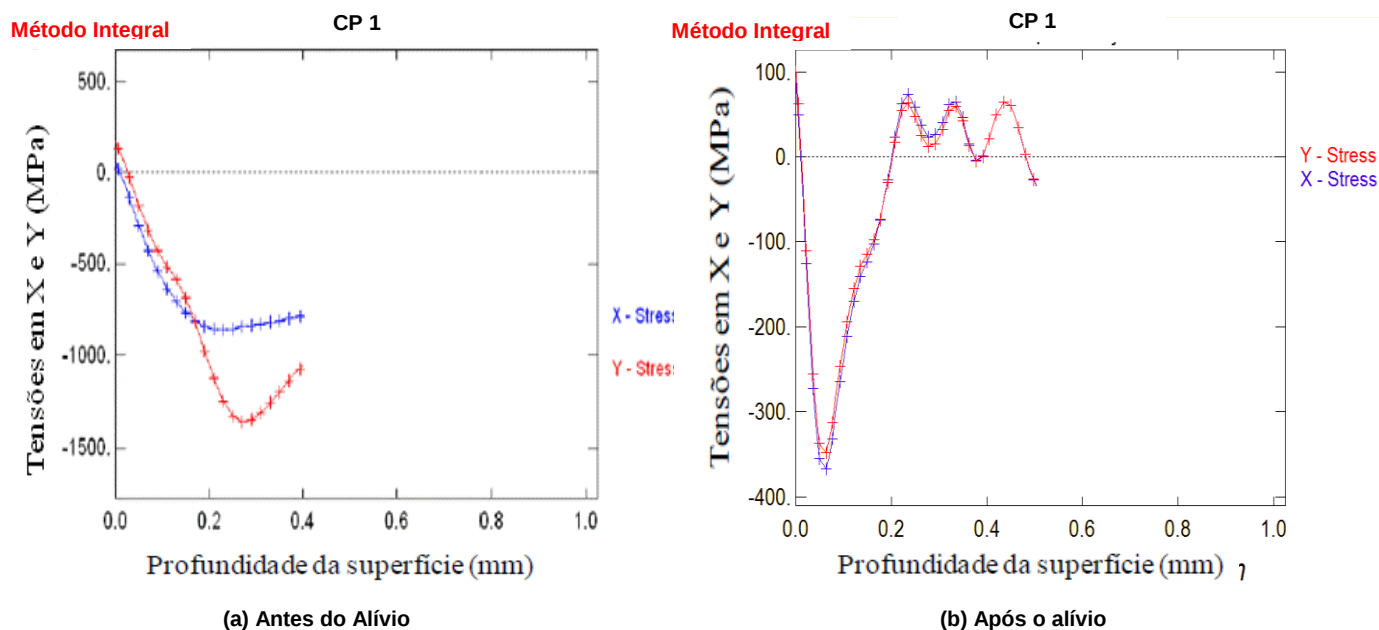


Figura 34 – Tensões residuais no CP 1 antes e após o alívio no plano X-Y

Analogamente à análise do corpo de prova 1, são mostrados na sequência os gráficos (a) e (b), antes e após o alívio, dos demais corpos de prova ensaiados.

O corpo de prova 2 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y respectivamente, tensões de -750 MPa e -1200 MPa antes do alívio e de -500 MPa e -500 MPa após o alívio.

CP 2 – Usinado – Aliviado Termicamente, conforme figura 35.

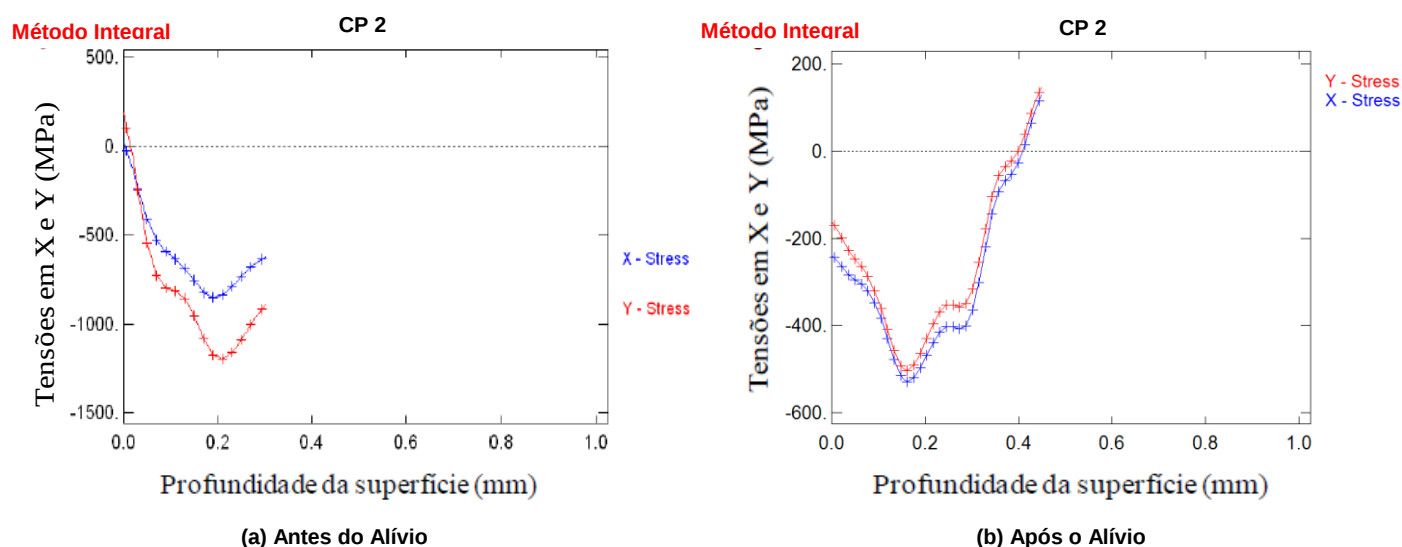


Figura 35 – Tensões residuais no CP 2 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 3 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de -750 MPa e -750 MPa antes do alívio e nulas após o alívio.

CP 3 – Usinado – Aliviado por Vibrações, conforme figura 36.

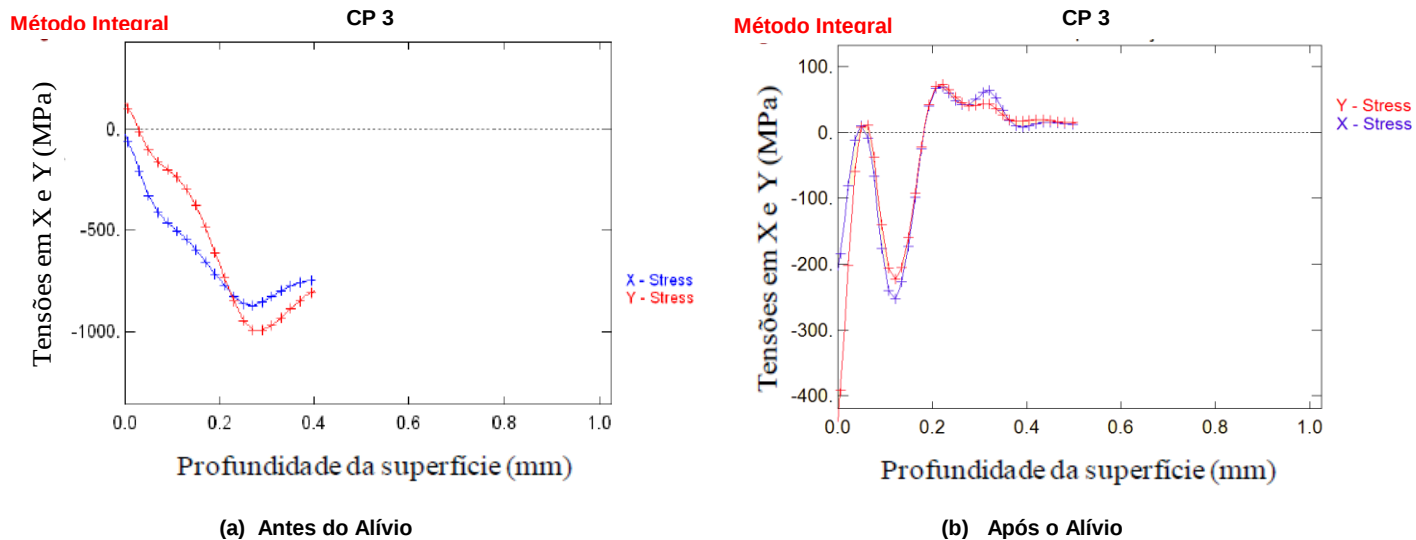


Figura 36 – Tensões residuais no CP 3 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 4 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de -750 MPa e -1100 MPa antes do alívio e nulas após o alívio.

CP 4 – Usinado – Aliviado Termicamente, conforme figura 37.

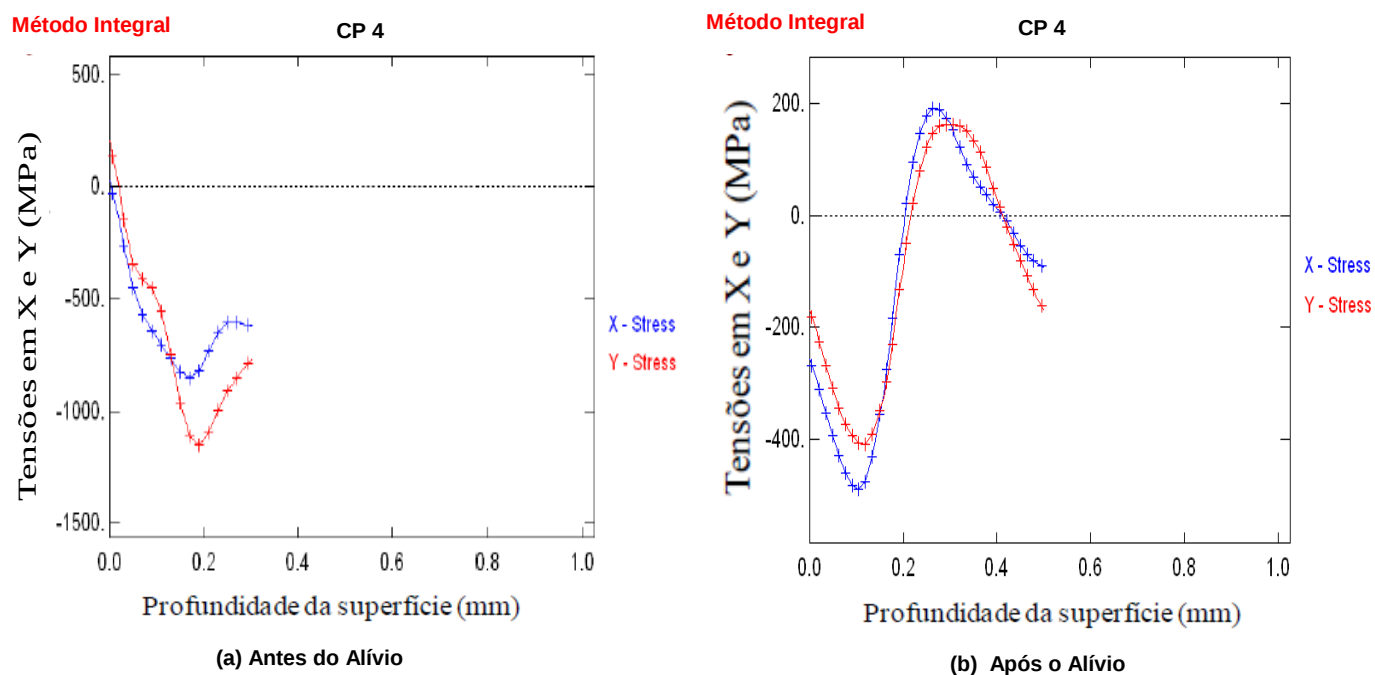


Figura 37 – Tensões residuais no CP 4 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 5 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de -600 MPa e -350 MPa antes do alívio e de +30 MPa e +20 MPa após o alívio.

CP 5 – Usinado - Aliviado por Vibrações, conforme figura 38.

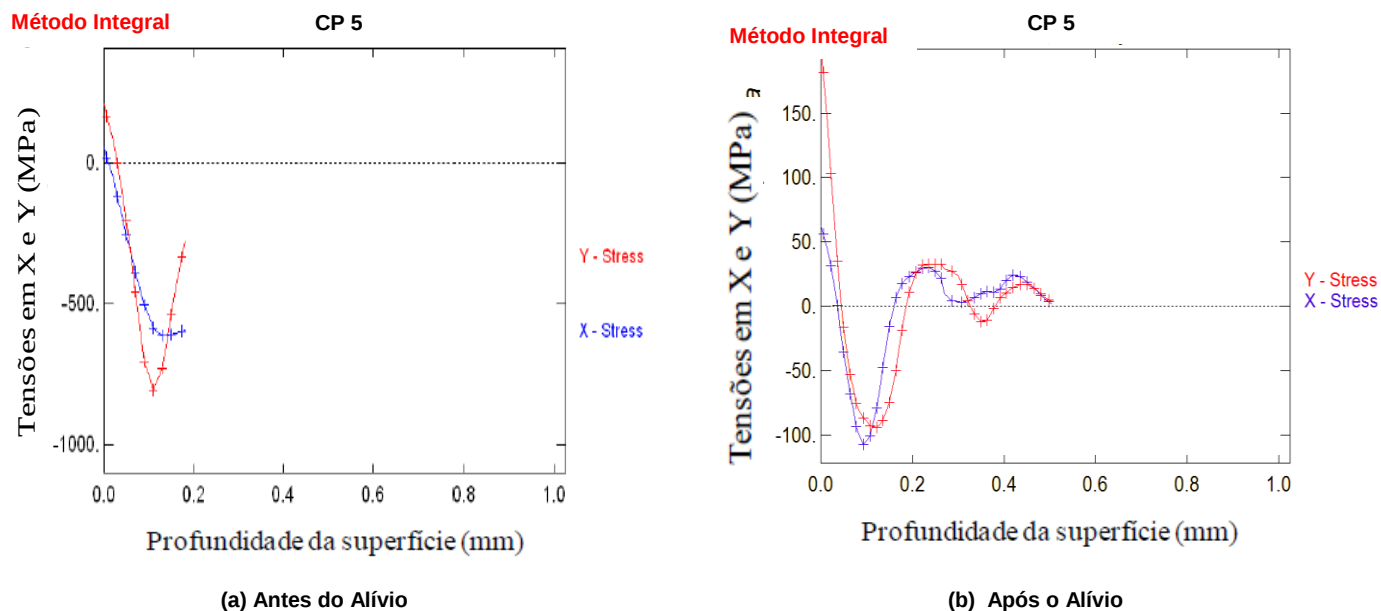


Figura 38 – Tensões residuais no CP 5 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 6 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de -700 MPa e -1000 MPa antes do alívio e de +100 MPa e +180 MPa após o alívio.

CP 6 – Usinado – Aliviado Termicamente, conforme figura 39.

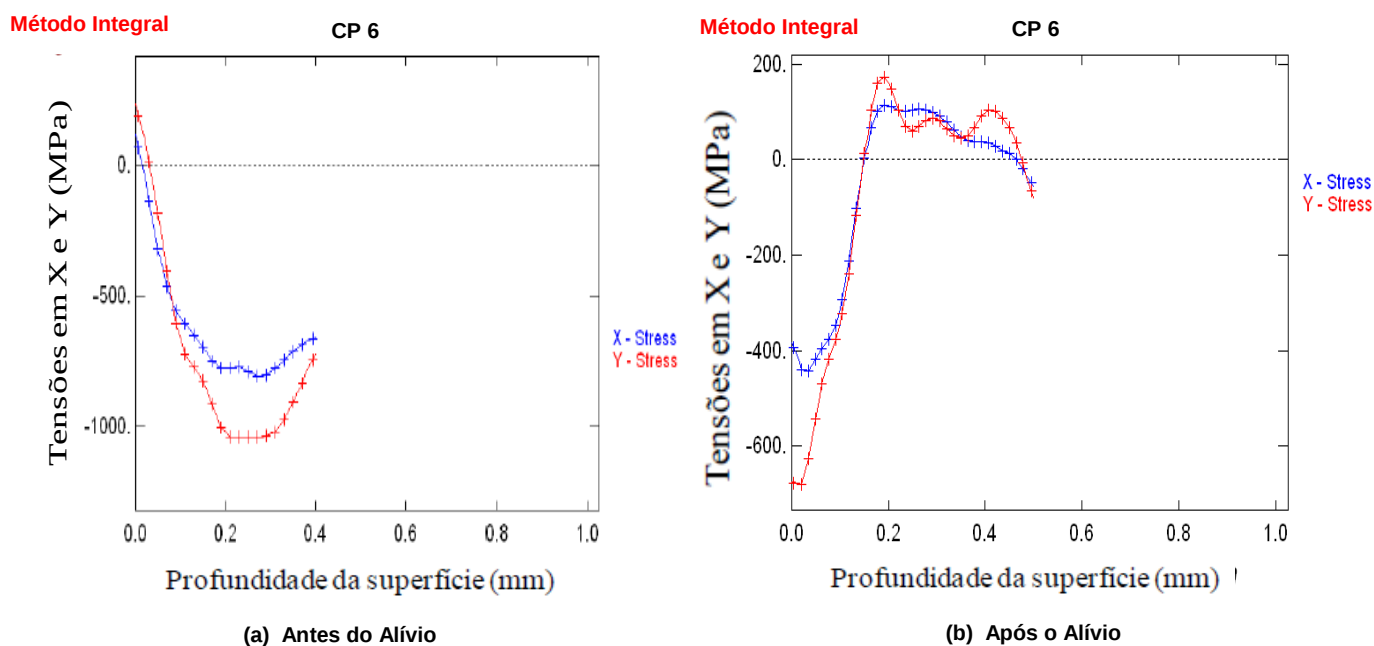


Figura 39 – Tensões residuais no CP 6 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 7 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de +500 MPa e +600 MPa antes do alívio e de -150 MPa e -150 MPa após o alívio.

CP 7 – Temperado – Aliviado por Vibrações, conforme figura 40.

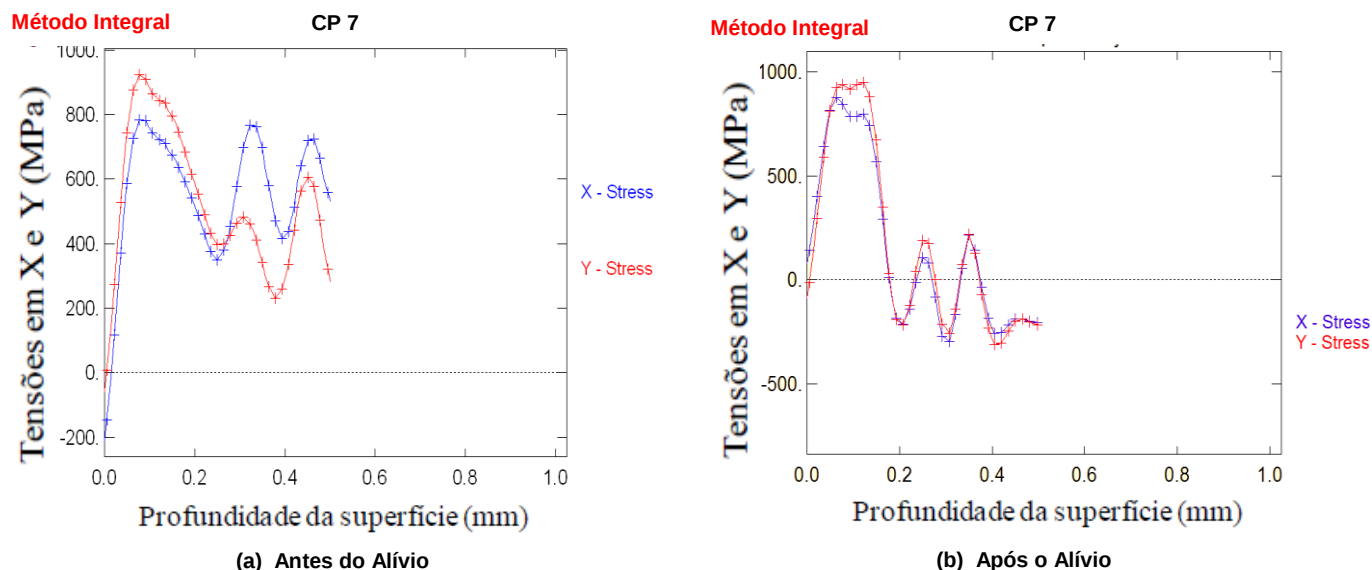


Figura 40 – Tensões residuais no CP 7 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 8 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de +550 MPa e +600 MPa antes do alívio e de +250 MPa e +300 MPa após o alívio.

CP 8 – Temperado – Aliviado Termicamente, conforme figura 41.

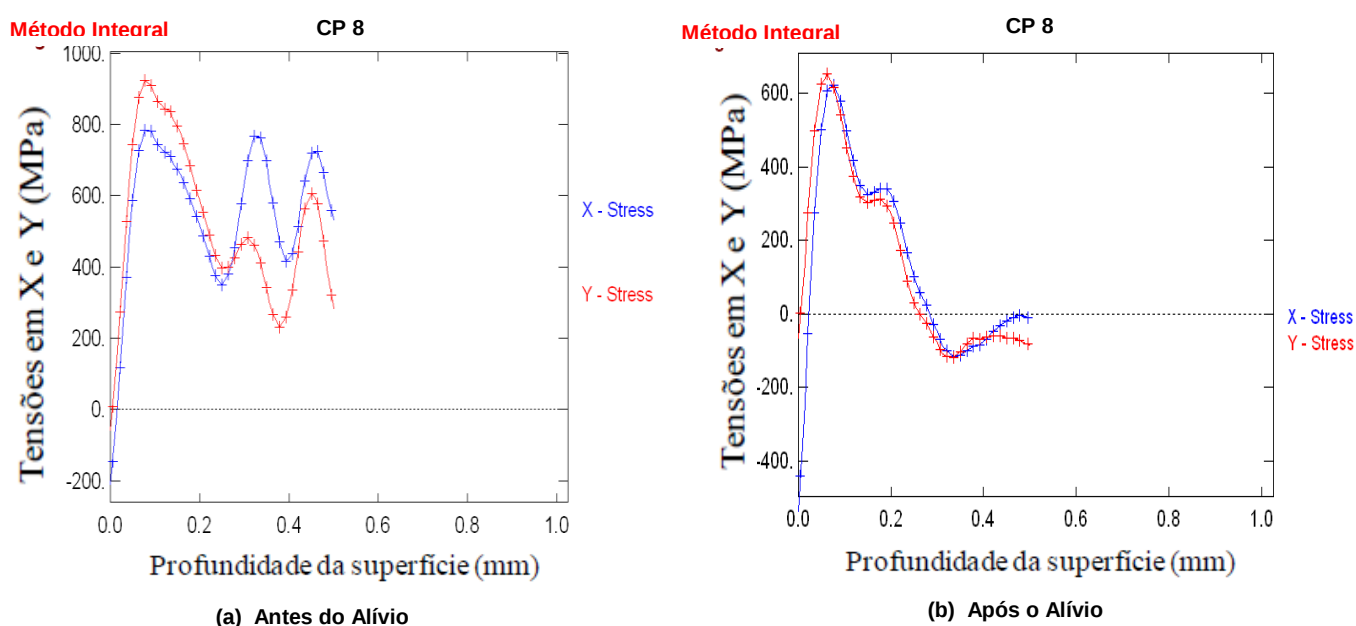


Figura 41 – Tensões residuais no CP 8 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 9 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de -150 MPa e -300MPa antes do alívio e de -120 MPa e -160 MPa após o alívio.

CP 9 – Temperado – Aliviado por vibrações, conforme figura 42.

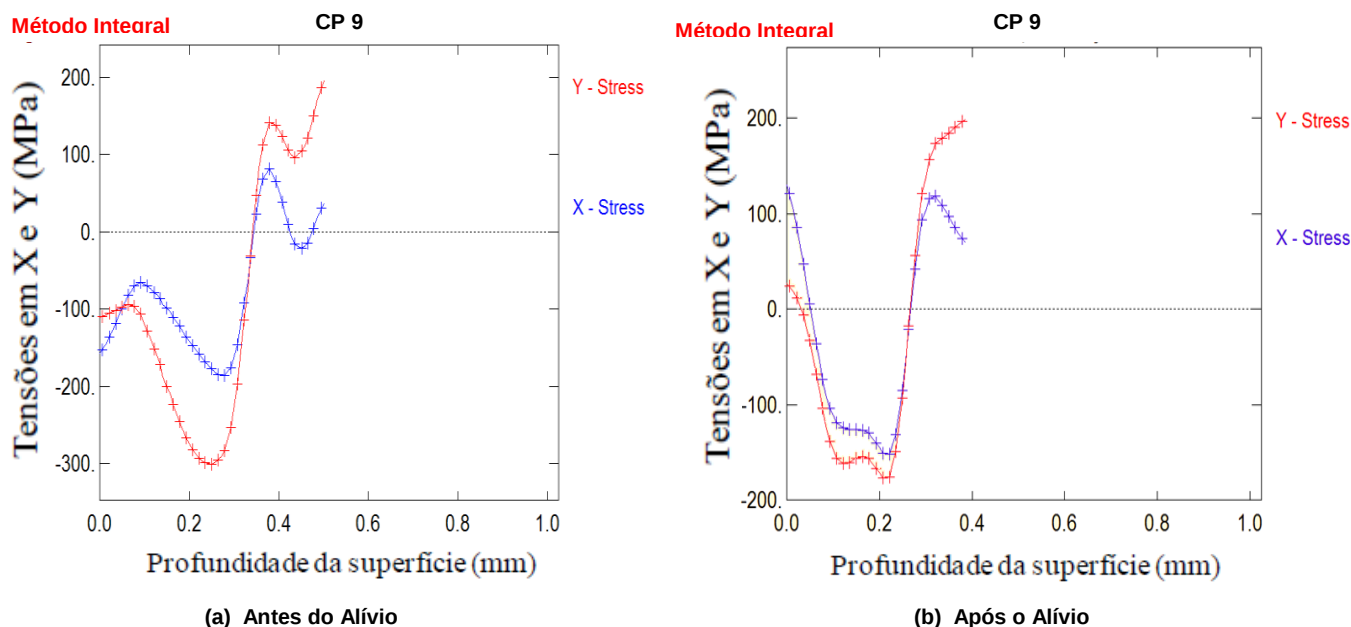


Figura 42 – Tensões residuais no CP 9 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 10 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de -150 MPa e -290 MPa antes e de -150 MPa e -170 MPa após o alívio.

CP 10 – Temperado – Aliviado Termicamente, conforme figura 43.

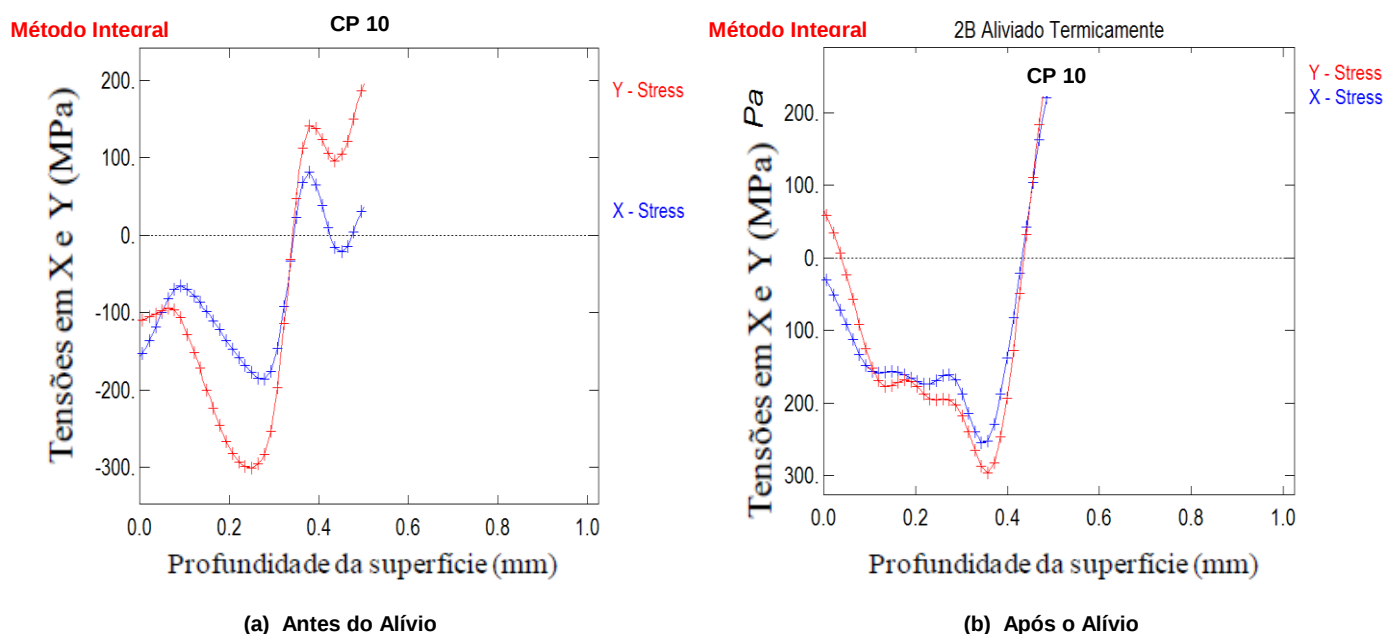


Figura 43 – Tensões residuais no CP 10 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 11 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de +110 MPa e +130 MPa antes do alívio e nulas após o alívio.

CP 11 – Temperado – Aliviado por vibrações, conforme figura 44.

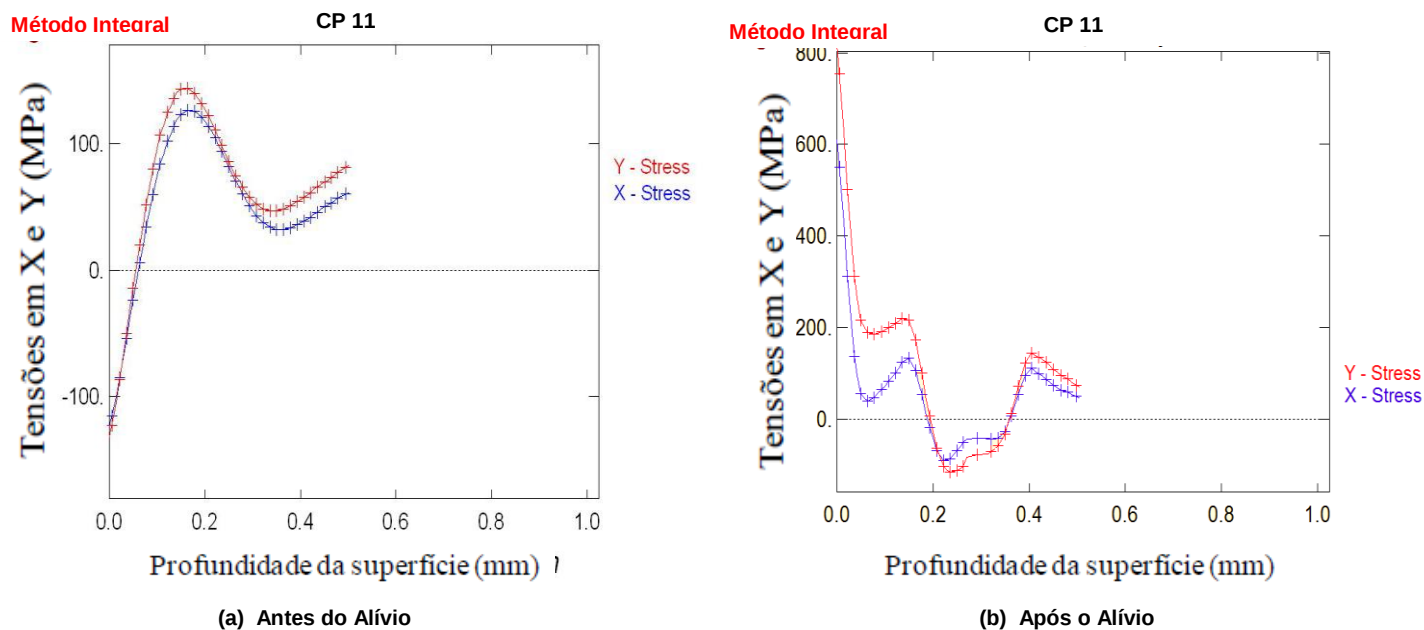


Figura 44 – Tensões residuais no CP 11 antes e após o alívio no plano X-Y

O corpo de prova 12 apresenta a 0,2 mm de profundidade nos eixos X e Y, tensões de +140 MPa e +160 MPa antes e de +60 MPa e +30 MPa após o alívio.

CP 12 – Temperado – Aliviado Termicamente, conforme figura 45.

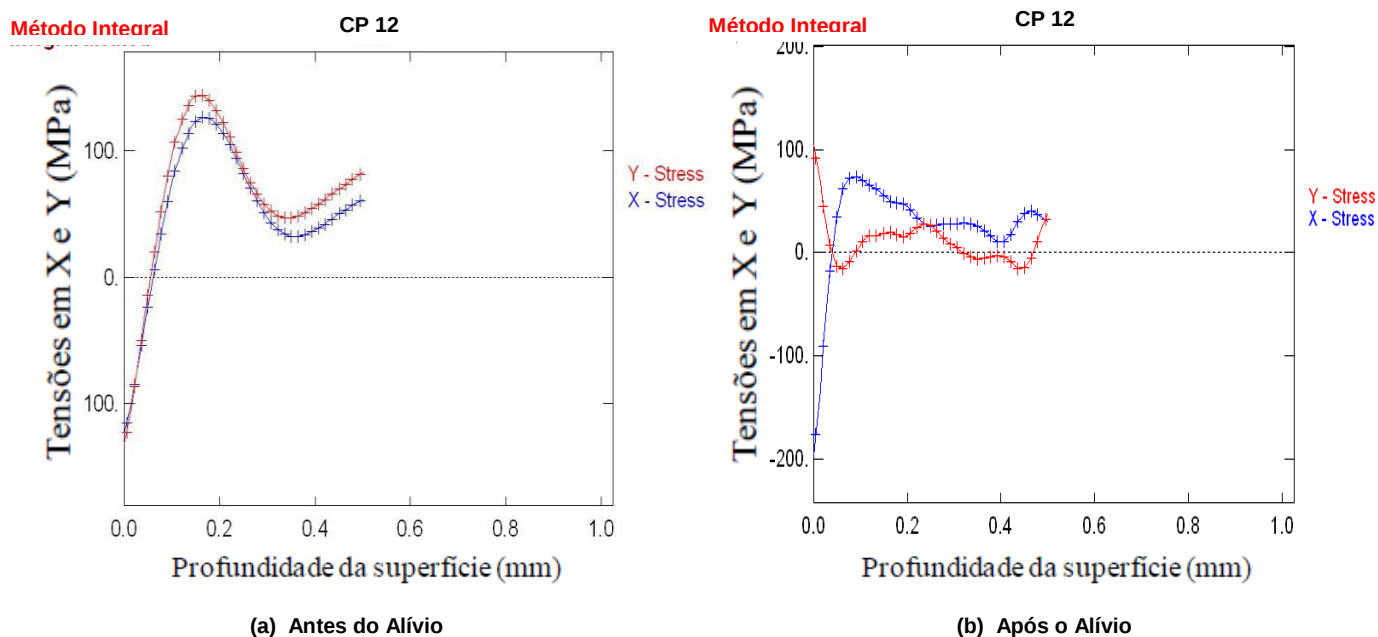


Figura 45 – Tensões residuais no CP 12 antes e após o alívio no plano X-Y

4.1.2 Medições com a Técnica de Difração de Raios-X

As tensões existentes nos corpos de prova, antes e depois dos alívios de tensões, também, foram determinadas por meio da técnica de difração de Raios-X. Observa-se, que, por meio desta técnica, é possível apenas determinar as tensões na superfície do corpo de prova.

Os resultados obtidos dos testes de difração de raios-X estão apresentados no quadro 8. Os gráficos resultantes destes testes encontram-se no Apêndice B na página 113.

Quadro 8 – Tensões residuais obtidas por difração de raios-X, antes e após os alívios

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANALISADAS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X			
			ANTES (MPa)	DESVIO (MPa)	APÓS (MPa)	DESVIO (MPa)
CP-1	Usinagem	Vibrações	- 368	20	+ 110	6
CP-2	Usinagem	Térmico	- 298	22	- 303	28
CP-3	Usinagem	Vibrações	- 258	24	- 297	13
CP-4	Usinagem	Térmico	- 320	34	- 321	10
CP-5	Usinagem	Vibrações	- 403	16	+ 171	24
CP-6	Usinagem	Térmico	- 225	45	- 363	16
CP-7	Têmpera	Vibrações	-79	4	+ 7	1
CP-8	Têmpera	Térmico	-79	4	- 389	11
CP-9	Têmpera	Vibrações	-84	0	+ 100	16
CP-10	Têmpera	Térmico	-84	0	- 349	15
CP-11	Têmpera	Vibrações	-77	3	+ 412	47
CP-12	Têmpera	Térmico	-77	3	- 271	11

4.2 RESULTADOS DOS ALÍVIOS DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES

Os corpos de prova 1, 3, 5, 7, 9 e 11 foram submetidos ao tratamento de alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes, de acordo com o item 3.3 na página 68, e foram aliviados aos pares, seguindo o grau de tensões individuais, conforme mensurado antes do alívio. Foram aliviados os corpos de prova (1 e 3), (5 e 7) e (9 e 11). Os três relatórios estão apresentados no Apêndice C na página 119.

As diferenças na frequência entre os picos de ressonância dos corpos de prova antes e após os alívios de tensões por vibrações sub-ressonantes são mostradas no quadro 9.

Quadro 9 – Diferenças de frequência entre os picos de ressonância antes e após os alívios

CORPOS DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	FREQUENCIA ENTRE PICOS DE RESSONÂNCIA
		DIFERENÇA (Hz)
CP-1	Usinagem	1,0
CP-3	Usinagem	1,0
CP-5	Usinagem	0,7
CP-7	Têmpera	0,7
CP-9	Têmpera	0,4
CP-11	Têmpera	0,4

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos nesta pesquisa está dividida por tipo de ensaio e tratamentos realizados nos corpos de prova.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FURO CEGO

Os resultados das tensões residuais mensuradas nos ensaios de furo cego, antes e após os alívios dos doze corpos de prova estão apresentados nos quadros 10 a 16 a seguir.

No quadro 10 podem ser observadas as tensões residuais na profundidade de 0,2 mm, nos eixos x e y, antes e após a execução dos alívios.

Quadro 10 – Tensões residuais obtidas nos ensaios de furo cego antes e após os alívios na profundidade de 0,2 mm

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANTES DO ALÍVIO		TENSÕES APÓS O ALÍVIO	
			EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)	EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)
CP-1	Usinagem	Vibrações	- 750	- 1000	0	0
CP-2	Usinagem	Térmico	- 750	- 1200	- 500	- 500
CP-3	Usinagem	Vibrações	- 750	- 750	0	0
CP-4	Usinagem	Térmico	- 750	- 1100	0	0
CP-5	Usinagem	Vibrações	- 600	- 350	+ 30	+ 20
CP-6	Usinagem	Térmico	- 700	- 1000	+ 100	+ 180
CP-7	Têmpera	Vibrações	+ 500	+ 600	- 150	- 150
CP-8	Têmpera	Térmico	+ 550	+ 600	+ 250	+ 300
CP-9	Têmpera	Vibrações	- 150	- 300	- 120	- 160
CP-10	Têmpera	Térmico	- 150	- 290	- 150	- 170
CP-11	Têmpera	Vibrações	+110	+ 130	0	0
CP-12	Têmpera	Térmico	+140	+ 160	+ 60	+ 30

Por meio dos resultados apresentados no quadro 10, observa-se que os níveis de tensões residuais de compressão introduzidas nos corpos de prova são, em média, 269% maiores nas peças usinadas que nas temperadas.

Através da comparação entre os gráficos dos testes de furo cego, os níveis de tensões residuais encontrados após os alívios por vibrações sub-ressonantes e térmicos são equivalentes, se considerado a partir da profundidade de 0,2 mm, ou seja, após os alívios, as tensões residuais tenderam a zero.

Este fato pode ser explicado através do postulado do modelo padrão que o alívio através de vibrações ocorre quando a combinação das tensões residuais e vibratórias excede o limite de elasticidade do material. O pressuposto é que o fluxo plástico subsequente é tal que quando a amplitude vibracional é removida, a área previamente tensionada pode agora retornar a um nível menor de tensões residuais (WALKER, 1995).

Aprofundando a análise dos resultados do quadro 10, foram separados os resultados por tipo de alívio. O quadro 11 apresenta os resultados obtidos apenas com o ATVS.

Quadro 11 – Tensões residuais obtidas antes e após o alívio de tensões por vibrações

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANTES DO ALÍVIO		TENSÕES APÓS O ALÍVIO	
			EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)	EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)
CP-1	Usinagem	Vibrações	- 750	- 1000	0	0
CP-3	Usinagem	Vibrações	- 750	- 750	0	0
CP-5	Usinagem	Vibrações	- 600	- 350	+ 30	+ 20
CP-7	Têmpera	Vibrações	+ 500	+ 600	- 150	- 150
CP-9	Têmpera	Vibrações	- 150	- 300	- 120	- 160
CP-11	Têmpera	Vibrações	+110	+ 130	0	0

Observa-se no quadro 11 uma redução que varia entre 46,6% a 100% das tensões residuais encontradas na profundidade de 0,2 mm com o alívio de tensões por vibrações no eixo Y e entre 20,0% a 100% no eixo X.

Analogamente estão apresentados no quadro 12 da página 82, os resultados obtidos através do alívio de tensões por tratamento térmico

Quadro 12 – Tensões residuais obtidas antes e após o alívio de tensões por tratamento térmico

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANTES DO ALÍVIO		TENSÕES APÓS O ALÍVIO	
			EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)	EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)
CP-2	Usinagem	Térmico	- 750	- 1200	- 500	- 500
CP-4	Usinagem	Térmico	- 750	- 1100	0	0
CP-6	Usinagem	Térmico	- 700	- 1000	+ 100	+ 180
CP-8	Têmpera	Térmico	+ 550	+ 600	+ 250	+ 300
CP-10	Têmpera	Térmico	- 150	- 290	- 150	- 170
CP-12	Têmpera	Térmico	+140	+ 160	+ 60	+ 30

Observa-se no quadro 12 uma redução que varia entre 41,37% a 100% das tensões residuais encontradas na profundidade de 0,2 mm com o alívio de tensões por tratamento térmico no eixo Y e entre 0,0% a 100% no eixo X.

Em relação ao tipo de introdução de tensões residuais, foi elaborada a divisão dos corpos de prova usinados e temperados. O quadro 13 apresenta as tensões residuais dos corpos de prova usinados.

Quadro 13 – Tensões residuais obtidas com os alívios de tensões por vibrações e por tratamento térmico dos corpos de prova usinados

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANTES DO ALÍVIO		TENSÕES APÓS O ALÍVIO	
			EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)	EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)
CP-1	Usinagem	Vibrações	- 750	- 1000	0	0
CP-3	Usinagem	Vibrações	- 750	- 750	0	0
CP-5	Usinagem	Vibrações	- 600	- 350	+ 30	+ 20
CP-2	Usinagem	Térmico	- 750	- 1200	- 500	- 500
CP-4	Usinagem	Térmico	- 750	- 1100	0	0
CP-6	Usinagem	Térmico	- 700	- 1000	+ 100	+ 180

Observa-se no quadro 13 uma redução que varia entre 94,3% a 100% das tensões residuais encontradas na profundidade de 0,2 mm com o alívio de tensões por vibrações e entre 33,3% e 100% com o alívio por tratamento térmico.

Analogamente o quadro 14 apresenta as tensões residuais dos corpos de prova temperados.

Quadro 14 – Tensões residuais obtidas com os alívios de tensões por vibrações e por tratamento térmico dos corpos de prova temperados

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANTES DO ALÍVIO		TENSÕES APÓS O ALÍVIO	
			EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)	EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)
CP-7	Têmpera	Vibrações	+ 500	+ 600	- 150	- 150
CP-9	Têmpera	Vibrações	- 150	- 300	- 120	- 160
CP-11	Têmpera	Vibrações	+110	+ 130	0	0
CP-8	Têmpera	Térmico	+ 550	+ 600	+ 250	+ 300
CP-10	Têmpera	Térmico	- 150	- 290	- 150	- 170
CP-12	Têmpera	Térmico	+140	+ 160	+ 60	+ 30

Observa-se no quadro 14 uma redução que varia entre 20,0% a 100% das tensões residuais encontradas na profundidade de 0,2 mm com o alívio de tensões por vibrações e entre 0% e 100% com o alívio por tratamento térmico.

O quadro 15 da página 84 apresenta as tensões máximas de cada corpo de prova, registradas antes do alívio, levando-se em consideração seu eixo e profundidade e o respectivo valor após o alívio.

Quadro 15 – Tensões máximas registradas antes dos alívios: eixo, profundidade e respectivas tensões após o alívio

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES MÁXIMAS ANTES DO ALÍVIO			TENSÕES APÓS ALÍVIO NO MESMO PONTO
			Tensão Máxima (MPa)	EIXO	PROFUND. (MM)	TENSÕES (MPa)
CP-1	Usinagem	Vibrações	- 1400	Y	0,28	+ 30
CP-2	Usinagem	Térmico	- 1200	Y	0,20	- 460
CP-3	Usinagem	Vibrações	- 1000	Y	0,27	+ 40
CP-4	Usinagem	Térmico	- 1100	Y	0,20	- 100
CP-5	Usinagem	Vibrações	- 800	Y	0,10	- 90
CP-6	Usinagem	Térmico	- 1050	Y	0,25	+ 80
CP-7	Têmpera	Vibrações	+ 950	Y	0,07 *	+ 970 *
CP-8	Têmpera	Térmico	+ 960	Y	0,05 *	+ 620 *
CP-9	Têmpera	Vibrações	- 300	Y	0,25	- 70
CP-10	Têmpera	Térmico	- 300	Y	0,22	- 190
CP-11	Têmpera	Vibrações	+120	Y	0,12	+ 200 *
CP-12	Têmpera	Térmico	+150	Y	0,10	+ 30

Pode ser observado no quadro 15 que a redução de tensões residuais ocorre em ambos os tipos de alívios de tensões, a uma profundidade superior a 0,20 mm. * Porém na superfície pode ocorrer aumento ou baixo nível de redução de tensões, observado nos corpos de prova 7, 8 e 11.

Isto se deve ao fato que o modelo de tensões residuais está em balanço em todas as partes da peça ou estrutura, ou seja, as tensões de tração de algumas áreas são balanceadas com a compressão de outras. Se a redução de tensões for alcançada através de alívio térmico ou por vibrações, tal redução implicará na operação de mecanismos de deformação plástica, normalmente na forma de processos microplásticos intergranulares de modo a haver deslocamento de segmentos individuais para posições de menor energia (WALKER, 1995).

O quadro 16 da página 85 apresenta as tensões máximas de cada corpo de prova, registradas após o alívio, levando-se em consideração seu eixo e profundidade e o respectivo valor antes do alívio para comparação final dos testes de furo cego.

Quadro 16 – Tensões máximas registradas após os alívios: eixo, profundidade e respectivas tensões antes do alívio

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES MÁXIMAS APÓS O ALÍVIO			TENSÕES ANTES DO ALÍVIO NO MESMO PONTO
			Tensão Máxima (MPa)	EIXO	PROFUND. (MM)	TENSÕES (MPa)
CP-1	Usinagem	Vibrações	- 360	X	0,05	- 250
CP-2	Usinagem	Térmico	- 520	X	0,18	- 800
CP-3	Usinagem	Vibrações	- 400	Y	0,00 *	+ 20 *
CP-4	Usinagem	Térmico	- 480	X	0,10	- 700
CP-5	Usinagem	Vibrações	- 200	Y	0,00 *	+100 *
CP-6	Usinagem	Térmico	- 700	Y	0,00 *	+ 80 *
CP-7	Têmpera	Vibrações	+ 950	Y	0,10	+ 850
CP-8	Têmpera	Térmico	+ 620	Y	0,08	+ 900
CP-9	Têmpera	Vibrações	+200	Y	0,45	+ 200
CP-10	Têmpera	Térmico	- 300	Y	0,35	+ 150
CP-11	Têmpera	Vibrações	+800	Y	0,00 *	-120 *
CP-12	Têmpera	Térmico	-170	X	0,00 *	- 120 *

Os resultados do quadro 16 comprovam que as tensões residuais são reduzidas com os alívios, com exceção na superfície* dos corpos de prova, como pode ser observado nos corpos de prova 2, 5, 6, 11 e 12.

Esta tendência pode ser explicada, pois as tensões superficiais ficam confinadas às regiões próximas à superfície, onde os níveis de tensões residuais originais são mais elevados e a atuação dos efeitos dos alívios penetra mais no interior do corpo do material (WALKER, 1995).

De acordo com os quadros apresentados, nota-se que na superfície, os níveis de tensões das dos corpos de prova usinados, originalmente sem tensões residuais, passaram a ter tensões de compressão entre -500 a -100 MPa. Já nos corpos de prova temperados, os níveis de tensões superficiais variaram de -100 MPa a zero, com exceção dos corpos de prova 8 que obteve nível de tensão na ordem de -200 MPa e o corpo de prova 11 que inicialmente tinha tensões de compressão de -100 MPa e após o alívio, níveis de tensões na ordem de 700 MPa de tração.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Os resultados das tensões residuais mensuradas nos ensaios de difração de raios-X, antes e após os alívios dos doze corpos de prova são apresentados no quadro 17.

Tais resultados corroboram os resultados dos ensaios de furo cego, pois a variação das tensões residuais na superfície não é uniforme para os dois tipos de alívios aplicados.

Quadro 17 – Tensões residuais registradas antes e após os alívios por difração de Raios-X

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	TENSÕES ANALISADAS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X			
			ANTES (MPa)	DESVIO (MPa)	APÓS (MPa)	DESVIO (MPa)
CP-01	Usinagem	Vibrações	- 368	20	+ 110	6
CP-03	Usinagem	Vibrações	- 258	24	- 297	13
CP-05	Usinagem	Vibrações	- 403	16	+ 171	24
CP-07	Têmpera	Vibrações	-79	4	+ 7	1
CP-09	Têmpera	Vibrações	-84	0	+ 100	16
CP-11	Têmpera	Vibrações	-77	3	+ 412	47
CP-02	Usinagem	Térmico	- 298	22	- 303	28
CP-04	Usinagem	Térmico	- 320	34	- 321	10
CP-06	Usinagem	Térmico	- 225	45	- 363	16
CP-08	Têmpera	Térmico	-79	4	- 389	11
CP-10	Têmpera	Térmico	-84	0	- 349	15
CP-12	Têmpera	Térmico	-77	3	- 271	11

No quadro 17 pode ser observado que o processo de usinagem introduz gradientes de tensões residuais na superfície em média 390% maiores do que os encontrados nos materiais temperados. Também se observa que após os tratamentos de alívio, as tensões residuais na superfície não seguem o padrão de redução ocorrido no núcleo do material.

5.3 RESULTADOS DOS ATVS

Por meio dos resultados apresentados no quadro 9 da página 78 e no quadro 11 da página 80, referentes aos corpos de prova aliviados por vibrações, podem ser correlacionados os gradientes de tensões removidas, com as diferenças das frequências entre os picos de ressonância dos corpos de prova, antes e após a execução do alívio de tensões. O quadro 18 apresenta esta correlação.

Quadro 18 – Correlação entre as tensões residuais removidas e a diferença de frequência entre os picos de ressonância

CORPO DE PROVA	INTRODUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	ALÍVIO DE TENSÕES	DIFERENÇA EM MÓDULO DAS TENSÕES ANTES E APÓS O ALÍVIO ($\Delta\sigma$)		FREQUENCIA ENTRE PICOS DE RESSONÂNCIA (Δf)
			EIXO X (MPa)	EIXO Y (MPa)	DIFERENÇA (Hz)
CP-1	Usinagem	Vibrações	750	1000	1,0
CP-3	Usinagem	Vibrações	750	750	1,0
CP-5	Usinagem	Vibrações	630	370	0,7
CP-7	Têmpera	Vibrações	650	750	0,7
CP-9	Têmpera	Vibrações	30	140	0,4
CP-11	Têmpera	Vibrações	110	130	0,4

O gráfico apresentado na figura 46 da página 88 foi feito a partir do quadro 18. Neste gráfico é feito um ajuste da curva da diferença de frequência em função do produto de redução de tensões residuais.

Observa-se que a equação que melhor se adapta aos resultados encontrados, com $R^2 = 0,9937$ para o eixo X, é a polinomial, ou seja, a equação 11:

$$\Delta\sigma = -2555,6(\Delta f)^2 + 4711,1 (\Delta f) - 1405,6 \quad (11)$$

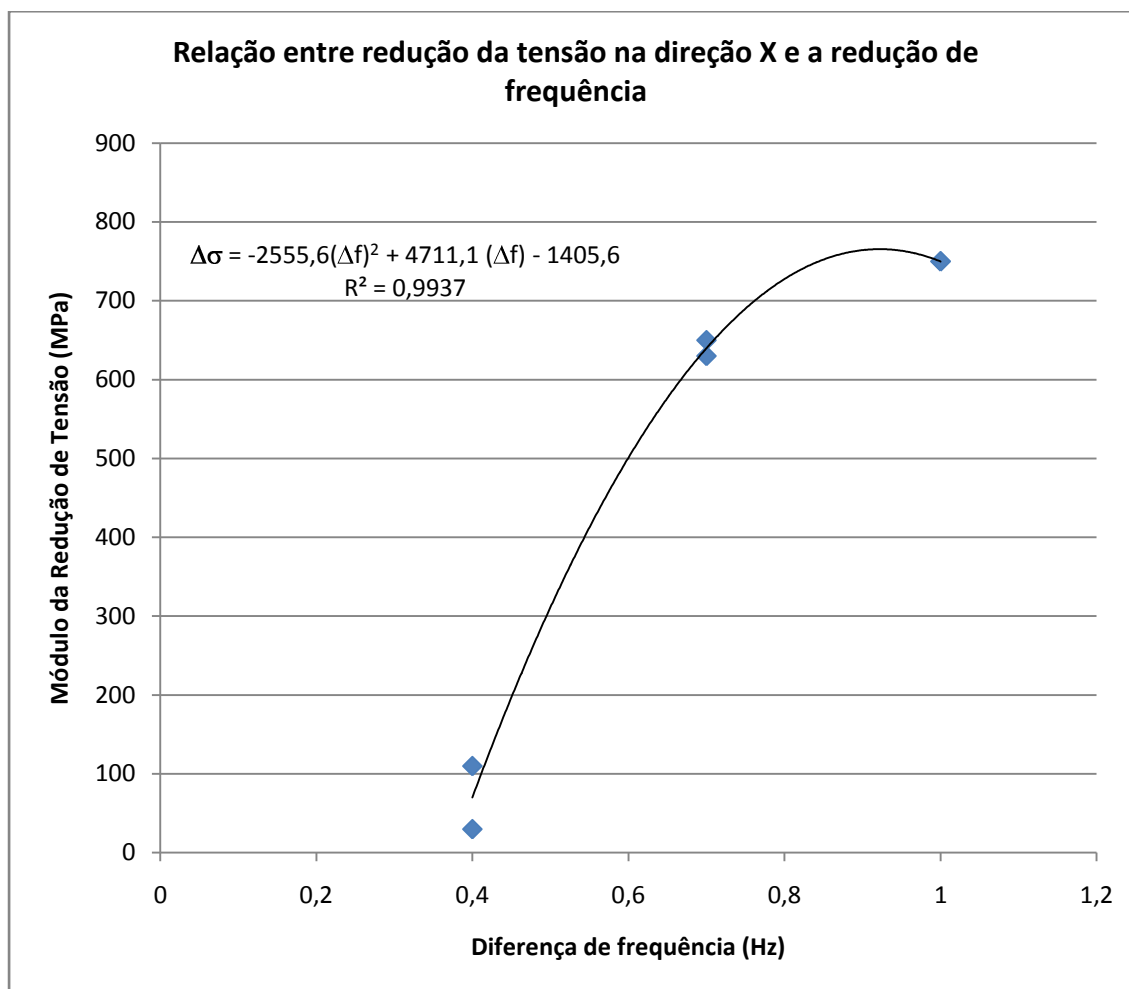


Figura 46 – Análise matemática dos parâmetros encontrados para o eixo X

O gráfico apresentado na figura 47 da página 89 foi feito a partir do quadro 18. Neste gráfico é feito um ajuste da curva da diferença de frequência em função do produto de redução de tensões residuais.

Observa-se que a equação que melhor se adapta aos resultados encontrados, com $R^2 = 0,9097$ para o eixo Y, é a potencial, ou seja, a equação 12:

$$\Delta\sigma = 948,33(\Delta f)^{2,0651} \quad (12)$$

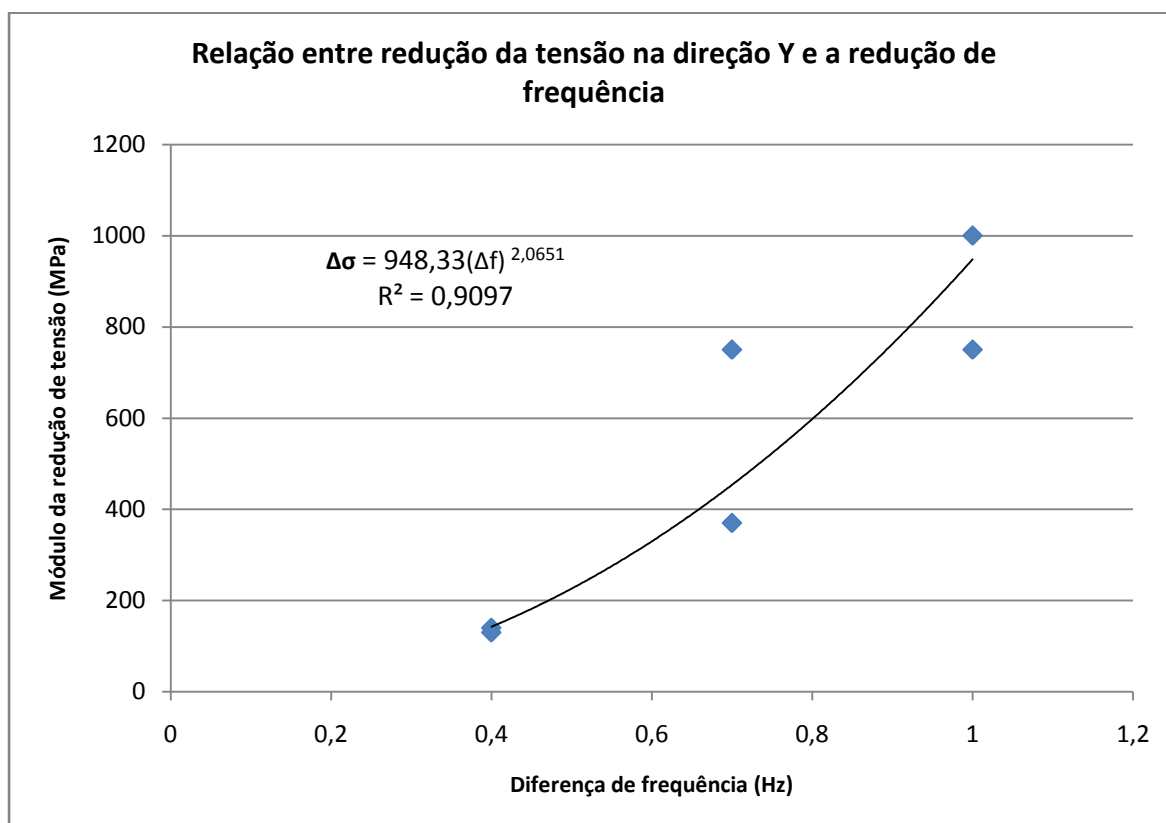


Figura 47 – Análise matemática dos parâmetros encontrados para o eixo Y

Observa-se, que as expressões encontradas são válidas apenas para os corpos de prova ensaiados nas condições especificadas nos itens 3.2 e 3.5 deste trabalho.

7. CONCLUSÃO

Após as análises realizadas no capítulo anterior, pode-se concluir que a redução de tensões obtida nos tratamentos térmico e por vibrações sub-ressonantes não é uniforme na superfície dos materiais. Isto pode ser observado nos dados dos quadros 16 da página 85 e 17 da página 86. Este fato já foi evidenciado em pesquisas anteriores efetuadas por Walker (1995).

Foi observado que, na profundidade de 0,2 mm, o tratamento térmico de alívio de tensões provoca reduções de tensão em até 100%. Estes dados podem ser encontrados no quadro 12 da página 82. Na mesma profundidade, o alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes provoca reduções em percentuais a partir de 20,0% até 100%, conforme dados encontrados no quadro 11 da página 81.

Também foi observado que nos corpos de prova que tiveram suas tensões introduzidas através de usinagem, o percentual mínimo de remoção de tensões foi de 94,3% por vibrações e de 33,3% por tratamento térmico, como pode ser observado nos dados do quadro 13 da página 82. Nos corpos de prova que tiveram suas tensões introduzidas através de têmpera, os percentuais foram entre 20,0% e 100% e entre 0% e 100% nos tratamentos por vibrações e térmico, respectivamente, nos dados do quadro 14 da página 83.

Através destes resultados, conclui-se, portanto que o alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes, na profundidade de 0,2 mm, possui percentuais médios de redução de tensões residuais, em média 10% maiores, quando comparados com os resultados obtidos através do alívio de tensões por tratamento térmico.

Quanto à parametrização do alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes através da relação entre os resultados dos gradientes de redução das tensões residuais dos corpos de prova e a diminuição da frequência dos picos de ressonância dos corpos de prova antes e após os alívios, apesar da limitação da quantidade de ensaios realizados e da inexistência de resultados mais amplos entre os pontos observados, chegou-se a conclusão que é possível obter esta parametrização.

8. CONSIDERAÇÃO FINAL

Como consideração final, sob um ponto de vista mais amplo, este trabalho mostra que, apesar de as instituições normativas não incluírem o tratamento por vibrações sub-ressonantes em seu elenco de técnicas para alívio de tensões, os resultados mostram que existe esta possibilidade. Fica patente a necessidade de realização de novas pesquisas a fim de se determinar parâmetros que possam nortear a utilização desta técnica em outras aplicações.

Embora o trabalho apresentado não contemple a comparação entre o custo do tratamento térmico e da aplicação de vibrações sub-ressonantes para alívio de tensões, ficou claro que existe uma diferença entre eles.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fica a sugestão para fazer uma abordagem com um maior número de corpos de prova aliviados por vibrações sub-ressonantes para ampliar e melhorar a parametrização. Estudar a possibilidade de utilização de corpos de prova com dimensões e massas maiores, no intuito de aumentar a diferença das frequências entre os picos de ressonância nos alívios de tensões por vibrações sub-ressonantes e assim melhorar a qualidade da parametrização.

Para trabalhos futuros sugere-se fazer a análise da remoção das tensões residuais em corpos de prova de outros materiais, onde seja feita a análise metalográfica antes e após os alívios térmicos e por vibrações sub-ressonantes, para se avaliar possíveis alterações em suas estruturas cristalinas.

Sugere-se também fazer uma comparação entre os custos e tempos necessários para a execução dos tratamentos de alívio de tensões térmico e por vibrações sub-ressonantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGEN, G.; AKSTENS, F.W.; ALLEN, C. M., et al; AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. ASM Handbook: Volume 6: **Welding, Brazing, and Soldering – Soldagem, Brasagem e Caldeamento**. USA: ASM International. 1998.
- ARAÚJO, C. A. **Comparação Entre Sequências de Soldagem Progressiva e Passo Reverso Através de Análise Numérica e Experimental**. 2007. 199p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.COPPE/UFRJ. 2007.
- ASTM - American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana para Testes e Materiais. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method – Método de Teste Padrão para Determinação de Tensões Residuais através de Extensômetros com Furo Cego**. E 837-08. USA. Jul 2009.
- BARROS, I.S.**Tensões Residuais de Soldagem**. Trabalho de Aproveitamento do Curso de Metalurgia de Soldagem de Ligas Ferrosas. (Doutorado em Metalurgia e Materiais em fase de elaboração) Escola Politécnica USP – Departamento de Metalurgia e Materiais. São Paulo. 2003.
- CABRAL,T.S; **Influência dos Procedimentos e Processos de Soldagem Mag na Redução de Deformações em Painéis de Estruturas Navais**, 2011. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011. Disponível em: <http://www.ufpa.br/ppgem/images/dissertacoes/2011/cabral%20trcio%20do%20santo%20s.pdf> acessado em 24/03/2013.
- CALLISTER, W.D. Jr; **Materials Science and Engineering: An introduction**. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- CHEEVER, D. L.; ROWLAND, E. W. **Vibrational Conditioning of Castings and Weldments An Exploratory Study – Estudo Exploratório do Condicionamento Vibracional de Materiais Fundidos e Soldados**. p 1, 1977.
- COFIÑO, R.C.; **Análise das Tensões Residuais em uma Junta Soldada em Condição Overmatch**. 2010 – Centro Unniversitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010. Disponível em: <http://fei.edu.br/~rodrimagn/TFC/Rachel.pdf>. Acessado em 02/04/2012
- CULLITY, B. D. **Elements of X-rays diffraction**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1956.

- DONATO, G. H. B. **Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos**. 2008. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DOU, D., **Finite Element Modeling of Stress Evolution in Quenching Process** - A Thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2005
- FUNDERBUCK, R. S.; **"Post Weld Heat Treatment"** Tratamento Térmico Pós-Soldagem, Welding Innovation Vol. XV, N° 2, 1998.
- GRANT, P.V., LORD J.D., WHITEHEAD, P.S.; **Measurement Good Practice Guide nº 53**, National Physical Laboratory, UK 53 p, 2002.
- HEBEL, T. E. **Heat Treating, Stress relieving**. p 1, 2, 3, 4 set. 1989.
- HEBEL III, A. **Sub-Harmonic Vibratory Stress Relief and Weld Conditioning** Palestra realizada em 17/02/98 às 8:00h, nas dependências da Bonal Technologies Inc., Sothfield Michigan U.S.A.
- JAMES, M. N.; **"Residual Stress Influences on Structural Reliability"**, Engineering Failure Analysis 2011,
- KANGA, H.T., LEEB, Y.-L. e SUN, V.J., **"Effects of residual stress and heat treatment on fatigue strength of weldments"**, Materials Science and Engineering A, v. 497, pp. 37-43, 2007.
- LAWRENCE, H. Van Vlack, Addison Wesley Publishing Co., **Elements of Materials Science**. p. 407, 1967
- LINNERT, G. E., **Welding Metallurgy** — American Welding Society, 1967
- MARTINS, C.A.P.; MORILLA, J.C., VILLANI, P.V. et al. **Alívio de Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Ressonantes**. 2012. Trabalho apresentado no XXXVIII Congresso Nacional de soldagem – ABS Ouro Preto, Minas Gerais.2012.
- MARTINS, C.A.P.; **Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Harmônicas – Histórico sobre a Origem desta Tecnologia, sua Introdução no Brasil, Descrição do Processo, Utilização e Aplicação**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós Graduação (Gestão de Negócios – Foco na Qualidade) Universidade Paulista – UNIP Santos, São Paulo.2004.

- META-LAX, Bonal Technologies, Inc. **Sub-Harmonic Vibratory Stress Relief and Weld Conditioning**. <http://www.meta-lax.com/> Acesso em 24/03/2013.
- MODENESI, P. J.; **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. 2008. – Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008. Disponível em: http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf. Acesso em 15 Mar. 2013.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. 2012. – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> acessado em 18/03/2013.
- Naval Material Industrial Resources Office **Ofício de Recursos Industriais de Materiais Navais, Vibratory Stress Relief – Alívio de Tensões por Vibrações**. p 4 1972.
- NUNES, R.M, **Análise de Tensões Residuais em Barras de Aço AISI 1048 Produzidas por Trefilação Combinada** Estudo do Coeficiente de Atrito para o Processo de Conformação a Frio de Alumínio com Ferramentas Tratadas por Nitretação a Plasma. 2006 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, disponível em <http://www.ufrgs.br/ldtm/pesquisa/empenamento/empenamento.htm>
- OKIMURA, T.; TANIGUCHI, C. (1982) **Engenharia de Soldagem e Aplicações**, LTC, capítulo 5.
- PAGEL-NITSCHKE, T. **Application of Diffraction Methods for the Residual Stress Determination in Welded Joints – Aplicação dos Métodos de Difração para Determinação de Tensões Residuais em Juntas Soldadas**. In: PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE. 2009. Praga
- PARADOWSKA, A.M., PRICE, J.W.H., KEREZSI, B., DAYAWANSA, P. e ZHAO, V.-L., 2010, "Stress relieving and its effect on life of welded tubular joints", Engineering Failure Analysis, v. 17, pp. 320 a 327.
- SHIMADZU. Instruction Manual: **Stress Measurement– Medição de Tensões** Catálogo do Equipamento SHIMADZU X-RAY DIFFRACTOMETER XRD-600. Kyoto 2011.
- RODRIGUES, L.D. **Medição de Tensões Residuais em Tubos visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados**, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/10462/10462_3.PDF e http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/10462/10462_1.PDF Acesso em 14/04/2013.
- RODRIGUES, T.V. **Tratamento Térmico Pós Soldagem para Alívio de Tensões Residuais em Chapas de Aço Soldadas: Modelagem e Análise**, Dissertação de

Mestrado CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [http:// www.dippg.cefet-rj.br/index.php?option=com_docman&task=doc...](http://www.dippg.cefet-rj.br/index.php?option=com_docman&task=doc...) Acesso em 30/08/2013.

- SKINNER, R. D. **An investigation Into the Theory Behind Sub-Ressonant Stress Relieve – Uma Pesquisa sobre a Teoria de Alívio de tensões por Vibrações Sub-Ressonantes.** p. 10, 1987.
- STIPKOVIC, M.A. **Análise da Integridade Superficial no Fresamento de Acabamento do Aço AISI 4140 Endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.
- TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel – Manual de Tensões Residuais e Deformações do Aço.** Ohio: ASM International, 2003.
- U. S. Department of Energy, Report no. DE-FG01-89 CE154123 RE: **Metalax Stress Relief – Alívio de Tensões Metalax.** p 1, 1990.
- WALKER, C.A; WADDEL A.J.; JOHNSTON D.J. **Vibratory Stress Relief – An Investigation of the Underlying Process – Alívio de Tensões por Vibrações – Uma Investigação do Processo Fundamental.** Journal of Process Mechanical Engineering – Periódico de Engenharia de Processo Mecânico, v. 209 p. 51 – 58 fevereiro de 1995.
- WITHERS, P.J; BHADESHIA, H. K. D. H. **Residual Stress Part 1- Measurement Techniques. Materials Science and Technology – Técnicas de Medição. Ciência dos Materiais e Tecnologia,** v. 17, n. 4, p. 355-365, abr. 2001. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/maney/mst/2001/00000017/00000004/art00001;jsessionid=6qi1fbiubcj8d.alice>. Acesso em: 06/mar/2013.
- WONG, T. E e JOHNSON, G. C. **Ultrasonic Evaluation of the Nonlinearity of Metals from a Design Perspective – Avaliação Ultrassônica de Não Linearidade de Metais a partir da Perspectiva.** p.15, 1987.

ANEXOS

ANEXO A – Autorização de Uso de Corpo de Prova AISI 4140

Autorização de uso de corpo de prova AISI 4140

Eu, Marco Antonio Stipkovic, venho por meio desta declaração, autorizar a utilização dos corpos de prova de material AISI 4140 endurecidos com dureza de 58HRC gerados para a minha Tese de Mestrado sobre a Análise da Integridade Superficial no Fresamento de acabamento do aço AISI 4140 endurecido, defendida em dezembro de 2012 no Centro Universitário da FEI, para o desenvolvimento do trabalho de mestrado na UNISANTA do aluno Carlos Augusto P. Martins vinculado a Engebasa Mecânica e Usinagem Ltda.

São Paulo 25 de julho de 2014.



Marco Antonio Stipkovic

ANEXO B – Relatório Químico, Físico e Metalográfico do Aço ABNT 4140 (STIPKOVIC, 2012)

 PROAQT - Empreendimentos Tecnológicos Ltda. Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010 Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3693-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br Em Prol da Alta Qualidade e Tecnologia	CREA-SP nº 1137560 CRQ-IV nº 16915-F		
	RELATÓRIO DE ENSAIO TESTING REPORT		
INTERESSADO: Prensas Schuler S/A. CUSTOMER: Av. Fagundes de Oliveira, 1515 – Piraporinha – Diadema – SP.		Folha: 2 / 3 SHEET	LB. Nº 07284/12

ENSAIOS QUÍMICO, FÍSICO E METALOGRAFICO

2.0 Composição Química:

Elementos em %												
Especificado	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V
SAE-4140	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,15 – 0,35	MAX. 0,030	MÁX. 0,040	0,80 – 1,00	-	0,15 – 0,25	-	-	-	-
Amostra	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V
7284	0,413	0,842	0,241	0,013	0,012	0,904	0,045	0,181	0,030	0,063	0,002	0,004
(S)	0,004	0,022	0,003	0,001	0,002	0,022	0,001	0,010	0,000	0,001	0,000	0,000

- Ensaio realizado numa temperatura ambiente, através do aparelho Espectrômetro de emissão Ótica Marca ARL Modelo 3460 com certificado de calibração No. 2011-0823, utilizando-se da instrução Proaqt Nº LB 10257 – Revisão 1 conforme norma ASTM E-415-2008 ou ASTM E 1086-1994(2005).
- A incerteza dos resultados é igual ao valor do desvio padrão (S) de cada amostra multiplicado pelo constante 1,359; isto é, (I = +/- 1,359.S). A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k=2,4 fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

3.0 Ensaio de Tração:

CP	Dimensões	Seção do CP	Limite Resistência Tração		Limite de escoamento		Alongamento		Redução de Área
	(mm)	(mm²)	{Carga Kgf}	{N/mm²}	{Carga Kgf}	{N/mm²}	{Lo mm}	{ % }	{ % }
1	Ø 12,48	122,33	9.978	800	6520	523	50	19	41

- Preparação do Corpo de Prova: Conforme ASTM A-370/12
- Método de Ensaio: Conforme ASTM A-370/12
- Ensaio realizado à temperatura ambiente de 24°C, na Máquina Universal de Ensaio Tinius Olsen MTR-006, certificado de calibração Nº DNTT-0548c/11, incerteza máxima expandida com fator de abrangência K=2.

4.0 Ensaio de Impacto:

Amostra	Localização do Entalhe	Resultado Obtido em JOULE			
		CP 01	CP 02	CP 03	Média
7284	Metal Base	9	18	9	12

- Temperatura de Ensaio: 23°C
- Dimensões: 10,0 x 10,0 x 55 mm
- Tipo de Entalhe: U-NOTCH
- Preparação do Corpo de Prova: Conforme Norma ASTM E 23/07ae1 – Tipo C.
- Método de Ensaio: Conforme Norma ASTM E 23/07ae1
- Ensaio realizado no laboratório a temperatura ambiente de 23°C, através da Máquina de Ensaio de Impacto na marca "Tinius Olsen" MQI 004, Certificado 112763-101 em 11/10/2011.
- Incerteza de medição = ± 0,2J.



PROAQT - Empreendimentos Tecnológicos Ltda.
 Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010
 Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br
 Em Proi da Alta Qualidade e Tecnologia

CREA-SP nº 1137560

CRQ-IV nº 16915-F

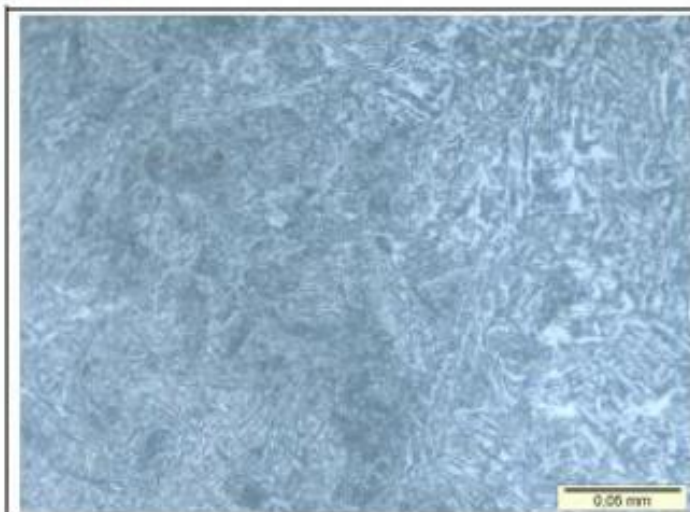


RELATÓRIO DE ENSAIO TESTING REPORT		Folha: SHEET	3 / 3	LB. Nº 07284/12
INTERESSADO: Prensas Schuler S/A. CUSTOMER: Av. Fagundes de Oliveira, 1515 - Piraporinha - Diadema - SP.				

ENSAIOS QUÍMICO, FÍSICO E METALOGRAFICO

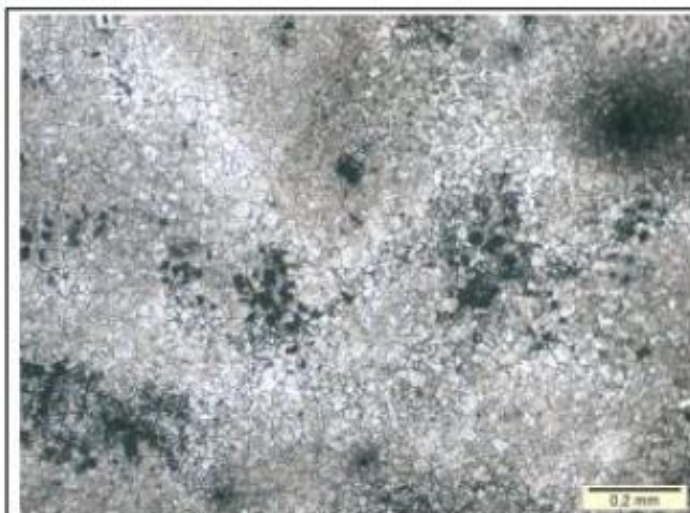
5.0 Micrografia:

5.1 Micro-Estrutura.



Microestrutura: Consiste de ferrita acicular, bainita e martensita revenida.
 Ataque: Nital 2%
 Aumento: 500x
 Preparação do CP: Conforme ASTM E-3/2011
 Seção: Longitudinal
 Ensaios de acordo com ASTM E-7/09
 Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51, certificado 100607003 de 08/07/2011.

5.2 Tamanho de Grão.



Microestrutura: Matriz consiste de tamanho de grão austenítico nos. 7 a 8.
 Ataque: HCl + H₂O
 Aumento: 100x
 Preparação do CP: Conforme ASTM E-3/2011
 Seção: Longitudinal
 Ensaios de acordo com ASTM E-112/2010
 Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51, certificado 100607003 de 08/07/2011.

6.0 Observações:

6.1 Os resultados obtidos e apresentados no presente relatório tem significação restrita e se aplicam somente às amostras ensaiadas. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização da Proaqt.

Ensaio realizado em 29 de Junho de 2012

&

Emissão de relatório em 02 de Julho de 2012

Eng. Luiz S. Nitti Mikami
 CREA nº 104.252

Serjão Calista Gomes
 Técnico Metalográfico

APÊNDICES

APÊNDICE A– Dados Operacionais dos Testes de Furo Cego

C.P. 1 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensione Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 80.00 80.00 80.00 80.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	-0.870	-0.348	-0.721
0.028	-0.597	0.298	-0.373
0.043	2.039	3.283	2.114
0.057	5.695	6.044	5.248
0.071	7.760	7.909	7.013
0.085	10.620	10.048	9.600
0.100	13.256	12.062	11.689
0.114	15.668	13.828	14.002
0.128	17.857	15.544	15.867
0.142	19.275	17.036	17.260
0.157	21.538	18.727	19.051
0.171	22.558	19.399	20.145
0.185	24.348	20.593	21.563
0.200	25.592	21.463	22.558
0.214	26.885	21.985	23.950
0.228	26.412	21.811	23.726
0.242	25.865	21.588	23.503
0.257	26.835	22.806	24.075
0.271	27.308	22.284	24.522
0.285	27.755	22.806	24.920
0.300	27.407	23.552	25.517
0.314	28.999	22.980	26.512
0.328	28.029	22.110	25.940
0.343	28.029	22.483	26.089
0.357	27.482	23.005	25.791
0.371	28.377	22.906	25.840
0.385	28.999	23.826	26.686
0.400	28.676	22.906	26.711

0.414	28.825	23.304	26.860
0.428	28.502	22.980	26.537
0.443	28.253	23.080	26.537
0.457	28.278	22.881	26.437
0.471	28.352	23.005	26.512
0.485	29.248	23.080	27.482
0.500	29.074	22.931	27.084

C.P. 2 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensione Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.40

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 70.00 70.00 70.00 70.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	1.791	-0.672	0.746
0.028	3.382	-0.995	0.920
0.043	6.044	-0.099	3.780
0.057	8.605	1.119	5.695
0.071	11.366	2.189	7.461
0.085	14.002	4.029	9.426
0.100	17.136	6.242	12.535
0.114	20.344	8.605	15.519
0.128	23.925	11.515	19.200
0.142	27.930	15.096	23.105
0.157	33.699	20.593	28.327
0.171	39.022	27.084	33.575
0.185	44.120	32.705	38.475
0.200	48.821	38.773	42.628
0.214	54.516	45.040	47.353
0.228	60.162	50.015	51.681
0.242	65.658	57.401	56.257
0.257	70.334	64.439	59.590
0.271	75.308	70.334	63.793
0.285	80.307	77.397	68.245
0.300	85.753	83.590	72.721
0.314	90.752	89.981	77.173
0.328	95.503	95.702	80.829
0.343	100.402	101.869	85.306
0.357	102.715	102.665	85.629

0.371	104.332	103.710	87.818
0.385	107.291	104.978	89.509
0.400	110.176	150.193	91.772
0.414	113.111	110.027	94.533
0.428	115.424	98.636	95.304
0.443	115.449	85.355	95.602
0.457	116.593	73.567	96.448

C.P. 3 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensioe Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 80.00 80.00 80.00 80.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	0.622	2.885	3.556
0.028	0.870	3.358	4.551
0.042	1.219	3.581	5.248
0.057	1.542	3.656	5.496
0.071	1.691	4.029	5.546
0.085	1.343	3.855	5.546
0.100	3.507	5.546	7.287
0.114	6.491	7.859	9.849
0.128	7.983	9.003	11.241
0.142	9.973	10.694	13.032
0.157	11.689	12.112	14.674
0.171	13.082	13.405	16.240
0.185	13.952	14.350	16.937
0.200	14.052	14.599	16.987
0.214	13.679	14.276	17.011
0.228	13.579	14.251	16.837
0.242	13.505	14.077	16.763
0.257	13.579	14.325	16.887
0.271	13.728	14.524	17.185
0.285	14.126	14.574	17.260
0.300	13.927	14.698	17.459
0.314	13.256	14.325	16.613
0.328	13.256	14.499	17.011
0.343	12.833	14.325	16.763
0.357	12.883	14.549	16.887

0.371	12.560	14.524	16.962
0.385	12.460	15.072	17.310
0.400	12.883	14.823	17.683
0.414	12.361	14.873	17.409
0.428	12.460	15.345	17.633
0.443	12.485	15.270	17.559
0.457	12.734	15.892	17.583
0.471	12.858	15.917	17.782
0.485	12.584	15.892	17.559
0.500	12.311	15.693	17.360

C.P. 4 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensioe Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 80.00 80.00 80.00 80.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	1.343	4.029	0.497
0.028	3.780	7.983	1.890
0.042	6.566	11.316	3.830
0.057	9.525	15.171	6.093
0.071	13.331	19.847	8.754
0.085	16.987	23.975	11.615
0.100	20.742	27.855	13.878
0.114	25.094	33.127	16.837
0.128	29.944	38.848	20.841
0.142	34.545	45.289	24.572
0.157	39.718	51.706	28.999
0.171	45.463	58.993	34.570
0.185	48.423	63.096	37.654
0.200	49.069	64.166	39.072
0.214	49.766	65.384	40.663
0.228	49.393	65.360	40.837
0.242	49.542	65.758	41.061
0.257	49.517	66.131	42.056
0.271	49.517	66.230	42.553
0.285	49.144	66.205	41.708
0.300	49.268	66.504	41.907
0.314	50.139	66.827	44.767
0.328	47.925	64.962	41.459

0.343	50.313	65.509	42.205
0.357	49.865	65.185	41.136
0.371	49.840	65.036	41.161
0.385	50.114	64.514	40.489
0.400	50.935	64.738	40.141
0.414	50.537	70.856	49.293
0.428	50.960	65.658	39.867
0.443	51.482	66.504	42.031
0.457	51.954	66.578	41.061
0.471	55.287	69.165	43.523
0.485	55.088	69.936	55.138
0.500	54.317	69.065	128.108

C.P. 5 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensioe Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 80.00 80.00 80.00 80.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	-0.323	-0.572	-2.015
0.028	-0.597	-0.597	-2.587
0.043	-0.572	-0.622	-2.810
0.057	-0.174	-0.547	-2.835
0.071	0.547	-0.174	-2.412
0.085	1.020	0.174	-2.189
0.100	1.890	0.821	-1.592
0.114	3.034	1.492	-0.920
0.128	4.178	2.636	0.174
0.142	4.974	2.711	0.547
0.157	4.427	2.960	1.144
0.171	5.123	4.054	2.611
0.185	4.303	3.656	2.313
0.200	4.402	3.954	2.015
0.214	4.327	4.178	1.940
0.228	4.352	4.203	2.039
0.242	3.855	3.681	1.741
0.257	3.880	3.606	1.816
0.271	3.930	3.905	1.741
0.285	3.706	3.706	1.666
0.300	3.606	3.631	1.293
0.314	3.556	3.457	1.268
0.328	3.930	3.681	1.393

0.343	3.631	3.333	1.020
0.357	3.706	3.507	1.219
0.371	3.830	3.855	1.641
0.385	3.930	3.681	1.542
0.400	3.606	3.581	1.442
0.414	3.507	3.706	1.641
0.428	3.358	3.457	1.442
0.443	3.233	3.308	1.368
0.457	3.109	3.308	1.343
0.471	3.009	3.233	1.268
0.485	3.084	3.382	1.393
0.500	3.333	3.631	1.592

C.P. 6 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensioe Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 80.00 80.00 80.00 80.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	-1.268	-0.497	-0.870
0.028	5.919	10.520	12.286
0.043	8.282	13.007	15.793
0.057	10.346	15.569	19.026
0.071	12.958	18.553	22.682
0.085	15.693	21.637	26.437
0.100	19.548	25.343	31.013
0.114	22.707	28.402	34.943
0.128	25.418	31.063	38.251
0.142	28.128	33.625	41.459
0.157	28.477	33.948	43.225
0.171	28.924	34.744	43.200
0.185	29.322	34.272	43.101
0.200	29.795	34.247	43.374
0.214	29.944	33.774	42.280
0.228	29.695	33.053	43.051
0.242	30.292	33.575	44.344
0.257	29.944	34.868	45.040
0.271	29.248	34.669	44.841
0.285	28.949	34.719	45.065
0.300	28.551	33.401	45.165
0.314	28.551	33.227	45.413

0.328	28.327	32.754	45.488
0.343	28.253 32.605 45.513		
0.357	28.178	32.904	45.488
0.371	28.054	32.431	46.135
0.385	28.054	32.356	45.637
0.400	28.253	32.431	45.438
0.414	28.079	32.481	44.717
0.428	27.780	32.555	44.468
0.443	28.974	32.779	44.095
0.457	28.949	32.555	43.772
0.471	29.223	32.730	44.195
0.485	29.148	33.376	43.299
0.500	29.845	33.898	44.667

C.P. 7 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensione Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.72

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 89.00 89.00 83.00 83.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	1.094	-0.075	-0.846
0.028	0.870	-1.890	-1.741
0.043	0.099	-6.441	-4.203
0.057	-6.392	-16.837	-14.375
0.071	-11.913	-23.677	-21.811
0.085	-18.752	-31.934	-30.765
0.100	-26.263	-40.937	-41.310
0.114	-32.730	-48.870	-49.666
0.128	-39.842	-59.465	-61.530
0.142	-48.348	-66.877	-69.712
0.157	-55.909	-74.562	-78.715
0.171	-186.056	-47.328	-88.962
0.185	-2707.100	-93.264	-98.263
0.200	-78.367	-99.482	-105.675
0.214	-85.032	-105.898	-114.802
0.228	-92.120	-112.937	-123.830
0.242	-97.965	-119.602	-130.893
0.257	-2226.653	-125.795	-137.310
0.271	-3107.341	-131.863	-145.069
0.285	-1075.424	-160.564	-152.133
0.300	-120.870	-143.552	-161.981
0.314	-2311.163	-152.381	-139.623

0.328	-1782.541	-157.156	-175.884
0.343	-4373.223	-142.259	-180.460
0.357	-652.601	-160.788	-186.106
0.371	-3813.090	-162.727	-166.732
0.385	-252.535	-175.411	-196.004
0.400	-179.241	-178.421	-198.019
0.414	-1453.778	-175.237	-205.778
0.428	-1856.879	-504.149	-209.956
0.443	-Inf	-144.721	-213.985
0.457	-233.335	-192.149	-218.711
0.471	-1879.287	-183.768	-221.248
0.485	-278.077	-181.554	-224.928
0.500	-Inf	-192.647	-228.012

C.P. 8 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensione Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 80.00 80.00 82.00 78.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	3.954	0.497	-0.124
0.028	5.248	0.274	-2.736
0.042	3.706	-1.890	-6.516
0.057	0.174	-6.019	-11.590
0.071	-3.755	-10.570	-16.415
0.085	-8.033	-15.320	-21.140
0.100	-12.709	-20.593	-25.965
0.114	-16.887	-25.169	-30.491
0.128	-20.593	-29.123	-34.197
0.142	-24.920	-33.699	-38.276
0.157	-28.924	-38.201	-42.155
0.171	-32.456	-42.379	-45.762
0.185	-36.012	-46.781	-49.318
0.200	-40.365	-51.731	-53.571
0.214	-44.394	-55.934	-56.680
0.228	-47.876	-60.659	-59.689
0.242	-51.134	-64.141	-62.077
0.257	-52.750	-66.454	-63.395
0.271	-54.864	-69.115	-65.185
0.285	-57.302	-71.950	-67.125
0.300	-58.595	-73.393	-67.747
0.314	-59.217	-74.487	-68.095

0.328	-60.062	-75.930	-68.767
0.343	-60.609	-76.502	-68.792
0.357	-60.684	-77.223	-69.065
0.371	-60.759	-78.292	-69.811
0.385	-61.604	-79.138	-70.806
0.400	-61.331	-79.884	-71.254
0.414	-62.375	-80.928	-71.453
0.428	-62.126	-81.227	-71.726
0.443	-62.823	-82.147	-71.602
0.457	-63.196	-82.272	-71.602
0.471	-63.768	-83.217	-71.876
0.485	-64.613	-83.988	-71.776
0.500	-64.763	-84.560	-71.552

C.P. 9 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensioe Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.70

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 83.00 85.00 84.00 87.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	1.293	2.984	0.547
0.028	2.164	3.830	1.119
0.042	3.407	4.899	1.840
0.057	4.949	6.864	3.855
0.071	4.899	7.511	3.532
0.085	5.770	10.073	4.949
0.100	6.466	12.659	6.317
0.114	6.964	14.574	7.188
0.128	8.108	18.330	9.799
0.142	8.978	21.737	11.689
0.157	9.898	25.393	13.405
0.171	11.042	28.850	16.738
0.185	12.012	32.182	19.424
0.200	13.256	35.913	22.657
0.214	15.121	40.688	26.686
0.228	16.091	44.369	29.720
0.242	17.608	47.179	33.227
0.257	18.951	52.452	38.997
0.271	21.687	55.411	41.310
0.285	23.254	60.112	46.284
0.300	24.099	63.022	48.995
0.314	26.313	66.877	52.651

0.328	28.651	69.787	56.431
0.343	29.944	72.796	58.147
0.357	31.088	72.671	56.978
0.371	30.292	72.373	55.685
0.385	29.894	72.696	55.685
0.400	29.944	72.348	56.257
0.414	29.894	73.020	56.879
0.428	30.914	74.015	57.277
0.443	32.580	76.825	56.754
0.457	33.998	77.994	56.083
0.471	35.018	78.044	56.307
0.485	35.639	79.511	55.212
0.500	34.744	79.909	52.924

C.P. 10 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensione Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.41

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 69.00 71.00 70.00 71.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	0.398	1.865	-0.423
0.028	1.268	3.507	-0.622
0.043	1.617	4.676	-1.293
0.057	2.213	6.093	-1.318
0.071	3.283	7.486	-1.119
0.085	4.402	9.302	-0.597
0.100	6.292	11.863	0.796
0.114	7.138	13.480	1.492
0.128	8.730	15.469	2.984
0.142	10.122	17.185	4.626
0.157	11.217	18.877	5.919
0.171	13.032	21.090	7.635
0.185	14.674	22.906	9.078
0.200	16.390	24.870	10.744
0.214	18.056	27.009	12.062
0.228	19.971	28.601	14.077
0.242	22.035	30.914	16.962
0.257	23.975	33.127	19.175
0.271	26.089	35.167	21.016
0.285	28.029	37.629	23.105
0.300	29.322	39.445	24.970
0.314	31.362	41.559	27.556

0.328	33.451	44.170	30.143
0.343	35.764	46.707	32.456
0.357	38.475	49.045	35.117
0.371	41.459	52.725	38.649
0.385	44.692	56.033	43.399
0.400	45.339	56.605	43.847
0.414	46.408	58.719	46.309
0.428	49.343	62.151	50.238
0.443	50.164	63.320	51.109
0.457	49.940	63.320	51.009
0.471	50.064	63.569	51.258
0.485	49.965	63.718	51.059
0.500	49.965	63.768	50.984

C.P. 11 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensione Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.74

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

Eccentricity Data: 94.00 79.00 86.00 89.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	0.473	0.597	0.572
0.028	0.945	0.746	1.045
0.042	2.213	1.268	2.213
0.057	2.686	1.268	2.910
0.071	3.556	0.945	3.656
0.085	2.462	0.373	2.164
0.100	3.009	-0.348	2.238
0.114	2.338	-1.094	1.418
0.128	0.373	-2.537	-0.870
0.142	-0.149	-3.507	-1.691
0.157	-2.313	-5.571	-4.924
0.171	-3.283	-6.342	-5.397
0.185	-4.377	-6.715	-7.088
0.200	-5.422	-7.834	-7.859
0.214	-7.312	-8.754	-9.948
0.228	-7.959	-9.227	-11.291
0.242	-8.779	-10.595	-12.684
0.257	-9.277	-10.048	-12.659
0.271	-10.694	-10.769	-14.475
0.285	-11.565	-11.938	-15.644
0.300	-12.759	-12.709	-16.837
0.314	-12.933	-12.858	-16.937

0.328	-13.704	-12.361	-18.504
0.343	-13.803	-13.331	-19.101
0.357	-14.574	-13.455	-20.021
0.371	-15.644	-14.574	-21.140
0.385	-16.191	-14.375	-22.184
0.400	-16.265	-14.475	-22.781
0.414	-17.608	-15.892	-24.149
0.428	-18.006	-15.867	-24.547
0.443	-19.150	-16.788	-25.890
0.457	-19.324	-17.011	-26.636
0.471	-20.269	-17.608	-28.427
0.485	-20.767	-17.832	-28.775
0.500	-21.040	-18.553	-29.820

C.P. 12 – Dados Operacionais

Test Description:

Place:

Operator:

Date:

Material: Fe 430 B

Heat Treatment: Distensioe Loc.

Poisson Coefficient: 0.300

Young Module: 206000.000

Number of Step: 35

Total Depth: 0.50

Hole Diameter: 1.60

Endmill Diameter: 1.80

Strain Gauge: 1-RY61-1.5/120R

Strain Gauge Diameter: 5.10

Strain Gauge Type: A

Gage Factor 1: 1.930

Gage Factor 2: 1.930

Gage Factor 3: 1.930

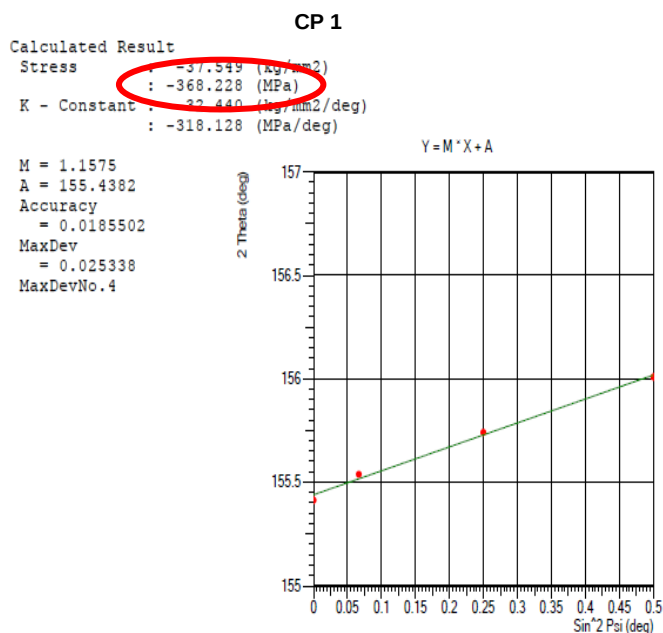
Eccentricity Data: 80.00 80.00 80.00 80.00

Depth [mm]	Strain (e1) [1E10-6]	Strain (e2) [1E10-6]	Strain (e3) [1E10-6]
0.014	3.233	3.407	-1.094
0.028	3.134	3.954	-1.119
0.043	2.711	4.029	-1.119
0.057	2.114	3.731	-1.144
0.071	2.064	3.780	-1.194
0.085	1.244	3.556	-1.641
0.100	1.069	4.104	-1.368
0.114	0.249	3.830	-1.492
0.128	-0.224	3.930	-1.592
0.142	-0.647	4.352	-1.318
0.157	-1.542	3.954	-1.492
0.171	-2.015	3.905	-1.641
0.185	-2.189	4.203	-1.666
0.200	-2.686	4.228	-1.492
0.214	-3.507	3.706	-1.990
0.228	-3.830	3.855	-1.915
0.242	-4.004	4.153	-2.213
0.257	-5.098	3.606	-2.611
0.271	-5.049	4.054	-2.686
0.285	-5.919	4.178	-2.885
0.300	-6.093	4.352	-2.661
0.314	-6.168	4.352	-2.761

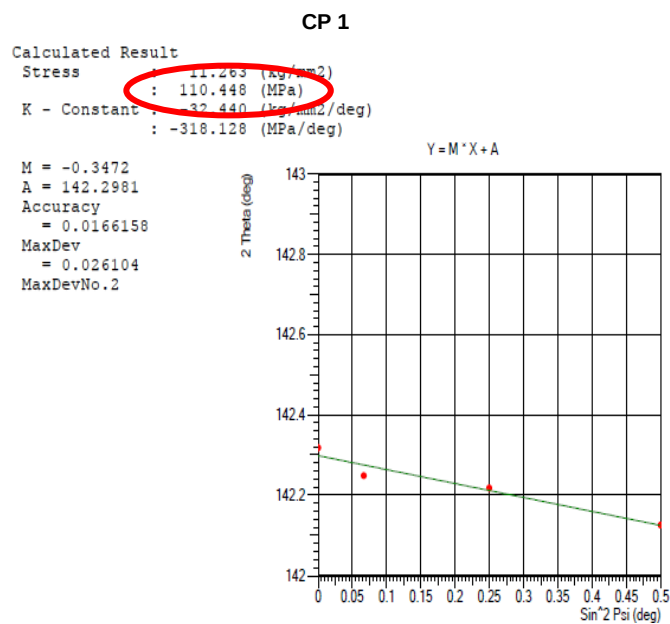
0.328	-6.640	4.676	-2.562
0.343	-7.337	4.303	-3.009
0.357	-7.511	4.402	-2.736
0.371	-8.207	4.054	-2.984
0.385	-8.531	4.054	-2.810
0.400	-8.829	4.253	-2.711
0.414	-9.426	3.631	-2.835
0.428	-9.451	4.228	-2.562
0.443	-10.023	3.805	-2.562
0.457	-10.446	3.954	-2.388
0.471	-10.669	4.228	-2.388
0.485	-10.868	3.830	-2.388
0.500	-11.590	3.805	-2.587

APÊNDICE B – Gráficos dos Testes de Difração de Raios-X

CP 1 - Usinado – Aliviado por Vibrações



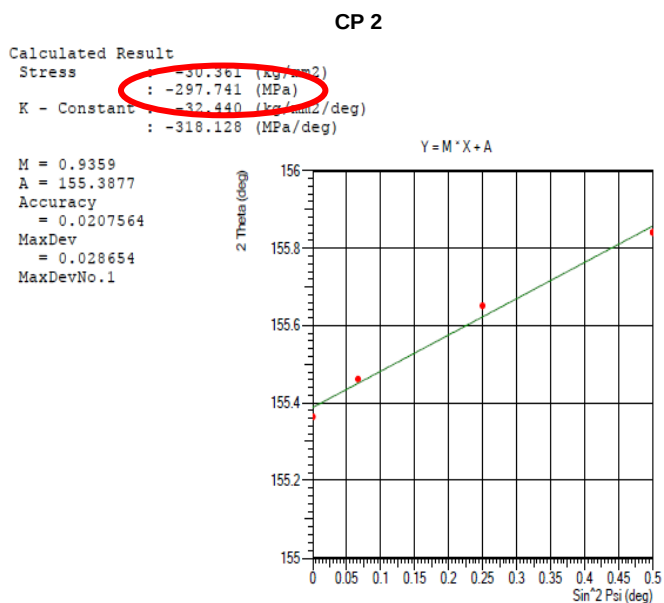
b) Antes do Alívio



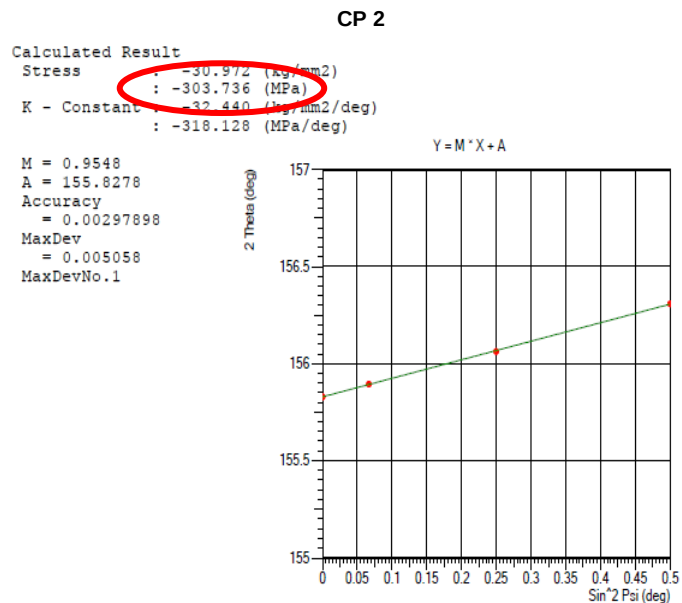
a) Após o Alívio

Tensões residuais no CP 1 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP2 – Usinado – Aliviado Termicamente



a) Antes do Alívio



b) Após o Alívio

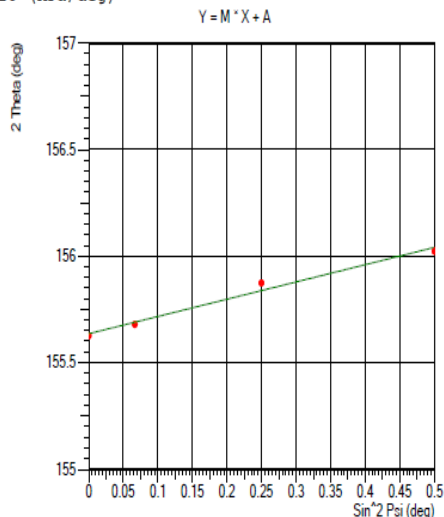
Tensões residuais no CP 2 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 3 – Usinado– Aliviado por Vibrações

CP 3

Calculated Result
 Stress : -26.281 (kg/mm²)
 : -257.732 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 0.8102
 A = 155.6345
 Accuracy
 = 0.0216119
 MaxDev
 = 0.037083
 MaxDevNo.1

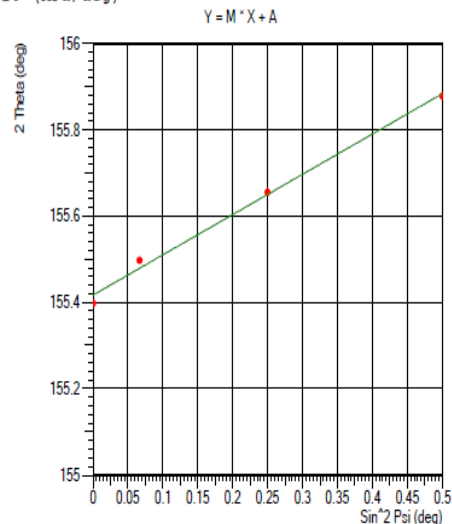


a) Antes do Alívio

CP 3

Calculated Result
 Stress : -30.258 (kg/mm²)
 : -296.727 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 0.9327
 A = 155.4161
 Accuracy
 = 0.0136766
 MaxDev
 = 0.018693
 MaxDevNo.4



b) Após o Alívio

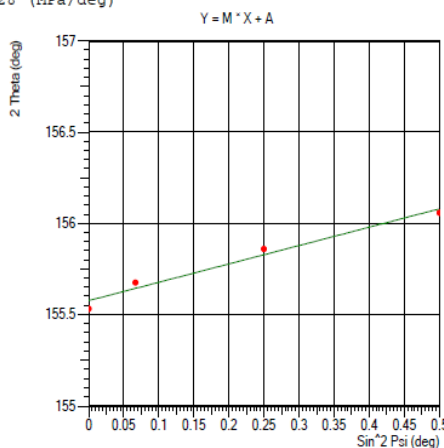
Tensões residuais no CP 3 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 4 – Usinado – Aliviado Termicamente

CP 4

Calculated Result
 Stress : -32.627 (kg/mm²)
 : -319.960 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 1.0058
 A = 155.5755
 Accuracy
 = 0.0334781
 MaxDev
 = 0.044352
 MaxDevNo.4

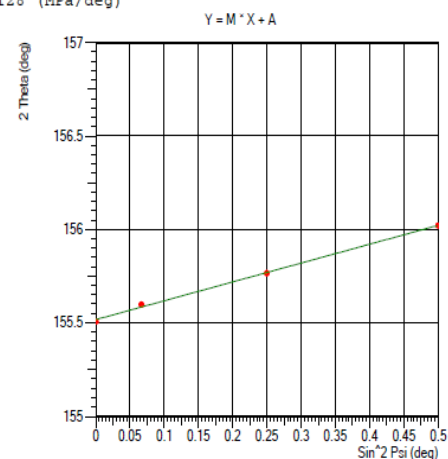


a) Antes do Alívio

CP 4

Calculated Result
 Stress : -32.720 (kg/mm²)
 : -320.872 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 1.0086
 A = 155.5161
 Accuracy
 = 0.00845849
 MaxDev
 = 0.013369
 MaxDevNo.4



b) Após o Alívio

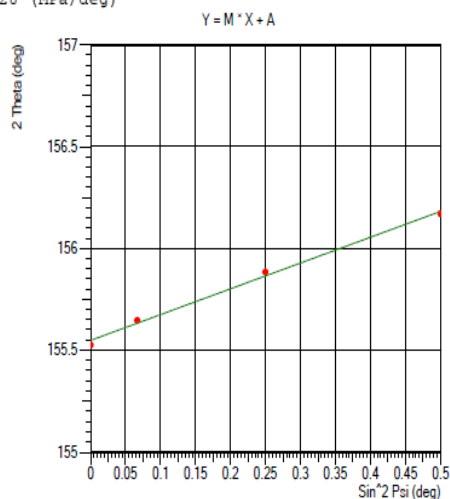
Figura 49 – Tensões residuais no CP 4 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 5 – Usinado– Aliviado por Vibrações

CP 5

Calculated Result
 Stress : -41.078 (kg/mm²)
 : -402.838 (MPa)
 K - Constant : -22.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 1.2663
 A = 155.5471
 Accuracy
 = 0.0166461
 MaxDev
 = 0.021042
 MaxDevNo.4

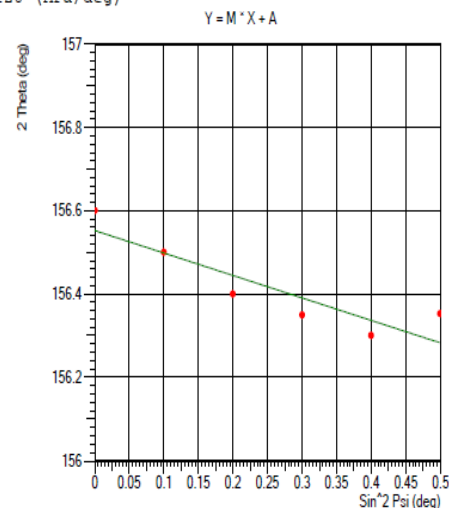


a) Antes do Alívio

CP 5

Calculated Result
 Stress : 17.481 (kg/mm²)
 : 171.426 (MPa)
 K - Constant : -22.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = -0.5389
 A = 156.5518
 Accuracy
 = 0.0450044
 MaxDev
 = 0.070381
 MaxDevNo.6



b) Após o Alívio

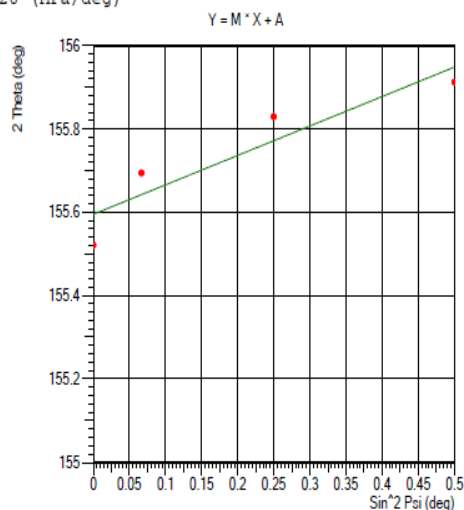
Tensões residuais no CP 5 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 6 – Usinado– Aliviado Termicamente

CP 6

Calculated Result
 Stress : -22.898 (kg/mm²)
 : -224.551 (MPa)
 K - Constant : -22.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 0.7059
 A = 155.5943
 Accuracy
 = 0.0565332
 MaxDev
 = 0.073907
 MaxDevNo.2

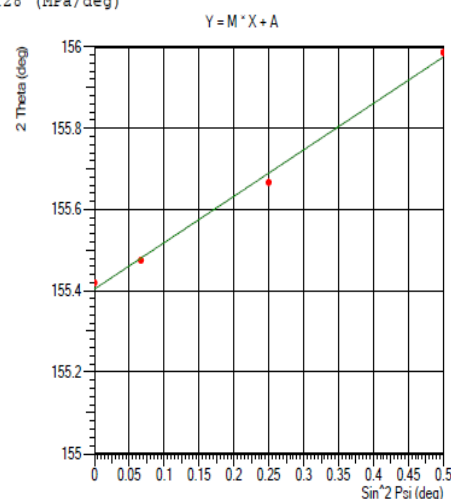


a) Antes do Alívio

CP 6

Calculated Result
 Stress : -36.997 (kg/mm²)
 : -362.814 (MPa)
 K - Constant : -22.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 1.1405
 A = 155.4034
 Accuracy
 = 0.0151445
 MaxDev
 = 0.022230
 MaxDevNo.3



b) Após o Alívio

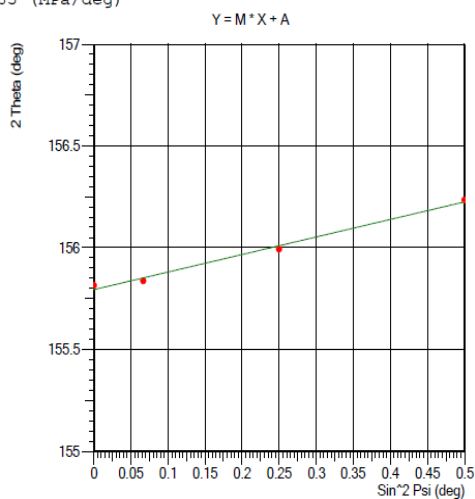
Tensões residuais no CP 6 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 7 – Temperado – Aliviado por Vibrações.

CP 7

Calculated Result
 Stress : $-8.098 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
 : -79.416 (MPa)
 K - Constant : $8.400 \text{ (kg/mm}^2\text{/deg)}$
 : $-92.183 \text{ (MPa/deg)}$

M = 0.8615
 A = 155.7927
 Accuracy
 = 0.0156383
 MaxDev
 = 0.020585
 MaxDevNo.4

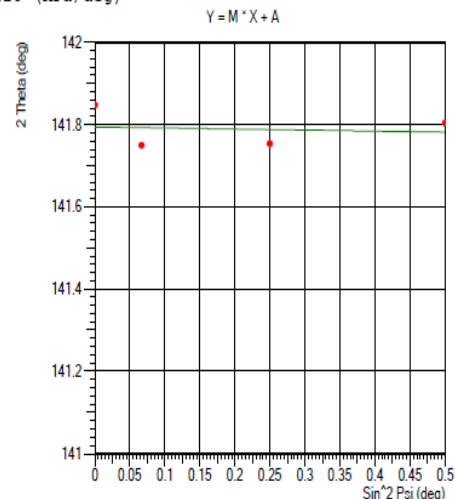


a) Antes do Alívio

CP 7

Calculated Result
 Stress : $0.801 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
 : 7.853 (MPa)
 K - Constant : $-38.440 \text{ (kg/mm}^2\text{/deg)}$
 : $-318.128 \text{ (MPa/deg)}$

M = -0.0247
 A = 141.7931
 Accuracy
 = 0.0397328
 MaxDev
 = 0.053558
 MaxDevNo.4



b) Após o Alívio

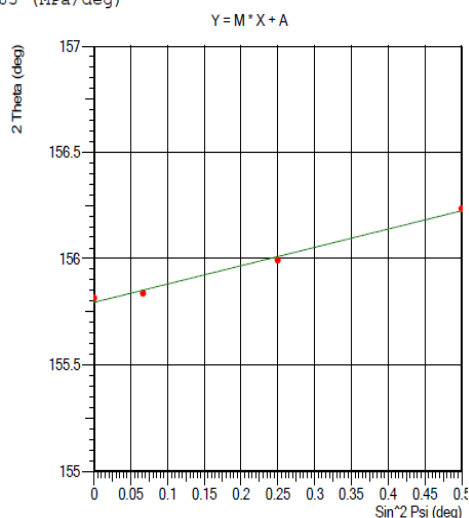
Tensões residuais no CP 7 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 8 – Temperado– Aliviado Termicamente

CP 8

Calculated Result
 Stress : $-8.098 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
 : -79.416 (MPa)
 K - Constant : $8.400 \text{ (kg/mm}^2\text{/deg)}$
 : $-92.183 \text{ (MPa/deg)}$

M = 0.8615
 A = 155.7927
 Accuracy
 = 0.0156383
 MaxDev
 = 0.020585
 MaxDevNo.4

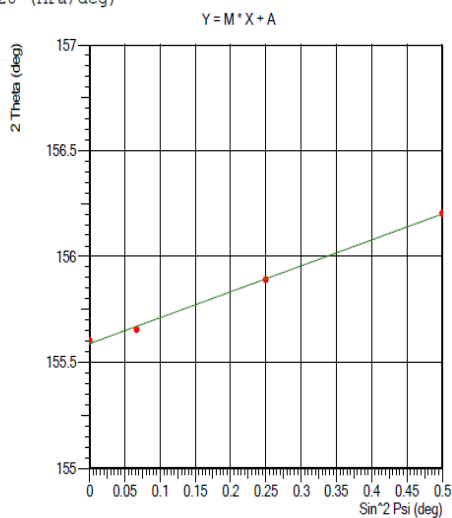


a) Antes do Alívio

CP 8

Calculated Result
 Stress : $-39.708 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
 : -389.398 (MPa)
 K - Constant : $-38.440 \text{ (kg/mm}^2\text{/deg)}$
 : $-318.128 \text{ (MPa/deg)}$

M = 1.2240
 A = 155.5870
 Accuracy
 = 0.0100852
 MaxDev
 = 0.014090
 MaxDevNo.1



b) Após o Alívio

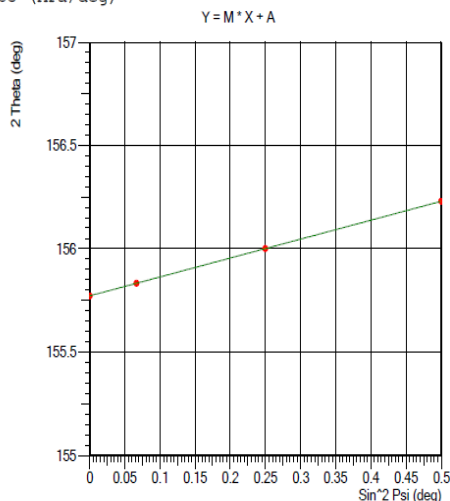
Tensões residuais no CP 8 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 9 – Temperado– Aliviado por vibrações

CP 9

Calculated Result
 Stress : -8.604 (kg/mm²)
 : -84.374 (MPa)
 K - Constant : 8.400 (kg/mm²/deg)
 : -92.183 (MPa/deg)

M = 0.9153
 A = 155.7706
 Accuracy
 = 0.000154885
 MaxDev
 = 0.000208
 MaxDevNo.4

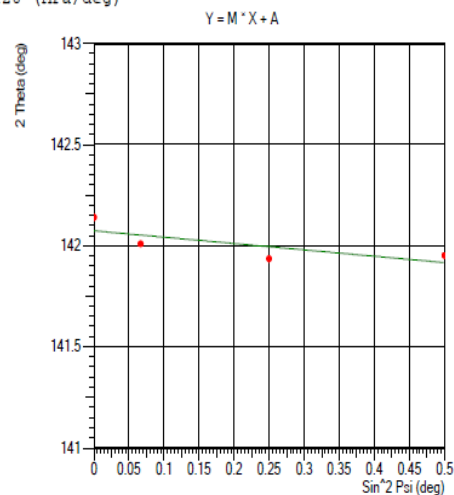


a) Antes do Alívio

CP 9

Calculated Result
 Stress : 10.198 (kg/mm²)
 : 100.005 (MPa)
 K - Constant : 33.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = -0.3144
 A = 142.0723
 Accuracy
 = 0.0524108
 MaxDev
 = 0.066619
 MaxDevNo.1



b) Após o Alívio

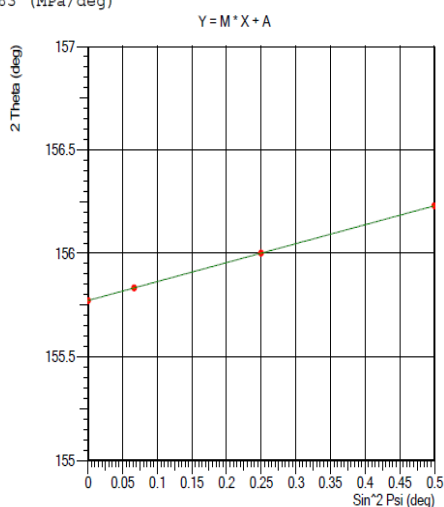
Tensões residuais no CP 9 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 10 – Temperado– Aliviado Termicamente

CP 10

Calculated Result
 Stress : -8.604 (kg/mm²)
 : -84.374 (MPa)
 K - Constant : 8.400 (kg/mm²/deg)
 : -92.183 (MPa/deg)

M = 0.9153
 A = 155.7706
 Accuracy
 = 0.000154885
 MaxDev
 = 0.000208
 MaxDevNo.4

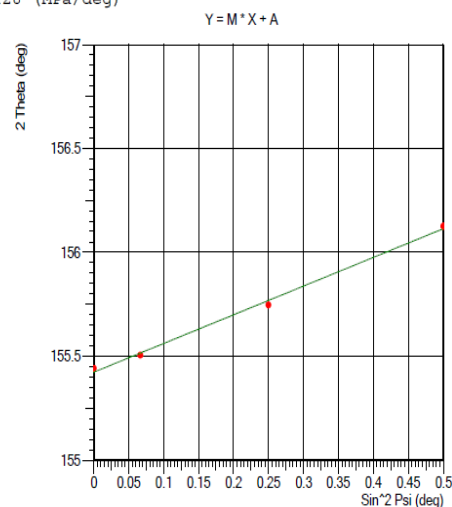


a) Antes do Alívio

CP 10

Calculated Result
 Stress : 44.769 (kg/mm²)
 : -439.039 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 1.3801
 A = 155.4220
 Accuracy
 = 0.016259
 MaxDev
 = 0.021318
 MaxDevNo.2



b) Após o Alívio

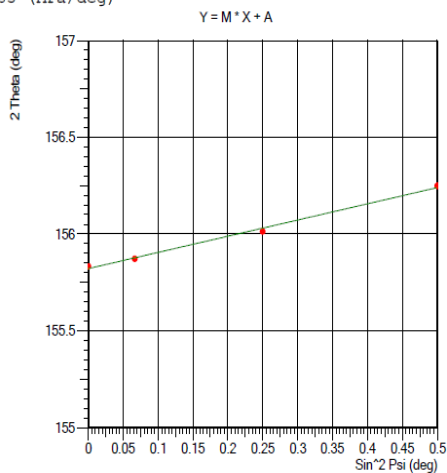
Tensões residuais no CP 10 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 11 – Temperado– Aliviado por vibrações

CP 11

Calculated Result
 Stress : -7.862 (kg/mm²)
 : -77.102 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -92.183 (MPa/deg)

M = 0.8364
 A = 155.8199
 Accuracy
 = 0.0115677
 MaxDev
 = 0.016018
 MaxDevNo.2

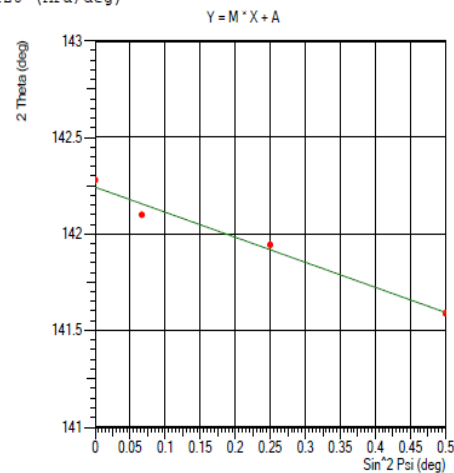


a) Antes do Alívio

CP 11

Calculated Result
 Stress : 42.087 (kg/mm²)
 : 412.733 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = -1.2974
 A = 142.2414
 Accuracy
 = 0.0360988
 MaxDev
 = 0.056703
 MaxDevNo.2



b) Após o Alívio

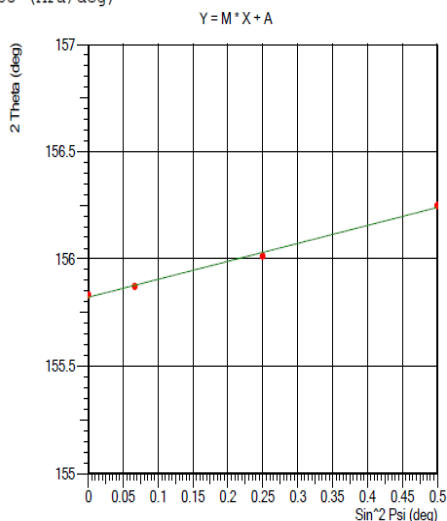
Tensões residuais no CP 11 antes e após o alívio por difração de Raios-X

CP 12 – Temperado– Aliviado Termicamente

CP 12

Calculated Result
 Stress : -7.862 (kg/mm²)
 : -77.102 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -92.183 (MPa/deg)

M = 0.8364
 A = 155.8199
 Accuracy
 = 0.0115677
 MaxDev
 = 0.016018
 MaxDevNo.2

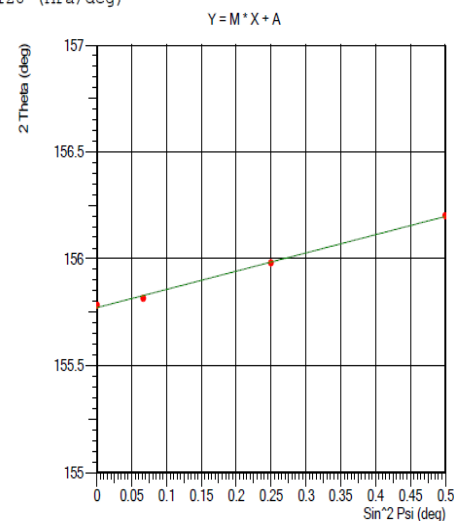


a) Antes do Alívio

CP 12

Calculated Result
 Stress : -271.680 (kg/mm²)
 : -271.447 (MPa)
 K - Constant : 32.440 (kg/mm²/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 0.8533
 A = 155.7698
 Accuracy
 = 0.00995486
 MaxDev
 = 0.013627
 MaxDevNo.4



b) Após o Alívio

Tensões residuais no CP 12 antes e após o alívio por difração de Raios-X

APÊNDICE C – Gráficos dos Alívios de Tensões por Vibrações Sub-Ressonantes

Meta-Lax® by BONAL TECHNOLOGIES, INC. - [2A-13.m]]		Meta-Lax® is a Patented process	
META-LAX® Provider		Customer	
TRAMONTINA		Tel#:	
Part(s)		Settings	
Part: 1 thru 1 WO#: Serial#: Part Name: CORPO DE PROVA ¹ - 3 Material/Type: 4140 Size: 10 x 7 x 2 cm Weight: 1 lbs Cold Worked: Blank		Location: 1 of 1 Force Inducer: 2A Material Class: B Batch Weight: 1001 kg Mode: Manual Stress Relief Dwell Timer: 20 min Monitor Timer: 10 min Eccentric: %	
META-LAX® Stress Relief Certification			
Digital Gain: 38			
Scan Results			
Total Scans Completed: 3	First Scan	Final Scan	Scan Results
Harmonic Frequency:	72.2 Hz	73.2 Hz	Harmonic Frequency Difference: 1.0 Hz
Peak Amplitude:	99.9	100.1	Peak Amplitude Difference: 0.2
SUB-Harmonic Frequency:	67.1 Hz	67.6 Hz	Total Dwell Time: 30:00
Date & Time: 16/05/2014 09:09:04	Final Dwell %	35	Total Monitor Time: 0:00
META-LAX® Provider		Job Notes	
TRAMONTINA ELETRIK S/A RODOVIA RSC 470, KM 230 CARLOS BARBOSA, RS 95185-000 BRASIL Tel#: (54) 3461-8200 Fax#:			
Opr: Juliano Supptitz			
Meta-Lax® is a registered trademark of Bonal Technologies, Inc. Form and Software Copyright © 2001-2005, by Bonal Technologies, Inc. All rights reserved.			

META-LAX [®] Provider		Customer	
TRAMONTINA		Tel#:	
Part(s)		Settings	
Part: 1 thru 1 WO#: Serial#: Part Name: CORPO DE PROVA 5 - 7 Material/Type: 4140 Size: 10 x 7 x 2 cm Weight: 1 kg Cold Worked: Blank		Location: 1 of 1 Force Inducer: 2A Material Class: B Batch Weight: 1001 kg Mode: Manual Stress Relief Dwell Timer: 20 min Monitor Timer: 10 min Eccentric: %	
META-LAX [®] Stress Relief Certification			
AMPLITUDE Digital Gain: 37 FREQUENCY (Hz)			
Scan Results			
Total Scans Completed: 3	First Scan	Final Scan	Scan Results
Harmonic Frequency:	70.4 Hz	71.1 Hz	Harmonic Frequency Difference: 0.7 Hz
Peak Amplitude:	99.9	106.9	Peak Amplitude Difference: 7.0
SUB-Harmonic Frequency:	67.4 Hz	67.1 Hz	Total Dwell Time: 30:00
Date & Time: 16/05/2014 09:54:00	Final Dwell %	35	Total Monitor Time: 0:00
META-LAX [®] Provider		Job Notes	
TRAMONTINA ELETRIK S/A RODOVIA RSC 470, KM 230 CARLOS BARBOSA, RS 95185-000 BRASIL Tel#: (54) 3461-8200 Fax#: Opr: Juliano Supptitz			
Meta-Lax[®] is a registered trademark of Bond Technologies, Inc. Form and Software Copyright © 2001-2005, by Bond Technologies, Inc. All rights reserved.			

Meta-Lax® by BONAL TECHNOLOGIES, INC. - [1A-3A.mf]		Meta-Lax® is a Patented process	
META-LAX® Provider		Customer	
TRAMONTINA		Tel#:	
Part(s)		Settings	
Part: 1 thru 1 WO#: Serial#: Part Name: CORPO DE PROVA 9 - 11 Material/Type: 4140 Size: 10 x 7 x 2 cm Weight: 1 kg Cold Worked: Blank		Location: 1 of 1 Force Inducer: 2A Material Class: B Batch Weight: 1001 kg Mode: Manual Stress Relief Dwell Time: 20 min Monitor Timer: 10 min Eccentric: 60%	
META-LAX® Stress Relief Certification			
Digital Gain: 37			
Scan Results			
Total Scans Completed: 3	First Scan	Final Scan	Scan Results
Harmonic Frequency:	71.7 Hz	71.3 Hz	Harmonic Frequency Difference: 0.4 Hz
Peak Amplitude:	99.9	102.7	Peak Amplitude Difference: 2.8
SUB-Harmonic Frequency:	66.8 Hz	66.9 Hz	Total Dwell Time: 30:00
Date & Time: 16/05/2014 08:09:31	Final Dwell %	35	Total Monitor Time: 0:00
META-LAX® Provider		Job Notes	
TRAMONTINA ELETRIK S/A RODOVIA RSC 470, KM 230 CARLOS BARBOSA, RS 95185-000 BRASIL Tel#: (54) 3461-8200 Fax#: Opr: Juliano Supptitz			
Meta-Lax® is a registered trademark of Bonal Technologies, Inc. Form and Software Copyright © 2001-2005, by Bonal Technologies, Inc. All rights reserved.			