

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PREVISÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE  
PAINÉIS NAVAIS PELO MÉTODO DPC**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA  
MECÂNICA

**CATARINA ESPOSITO MENDES**

RECIFE, 2015

**PREVISÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE  
PAINÉIS NAVAIS PELO MÉTODO DPC**

CATARINA ESPOSITO MENDES

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim

RECIFE, 2015.

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M538p Mendes, Catarina Esposito.  
Previsão de tensões residuais em juntas soldadas de painéis navais pelo método DPC / Catarina Esposito Mendes. - Recife: O Autor, 2015.  
68 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Método DPC. 4. Tensão de recuo. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti. (Orientador). II. Rolim, Tiago Leite. (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-294

30 de outubro de 2015.

“PREVISÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE PAINÉIS  
NAVAIS PELO MÉTODO DPC”

CATARINA ESPOSITO MENDES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

---

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM  
CO-ORIENTADOR

---

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO  
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

---

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)

---

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA (UFPE)

---

Prof. Dr. ANÍBAL VERAS DE SIQUEIRA FILHO (ITEP)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Rosane Esposito Mendes e Alexandre Mendes de Oliveira, por todo apoio dado durante minha vida. Agradeço principalmente à minha mãe, por sempre me incentivar e estar presente em todos os momentos.

Aos meus avôs maternos, Maria do Socorro e Romildo, que graças a Deus ainda estão presentes na minha vida. À minha avó, por ser uma mulher guerreira e até hoje não deixa de ser feliz e trabalhadora, mesmo com os percalços da vida.

Aos meus avôs paternos, Lúcia e Álvaro, onde eu passei uma boa parte da minha infância brincando com meus primos naquele “enorme” terraço. E à minha avó Lúcia, que não está mais presente, mas sempre que eu olho para lua, eu me lembro de sua paixão pelos seus filhos e netos, nunca nos deixando sós.

À minha irmã Mariana, que sempre me apoiou nos momentos mais difíceis e me incentivou a sempre estudar e tirar boas notas. Com sua personalidade diferente da minha, me ensinou a ter paciência e bastante sabedoria para lidar com qualquer tipo de situação.

Ao meu amado Leonardo, que sempre me apoiou em todas as minhas escolhas, também me mostrando que nem sempre a vida é preto no branco. E mesmo com os problemas da vida, nunca deixamos de nos apoiar e ajudar. Agradeço também, pelo amor verdadeiro, crescido em meio de muita conversa, respeito, carinho e muito amor.

Ao Prof. Ricardo Arthur Sanguinett Ferreira, por acreditar na minha capacidade de elaborar esse trabalho de dissertação, usando de sua inteligência e capacidade para tirar o máximo de ideias de mim e me ajudar a visualizar o quanto nós podemos evoluir.

Ao Prof. Tiago Leite Rolim, por me mostrar que eu sou capaz. Por acreditar na minha capacidade de trabalho e sempre me apoiar nos desafios diários. E por fornecer os equipamentos necessários para a fabricação dos corpos de prova e medição das tensões.

A todos os meus amigos e colegas, que me acompanharam nesse curto período do mestrado.

Aos Professores da Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, por passarem todo o conhecimento que tenho adquirido ao longo desses anos.

Ao programa de formação de recursos humanos em tecnologia de equipamentos da Petrobras, PRH PB203. E ao coordenador, o Prof. José Maria Andrade Barbosa pela colaboração e apoio.

À Universidade Federal de Campina Grande pelo apoio necessário na realização do ensaio de DR-X.

Ao Estaleiro Atlântico Sul pelo fornecimento da matéria prima necessária para o trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio e disponibilidade de equipamentos para a realização no trabalho.

## RESUMO

A soldagem é um processo mecânico que une partes de componentes mecânicos, mas ao mesmo tempo, pode causar transtornos na montagem e operação desses componentes. Uma das grandes preocupações do processo de soldagem, é a tensão residual. Esse trabalho busca correlacionar os valores de tensões residuais longitudinal e transversais, com a tensão de recuo, fruto do efeito anisotrópico presente em chapas laminadas. As tensões residuais foram calculadas através do método teórico-experimental de deslocamento de pontos coordenados (DPC) e comparadas com o método consagrado de DR-X. O material utilizado foi um aço estrutural naval ASTM A131 Grau AH-36, soldado pelo processo MAG no sentido da laminação e transversalmente a ela. Após o processo de soldagem, foram feitos furos sobre a zona termicamente afetada (ZTA) e o cordão de solda. Suas coordenadas foram mapeadas a partir de um furo de referência, em uma máquina de medição por coordenadas (MMC). Posteriormente, as chapas passaram por um processo de alívio de tensão, onde ocorreram deslocamentos (escoamento) dos pontos em questão. A partir desses deslocamentos, as tensões residuais foram calculadas através da Lei de Hooke. Foi visto que os valores das tensões residuais calculadas pelo método DPC estão dentro do limite de tolerância dos valores medidos pelo método DR-X. A partir do ensaio de tração foi encontrada a tensão de recuo do material.

Palavras-chaves: tensões residuais, método DPC, tensão de recuo.

## **ABSTRACT**

Welding is a mechanical process which helps join together parts of components, whilst at the same time, causes great setbacks if not well specified. One of many worries of the welding process are residual stresses left on the material. This work intends to relate longwise and crosswise residual stresses values through back stress, a result of the anisotropic effect of welded rolled steel sheets. Residual stresses were calculated through the theoretic-experimental method of displacements of coordinated points (DCP) and compared with the well-known X-Ray method. The used material was a naval structure steel ASTM A131 grade AH-36, welded by MAG process, both by rolling direction and transverse to it. After the welding process, the sheets had some points drilled over the heat affected zone (HAZ) and the weld bead, which were later mapped from an origin reference point by a coordinate measurement machine (CMM). Then, the sheets were submitted to an annealing heat treatment in which the previously mapped points would be displaced (yielding). From these displacements, residual stresses were calculated by using Hooke's Law. It was seen that residual stresses values calculated by DCP method are within range of values measured by DR-X method. From the tensile strength test, the material back stress was found.

Key-words: residual stress, DCP method, back stress.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de um equipamento de soldagem MIG/MAG. ....	18
Figura 2. Representação esquemática da distribuição resultante da tensão residual longitudinal ao longo da espessura de chapa. ....	21
Figura 3. Esquema das tensões residuais longitudinais durante a soldagem. ....	22
Figura 4. Uma viga fraturada pela tensão residual. Temperatura ambiente e sem carga. ....	24
Figura 5. Flambagem em uma coluna. ....	25
Figura 6. Composição básica de um MMC. (Rolim, 2003). ....	27
Figura 7. Comparativo entre os métodos de medição de tensões residuais. ....	28
Figura 8. Modelo de incidência e de difração de feixes de raio-x em nível atômico. ....	30
Figura 9. Relação das dimensões analisadas pela técnica do furo cego. ....	32
Figura 10. Ciclo de carregamento do Efeito de Bauschinger. ....	36
Figura 11. Máquina MIG/MAG para soldagem da ESAB Smashweld 318 Topflex.e tartaruga utilizada para a soldagem semi-automática. ....	38
Figura 12. Processo de decapagem da chapa soldada. ....	40
Figura 13. Difratômetro portátil (Portable stress analyser STRESSRAD). ....	41
Figura 14. Distribuição dos pontos na chapa soldada. ....	42
Figura 15. Máquina de medição por coordenadas. ....	42
Figura 16. Microscópio eletrônico de varredura, modelo TM3000. ....	43
Figura 17. Comparação entre tensões na ZTA da direção y. ....	46

Figura 18. Comparação entre tensões no CS da direção y.....	46
Figura 19. Comparação entre tensões na ZTA da direção y com aporte térmico menor. .....	47
Figura 20. Comparação entre tensões no CS da direção y com aporte térmico menor. .....	47
Figura 21. Comparação entre tensões na ZTA da direção x. ....	48
Figura 22. Comparação entre tensões no CS da direção x.....	49
Figura 23. Comparação entre tensões na ZTA da direção x com aporte térmico menor. .....	49
Figura 24. Comparação entre tensões no CS da direção x com aporte térmico menor. .....	50
Figura 25. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 2. .....	51
Figura 26. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 3. .....	52
Figura 27. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 6. .....	53
Figura 28. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 7. .....	53
Figura 29. Macrografias das chapas 6 e 7. ....	55
Figura 30. Metal de base, ZTA e metal de adição a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 100x. ....	56
Figura 31. Metal de base a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 500x.....	57

Figura 32. MB e ZTA a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 300x.....58

Figura 33. ZTA e metal de adição a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 300x.....59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do aço ASTM A131 grau AH-36.....	16
Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço ASTM A131 grau AH-36.....	16
Tabela 3. Parâmetros de soldagem para cada chapa.....	39
Tabela 4. Medidas para a fabricação dos corpos de prova do ensaio de tração.....	39
Tabela 5. Resultados das propriedades mecânicas dos corpos de provas.....	44
Tabela 6. Deslocamentos dos pontos referenciados para as chapas na direção y...	44
Tabela 7. Tensões residuais das chapas na direção y.....	45
Tabela 8. Tensões residuais das chapas na direção x.....	47
Tabela 9. Influência da tensão de recuo. ....	50
Tabela 10. Influência da tensão de recuo para aporte térmico diferente.....	52
Tabela 11. Comparação entre tensão residual calculada entre DR-X e DPC. ....	53
Tabela 12. Comparação entre os métodos DR-X e DPC. ....	54

## LISTA DE ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas

ARBL – Alta Resistência E Baixa Liga

ASTM – American Society Of Testing And Materials

AWS – American Welding Society

CCC – Cúbica De Corpo Centrado

CFC – Cúbica De Face Centrada

DPC – Deslocamento De Pontos Coordenados

DR-X – Difração De Raio-X

GWAW – Gas Metal Arc Welding

MAG – Metal Active Gas

MEV – Microscópio Eletrônico De Varredura

MIG – Metal Inert Gas

MMC – Máquina De Medição Por Coordenadas

PVC – Policloreto De Vinila

Tin – Nitreto De Titânio

TTPS – Tratamentos Térmicos Pós Soldagem

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	14
2. Objetivos .....	15
2.1. Objetivo geral .....	15
2.2. Objetivos específicos .....	15
3. Fundamentação teórica .....	15
3.1 Aço ASTM A131 grau AH-36.....	15
3.2 Processo de soldagem MIG/MAG (GMAW).....	16
3.3 Tensões Residuais.....	19
3.3.1 Tipos de tensões residuais.....	20
3.3.2 Tensões residuais a partir do processo de laminação .....	20
3.3.3 Tensões residuais a partir do processo de soldagem .....	21
3.3.4 Efeitos das tensões residuais.....	24
3.5 Máquina de Medição por Coordenadas .....	27
3.6 Métodos de medições de tensões residuais.....	28
3.6.1 Difração por raio-x.....	29
3.6.2 Técnica do furo cego.....	32
3.6.3 Deslocamentos de pontos coordenados .....	33
3.7 Anisotropia .....	35

3.8 Efeito de Bauschinger .....	36
4. Materiais e Métodos .....	38
4.1 Metal de base .....	38
4.2 Equipamentos, processo e parâmetros de soldagem .....	38
4.3 Ensaio de tração .....	39
4.4 Ensaio para o método de difração de raio-x .....	40
4.5 Ensaio pelo método de deslocamento de pontos coordenados .....	41
4.6 Caracterização Macroestrutural e Microestrutural .....	43
5. Resultados e discussões .....	43
5.1 Ensaio de tração .....	43
5.2 Tensões residuais medidas por DR-X e DPC .....	44
5.2.1 Método de DPC .....	44
5.2.2 Método DR-X .....	53
5.3 Análise macroscópica .....	52
5.4 Caracterização microestrutural .....	55
6. Conclusões .....	59
7. Sugestões para trabalhos futuros .....	60
Referências .....	61
Apêndice – Memória de cálculo .....	64

## 1. Introdução

Com retomada da indústria naval, de petróleo e gás no Brasil, e com a necessidade de avanço da mesma, se fazem necessárias melhorias nas condições de construção, na manutenção e no reparo de equipamentos. E muitas dessas melhorias advêm das pesquisas realizadas em prol da evolução industrial.

Um dos problemas recorrentes é o efeito das tensões residuais. Altos valores de tensões residuais repercutem significativamente na integridade estrutural do componente soldado. Por exemplo, em vasos de pressão, o efeito da tensão residual pode provocar falha prematura do componente. Estas tensões residuais produzem grandes distorções que comprometem tanto a integridade quanto a montagem, significando um alto custo para a indústria. Com o fácil conhecimento das tensões residuais, o tempo e o custo de montagem de um casco de navio por exemplo, irá diminuir, e, conseqüentemente, o ambiente de trabalho se tornará favorável à produção de qualidade em larga escala. As tensões residuais podem ainda comprometer a segurança operacional da unidade, sendo algumas vezes necessária a realização de testes hidrostáticos ou tratamentos térmicos pós soldagem (TTPS) para alívio das mesmas (Oliveira, 2009). Essas tensões internas existem em corpos moldáveis sujeitos a condições não-uniformes de temperatura, mesmo na ausência de carregamentos externos e de forças de massa (Gurova, 1997).

Para determinar os valores das tensões residuais em juntas soldadas existem alguns métodos, passando dos mais tradicionais como o método de Difração de Raio-X, chegando até métodos analíticos, onde problemas como a falta de linearidade dos fenômenos mecânicos não foram resolvidos. Esse trabalho busca aprimorar um método em desenvolvimento, cujos resultados preliminares mostraram uma boa correlação com os resultados obtidos por DR-X, de forma rápida, segura e de baixo custo.

O método DPC – Deslocamento de Pontos Coordenados tem como princípio as medições das extensões do deslocamento de pontos previamente mapeados numa Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). Com esses valores, as tensões residuais calculadas são comparadas aos valores obtidos por Difração de Raio-X (DR-

X). Porém, Siqueira Filho (2012) observou que as tensões residuais calculadas em sentidos diferentes apresentam valores discrepantes. A causa dessa diferença foi sugerida devido aos efeitos anisotrópicos de chapas laminadas.

Nesse trabalho, a metodologia teórico-experimental apresentada por Siqueira Filho (2012) será aprimorada de modo que os resultados obtidos reproduzam valores de tensões residuais mais próximos nos dois sentidos calculados.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo geral

Cálculo de tensões residuais pelo método de Deslocamento de Pontos Coordenados - DPC, considerando-se o efeito da anisotropia de chapas navais laminadas.

### 2.2. Objetivos específicos

- Medir as extensões (deslocamento de pontos) produzidas no material após tratamento para alívio de tensões (recristalização parcial/recuperação no material);
- Calcular os valores das tensões residuais baseado nos deslocamentos medidos, considerando o estado plano de tensões.
- Encontrar uma relação entre tensões residuais do cordão de solda e da ZTA de chapas de teste soldadas em dois sentidos de laminação.

## 3. Fundamentação teórica

### 3.1 Aço ASTM A131 grau AH-36

O aço ASTM A131 grau AH-36 é específico para a construção naval. Ele é um aço com alta resistência à tração e de baixa liga utilizado, principalmente, em casco de navios e plataformas, ou seja, apresenta boas propriedades de tenacidade, resistência mecânica, resistência à corrosão, facilidade para conformação e propriedades de soldagem. Esse tipo de aço pode ser utilizado na fabricação de navios, cujos pesos podem ser superiores a 10 mil toneladas. A composição química normatizada desse aço é mostrada na tabela abaixo.

Tabela 1. Composição química do aço ASTM A131 grau AH-36.

Grau	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	Nb
	max	max		max	max	min	max	max	max	max	max	
AH-36			0,90									0,02
	0,18	0,50	-	0,035	0,035	0,015	0,02	0,35	0,20	0,40	0,08	-
			1,60									0,05

(ASTM A131, 2015)

Assim como as propriedades mecânicas do aço na tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço ASTM A131 grau AH-36.

Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa) min	Alongamento % min	Akv/ J min						
			Temperatura experimental	Espessura (mm)					
490-630	355	21		0					
			≤ 50		> 50-70		>70-100		
			SC		SL	SC	SL	SC	SL
				34	24	41	27	50	34

Nota: SC: sentido do comprimento e SL: sentido da largura. (shipbuilding) (ASTM A131, 2015)

Esse aço permite um acréscimo substancial da carga unitária da estrutura ou a diminuição proporcional da seção. Melhora a resistência ao choque, o limite de fadiga, e eleva a relação entre limite de escoamento e o limite de resistência à tração sem perda apreciável da ductilidade. Essas características não se encontram em outros tipos de aços ou ligas metálicas, a um custo comparável.

### 3.2 Processo de soldagem MIG/MAG (GMAW)

Soldagem MIG/MAG é um método no qual a fonte de calor requerido para fundir o metal é gerada por um arco elétrico formado pela corrente elétrica passando entre o arame nu consumível (alimentado continuamente) e a peça de trabalho. A proteção da região a ser soldada é feita por uma atmosfera de gás inerte e/ou ativo. A nomenclatura MIG é um acrograma advindo do inglês, onde representa *Metal Inert Gas* e MAG representa *Metal Active Gas*. Por muitas vezes se utilizar misturas de gases, a *American Arc Welding* (AWS), normatizou esse processo de GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

Esse processo pode ser de forma automática ou semiautomática. Quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, se diz que o processo é automático. E quando se faz necessário um operador para realizar o movimento da tocha, este é

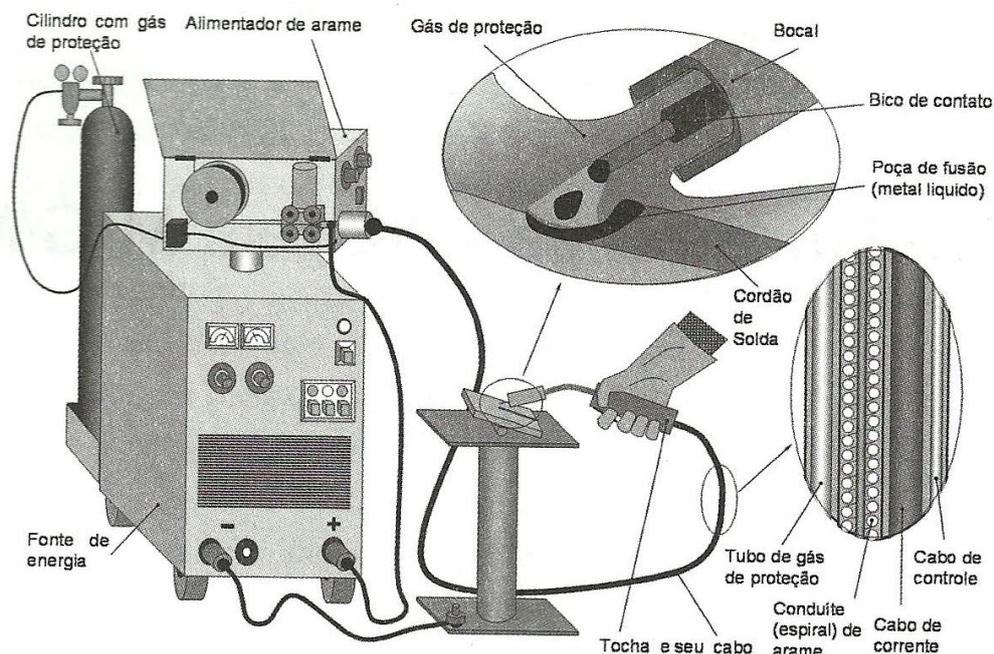
dito um processo semiautomático. Em ambos os casos, a alimentação do arame-eletrodo é feita mecanicamente. O arame-eletrodo é chamado assim, pois a partir do ponto de contato elétrico até o metal de base, ele passa a ter a função de condutor elétrico.

O enorme calor desenvolvido pela passagem da corrente pelo arame-eletrodo e a chapa consegue fundir a extremidade do arame e as bordas adjacentes das peças de trabalho, criando uma poça de metal fundido. Esta poça está em um estado líquido bem fluido e turbulento. À medida que o cordão de solda é constituído, a parte fundida do fluxo se resfria e solidifica, formando um material duro e vítreo, que protege a solda até seu resfriamento, sendo obrigatória a posterior retirada.

O gás de proteção tem as funções de ser um meio ionizante e de evitar a contaminação do arame-eletrodo, das gotas de metal fundido em transferência, da poça de fusão pelos gases da atmosfera, conferindo as propriedades de estabilidade do arco e controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal de base.

Para o processo de soldagem GMAW alguns parâmetros pré-determinados são: tipo ou espessura do metal de base, propriedades requeridas para o metal de solda e os parâmetros decididos na fase inicial da produção tais que, são determinados em função da disponibilidade de equipamentos, como o tipo de gás de proteção, projeto da junta, posicionamento da tocha. Ainda, os parâmetros primários, como a corrente, a tensão, a velocidade de soldagem, o diâmetro do arame, a distância bico-peça e a velocidade de alimentação do arame. O equipamento básico consiste em uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás de proteção, como mostrado na figura 1.

Figura 1. Esquema de um equipamento de soldagem MIG/MAG.



(Scoot, América).

A fonte de energia tem o papel de fornecer saídas de correntes e tensão em níveis e com características adequadas para o processo, permitindo a regulação e controle da variação da corrente e tensão dos processos que se destinam. O alimentador de arame consiste em um sistema que impulsiona o arame na direção da tocha, alimentando o material de consumo e trabalha interligado com a fonte de energia. A tocha de soldagem faz parte do sistema de alimentação do arame, juntamente com a fonte de energia. O gás se origina num cilindro à parte, sendo transferido pelo cabo, juntamente com o arame.

Para controlar o tamanho do cordão e sua penetração, a velocidade de soldagem é de fundamental importância. Ela não pode ser excessivamente alta, pois aumenta a tendência a mordeduras, porosidade, trincas e cordões com formato não uniforme. Se for excessivamente baixa, os cordões ficaram sujeitos à trincas e poças de fusão largas, resultando num cordão áspero e com possíveis inclusões de escória, e respingos.

Outro parâmetro importante é a energia de soldagem, calculada a partir da eficiência do processo de soldagem, da corrente, da tensão e da velocidade de soldagem. A energia de soldagem representa a quantidade de calor adicionada a um

material por unidade de comprimento linear, expressa em kJ/mm, kJ/cm ou J/mm. A energia de soldagem (ou aporte térmico) é calculada pela equação (3.1):

$$E = \frac{\eta \times V \times I}{v} \quad (3.1)$$

Onde:

$\eta$  - eficiência de transferência, a depender do processo;

$V$  - tensão em volts (V);

$I$  - corrente elétrica em ampères (A);

$v$  - velocidade linear de soldagem, em mm/s.

Como uma regra geral, quando o aporte térmico empregado nos testes conforme a norma AWS, ultrapassa o valor de 2,3 kJ/mm, a tenacidade e a resistência da solda serão menores que os previstos pelos fabricantes das máquinas de soldagem.

O fluxo de calor durante a soldagem afeta as transformações de fase, modificando, assim, a microestrutura, o ciclo térmico e as propriedades resultantes na área afetada pelo processo. Conseqüentemente, é esse o grande responsável pela existência das tensões residuais e distorções.

### 3.3 Tensões Residuais

Tensões residuais são definidas como as tensões internas que permanecem no material, elemento mecânico ou produto final ao se encerrarem os esforços mecânicos e/ou térmicos. As tensões residuais podem ser prejudiciais para o desempenho de um material ou a vida de um componente mecânico.

As tensões residuais dificilmente podem ser previstas com exatidão, pois para isto é necessário conhecer a história do material da peça, desde o processo de fabricação da matéria prima até o processo de fabricação e montagem do produto final em serviço (Suterio, 2005). Tensões residuais podem ser classificadas pela origem (termicamente ou mecanicamente), pela escala na qual elas estão auto equilibradas ou segundo o método pelo qual elas são medidas. Essas tensões residuais podem ser originadas por um desequilíbrio em diferentes regiões do material (Oliveira, 2009).

Como um exemplo, a deformação plástica não-homogênea de uma chapa laminada, porém podendo também surgir com um elevado gradiente de temperatura, como no caso de soldagem de chapas.

### 3.3.1 Tipos de tensões residuais

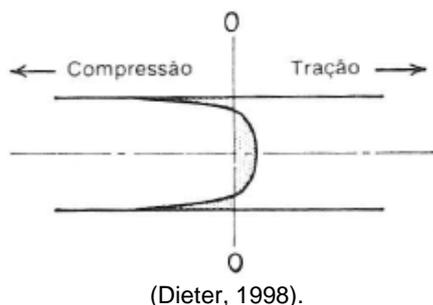
Existem três tipos de tensões residuais. As do tipo I, chamadas de macro tensões são constantes ao longo de um grande número de grãos e estão equilibradas nos limites da amostra inteira ou de uma determinada peça. As do tipo II acontecem pela interação entre os grãos de uma mesma fase ou entre fases diferentes, ou ainda entre partículas presentes no interior do material, como precipitados e inclusões. Estas são mais significativas em materiais que apresentam microestruturas complexas, formadas por várias fases ou que estão sujeitos a transformação de fases. Por fim, as do tipo III são constantes na ordem atômica e originam-se pela coerência entre interfaces e campos de discordâncias (Oliveira, 2009).

### 3.3.2 Tensões residuais a partir do processo de laminação

No processo de laminação, as tensões residuais são introduzidas pelas deformações plásticas não-homogêneas causadas pelos esforços de compressão dos rolos sobre a chapa.

Na laminação de chapas grossas, 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. As fibras da parte central tendem a impedir as fibras superficiais de se alongarem, enquanto as fibras superficiais esticam as da parte central da chapa. Essa diferença no comportamento das fibras resulta em uma distribuição de tensões residuais na chapa, que consiste em elevadas tensões compressivas na superfície e tensões trativas no centro, mostrada na figura 2 (Dieter, 1988).

Figura 2. Representação esquemática da distribuição resultante da tensão residual longitudinal ao longo da espessura de chapa.



Quando a chapa laminada apresenta deformação homogênea, as fibras superficiais que foram alongadas na direção longitudinal pela laminação permanecem em um estado de tensões residuais compressivas ao se remover a carga externa de laminação.

Para este caso de tensões residuais longitudinais apresentado na figura 2, a área sob a curva para as tensões residuais compressivas deve se equilibrar com a área sob a curva para as tensões residuais trativas, assim tornando a força total e o momento total em qualquer plano nulos. Entretanto, é importante apontar que a situação real se torna complexa devido à presença de um estado de tensões residuais tridimensional.

Quando na laminação existir expansão ou contração térmica não uniforme devido ao aquecimento e/ou resfriamento não controlados, as tensões residuais surgirão da mesma forma que a deformação plástica homogênea.

### 3.3.3 Tensões residuais a partir do processo de soldagem

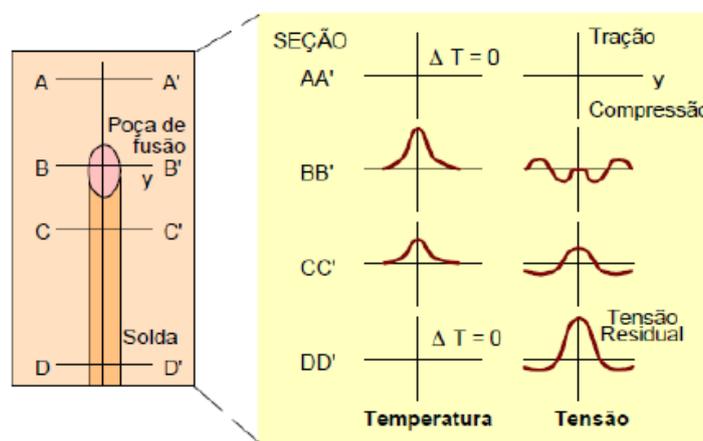
No caso da soldagem, as tensões residuais são introduzidas pelo elevado gradiente de temperatura devido ao aquecimento e resfriamento não uniforme. As três principais fontes para a produção das tensões residuais no processo de soldagem são decorrentes à contração no resfriamento, ao resfriamento superficial intenso e à transformação de fases.

#### 3.3.3.1 Tensões residuais devido à contração no resfriamento

As tensões residuais na soldagem devido ao processo de resfriamento, ocorrem quando as regiões aquecidas e resfriadas são vizinhas. Essa diferença de

temperatura fará com que o material dilate e resfrie de forma diferente dependendo da temperatura que cada região vá atingir, de modo que a região do cordão de solda e a sua vizinhança apresentarão tensões térmicas diferentes. Porém, no processo de soldagem de chapas, se existir algum tipo de restrição ao movimento de contração e dilatação, como por exemplo, ponteamto da chapa, surgirão as tensões térmicas residuais à temperatura ambiente. Para o cordão de solda, o acúmulo de tensões térmicas será do tipo tração, atingindo valores da ordem do limite de escoamento do material da solda.

Figura 3. Esquema das tensões residuais longitudinais durante a soldagem.



(Modenesi, 2008).

A figura 3 representa graficamente o comportamento da variação de temperatura e das tensões nas regiões da poça de fusão e da zona termicamente afetada. Na seção A-A' a poça de fusão não atingiu o material, sendo assim, não existe variação de temperatura e tensão ao longo da direção Y (direção do cordão de solda). Na seção B-B', a tensão na direção y (direção do cordão de solda) é próximo de zero, pois a poça de fusão não suporta carga. Nas regiões distantes da fonte de calor, as tensões são do tipo compressivas, uma vez que a expansão dessa área é restrita pelo material ao redor, que está a temperaturas inferiores. Por causa da baixa tensão de escoamento do material à alta temperatura, nestas áreas, a tensão residual na direção y (direção do cordão de solda) alcança a ordem da tensão de escoamento do metal de base (Oliveira, 2009).

A seção C-C' representa o cordão de solda no começo da solidificação, ainda a uma temperatura elevada, mas, abaixo da temperatura da seção B-B'. Na seção C-

C', o material começa a resfriar e tende a contrair. Este movimento é impedido pelo material ao redor que está a temperaturas mais baixas. Essa diferença na tendência das regiões de contrair e expandir, resulta em tensões trativas no cordão de solda. Enquanto isso, na ZTA o material tende a dilatar, em função da dissipação do calor do cordão de solda para o metal de base, gerando tensões compressivas. Após o resfriamento completo, na seção D-D', as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material.

### 3.3.3.2 Tensões residuais devido ao resfriamento superficial intenso

As tensões residuais devido ao resfriamento superficial intenso acontecem ao longo da espessura da junta soldada, já que a parte exposta ao ar ambiente resfria mais rápido que a parte interna. Quando o processo de resfriamento começa, a superfície se contrai rapidamente em relação ao interior da peça, provocando assim o escoamento localizado do material que por sua vez, provocará a existência da tensão residual. Observa-se que as tensões são mais intensas na soldagem de chapas ou tubulações com grandes espessuras. (Oliveira, 2009)

### 3.3.3.3 Tensões residuais devido à transformação de fases

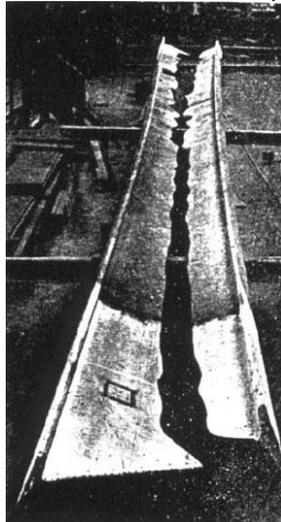
As transformações de fases ocorrem no estado sólido em ligas de aço carbono e são responsáveis por muitas das vezes provocar tensões residuais ao final da solidificação. Quando o material resfria a partir da fase sólida austenita, ocorre a formação de várias outras fases, como a ferrita, a perlita, a bainita e a martensita. Esse mecanismo de transformação de fase pode ser de dois tipos, sendo o primeiro chamado de difusional, no qual a transformação ocorre pelo movimento de átomos termicamente ativados, que se deslocam da sua posição original no reticulado. Esse mecanismo pode ser substitucional ou intersticial, e as principais fases obtidas a partir do campo austenítico são a ferrita e a perlita. O outro mecanismo de transformação é chamado de não-difusional, e as fases são formadas por um mecanismo de deslizamento devido à ação de tensões cisalhantes originadas quando o material é resfriado rapidamente a partir do campo austenítico, transformando a austenita em bainita (difusão + cisalhamento) ou martensita e não permitindo a decomposição da austenita em outras fases (Porter & Easterling, 2006).

No caso da soldagem, as regiões onde provavelmente ocorrem essas transformações são a zona fundida e a zona termicamente afetada. Essas transformações de fases são influenciadas pelo tamanho do grão, o pico de temperatura atingida e a velocidade de resfriamento.

#### 3.3.4 Efeitos das tensões residuais

As tensões residuais podem modificar o comportamento mecânico de componentes e estruturas soldadas. Os materiais que se deformam plasticamente podem falhar pela formação e propagação de trincas no material, sendo para isso necessária a existência de uma tensão residual trativa na ordem da tensão de escoamento do material. A figura 5 mostra uma coluna fraturada a temperatura ambiente devido à existência de trincas e tensão residual de tração, produzidas pelo processo de conformação (Hosford, 2005).

Figura 4. Uma viga fraturada pela tensão residual. Temperatura ambiente e sem carga.



(Hosford, 2005).

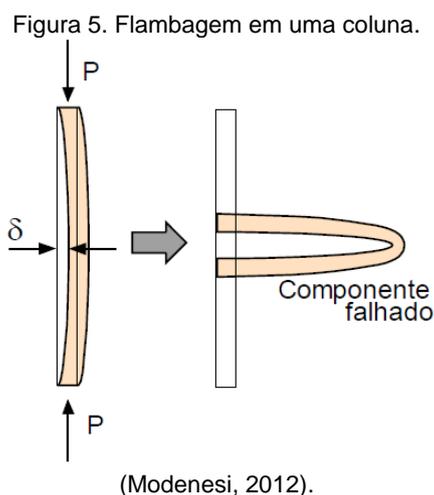
Falhas por fadiga, fissuras de corrosão sobre tensão e fraturas frágeis são defeitos que se iniciam na superfície de uma peça e tendem a acontecer sob tensão de tração ao invés de compressão (Hosford, 2005).

#### 3.4.4.1 Efeitos específicos na presença de tensões residuais em componentes soldados

- Flambagem:

Este tipo de efeito pode acontecer com materiais que apresentam perfil longo e delgado, e que estão sujeitos a compressão. Se ocorrer uma aplicação de tensão axial de compressão suficientemente elevada, uma força lateral infinitamente pequena pode causar uma deformação lateral ( $\delta$ ) grande do perfil.

Em algumas situações, a flambagem pode levar à falha rápida de um componente submetido a uma tensão, em geral, menor que o limite de escoamento do material (fig. 8). Em outras situações, embora não chegue a causar a falha final do componente, a flambagem pode levar ao aparecimento de distorções intensas na estrutura (Modenesi, 2012).



As juntas soldadas feitas em chapas de pequena espessura podem ter aspectos irregular ou “enrugado” devido à flambagem resultante das tensões térmicas e residuais.

- Falha por fadiga

Fadiga é um mecanismo de falha que envolve a nucleação, crescimento e propagação de trincas no material devido a esforços mecânicos variáveis no tempo. Essa é a forma mais comum de falha de um componente mecânico.

A falha por fadiga tende a acontecer com cargas inferiores ao limite de escoamento do material e em períodos de tempo inferiores ao projetado. Os defeitos superficiais existentes na peça facilitam a nucleação da trinca e reduzem o tempo de

vida esperado de uma peça. Desta forma, a presença de tensões residuais de compressão na superfície de um componente reduz localmente o valor da sollicitação mecânica e, desta forma, dificultam a iniciação de trincas de fadiga (Modenesi, 2012).

- Trincas de solidificação

As trincas de solidificação ocorrem devido à presença de fase líquida no interior do cordão de solda ou metal de base, no final da solidificação. Outro fator que influencia a formação de trincas é o padrão de solidificação, onde algumas condições de solidificação levam ao crescimento de grãos colunares no interior da poça de fusão.

Outro tipo de trinca que pode acontecer na chapa soldada, é a trinca causada pela fissuração a frio. Ela é induzida pela presença de hidrogênio e só é observada dias após o processo de soldagem, acontecendo comumente na ZTA, perto da linha de fusão, ou ainda, na ZF. A trinca por fissuração a frio nucleia em pontos de altos níveis de tensão, como na raiz do cordão de solda, por exemplo. Porém, para que esta ocorra, é preciso combinar a presença de três condições: de tensões trativas, de hidrogênio e de uma microestrutura frágil (martensita, por exemplo).

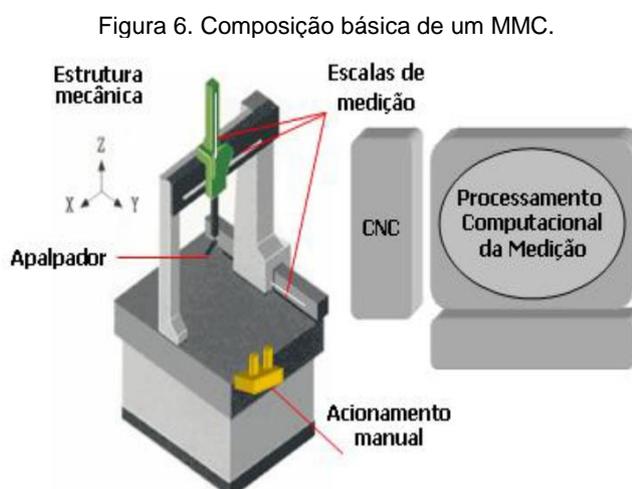
Para reduzir a probabilidade desses efeitos em componentes soldadas são realizados tratamentos térmicos para o alívio das tensões residuais oriundas do ciclo térmico de soldagem. Os tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS) são amplamente empregados nos procedimentos de soldagem de aços de baixa liga, C-Mn e aços ao carbono, com objetivo de reverter a microestrutura, reduzindo assim a dureza da ZTA e, quando necessário, remover hidrogênio da peça. O TTPS consiste em aquecer a peça ou estrutura em temperatura elevada (acima de 550°C), de tal forma que ocorra uma redução no limite de escoamento do material, o qual deverá ser inferior às tensões residuais. Desta forma, as tensões residuais serão elevadas o suficiente para promoverem deformações plásticas localizadas no material, e, assim, diminuirão de intensidade. Segundo Bailley (1994), a redução das tensões residuais de soldas de aço C-Mn tratados termicamente à 600°C pode chegar a 70%.

### 3.5 Máquina de Medição por Coordenadas

A máquina de medição por coordenadas apresenta características de flexibilidade, alta velocidade de medição, baixo nível de incertezas e alta aplicabilidade. Foi desenvolvida para melhorar os métodos convencionais de medição, apresentando uma medição confiável, dentro dos padrões de tolerância especificados. O objetivo dessa máquina é determinar parâmetros dimensionais através da medição das coordenadas ( $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ ) de pontos sobre a superfície de uma peça e processar estes parâmetros matematicamente (Rolim, 2003).

Acompanha a máquina um programa computacional com algoritmos matemáticos adequados para ajustar os pontos coordenados às geometrias (conhecidas como geometrias substitutas), que modela a peça a ser medida, resultando em vários tipos de medições. O método dos mínimos quadrados é o mais utilizado pelos fabricantes de máquinas de medição por coordenadas para ajustar os pontos coordenados para obtenção das geometrias substitutas (Rolim, 2003).

A máquina é composta por um conjunto de sistemas integrados e realiza a materialização de um sistema de coordenadas espaciais em uma determinada peça. Os eixos do sistema cartesiano são representados por um sistema de guias com mancais aerostáticos e escalas optoeletrônicas, ou por um sistema a laser, para determinar as coordenadas com um cabeçote apalpador montado para funcionamento em um dos eixos coordenados (Rolim, 2003).



(Rolim, 2003)

Uma MMC é formada por equipamentos mecânicos (estrutura de sustentação, mesa, mancais, guias eixos e acionamentos), eletroeletrônicos (servo-motores, controladores, cabeçotes apalpador, circuitos de controle), ópticos (escalas de medição optoeletrônicas), com funcionamento integrado gerenciado por um computador e através de processamento computacional para medição.

### 3.6 Métodos de medições de tensões residuais

Todos os materiais sólidos deformam quando submetidos a carregamento externos e se essa deformação for do tipo plástica, existirá deformação permanente no material após a carga ser removida. É bem estabelecido que, na maior parte da região elástica, a deformação é diretamente proporcional à carga. Esta é conhecida como Lei de Hooke. Então, é com base nessas características e nas leis que governam as relações entre tensão e deformação que muitos métodos para medição de tensões residuais funcionam.

Lu (1996) mostrou informações mais detalhadas sobre alguns métodos de medições de tensões residuais. Essas informações são mostradas na figura 7.

Figura 7. Comparativo entre os métodos de medição de tensões residuais.

<b>Método</b>	<b>Magnético</b>	<b>Ultra-som</b>	<b>Raio-X</b>
Tipo de tensão medida	Tipo I, II e III	Tipo I, II e III	Tipo I, II ou III
Parâmetro medido	Amplitude do efeito <i>Barkhausen noise</i> e permeabilidade magnética.	Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.	Variação da distância interplanar
Profundidade máxima de inspeção	0,1 a 1mm.	0,015 a 3mm	1 a 50 $\mu$ m
Tempo estimado de medição de um ponto	Instantâneo	Alguns minutos	20 minutos
Sistema de medição portátil.	Sim	Sim	Sim
Precisão usual	$\pm 10$ a 20 MPa	$\pm 10$ a 20 MPa	$\pm 20$ MPa
Vantagem	Facilidade de uso, rapidez.	Facilidade de uso, rapidez. Permite medir tensões internas.	Técnica bastante desenvolvida e precisa.
Desvantagem	Aplicável somente em materiais magnéticos. Sensível à microestrutura.	Extremamente sensível à microestrutura.	Necessita de cuidados extras com relação à radiação. Pequena penetração.

(Lu, 1996).

### 3.6.1 Difração por raio-x

O raio-X foi descoberto por Wilhelm Conrad Röntgen na Alemanha, no final o século XIX. A partir desta descoberta, inúmeros estudos passaram a investigar os efeitos e aplicações deste tipo de radiação. Willian Henry Bragg e William Lawrence Bragg estudaram o comportamento da difração do raio-X em um cristal de rocha de NaCl e posteriormente desenvolveram uma equação capaz de relacionar o resultado do experimento de difração de raio-X com a estrutura do material.

Desde então, esta equação passou a ser conhecida como Lei de Bragg.

$$n\lambda = 2d \times \text{sen } 2\theta \quad (3.2)$$

Onde:

n= um número inteiro;

$\lambda$ = comprimento de onda (Å ou nm);

d= distância interplanar (Å ou nm);

$\theta$ = ângulo entre feixe incidente e o plano difrator (grau).

Essa equação foi desenvolvida através da incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por algum dispositivo. A difração do feixe ocorre pela colisão da onda com obstáculos na estrutura do material, que podem ser elétrons ou átomos.

Caso a difração ocorra de forma construtiva, a onda espalhada apresentará a mesma fase e mesma energia da onda incidente. Este tipo de espalhamento é característico em colisões elásticas. Quando a difração não ocorre na mesma fase e mesma energia incidente, o espalhamento é chamado de inelástico, o seu espalhamento ocorre sem uma direção determinada. Este processo é conhecido como Efeito Compton (Noyan & Cohen, 1987; Sasaki, 2000).

Para materiais cristalinos, cujos átomos estão dispostos regularmente em uma estrutura periódica, verifica-se que a distância entre os planos de átomos é perfeitamente regular, assim para cada tipo de material será apresentado uma



através da determinação do perfil de difração por meio de um feixe monocromático de raio-X.

Para determinar a tensão residual pelo método de raio-X se utiliza a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{d\psi - d_{\perp}}{d_{\perp}} \times \frac{E}{1+\nu} \times \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (3.3)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão residual (MPa);

$d\psi$  = distância interplanar, ângulo de incidência e  $\psi$  (Å);

$d_{\perp}$  = distância interplanar, ângulo de incidência e a normal (Å);

E = módulo de Young (GPa);

$\nu$  = Coeficiente de Poisson;

$\psi$  = ângulo de incidência (grau).

Os primeiros relatos de medição de deformações e tensões por raio-X são datados de 1922, tendo sido realizados por Joffe e Kirpicheva no Instituto de São Petesburgo (Joffe & Kirpicheva, 1922; Eigenmann & Macherauch, 1996). Em 1925 Lester e Aborn propuseram um método de medição de tensões residuais por difração de raio-x, o qual passou a competir a partir de 1930 com os métodos mecânicos existentes.

Desde então, extraordinários avanços sobre a determinação das tensões em materiais vêm sendo realizados, seguindo principalmente duas grandes vertentes. A primeira diz respeito à melhor compreensão da relação entre a deformação da rede cristalina e as tensões macroscópicas, especialmente em materiais que apresentam textura cristalográfica ou são anisotrópicos (Welzel & Mittemeijer, 2003). A outra linha de progresso que contribuiu para os avanços na tensometria por DR-X é de cunho tecnológico com o desenvolvimento de detectores que substituíram o uso de filmes, com a utilização de computadores que passaram a controlar parcial ou completamente os difratômetros, e com os pacotes de softwares que tornaram possível a redução dos

tempos de medição em níveis similares aos obtidos pelo uso de extensômetros (Sprauel & Castex, 1991).

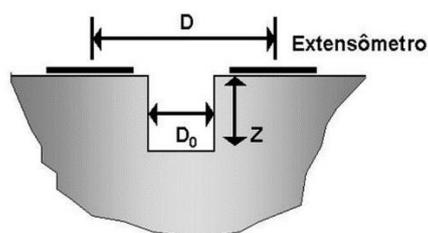
A incerteza do método de DR-X é bastante afetada por três parâmetros metalúrgicos: o tamanho do grão ou as impurezas e os vazios, que são muitas vezes difíceis de se quantificar para a correção do método. Para que esses parâmetros não influenciem nas medições é importante que se trabalhe com materiais com comportamento linear elástico, policristalinos (pelo menos na região irradiada) e cujas tensões são constantes na área irradiada. Ao se trabalhar com essas condições, a incerteza do método é cerca de  $\pm 15$  MPa, influenciada pela incerteza de medição dos ângulos pelo goniômetro, na ordem de 0,5 min.

Atualmente, dentre todas as técnicas de medição de tensões residuais, a difração de raio-X é considerada um método não-destrutivo para o corpo de prova, permitindo a avaliação de tensões sem comprometer a integridade da peça ou componente (Lu *et al.*, 1994; Lu, 1996; Noyan & Cohen, 1987). Porém, ainda é um método caro e de difícil utilização em grande escala industrial.

### 3.6.2 Técnica do furo cego

A técnica consiste em usinar um pequeno furo na superfície do componente a ser analisado. Esse processo de usinagem provoca o alívio das tensões existentes que atuam no volume do material removido, que por sua vez provoca mudança no estado de deformação em pontos do furo. Para detectar dessa deformação do furo são utilizados extensômetros colados próximos à região onde foi usinado o furo. O diâmetro do furo utilizado para desenvolver essa técnica foi de 1,8 mm e com profundidade de 40% do diâmetro do furo, como mostrado na figura 9 (Fry, 2000).

Figura 9. Relação das dimensões analisadas pela técnica do furo cego.



(Fry, 2000)

O extensômetro especial grava a deformação do furo nas três direções e a partir destes dados é possível calcular as tensões residuais assumindo o estado plano de tensões (Fly, 2000). Não existe um cálculo direto para determinação da tensão residual a partir da teoria da elasticidade, exceto pela introdução de coeficientes empíricos devido à geometria do furo cego, em função dos efeitos de borda e deformação, sendo muito complexo.

A incerteza de medição está entre 10 e 20% do valor medido ou 10% da tensão de escoamento, considerando o uso em campos de tensão uniformes e empregos de técnicas de medição adequadas (Prevey, 1986). Esse método exige uma etapa de calibração experimental ou computacional (Kockelmann, 1993). No caso de campos de tensões residuais uniformemente distribuídas na espessura do material, as constantes de calibração já foram estabelecidas por procedimentos experimentais e/ou numéricos (Soares, 2003).

Essa técnica pode ser aplicada em laboratório ou em campo sobre corpos de prova com grande variedade de forma e tamanho. É uma técnica considerada "semidestrutiva" quando o furo usinado não provocar danos significativos na integridade estrutural do objeto que está sendo testado.

### 3.6.3 Deslocamentos de pontos coordenados

O método DCP foi desenvolvido por Siqueira Filho em 2012 como um método teórico-experimental alternativo ao método do furo cego. O DCP mede as tensões residuais utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas. Os resultados obtidos com esse método apresentaram valores de tensões residuais longitudinais bastante coerentes, quando comparado ao método de difração de raio-x. Porém, os resultados das tensões residuais transversais apresentaram em alguns pontos mapeados, valores discrepantes quando comparado com o DR-X. Siqueira Filho (2012) concluiu que essa discrepância de valores é justificada pela anisotropia do material laminado.

O método consiste em realizar pequenos furos com broca de centro de 2,5 mm de diâmetro por 2 mm de profundidade e, em seguida cada coordenada (x,y) do centro

dos furos deve ser mapeada na Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) com controle numérico computadorizado. Para o mapeamento dos pontos é preciso realizar um ponto de referência em cada chapa. Após essa etapa o material deve ser submetido a um tratamento térmico para o alívio de tensões com temperatura inferior à de recristalização do material. Ao término do tratamento térmico do material os pontos mapeados sofrerão deslocamentos devido ao escoamento do material e com isso, deverão ser novamente mapeados, a partir do ponto de referência, de acordo com a técnica de medição por coordenadas, que determina os parâmetros dimensionais através da medição das coordenadas de pontos sobre a superfície de uma peça e processa matematicamente (Rolim, 2003), possibilitando a cálculo das deformações através das equações 3.4 e 3.5 para o sentido longitudinal e transversal, respectivamente:

$$\varepsilon_x = \frac{X_f - X_i}{X_i} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{Y_f - Y_i}{Y_i} \quad (3.5)$$

$\varepsilon_x$ : deformação específica na direção x;

$\varepsilon_y$ : deformação específica na direção y;

$X_i$ : Coordenada inicial do ponto na direção x (mm);

$X_f$ : Coordenada final do ponto na direção x (mm);

$Y_i$ : Coordenada inicial do ponto na direção y (mm);

$Y_f$ : Coordenada final do ponto na direção y (mm).

Com os valores das deformações específicas nas duas direções, as tensões residuais no estado plano de tensões geradas pelo processo de soldagem podem ser calculadas pelas equações 3.6 e 3.7 (Okumura, 1982):

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (3.6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (3.7)$$

$\sigma_x$ : tensão residual transversal – direção normal à linha de solda (MPa);

$\sigma_y$ : tensão residual longitudinal – direção da solda (MPa);

$\epsilon_x$ : deformação específica normal a linha de solda;

$\epsilon_y$ : deformação específica na linha de solda;

E: módulo de elasticidade do material (GPa);

$\nu$ : coeficiente de Poisson.

Segundo Okumura os valores das tensões residuais  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são obtidos pela medição de  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ , que são os valores das deformações residuais nos pontos onde se deseja conhecer as tensões residuais.

### 3.7 Anisotropia

A anisotropia acontece em materiais policristalinos, que são constituídos de pequenos cristais, denominados grãos, os quais são separados por contornos de grão. Cada grão tem orientação cristalográfica diferente, ou seja, os planos e as direções cristalinas têm orientações aleatórias, uns em relações aos outros. Porém, os agregados policristalinos podem apresentar orientações preferenciais ou textura cristalográfica.

A textura cristalográfica pode ser genericamente definida como uma condição na qual a distribuição de orientações dos grãos de um policristal não é aleatória, entretanto, ela representa a forma como a rede cristalina desses grãos é arranjada especialmente. Uma maneira de obter essa textura é por meio de deformação plástica.

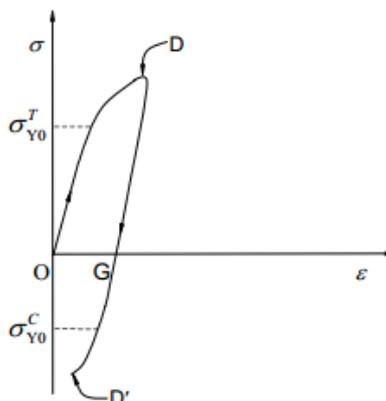
Todavia, a maioria dos metais policristalinos possuem uma orientação preferencial e eles tendem a ser anisotrópicos. Essa anisotropia apresenta níveis de intensidade, que depende do grau de alinhamento dos cristais, sendo observada em materiais metálicos. Esses materiais podem apresentar dois tipos de anisotropia. O primeiro tipo é a anisotropia cristalográfica, onde as orientações preferenciais dos grãos são produzidas por uma deformação plástica no material. Esse tipo de anisotropia é mais frequente em metais não-ferrosos, quando são conformados na forma de chapas finas. Um exemplo clássico desse tipo de anisotropia é a deformação não uniforme em conformação por estampagem profunda. A tensão de escoamento e a resistência mecânica são as propriedades mais afetadas. O segundo tipo é chamado

de fibramento mecânico e é causado devido ao alinhamento preferencial de descontinuidades estruturais como inclusões, vazios, segregações e outras fases na direção de trabalho da deformação plástica. Este tipo de anisotropia é importante em peças forjadas ou placas grossas. Portanto, a anisotropia está associada com a variação do espaçamento atômico ou iônico e/ou a direção cristalográfica (Callister, 2007).

### 3.8 Efeito de Bauschinger

O efeito Bauschinger foi observado depois que Bauschinger (1886) realizou um ciclo de carregamento mecânico, em um corpo de prova submetido a um esforço de tração até o regime plástico, depois descarregado e, em seguida, recarregado no sentido de compressão, mostrando que o limite de escoamento à tração é diferente do limite à compressão. A figura 10 apresenta um gráfico de tensão-deformação, onde o efeito Bauschinger é aplicado.

Figura 10. Ciclo de carregamento do Efeito de Bauschinger.



O corpo de prova é submetido a um esforço de tração até a região do regime plástico e atinge o ponto D, sendo então, descarregado, permanecendo uma deformação plástica (ponto G). Em seguida, aplica-se um esforço compressivo até atingir o ponto D'. Na figura, os valores em módulo para o limite de escoamento à tração ( $\sigma_{Y0}^T$ ) e compressão ( $\sigma_{Y0}^C$ ) não coincidem, verificando-se que  $\sigma_{Y0}^T > \sigma_{Y0}^C$  (Dieter, 1981). Esta dependência do sentido do carregamento e o comportamento assimétrico das tensões é conhecida como o efeito Bauschinger. Porém, esses estudos tratam apenas uma parte dos fenômenos envolvidos, sendo o comportamento direcional na relação tensão-deformação mais complexo do que Bauschinger imaginou.

Esse efeito também é encontrado em uma variedade de materiais, como os monocristais, policristais, metal puro, ligas e metais endurecidos. Entretanto, Wolley (1953) observou que o efeito Bauschinger foi mais pronunciado em materiais CFC do que em materiais de CCC.

Para explicar o mecanismo do efeito Bauschinger muitos estudos têm sido realizados. Acreditava-se que a causa do efeito Bauschinger eram as tensões internas e tensões residuais macroscópicas desenvolvidas devido à deformação não homogênea de grãos individuais de um metal policristalino (Yan, 1998), mas, para Orowan (1958), deve-se à anisotropia da força motriz ocasionada pelo movimento de deslocamento, devido à pré-deformação.

Abel e Ham (1996) analisaram o efeito Bauschinger através da tensão de recuo. Eles mostraram que a tensão produzida pela deformação no sentido inicial pode ser observada apenas em termos das contribuições dos componentes direcionais e não direcionais de endurecimento. Assumindo que os componentes direcionais da tensão interna não são muito aliviados nas operações de descarga, a tensão de recuo apresenta uma perda de elasticidade.

Se o empilhamento de discordâncias é responsável pelo endurecimento, ele seria dizimado e parte do esforço despendido na deformação no sentido original seria recuperada no sentido inverso. Portanto, um amolecimento permanente seria observado no teste Bauschinger.

O amolecimento permanente é convenientemente determinado a partir da impressão da curva tensão-deformação no sentido original e reverso em termos da tensão e da deformação absoluta. A diferença entre o valor da tensão de escoamento em uma direção e o valor da tensão de escoamento em outra direção é designado como tensão de recuo.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Metal de base

As chapas utilizadas no trabalho foram fornecidas pelo Estaleiro Atlântico Sul, localizado no Porto de Suape - Cabo de Santo Agostinho – PE, com as dimensões de 1200 x 500 x 13,7 mm e classificação ASTM A131 grau AH-36.

Para as chapas de teste serem soldadas foi necessária a preparação das mesmas, sendo preciso cortá-las nas dimensões de 70 x 200 13,7 mm com o sentido de laminação transversal e longitudinal, para que os cordões de solda fossem produzidos transversalmente e paralelamente à direção de laminação.

### 4.2 Equipamentos, processo e parâmetros de soldagem

O processo de soldagem MIG/MAG foi realizado de forma semiautomática com uma máquina de soldagem ESAB Smashweld 318 Topflex e uma tartaruga fornecidos pelo programa PRH PB203 (fig. 11).

Figura 11. Máquina MIG/MAG para soldagem da ESAB Smashweld 318 Topflex e tartaruga utilizada para a soldagem semi-automática.



Para o processo de soldagem MIG/MAG foi utilizado um arame de bitola de 1,2 mm e tipo ASME SFA 5,18 ER70S-6, com um gás de 25% de Ar e 75% de CO<sub>2</sub>.

Para simular a soldagem do painel naval, foi necessário prender as chapas com pontos de solda nas extremidades. Depois os pares foram alinhados com a tartaruga para o passe de raiz e o preenchimento do chanfro com outros passes.

Para o cálculo do aporte térmico médio, foi considerado a eficiência do processo de soldagem MIG/MAG de 80%.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para cada chapa.

Chapa	Sentido de Laminação	Quantidade de Passes	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Velocidade de Soldagem (m/s)	Aporte Térmico Médio (kJ/m)
1	Longitudinal	5	19,3	220,0	0,0035	979,1
2	Longitudinal	6	19,7	199,0	0,0035	914,3
3	Transversal	6	18,9	213,3	0,0036	896,5
4	Transversal	6	19,0	212,7	0,0036	896,4
5	Longitudinal	6	18,8	219,7	0,0054	611,9
6	Longitudinal	5	18,1	213,6	0,0054	572,8
7	Transversal	6	18,1	206,8	0,0054	554,5
8	Transversal	6	18,0	208,0	0,0054	554,7
9	Longitudinal	6	19,5	218	0,0035	971,7

O procedimento de soldagem foi executado em chapas com junta de topo, com bisel de 25°, chanfro tipo V com nariz de 2 mm e posição de soldagem 1G. A fabricação dos chanfros foi realizada em um centro de usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

As chapas foram soldadas no galpão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. Após cada passe o verniz residual do arame foi removido com uma escova de aço.

#### 4.3 Ensaio de tração

Foram preparados 6 corpos de prova para ensaio de tração, 3 corpos de prova retirados no sentido longitudinal ao sentido de laminação e 3 corpos de prova no sentido transversal. A norma utilizada para a preparação dos corpos de provas foi ASTM E8/E8M-11 A370, sendo os parâmetros utilizados listados abaixo (tab. 4):

Tabela 4. Medidas para a fabricação dos corpos de prova do ensaio de tração.

Parâmetro	Parte útil (mm)	Raio de concordância (mm)	Cabeça (mm)	Largura		Comprimento total (mm)	Espessura (mm)
				Largura útil (mm)	da cabeça (mm)		
Medida	50,0 ± 0,1	12,5	50,0	12,5 ± 0,2	20,0	200,0	7,5

Os corpos de prova foram produzidos em uma fresadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, com uma fresa de 25 mm de diâmetro de aço rápido com revestimento de TiN.

#### 4.4 Ensaio para o método de difração de raio-x

Para a medição das tensões residuais pelo método DR-X, foi utilizada a chapa 9, sendo preciso que a mesma passasse preliminarmente por um processo de decapagem eletrolítica. Esta decapagem é necessária para a remoção de uma fina camada superficial de material, da ordem décimos de milímetros, a fim de eliminar tensões residuais remanescentes de processos de fabricação prévios, como por exemplo, a laminação.

O processo de decapagem foi feito através de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro que foi preenchido com uma solução de ácido sulfúrico a 25% (fig. 12). Para o processo eletrolítico acontecer foi necessário a passagem de corrente elétrica com 3,8 A e tensão de 2 V por 10 min, estando o eletrodo (anodo aço inox) positivo na solução e negativo na chapa, para possibilitar a limpeza da superfície. Para a passivação da superfície foi utilizado uma solução de Nital a 5%.

Figura 12. Processo de decapagem da chapa soldada.



Ao final da decapagem, foram realizadas três marcações na ZTA e duas no cordão de solda, a fim de se obter as tensões residuais pelo método de DR-X.

Para o ensaio foi utilizado um difratômetro portátil (Portable Stress Analyser STRESSRAD), figura 13, e um software de análise (Stress Analyzer Stressrad), pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Figura 13. Difratorômetro portátil (Portable Stress Analyzer STRESSRAD).



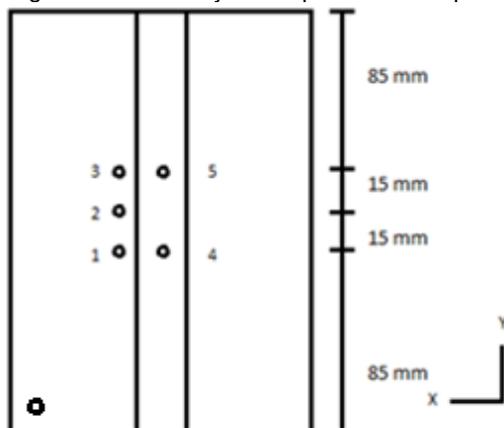
Foi utilizado um feixe monocromático com comprimento de onda  $\lambda = 2,2911 \text{ \AA}$  do tipo Cr K- $\alpha$ , a tensão de operação for de 25kV e a corrente de 50 mA. O método foi o do  $\text{sen}^2\theta$ .

Foram medidas tensões residuais no sentido transversal e longitudinal da solda dos pontos escolhidos. No software utilizado foi possível a construção dos difratogramas, ajustes das curvas e localização dos picos para o cálculo das tensões residuais.

#### 4.5 Ensaio pelo método de deslocamento de pontos coordenados

Depois das chapas soldadas, foram realizados furos com brocas de centro de 2,5 mm de diâmetro por 2 mm de profundidade sobre o cordão de solda e sobre a ZTA, conforme figura 14. Pontos previamente marcados sobre os quais foram medidas as tensões residuais por DR-X. Em seguida, as coordenadas (x,y) do centro de cada furo foram mapeadas em uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) com controle numérico computadorizado, modelo CRYSTA 574 (curso de medição de 700 mm e resolução de 0,0005 mm), fabricação MITUTOYO, ano 2004, com certificado de calibração 03206/2013, do Laboratório de Medição por Coordenada (LAMECO) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

Figura 14. Distribuição dos pontos na chapa soldada.



O furo de referência no canto da chapa serve para medir as coordenadas de cada centro dos furos 1 a 5.

Após a realização do mapeamento inicial dos pontos em cada chapa, foi preciso realizar um tratamento térmico de alívio de tensão à temperatura de 680°C por 30 min. Ao término do TT do material, os pontos mapeados sofreram deslocamentos devido ao escoamento do material e com isso, foram novamente mapeados. Destas novas coordenadas do centro dos furos medidas na MMC, foram encontradas as deformações geradas pelo processo de soldagem.

Figura 15. Máquina de medição por coordenadas.



LAMECO da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Com os valores das coordenadas de antes e depois do tratamento térmico de cada furo, foram calculadas as deformações pelas equações 3.4 e 3.5 e posteriormente, as tensões residuais pelas equações 3.6 e 3.7 em cada ponto.

#### 4.6 Caracterização Macroestrutural e Microestrutural

A caracterização microestrutural das juntas soldadas foi realizada através de exames metalográficos. Amostras foram extraídas das chapas, compreendendo a região do metal de base, ZTA e metal de solda. A análise foi realizada na seção transversal e longitudinal. A preparação consistiu em lixamento utilizando uma lixadeira rotativa e lixas com granulometria de 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200. Após a etapa de lixamento foi realizado um polimento com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e, em seguida, as amostras foram atacadas com Nital 5%.

Figura 16. Microscópio eletrônico de varredura, modelo TM3000.



Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

A caracterização da microestrutura foi realizada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de modelo TM3000, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, acoplado com sistema de análise de energia dispersiva de raio-X.

## 5. Resultados e discussões

### 5.1 Ensaio de tração

A partir dos ensaios de tração dos 6 corpos de provas como recebidos, foram obtidos os valores de limite de escoamento para cada corpo de prova. Na tabela 5 estão apresentados esses valores.

Tabela 5. Resultados das propriedades mecânicas dos corpos de provas.

Corpo De Prova	Sentido da Laminação	Limite De Escoamento (MPa)	Tensão de Recuo (MPa)
1	Longitudinal	375,3	22,0
2	Longitudinal	381,6	
3	Longitudinal	380,7	
4	Transversal	353,9	
5	Transversal	348,9	
6	Transversal	368,9	

A média do limite de escoamento dos corpos retirados no sentido de laminação (1, 2 e 3) foi de 379,2 MPa com desvio padrão de  $\pm 3,4$  MPa e no sentido transversal (4, 5 e 6) foi de 357,2 MPa com desvio padrão de  $\pm 10,4$  MPa. Resultando em uma tensão de recuo média de 22,0 MPa com desvio padrão de  $\pm 10,4$  MPa.

## 5.2 Tensões residuais medidas por DR-X e DPC

### 5.2.1 Método de DPC

#### 5.2.1.1 Tensões residuais na direção x e y

Os valores medidos dos deslocamentos dos pontos na direção y (direção do cordão de solda) nas chapas de teste estão mostrados na tabela 6.

Tabela 6. Deslocamentos dos pontos referenciados para as chapas na direção y.

Chapa	Ponto 1	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 5
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	direção y	direção x								
1	-0,001	-0,001	0,017	0,008	0,026	0,010	-0,034	-0,025	0,007	0,004
2	0,024	0,014	0,028	0,014	0,031	0,013	0,017	0,013	0,038	0,022
3	0,005	0,003	0,005	0,003	0,004	0,002	0,005	0,004	-0,002	-0,001
4	-0,026	-0,016	0,008	0,004	0,015	0,006	0,030	0,024	0,048	0,026
5	0,013	0,010	-0,001	-0,001	0,012	0,006	0,018	0,015	0,001	0,001
6	0,011	0,007	0,012	0,006	-0,001	-0,001	-0,007	-0,009	0,006	0,003
7	-0,017	-0,011	-0,019	-0,010	-0,014	-0,006	-0,024	-0,019	-0,002	-0,001
8	0,005	0,003	0,006	0,003	-0,077	-0,035	0,006	-0,004	-0,015	-0,008
9	-0,055	-0,036	-0,047	-0,035	0,089	-0,081	0,089	-0,075	-0,054	-0,044

Para a chapa 1, soldada no sentido longitudinalmente, os valores dos deslocamentos dos pontos foram maiores na direção y (direção do cordão de solda), tanto na ZTA (ponto 2) quanto no cordão de solda (ponto 4). Quando os deslocamentos da chapa 1 são comparados com os deslocamentos da chapa 3,

soldada transversalmente a laminação, eles são maiores independente da direção (x e y) e se o ponto está no cordão de solda ou na ZTA.

Para a chapa 5, soldada no sentido longitudinal, soldada com aporte térmico menor, os valores dos deslocamentos dos pontos são próximos para as duas direções (x e y), tanto na ZTA (ponto 2) quanto no cordão de solda (ponto 4). Quando os deslocamentos da chapa 5 são comparados com os deslocamentos da chapa 8, soldada transversalmente à laminação, eles também são próximos independente da direção (x e y) na ZTA. Os deslocamentos no cordão de solda são maiores para a chapa soldada com aporte térmico maior (chapa 1).

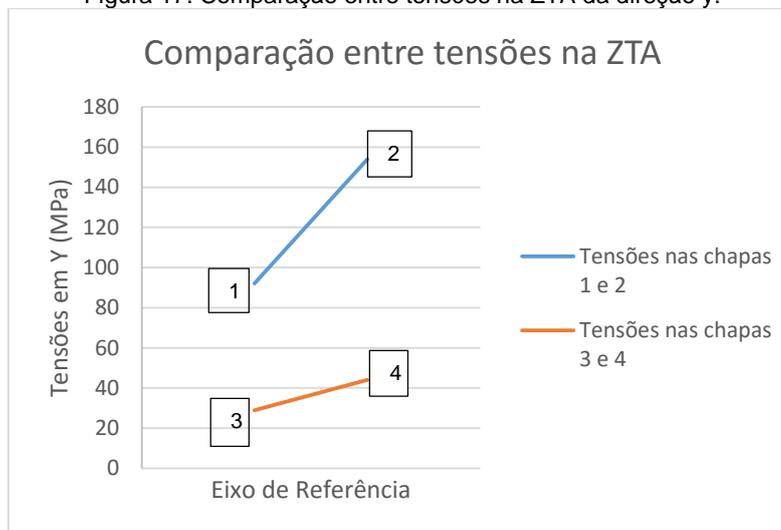
Os valores calculados das tensões residuais a partir dos deslocamentos dos pontos na direção y (direção do cordão de solda) nas chapas de teste estão mostrados na tabela 7.

Tabela 7. Tensões residuais das chapas na direção y.

CHAPAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>PONTOS</b>	Tensão residual $\sigma_y$ (MPa)								
<b>1 (ZTA)</b>	-8	136	28	-149	80	64	-100	27	-163
<b>2 (ZTA)</b>	92	154	29	44	-5	66	-105	35	-144
<b>3 (ZTA)</b>	137	165	24	83	66	-8	-75	-417	117
<b>4 (CS)</b>	-202	104	28	185	109	-51	-147	-36	124
<b>5 (CS)</b>	38	218	-12	271	6	34	-12	-82	-169

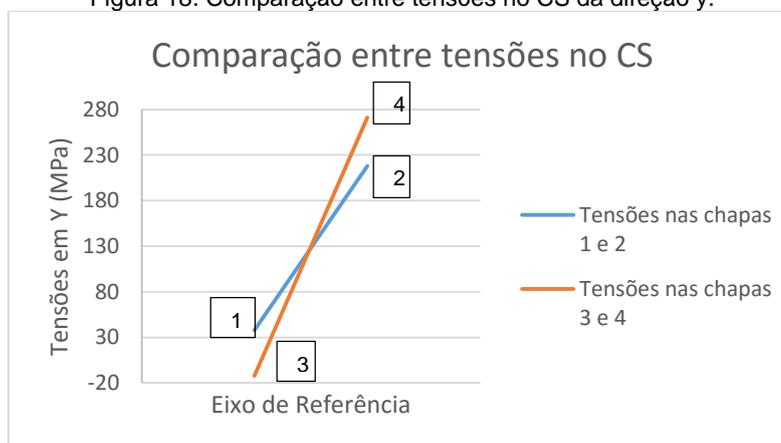
Para mostrar a diferença das tensões na direção y (direção do cordão de solda) para chapas soldadas no sentido da laminação (chapas 1 e 2) em relação às soldadas no sentido transversal (chapas 3 e 4), foram selecionados dois pontos: um no cordão de solda (ponto 5) e outro na ZTA (ponto 2). A figura 17 mostra as tensões na ZTA. A linha em azul representa as chapas soldadas no sentido da laminação, e, em vermelho, as chapas soldadas no sentido transversal a laminação. Pode-se notar que as tensões na ZTA são maiores para as chapas soldadas no sentido da laminação e isso era de se esperar, já que os deslocamentos foram maiores.

Figura 17. Comparação entre tensões na ZTA da direção y.



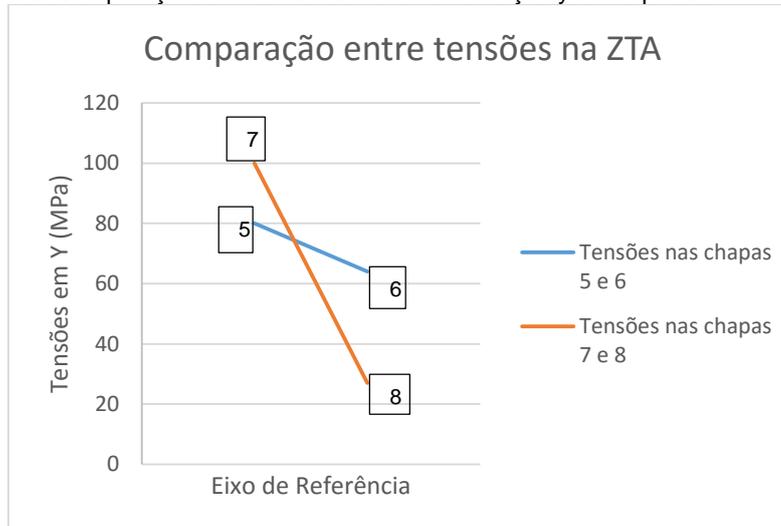
Para o cordão de solda (fig. 18), as tensões apresentam valores próximos, pois os deslocamentos são da mesma ordem, independente do sentido de laminação. As chapas 1 e 3 apresentam valores de tensões da mesma ordem, enquanto que as chapas 2 e 4 apresentam valores maiores que as chapas 1 e 3.

Figura 18. Comparação entre tensões no CS da direção y.



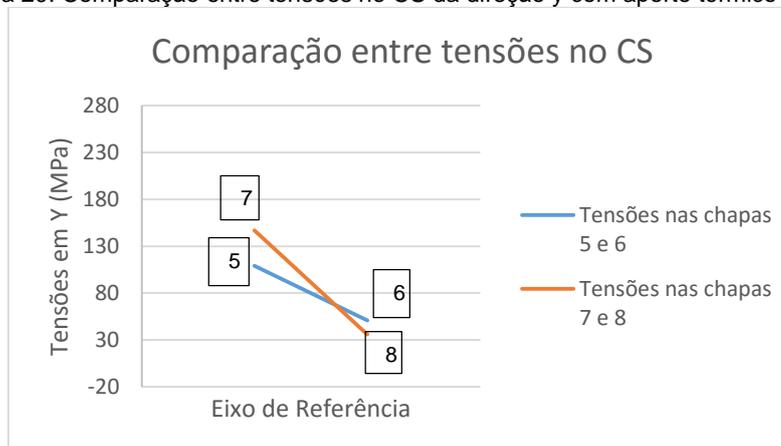
E para mostrar a diferença das tensões na direção y (direção do cordão de solda) para chapas soldadas (com aporte térmico menor) no sentido da laminação (chapas 5 e 6) em relação às soldadas no sentido transversal (chapas 7 e 8), foram selecionados dois pontos: um no cordão de solda (ponto 4) e outro na ZTA (ponto 1). A figura 19 mostra as tensões na ZTA. Pode-se notar que a tensão na ZTA é menor para a chapa 6 soldadas no sentido da laminação e maior para a 7 no sentido transversal a laminação.

Figura 19. Comparação entre tensões na ZTA da direção y com aporte térmico menor.



Para o cordão de solda (fig. 20), as tensões apresentam valores próximos. Porém, pode-se notar que a tensão no cordão de solda é maior para a chapa 6 soldadas no sentido da laminação e maior para a 7 no sentido transversal à laminação, o mesmo comportamento mostrado na figura 19.

Figura 20. Comparação entre tensões no CS da direção y com aporte térmico menor.



Os valores calculados das tensões a partir dos deslocamentos dos pontos na direção x (direção transversal ao cordão de solda) nas chapas de teste estão listados na tabela 8.

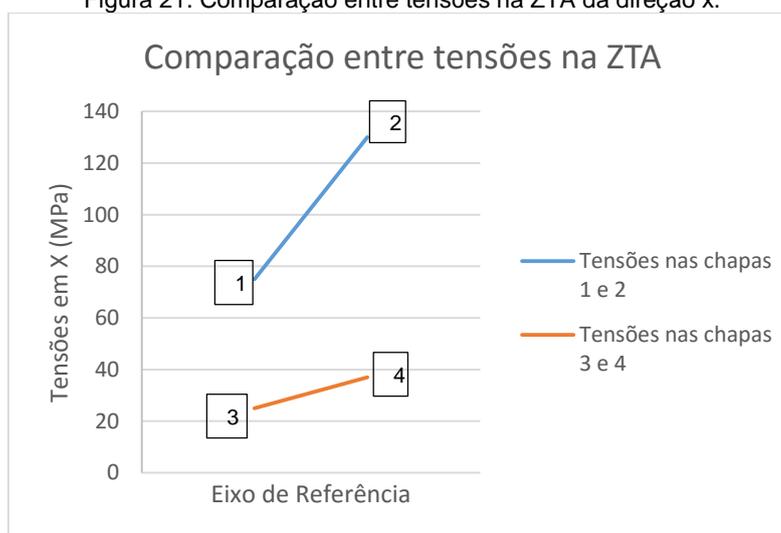
Tabela 8. Tensões residuais das chapas na direção x.

CHAPAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>PONTOS</b>	Tensão residual $\sigma_x$ (MPa)								
<b>1 (ZTA)</b>	-7	125	27	-138	82	61	-97	25	-164

<b>2 (ZTA)</b>	75	130	25	37	-5	57	-92	30	-155
<b>3 (ZTA)</b>	100	129	19	63	56	-6	-61	-330	-223
<b>4 (CS)</b>	-209	110	30	197	119	-68	-155	-37	-202
<b>5 (CS)</b>	33	198	-11	238	6	30	-11	-70	-191

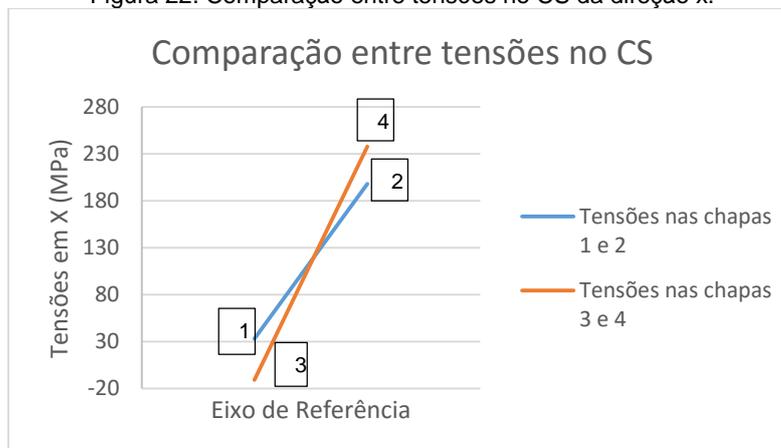
Para mostrar a diferença da tensão na direção x (direção transversal ao cordão de solda), foram escolhidas as mesmas condições na direção y (direção do cordão de solda). A figura 21 mostra essas tensões na ZTA. Pode-se notar que as tensões na ZTA são maiores para as chapas soldadas no sentido da laminação, já que os deslocamentos são maiores. Porém, os valores são menores quando comparados com as tensões na direção y (direção do cordão de solda) (fig. 17).

Figura 21. Comparação entre tensões na ZTA da direção x.



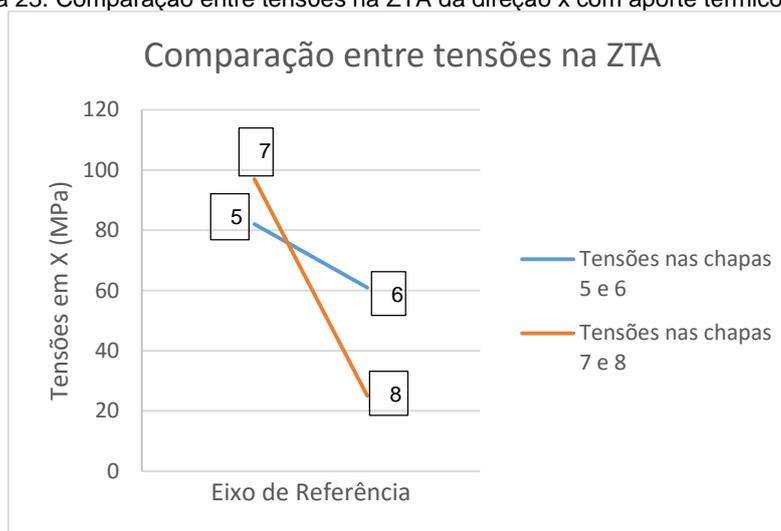
Para o cordão de solda (fig. 22), as tensões apresentam valores próximos, pois os deslocamentos são próximos, independente do sentido de laminação. As chapas 1 e 3 apresentam valores de tensões da mesma ordem e as chapas 2 e 4 apresentam valores maiores que as chapas 1 e 3. As tensões na direção x (direção transversal ao cordão de solda) são menores que na direção y (direção do cordão de solda) (fig. 18).

Figura 22. Comparação entre tensões no CS da direção x.



E para mostrar a diferença das tensões na direção x (direção transversal ao cordão de solda) para chapas soldadas (com aporte térmico menor) foram escolhidas as chapas nas mesmas condições da direção y (direção do cordão de solda). A figura 23 mostra as tensões na ZTA. Pode-se notar que a tensão na ZTA é menor para a chapa 6 soldadas no sentido da laminação e maior para a 7 no sentido transversal à laminação. E o comportamento é similar quando comparado às tensões na direção y (direção do cordão de solda) do cordão de solda.

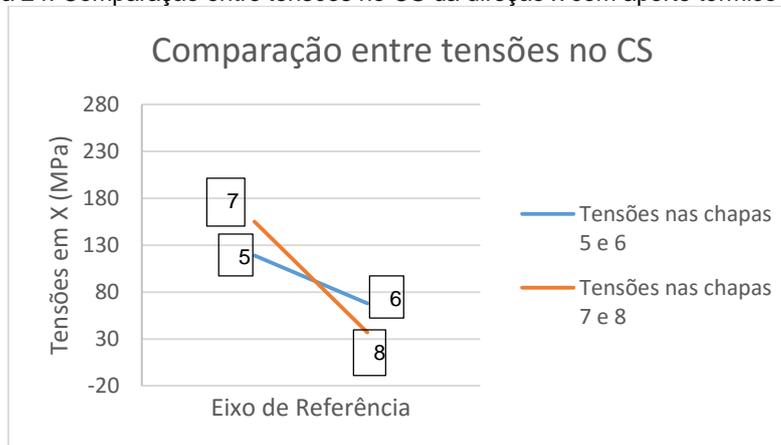
Figura 23. Comparação entre tensões na ZTA da direção x com aporte térmico menor.



Para o cordão de solda (fig. 24), as tensões apresentam valores próximos. Porém, pode-se notar que a tensão no cordão de solda é menor para a chapa 6 soldadas no sentido da laminação e maior para a 7 no sentido transversal a laminação,

o mesmo comportamento mostrado na ZTA e para as tensões residuais no cordão de solda com aporte térmico maior (fig.20).

Figura 24. Comparação entre tensões no CS da direção x com aporte térmico menor.



### 5.2.1.2 Relação entre as tensões residuais

Para chapas com o cordão de solda na direção da laminação, após o TT para alívio de tensão, apresentam-se deslocamentos (escoamento) maiores no sentido da laminação que no sentido transversal. Isso é observado nos valores das tensões na direção da laminação ( $\sigma_y$ ), maiores que na direção transversal ( $\sigma_x$ ). (tab. 9).

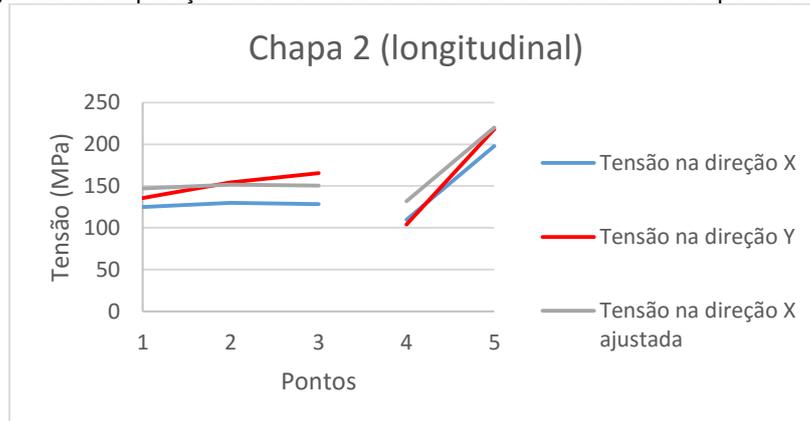
Tabela 9. Influência da tensão de recuo.

Ponto	Chapa 1 (soldada no sentido longitudinal)			Chapa 2 (soldada no sentido longitudinal)		
	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x'=\sigma_x+\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x'=\sigma_x+\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
<b>ZTA</b>						
1	7,4	29,4	8,4	125,0	147,0	135,8
2	74,9	96,9	92,1	129,8	151,8	154,4
3	99,6	121,6	137,4	128,5	150,5	165,4
<b>ZF</b>						
4	209,4	231,4	202,2	109,7	131,7	104,1
5	32,6	54,6	37,5	198,1	220,1	218,2
Ponto	Chapa 3 (soldada no sentido transversal)			Chapa 4 (soldada no sentido transversal)		
	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x'=\sigma_x+\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x'=\sigma_x+\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
<b>ZTA</b>						
1	26,9	48,9	28,0	138,2	160,2	148,8
2	24,8	46,8	28,8	37,2	59,2	44,1
3	18,6	40,6	23,9	62,8	84,8	82,6
<b>ZF</b>						
4	29,8	51,8	27,7	196,8	218,8	185,0
5	10,9	32,9	12,3	237,6	259,6	271,2

Para mostrar como a tensão de recuo atua em chapas com diferentes direções de laminação foram escolhidas as chapas 2 e 3. Na figura 25, a chapa 2, soldada no sentido da laminação. Pode-se notar que a tensão residual na direção x (direção

transversal ao cordão de solda) (linha azul) foi aproximada da tensão na direção y (direção do cordão de solda) (linha vermelha) pela soma da tensão de recuo (linha cinza). Porém, no cordão de solda as tensões residuais em x e em y já estão próximas, devido aos deslocamentos serem próximos.

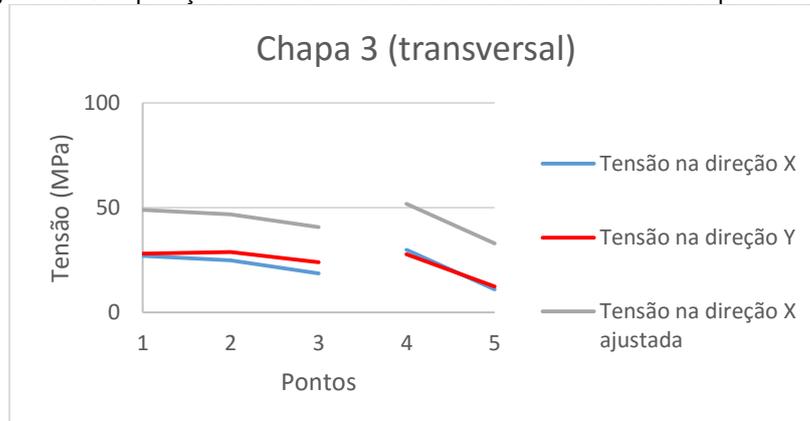
Figura 25. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 2.



Essa condição acontece, pois, durante o TT a tensão de recuo atua revertendo as barreiras (discordâncias bloqueadas) contribuindo para o deslocamento (escoamento) na direção contrária à plastificação. E a direção transversal, por produzir menores deslocamentos, apresenta valores menores de tensão residual. Esses valores somados à tensão de recuo, na maioria dos casos, se aproximam dos valores das tensões residuais nas duas direções.

Na figura 26, a chapa 3, soldada no sentido transversal a laminação. Pode-se notar que a tensão residual na direção x (direção transversal ao cordão de solda) (linha azul) já é próxima da tensão na direção y (direção do cordão de solda) (linha vermelha) e a tensão de recuo (linha cinza) desloca a linha azul para longe da linha azul, tanto para a ZTA quanto para o cordão de solda.

Figura 26. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 3.



Essa condição da tensão de recuo atuando para reverter as barreiras não existe para as chapas soldadas na direção transversal a laminação, uma vez que os deslocamentos na direção x e y são próximos e, conseqüentemente, as tensões residuais são parecidas. A tensão de recuo não atuará, nesse caso, por isso a direção contrária apresentará deslocamentos da mesma ordem.

As chapas soldadas com aporte térmico menor apresentaram, após o TT para alívio de tensão, tensões residuais próximas, independente do sentido da laminação. (tab. 10).

Tabela 10. Influência da tensão de recuo para aporte térmico diferente.

Ponto	Chapa 5 (soldada no sentido longitudinal)			Chapa 6 (soldada no sentido longitudinal)		
	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x' = \sigma_x + \sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x' = \sigma_x + \sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
ZTA						
1	81,7	103,7	79,7	61,1	83,1	64,0
2	5,0	27,0	5,4	56,9	78,9	65,9
3	55,7	77,7	65,7	6,1	28,1	7,7
ZF						
4	119,4	141,4	108,8	68,5	90,5	50,9
5	5,7	27,7	6,4	30,1	52,1	34,3
Ponto	Chapa 7 (soldada no sentido transversal)			Chapa 8 (soldada no sentido transversal)		
	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x' = \sigma_x + \sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_x' = \sigma_x + \sigma_r$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
ZTA						
1	97,3	119,3	99,6	25,3	47,3	26,6
2	92,5	114,5	104,7	30,0	52,0	34,5
3	60,8	82,8	74,8	329,7	351,7	416,6
ZF						
4	154,6	176,6	146,7	37,1	59,1	36,1
5	10,9	32,9	12,5	70,3	92,3	81,6

E para mostrar que a tensão de recuo não atuou nessa condição de soldagem foram escolhidas as chapas 6 e 7. A figura 27 e 28 mostra que as tensões residuais na direção x (direção transversal ao cordão de solda) (linhas azuis) já são próximas, nos

dois sentidos de soldagem, das tensões residuais na direção y (direção do cordão de solda) (linhas vermelhas), e a tensão de recuo (linhas cinzas) desloca as linhas azuis para longe das linhas vermelhas. Esse comportamento acontece tanto na ZTA quanto no cordão de solda, o que era de se esperar, já que os deslocamentos foram próximos nas duas direções.

Figura 27. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 6.

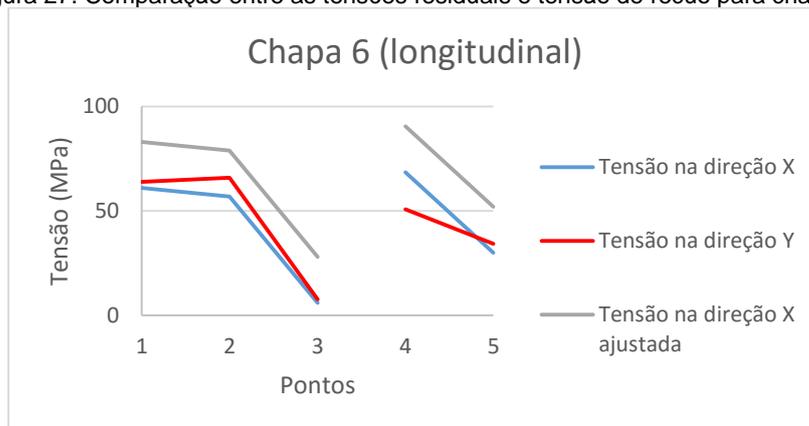
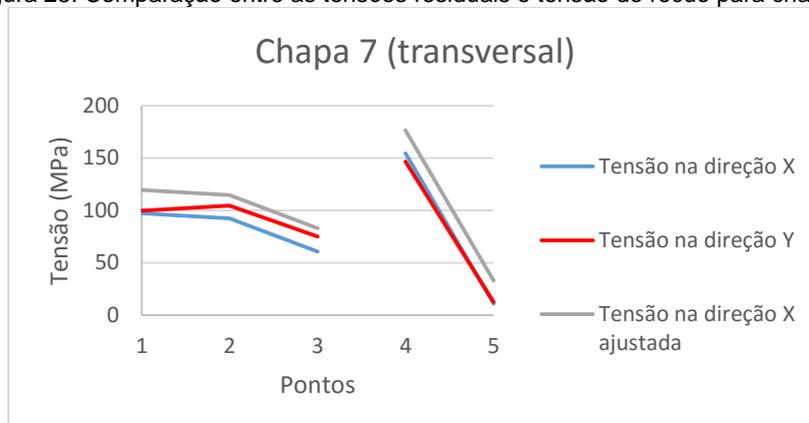


Figura 28. Comparação entre as tensões residuais e tensão de recuo para chapa 7.



### 5.2.2 Método DR-X

Para comparar as tensões residuais calculadas pelo método DPC com as obtidas pelo DR-X foi utilizada a chapa 9. Os valores das tensões na direção x (direção transversal ao cordão de solda) para a chapa 9 estão mostradas na tabela 11.

Tabela 11. Comparação entre tensão residual calculada entre DR-X e DPC.

Ponto	Difração de Raio-x (MPa)	Método DPC - $\sigma_x$ (MPa)
1	322 $\pm$ 88	163 $\pm$ 16
2	228 $\pm$ 70	155 $\pm$ 9
3	312 $\pm$ 83	222 $\pm$ 8

4	181 $\pm$ 43	201 $\pm$ 3
5	153 $\pm$ 49	191 $\pm$ 4

Os valores obtidos pelo método DPC foram inferiores aos de DR-X, assim como os valores das incertezas de medição. O método DR-X apresentou em dois pontos, 1 e 3, valores de tensões residuais muito próximos ao limite de escoamento do material ao ponto de que ao se adicionar a incerteza de medição, os valores ultrapassam o limite de escoamento do material. Essa situação não acontece com os valores calculados pelo método DPC. Ainda, Lu (1996) diz que o valor máximo em módulo que as tensões residuais podem alcançar é o próprio limite de escoamento do material.

Abaixo uma breve análise comparativa entre o processo em desenvolvimento (DPC) e um método usual (DR-X).

Tabela 12. Comparação entre os métodos DR-X e DPC.

Método	DR-X (portátil)	DPC
Mais caro	X	
Maior tempo de medição		X
Utilização em campo	X	
Mais preciso		X

A grande desvantagem do DR-X está no fato de ser um equipamento com custo mais elevado que uma mesa de coordenadas. Além disso, existe uma incerteza enorme nas medições provenientes desse processo, como demonstrado em nosso trabalho, chegando a até 27% do mensurando. Por outro lado, se for usado um equipamento portátil, é possível a realização de medições em campo, algo que pode um dia ser viável também para o método DPC. O método DPC tem um tempo maior para as medições das tensões, pois é necessário fazer as medições das coordenadas iniciais, depois o tratamento térmico para que seja feita novamente as medições das coordenadas. Entretanto, o método DPC mostra-se mais preciso nas medições e com uma faixa de incerteza de medição menor, tornando-o mais precisa.

### q5.3 Análise macroscópica

Para a análise das macrografias das juntas soldadas, foram cortadas duas chapas transversalmente ao cordão de solda, cada uma em um sentido de laminação. Depois de cortadas, as mesmas foram retificadas para uma melhor qualidade na realização das macrografias e micrografias. A figura 29 mostra as duas amostras depois de polidas e atacadas com Nital. A amostra da esquerda representa a chapa 6 e a da direita a chapa 7.

Figura 29. Macrografias das chapas 6 e 7.



Nessa figura ficam nítidos alguns defeitos de soldagem, como por exemplo, a falta de penetração, a falta de fusão e inclusão de escória. Tais defeitos são prejudiciais à operação da junta, porém não invalidam a utilização dessas juntas porque todas as tensões residuais medidas nesse trabalho são macrotensões e os parâmetros de soldagem foram escolhidos com objetivo influenciar as tensões residuais medidas.

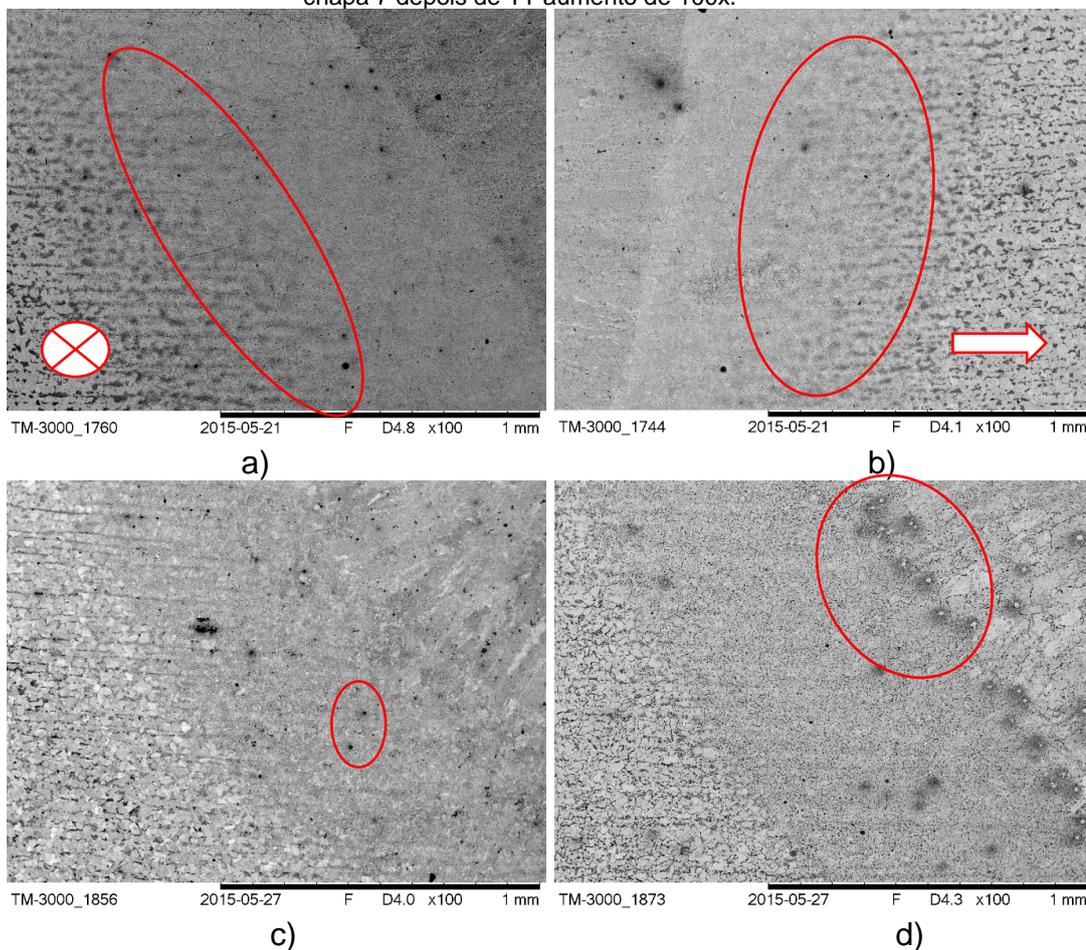
### 5.4 Caracterização microestrutural

Para a análise da microestrutura das chapas 6 e 7, foram realizadas micrografias do metal de base, da zona termicamente afetada e do metal de adição.

A figura 30 a) e b) mostra as micrografias das chapas antes do TT, onde a interface entre o metal de base e a ZTA não é de fácil observação, porém pode-se notar o crescimento dos grãos e o formato lamelar, o mesmo encontrado no metal de

adição. Entretanto, a interface entre a ZTA e o metal de adição já é de fácil caracterização.

Figura 30. Metal de base, ZTA e metal de adição a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 100x.

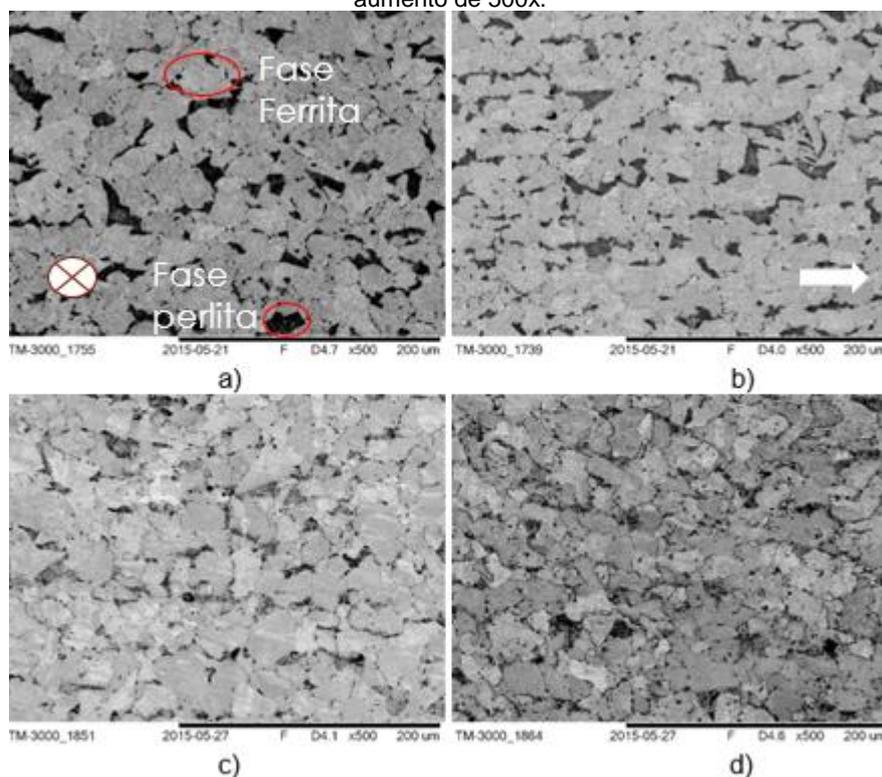


A figura 30 c) e d) mostra as micrografias das chapas depois do TT, onde as interfaces ficaram mais bem definidas. Na figura 30c) após o TT, surgiram novos microconstituintes, provavelmente precipitados de carbeto. Na figura 30d) ficaram evidentes as inclusões de verniz residual na interface ZTA e metal de adição e entre passes.

A figura 31 mostra o metal de base para as duas chapas. Onde a fase ferrita (cor clara) se apresenta com maior quantidade que a fase perlita (cor escura), que é um agregado de ferrita carbeto. A figura 31.a) mostra a chapa 6 com os grãos sem orientação preferencial e com seu formato equiaxial, já na figura 31.b) os grãos estão

orientados e em formato alongado. Isso é resultado da laminação, tendo a chapa 9 sido soldada no sentido contrário à laminação.

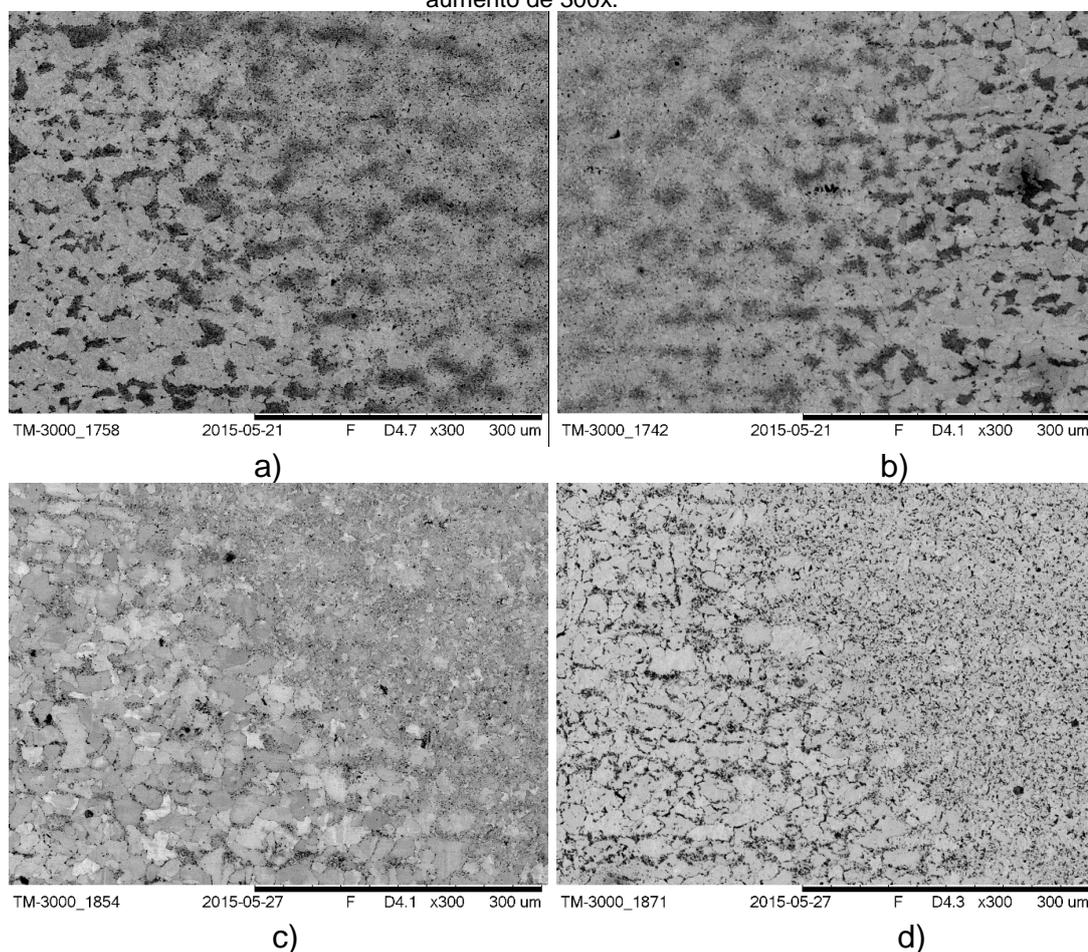
Figura 31. Metal de base a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 500x.



As figuras 31 c) e d) mostram as chapas depois dos TT, onde os veios de perlita perderam a orientação. E novamente, precipitados de carbeto foram observados.

A figura 32 mostra a interface entre o metal de base e a ZTA para as duas chapas. Na ZTA pode notar-se um aumento da quantidade de perlita e o perdeu-se o efeito direcional da laminação (textura). Na região intercrítica pode-se notar a formação de regiões perlíticas e ferríticas, evidenciando a transição.

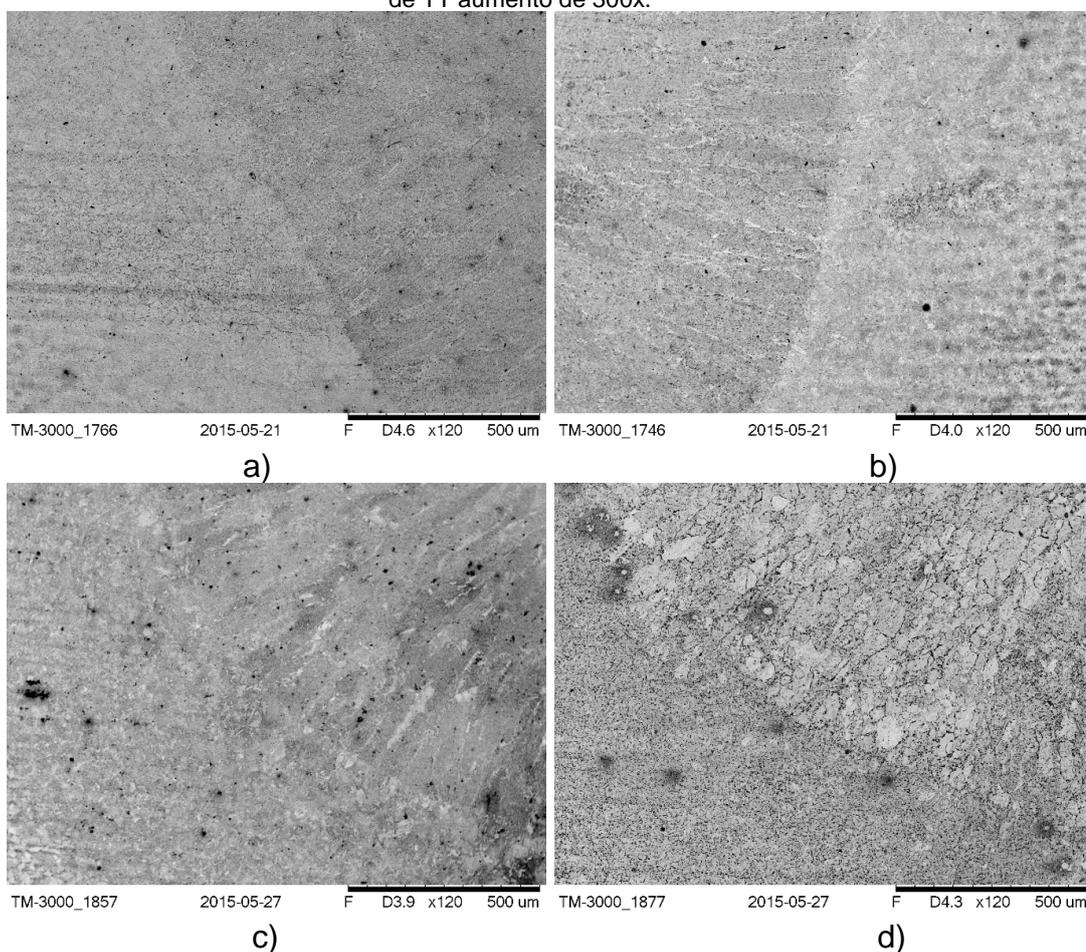
Figura 32. MB e ZTA a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 300x.



Para as duas condições, a região de interface do MB e ZTA foi reduzida. Na ZTA pode notar-se um aumento da quantidade de perlita, o desaparecimento do efeito direcional dos grãos (recristalização) e o redução no tamanho da região subcrítica.

A figura 33 mostra a transição entre a ZTA e o metal de adição. Na ZTA temos o efeito da epitaxia e, após este, a nucleação de subgrãos que tendem à morfologia equiaxial. Fica claro que a quantidade de perlita cresce na região plastificada e se justifica pela migração de carbeto para esta região, reduzindo localmente a energia. O metal de base serve para a poça de fusão como uma parede de um molde de um processo de fundição, por isso os grãos em crescimento apresentam esse formato orientado (epitaxia).

Figura 33. ZTA e metal de adição a) chapa 6, b) chapa 7, c) chapa 6 depois do TT e d) chapa 7 depois de TT aumento de 300x.



Depois da recristalização parcial da ZTA, o escoamento mais intenso restaura a microestrutura. O efeito direcional desaparece e os subgrãos coalescem e a microestrutura final apresenta grãos perlíticos envolvidos por ferríticos. Depois da recristalização parcial da ZF, existiu o coalescimento dos subgrãos, com tendência a crescer equiaxialmente.

## 6. Conclusões

Os resultados das tensões residuais calculadas a partir do método DPC mostraram que o aspecto anisotrópico das chapas soldadas na direção de laminação influencia no cálculo das tensões residuais. Contudo, os valores das tensões residuais das duas direções podem ser aproximados pela tensão de recuo.

As chapas soldadas no sentido longitudinal à laminação apresentaram deslocamentos maiores, nesta direção, em relação ao sentido transversal da

laminação. Esse fato é explicado pela textura de recozimento que amplifica esse deslocamento.

Para chapas soldadas no sentido transversal da laminação, os deslocamentos em sentidos diferentes são próximos, mostrando que a tensão de recuo não atua revertendo o deslocamento (escoamento). Portanto, os valores das tensões residuais calculados são próximos.

As análises morfológicas mostraram o efeito do tratamento térmico para alívio das tensões residuais.

#### 7. Sugestões para trabalhos futuros

- Influência da distância de medição na ZTA com a anisotropia.
- Análise da influência do aporte térmico no cálculo da tensão residual no estado plano.
- Utilização do método DPC para prever tensões residuais em soldagem de tubos.

## Referências

- Abel, A.; Ham, R. K. *Acta Metall* 14, p 1489, 1966.
- ABNT NBR ISO 6892-1: Materiais Metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 2013.
- ASTM A 131. Standard Specification of Structural Steel for Ships. 2015.
- Bailey, N. *Weldability of ferritic steels*. Abington Publishing and ASM international. Cambridge, England, 1994.
- Bauschinger, J. *Mechanisch-technischen laboratorium*, Materials Forum, 1886.
- Bueno, R. S. *Análise Microestrutural de Junta Soldada de Aço Baixa Liga*. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- Callister, JR. W. D., *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002.
- Dieter, G. E. *Metalurgia Mecânica*. 2. ed, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1981.
- Eigenmann, B. & Macherauch, E., *Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen*. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, v. 27, pp. 426-237. 1996.
- Fry, T. "Measurement Good Practice Guide No.53" National Physical Laboratory, UK, 2000.
- Guimarães, P. B. *Estudo do Campo de Temperatura Obtido Numericamente para Posterior Determinação das Tensões Residuais numa Junta Soldada de Aço ASTM AH36*. Tese de Doutorado. UFPE, Recife, PE. 2010.
- Gurova, T. *Variação do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por Shot-Peening, Durante Deformação Plástica por Tração Uniaxial, em aços*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- Haus, S. A. *Influência dos Efeitos Bauschinger no Retorno Elástico em Aços Avançados de Elevada Resistência*. Dissertação de Mestrado. UFPR, Curitiba, PR, 2011.
- Hosford, W. F. *Mechanical Behaviour of Materials*. Cambridge University Press, 2005.
- Joffe, A. E., Kirpicheva, M. G. *Röntgenogramas of Strained Crystals*. *Philosophical Magazine*, v. 43, pp. 204-206. 1922.
- K. Poorhaydari, B. M. Patchett, D. G. Ivey. *Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness*, AWS Journal, 2005.

Kockelmann, H. e Schwarz, T. 1993. Die Bohrlochmethode-ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. MTB von HBM, 29(2): 33-38.

Lu, J. Bouhelier, C., Lieurade, H. P., Baralle, D., Miede, B., Flevanot, J. F. Study of Residual Welding Stress Using Step-by-step Hole Drilling and X-ray Diffraction Method. Welding in the World, v. 33, n. 2, pp. 118-128. 1994.

Lu, J. Handbook of Measurements of Residual Stress, SEM, 1996.

Malavolta, A. T. Metodologia para determinação dos parâmetros utilizados em uma nova superfície de escoamento anisotrópico para processos de conformação de chapas metálicas. Tese de Doutorado. UPS, São Carlos, SP. 2008.

Masing, G. IBID, p. 135 e 142, 1926.

Modenesi, P. J. Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico. UFMG, 2008. Disponível em: <[www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao\\_residual.pdf](http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf)> Acesso em: 03/05/2013.

Modenesi, P. J. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Dissertação de Mestrado. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004. Disponível em: <[www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/textos/metferritic.pdf](http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/textos/metferritic.pdf)> Acesso em: 03/05/2013.

Modenesi, P. M. Tenacidade do Aço UNS S31803 Após Soldagem. Relatório final PIBIC. Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, 2008.

Mott, N. F. Phil Mag. 43, p. 1151, 1952.

Munhoz, Dorival Jr. Determinação de tensão residual e austenita retida em aços cementados usando difração de raio X, 1983.

Noyan I. C. & Cohen, J. B. Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation. New York: Springer. 1987.

Okumura, T.; Tanigusgi, C. Engenharia de soldagem e aplicações. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

Oliveira, G. L. Avaliação de Tensões Residuais de Soldagem em Chapas Planas do Aço Estrutural ASTM A516 G70. Dissertação de Mestrado, UFCE, Fortaleza, CE. 2009.

Orowan, E. Cause and Effect of Internal Stresses - Internal Stresses and Fatigue in Metal. Detroit, 1958.

Porter, D. A., Easterling, K. E. Phase Transformations in Metals and Alloys, 2 ed, Chapman & Hall, London, UK. 1992.

Prevey, Paul S. X-Ray Diffraction - Residual Stress Techniques. Diffraction Methods - Lambda Research, Inc. p. 381-392, 1986.

Ribeiro, J. C. R. S. Análise de Tensões Residuais e Deformações em Soldadura. Dissertação de Mestrado. UNL. Monte da Caparica, Setúbal, Portugal. 2010.

Rolim, T. L. Sistemática indicadora de método para calibração de máquinas de medição por coordenadas. Tese de Doutorado, UFPB, João Pessoa, PB, 2003. 139p.

Sá, A. L. C.. Análise Microestrutural e de Propriedades Mecânicas Resultantes da Soldagem de um Aço do Tipo HY-80 com os Processos Eletrodo Revestido e Arame Tubular. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

Sasaki, J. M. Difração de Raio-X. Apostila, UFCE. 2000.

Scott, A. Soldagem MIG MAG. São Paulo: ARTLIBER EDITORA, 2008.

Seeger, A. Dislocation and mechanical properties os crystals. John-Wiley and Sons, p. 243, 1957.

Silva, C. C. Avaliação das Tensões Residuais de Soldagem em Tubulações de Pequeno Diâmetro Usadas em Refinaria de Petróleo. Dissertação de Mestrado. UFCE, Fortaleza, CE. 2007.

Siqueira Filho, A. V. Estudo Comparativo das Tensões Residuais em Juntas Soldadas pelas Técnicas de Medição por Coordenadas e Difração de Raios-X. Tese de Doutorado. UFPE, Recife, PE. 2012.

Soares, A. C.; Freire, J. L. F. Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego. Rio de Janeiro, 2003; 236p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sprael, J. M., Castex, L. X-ray Stress Analysis. Materials Science Forum. v. 79-82, pp. 143-152. 1991.

Sutero, R. Medição de Tensões Residuais por Indentação Associada à Holografia Eletrônica. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 2005.

Welzel, U. & Mittemeijer, E. J., 2003. Diffraction stress analysis of macroscopically elastically anisotropic specimens: On the concepts of siffraction elastic constants and stress factors. Journal of Applied Physics. v. 93, 9001-9011. 2003.

Whithers, P. J., Bhadeshia, H. K.. D. H. Residual stress. Part 1 - Measurement techniques. Materials Science and Technology, v. 17, pp. 355-365.

YAN, J. Study of Bauschinger effect in various spring steels. Dissertação de Mestrado, Universidade de Toronto, 1998.

## Apêndice – Memória de cálculo

Cálculo de Tensão Residual		Chapa 1									
Ponto	Xi	Xf	Yi	Yf	Xi-Xf	Yi-Yf	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	E/1-v2	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	39,686	39,687	71,334	71,335	-	-	2,375E-05	2,989E-05	227472	-7,443	-8,419
2	40,156	40,148	84,512	84,495	0,008	0,017	2,283E-04	3,363E-04	227472	74,884	92,086
3	39,359	39,349	103,628	103,602	0,010	0,026	2,819E-04	5,196E-04	227472	99,588	137,432
4	54,051	54,076	72,326	72,360	-	-	7,188E-04	6,733E-04	227472	-	-
5	54,469	54,465	101,346	101,339	0,004	0,007	1,029E-04	1,341E-04	227472	32,565	37,522
Cálculo de Tensão Residual		Chapa 2									
Ponto	Xi	Xf	Yi	Yf	Xi-Xf	Yi-Yf	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	E/1-v2	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	42,225	42,211	70,382	70,358	0,014	0,024	4,069E-04	4,748E-04	227472,5	124,966	135,773
2	42,751	42,737	84,479	84,451	0,014	0,028	4,031E-04	5,576E-04	227472,5	129,759	154,361
3	43,768	43,755	100,417	100,386	0,013	0,031	3,814E-04	6,125E-04	227472,5	128,549	165,350
4	54,933	54,920	71,144	71,127	0,013	0,017	3,793E-04	3,438E-04	227472,5	109,738	104,096
5	58,488	58,466	100,013	99,975	0,022	0,038	6,407E-04	7,669E-04	227472,5	198,066	218,161
Cálculo de Tensão Residual		Chapa 3									
Ponto	Xi	Xf	Yi	Yf	Xi-Xf	Yi-Yf	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	E/1-v2	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	44,641	44,638	68,769	68,764	0,003	0,005	8,938E-05	9,638E-05	227472,5	26,908	28,023
2	45,231	45,228	85,924	85,919	0,003	0,005	7,781E-05	1,035E-04	227472,5	24,761	28,847
3	45,486	45,484	103,881	103,877	0,002	0,004	5,534E-05	8,848E-05	227472,5	18,627	23,903
4	56,002	55,998	69,882	69,877	0,004	0,005	1,039E-04	9,073E-05	227472,5	29,819	27,727
5	57,998	57,999	104,181	104,183	-	-	3,473E-05	4,367E-05	227472,5	-10,881	-12,305
Cálculo de Tensão Residual		Chapa 4									
Ponto	Xi	Xf	Yi	Yf	Xi-Xf	Yi-Yf	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	E/1-v2	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	43,099	43,115	70,65	70,676	-	-	4,520E-04	5,187E-04	227472,5	-	-
2	44,499	44,495	87,604	87,596	0,004	0,008	1,156E-04	1,593E-04	227472,5	37,157	44,114
3	43,252	43,246	103,49	103,475	0,006	0,015	1,838E-04	3,078E-04	227472,5	62,807	82,556
4	57,481	57,457	73,141	73,111	0,024	0,030	6,829E-04	6,082E-04	227472,5	196,840	184,956
5	57,431	57,405	105,033	104,985	0,026	0,048	7,546E-04	9,660E-04	227472,5	237,569	271,236
Cálculo de Tensão Residual		Chapa 5									
Ponto	Xi	Xf	Yi	Yf	Xi-Xf	Yi-Yf	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	E/1-v2	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	51,334	51,324	70,025	70,012	0,010	0,013	2,791E-04	2,665E-04	227472,5	81,662	79,657

2	50,933	50,934	85,286	85,287	-	-	1,619E-05	1,898E-05	227472,5	-4,978	-5,421
3	52,496	52,490	101,976	101,964	0,006	0,012	1,740E-04	2,367E-04	227472,5	55,741	65,712
4	57,842	57,827	69,482	69,464	0,015	0,018	4,191E-04	3,524E-04	227472,5	119,378	108,758
5	58,256	58,255	102,277	102,276	0,001	0,001	1,845E-05	2,267E-05	227472,5	5,744	6,416
<b>Cálculo de Tensão Residual</b>		<b>Chapa 6</b>									
<b>Ponto</b>	<b>Xi</b>	<b>Xf</b>	<b>Yi</b>	<b>Yf</b>	<b>Xi-Xf</b>	<b>Yi-Yf</b>	<b><math>\epsilon_x</math></b>	<b><math>\epsilon_y</math></b>	<b>E/1-v2</b>	<b><math>\sigma_x</math></b>	<b><math>\sigma_y</math></b>
1	45,564	45,557	70,992	70,981	0,007	0,011	2,023E-04	2,207E-04	227472,5	61,081	64,002
2	45,731	45,725	85,885	85,873	0,006	0,012	1,795E-04	2,360E-04	227472,5	56,930	65,922
3	45,801	45,802	101,729	101,730	-	-	1,817E-05	2,825E-05	227472,5	-6,061	-7,667
4	55,11	55,194	70,152	70,259	-	-	2,409E-03	2,147E-03	227472,5	-	-
5	57,124	57,121	104,588	104,582	0,003	0,006	9,544E-05	1,223E-04	227472,5	30,058	34,338
<b>Cálculo de Tensão Residual</b>		<b>Chapa 7</b>									
<b>Ponto</b>	<b>Xi</b>	<b>Xf</b>	<b>Yi</b>	<b>Yf</b>	<b>Xi-Xf</b>	<b>Yi-Yf</b>	<b><math>\epsilon_x</math></b>	<b><math>\epsilon_y</math></b>	<b>E/1-v2</b>	<b><math>\sigma_x</math></b>	<b><math>\sigma_y</math></b>
1	48,688	48,699	72,526	72,543	-	-	3,260E-04	3,399E-04	227472,5	-97,340	-99,557
2	48,379	48,389	87,076	87,095	-	-	2,950E-04	3,717E-04	227472,5	-92,476	-
3	48,275	48,281	101,883	101,897	-	-	1,851E-04	2,734E-04	227472,5	-60,753	-74,819
4	55,335	55,354	71,664	71,688	-	-	5,345E-04	4,846E-04	227472,5	-	-
5	55,801	55,802	102,666	102,668	-	-	3,448E-05	4,441E-05	227472,5	-10,874	-12,455
<b>Cálculo de Tensão Residual</b>		<b>Chapa 8</b>									
<b>Ponto</b>	<b>Xi</b>	<b>Xf</b>	<b>Yi</b>	<b>Yf</b>	<b>Xi-Xf</b>	<b>Yi-Yf</b>	<b><math>\epsilon_x</math></b>	<b><math>\epsilon_y</math></b>	<b>E/1-v2</b>	<b><math>\sigma_x</math></b>	<b><math>\sigma_y</math></b>
1	45,652	45,649	71,681	71,676	0,003	0,005	8,366E-05	9,195E-05	227472,5	25,305	26,625
2	46,514	46,511	86,078	86,072	0,003	0,006	9,513E-05	1,232E-04	227472,5	30,049	34,523
3	46,108	46,143	102,24	102,317	-	-	9,889E-04	1,535E-03	227472,5	-	-
4	52,288	52,292	70,895	70,901	-	-	1,271E-04	1,206E-04	227472,5	-37,130	-36,100
5	53,565	53,573	100,877	100,892	-	-	2,216E-04	2,921E-04	227472,5	-70,339	-81,569
<b>Cálculo de Tensão Residual</b>		<b>Chapa 9</b>									
<b>Ponto</b>	<b>Xi</b>	<b>Xf</b>	<b>Yi</b>	<b>Yf</b>	<b>Xi-Xf</b>	<b>Yi-Yf</b>	<b><math>\epsilon_x</math></b>	<b><math>\epsilon_y</math></b>	<b>E/1-v2</b>	<b><math>\sigma_x</math></b>	<b><math>\sigma_y</math></b>
1	50,359	50,395	79,677	79,732	-	-	1,029E-03	1,100E-03	227472,5	-	-
2	50,479	50,514	93,441	93,488	-	-	5,385E-04	9,400E-04	227472,5	-	-

3	50,048	50,129	109,197	109,108	- 0,081	0,089	- 2,314E- 03	1,780E- 03	227472,5	- 222,731	117,411
4	58,499	58,574	85,55	85,461	- 0,075	0,089	- 2,143E- 03	1,780E- 03	227472,5	- 201,733	123,710
5	58,562	58,606	99,369	99,423	- 0,044	- 0,054	- 1,257E- 03	- 1,080E- 03	227472,5	- 190,832	- 169,030

<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 1</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0026	0,0026	9,0506	9,0504
2	0,0028	0,0030	10,4207	10,3420
3	0,0029	0,0034	11,9754	11,6092
4	0,0040	0,0039	16,2188	16,4280
5	0,0026	0,0027	9,2784	9,2735
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 2</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0031	0,0033	12,1961	12,0722
2	0,0031	0,0035	12,9120	12,5721
3	0,0031	0,0037	13,3485	12,7983
4	0,0031	0,0030	11,1253	11,1678
5	0,0038	0,0042	16,8082	16,2148
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 3</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0026	0,0026	9,1827	9,1819
2	0,0026	0,0026	9,1794	9,1766
3	0,0026	0,0026	9,1305	9,1278
4	0,0026	0,0026	9,1960	9,1976
5	0,0026	0,0026	9,0645	9,0642
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 4</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0032	0,0034	12,8268	12,6780
2	0,0026	0,0027	9,3640	9,3554
3	0,0027	0,0029	10,1217	10,0526
4	0,0039	0,0037	15,2349	15,5315
5	0,0041	0,0049	20,6218	19,1796
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 5</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0029	0,0028	10,2502	10,2587
2	0,0026	0,0026	9,0435	9,0435
3	0,0027	0,0028	9,7612	9,7369
4	0,0032	0,0030	11,3913	11,4833
5	0,0026	0,0026	9,0455	9,0454

<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 6</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0027	0,0028	9,7805	9,7731
2	0,0027	0,0028	9,7733	9,7509
3	0,0026	0,0026	9,0479	9,0477
4	0,0107	0,0095	67,1032	74,9165
5	0,0026	0,0026	9,2406	9,2368
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 7</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0029	0,0030	10,8390	10,8250
2	0,0029	0,0030	10,8956	10,8177
3	0,0027	0,0028	9,9532	9,9107
4	0,0035	0,0033	13,0424	13,1656
5	0,0026	0,0026	9,0649	9,0645
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 8</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0026	0,0026	9,1676	9,1667
2	0,0026	0,0027	9,2420	9,2380
3	0,0050	0,0071	34,7538	27,6882
4	0,0027	0,0026	9,2930	9,2940
5	0,0028	0,0029	10,1584	10,1163
<b>Cálculo da Incerteza de Medição</b>	<b>Chapa 9</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Incerteza expandida x</b>	<b>Incerteza expandida y</b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_x</math></b>	<b>Incerteza de <math>\sigma_y</math></b>
1	0,0031	0,0032	11,7903	11,7142
2	0,0026	0,0027	9,3227	9,3160
3	0,0026	0,0026	9,0756	9,0746
4	0,0033	0,0031	11,8592	11,9497
5	0,0026	0,0026	9,0941	9,0933