

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BÁRBARA DINIZ PENA

“ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O AÇO INOXIDÁVEL AISI 430”

BELO HORIZONTE

2013

BÁRBARA DINIZ PENA

“ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O AÇO INOXIDÁVEL AISI 430”

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Wellington Lopes

Coorientadora: Profa. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Belo Horizonte

2013

BÁRBARA DINIZ PENA

“ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O AÇO INOXIDÁVEL AISI 430”

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 04/04/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. Wellington Lopes – Orientador

Prof.

Prof.

Dedico este trabalho a todos que estiveram ao meu lado durante esta longa caminhada, principalmente ao meu pai, que mesmo ausente fisicamente, esteve presente em meu coração e me inspirou a me tornar uma engenheira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Wellington Lopes, pela paciência na orientação e incentivo, que tornaram possíveis a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho investigou as condições favoráveis ao aparecimento de tensões residuais em amostras de aço inoxidável ferrítico AISI 430 (tipo 430 A) como a quantidade de deformação em carregamento monotônico de tração e em cisalhamento, o efeito do modo de deformação (tração e cisalhamento) para valores semelhantes de deformação efetiva e por fim, o efeito da condução de tratamento térmico de recozimento após a execução dos ensaios mecânicos. Neste caso, a tensão residual do aço AISI 430 para as diferentes condições de processamento foi identificada a partir da técnica de difração de raios-X. Os resultados indicaram que a o aumento da quantidade de deformação plástica produzida na amostra, seja por cisalhamento ou por tração, ocasionou o aumento direto do valor de tensão residual. Notou-se ainda a tendência ao aumento da tensão residual com a combinação dos esforços mecânicos e que a condução do tratamento térmico de recozimento provocou a diminuição dos valores de tensão residual. De modo geral foi observado ainda que o modo de deformação que ocasionou maior quantidade de tensão residual foi a tração uniaxial quando comparada com o esforço de cisalhamento.

Palavras-chave: Aço AISI 430. Tensão residual. Tração. Cisalhamento. Recozimento.

ABSTRACT

This work investigated the favorable conditions to the occurrence of residual stress in specimen of AISI 430 (type 430A), a ferritic stainless steel such as the amount of deformation in tension and shearing monotonic loading, the effect of the mode of deformation (tension and shearing) for similar values of effective strain and last one, the effect of the annealing conducted after the mechanical tests in the residual stress. In this case, the residual stress in the AISI 430 steel was identified under the X-ray diffraction. The results indicated that the higher values of plastic deformation applied by shearing or tension efforts generated the direct increase in the value of the residual stress. It was observed also the tendency to the increase of the residual stress with the combination of the mechanical efforts and that the heat treatment occasioned the reduction of the residual stresses. Finally, can be mentioned that the tension was the mechanical effort when compared to the shearing effort that produced the higher residual stress value.

Key-words: AISI 430 steel, residual stress, tension, shearing and annealing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) componente submetido a trabalho a frio, (b) distribuição das tensões residuais. -----	16
Figura 2 - Esquema da operação de estampagem de chapa por embutimento. -----	17
Figura 3 - Copos que apresentaram o fenômeno de <i>Delayed Cracking</i>. -----	18
Figura 4 - Sistema de três barras de aço engastadas em um suporte de mesmo material. -----	19
Figura 5 - Somente a barra central é aquecida. -----	20
Figura 6 – Diagrama esquemático das tensões internas em função da temperatura na barra central da Figura 3. -----	20
Figura 7 - Tensões residuais atuantes em um cordão de solda. -----	23
Figura 8 – Volume ocupado pelo metal de adição: (a) no estado líquido e (b) à temperatura ambiente, esquemático. -----	24
Figura 9 – (a) comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras e (b) as tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal (y) de uma solda por fusão. -----	24
Figura 10 - Diagrama Ferro-Carbono. -----	28
Figura 11 – Cilindro com secção transversal de área A no qual é aplicada uma força F. -----	34
Figura 12 – Microscópio óptico Kontrol com câmera acoplada para a digitalização das imagens. Laboratório de metalografia, departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG -----	39
Figura 13 – (a) Microscópio de varredura por feixe de elétrons (MEV) Simadzu modelo SSX-550 e (b) metalizadora SC-701 Quick Coater. Laboratório de caracterização dos materiais, departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. -----	41
Figura 14 – (a) Difratorômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000 e (b) porta-amostra do difratorômetro. Laboratório de caracterização dos materiais, departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. -----	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Origens das tensões residuais. -----	15
Tabela 2 - Métodos para aliviar tensões residuais. -----	30
Tabela 3 - Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais. -----	32
Tabela 4 - Composição química do aço AISI 430 (% em peso). -----	37
Tabela 5 – Parâmetros de resistência mecânica, ductilidade e coeficiente de encruamento do aço AISI 430. -----	42
Tabela 6 – Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 tracionadas. ---	45
Tabela 7 - Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 tracionadas e cisalhadas. -----	46
Tabela 8 - Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 tracionadas e tratadas termicamente. -----	47
Tabela 9 - Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 cisalhadas e tratadas termicamente. -----	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de fluxo após o ensaio de tração do aço AISI 430. -----	42
Gráfico 2 - Curva de fluxo após o ensaio de tração do aço AISI 430, com quantidades de deformação de 0,03536 e 0,1380. -----	43
Gráfico 3 – Curva de fluxo após ensaio de tração do aço AISI 430, com quantidade de deformação de 0,138, seguido pelo ensaio de cisalhamento, com quantidade de deformação de 0,066. -----	44
Gráfico 4 - Curva de fluxo após ensaio de tração do aço AISI 430, com quantidade de deformação de 0,009208, seguido pelo ensaio de cisalhamento, com quantidade de deformação de 0,009252. -----	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Tensão Residual	14
3.2 Causas Comuns do Aparecimento da Tensão Residual	16
<i>3.2.1 Tensões Residuais Originadas por Deformação Mecânica</i>	16
<i>3.2.2 Tensão Residual Versus Gradiente Térmico</i>	18
3.2.2.1 Tensões Residuais Geradas pela Têmpera	21
3.2.2.2 Tensões Residuais Geradas pelo Processo de Soldagem	22
3.3 Tensão Residual e a Corrosão dos Materiais Metálicos	25
3.4 Alívio de Tensões Residuais	27
3.5 Métodos de Medição da Tensão Residual	31
<i>3.5.1 Método de Difração de Raios-X</i>	33
4. METODOLOGIA	37
4.1 Material	37
4.2 Caracterização Mecânica	38
4.3 Rotas do Estudo da Tensão Residual	38
4.4 Ensaio de Tração	39
4.5 Ensaio de Cisalhamento	40
4.6 Tratamento Térmico	40
4.7 Difração de Raios-X	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Caracterização Mecânica	42
5.2 Avaliação da Tensão Residual	45
6 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Os esforços mecânicos são aplicados aos materiais, dentre outros objetivos, para alterar a forma e as dimensões dos mesmos, sendo necessário neste caso, o uso de equipamentos específicos para a aplicação de diversos tipos de carregamentos, de um do só tipo (tração, compressão ou cisalhamento) ou combinados (como, por exemplo, tração e compressão). Contudo, uma parcela da energia entregue ao material é perdida de diversas formas, como pelo aquecimento do material, assim como parte do esforço mecânico encontra restrição à deformação do material, ficando armazenado.

Esse esforço mecânico “aprisionado” é reconhecido como tensões retidas ou residuais e não contribui para a deformação almejada, embora interfira na resposta do material de diversos modos, desde o aparecimento de deformação fora da linha base (linha neutra) como empenos ou como ponto para a nucleação de trincas.

Essas tensões residuais podem ser introduzidas nos materiais, acidentalmente, durante diversos processos de fabricação, tais como soldagem, nas operações de conformação mecânica de forjamento, laminação, trefilação, dobramento, entre outros. Além disso, variações de temperatura impostas ao material geram gradientes térmicos e, conseqüentemente, tensões residuais.

Por outro lado, tensões residuais podem ser introduzidas propositalmente, como no processo de jateamento por granalha, com o intuito de aumentar a resistência à fadiga do material.

A presença dessas tensões residuais é, muitas vezes, responsável pela ocorrência de trincas que levam à fraturas inesperadas do material. Dessa forma, a combinação dessas tensões com as tensões de serviço resulta em um encurtamento da vida útil das peças e na diminuição da capacidade destes materiais de suportar um carregamento. Por esses motivos, a determinação precisa das tensões residuais, por meio de ensaios não destrutivos ou destrutivos, torna-se importante, assim como os tratamentos para o seu alívio.

O presente trabalho aborda desde o conceito de tensões residuais, passando por suas origens, até as técnicas capazes de identificar sua presença no material. O objetivo é conhecer um pouco mais sobre o assunto para fazer uma análise posterior das influências das tensões residuais no aço inoxidável AISI 430.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é discutir as condições favoráveis ao aparecimento de tensões residuais em uma amostra de aço amplamente utilizado em processos de conformação por estampagem de chapas, o aço inoxidável ferrítico AISI 430. Esta investigação será feita com uso da técnica de difração de raios-X para diferentes condições deste material (como recebido, pré-deformado em tração uniaxial, em cisalhamento, esforço combinado de tração e de cisalhamento e tratado termicamente por recozimento) para:

- a) avaliar a influência do modo e da combinação de esforços mecânicos no aparecimento e na magnitude da tensão residual;
- b) definir as condições críticas para o aparecimento de tensões residuais a partir das condições investigadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tensão Residual

As tensões residuais podem ser consideradas como tensões aprisionadas, que estão presentes numa parte não submetida a uma força externa (DIETER,1981). Elas surgem a partir da deformação não uniforme de um corpo. Como resultado das operações tecnológicas para a produção de estruturas e, posteriormente, na sua montagem e funcionamento, freqüentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. A análise da sua presença e sua magnitude é de extrema importância para o controle de funcionamento de componentes e estruturas, já que a presença de tensões residuais influencia nas características do funcionamento e da resistência mecânica de uma peça.

Uma importante característica do estado de tensões residuais é que o sistema de tensões residuais em um corpo deve estar em equilíbrio estático, ou seja, trata-se de um estado em que o somatório de todas as forças e momentos produzidos deve ser igual a zero. Entretanto, como mencionado, estas tensões não podem ser desprezadas, pois elas se somam às tensões aplicadas externamente e, dependendo do seu sinal e da sua distribuição, pode ocorrer o aumento ou a diminuição da vida útil do componente devido a sua presença (CAMPOS *et al*, 2006).

Pode-se agrupar as tensões residuais em três tipos principais, considerando-se a porção de material na qual elas atuam:

- Tipo I – Tensões residuais macroscópicas: atuam sobre, no mínimo, vários grãos de material;
- Tipo II - Tensões residuais microestruturais: abrangem a distância de um grão ou parte do mesmo.
- Tipo III - Tensões micro-localizadas: ocorrem entre várias distâncias atômicas dentro de um grão e são equilibradas sobre uma pequena parte do grão.

Sobre suas origens, os principais mecanismos pelos quais elas podem surgir são mudanças não homogêneas na forma e/ou no volume de uma peça. A **Tabela 1** mostra as principais origens das tensões residuais.

Tabela 1 - Origens das tensões residuais

(1)	Deformação plástica local	Compreende todos os processos de carregamento mecânico, moagem e usinagem.
(2)	Fornecimento ou retirada de calor	Soldagem, fundição, processos de tratamento térmico.
(3)	Diferente expansão térmica de diferentes fases	Processos de recobrimento.
(4)	Gradientes de composição química	Tratamento de superfície (carbonetação, nitretação) e recobrimento.

Fonte: (CAMPOS *et al.*, 2006)

As tensões originadas por deformação plástica local e pelo fornecimento ou retirada de calor, por serem mais recorrentes, serão tratadas de forma mais detalhada posteriormente.

É importante lembrar que as tensões residuais, uma vez produzidas, podem ser aliviadas, por exemplo, segundo Dieter (1981, p. 494), pelo aquecimento do material até uma temperatura onde sua tensão limite de escoamento é igual ou inferior à tensão residual. Assim, o material pode se deformar e aliviar a tensão. A deformação por fluência é importante no alívio térmico de tensões.

Apesar de, muitas vezes, o aparecimento das tensões residuais ser indesejado, em outros momentos elas são introduzidas propositalmente, como para aumentar a vida em fadiga de componentes metálicos. Para isso, o jateamento de partículas, por exemplo, é bastante utilizado. Neste processo, tensões residuais compressivas são introduzidas propositalmente na superfície do material, aumentando a vida em fadiga e a resistência à iniciação e à propagação de trincas (SOARES, 2003).

3.2 Causas Comuns do Aparecimento da Tensão Residual

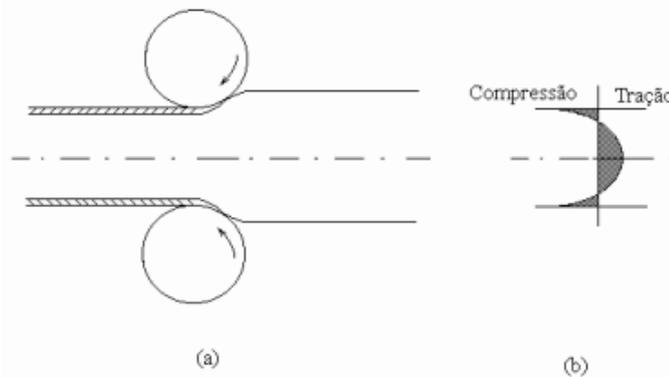
3.2.1 Tensões Residuais Originadas por Deformação Mecânica

As tensões residuais aparecem quando a deformação plástica através da seção transversal total da parte deformada não é uniforme (DIETER, 1981). Para análise dos mecanismos que definem seu surgimento, é importante considerar as tensões desenvolvidas em cada processo de conformação mecânica, seja ele forjamento, trefilação, laminação, dobramento, dentre outros.

Para a compreensão do mecanismo de surgimento dessas tensões residuais durante um processo de conformação mecânica, será descrito a seguir como elas se formam durante a laminação de uma chapa metálica, como ilustrado na **Figura 1**. DIETER (1981, p. 494) descreve:

Neste exemplo as condições de laminação são tais que o escoamento plástico somente ocorre próximo às superfícies da chapa. Os grãos da superfície da chapa são deformados e tendem a se alongar, enquanto que os grãos do centro da chapa permanecem sem serem afetados. Como a chapa deve se manter contínua como um todo, suas regiões superficial e central devem se sujeitar a uma acomodação de deformações. As fibras centrais tendem a impedir as fibras superficiais de se alongarem, enquanto as fibras superficiais procuram esticar aquelas localizadas na parte central da chapa. Como resultado, obtém-se uma distribuição de tensões residuais na chapa, que consiste em elevadas tensões compressivas na superfície e tensões trativas no centro [...]. Em geral, o sinal da tensão residual que é produzida por deformação não-homogênea será oposto ao sinal da deformação plástica que produziu a tensão residual. Para o caso da chapa laminada, as fibras superficiais que foram alongadas na direção longitudinal pela laminação permanecem em um estado de tensões residuais compressivas quando a carga externa e laminação é removida.

Figura 1 - (a) componente submetido a trabalho a frio, (b) distribuição das tensões residuais.



Fonte: (SOARES, 2003).

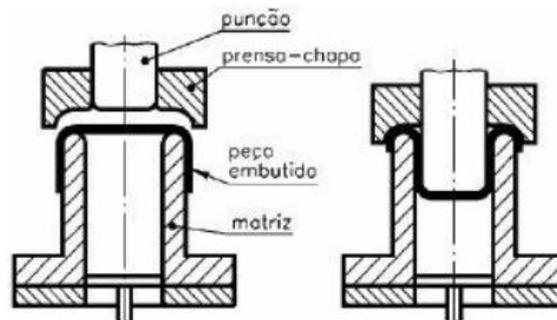
É importante ressaltar que a região superficial sofre deformação plástica, aparentemente uniforme, enquanto a região central permanece sob regime de deformação elástica.

Para compreender o surgimento de tensões residuais a partir do embutimento, é necessário fazer uma análise de todo o processo.

O embutimento é comumente usado na produção de peças ocas no parque industrial automotivo, entre outros. O processo consiste na aplicação de uma força compressiva sobre uma chapa, a qual é forçada a passar por uma matriz aberta. A parede do copo tem que suportar uma tensão axial de tração requerida para puxar a chapa para dentro da cavidade da matriz.

A primeira etapa de transformação de uma chapa plana em um copo consiste na aplicação de um lubrificante sobre a chapa. O segundo passo é o fechamento com o prensa-chapa. Já a terceira etapa consiste no processo de embutimento até o punção alcançar a posição inferior, o retorno desse punção e a retirada do prensa-chapa. Parte desta terceira etapa, quando o punção entra em contato com a chapa, é mostrada na **Figura 2**.

Figura 2 – Esquema da operação de estampagem de chapa por embutimento.



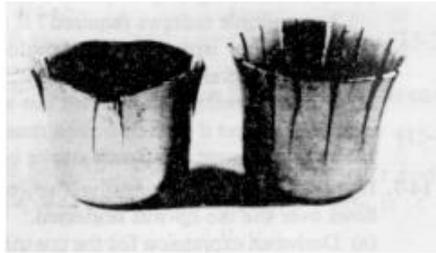
Fonte: (LOPES, 2011).

Durante o embutimento, a chapa é submetida a tensões que variam de acordo com o posicionamento. Um determinado elemento localizado na aba sofre uma tensão radial provocada pelo punção quando este empurra a chapa para dentro da cavidade da matriz por uma tensão compressiva, exercida pelo prensa-chapa, e por uma tensão compressiva circunferencial induzida. Se um determinado elemento encontra-se na parte cilíndrica do copo, ele é submetido a uma tensão trativa axial - resultante da força exercida no fundo do

copo e da força atuante do prensa-chapa na aba do copo, a qual é responsável pelo estiramento da parede do copo e por uma tensão trativa circunferencial proveniente da restrição do material pelo punção. Já um elemento localizado no fundo do copo, é submetido apenas às forças trativas, associadas à força do punção sobre a chapa.

Após o embutimento, grandes tensões residuais permanecem nas paredes dos copos, devido aos dobramentos sofridos pelo material ao adentrar a matriz. Tensões residuais de compressão são formadas no lado interno do copo e de tração no lado externo. Essas tensões - maiores nas proximidades da borda dos copos - induzem um momento de dobramento em suas paredes, o qual é contrabalançado por tensões circunferenciais desenvolvidas na borda. Em alguns materiais estas tensões circunferenciais podem levar ao rasgamento das paredes dos copos como no caso da corrosão sob tensão. O fenômeno, conhecido por *Delayed Cracking*, é mostrado na **Figura 3**.

Figura 3 – Copos que apresentaram o fenômeno de *Delayed Cracking*.



Fonte: (SANTOS, 2008).

3.2.2 Tensão Residual Versus Gradiente Térmico

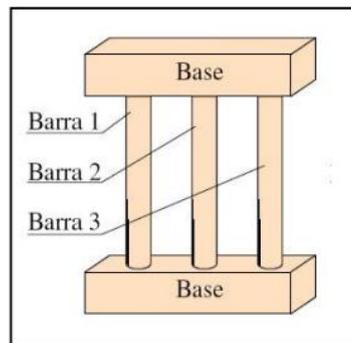
Com o objetivo de aperfeiçoar algumas propriedades mecânicas dos metais, são realizados tratamentos térmicos, sendo que cada um é destinado a uma determinada melhoria nas características do material, como dureza, tenacidade, etc. Porém, as variações de temperatura impostas ao material geram gradientes térmicos e, conseqüentemente, tensões residuais que podem, por sua vez, gerar trincas dependendo da sua característica, orientação e de sua magnitude (LAGATTA *et al*, 2005, p.38).

As tensões residuais geradas pelos tratamentos térmicos podem ser provocadas por dois mecanismos:

Num primeiro, a diferença de temperatura entre o centro e a superfície gera tensões, uma vez que, devido ao gradiente de calor, núcleo e superfície se expandem e contraem em momentos diferentes. O outro processo que gera tensão residual é a transformação de fase. Com a mudança de fase do material, há alteração em sua estrutura cristalina, que expande ou contrai. Porém, como as diferentes fases possuem diferentes coeficientes de expansão térmica, uma parte do cilindro se expande mais que a outra, gerando deformação plástica e, conseqüentemente, tensões residuais. A diferença de expansão devida à mudança de fase geralmente é maior que a devida ao gradiente térmico, fazendo com que esse processo tenha grande importância no mecanismo gerador de tensões (LAGATTA *et al*, 2005, p.38).

Para exemplificar o aparecimento de tensões residuais de origem térmica, pode-se fazer uma analogia com uma barra aquecida. Considere três barras de aço (1,2 e 3) engastadas em suas extremidades em suportes fixos de mesmo material, sem que nenhuma das peças envolvidas esteja sob esforço mecânico, como mostra a **Figura 4**.

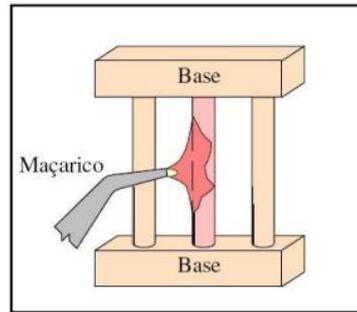
Figura 4 - Sistema de três barras de aço engastadas em um suporte de mesmo material.



Fonte: (ROCHA, 2009).

A barra central é então aquecida, enquanto as outras duas barras (1 e 3) permanecem à temperatura ambiente (**Figura 5**).

Figura 5 - Somente a barra central é aquecida.

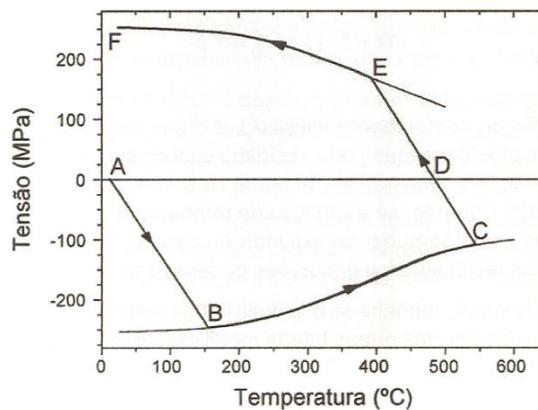


Fonte: ROCHA (2009).

Com isso, segundo Rocha (2009), a barra 2 tenderá a se expandir (dilatação térmica), mas será restringida pelas outras através das bases.

A **Figura 6** mostra a evolução das tensões internas na barra 2, de acordo com a variação da temperatura.

Figura 6 – Diagrama esquemático das tensões internas em função da temperatura na barra central da Figura 3.



Fonte: (MARQUES *et al*, 2009).

Segundo Marques *et al* (2009), o diagrama exposto na **Figura 6** pode ser explicado da seguinte maneira:

- Ponto A-B – a temperatura começa a aumentar, a barra central tende a se expandir, porém é restringida pelas barras laterais e pelas bases, as quais se mantêm

em temperatura ambiente. Isso faz com que ela experimente um esforço de compressão, que aumenta com a elevação da temperatura, até que as tensões residuais atinjam o valor da tensão limite de escoamento em compressão, no ponto B.

- Ponto B-C – o aquecimento continua, assim como a dilatação térmica. Porém, como o nível de tensões internas atingiu o limite de escoamento do material, a barra 2 começa a se deformar plasticamente (sendo comprimida). Este processo prossegue até o ponto C.
- Ponto C-D – a barra está submetida à compressão com magnitude igual ao valor da tensão limite de escoamento em compressão na temperatura do fim do aquecimento. Com o fim do aquecimento, a barra irá resfriar e, com isso, contrair, o que faz com que a compressão diminua, até se anular no ponto D.
- Ponto D-E – a temperatura continua a cair e a barra tende a continuar a diminuir, porém, como seu comprimento foi diminuído pela deformação plástica ocorrida no aquecimento, a contração é restringida. Dessa forma, a barra central começa a sentir um esforço de tração e uma deformação elástica crescentes, até que o limite de escoamento em tração do material seja atingido (ponto E).
- Ponto E-F – a barra passa a se deformar plasticamente por tração, até que a temperatura volte a ser ambiente, no ponto F.

Ao final deste processo, a barra 2 apresentará tensões residuais de tração e as laterais experimentarão tensões internas de compressão.

3.2.2.1 Tensões Residuais Geradas pelo Tratamento Térmico de Têmpera

O tratamento térmico de têmpera nos aços tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura que proporcione propriedades de dureza e resistência mecânicas elevadas, sendo isso representado pela formação do constituinte martensita.

Este processo é caracterizado pelo aquecimento da peça que se deseja temperar até uma temperatura em que ocorra a austenitização com o posterior resfriamento, realizado de forma bem rápida, na maioria das situações.

Com isso, obtém-se uma microestrutura composta predominantemente de martensita, fase que apresenta elevada dureza.

A queda brusca de temperatura provocada na peça durante o resfriamento provoca o surgimento de tensões internas, ou residuais, as quais, por sua vez, influenciam na cinética das transformações de fase, alterando as temperaturas em que estas ocorrem. Essas tensões residuais induzidas pelo processo térmico podem promover distorções geométricas e/ou formação de trincas capazes de tornar a peça inutilizável. Por esse motivo, é importante prever o nível de tensões residuais resultantes para impedir a perda do material tratado termicamente.

Na têmpera, tratamento térmico em destaque, as tensões residuais são introduzidas com o resfriamento rápido do material, o que, por sua vez, ocasiona um resfriamento não uniforme do material, no qual a superfície atinge a temperatura ambiente mais rapidamente do que as regiões centrais. Isso provoca mudanças volumétricas não uniformes, já que a superfície contrai mais rapidamente do que as camadas mais internas. Assim, a porção central da peça fica sob compressão enquanto a mais externa sob tração.

Quando essas tensões internas ultrapassam a tensão limite de escoamento do aço, há deformação plástica e o conseqüente empenamento da peça; porém, se essas tensões internas excederem a tensão limite da resistência à tração do material, então ocorrerão fissuras, impedindo o uso do material.

3.2.2.2 Tensões Residuais Geradas pelo Processo de Soldagem

Outro processo que pode levar à geração de tensões residuais a partir do aquecimento e posterior resfriamento de um material é a soldagem. Segundo Gurova *et al* [20--], as fontes dessas tensões em soldagem podem ser: a contração do material durante o resfriamento das regiões aquecidas de modo diferente e plastificadas durante a operação de soldagem (*shrinkage residual stresses*); o resfriamento superficial mais intenso (*quenching residual stresses*) e a transformação de fase (*transformation residual stresses*), sendo que a primeira – contração por resfriamento não-uniforme - representa a principal fonte de tensão residual.

Durante o resfriamento do cordão de solda surgem gradientes de temperatura nas direções longitudinal e transversal e também variação da temperatura ao longo da espessura da peça, já que o resfriamento ao longo do cordão de solda não é uniforme. Quando este último gradiente térmico é alto, como por exemplo, no caso de chapas espessas, ocorrerá um nível elevado de tensões residuais, reduzindo a tensão necessária ao início da deformação plástica do material.

Caso este mecanismo de resfriamento mais rápido da superfície do cordão de solda em relação ao restante da parte soldada fosse a única fonte de tensões residuais no processo de soldagem, tensões de tração seriam obtidas no interior do cordão de solda e tensões de compressão estariam presentes na superfície do material, como mostra a **Figura 7**. Este estado de tensões é similar ao desenvolvido quando um material aquecido é posteriormente resfriado de modo heterogêneo.

Figura 7 - Tensões residuais atuantes em um cordão de solda.

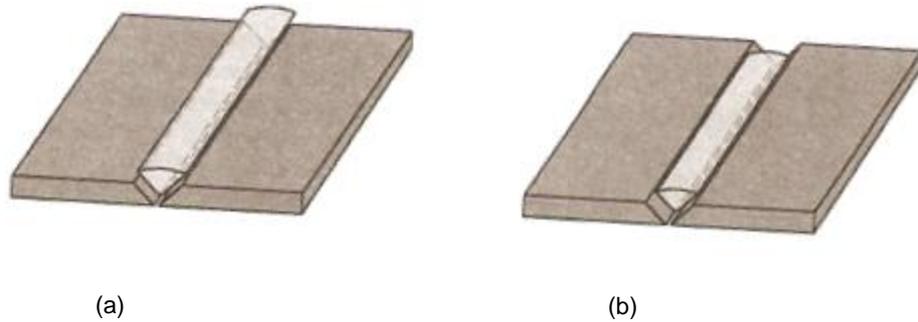


Fonte: (OLIVEIRA *et al*, 2009).

Entretanto, há outra forma de desenvolvimento de tensões residuais em uma peça soldada como mostrado na **Figura 8**. No momento em que o metal de adição é depositado, ele se encontra aquecido e líquido, ocupando o volume indicado na **Figura 8(a)**.

Esta mesma quantidade de material sólido quando em temperatura ambiente ocupa somente o volume mostrado na **Figura 8(b)**. Contudo, como ligações atômicas foram formadas entre a parte fundida e o metal base durante o processo de soldagem, o material ocupará, ao final da operação, o mesmo volume que ocupava inicialmente, estando, portanto, intensamente tensionado e deformado (MARQUES *et al*, 2009, p. 114).

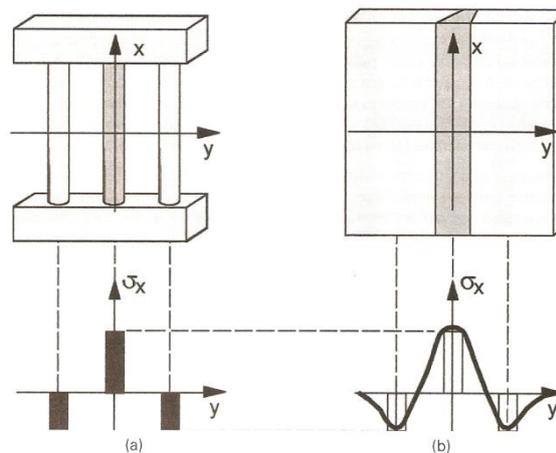
Figura 8 – Volume ocupado pelo metal de adição: (a) no estado líquido e (b) à temperatura ambiente, esquemático.



Fonte: (MARQUES *et al*, 2009).

Na **Figura 9** é esquematizada a distribuição de tensões longitudinais numa junta soldada ao longo da direção transversal e esta é comparada com a montagem das três barras mostradas anteriormente na **Figura 4**. Marques *et al* (2009) destaca que a região da solda, destacada por uma cor mais escura na **Figura 9(b)**, está sujeita a tensões de tração cujo valor máximo é próximo ao valor da tensão limite de escoamento do material. Estas tensões reduzem de intensidade, passando para valores negativos (compressão) nas regiões mais afastadas da solda, regiões mais claras na **Figura 9(b)**, que rodeiam a solda.

Figura 9 – (a) comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras e (b) as tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal (y) de uma solda por fusão.



Fonte: (MARQUES *et al*, 2009).

Outra fonte de geração de tensões residuais na soldagem é a transformação de fase na região soldada do metal. Com a mudança de fase do material, há alteração em sua estrutura cristalina, que expande ou contrai, de acordo com o tipo de arranjo estrutural assumido pelo material. Porém, como fases diferentes possuem coeficiente de expansão térmica também diferente, uma parte da peça se expande mais que a outra, gerando deformação plástica e, conseqüentemente, tensões residuais. Portanto, durante a transformação da austenita para a ferrita, bainita, perlita ou martensita, ocorre um aumento de volume (a transformação de fase da austenita para martensita, por exemplo, provoca uma expansão volumétrica de, aproximadamente, 4% (SILVA *et al*, 2002)). Assim, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada, que sofre transformação de fase, tenderá a se expandir, mas será impedido (pelo menos na direção longitudinal da solda) pelo restante do material, que está mais frio e não sofreu transformação de fase.

Como resultado dessa diferença de temperatura nas diferentes posições do material soldado, nota-se o aparecimento de tensões residuais de compressão na região que sofreu a transformação de fase (GUROVA *et al*, 2011, p.2).

O processo de geração de tensões residuais devido à mudança de fase constitui um dos mecanismos mais importantes de geração de tensões residuais, já que a diferença de expansão térmica causada por este é maior que o representado pela presença do gradiente térmico (LAGATTA *et al*, 2005, p.38).

As tensões residuais podem afetar a utilidade e o desempenho da estrutura soldada, sendo, desta forma, fundamental o conhecimento de suas características e medidas para a prevenção e controle. Elas podem gerar diversos problemas, como o surgimento de trincas, a maior propensão para a ocorrência de fadiga ou fratura frágil, além da perda de estabilidade dimensional (MARQUES *et al*, 2009, p. 114).

3.3 Tensão Residual e a Corrosão dos Materiais Metálicos

A corrosão de materiais sob tensão ocorre devido à ação de tensões residuais ou aplicadas, além da presença de meios corrosivos. Quando ocorre fratura na peça, ela recebe o nome de corrosão sob tensão fraturante (*stress corrosion cracking*) (GENTIL, 2007).

É importante ressaltar que nesse tipo de corrosão só há solicitações estáticas e que praticamente não há perda de massa do material. O objeto é capaz de preservar um aspecto superficial satisfatório até a ocorrência da fratura favorecida pela ação das tensões residuais.

O tempo necessário para ocorrer corrosão sob tensão fraturante de um material metálico depende:

- da magnitude da tensão atuante, ou seja, quanto maior este valor, menor o tempo para ocorrer a fratura;
- da concentração ou natureza do meio corrosivo;
- da temperatura do ambiente em que o material está;
- do arranjo estrutural e da composição química do material – geralmente o material com grãos menores é mais resistente à corrosão sob tensão fraturante.

Gentil (2007) afirma ainda que:

A estrutura cristalina também influencia a corrosão sob tensão fraturante, assim o aço inoxidável ferrítico (cúbica de corpo centrado, c.c.c) é muito mais resistente à corrosão sob tensão fraturante quando exposto a soluções aquosas de cloreto do que o aço inoxidável austenítico (cúbica de faces centrada, c.f.c).

Durante a corrosão, as trincas são geradas na superfície e se propagam na direção perpendicular ao esforço mecânico ao longo da microestrutura do material. Duas etapas constituem o mecanismo de corrosão sob tensão fraturante: a nucleação da trinca e a propagação da mesma, que pode ser intergranular ou intragranular. Esses dois mecanismos podem coexistir em uma mesma trinca ou ela pode se iniciar de uma forma e propagar-se de outra.

A nucleação da trinca não é instantânea, é necessário um tempo de incubação, sendo isso evidenciado pela formação de pites ou com a emergência de discordâncias sucessivas na superfície do material, as quais rompem camadas protetoras, expondo regiões ativadas do cristal ao ataque.

Por fim, Gomes (2003) relata que os mecanismos propostos na literatura para explicar o fenômeno da ação combinada da tensão e da corrosão são baseados principalmente nos

conceitos de ruptura do filme superficial, dissolução metálica, fragilização por absorção do hidrogênio e na teoria da mobilidade superficial, que consiste na contaminação da superfície do metal por espécies do meio corrosivo.

Alguns artifícios podem ser utilizados para minimizar os efeitos da corrosão. Alguns exemplos de procedimentos são apresentados a seguir:

- redução das tensões atuantes sobre o material, principalmente a sua restrição à região elástica, sendo, porém, de difícil aplicação;
- eliminação das tensões residuais provenientes dos diferentes processos de fabricação mediante a condução de tratamento térmico (recozimento, por exemplo);
- evitar o acúmulo e a concentração de espécies químicas nocivas, ou alterar as características do meio corrosivo, como o pH, a eliminação de oxigênio e de cloretos das soluções, dentre outras ações;
- proteção catódica do metal ou por inibidores;
- substituição do material empregado por outro.

3.4 Alívio de Tensões Residuais

Há diversas formas de aliviar as tensões residuais presentes em metais, ainda que sua completa eliminação seja difícil. Porém, como elas podem se tornar muito prejudiciais ao material, a redução da magnitude das mesmas (o seu alívio) se torna não só desejável, mas necessário.

Vários métodos são usados para reduzir a magnitude das tensões, dentre os quais, a realização de tratamentos térmicos de recozimento e de revenimento. Neste caso, cada tratamento térmico é destinado a uma determinada melhoria de propriedades específicas do aço, como a redução da dureza.

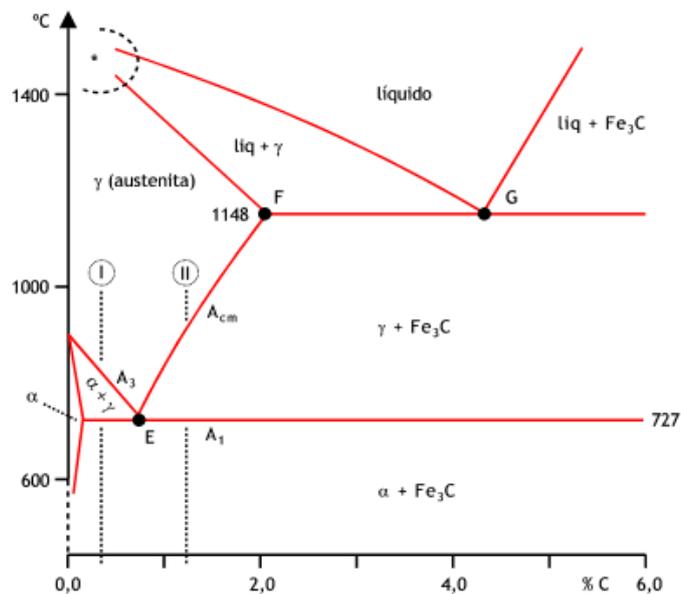
No caso do recozimento, este tratamento térmico é aplicado quando se deseja, dentre outros objetivos, remover tensões residuais provenientes do processamento mecânico, diminuir a dureza, aumentar a ductilidade, regularizar a textura bruta de fusão e eliminar finalmente, o

efeito de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tenha sido submetido anteriormente (CHIAVERINI, 1986).

Com relação ao arranjo microestrutural assumido pelo material ao término do tratamento térmico de recozimento, cita-se a formação da ferrita pró-eutetóide mais perlita, caso o aço seja hipoeutetóide (porcentual de carbono em peso inferior a 2,11%), perlita mais cementita, para aços hipereutetóides (porcentual de carbono em peso maior que 0,77% e igual até 2,11%) e apenas perlita, se o aço for eutetóide (porcentual de carbono em peso igual a 0,77%).

Durante o aquecimento, deve-se atingir uma temperatura de aproximadamente 50°C acima do limite superior da zona crítica (acima da linha A3 para os hipoeutetóides, e acima da linha A1 para os aços hipereutetóides, nos quais pode haver formação de cementita nos contornos de grão caso a temperatura ultrapasse a linha A3, o que torna os aços fáceis) (**Figura 10**).

Figura 10 - Diagrama Ferro-Carbono.



Fonte: MSPC – Informações Técnicas.

Já o revenimento consiste em um tratamento térmico complementar à têmpera. Ao fim deste último, tem-se uma estrutura predominantemente martensítica, a qual apresenta elevada dureza e baixa tenacidade. Para corrigir a tenacidade e a ductilidade do material abaixo do valor considerado adequado ao uso do mesmo, faz-se uso deste tratamento térmico.

As temperaturas às quais as peças são submetidas durante este tratamento são elevadas, porém abaixo das usadas na têmpera, podendo ir até, aproximadamente, 700°C.

Além dos tratamentos térmicos, as tensões residuais podem também ser reduzidas por deformação plástica, o que é feito à temperatura ambiente. Dieter (1981) menciona que produtos tais como chapas finas, chapas grossas e produtos extrudados são frequentemente tracionados além da tensão limite de escoamento para aliviar gradientes de deformação através da deformação plástica. As tensões residuais em barras de seção transversal circular e tubos trabalhados a frio são aliviadas na desempenadeira de rolos.

Com relação à soldagem, após este processo, alguns métodos podem ser realizados para o alívio das tensões residuais geradas. A **Tabela 2** mostra alguns destes métodos, segundo Marques *et al*, (2009).

Tabela 2 – Métodos para aliviar tensões residuais.

	PROCEDIMENTO	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	LIMITAÇÕES
(a)	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem	Método simples e pode causar refino do tamanho 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. O alívio de tensões não é uniforme.
(b)	Recozimento para alívio de tensões	Aquecimento entre 600°C a 700°C (aços ferríticos) ou 900°C (cós austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e eficiente.	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Recozimento a alta temperatura	Aquecimento entre 900°C e 950°C (aços ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Pode eliminar completamente as tensões residuais.	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo muito elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda entre 150°C e 200°C em uma largura total de 60mm a 130mm.	Adequado para grandes estruturas.	O alívio de tensões é parcial.
(a) Processos mecânicos; (b) Processos térmicos				

Fonte: (MARQUES *et al*, 2009).

3.5 Métodos de Medição da Tensão Residual

Os métodos de determinação de tensões residuais podem ser classificados em dois tipos: (a) métodos não destrutivos e (b) métodos destrutivos. Os métodos do primeiro grupo permitem manter a forma e dimensões originais da peça, permitindo, assim, medições repetidas. Nos métodos do segundo tipo, a medição é acompanhada de destruição parcial ou completa da amostra (GUROVA *et al*, 2011, p.3).

Entre os métodos destrutivos mais utilizados estão o método da perfuração, o método da amostragem e o método da remoção de camadas.

Já com relação aos métodos não destrutivos mais usados, são eles: métodos acústicos, métodos elétricos, métodos magnéticos, métodos por raios-X.

A **Tabela 3** mostra as vantagens e desvantagens de alguns métodos não destrutivos mencionados acima, e suas aplicações.

Tabela 3 – Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais.

Método	Magnético	Ultra-som	Raios-X	Furo cego
Vantagens	Velocidade e facilidade de uso. Unidade portátil.	Velocidade e facilidade de uso. Permite a medição de tensões internas	Metodologia bem estabelecida e precisa.	Metodologia bem estabelecida e precisa.
Desvantagens	Somente para materiais ferríticos. Fornece as diferenças entre tensões principais, não os valores absolutos. Sensível a microestrutura do material.	Não aplicável a metais de solda. Sensível a microestrutura do material.	Pode precisar de proteção contra a radiação. Unidade deve ser fixa em relação ao componente.	Semi-destrutivo localmente. Resultados demorados.
Penetração Máxima	1,0 mm	Superficial: 1,0 mm. Interna: 150,0 mm	0,01 mm	2,0 mm (com strain-gages comerciais)
Tipo de Tensão Medida	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1 e 2 ou 1 e 3	Tipo 1
Parâmetro Medido	Amplitude do efeito "Barkhausen noise" ou permeabilidade magnética	Variações da velocidade da onda ultra-sônica	Alteração no espaçamento interplanar de materiais policristalinos	Deformação superficial ou deslocamentos
Problemas para o caso de materiais com grãos grandes e textura grosseira	Sim	Sim	Sim	Não
Sensibilidade para endurecimento por deformação plástica	Alta	Alta	Alta	Baixa
Probabilidade	Sim	Sim	Sim	Sim
Precisão Normal	±20,0 MPa	±20,0 MPa	10,0 a 20,0 MPa	10,0 a 20,0 MPa

Fonte: (GUROVA *et al*, [2011]).

OBS.: Os tipos de tensão medida aos quais a Tabela 3 se refere, são os mesmos explicados na página 14 deste trabalho.

Não há, portanto, um método universal de medida das tensões residuais capaz de resolver todos os problemas da melhor forma possível e a baixo custo. A escolha da técnica a ser utilizada, de acordo com Lagatta *et al*, 2004, deve ser baseada em diversos parâmetros influenciados pelas características do componente e o tipo de medida a ser efetuada. Estes parâmetros se baseiam:

- na natureza do componente;
- no tipo de tensões residuais presentes no componente;

- no gradiente de tensões residuais;
- na geometria do componente;
- no local onde a medida será realizada (em campo ou no laboratório);
- no tipo de intervenção (método destrutivo ou não-destrutivo);
- no tempo disponível para a medida e apresentação dos resultados;
- na precisão e a repetibilidade do método;
- no custo final da medida.

3.5.1 Método de Difração de Raios-X

Com a utilização da técnica de difração de raios-X, é possível realizar a medição de macrotensões, a determinação da distribuição das tensões residuais sub-superficiais, assim como a medição de tensões residuais relativas a falhas por fadiga ou associadas a corrosão sob tensão. Essa técnica também permite a medição de microtensões possibilitando a medida de microdureza para pequenas camadas superficiais (NUNES, 2008).

Não é necessária uma preparação para a realização do ensaio de difração de raios-X, o que se deve observar é que o tamanho da amostra está limitado ao tamanho do porta-amostras do equipamento de raios-X.

Essa técnica, no entanto, apresenta alguns fatores limitantes, segundo Nunes, 2008:

- Equipamento complexo e de alto valor agregado, apenas uma pequena parte da superfície é medida com profundidades menores que 0,025 mm.
- Para medições em profundidades maiores, é necessário fazer uma remoção de camadas utilizando-se para isto um ataque eletrolítico.
- O tempo de análise por ponto pode ser elevado, chegando a 2 horas por ponto dependendo do equipamento utilizado.

Quando uma amostra policristalina de metal é deformada elasticamente, de maneira que a tensão seja uniforme ao longo de distâncias relativamente grandes, os espaçamentos entre os

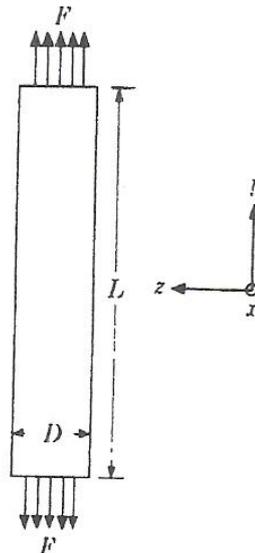
grãos se alteram, partindo de um valor determinado quando a amostra está livre da presença de tensões residuais, para um valor proporcional à magnitude de tensão aplicada. Estas novas distâncias entre os grãos são praticamente constantes em todos os planos cristalinos, desde que o material seja deformado elasticamente - se o metal é deformado plasticamente, a rede cristalina é deformada de maneira que os novos espaços entre os grãos variam. Esse distanciamento entre os grãos causam um desvio nos raios-X para uma nova posição 2θ .

A técnica utilizando a difração de raios-X se baseia nesse desvio provocado pela distorção da rede cristalina, com o qual se calcula a deformação gerada na rede cristalina da peça e a partir disso, calculam-se as tensões residuais presentes.

A profundidade de penetração na amostra depende principalmente do tipo de material que será analisado, do tipo de ânodo usado no equipamento de raios-X, e do ângulo de incidência do feixe na amostra. Ressalta-se que esta medida é sempre próxima à superfície da amostra.

O modo mais simples de compreender como funciona esta técnica é considerando uma situação na qual haja uma tensão atuando em uma única direção: em um cilindro com uma seção transversal de área A é aplicada uma força F , como mostrado na **Figura 11**, assim há uma tensão $\sigma_y = F/A$ na direção y .

Figura 11 - Cilindro com secção transversal de área A no qual é aplicada uma força F .



Fonte: (CULLITY, 2004)

A tensão σ_y produz uma deformação ϵ_y na direção y , dada por:

$$\epsilon_y = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (1)$$

onde L_0 e L_f são os comprimentos original e final da barra, respectivamente.

Essa deformação é relacionada à tensão pela equação:

$$\sigma_y = E \epsilon_y \quad (2)$$

onde E é o módulo de Young.

O alongamento da barra é acompanhado pela diminuição do diâmetro da barra. As deformações nas direções x e z são dadas por:

$$\epsilon_x = \epsilon_z = \frac{D_f - D_0}{D_0} \quad (3)$$

Onde D_0 e D_f são os diâmetros original e final da barra. Se o material do cilindro é isotrópico, essas deformações são relacionadas pela equação:

$$\epsilon_x = \epsilon_z = -\nu \epsilon_y \quad (4)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson para o material da peça. Este valor varia entre 0,25 e 0,45 para a maioria dos metais e ligas.

Para medir *ia* ϵ_y por raios-X, é necessário fazer a difração em planos perpendiculares ao eixo do cilindro. Como isso é fisicamente impossível, é feita uma fotografia a partir do uso de elétrons retroespalhados em uma direção normal ao feixe incidente de raios-X. É necessário utilizar esta técnica, para que haja maior precisão na medição dos espaçamentos, já que até grandes tensões geram apenas uma pequena alteração em d .

Com isso, é obtida uma medição da deformação na direção z , que é dada por:

$$\epsilon_z = \frac{d_n - d_0}{d} \quad (5)$$

onde d_n é o espaçamento interplanar com a presença de tensão residual, refletido na direção normal e d_0 é o espaçamento entre os mesmos planos, na ausência de tensão residual.

Combinando as equações 2, 4 e 5, obtemos a relação:

$$\sigma_y = -\frac{E}{\nu} \left(\frac{d_n - d_0}{d_0} \right) \quad (6)$$

a qual fornece a tensão desejada em termos de quantidades observadas.

Apesar do cálculo de tensões residuais por DRX se basearem nessas equações, no caso deste trabalho, as mesmas não foram utilizadas, já que o software utilizado já fornece todos os resultados após a análise das amostras.

4 METODOLOGIA

4.1 Material

Chapas de aço inoxidável AISI 430 (tipo 430A) foram utilizadas neste trabalho para investigar o aparecimento de tensões residuais neste material em função das condições de processamento termomecânico aplicadas ao mesmo. A espessura inicial das chapas era de 1mm e todos os ensaios mecânicos foram realizados na direção de laminação original deste aço.

A composição química do aço AISI 430 é apresentada na **Tabela 4**:

Tabela 4 - Composição química do aço AISI 430 (% em peso).

Elemento	Teor (% em peso)	
	*Referência	Material
Cr	16,0 a 18,0	16,0657
Nb	-	0,4033
Si	até 1,00	0,3341
Ni	até 0,75	0,2448
Mn	até 1,00	0,2012
V	-	0,0360
P	até 0,040	0,0263
C	até 0,012	0,0197
Mo	-	0,0146
Al	-	0,0024
Ti	-	0,0037
S	até 0,030	0,00002

Fonte: Produzida pela Autora

4.2 Caracterização Mecânica

As chapas do aço AISI 430 foram submetidas ao ensaio de tração uniaxial para determinação dos parâmetros de resistência mecânica (tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência à tração) e de ductilidade (alongamento uniforme).

Neste caso, foram utilizados corpos de prova de tração com dimensão de 135mm x 12,5mm x 1,0mm (comprimento total x largura útil x espessura inicial), de acordo com o previsto pela norma ASTM E-8.

A tensão limite de escoamento (LE) foi calculada a partir do valor de tensão convencional identificado pela interseção de uma reta traçada a partir do valor de deformação convencional de 0,2% (0,002) com a mesma inclinação da região elástica da curva de tensão convencional versus deformação convencional.

O outro parâmetro de resistência mecânica, a tensão limite de resistência à tração, LRT, foi calculada pela razão entre o valor da carga máxima obtida no ensaio pela área inicial do corpo de prova.

Por fim, o alongamento uniforme (AU) foi calculado a partir do valor de deformação convencional descontado do respectivo valor do retorno elástico sofrido pelo aço AISI 430 quando este foi deformado até o ponto de carga máxima. Neste caso, para identificar o retorno elástico foi necessário descontar do valor de deformação convencional no ponto de carga máxima, o respectivo valor de deformação convencional registrado a partir do traçado de uma reta desde o ponto de tensão máxima (LRT) até o eixo das abscissas (deformação convencional).

4.3 Rotas do Estudo da Tensão Residual

As rotas de estudo da tensão residual envolveram:

- a) efeito da quantidade de deformação em tração: o material foi deformado em tração de 19% e de 75% do valor de alongamento uniforme e posteriormente, submetidos ao ensaio para mensurar a tensão residual;
- b) o efeito da quantidade de deformação em cisalhamento: o aço AISI 430 foi deformado monotonicamente até 75% do valor do alongamento uniforme e em seguida, submetido ao ensaio para identificar a tensão residual;
- c) a combinação dos esforços de tração e de cisalhamento: neste caso, o material foi pré-deformado em tração de 5% e 75% do valor do alongamento uniforme assim como até a fratura e, em seguida, cisalhado monotonicamente até 0,20 de deformação efetiva neste último modo de deformação plástica;
- d) a combinação de esforço de tração e do tratamento térmico de recozimento: o aço AISI 430 foi deformado em tração de 5% e 75% do valor do alongamento uniforme assim como até a fratura e em seguida, tratado termicamente por recozimento a 930°C durante 25 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno;
- e) a combinação de esforço de cisalhamento e do tratamento térmico de recozimento: o aço AISI 430 foi deformado em tração de 27% e 80% do valor do alongamento uniforme assim como até a fratura e em seguida, tratado termicamente por recozimento a 930°C durante 25 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno.

A descrição dos ensaios de tração, cisalhamento e do tratamento térmico serão apresentadas nos próximos subitens.

4.4 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração uniaxial foram conduzidos na máquina de ensaios universais Instron 5582 com sistema de aquisição de dados Blue Hill e extensômetro mecânico com abertura de 25mm.

Eles foram realizados com uso de corpos de prova com seção transversal retangular de acordo com as recomendações previstas na norma ASTM E8, sob taxa de deformação inicial de 0,001/s.

4.5 Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi executado na máquina de ensaios universais INSTRON 5582 de outra instituição de ensino mediante a montagem de um dispositivo que foi adaptado a essa máquina para a condução desse experimento.

Neste caso, fez-se uso de corpos de prova com 50mm de comprimento, 15mm de largura total, sendo 3,5mm de largura útil submetida ao esforço cisalhante e espessura variável de acordo com a condição inicial do material (espessura inicial da chapa sem nenhum tipo de processamento termomecânico foi igual a 1,0mm).

Os ensaios foram realizados sob taxa de deformação igual a 0,001/s, sendo a deformação cisalhante, γ , calculada a partir da razão entre o deslocamento lateral da chapa (ΔL) pela largura útil do corpo de prova (3,5mm). Já a tensão cisalhante consistiu na divisão entre a carga registrada pela área cisalhada (comprimento versus espessura).

Por fim, fez-se a relação entre a tensão e deformação cisalhantes com a tensão e deformação efetiva mediante a correção pelo critério de Taylor, de acordo com o previsto pelas equações 4.1 e 4.2, respectivamente:

$$\sigma_{\text{efet}} = \tau \cdot 1,84 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{efet}} = \gamma / 1,84 \quad (9)$$

4.6 Tratamento Térmico

O tratamento térmico de recozimento (temperatura de aquecimento de 930°C com tempo de encharque de 600s e resfriamento no interior do forno) foi realizado no Forno Magnus, do Laboratório de Tratamento Térmico do CEFET-MG, para duas condições do aço AISI 430:

a) material pré-deformado em tração: 5% e 75% do valor do alongamento uniforme;

b) material pré-deformado em cisalhamento: 27% e 80% do valor do alongamento uniforme.

4.7 Difração de Raios-X

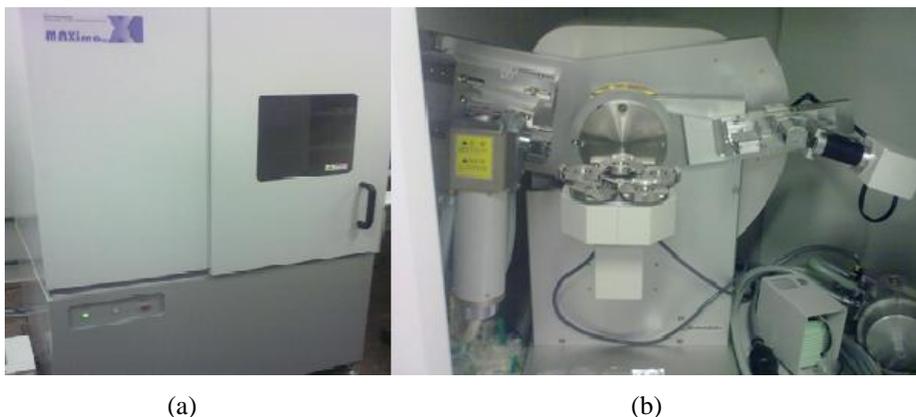
O difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000 (**Figura 12**) do Laboratório de Caracterização de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG foi utilizado para a caracterização inicial do aço AISI 430 em termos da fase presente (ferrita) e para a identificação da tensão residual deste material para as diferentes condições de processamento aplicadas ao mesmo com uso de acessório específico (*residual stress*) para esta finalidade.

Após o corte das amostras pela cortadeira metalográfica da Struers, as mesmas foram lavadas com água e secas com álcool e, em seguida, posicionadas no difratômetro para a medição da tensão residual.

Quanto às dimensões das amostras, elas foram cortadas em forma de quadrados de 16mm x 16mm, com espessura variando entre 1mm (inicial) até 0,8mm.

Mesmo considerando que o corte das amostras com uso da cortadeira metalográfica poderia ocasionar a geração de tensões residuais, as mesmas não foram decaçadas, pois todas foram cortadas do mesmo modo e com o mesmo equipamento.

Figura 12 – (a) difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000 e (b) porta-amostra do difratômetro. Laboratório de caracterização dos materiais, departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.



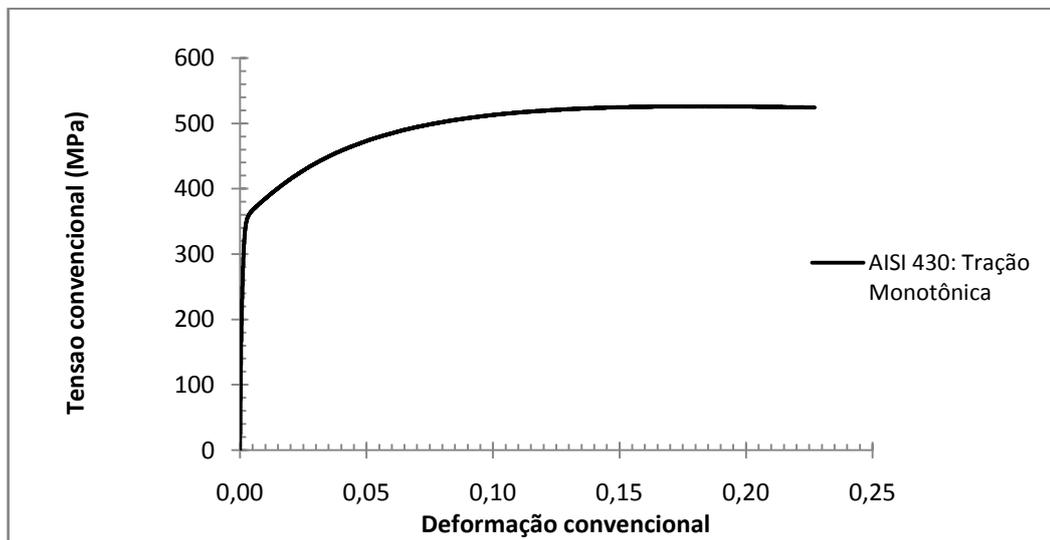
Fonte: Produzida pela Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Mecânica

A partir do ensaio de tração monotônica, foi obtido um gráfico que possibilitou a caracterização mecânica do AISI 430, sendo a mesma exibida mediante a apresentação da curva de fluxo disposta no **Gráfico 1**.

Gráfico 1 - Curva de fluxo após o ensaio de tração do aço AISI 430.



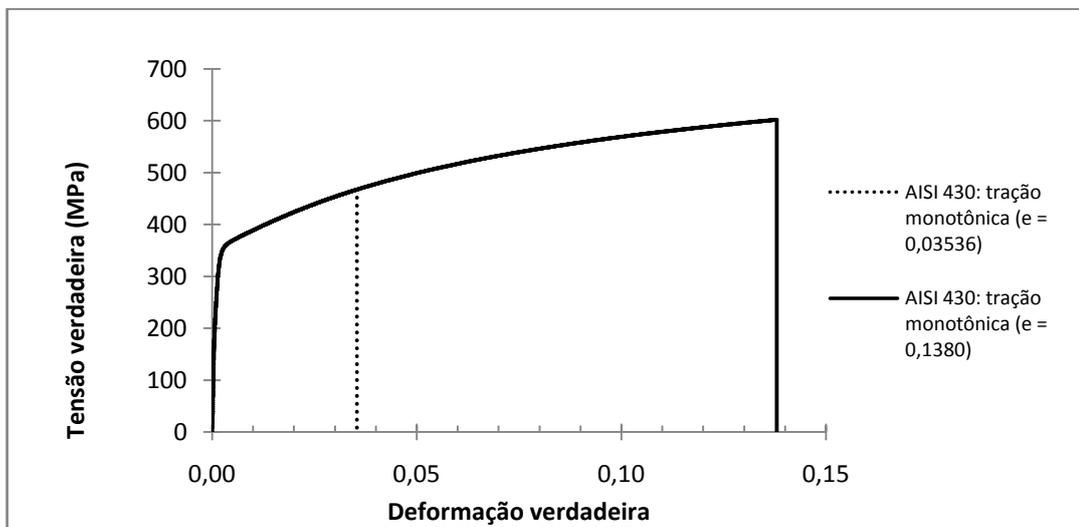
Os parâmetros de resistência mecânica (tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência à tração) e de ductilidade (alongamento uniforme) encontrados para este material estão apresentados na **Tabela 5**, a seguir.

Tabela 5 – Parâmetros de resistência mecânica, ductilidade e coeficiente de encruamento do aço AISI 430.

Limite de Escoamento (LE)	Limite de Resistência à Tração (LRT)	Alongamento Uniforme (AU)
358 MPa	526 MPa	18,5%

Foram realizados ensaios de tração até a ruptura, com amostras que apresentavam diferentes quantidades de deformação (75% e 19% do valor do alongamento uniforme) para investigar a influencia dessa variável sobre a tensão residual no material, o que será apresentado mais à frente. É importante ressaltar que os valores de quantidade de deformação foram escolhidos aleatoriamente. Os resultados destes ensaios estão apresentados no **Gráfico 2**.

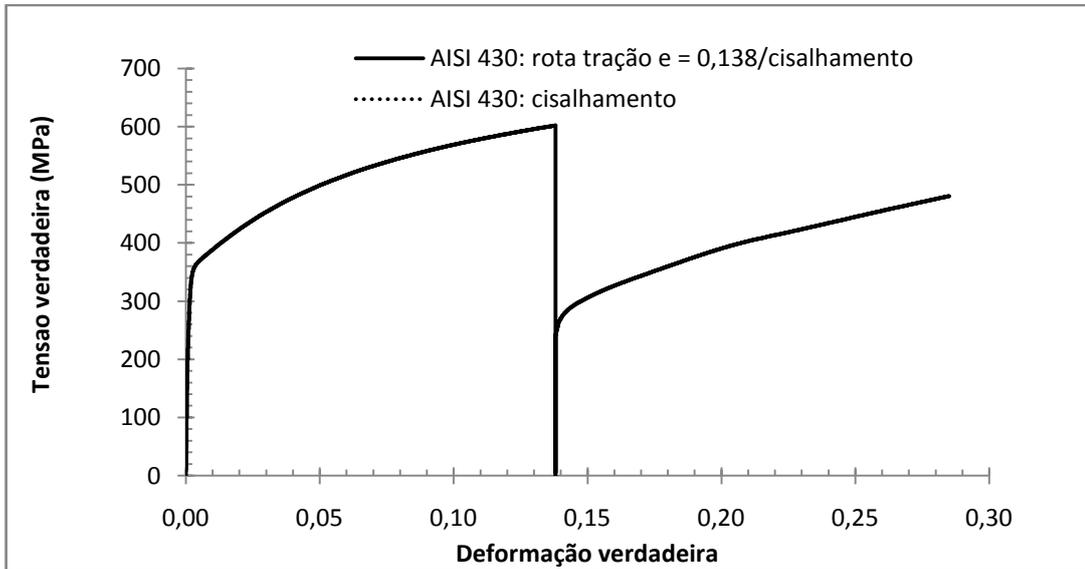
Gráfico 2 - Curva de fluxo após o ensaio de tração do aço AISI 430, com quantidades de deformação de 0,03536 e 0,1380.



Além disso, foram realizados também ensaios de tração combinados com cisalhamento, cujo objetivo foi avaliar o quanto a quantidade de pré-deformação em tração e a combinação dos esforços mecânicos influenciava na variação da tensão residual no material.

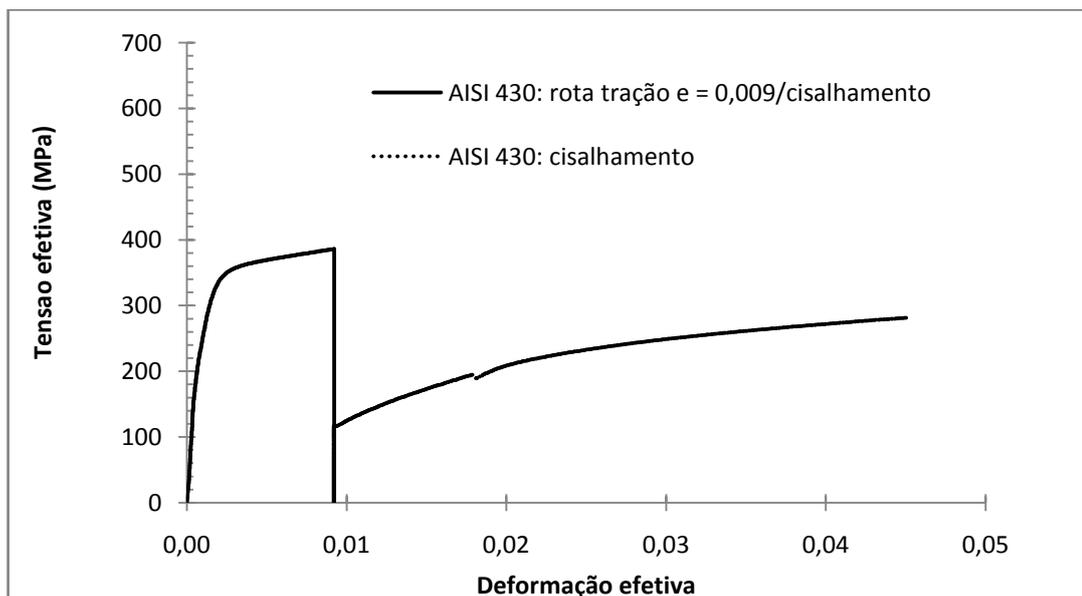
Primeiramente, foi obtida uma quantidade de deformação de 0,066 a partir de um esforço de cisalhamento, em uma amostra que já apresentava uma pré-deformação em tração de 0,138, totalizando, assim, uma quantidade de deformação de 0,204. O **Gráfico 3** mostra a curva desses dois ensaios combinados.

Gráfico 3 – Curva de fluxo após ensaio de tração do aço AISI 430, com quantidade de deformação de 0,138, seguido pelo ensaio de cisalhamento, com quantidade de deformação de 0,066 .



Neste gráfico, observa-se que houve uma diminuição da resistência mecânica da amostra, o que não era esperado. Isto ocorreu devido ao Efeito Bauschinger, que prevê que a tensão no material é reduzida pela aplicação de um esforço prévio em direção contrária ao do ensaio. Este efeito corresponde à variação no valor de tensão entre o fim da rota de tração e o início da rota de cisalhamento. Neste caso, esta variação foi da ordem de 360 MPa.

Gráfico 4 - Curva de fluxo após ensaio de tração do aço AISI 430, com quantidade de deformação de 0,009208, seguido pelo ensaio de cisalhamento, com quantidade de deformação de 0,009252.



Já em um segundo ensaio combinando esforços de tração e cisalhamento, foi obtida uma quantidade de deformação de 0,01846 (0,009208 após o ensaio de tração e 0,009252 após o ensaio de cisalhamento) – **Gráfico 4**.

Neste caso, sendo a pré-deformação em tração menor, já era previsto que o Efeito Bauschinger também fosse menor (270 MPa). Isto porque ele consiste em uma tentativa de reorganizar as discordâncias no material após a aplicação de um esforço mecânico e a magnitude da quantidade de deformação obtida anteriormente no material é diretamente proporcional à dificuldade em reorganizar essas discordâncias, já que estas se encontram mais estabelecidas.

5.2 Avaliação da Tensão Residual

Os resultados obtidos após a difração de raios-X das amostras foram todos negativos, ou seja, indicando que as mesmas teriam sofrido somente esforços de compressão, o que não corresponde à realidade. Isso se deu devido à direção com que os raios-X entraram em contato com o material, cujas dimensões permitiram que fosse posicionado de maneira que os raios atingissem as amostras apenas perpendicularmente. Porém, este fato não comprometeu a análise dos resultados.

A difração de raios-X foi feita em amostras do aço AISI 430 submetidas à tração; à tração e cisalhamento; à tração e tratamento térmico; e ao cisalhamento e tratamento térmico.

Nas amostras de aço tracionadas, buscou-se investigar o efeito da quantidade de deformação em tração na tensão residual. Como já era de se esperar, quanto maior é a deformação, maior é a tensão residual apresentada pela peça (**Tabela 6**).

Tabela 6 – Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 tracionadas.

Material	Condição	Tensão Residual (MPa)
AISI 430	AISI 430 recebido	-60,537
AISI 430	Deformado tração efetiva=0,03536	-69,703
AISI 430	Deformado tração efetiva=0,138	-283,891

Observa-se que após uma pequena deformação, de 0,03536, já houve um acréscimo de pouco mais de 9 MPa na tensão residual do material.

Quando a tração foi aumentada em um pouco mais de 390%, ou seja, de 0,03536 para 0,138, ocorreu um aumento de 214 MPa, o que representa 307% a mais de tensão residual no material.

Já nas amostras que sofreram tração e cisalhamento, o objetivo foi de avaliar como a tensão residual se comporta com a combinação dos esforços nas amostras de aço e, também, o quanto a pré-deformação em tração a altera. Os resultados obtidos com essas amostras estão apresentados na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 tracionadas e cisalhadas.

Material	Condição	Tensão Residual (MPa)
AISI 430	Cisalhamento efetivo = 0,134	-111,905
AISI 430	Deformado tração efetiva=0,138	-283,891
AISI 430	Tração efetiva = 0,009208 e Cisalhamento efetivo = 0,009252	-171,308
AISI 430	Tração efetiva até a fratura = 0,138 e Cisalhamento efetivo = 0,066	-272,997

Nota-se que neste caso também houve o aumento da tensão residual nas peças que sofreram uma quantidade de deformação em cisalhamento maior (ainda que essa quantidade de deformação tenha sido muito pequena), fato já esperado, já que quando as amostras eram somente tracionadas, esse aumento já ocorria.

Pode-se inferir, ainda, que há uma tendência ao aumento da tensão residual com a combinação de esforços, quando comparada com os resultados gerados somente pelo cisalhamento monotônico. Este fato é comprovado pelos resultados apresentados na primeira e na terceira linha da **Tabela 7** – na terceira linha, a quantidade de deformação por cisalhamento é bem menor que a condição mostrada na primeira linha e ainda assim a tensão residual se mostrou maior (quase 54% a mais do que quando o esforço aplicado é somente o de cisalhamento).

Quando se compara os mesmos valores da primeira linha com o da última linha da mesma tabela, essa tendência é mais uma vez comprovada.

Observa-se também, pelos resultados mostrados na segunda e na última linha, que o cisalhamento subsequente à tração gera uma tendência à diminuição da tensão residual. Porém, como a diferença entre os valores (283,891 MPa, para tração; e 272,997 MPa, para cisalhamento após tração) é muito pequena, cerca de 4%, há incertezas quanto aos valores.

Tabela 8 - Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 tracionadas e tratadas termicamente.

Material	Condição	Tensão Residual (MPa)
AISI 430	Tração efetiva = 0,009208 e Tratamento Térmico	-241,007
AISI 430	Tração efetiva = 0,1364 e Tratamento Térmico	-249,202
AISI 430	Tração efetiva até a fratura = 0,1697 e Tratamento Térmico	-255,796

Analisando a **Tabela 8**, acima, mais uma vez pode-se dizer que um acréscimo na quantidade de deformação por tração provoca um aumento da tensão residual na peça. Quanto à realização do tratamento térmico posterior ao esforço mecânico, confirmou-se o fato de que o recozimento reduz os níveis de tensão residual. Isto pode ser percebido, comparando-se o resultado apresentado na terceira linha da **Tabela 6** - que corresponde a uma peça tracionada com quantidade de deformação de 0,138, cuja tensão residual medida foi de 283,891 MPa – com o resultado mostrado na segunda linha da **Tabela 8**. Nesta última, houve uma redução de, aproximadamente, 2% na quantidade de deformação em relação à peça da **Tabela 6**, que foi apenas tracionada, ou seja, de 0,138 para 0,1364, enquanto a tensão residual diminuiu cerca de 12%. Nota-se também que ao aumentar a pré-deformação, para as amostras tratadas termicamente, a diferença nas tensões residuais fica mais discreta.

Comparando-se agora os efeitos do modo de deformação (tração e cisalhamento) e da condução do tratamento térmico de recozimento, fez-se o estudo da imposição de rotas de carregamento monotônico em cisalhamento (deformação efetiva de 0,134) e de cisalhamento

combinado com tratamento térmico para dois valores de pré-deformação (deformação efetiva) em cisalhamento: 0,05 e 0,148, **Tabela 9**.

Tabela 9 - Avaliação da tensão residual nas amostras de aço AISI 430 cisalhadas e tratadas termicamente.

Material	Condição	Tensão Residual (MPa)
AISI 430	Cisalhamento efetivo = 0,134	-111,905
AISI 430	Cisalhamento efetivo = 0,05 e Tratamento Térmico	-274,917
AISI 430	Cisalhamento efetivo = 0,148 e Tratamento Térmico	-235,108

Nota-se que a condução do tratamento térmico de recozimento para o material cisalhado intensificou o valor da tensão residual. Neste caso, percebe-se que o tratamento térmico tende a gerar tensões de compressão que provocam o aumento do valor de tensão residual.

Como previsto, a condição de tratamento térmico reduziu ainda o efeito da quantidade de pré-deformação em cisalhamento no respectivo valor de tensão residual. É possível observar na Tabela 9 que quando o aço AISI 430 foi cisalhado de 0,05 e de 0,148 de deformação efetiva em cisalhamento antes do tratamento térmico que o respectivo valor de tensão residual foi similar.

Por fim, nota-se que o modo de deformação que gerou mais tensão residual foi o de tração, já que com uma quantidade de deformação equivalente à quase metade da quantidade de deformação obtida no ensaio de cisalhamento (40,7%), foi obtida uma tensão residual somente 20%, aproximadamente, menor.

6 CONCLUSÕES

O estudo das tensões residuais a partir da imposição de rotas de sollicitação mecânico compostas por carregamentos monotônicos e combinados de tração e cisalhamento com e sem a execução de tratamento térmico de recozimento revelou os seguintes resultados:

- Quanto maior foi a quantidade de deformação produzida na amostra, seja por cisalhamento ou tração, maior foi o valor da tensão residual apresentado pelo aço AISI 430;
- A tendência de aumento da tensão residual no aço AISI 430 após a combinação de diferentes esforços mecânicos, no caso a tração seguida pelo cisalhamento;
- Como previsto, o tratamento térmico de recozimento conduzido após a deformação em tração registrou a tendência de redução dos valores de tensão residual;
- O modo de deformação que gerou mais tensão residual foi o de tração uniaxial;
- O cisalhamento feito posteriormente à tração gera uma tendência à diminuição da tensão residual no aço AISI 430.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, Marcos Flávio de; MACHADO, Rogério; HIRSCH, Thomas. **Tensões Residuais em Aços Avaliadas por Difração de Raios-X**: diferença entre micro e macro tensões residuais. In: Workshop sobre Texturas, 3., 2006, São Paulo. p.115-131. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pagina%20no%20site%20do%20departamento/pdf/ID11.pdf>>. Acesso em 02 nov. 2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986. 3 v.

CULLITY, B. D. **Elements of X-Ray Diffraction**. Reading: Addison-Wesley Publishing Company Inc.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1981.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. São Paulo: Ltc, 1998.

GUROVA, Tetyana; QUARANTA, Francisco; ESTEFEN, Segen. **Monitoramento dos estados das tensões residuais durante a fabricação de navios**. Disponível em: <<http://www.gurteq.com/RAYSTRESS%20DOWNLOAD/RAYSTRESS%20006.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2011.

INFORGEL. **Revenimento**. Disponível em: <<http://www.inforgel.com.br/site/0903/p/Revenimento>>. Acesso em 05 nov. 2011.

LAGATTA, Cristiano Fernandes; BORTOLETO, Eleir Mundim; SOUZA, Roberto Martins de. **Construção de um modelo computacional para simulação e análise de tensões residuais em cilindros**. Disponível em <http://www.lfs.usp.br/IC2006/Artigos/Trabalho_8_Cristiano_Eleir.pdf>. Acesso em 02 nov. 2011.

LAGATTA, Cristiano Fernandes; BORTOLETO, Eleir Mundim; SOUZA, Roberto Martins de. **Simulação e Análise de Tensões Residuais em Cilindros**. In: Congresso Nacional de

Estudantes de Engenharia Mecânica, 12., 2005, Ilha Solteira. Disponível em: <http://www.dem.feis.unesp.br/cdrom_creem2005/pdf/trabalhos_completos/tc01.pdf>.

Acesso em: 02 nov. 2011.

LAMY, Carlos Alfredo; FILHO, João da Cruz Payão; BITTENCOURT, Marcelo de Siqueira Queiroz; AREAS, Vitor Leonardo Ferreira. **Avaliação por Ultra-Som do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões**. In: Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, 21., 2002, Salvador. Disponível em: <<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/T-009.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2011.

LOPES, Wellington. **Conformação de materiais metálicos: Estampagem**. Belo Horizonte: CEFET MG, 2011. 62 p. Anotações sobre aula de estampagem. Notas de aula.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2005. 362 p.

MARTINS, C. O. D., STROHAECKER, T. R., ROCHA, A. S., HIRSCH, T. K. Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100. **Revista Matéria**, v.9, n. 1, p. 22-28, 2004. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10589/10589.pdf>>. Acesso em 08 dez. 2011.

MSPC – **Informações Técnicas**. Disponível em:

<<http://www.mspc.eng.br/ciemat/im01/aco103.gif>>. Acesso em 08 dez. 2011.

NUNES, Rafael Menezes. **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós-processamento**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14399/000665641.pdf?sequence=1>>.

Acesso em 08 dez. 2011.

R.K. Boger, R.H. Wagoner, F. Barlat, M.G. Lee, K. Chung. **Continuous, large strain, tension/compression testing of sheet material**. International Journal of Plasticity, v.21, n. 12, p.2319-2343, 2005. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641905000410>>. Acesso em 19 mar. 2013.

ROCHA, Ricardo Silva. **Avaliação do Alívio Mecânico de Tensões Residuais devido à Sobrecarga Causada por Teste Hidrostático**. 2009, 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/21592/000737013.pdf?sequence=1>>. Acesso em 02 nov. 2011.

SANTOS, Maria Ribeiro dos. **Efeito do Nitrogênio e do Cobre na Formação da Martensita em Aços Inoxidáveis Austeníticos e sua Influência sobre o Fenômeno de Delayed Cracking**. 2008. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/MAPO-7REMF9/1/marta_ribeiro_dos_santos.pdf>. Acesso em 08 dez. 2011.

SCHVARTZMAN, Mônica M. de A. Mendonça; QUINAN, Marco Antônio Dutra; CAMPOS, Wagner Reis da Costa; IGLÉSIAS, Luciana; LIMA, Lourenço. Avaliação da Suscetibilidade à Corrosão sob Tensão da ZAC do aço inoxidável AISI 316L em Ambiente de Reator Nuclear PWR. **SciELO**. vol.14, n.3, p.228-237. 2009. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/si/v14n3/v14n3a06.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2011.

SOARES, Maria da Conceição Barbosa Vieira. **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas**. 1998, 116p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1998. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Maria%20da%20Conceicao%20Barbosa%200Vieira%20Soares_D.pdf>. Acesso em 02 nov. 2011.

WITHERS, P. J., BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress: part 1 – measurement techniques. **Materials Science and Technology**, vol. 17, p. 355-365, Abril, 2011.