



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Rômulo do Nascimento Rodrigues**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS  
SOBRE OS NÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE  
AÇOS ASTM A516 Gr.60**

**Campina Grande – PB**

**Agosto de 2013**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS  
SOBRE OS NÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE  
AÇOS ASTM A516 Gr.60**

**Rômulo do Nascimento Rodrigues**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador(es): Prof. Dsc. Antonio Almeida Silva**

**Prof. Dsc. Theophilo Moura Maciel**

**Campina Grande-PB**

**Agosto de 2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- R696a Rodrigues, Rômulo do Nascimento.  
Avaliação do efeito da aplicação de vibrações mecânicas sobre os níveis de tensões residuais em juntas soldadas de aços ASTM A516 Gr.60 / Rômulo do Nascimento Rodrigues. – Campina Grande, 2013.  
129 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2013.
- "Orientação: Prof. Dsc. Antonio Almeida Silva, Prof. DSc. Theophilo Moura Maciel".  
Referências.
1. Juntas Soldadas. 2. Aço ASTM A516 Gr.60. 3. Tensões Residuais.  
4. Tensometria por Raios-X. 5. Tratamento por Vibrações. I. Silva, Antonio Almeida. II. Maciel, Theophilo Moura. III. Título.

CDU 621.791(043)

**“AVALIAÇÃO DO EFEITO DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS  
SOBRE OS NÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE  
AÇOS ASTM A516 Gr.60”.**

**RÔMULO DO NASCIMENTO RODRIGUES**

Dissertação Aprovada em 30/08/2013 pela banca examinadora constituída dos  
seguintes membros:



**Dr. Antonio Almeida Silva**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



**Dr. Theophilo Moura Maciel**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



**Dr. Marco Antonio dos Santos**

Examinador Interno

UAEM/CCT/UFCG



**Dr. Elineudo Pinho de Moura**

Examinador Externo

UFC

## **DEDICATÓRIA**

*À Ivanilde e Rozeli Rodrigues, Rafael Rodrigues, Maria Alves Bezerra e Janiery Castro.*

## AGRADECIMENTOS

Como já sabemos uma pesquisa é um processo de construção do conhecimento que tem como metas principais gerar novos conhecimentos, e/ou corroborar ou refutar algum conhecimento pré-existente. É basicamente um processo de aprendizagem tanto do indivíduo que a realiza quanto da sociedade na qual esta se desenvolve. Por mais solitário que essa jornada em busca do conhecimento possa às vezes parecer, só conseguimos chegar até o final graças aos estudos de outros pesquisadores, às conversas com colegas de Universidade, à ajuda e o cuidado dos familiares e de cada pessoa com nosso trabalho e com nossas ideias e planos.

Portanto, venho através destas poucas palavras agradecer as pessoas que fizeram parte dessa longa e dura jornada chamada mestrado. Primeiramente agradecer a Deus por ter me dado saúde, coragem e proteção durante esses dois anos de mestrado, para que pudesse estar aqui concluindo mais essa fase da minha vida. Gostaria de agradecer aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica que fizeram com que me sentisse bem-vindo, lá em setembro de 2011, quando cheguei a Campina Grande com esse desejo de cursar o mestrado. Ao Professor Carlos José que mesmo não me conhecendo e não sendo o coordenador do PPGEM na época, disponibilizou um pouco do seu tempo para que pudéssemos conversar sobre minhas ideias e pretensões e dando aquele primeiro empurrão para início dessa jornada. Ao professor Yoge pelo grande apoio nos equipamentos e no laboratório para que pudéssemos realizar os tratamentos por vibrações.

Agradecimento especial ao meu orientador, Professor Antonio Almeida, que acreditou nesse projeto, quando ainda não era meu orientador e que hoje conclui essa etapa junto comigo. Quero agradecer pela amizade, paciência, ensinamentos e horas gastas lendo meus textos e principalmente corrigindo. Agradecimentos também ao Professor Theophilo Maciel pela amizade e pelos ensinamentos passados durante todas as cadeiras que pude cursar sob seus cuidados e por ter acreditado juntamente com o Professor Antonio Almeida no potencial dessa ideia.

Aos amigos de mestrado e de prédio Wiarley, Waldeiza e Samuel obrigado pelas inúmeras conversas e pelos momentos de descontração sejam elas nos corredores da faculdade ou do prédio, na academia ou indo correr no parque da criança. Agradecimentos também ao colega de mestrado e de laboratório Richard Senko pela grande ajuda com os experimentos no Laboratório de Vibrações e Instrumentação (LVI), vindo até em certos

momentos deixar suas atividades para dedicar um pouco do seu tempo aos meus experimentos.

Também gostaria de agradecer a um grande parceiro e irmão, meu grande amigo Anderson Laursen, muito obrigado pela sua amizade e companheirismo, pela sua grande colaboração com a parte de tratamento térmico das amostras e pelas incontáveis conversas e reuniões na sua casa para tomar as inúmeras xícaras de café “fraquinho”.

Agradecimento muito especial para meu parceiro, amigo e irmão Aureliano Xavier. Gostaria de deixar o meu muito obrigado a você meu amigo, obrigado pelas inúmeras horas de companhia nos estudos para as provas e nos diversos laboratórios que com sua ajuda pude contar. Você mesmo com a suas dificuldades pessoais nunca me deixou na mão sempre estando lá para me ajudar desde a confecção das amostras até a construção e montagem da bancada para tratamento por vibrações. Saiba que esse mestrado tem seu DNA e que você, juntamente com sua esposa Juliana e seu filho Matheus se tornaram parte da minha família também.

Não poderia deixar de mencionar e agradecer as pessoas mais importantes na minha vida, a Minha família, algo de tamanha importância e extremo valor que corro até risco de pecar por excesso na busca de simplificar toda a minha gratidão. Família, muito obrigado por TUDO. Principalmente quando me apoiaram na decisão de largar o emprego pra fazer o mestrado, sem o carinho, suporte e ensinamento de vocês, Pai e Mãe, eu não estaria aqui hoje. Vó Maria muito obrigada pelo seu amor e pelos seus conselhos sempre sábios. Rafael, meu irmão e melhor amigo, muito obrigado pelas dicas e por estar comigo nas horas que precisei.

Gostaria de deixar o meu muito obrigado também a uma pessoa muito especial, que entrou na minha vida para somar, a minha querida Janiery Castro. Linda, não existe outra pessoa que tenha absorvido parte dessa experiência de maneira tão forte quanto você. Você sempre me incentivou, me ouviu, me ajudou e sempre me cobrou para que eu continuasse e amadurecesse em todos os sentidos. Essa vitória também é sua.

A CAPES / CNPq pelo apoio financeiro.

Enfim, a outras pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado!

Rodrigues, R. N., 2013, “Avaliação do efeito da aplicação de vibrações mecânicas sobre os níveis de tensões residuais em juntas soldadas de aços ASTM A516 Gr. 60”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

## **RESUMO**

No mundo atual com o elevado crescimento da indústria petroquímica, a tecnologia da soldagem passou por um grande desenvolvimento devido à elevada fabricação de estruturas marítimas, tanques de armazenamento de derivados de petróleo, caldeiras e vasos de pressão para plantas de refino. Perante as diversas alterações metalúrgicas e de restrições à contração e dilatação sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais que são tensões internas ao material sem que o mesmo esteja exposto a forças externas. Elas são geralmente indesejáveis, tendo em vista que podem acarretar diversos problemas, tais como trincas a frio, fratura por fadiga, corrosão sob tensão, dentre outros. Embora diversos trabalhos envolvendo tensões residuais tenham sido desenvolvidos nos últimos anos, pouco se sabe com relação à variação das tensões residuais em juntas soldadas quando submetidas ao tratamento de alívio de tensões por vibrações mecânicas. Da mesma forma, não existem muitas informações sólidas relacionadas com a comparação do grau de eficiência das técnicas de alívio de tensões por tratamento térmico pós-soldagem e tratamento por vibrações. Portanto, almeja-se com este trabalho aplicar o tratamento de alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas em juntas soldadas de aço ASTM A516 Gr.60, induzidas por processos de soldagem e avaliar os níveis de tensões residuais após o tratamento com o intuito de analisar se a técnica mostra-se eficiente e quais são suas vantagens e limitações. Além disso, espera-se contribuir para o melhor entendimento da técnica de alívio de tensões por vibrações mecânicas tentando entender quais dos seus parâmetros influem mais nos seus resultados.

---

**Palavras-chave:** Aço ASTM A516 Gr.60, Juntas Soldadas, Tensões Residuais, Tensometria por Raios-X, Tratamento por Vibrações.

Rodrigues, R. N., 2012, "Evaluation of the effect of mechanical vibration on the levels of residual stresses in welded joints of ASTM A516 Gr. 60 steels", M.Sc. Thesis, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil.

## **ABSTRACT**

Nowadays with the high growth of petrochemical welding technology a great development due to high manufacturing offshore structures, storage tanks of petroleum, boilers and pressure vessels for refining plants have been done. Due to various metallurgical changes and restrictions to contraction and expansion undergone by materials when subjected to welding thermal cycle, internal stresses are generated in welded joint which are nominated residual stresses. It is generally undesirable because it can lead to several problems, such as cold cracks, stress corrosion cracks, among others. Although several studies involving residual stresses have been developed in recent years, little information's known about the variation of the residual stresses level in welded joints when subjected to the treatment of stress relief by mechanical vibration. Likewise, there are little information related to the comparison between the degree of efficiency by using the post-weld heat treatment and those treatment. . Therefore, the goal of this work was to apply the relieve residual stresses treatment by mechanical vibration in ASTM A516 Gr 60 steel welded joints used in oil industry, and compare the results with those obtained by post heat treatment and evaluate the efficiency level of this technique In addition, this works also hope to contribute for a better understanding of this technique and to find which parameters have a greater influence on the results.

---

**Keywords:** ASTM A516 Gr.60 Steel, Welded Joint, Residual Stresses, X-ray Tensometry, Treatment by Vibrations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de tanques e vasos de pressão.....	15
Figura 2 - Modelos de vasos de pressão quanto ao posicionamento.....	25
Figura 3 - Juntas soldadas: longitudinal e circunferencial .....	26
Figura 4 - Evolução do processo de soldagem ao longo dos anos. ....	27
Figura 5 - Esquema do processo MIG/MAG .....	28
Figura 6 - a) Sistema de alimentação de rolos simples b) sistema de alimentação de rolos duplos....	29
Figura 7 - Comportamento de tensões na direção de soldagem .....	31
Figura 8 - Modelo para descrever tensões térmicas. Conjunto de barras presas nas extremidades (A) e barra central sendo aquecida (B).....	32
Figura 9 - Variação da tensão $\sigma$ com a temperatura na barra central .....	33
Figura 10 - Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem. ....	34
Figura 11 - Exemplos de trincas a quente. a)Trinca a quente longitudinal que aparece na superfície de um metal de solda por SMAW. b) Trinca a quente longitudinal que aparece na secção transversal de um metal de solda por SAW. ....	36
Figura 12 - Exemplos de trincas a frio. a) Trinca a frio é iniciada na raiz da solda e desenvolvida no metal de solda. b) Trinca a frio é iniciada na margem da solda e é desenvolvida na Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	37
Figura 13 - Corrosão sob tensão em aço inox de Classe 304.....	39
Figura 14 - Difração de raios-X para distância interplanar. ....	41
Figura 15 - Sistema de coordenadas polares. ....	42
Figura 16 - Tipos de soldas segundo a API 579. a) Soldas em vasos cilíndricos, b) Solda em vasos tipo Heads, c) Soldas de filete em juntas T, d) Soldas em tanques de armazenamento, e) Soldas de filete em juntas de canto e f) Soldas de reparo.....	44
Figura 17 - Modelo de equipamento usado na indústria para alívio de tensões por vibração - Fórmula 62.....	49
Figura 18 - a) Tratamento por vibrações feita no monte de transporte para a estação espacial life boat da NASA b) Tratamento em propulsores de proa para uma plataforma de petróleo off-shore.....	52
Figura 19 - Máquina de soldagem MIG/MAG.....	55
Figura 20 - Difrátômetro portátil para análise de tensão residual .....	55
Figura 21 - Analisador de sinal dinâmico (Agilent 35670A).....	56
Figura 22 - a) Martelo de impacto (PCB Piezotronics 086C03); b) acelerômetro (PCB 3528B10) montado na extremidade livre da viga. ....	56
Figura 23 – Coletor analisador de sinal Vibtron .....	57
Figura 24 - Modelo de vibrador pneumático da série NCR .....	57
Figura 25- Plano de corte da chapa ilustrando as dimensões das amostras.....	60
Figura 26 - Ilustração das dimensões da viga e do cordão de solda.....	60
Figura 27 - a) Linhas para medição das tensões transversais; b) Linhas para medição das tensões longitudinais.....	61
Figura 28 - Interface gráfica construída na plataforma Matlab .....	62
Figura 29 - Regiões da interface gráfica. a) Dados para Analise; b) Resultados das tensões residuais; c) Resultados da inspeção .....	63
Figura 30 - Gráfico de tensões residuais transversais da norma gerada pela interface gráfica .....	64
Figura 31 - Esquema de um procedimento modal experimental.....	65

Figura 32 - Modos de vibração para uma viga na condição engastada-livre .....	65
Figura 33 - Setup de análise modal experimental nas amostras com e sem o excitador de vibração..66	
Figura 34 - a) Montagem das vigas na estufa de tratamento; b) Painel com temperatura de tratamento.....	67
Figura 35 - a) Bancada experimental para realização do tratamento por vibração; b) Detalhe do vibrador pneumático.....	68
Figura 36 - Ilustração das regiões utilizadas na análise microestrutura das amostras.....	69
Figura 37 - Interface para auxílio no cálculo da distribuição de temperaturas na soldagem. ....	71
Figura 38 - Resultado da distribuição de temperaturas na espessura da chapa. ....	72
Figura 39 - Microestrutura do Aço ASTM A516 Gr.60. Ataque: Nital 2% Aumento: 50x.....	73
Figura 40 - Regiões da ZTA e suas respectivas temperaturas.....	73
Figura 41 - Microestrutura da amostra submetida a tratamento por vibrações. a) Região A (20x); b) Região B (20x); c) Região C (50x). Ataque: Nital 2% .....	74
Figura 42 - Microestrutura da amostra submetida a tratamento térmico. a) Região A (20x); b) Região B (20x); c) Região C (50x). Ataque: Nital 2%.....	75
Figura 43 - Espectro de frequência obtido para 2 bar (Agilent).....	76
Figura 44 - Espectro de frequência obtido para 4 bar (Agilent).....	77
Figura 45 - Espectro das frequências naturais das amostras sem excitador (Avg:5) .....	78
Figura 46 - Espectro das frequências naturais das amostras com excitador (Avg:5).....	78
Figura 47 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais transversais (sem tratamento) .....	81
Figura 48 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais longitudinais (sem tratamento) .....	82
Figura 49 - Gráfico comparativo das curvas de tensões residuais transversais da amostra versus tensões da norma API 579.....	82
Figura 50 - Comparativo entre as tensões residuais transversais com as geradas pela norma API 579 (sem tratamento).....	83
Figura 51 - Comparativo entre as tensões residuais longitudinais com as geradas pela norma API 579 (sem tratamento).....	84
Figura 52 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais transversais (pós-tratamentos).....	85
Figura 53 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais longitudinais (pós-tratamentos).....	86
Figura 54 - Comparativo entre as porcentagens de reduções das tensões residuais transversais nas duas linhas de medição.....	88
Figura 55 - Comparativo entre as porcentagens de reduções das tensões residuais longitudinais nas duas linhas de medição.....	88
Figura 56 - Comparativo entre os percentuais de redução das tensões pós-tratamentos em relação à norma API 579 .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Acidentes com equipamentos pressurizados nos EUA (1997, 2000 e 2001).....	16
Tabela 2 - Causas de acidentes com vasos de pressão nos EUA (1997, 2001 e 2003).....	17
Tabela 3 - Métodos para alívio de tensões residuais.....	19
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 Gr 60.....	53
Tabela 5 - Composição química da chapa de aço ASTM A 516 Gr 60.....	53
Tabela 6 - Composição química do metal de adição.....	54
Tabela 7- Matriz de planejamento experimental da dissertação.....	59
Tabela 8- Parâmetros utilizados para a soldagem das amostras.....	60
Tabela 9 - Resultados experimentais para a análise modal nas juntas soldadas (Avg:5).....	77
Tabela 10 - Tensões residuais transversais obtidas das juntas soldadas (sem tratamento).....	79
Tabela 11 - Tensões residuais longitudinais obtidas das juntas soldadas (sem tratamento).....	80
Tabela 12 - Tensões residuais transversais obtidas das juntas soldadas (pós-tratamentos).....	84
Tabela 13 - Tensões residuais longitudinais obtidas das juntas soldadas (pós-tratamentos).....	85
Tabela 14- Níveis de redução percentual das tensões residuais transversais provocadas pelos dois tratamentos.....	87
Tabela 15 - Níveis de redução percentual das tensões residuais longitudinais provocadas pelos dois tratamentos.....	87
Tabela 16 - Percentuais de redução das tensões residuais pós-tratamentos em relação à norma API 579.....	90
Tabela 17 - Tabela para calculo da ANOVA de um planejamento fatorial 2k.....	91
Tabela 18 - ANOVA para as tensões residuais transversais (linha 1).....	92
Tabela 19 - ANOVA para as tensões residuais transversais (linha 2).....	93
Tabela 20 - ANOVA para as tensões residuais longitudinais (linha 1).....	93
Tabela 21 - ANOVA para as tensões residuais longitudinais (linha 2).....	93

## LISTA DE SÍMBOLOS

T = Temperatura [°C]

To = Temperatura de pré-aquecimento [°C]

k = Condutividade térmica do material [J/m s K]

g = Espessura da chapa [m]

Q = Calor transferido pela fonte de solda [W]

V = Velocidade de soldagem [m/s]

$\alpha$  = Difusividade térmica do material [m<sup>2</sup>/s]

Ko = Função de Bessel modificada de ordem zero.

r = Distância radial da origem para chapas, calculada com  $\sqrt{(x^2 + y^2)}$

$\Delta L$  = Variação do comprimento

$L_0$  = Comprimento inicial

$L_1$  = Comprimento final

$\alpha$  = Coeficiente de dilatação linear

$\Delta T$  = Variação da temperatura

E = Módulos de elasticidade do material à temperatura ambiente

$E_t$  = Módulos de elasticidade do material à temperatura (T)

$\sigma_c$  = Tensão na barra central

$\sigma_l$  = Tensão na barra lateral

d = Distância interplanar

e = Deformação

s = Tensão

q = Ângulo de difração

m = Coeficiente de atrito

l = Comprimento de onda

$\sigma_{ys}$  = Limite de escoamento do material

$\sigma_{ys}^r$  = Limite de escoamento do material real

$\sigma^r(y)$  = Tensão residual na posição y

w = Espessura do cordão de solda

$R_r$  = Fator de redução de tensão

r = Raio médio do componente

t = Espessura do componente

$H_t$  = Aporte de calor (J/cm);

$H_l$  = Aporte de calor líquido (J/cm);

V = Tensão no arco (V);

I = Corrente de soldagem (A);

v = Velocidade de soldagem (cm/s).

$\eta$  = Eficiência de transferência de energia

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Contextualização do Problema .....	15
1.2. Justificativa .....	20
1.3. Objetivos .....	20
1.3.1. Objetivos gerais .....	20
1.3.2. Objetivos específicos .....	21
1.4. Delimitação do Tema .....	21
1.5. Organização da Dissertação .....	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	24
2.1. Aplicações de Juntas Soldadas na Indústria .....	24
2.1.1. Vasos de pressão .....	24
2.2. Processos de Soldagem .....	26
2.2.1. Processo GMAW .....	27
2.2.2. Distribuição de temperatura durante a soldagem .....	29
2.3. Tensões Residuais .....	31
2.3.1. Desenvolvimento das tensões residuais .....	32
2.3.2. Efeitos das tensões residuais sobre as propriedades da solda .....	35
2.3.2.1. Efeito das tensões residuais sobre a formação de trincas .....	35
2.3.2.2. Efeito das tensões residuais sobre a resistência a fadiga .....	38
2.3.2.3. Efeito das tensões residuais na corrosão sob tensão .....	38
2.4. Métodos para Determinação das Tensões Residuais .....	40
2.4.1. Tensometria por difração de raios X .....	40
2.5. Norma API 579 .....	43
2.6. Métodos para Tratamento de Alívio de Tensões Residuais .....	46
2.6.1. Tratamento térmico para alívio de tensões residuais .....	46
2.6.2. Tratamento para alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas .....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	53
3.1. Materiais .....	53
3.1.1. Metal de base .....	53
3.1.2. Metal de adição .....	54
3.1.3. Elementos de proteção .....	54
3.2. Equipamentos utilizados .....	54
3.2.1. Equipamentos empregados na soldagem das juntas .....	54
3.2.2. Equipamento para realização das medidas de tensões residuais .....	55
3.2.3. Equipamentos para análise de vibrações .....	56

3.2.4.	Equipamento para tratamento por vibração.....	57
3.3.	Metodologia.....	58
3.3.1.	Planejamento experimental.....	58
3.3.2.	Corte e preparação das amostras .....	59
3.3.3.	Soldagem das juntas .....	60
3.3.4.	Tensometria por difração de raios X .....	61
3.3.5.	Interface gráfica.....	62
3.3.6.	Análise modal experimental.....	64
3.3.7.	Tratamento térmico.....	67
3.3.8.	Tratamento por vibração mecânica .....	68
3.3.9.	Preparação e Análise Metalográfica.....	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	70
4.1.	Energia de soldagem e distribuição de temperatura .....	70
4.2.	Análise Microestrutural .....	72
4.3.	Análise modal experimental das amostras soldadas .....	76
4.3.1.	Determinação da faixa de frequência de excitação .....	76
4.3.2.	Determinação das frequências naturais das amostras.....	77
4.4.	Tensões residuais pré-tratamento.....	79
4.5.	Tensões residuais pós-tratamento .....	84
4.6.	Planejamento Experimental .....	91
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	95
5.1.	Conclusões.....	95
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	96
6.	Referências Bibliográficas .....	97
	APÊNDICE A – Gráficos comparativos de curvas de tensões residuais pré-tratamento versus tensões da norma API 579 .....	103
	APÊNDICE B – Gráficos comparativos de curvas de tensões residuais pós-tratamento versus tensões da norma API 579.....	116
	ANEXO – PONTOS DE PORCENTAGEM DA DISTRIBUIÇÃO F, 5%.....	129

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização do Problema

No mundo atual com o elevado crescimento da indústria petroquímica, a tecnologia da soldagem passou por um grande desenvolvimento devido à elevada fabricação de estruturas marítimas, tanques de armazenamento de derivados de petróleo, caldeiras e vasos de pressão para plantas de refino. Na indústria, o processamento e estocagem de muitos produtos normalmente são feitos a pressões diferentes da pressão atmosférica. Dessa maneira, são empregados recipientes fechados e com resistência para suportar pressões no seu corpo, assim como temperaturas que extrapolam a ambiente. Esses equipamentos, denominados “vasos de pressão”, por geralmente operarem sujeitos à pressão e/ou temperaturas elevadas, são considerados equipamentos de alto risco, por conterem grande quantidade de energia acumulada no seu interior.

O projeto e a construção de vasos de pressão (Fig.1) envolve uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, pois as falhas em vasos de pressão podem acarretar consequências catastróficas até mesmo com perda de vidas, sendo considerados os vasos de pressão equipamentos de grande periculosidade.

**Figura 1 - Exemplos de tanques e vasos de pressão.**



**Fonte: (Da silva, 2009).**

A segurança torna-se um assunto muito sério quando se trabalha com caldeiras e com os vasos de pressão. Os riscos envolvidos são diversos (explosões, incêndios entre muitos), apesar dos recursos de intertravamentos que têm sido implementados e das melhorias nos sistemas de controle. Não é sem razão que, nos países do primeiro mundo, como também no Brasil, existam órgãos especialmente voltados a monitorar a segurança em tais equipamentos. É o caso, por exemplo, do *National Board of Boiler and Pressure Vessels Inspectors*, criado em 1919 nos Estados Unidos (DA CRUZ, 2008). Este órgão promove o

acompanhamento e o estudo do número de acidentes com equipamentos pressurizados e as causas que levaram a sua ocorrência de tal forma que os mesmos possam ser reparados. A tabela 1 mostra os quantitativos de acidentes com equipamentos pressurizados nos Estados Unidos entre os anos de 1997, 2000 e 2001 obtidos pela National Board.

**Tabela 1 - Acidentes com equipamentos pressurizados nos EUA (1997, 2000 e 2001).**

Tipo de Equipamento	Ano: 1997			Ano: 2000			Ano: 2001		
	A	F	M	A	F	M	A	F	M
Caldeira de Potência	451	24	4	460	20	8	296	56	7
Caldeira a vapor para aquecimento	809	6	0	1047	2	0	1091	0	1
Caldeira de água quente p/ aquecimento	903	4	1	958	2	0	631	10	0
Vasos de Pressão	292	41	13	221	3	6	201	18	4
<b>Total</b>	<b>2455</b>	<b>75</b>	<b>18</b>	<b>2686</b>	<b>27</b>	<b>14</b>	<b>2219</b>	<b>84</b>	<b>12</b>

**OBS: A - Acidentes, F - Feridos, M - Mortes.**

**Fonte: (NATIONAL BOARD, 2013).**

Podemos perceber ao analisarmos a tabela 1 que com o passar dos anos houve algumas mudanças com relação ao número de acidentes com equipamentos pressurizados, onde: para caldeiras de potência e caldeiras de água quente para aquecimento tivemos queda de até 35% do número de acidentes; e para caldeiras a vapor para aquecimento tivemos um aumento de 30% no número de acidentes. Para os vasos de pressão tivemos uma queda máxima de 30% entre os anos de 1997 e 2000 e de 9% entre os anos de 2000 e 2001. Embora tenham ocorrido mudanças de caráter redutivo na maioria dos equipamentos pressurizados, os números de acidentes ainda permanecem num patamar elevado vindo os mesmos a ocasionar número de feridos e de óbitos ainda consideráveis. Estudos e análises foram realizados de modo a tentar encontrar os agentes causadores de tais acidentes com os equipamentos pressurizados. A tabela 2 mostra as principais causas de acidentes com vasos de pressão nos EUA entre os anos de 1997, 2001 e 2003 obtidos pela National Board.

Tabela 2 - Causas de acidentes com vasos de pressão nos EUA (1997, 2001 e 2003).

Tipos de Ocorrência/Causa	Ano: 1997			Ano: 2001			Ano: 2003		
	A	F	M	A	F	M	A	F	M
Diversos	82	0	0	0	0	0	0	0	0
Causa Desconhecida (Sendo investigada)	1	0	2	4	2	6	17	1	0
Válvula de Segurança	8	2	0	7	0	0	4	1	0
Controles de Limite	7	2	1	6	0	0	5	0	0
Instalação Inadequada	12	23	3	9	0	0	9	0	1
Reparo Inadequado	6	1	0	11	0	0	5	0	0
Deficiência de Projeto ou Fabricação	35	7	1	15	1	0	5	1	0
Erro de Operação ou Manutenção Deficiente	141	6	6	169	0	0	42	10	7
<b>Total</b>	<b>292</b>	<b>41</b>	<b>13</b>	<b>221</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>87</b>	<b>13</b>	<b>8</b>

OBS: A - Acidentes, F - Feridos, M - Mortes.

Fonte: (NATIONAL BOARD, 2013).

Os vasos de pressão estão apresentando uma tendência de queda em quantidade de acidentes, provavelmente devido às melhorias com a automação dos processos. Contudo, apresentaram como a principal causa de acidentes: “Erro de operação ou Manutenção Deficiente”, logo a falha humana continua sendo evidenciada nestes equipamentos (Da Cruz, 2008). Outro dos grandes problemas que levam a ocasionar acidentes com vasos de pressão está correlacionado com a deficiência de projeto ou durante o processo de fabricação, em que o surgimento de tensões residuais induzidas pelo processo de soldagem representa um dos grandes causadores de acidentes. Contudo, é negligenciada a sua presença levando o mesmo a sofrer ruptura em serviço devido à combinação de cargas e pressões variáveis durante sua operação.

A soldagem é um processo de fabricação que consiste na união de duas partes metálicas usando uma fonte de calor, com ou sem o uso de pressão (Wainer, 2004), é bastante utilizada na construção ou no reparo de vasos de pressão e tubulações industriais. Ela pode ser executada por vários processos manuais, semiautomáticos ou automáticos dos quais os mais usados são os seguintes:

- Soldagem Manual: Ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*) e ao Arco Elétrico com Eletrodo de Tungstênio com Proteção Gasosa (GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*) também conhecida como TIG (*Tungsten Inert Gas*).
- Soldagem semi-automática: Ao Arco Elétrico com Proteção Gasosa (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) também conhecida como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*).

- Soldagem automática: Ao Arco Submerso (SAW - *Submerged Arc Welding*).

A soldagem em muitos casos é usada de forma errônea na manutenção e reparo de vasos de pressão vindo a ocasionar muitos acidentes devidos às alterações provocadas pelo processo termomecânico. Tendo em vista tal problema foi que começaram a surgir muitos estudos e normas com o objetivo de diminuir de forma considerável essas alterações provocadas pelos processos de soldagem e com isso acarretar a redução do número de acidentes que acompanham tais mudanças.

Perante as diversas alterações metalúrgicas e de restrições à contração e dilatação sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais que são tensões internas ao material sem que o mesmo esteja exposto a forças externas. Elas são geralmente indesejáveis, tendo em vista que podem acarretar diversos problemas, tais como trincas a frio, fratura por fadiga, corrosão sobtensão, dentre outros.

Tendo em vista que a geração de tensões residuais serem uma características intrínsecas ao ciclo térmico gerado por qualquer processo de soldagem, não sendo possível evitá-las, e a sua presença é geralmente indesejada, pois está associada a diversos problemas metalúrgicos, torna-se então imprescindível conhecer formas de reduzi-las tanto no antes da execução da soldagem como após o processo ter sido realizado. O nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído antes da soldagem reduzindo-se a quantidade de calor fornecido à junta ou o quantidade de metal depositado. Na prática, isto pode ser feito otimizando-se o desenho do chanfro e evitando-se depositar material em excesso. A seleção de processos de maior eficiência térmica é uma possível alternativa de controle (BRAGA, 2011).

Existem muitos tratamentos pós-soldagem com o objetivo de aliviar essas tensões residuais formadas durante o ciclo térmico da soldagem. Estes tratamentos estão divididos em duas categorias: térmicos e mecânicos. Os tratamentos mecânicos são compostos por três procedimentos distintos: o martelamento, o encruamento e a vibração. Já quanto aos tratamentos térmicos para alívio de tensões, estes podem ser por recozimento normal, recozimento a alta temperatura e a baixas temperaturas. A tabela 3 mostra com mais detalhes cada um dos tratamentos.

Tabela 3 - Métodos para alívio de tensões residuais.

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

(a) Processos mecânicos

(b) Processos térmicos

Fonte: (BRAGA, 2011)

O tratamento por vibrações também denominado de VSR (Vibration Stress Relief) consiste no uso de vibrações mecânicas com o objetivo de reduzir as tensões residuais. É um método baseado na ressonância vibratória, em que as peças são submetidas a vibrações de baixa frequência por um curto período de tempo. O tratamento por vibração mecânica vem sendo utilizada há mais de 20 anos, em várias partes do mundo (Martins, 2012), com resultados satisfatórios e comprovada economia de energia, aparecendo como uma opção aos tratamentos térmicos por apresentar um menor custo de energia e horas de trabalho, assim como por manter as propriedades mecânicas de parte dos componentes inalteradas. As tensões não reaparecem em serviços posteriores e o procedimento não representa riscos de contaminação ambiental.

## **1.2 Justificativa**

Os resultados práticos do tratamento de alívio de tensões por vibração têm sido comprovados em empresas aqui no Brasil, porém sua credibilidade nos meios industriais e acadêmico ainda é questionada. Isto se deve ao fato de que as instituições normativas ainda não incluíram esta tecnologia, provavelmente devido à falta de comprovações científicas que embasem os resultados práticos atingidos (MARTINS, 2012). Embora o estudo de tensões residuais tenha chamado a atenção de diversos pesquisadores nos últimos anos, dada a sua atuação direta nos principais problemas metalúrgicos relacionados à soldagem, pouco se sabe ainda sobre as características do tratamento por VSR e suas vantagens enquanto processo e com relação aos demais processos de controle de tensões pós-soldagem.

Portanto, tendo em vista a carência que existe com relação ao conhecimento científico do tratamento de vibrações mecânicas para o alívio de tensões residuais é que nos motivamos a realização deste trabalho. Acredita-se que com o conhecimento mais amplo e em maior profundidade sobre o grau de redução dos níveis das tensões residuais, induzidas por processos de soldagem manuais ou automáticos, com relação ao tratamento por VSR, e sua comparação com os tratamentos térmicos, será possível avaliar o aumento da segurança operacional do tratamento em estudo resultando no aumento da confiabilidade dos produtos e na segurança dos mesmos.

O metal de base utilizado nesta pesquisa foi o aço ASTM A516 grau 60. Este material é comumente aplicado na fabricação de vasos de pressão, por ser um aço que atende aos requisitos de tenacidade em serviços de moderada e baixa temperatura, onde a graduação 60 de sua especificação corresponde à 60.000 PSI de resistência mínima à tração. Entre os quatro tipos de aço ASTM A516 disponíveis comercialmente (graus 55, 60, 65 e 70), ele é o terceiro com relação à maior porcentagem de carbono em sua composição e muito estudado por vários pesquisadores.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1. Objetivos gerais**

Avaliar a eficácia do tratamento de alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas (VSR) em juntas soldadas de aço ASTM A516 Gr.60.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Montar uma bancada experimental tipo viga *cantilever* contendo a junta soldada acoplada a um excitador de forma a executar o tratamento por vibração mecânica onde será realizada a variação de frequência de excitação e variação de tempo de tratamento.
- Avaliar o comportamento dinâmico e estrutural da viga contendo a junta soldada de forma a obter as primeiras frequências naturais que serão utilizadas para o tratamento por VSR.
- Avaliar a microestrutura obtida nas juntas devido ao processo de soldagem.
- Avaliar e comparar os níveis de tensões residuais na junta soldada após o tratamento por vibração e por tratamento térmico.
- Conceber e elaborar uma interface gráfica com algoritmo em linguagem Matlab que calcule e expresse as tensões residuais especificadas pela norma API 579, visando avaliar os resultados das tensões obtidas após os tratamentos comparando-as entre si e em relação às especificadas pela norma.

## 1.4 Delimitação do Tema

Neste trabalho busca-se investigar o nível de redução das tensões residuais em juntas soldadas submetidas ao processo de tratamento de vibrações mecânicas, a partir de um dispositivo composto por uma estrutura tipo viga contendo uma junta soldada na sua região central, de forma a comparar os níveis de redução obtidos pelo tratamento térmico para alívio de tensões e correlacionar com as tensões residuais máximas estipuladas pela norma API 579.

Além disso, alguns parâmetros de tratamento por vibração como tempo de duração do tratamento e frequência de excitação serão avaliados com o intuito de investigar a eficiência do tratamento com relação à variação de redução dos níveis de tensões residuais conseguindo-se assim caracterizar qual dos parâmetros possui maior influência sobre o tratamento.

O estudo planejado para esta dissertação procurou proporcionar o melhor entendimento com relação à variação dos parâmetros de tratamento por vibrações mecânicas para alívio de tensões para um determinado tipo de material e para uma determinada característica de espessura e geometria de junta soldada, o que acarretará numa variação das frequências naturais da estrutura.

Dentro do possível tentou-se manter os mesmos parâmetros de soldagem, o que acarreta num aporte térmico de mesma magnitude para todas as amostras, o que leva a um comportamento das tensões residuais, inseridas pelo ciclo térmico, até certo ponto, semelhantes para todas as amostras.

Outro fator comum a todas as juntas devido ao aquecimento gerado pelo processo de soldagem está relacionado com as propriedades do material na zona termicamente afetada (ZTA), pois, para este determinado aquecimento o metal sofreu uma variação metalúrgica, acarretando um comportamento específico quando o mesmo foi submetido ao tratamento por vibração. Porém, variações no processo e nos parâmetros de soldagem levariam a mudanças no comportamento das tensões residuais e/ou variações nas características do material na região da ZTA após a soldagem, o que poderia levar a amostra a sofrer um comportamento distinto, quando exposto ao tratamento. Portanto, os resultados obtidos durante a pesquisa que levaram a elaboração dessa dissertação foram obtidos mantendo-se constantes a espessura e geometria da junta, os parâmetros de soldagem e o processo de soldagem.

## **1.5 Organização da Dissertação**

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, assim distribuídos:

No Capítulo 1 é feita a introdução ao trabalho, procurando dar uma visão geral do estudo, apresentando e justificando o tema da dissertação, bem como as hipóteses, delimitações e os objetivos desta investigação.

O Capítulo 2 pretende enquadrar o tema de forma mais aprofundada abordando alguns conceitos de processos de soldagem, sobre tensões residuais e seus principais efeitos, além de discutir as técnicas existentes para medição e para alívio das tensões e sobre a norma API 579 que estipula limites máximos de tensões admissíveis para o material em estudo.

O Capítulo 3 descreve a metodologia seguida na pesquisa e apresenta os materiais, técnicas e procedimentos para realização dos tratamentos e preparação das amostras, equipamentos e programas computacionais utilizados no desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa tais como: energia de soldagem e distribuição de temperatura, análise microestrutural das amostras, análise modal experimental das amostras soldadas, tensões residuais pré-tratamentos e pós-tratamentos e planejamento experimental. É também, onde se discute a eficiência do tratamento por

vibração quando comparada a outro tratamento e com relação aos limites estabelecidos pela norma API 579.

Por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos julgadas como importantes, baseando-se nos resultados obtidos a partir dos testes experimentais realizados ao longo deste trabalho.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Aplicações de Juntas Soldadas na Indústria**

Com o principal objetivo de unir componentes metálicos, além de possuir outras aplicações como realização de reparos, os processos de soldagem por fusão se caracterizam como de grande complexidade física, principalmente por envolverem interações entre fenômenos de natureza térmica, mecânica e de transformação de fases.

Em função disso, as juntas soldadas se tornaram foco de uma série de estudos numéricos e experimentais ao longo dos anos, visando representar diversos aspectos relativos ao processo, como a identificação de regiões termicamente afetadas e sua influência nas propriedades do material, o levantamento do perfil de distribuição de tensões residuais provocadas pelo processo de soldagem e a correta representação mecânica da união entre os componentes soldados. As juntas soldadas são largamente utilizadas nas mais diversas aplicações de engenharia, estando presentes nas indústrias de óleo e gás, automobilística, aeronáutica, dentre outras.

#### **2.1.1. Vasos de pressão**

Os produtos químicos e petroquímicos a partir dos quais o homem retira energia, matéria-prima para elaboração de compostos entre outros fins, não são encontrados na natureza na forma de serem consumidas ou utilizadas. Para chegarem à característica final para consumo, os produtos extraídos pelo homem da natureza passam por uma série de processamentos, transformações e estocagens na indústria.

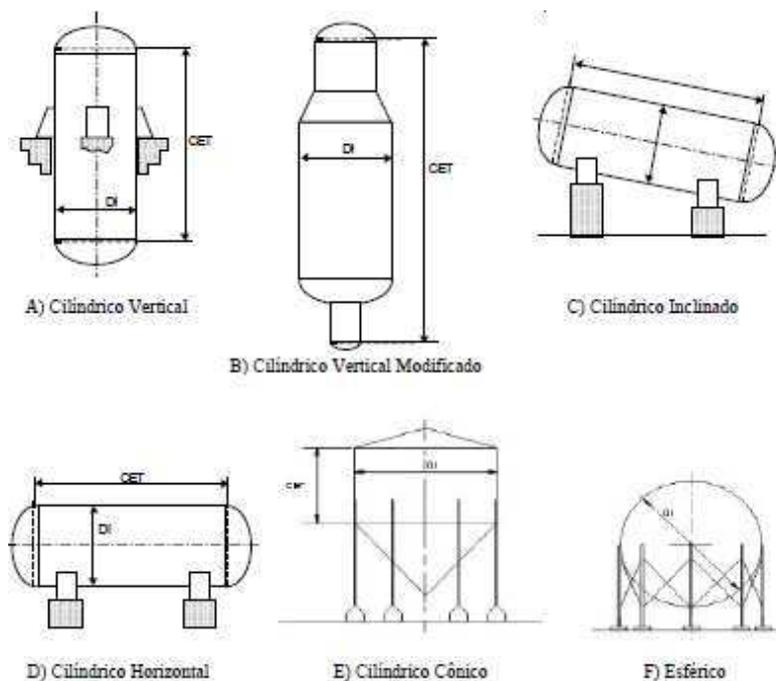
Na indústria, o processamento e estocagem de muitos produtos são feitos a pressões maiores ou menores que a atmosférica, vindo tais indústrias a utilizarem equipamentos denominados de “vasos de pressão”. De acordo com Telles (2001) o nome vaso de pressão (*pressure vessel*) designa genericamente todos os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado. Os vasos de pressão podem ser classificados quanto à função da seguinte maneira:

- Vasos não sujeitos a chamas: Vasos de armazenamento e de acumulação, Torres de destilação fracionada, retificação, absorção etc., reatores diversos, Esferas de armazenamento de gases e trocadores de calor.
- Vasos sujeitos a chamas: caldeiras e os fornos.

De uma forma genérica, os vasos de pressão não sujeitos a chama são empregados em três casos gerais de uso: armazenamento de gases sob pressão, processamento de gases

e líquidos e acumulação intermediária de gases e líquidos em processos industriais (TELLES, 2001). Quanto ao posicionamento de instalação, ou seja, sua posição com relação ao solo, os vasos podem ser classificados em cilíndrico vertical, cilíndrico vertical modificado, cilíndrico inclinado, cilíndrico horizontal, cilíndrico cônico e esférico, conforme mostra a figura 2.

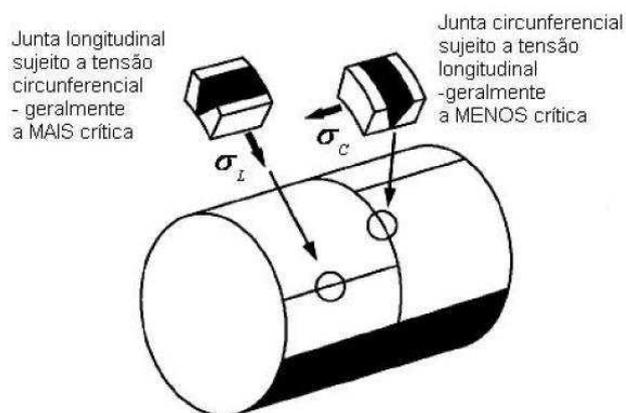
**Figura 2 - Modelos de vasos de pressão quanto ao posicionamento**



**Fonte: (TELLES, 2001)**

Hoje em dia, pelo fato de o formato geométrico da maioria dos vasos de pressão ser cilíndrico, o método de fabricação mais empregado para vasos metálicos é o da laminação de chapas planas com posterior soldagem por fusão da junta longitudinal (Taniguchi, 2008). Juntas circunferenciais são utilizadas para união das extremidades - calotas ou domos- ao cilindro e também para a união de chapas laminadas no caso de vasos longos (Figura 3). As calotas ou domos são moldados através de um processo de conformação a frio e os demais componentes – bocais, flanges, válvulas – são forjados ou fundidos e são fixados no cilindro e calotas ou domos também pelo processo de soldagem por fusão. As estruturas de sustentação – cavaletes e pés ou saias – também são fixadas pelo mesmo processo de soldagem (MATTHEWS, 2001).

**Figura 3 - Juntas soldadas: longitudinal e circunferencial**



Fonte: (TANIGUCHI, 2008)

A seleção de materiais de construção, segundo Bednar (1986), deve ser efetuada sempre escolhendo materiais que estão de acordo com especificações técnicas. Entretanto, a escolha do material adequado dependerá principalmente do ambiente de serviço, no qual será usado o equipamento, levando em consideração se o ambiente possui alta ou baixa corrosividade. Para vasos de pressão simples – horizontais ou verticais compostos por um corpo cilíndrico, duas calotas tipo prato, com aberturas para inspeção, dreno, placa de identificação e conexões de entrada e saída – são geralmente fabricadas com três tipos de materiais: aços ferríticos (aço de baixo carbono), aço austenítico (aço inoxidável) e alumínio e suas ligas.

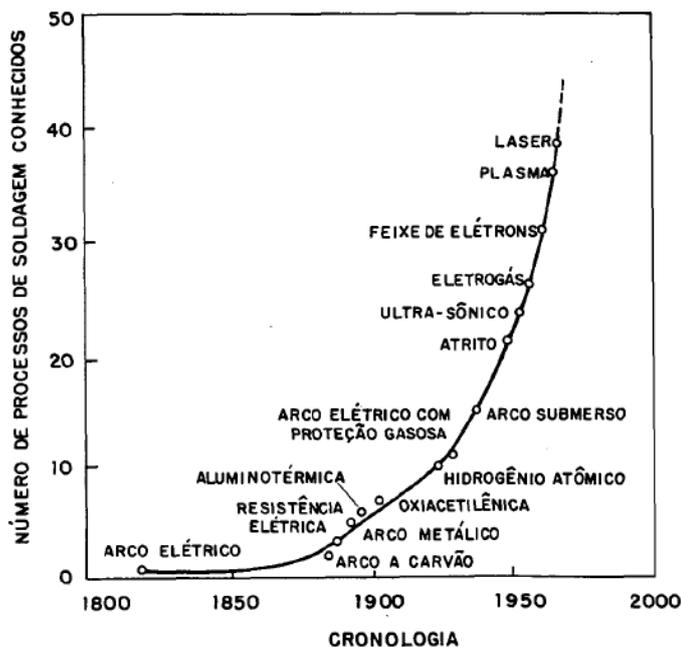
## 2.2. Processos de Soldagem

São os mais diversos e complexos os processos utilizados para união de materiais. Segundo Machado (2007). Existem três grandes grupos de processos dedicados à união dos materiais, os quais são a soldagem a arco elétrico, a brasagem e a solda branda, além dos adesivos. Dentre os grupos a soldagem é o processo que mais se destaca entre os demais, principalmente, devido ao seu largo emprego e grande volume de atividades que a envolve.

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão (WAINER, 2004). Nesse caso, a união de dois materiais é realizada ou através da fusão dos mesmos em íntimo contato; ou pela fusão de ambos e adição de outro material fundido; ou ainda, simplesmente, por contato destes materiais, nas fases sólida ou semi-sólida (MACHADO, 2007).

O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX (WAINER, 2004). Pode-se estimar que existe em utilização comercial cerca de cinquenta processo de soldagem (OKUMURA, 1982). A figura 4 mostra a evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos.

Figura 4 - Evolução do processo de soldagem ao longo dos anos.

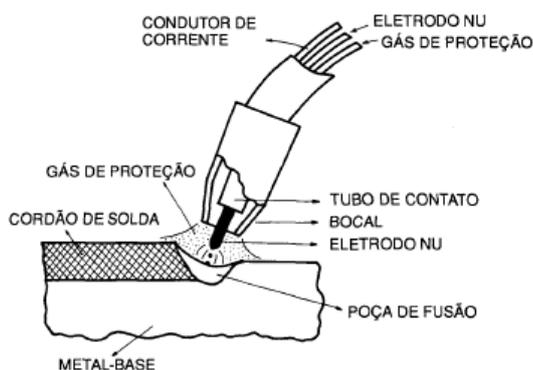


Fonte: (WAINER, 2004; OKUMURA, 1982).

### 2.2.1. Processo GMAW

Gas Metal Arc Welding (GMAW), frequentemente também designado por Metal Inert Gas ou Metal Active Gas (MIG/MAG), sigla derivada dos gases de proteção utilizados neste processo respectivamente gás inerte ou gás ativo, é um processo de soldagem de metais, que através de um arco elétrico estes são aquecidos até ao seu ponto de fusão e unidos (ROSADO, 2008). A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. A figura 5 mostra um esquema do processo de soldagem MIG/MAG.

**Figura 5 - Esquema do processo MIG/MAG**



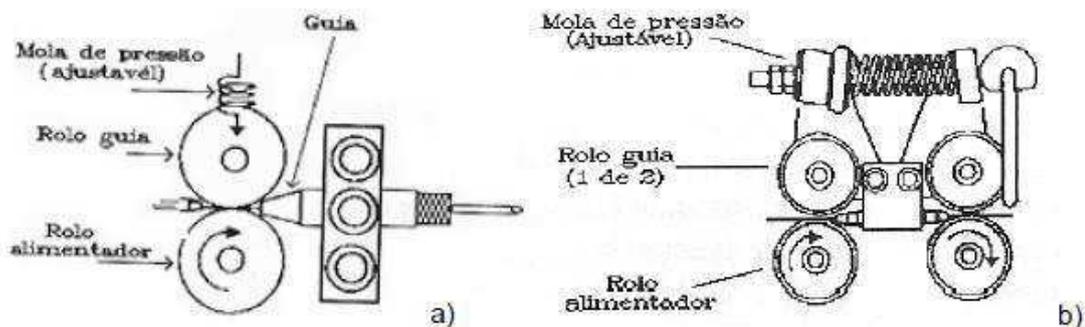
**Fonte: (WAINER, 2004).**

O processo MIG/MAG pode ser completamente automático, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina e o soldador é responsável apenas pela iniciação e interrupção da soldagem e pode ser também uma soldagem semiautomática quando a tocha é conduzida manualmente pelo operador. Todavia em ambos os casos a alimentação do arame é feita de forma contínua, onde o equipamento mantém por si só a velocidade de alimentação e o comprimento do arco constante (PONTES apud BRACARENSE *et al.*, 2008).

O arame usado é denominado de arame-eletrodo, ou simplesmente eletrodo, pois a partir do ponto de contato elétrico até o metal de base ele passa a ter a função de condutor elétrico. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo, onde o comprimento do arco, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente do movimento e da altura da tocha pelo soldador.

O sistema de alimentação automática do eletrodo pode ser de dois tipos, sistema de rolos simples (Fig. 6a), em que a velocidade de alimentação do fio é controlada por um rolo motor e um rolo guia, e um sistema de rolos duplo (Fig. 6b), com dois rolos e dois rolos motores. A fonte de alimentação incorpora características de saída desenhadas para otimizar a performance do arco para uma determinada aplicação. Para o processo MIG/MAG essas características caem dentro de duas categorias: corrente e tensão (ROSADO, 2008). Em fonte de tensão constante a corrente é controlada pela velocidade de alimentação do arame.

Figura 6 - a) Sistema de alimentação de rolos simples b) sistema de alimentação de rolos duplos



Fonte: (ROSADO, 2008)

O processo MIG é adequado à soldagem de aços-carbonos, aços de baixa liga, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga (WAINER, 2004). Além dos problemas causados pelos ciclos térmicos durante a soldagem, outros fenômenos podem provocar efeitos danosos às estruturas soldadas. Entre eles, e praticamente inerente a todos os processos de soldagem, surgem as deformações residuais e, conseqüentemente, o aparecimento de tensões residuais na junta soldada e suas adjacências.

### 2.2.2. Distribuição de temperatura durante a soldagem

Os processos de soldagem a arco elétrico são caracterizados por uma intensa concentração de calor numa dada região da peça, a qual se funde e com a posterior solidificação produz a união das partes. Conhecer o histórico de temperatura devido ao ciclo térmico de soldagem é muito importante, pois as taxas de aquecimento e resfriamento, as temperaturas máximas atingidas, a forma de fluxo de calor e outros aspectos relacionados à transferência de calor têm um papel fundamental para a análise de problemas metalúrgicos como, transformações de fase, degradação das propriedades mecânicas e tensões residuais e distorção (SILVA, 2007).

A equação de Rosenthal foi a primeira a descrever a distribuição de temperatura durante o processo de soldagem. Ela foi derivada à partir das equações de transferência de calor e seu pesquisador fez várias simplificações para facilitar a sua aplicação na soldagem. Foi fixado um sistema de coordenadas sobre a fonte de solda. A origem dos eixos foi estabelecida como o ponto de contato entre o arame e a peça soldada e o sistema se move

conforme a pistola produz o cordão de solda. Visto dessa maneira, com o observador sobre a fonte de solda, o processo é quase estacionário, pois tanto a poça de fusão quanto a distribuição de temperatura não se alteram (ONUKEI, 2009).

Para que seja possível formulá-la, Rosenthal assumiu as seguintes premissas (ROSENTHAL, 1941 e 1946):

1. Transferência de calor em estado estacionário;
2. Fonte de calor pontual;
3. Calor latente necessário para a fusão desprezado;
4. Propriedades do material constantes com a temperatura;
5. Sem perda de calor pela superfície do material;
6. Sem convecção na poça de fusão.

Adotando as premissas acima Rosenthal propôs as seguintes equações para chapas finas e placas grossas, respectivamente:

$$e^{\frac{Vx}{2\alpha}} K_0 \frac{Vr}{2\alpha} = \frac{2\pi(T-T_0)*k*g}{Q} \quad (1)$$

$$e^{\frac{V(R-x)}{2\alpha}} = \frac{2\pi(T-T_0)*k*R}{Q} \quad (2)$$

Onde:

T = temperatura [°C]

To = temperatura de pré-aquecimento [°C]

k = condutividade térmica do material [J/m s K]

g = espessura da chapa [m]

Q = calor transferido pela fonte de solda [W]

V = velocidade de soldagem [m/s]

$\alpha$  = difusividade térmica do material [m<sup>2</sup>/s]

Ko = função de Bessel modificada de ordem zero.

r = distância radial da origem para chapas, calculada com  $\sqrt{x^2 + y^2}$

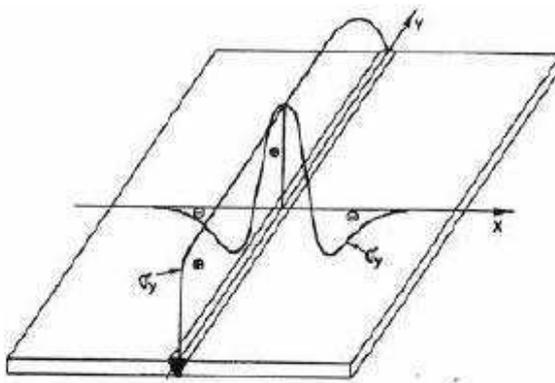
A equação possui algumas limitações, mas mesmo assim é muito usada devido a sua simplicidade. A solução de Rosenthal pode ser usada com sucesso para determinar a distribuição de temperatura distante da fonte de calor, mas ela é falha para a determinação das temperaturas próximas à fonte de calor. Entretanto, para várias situações de solda TIG ou MIG/MAG ela apresenta resultados próximos da realidade e dentro da tolerância (SILVA, 2007).

### 2.3. Tensões Residuais

As tensões que permanecem em um material na temperatura ambiente, após ter cessado o esforço externo que lhe deu origem, são denominadas de tensões residuais. Estas tensões muitas vezes são chamadas de tensões internas e podem ser induzidas no material em quase todas as etapas de seu processamento, como por exemplo, fundição, laminação, flexão, corte à chama, forjamento, usinagem, soldagem, brazagem, aspersão térmica, eletrodeposição, tratamentos térmicos, termoquímicos e tratamentos superficiais (SILVA, 2007).

Durante a soldagem, o metal é aquecido e resfriado, o que causa expansões térmicas e contrações do material. Como estes efeitos são restringidos pelas zonas frias adjacentes do metal, produzem-se tensões de soldagem naquela região. Por outro lado, o limite de escoamento do metal base e as tensões de restrição sofrem um aumento relativo, a altas temperaturas. Como resultado, o metal é deformado plasticamente na zona de soldagem. A deformação plástica permanecerá parcialmente, após se completar a soldagem, entrando em equilíbrio elástico com a zona adjacente, produzindo-se então as tensões residuais, conforme figura 7 (OKUMURA, 1982).

**Figura 7 - Comportamento de tensões na direção de soldagem**



**Fonte: (ANTUNES, 2005)**

As tensões residuais devidas à soldagem são, geralmente, divididas em dois grupos:

- Tensões residuais devidas a vínculos internos: São tensões auto equilibradas, geradas pelo aquecimento e resfriamento local de um membro estrutural não vinculado externamente;
- Tensões residuais devidas a vínculos externos: São tensões residuais geradas pela ação restritiva de vínculos externos (OKUMURA, 1982).

As tensões residuais também podem ser classificadas segundo a forma como foram causadas (origem térmica, mecânica, etc.), de acordo com a escala na qual elas estão auto-equilibradas ou de acordo com o método pelo qual são medidas. Alguns fatores influenciam no desenvolvimento das tensões residuais como: tensão de escoamento do material e seu comportamento com relação à temperatura, temperatura máxima de aquecimento, velocidade de resfriamento, vinculação externa e pré-aquecimento.

### 2.3.1. Desenvolvimento das tensões residuais

De modo geral para se perceber a origem das tensões residuais, provenientes da soldagem, é necessário entender o fenômeno que ocorre durante o ciclo térmico da soldagem. Quando um material é aquecido suas dimensões tendem a aumentar proporcionalmente à variação da temperatura. Este fenômeno é definido pela equação de dilatação térmica, dada por:

$$\Delta L = L_1 - L_0 = L_0 \alpha \Delta T \quad (3)$$

Onde:

$\Delta L$  → Variação do comprimento

$L_0$  → Comprimento inicial

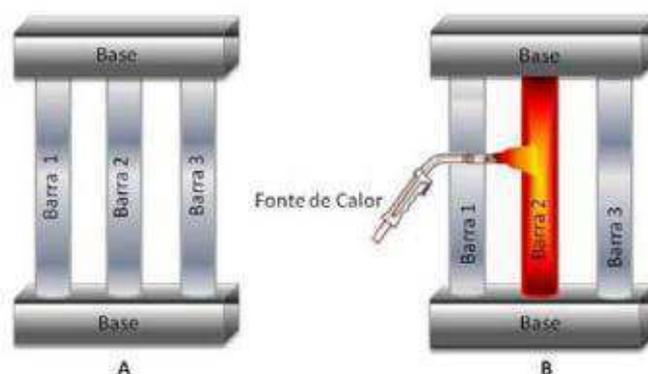
$L_1$  → Comprimento final

$\alpha$  → Coeficiente de dilatação linear

$\Delta T$  → Variação da temperatura

Para o entendimento desse fenômeno alguns autores, como Modenesi (2008), trabalham com modelos similares para explicar o fenômeno das tensões térmicas. O modelo consiste de três barras de aço de baixo carbono de mesmo comprimento e seção transversal unidas em suas extremidades por duas bases, de forma que nenhuma pode se alongar ou contrair independentemente das outras, conforme figura 8.

**Figura 8 - Modelo para descrever tensões térmicas. Conjunto de barras presas nas extremidades (A) e barra central sendo aquecida (B).**



Fonte: (BRAGA, 2011)

A Figura 9 esboça a evolução da tensão longitudinal média na barra central em função de sua temperatura. No início do aquecimento (curva AB, Figura 9), as tensões e deformações resultantes da dilatação da barra central serão elásticas (BRAGA, 2011). Como as barras mantêm o mesmo comprimento aproximado, a dilatação térmica tem de ser compensada por deformações elásticas, e a seguinte relação deve ser obedecida:

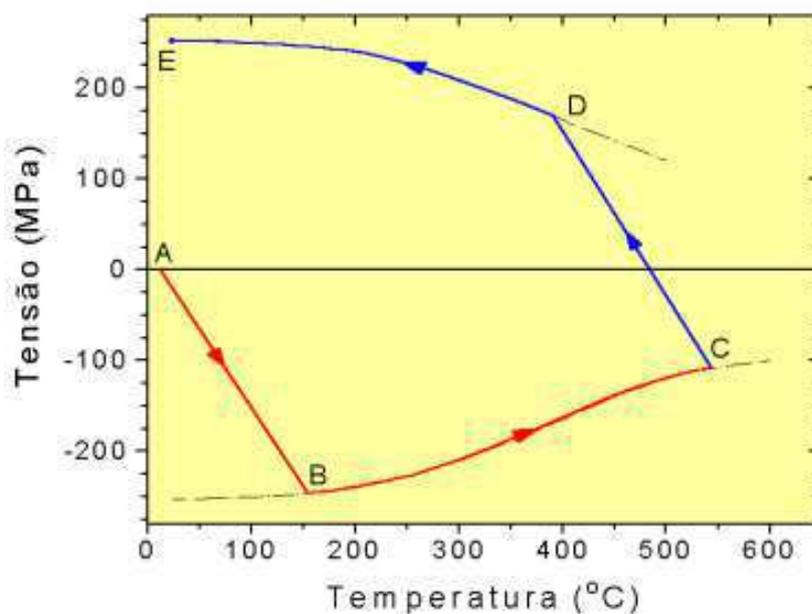
$$\frac{\sigma_c}{E_t} = \alpha \Delta T + \frac{\sigma_l}{E} \quad (4)$$

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

$$\sigma_c = -\alpha \Delta T \frac{2E}{1+2E/E_t} \quad (5)$$

Agora supomos que aquecemos a barra 2 até atingir seu limite de escoamento, fazendo com que tensões compressivas façam a se deformar plasticamente. Como o limite de escoamento diminui com o aumento da temperatura, o valor da tensão na barra central tende a cair à medida que sua temperatura aumenta e a barra sofre uma maior deformação plástica (curva BC, Figura 9).

**Figura 9 - Variação da tensão  $\sigma$  com a temperatura na barra central**



Fonte: (WELDING HANDBOOK, 1991)

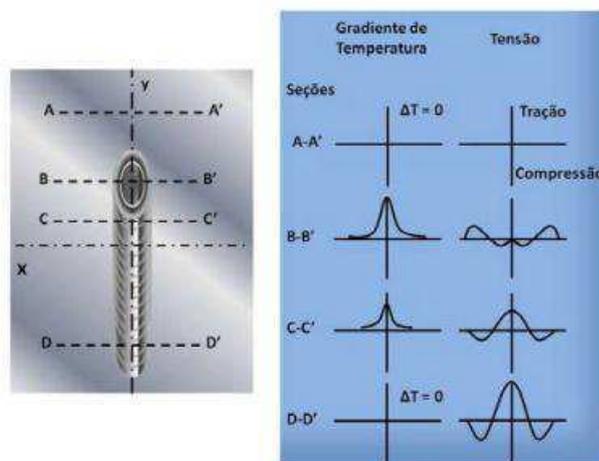
Se pararmos o aquecimento no ponto C, a barra central se contrai com a queda de temperatura. Contudo, devido a deformação plástica ela se tornou mais curta e no

momento que ela resfria, tensões de tração passam a atuar sobre ela até que o limite de escoamento seja atingido no ponto D.

Como as barras estão rigidamente ligadas, as diferenças de comprimentos serão compensadas pela deformação elástica que gerarão tensões residuais. Na barra central essas trações serão de tração (próximo ao limite de escoamento) e nas externas de compressão (de valor igual à metade da tensão na barra central, supondo que as seções transversais sejam as mesmas ainda). (BRAGA, 2011; MODENESI, 2008).

Uma situação similar pode ser considerada para uma junta soldada, associando-se a região da solda com a barra central e as regiões mais afastadas do metal de base, com as barras externas. Por este raciocínio, pode-se esperar, como consequência da operação de soldagem, o desenvolvimento de tensões residuais de tração na região da solda e de tensões de compressão no metal de base. A figura 10 compara, esquematicamente, a distribuição de tensões residuais na montagem das barras com a esperada em uma solda.

**Figura 10 - Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem.**



**Fonte: (Braga, 2011)**

Na parte AA', muito afastada da poça de fusão e ainda não aquecida pela fonte de calor, não existem variações de temperatura e o material ainda está isento de tensões. Na seção BB', junto à poça de fusão, o material aquecido tende a se expandir sendo, contudo, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, assim, tensões de compressão em regiões próximas à zona fundida e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Quando o seu limite de escoamento é alcançado, o material aquecido deforma-se plasticamente em compressão.

Na poça de fusão o material ainda está no estado líquido e portanto, as tensões são nulas. Com o arrefecimento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda. Assim, na seção CC' surgem tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Estas tensões aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida. Após o resfriamento completo, seção DD', as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material.

### **2.3.2. Efeitos das tensões residuais sobre as propriedades da solda**

As tensões residuais de soldagem podem afetar o comportamento mecânico de componentes e estruturas, podendo ser o responsável pela falha dos mesmos. Segundo Silva (2007), isto ocorre porque em muitos casos os níveis de tensões residuais observados nas estruturas soldadas são da magnitude do limite de escoamento do material.

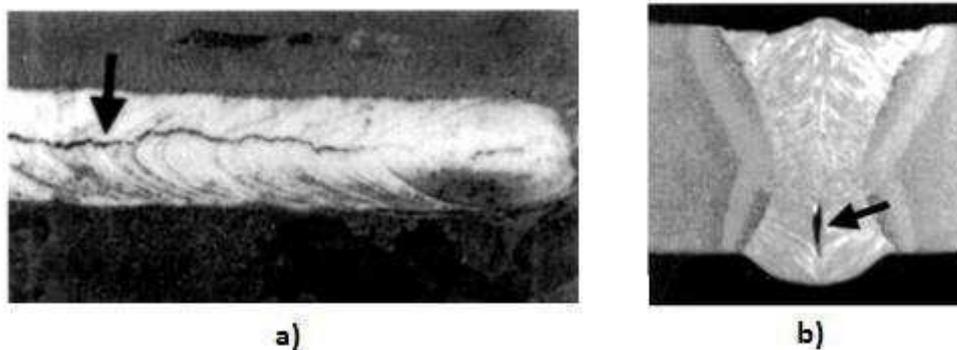
Essa presença de elevados níveis de tensões pode ocasionar a falha dos componentes de engenharia, vindo estas falhas a estarem associadas à perda de resistência, seja por rigidez insuficiente, escoamento localizado ou global, escoamento por fluência, instabilidade dimensional, formação de trincas a quente e trincas a frio, processos de fratura frágil e dúctil, fratura por fadiga, corrosão sob tensão e desgaste superficial.

#### **2.3.2.1. Efeito das tensões residuais sobre a formação de trincas**

Dos defeitos que podem ocorrer durante um processo de soldagem, sem dúvida o mais grave refere-se ao surgimento de trincas. Entre aquelas que ocorrem durante a própria operação de soldagem, ou imediatamente depois, se distinguem dois grupos: os fissuramentos a quente e os trincamentos a frio.

Trincas a quente são resultantes de tensões elevadas associadas com a presença de um filme líquido nos contornos dos grãos. Estes tipos de trinca são normalmente observados na zona fundida (Fig. 11) sendo o resultado da solidificação de metais de solda ricos em impurezas (SILVA, 2007).

**Figura 11 - Exemplos de trincas a quente. a) Trinca a quente longitudinal que aparece na superfície de um metal de solda por SMAW. b) Trinca a quente longitudinal que aparece na secção transversal de um metal de solda por SAW.**



**Fonte: (KOBELCO, 2013)**

Algumas ligas metálicas não têm uma boa capacidade de deformação durante a fase de solidificação de um processo termico, e a fissuração a quente tem lugar durante a fase final da solidificação, fase em que a liga é semi-sólida (CICALA, 2005). No caso dos aços, na solidificação, a austenita ao transformar-se em ferrita expulsa para o líquido remanescente diversas impurezas, alterando a composição química do líquido e reduzindo seu ponto de fusão. Ao término da solidificação verifica-se a presença de um filme líquido nos contornos de grãos o quais não tem resistência para suportar as tensões provocadas pela contração do material durante o resfriamento, causando assim a formação da trinca (MODENESI, 2008).

As trincas a quente podem ser de escala microscópica, e não serem detectadas pelas técnicas convencionais de inspeção, ou na maioria dos casos em escala macroscópica, que apesar de desenvolver o mesmo mecanismo da fissuração microscópica, atingem dimensões muito maiores (PARANHOS, 2003).

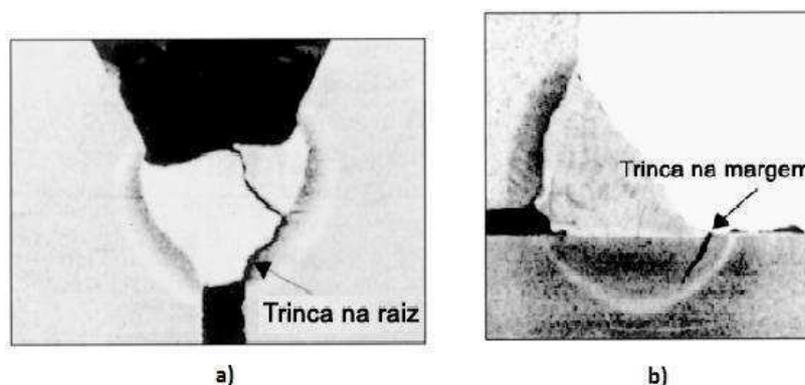
Dentre os tipos de trincas temos também as trinca a frio que é talvez o maior problema na utilização de aços após a soldagem, pois esse tipo de trinca pode ocorrer várias horas após a junta ter sido soldada e dificilmente pode ser reparada, consequentemente ocasionando perda total do conjunto soldado causando enormes prejuízos. A trinca a frio é também conhecida como: trincas induzidas por hidrogênio, trincas assistida pelo hidrogênio ou ainda trincas retardadas (GODOY, 1989).

É consenso entre vários autores que este tipo de trinca ocorre pela interação de pelo menos 3 fatores. São eles: teor de hidrogênio, microestrutura suscetível e tensão residual. No entanto, para alguns autores, existem outros fatores além destes que também influem

para que a trinca a frio ocorra que são: temperatura, limite de resistência e tenacidade à fratura da solda e da zona afetada pelo calor (GODOY, 1989).

A trinca a frio pode ocorrer na superfície do cordão (chamada de trinca superficial) ou na seção transversal do cordão (chamada de trinca transversal). A trinca transversal tanto pode ocorrer na região termicamente afetada da junta soldada como no metal de solda, conforme figura 12 (GODOY, 1989).

**Figura 12 - Exemplos de trincas a frio. a) Trinca a frio é iniciada na raiz da solda e desenvolvida no metal de solda. b) Trinca a frio é iniciada na margem da solda e é desenvolvida na Zona Termicamente Afetada (ZTA).**



Fonte: (KOBELCO, 2013)

Por mais cuidados que se tenha com os procedimentos, processos e parâmetros de soldagem, o metal de solda absorve hidrogênio. O hidrogênio pode ser induzido na soldagem por diversas fontes tais como umidade e/ou compostos orgânicos nos consumíveis (revestimentos ou fluxos), umidade na superfície do material, presença de tintas, vernizes e outros compostos orgânicos na superfície a ser soldada, dentre outros. O hidrogênio introduzido no metal fundido pode migrar para o interior da ZTA onde tendem a se difundir para micro-cavidades e outras discontinuidades microscópicas e sub-microscópicas na região, onde eles se recombinaem na forma molecular. Se esta região tiver condições propícias para o trincamento, como uma microestrutura susceptível e/ou elevados níveis de tensões residuais ocorrerão a trinca. Uma das teorias sobre o mecanismo de formação de trincas a frio cita que, átomos de hidrogênio migram por difusão e, ao encontrarem outros átomos, ocorre à formação de moléculas, as quais geram microvazios que concentram tensões e associada à presença de uma microestrutura dura e frágil e um campo de tensões elevado, a trinca se propaga (BAILEY, 1993).

Conforme informado anteriormente, para que as trincas se formem e se propaguem, a presença de um nível elevado de tensões tem um elevado nível de contribuição. Se o

material trabalha submetido a esforços desta natureza, torna-se necessária a minimização das tensões residuais para evitar que durante a operação, as combinações entre as tensões residuais e as tensões de trabalho, atinjam níveis capazes de promover o movimento das trincas. Em alguns casos é possível que o material rompa somente sob o efeito das tensões residuais, sem qualquer ação de forças externas.

### **2.3.2.2. Efeito das tensões residuais sobre a resistência a fadiga**

Embora muitas vezes os problemas de falha causada por fadiga estejam diretamente associados a defeitos de caráter geométrico do cordão de solda, tais como: inclusão de escória, porosidade, mordedura, convexidade ou concavidade excessiva, dentre outros, que atuam na junta como concentradores de tensões, é possível que a resistência à fadiga de uma junta soldada sofra ainda os efeitos das tensões residuais presentes no material, uma vez que a fadiga é regida por ciclos de tensões. Justamente por isso, os efeitos das tensões residuais sobre a resistência à fadiga têm sido extensivamente estudados ao longo dos anos (MUNSI, 2001).

Entres as técnicas para reduzir as tensões residuais existem algumas que afetam a vida em fadiga dos componentes soldados, como as técnicas de vibração mecânica e de tratamento térmico. Munsí (2001) demonstrou que tratamentos vibratórios tendem a aumentar a vida em fadiga dos componentes, se o tratamento é efetuado aplicando um pequeno número de ciclos de tensão dinâmica elevada. Por outro lado, o tratamento térmico também reduz a vida para fadiga por alteração das propriedades do material.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos sobre o comportamento dos materiais soldados à fadiga, como os trabalhos de Nguyen & Wahab (1995a,1995b,1996, 1998), buscando avaliar conjuntamente os efeitos da geometria da solda e das tensões residuais. Nguyen & Wahab constataram que tensões residuais compressivas na superfície aumentam a vida à fadiga somente no estágio inicial de propagação da trinca, e quando o comprimento da trinca corresponde à profundidade do campo de tensões compressivas. Após o comprimento da trinca ultrapassar a profundidade do campo de tensões residuais compressivas, estas não têm nenhum efeito significativo sobre a vida à fadiga.

### **2.3.2.3. Efeito das tensões residuais na corrosão sob tensão**

A corrosão sob tensão (CST) é o fenômeno de deterioração de materiais causada pela ação conjunta de tensões mecânica (residuais ou aplicadas) e meio corrosiva. A CST é

caracterizada pela formação de trincas, o que favorece a ruptura do material. Por essa razão, a corrosão sob tensão é comumente chamada de corrosão sob tensão fraturante e ocorre comumente com metais dúcteis. Um dos principais problemas deste tipo de falha está no fato de que podem ocorrer de forma repentina, uma vez que o mecanismo de falha não apresenta perda de massa considerável e sim nucleação e crescimento de trincas. Por este motivo torna-se necessário combater os agentes causadores deste tipo de corrosão para prevenir as falhas dos equipamentos e tubulações industriais que estão sujeitos a este tipo de falha. A figura 13 mostra um exemplo de corrosão sob tensão num componente de aço inox de classe 304.

**Figura 13 - Corrosão sob tensão em aço inox de Classe 304**



**Fonte: (MANUTENÇÃO & SUPRIMENTOS, 2013)**

Meios corrosivos contendo sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) são considerados críticos quanto à corrosão sob-tensão ou fragilização. A corrosão sob-tensão pode estar particularmente associado a dois tipos: “Hydrogen-Induced Cracking” (HIC) e “Sulfide Stress Cracking” (SSC). O primeiro tipo ocorre quando o hidrogênio gerado pelo processo corrosivo é absorvido pelo material, causando trincas ao longo da direção de laminação, independente da presença de tensões. O segundo tipo é uma variante do HIC, contudo, necessita da presença de tensões trativas aplicadas ou residuais. Este segundo é mais comum nas juntas soldadas e em aços com alta resistência (ALBARRAN, 1999). Muitos trabalhos têm sido realizados nessa linha de pesquisa, porém, ambos apenas levam em consideração o fator corrosão e não levam em questão o efeito da tensão residual e métodos de alívio com o objetivo de evitar a corrosão sob tensão (SILVA, 2007).

## **2.4. Métodos para Determinação das Tensões Residuais**

A medição de tensões residuais é realizada por técnicas que são classificadas em destrutivas e não destrutivas. Os métodos destrutivos, também chamados de métodos mecânicos, possuem esta denominação por determinarem as tensões residuais através da destruição completa ou parcial da peça/componente, onde podemos citar o método do furo-cego cuja técnica consiste em usinar um pequeno furo na superfície do componente a ser analisado. A usinagem do furo provocará o alívio das tensões existentes que atuam no volume de material removido, que por sua vez provocará mudança nos estados de deformação em pontos da região no entorno do furo. Estes métodos determinam a deformação elástica residual presente em um dado volume de material, após promover o relaxamento das tensões (WITHERS, 2001a).

As técnicas não destrutivas por sua vez, têm por característica não provocarem qualquer tipo de dano durante a medição. Estes métodos são baseados em propriedades físicas que são alteradas quando o material apresenta tensões. A grande vantagem deste método é que após a medição a peça permanece em plena condição de uso.

Existe uma variedade de técnicas disponíveis para a medição de tensões, entre os métodos destrutivos mais usados podemos citar:

- Furo cego ou furo incremental;
- Método do anel;
- Método do contorno.

Entre os mais usuais métodos não destrutivos temos:

- Difração de raios-x;
- Difração de nêutrons;
- Ultrassom;
- Magnético.

### **2.4.1. Tensometria por difração de raios X**

A tensometria por difração está fundamentada na teoria de difração de raios X e na mecânica dos materiais. Como os cristais apresentam distância interplanar uniformes, ocorre uma interferência construtiva de ondas do feixe incidente de raios X no cristal, quando o mesmo está sob deformação. Os procedimentos necessários para que ocorra tal fenômeno (difração de raio X) esta fundamentada na lei de Bragg (TURIBUS, 2011).

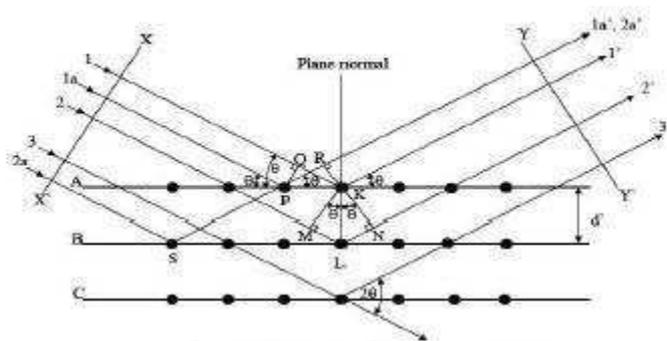
O princípio da difração de raios-X é caracterizado de uma maneira básica pela incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por algum dispositivo. No estado inicial, não deformado, o material metálico possui distância interplanar,  $d_0$ , entre seus planos cristalinos.

O método por difração de raios-X depende da regularidade do espaçamento entre os planos atômicos. Quando um feixe de raios-X monocromáticos incide sobre um material, ocorre o espalhamento do mesmo pelos átomos que compõem o material. Como nos materiais cristalinos os átomos são organizados de maneira tridimensional em uma rede periódica, a distância entre os planos cristalográficos é uma característica do material. Portanto, um feixe paralelo de raios-x, de comprimento de onda  $\lambda$ , incide na superfície do material segundo um determinado ângulo de incidência  $\theta_0$ , sendo este feixe difratado sob o mesmo ângulo, desde que seja satisfeita a lei de Bragg,

$$n\lambda = 2d_0^{hkl} \cdot \text{sen}^{hkl}\theta \quad (6)$$

Nessas condições, ao utilizar raios-x monocromáticos ( $\lambda=\text{constante}$ ), o valor do ângulo  $\theta_0$ , pra uma mesma família de planos hkl, referente a uma intensidade máxima de difração, depende da distância interplanar  $d_0$ . A figura 14 ilustra o espalhamento das ondas de raios – X devido à distribuição atômica regular do material cristalino.

**Figura 14 - Difração de raios-X para distância interplanar.**



**Fonte: (PONTES, 2012)**

A teoria da elasticidade do material sólido, proveniente da mecânica dos sólidos, prevê as seguintes relações:

$$\text{Tensão: } \sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (7)$$

$$\text{Deformação: } \varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (8)$$

A lei de Hooke, também estabelece a relação entre tensão e deformação, para estado uniaxial:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (9)$$

Onde: E é o modulo de elasticidade do material.

O material quando estiver sob tensão  $\sigma$ , a distância interplanar  $d_0$ , varia de um valor  $\Delta d = d - d_0$ , sendo  $d$  a distância no material tensionado, o que ocasiona a deformação  $\varepsilon$  na rede cristalina do material. Nessas condições, a variação do ângulo de difração é igual a  $\Delta\theta = d - d_0$ , que pode ser medida pela técnica da tensometria por raios-X.

Portanto, fazendo a diferenciação da lei de Bragg (Eq. 6) podemos obter a relação entre a deformação  $\varepsilon$  e o ângulo  $\theta_0$  de difração:

$$2\Delta d \cdot \text{sen}\theta + 2d \cdot \text{cos}\theta \cdot \Delta\theta = 0$$

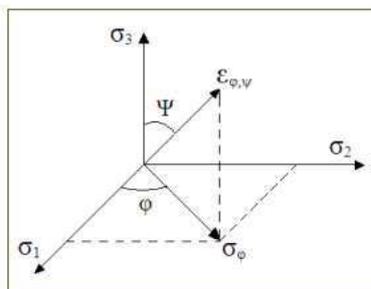
$$\frac{\Delta d}{d_0} = -\text{cotg}\theta \cdot \Delta\theta$$

$$\varepsilon = -\text{cotg}\theta \cdot \Delta\theta \quad (10)$$

Para uma melhor adequação ao estado real de tensões, é utilizado um sistema de coordenadas polares (Fig. 15). Então, da Eq. (10), podemos obter:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} = -\text{cotg}\theta \cdot (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0) \quad (11)$$

**Figura 15 - Sistema de coordenadas polares.**



Fonte: (Chuvas, 2012)

Sabendo que:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = (\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) \cdot \sin^2 \psi - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (12)$$

Mantendo fixo o ângulo  $\varphi$ , e determinando a diferença entre as deformações em duas direções diferentes, segundo o ângulo  $\psi$ , tem-se:

$$\varepsilon(\varphi, \psi_2) - \varepsilon(\varphi, \psi_1) = \cotg \theta_c \cdot (\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1}) \quad (13)$$

Reescrevendo o primeiro membro da Eq. (12), também em função da diferença entre as deformações em duas direções diferentes:

$$\varepsilon(\varphi, \psi_2) - \varepsilon(\varphi, \psi_1) = \frac{(1+\nu)\sigma_\varphi \cdot (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)}{E} \quad (14)$$

Quando substituirmos o primeiro membro da Eq. (14) pelo segundo membro da Eq. (13), é obtida a equação utilizada na medição de tensões residuais:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1+\nu)} \cdot \cotg \theta_0 \cdot \frac{(\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})}{(\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)} \quad (15)$$

A equação para as tensões residuais é válida para quaisquer valores de  $\psi_1$  e  $\psi_2$  que impusermos ao equipamento.

## 2.5. Norma API 579

A avaliação da integridade estrutural de equipamentos é de fundamental importância para se evitar falhas e assim obter rendimento possível dos componentes mecânicos presente em vários setores industriais. A capacidade de demonstrar a integridade estrutural de um componente em serviço que contém danos ou falhas é denominada de avaliação de integridade ou FFS abordada pela API 579 e é amplamente tratado por avaliação de procedimentos como a R6(1995). (Almeida, 2012).

A API 579 é uma publicação de práticas recomendadas pela American Petroleum Institute, de adequação ao serviço, com métodos de avaliação fidedigna da integridade estrutural de equipamentos que contenham falhas ou deterioração por serviço. Ela é resultado de uma necessidade de padronização das técnicas de adequação ao serviço de avaliação para equipamentos pressurizados na indústria de refino e petroquímicas. Ela foi elaborada por uma comissão que inclui representantes do American Petroleum Instituto e

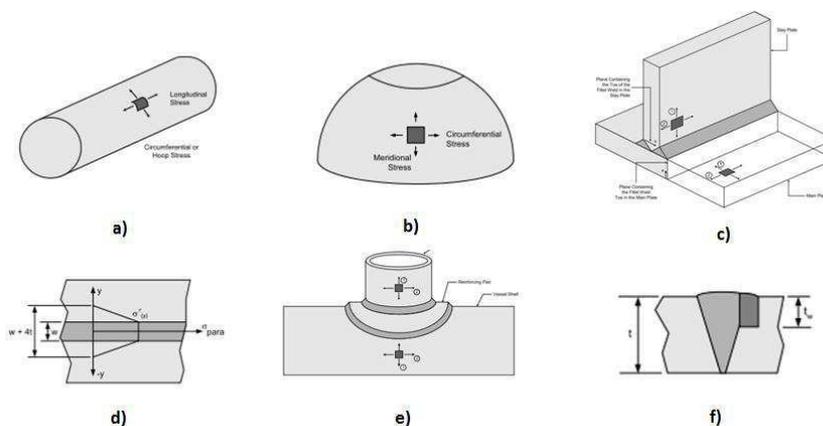
Chemical Manufacturers Association, bem como os indivíduos associados com as relacionadas indústrias.

A API 579 destina-se a complementar e aumentar os requisitos API 510, API 570 e API 653. Ela é dividida em varias seções onde são calculados os vários fatores de risco para dutos e vasos de pressões. No apêndice E dessa norma, encontra-se as orientações para determinar a magnitude e a distribuição de tensões residuais admissíveis em uma junta soldada. Esta informação é necessária como entrada para realizar uma avaliação de aptidão para o serviço de um componente que contém uma falha (API, 2007).

Mais detalhes sobre a metodologia se encontra no apêndice E da norma API 579 e são aplicáveis às juntas soldadas localizadas nos equipamentos, tanto para aqueles já em serviço, assim como para novas construções. A distribuição de tensões residuais são fornecidas para o seguinte tipos de soldas:

- Soldas de penetração completa em tubulações e reservatórios de pressão de recipiente cilíndrico (Fig. 16a);
- Soldas de penetração completa nos vasos de pressão esféricos e Pressure Vessel Heads (Fig. 16b);
- Soldas de filete em juntas T (Fig. 16c);
- Soldas de penetração completa em tanques de armazenamento (Fig. 16d);
- Soldas de filete em juntas de canto (Fig. 16e);
- Soldas de reparo (Fig. 16f).

**Figura 16 - Tipos de soldas segundo a API 579. a) Soldas em vasos cilíndricos, b) Solda em vasos tipo Heads, c) Soldas de filete em juntas T, d) Soldas em tanques de armazenamento, e) Soldas de filete em juntas de canto e f) Soldas de reparo.**



Fonte: (API 579, 2007)

A fim de se estimar essa distribuição das tensões na superfície do componente, primeiramente deve-se estimar o limite de escoamento real do material. Se os dados reais não existem ou não pode ser determinados, as seguintes equações podem ser utilizadas para estimar a magnitude do limite de escoamento real. (API, 2007).

$$\sigma_{ys}^r = \sigma_{ys} + 69MPa \quad (16)$$

$$\sigma_{ys}^r = \sigma_{ys} + 10ksi \quad (17)$$

Depois de obtido o limite de escoamento real, a norma sugere equações para descrever a distribuição das tensões residuais na superfície do equipamento, tanto longitudinal como transversais e aplicadas tanto em soldas contínuas como de ponto. As equações são:

$$\sigma^r(y) = \sigma_{ys}^r * R_r \quad se \quad |y| \leq \frac{w}{2} \quad (18)$$

$$\sigma^r(y) = \left\{ \frac{1 - \frac{(|y| - \frac{w}{2})^2}{c}}{1 + \frac{(|y| - \frac{w}{2})^{2n}}{c}} \right\} \sigma_{ys}^r * R_r \quad se \quad |y| > \frac{w}{2} \quad (19)$$

Onde as equações 18 e 19 são escolhidas em função de  $y$  que corresponde ao ponto de análise das tensões residuais ao longo da junta soldada tendo como ponto de referência o centro do cordão de solda. O valor do comprimento de análise ( $y$ ) é tirado em função de  $w$  que corresponde à largura do cordão de solda, para valores menores que a metade da largura do cordão de solda será escolhida para representar o comportamento das tensões residuais à equação 16 e para valores maiores toma-se a equação 19.

As equações de distribuição superficiais acima mencionados dependem de algumas incógnitas, onde, além de  $y$  e  $w$ , temos o  $c$  que é um parâmetro que depende do raio médio do componente ( $r$ ) e da espessura nominal ( $t$ ) dele e segue a relação  $\sqrt{r * t}$ . O  $w$  é o parâmetro, como mencionamos acima, referente a largura do cordão de solda e o  $n$  é uma constante que varia entre 2 e 5, sendo seu valor dependente do tipo de junta e da direção da tensão residual.

O  $R_r$  é referente ao fator de redução de tensão, ele está presente nas equações pelo fato de todo vaso de pressão ser submetido a teste hidrostático  $T_p$  e, conseqüentemente, esse teste hidrostático provoca redução nas tensões do componente. O fator de redução varia de acordo com o teste de pressão ( $T_p$ ) da seguinte maneira:

$$R_r = 1 \quad \text{se } T_p < 75\%$$

$$R_r = \frac{168,5063 - 2,26770 * T_p + 9,16852 * 10^{-3} * T_p^2}{100} \quad \text{se } 75\% \leq T_p \leq 110\%$$

$$R_r = 0,3 \quad \text{se } T_p > 110\%$$

## 2.6. Métodos para Tratamento de Alívio de Tensões Residuais

As tensões residuais são uma característica intrínseca da soldagem, e embora sejam indesejadas devido a estarem associadas a diversos problemas metalúrgicos, elas são impossíveis de serem evitadas. Portanto, torna-se necessário o uso de métodos para a redução de seus níveis de forma a minimizar seus efeitos sobre os componentes ou materiais soldados. Existem vários métodos de tratamento de tensões residuais que são usados e podem ser clasificados segundo Berezhnyts'ka (2001) em dois grupos:

- Métodos para minimizar o surgimento de tensões residuais;
- Métodos para alívios das tensões residuais.

O primeiro grupo está relacionado a prevenir as tensões em medidas tomadas durante o projeto e construção e que devem ser realizadas antes da soldagem, como o tipo da junta, parâmetros de soldagem, número de passes, restrições e fixações, preaquecimento, etc. Para o segundo grupo estão relacionados os métodos de tratamento pós-soldagem, que usam aplicação de cargas ou elevação de temperatura para aliviar as tensões residuais.

Após a soldagem, as tensões residuais podem ser aliviadas por métodos térmicos ou mecânicos, cada um desses possuindo suas vantagens e suas limitações. Dentre os tratamentos térmicos podemos citar o recozimento para alívio de tensões, recozimento a alta temperatura e alívio de tensões a baixas temperaturas. Para os processos mecânicos de alívio de tensões podemos citar o martelamento, encruamento e a vibração.

### 2.6.1. Tratamento térmico para alívio de tensões residuais.

O tratamento térmico em metais é um conjunto de operações envolvendo aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento em condições específicas controladas, com o objetivo de melhorar as suas propriedades ou

conferir-lhes características pré-determinadas. Os principais tratamentos térmicos associados às operações de soldagem são (Junior, 1997):

- Recozimento;
- Normalização;
- Têmpera;
- Revenimento;
- Solubilização;
- Alívio de Tensões;
- Pré-aquecimento;
- Pós-aquecimento.

Os tratamentos térmicos para alívio de tensões (TTAT) mais usuais são solubilização, normalização, recozimento e alívio de tensões. O recozimento para alívio de tensões consiste no aquecimento da peça de maneira uniforme em um patamar de temperatura por um determinado período de tempo específico, seguido de um resfriamento ao ar à temperatura ambiente (Rodrigues, 2011). Deve-se observar que os parâmetros desse TTAT (temperatura e tempo) devem ser bem planejados segundo o tipo de metal de base e de solda, pois, dependendo do tipo de temperatura e do período da junta exposta a essa temperatura podem ocorrer mudanças microestruturais vindo a prejudicar a junta.

A normalização é um tratamento para aços que consiste em aquecimento a uma temperatura um pouco acima da austenitização, e resfriamento em ar, com o intuito de refinar o grão, aumentando sua resistência mecânica. Já a solubilização é um tratamento térmico que faz uma solução no estado sólido de elementos que anteriormente estavam precipitados, seguido de resfriamento rápido, o suficiente para reter na matriz os elementos na solução, antes precipitados (Junior, 1997).

O recozimento é o tratamento térmico que tem por finalidade reduzir a dureza de uma peça temperada ou normalizar materiais com tensões internas resultantes do forjamento, da laminação, trefilação etc. (Pauli, 1997). Existem dois tipos de recozimento: recozimento para reduzir a dureza de uma peça temperada e recozimento para normalizar a estrutura de um material.

O tratamento térmico de alívio de tensões depende fundamentalmente da temperatura e do tempo de permanência, também se deve levar em consideração a resistência mecânica e a composição química. Este tratamento para aços envolve aquecimento abaixo da

temperatura crítica de transformação, permanecendo por um período de tempo, geralmente proporcional a espessura seguido de resfriamento lento, permitindo desta forma reduzir as tensões prejudiciais a um limite mínimo e aceitável. Os maiores benefícios do tratamento térmico de alívio de tensões são (Junior, 1997):

- Aumentar a ductilidade.
- Diminuir a dureza.
- Melhorar as condições metalúrgicas da ZTA.

Os TTAT são eficazes, possuem algumas desvantagens e limitações que incluem (Chuvas, 2012):

- Alto consumo de energia e, conseqüentemente, elevação de custos.
- Formação de óxidos nas superfícies dos componentes, que requerem posteriores processos de acabamento para removê-los.
- Inconvenientes das peças de grandes dimensões, para as quais há a limitação do tamanho dos fornos disponíveis para estes tratamentos e as distorções que podem ocorrer nas estruturas e componentes tratados.
- Inadequados para os componentes que são previamente submetidos a tratamentos térmicos, pois o processo de recozimento, muitas vezes, reduz os efeitos benéficos do tratamento térmico.

### **2.6.2. Tratamento para alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas**

Para a redução das tensões residuais e em substituição ao alívio térmico de tensões, vem sendo utilizada, em várias partes do mundo, uma tecnologia que utiliza a vibração mecânica, com resultados satisfatórios e comprovada economia de energia (Martins, 2012).

O alívio de tensões por vibração mecânica é um método baseado na ressonância vibratória, em que as peças são submetidas a vibrações de baixa frequência por um período de tempo (Kwofie, 2009). As tensões dinâmicas se combinam com tensões residuais e podem exceder o limite de escoamento do material, induzindo deformações plásticas em partes da estrutura e realinhando a estrutura cristalina, o que provoca redução dos campos de tensões residuais tornando-os mais baixos, ou seja, aliviando-os. Este método é bastante flexível, pois em alguns casos sua aplicação não depende da paralisação do equipamento que possui a parte a ser tratada (Chuvas apud Rao *et al*, 2012).

O aprofundamento teórico desta tecnologia se iniciou com um estudo de Skinner (1987), segundo Martins (2012). Neste estudo foi avaliada, detalhadamente, cada parte da curva de ressonância e como ocorre a dissipação da energia em função da frequência aplicada, sendo aqui considerada como energia dissipada a quantidade de tensões internas contidas na peça que pode ser removida. Verificou-se que a região sub harmônica é a que possui melhor desempenho neste sentido, sendo esta então a adotada nesta tecnologia. O estudo de Skinner confirmou empiricamente que quando se aplica a frequência de ressonância o resultado é praticamente nulo, em termos de alívio de tensões internas, se comparado à região sub harmônica (Martins, 2012).

Os processos de alívio de tensões e condicionamento de solda por vibrações podem ser aplicados na maioria dos metais trabalhados nas indústrias metal mecânicas (Fig. 17). A única limitação deste processo é a não atuação no Cobre e suas ligas, por razões ainda não conhecidas (Martins, 2012).

A técnica tem sido amplamente aplicada em juntas soldadas, durante e/ou após o processo de soldagem e, ainda, em alguns casos após outros processos de fabricação, tais como aqueles avaliados Sun *et al.* (2004), que estudaram os efeitos da vibração em chapas laminadas a quente e obtiveram redução de cerca de 48% nas macrotensões residuais.

**Figura 17 - Modelo de equipamento usado na indústria para alívio de tensões por vibração - Fórmula 62.**



**Fonte: (Tecweldshop, 2013; Braga, 2011).**

Muitos autores pesquisam a influência dos parâmetros de vibração, tais como, tipo e frequência de excitação, durante a soldagem de chapas de diferentes aços. Sun *et al.*, (2004), utilizaram a técnica de alívio de tensões residuais por vibração em chapas de aço

ARBL soldadas pelo processo TIG e conseguiram obter alívio das tensões residuais em grande parte dos pontos analisados. Nesse trabalho ficou demonstrado que a técnica da vibração resulta em um alívio heterogêneo das tensões residuais, tanto nas tensões trativas quanto nas compressivas.

Chuvas (2012) em seu trabalho também buscou constatar a eficiência da técnica de vibrações na redução de tensões residuais. Em sua pesquisa, foi utilizado juntas soldadas a plasma de aço (AHSS DP600) com duas dimensões de 510 x 400 x 4,15 mm e 510 x 400 x 3,3 mm respectivamente. Ela realizou um tratamento por vibração mecânica numa frequência em torno de 300 Hz, sendo esta uma frequência próxima da terceira frequência natural das amostras na condição engastada-livre que eram de 298 Hz a de 3,3 mm de espessura e de 363 Hz para a junta de 4,15 mm de espessura, durante um período de tratamento de 10 minutos. Com isso concluiu que o efeito do alívio de tensões foi mais expressivo na direção transversal do cordão de solda, apresentando maior nível de redução nas amostras de 3,3 mm (por volta de 50%). Chuvas constatou ainda que a significativa diferença na magnitude da redução das tensões entre as amostras estudadas, pode ser atribuída ao efeito da espessura. Assim sendo, as amostras de 4,15mm apresentaram rigidez maior, o que deve ter influenciado na susceptibilidade ao tratamento por vibração.

Outro pesquisador que buscou conhecimento sobre as características da técnica de alívio por vibrações foi Aoki *et al*, (2005). Foi investigada a influência do tipo de excitação no alívio de tensões residuais durante a soldagem de chapas finas. Nesta pesquisa os autores consideraram duas condições de vibração, utilizando um ruído branco (combinação simultânea de todas as frequências), na faixa de 0 a 500 Hz.

Mostraram que a redução dos valores de tensão residual foi significativa, principalmente próximo ao centro do cordão, em ambas as condições de vibração, levando-os a conclusão de que essa redução seria decorrente da deformação plástica nas regiões próximas ao cordão de solda devido ao fato do limite de escoamento imediatamente após a soldagem ser muito menor do que o inicial. Assim, as áreas mais próximas do cordão deformam plasticamente sob um carregamento externo de baixa magnitude, resultando no alívio das tensões.

Em 2007, Aoki e sua equipe analisaram a influência de diferentes frequências de excitação harmônica no alívio das tensões residuais durante a soldagem de aço JIS G3101 SS400 de dimensões 100 x 276 x 9 mm. Neste trabalho, as tensões residuais foram medidas somente ao longo do cordão de solda das amostras. Contudo, antes de realizar os testes, foram determinadas as frequências naturais das amostras estudadas, obtendo-se os

valores teóricos, de 36 e 31 Hz. A partir daí Aiko e sua equipe escolheram para excitação das amostras, as frequências de 20, 30 e 40 Hz.

Para obter bons resultados, algumas amostras foram soldadas sem vibração para que depois pudessem ser comparados os resultados. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a tendência do tratamento de vibração é minimizar a magnitude das tensões residuais, independente da natureza das mesmas, tratativas ou compressivas, sendo que a frequência de 30 Hz forneceu os melhores níveis de alívio de tensão, porém, sem um padrão definido.

O tratamento por vibração possui resultados práticos e tem sido comprovado em empresas, tanto ao redor do mundo como aqui no Brasil, porém sua credibilidade nos meios industrial e acadêmico ainda é questionada ou não foi bem difundida. Isto se deve ao fato de que as instituições normativas ainda não incluíram esta tecnologia, provavelmente devido à falta de comprovações científicas que embasem os resultados práticos atingidos.

Um exemplo dos resultados obtidos em empresas aqui no Brasil com esta tecnologia foi a aplicação do alívio de tensões em selos de vedação das portas de coqueria da companhia Usinas Siderúrgicas Minas Gerais S/A – Usiminas. Estes selos são formados por tiras de aço de 6,3 mm de espessura x 180 mm de largura x 3.000 mm de comprimento. As peças eram fabricadas a partir de chapa de 12,7 mm de espessura, usinadas para 6,3 mm em chanfro, ao longo de todo o comprimento. Todas as vezes que a fabricante produzia estas peças, havia um problema sério de empeno devido à retirada de uma quantidade de material muito grande em relação ao seu perfil. Após a utilização da nova tecnologia de alívio de tensões, este problema deixou de ocorrer, pois são feitos alívios parciais durante a usinagem e depois um alívio final, que evitam por completo as torções e os empenos (Martins, 2012).

Outro resultado impressionante ocorreu com o reparo do bloco da tesoura de tiras a quente da laminação da Usiminas. O equipamento necessitou de um reparo de emergência, pois a produção foi interrompida devido à parada deste equipamento. Após a deposição de 50 kg de solda para a remoção de trincas o equipamento sofreu alívio de tensões por vibração, pois não havia tempo hábil para a realização do tratamento térmico. O resultado foi mais que satisfatório, pois além da excelente qualidade do reparo comprovada após o retorno do equipamento à operação, conseguiu-se executar todo o serviço em apenas 28 horas, ao invés das 40 horas previstas (Martins, 2012).

Como toda técnica a vibração mecânica possui suas vantagens e limitações. As principais vantagens deste tratamento em relação ao térmico são (Meta-Lax, 2013): é que

não ocorrem distorções por causa do tratamento, o custo do processo é 90% menor do que outros tratamentos, o tempo do processo 98% menor, o tempo de usinagem após tratamento 41% menor, aumento da vida útil em relação à fadiga, vindo os resultados a serem obtidos nos mais diversos componentes soldados, conforme figura 18.

**Figura 18 - a) Tratamento por vibrações feita no monte de transporte para a estação espacial life boat da NASA b) Tratamento em propulsores de proa para uma plataforma de petróleo off-shore.**



**Fonte: (Meta-Lax, 2013).**

O tratamento possui algumas limitações como em qualquer processo metalúrgico e/ou mecânico. O processo não é recomendado para trabalhos com peças muito espessas, compridas ou estrutura com vigas abertas a vibração, podendo necessitar de aplicações em diversos pontos, requerendo um maior tempo. Nas situações de soldagem onde a vibração é usada durante a execução do processo de soldagem, o tratamento será mais compatível com os processos, SMAW, GMAW e GTAW, onde outros processos de soldagem podem apresentar problemas de logística quando trabalhados em conjunto com o tratamento por vibrações. (Braga, 2011).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os procedimentos experimentais empregados nos ensaios, bem como uma descrição dos equipamentos e acessórios utilizados.

#### 3.1. Materiais

Os materiais empregados neste trabalho, se referem aos materiais envolvidos na confecção das juntas soldadas que são: o metal de base (substrato) e os consumíveis: metal de adição e gases de proteção.

##### 3.1.1. Metal de base

Neste trabalho foi utilizado como metal de base o aço carbono estrutural ASTM A516 Gr.60., classificado pela Norma ASTM (1979) segundo as suas propriedades mecânicas que contém como principais elementos de liga o Mn e o Si. As Tabelas 4 e 5 apresentam as propriedades mecânicas e a composição química deste material segundo o fabricante.

**Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 Gr 60.**

Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento min (MPa)	Alongamento mínimo Lo= 200mm (%)	Alongamento mínimo Lo= 50mm (%)
415-550	220	21	25

Fonte: (Cardozo, 2003)

**Tabela 5 - Composição química da chapa de aço ASTM A 516 Gr 60.**

Elemento	C máx (%)	Mn (%)	P máx (%)	S máx (%)	Si (%)
Composição	0,23	0,79-1,30	0,035	0,04	0,13-0,45

Fonte: (Cardozo, 2003)

Este aço apresenta boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão atmosférica, boa resistência ao choque e à fadiga, o que aliada a uma boa maleabilidade e soldabilidade torna sua aplicação atrativa na construção de vasos de pressão, no setor petrolífero, transporte e construção civil, dentre outros (Telles, 2001).

### 3.1.2. Metal de adição

O processamento de petróleos de alta acidez é economicamente atrativo, o que torna fundamental a procura por novos materiais para fabricar componentes que suportem estes elevados índices de acidez na extração e processamento do petróleo (FIGUEREDO *apud* PÈREZ, 2012). Atualmente, para equipamentos que trabalham a temperaturas superiores a 600°C (vasos de pressão, caldeiras, turbinas a gás e etc.) o projeto das carcaças requer a utilização de Inconel 625 no lugar dos aços 12%Cr no interior como metal de adição (GUIMARÃES, 2011).

Tendo em vista que nosso material é utilizado para construção de vasos de pressão optamos pelo uso do eletrodo de ER NiCrMo-3, conhecido comercialmente como Liga Inconel 625. A Tabela 6 apresenta a composição química deste metal de adição em peso, segundo o fabricante. Os valores simples indicam teores máximos permitidos.

**Tabela 6 - Composição química do metal de adição.**

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb+Ta
ER NiCrMo-3	0.1	0.5	0.5	0.020	0.015	20.0-23.0	8.0-10.0	58 min	0.4	0.5	0.4	5.0	3.15-4,15

Fonte: (Pontes, 2012)

### 3.1.3. Elementos de proteção

Foi utilizado como gases de proteção uma mistura de Argônio e 25% de Hélio. Ambos são gases inertes caracterizando assim o processo de soldagem MIG.

## 3.2. Equipamentos utilizados

### 3.2.1. Equipamentos empregados na soldagem das juntas

Para a realização do processo de soldagem MIG foi utilizado equipamentos da IMC Soldagem (Fig. 19). Algumas características operacionais dos equipamentos utilizados na realização das soldagens das juntas são:

- Fonte de soldagem eletrônica multiprocessado, com corrente máxima de 800 A;
- Sistema de aquisição de dados para os sinais de tensão e corrente;
- Tartilope para deslocamento linear da tocha.

**Figura 19 - Máquina de soldagem MIG/MAG**



**Fonte: (Autoria Própria)**

### **3.2.2. Equipamento para realização das medidas de tensões residuais**

Para a análise das tensões residuais foi utilizado um difratômetro de raios-X portátil - *Portable stress analyser STRESSRAD (RADICON Ltd. Scientific instruments)* juntamente com o software de análise do equipamento - *Stress* (Fig. 20).

**Figura 20 - Difratômetro portátil para análise de tensão residual**



**Fonte: (Autoria Própria)**

O tubo de raios-X deste difratômetro funciona de forma análoga ao modelo laboratorial, um feixe de elétrons é acelerado através de uma grande diferença de potencial (25 kV, gerado por uma fonte de potencial constante) colidindo com o anodo com uma energia considerável. Raios-X são gerados como consequência. Grande parte da energia é dissipada na forma de calor e apenas 2% dela é transformada em raios-X. (Pontes, 2012).

Na análise de aços ferríticos/perlíticos pode-se analisar os planos {211} com um comprimento de onda de  $\lambda = 2,2896 \text{ \AA}$  e ângulo de pico ( $2\theta$ ) =  $156.5^\circ$ . Este comprimento de onda é produzido por um tubo anódico de cromo (Pontes *apud* HAULK, 2012). O método empregado foi o  $\text{sen}^2\phi$ , com medidas realizadas para  $\phi = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$  e  $45^\circ$ .

### 3.2.3. Equipamentos para análise de vibrações

Foram utilizados dois equipamentos para análise de vibrações: o analisador de sinal Agilent e o analisador de sinais Vibtron. O analisador de sinal dinâmico Agilent (Fig. 21) consiste num equipamento construído em fonte de espectro geral para analisar e avaliar problemas de ruído, vibração e acústica, problemas de rotação de máquinas e parâmetros de caracterização de sistemas de controle. Com o analisador de sinal dinâmico foram realizados testes de impactos com o objetivo de obter as frequências naturais das amostras.

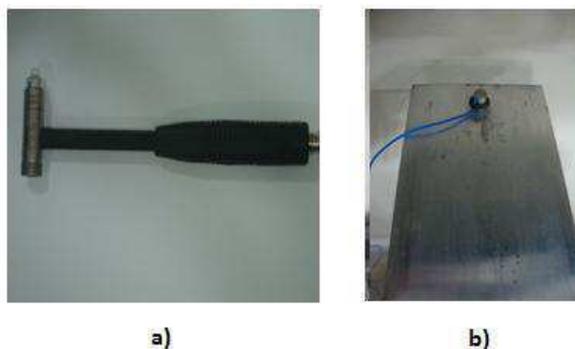
**Figura 21 - Analisador de sinal dinâmico (Agilent 35670A)**



**Fonte: (Autoria Própria)**

Para a realização dos testes de impacto nas amostras foram usados um kit de martelo de impacto (PCB Piezotronics 086C03), que possui máxima tensão entre 20 a 30 VDC, máxima força 2224 N pk, sensibilidade 2,25 mV/N e frequência de ressonância maior ou igual a 22,5 kHz e um acelerômetro modelo PCB 3528B10 SN 34589 (Figs. 22a e 22b).

**Figura 22 - a) Martelo de impacto (PCB Piezotronics 086C03); b) acelerômetro (PCB 3528B10) montado na extremidade livre da viga.**



**Fonte: (Autoria Própria)**

O Vibtron (Fig. 23) consiste num coletor analisador de campo que foi desenvolvido para identificar falhas em diversos tipos de equipamentos através da coleta de dados das medições globais e espectros vibratórios tanto em velocidade como aceleração, ambos em

RMS, com uma faixa de resposta em frequência de 1 a 5000 Hz. Acoplado ao equipamento Vibtron foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico industrial ICP com uma sensibilidade de 100 mV/g e um limite de aceleração de 20 g pico.

**Figura 23 – Coletor analisador de sinal Vibtron**



**Fonte: (Autoria Própria)**

#### **3.2.4. Equipamento para tratamento por vibração**

Para o tratamento por vibração mecânica foi utilizado um vibrador industrial pneumático (Fig. 24) da série NCR da BVI Brunialti. As vibrações são geradas por um rolo que gira a alta velocidade em uma pista de aço duro e polido. A frequência de vibração e a força dinâmica podem ser ajustadas mediante alteração da pressão de ar de suprimento (2 a 6 bar).

**Figura 24 - Modelo de vibrador pneumático da série NCR**



**Fonte: (BVI Brunialti, 2013)**

### 3.3. Metodologia

#### 3.3.1. Planejamento experimental

Devido aos ótimos resultados que se têm obtido no desenvolvimento tecnológico e industrial é cada vez maior a necessidade e a utilização de ferramentas estatísticas, com o intuito de se obter uma otimização de processos industriais, e quando se alia essas ferramentas estatísticas ao planejamento experimental, uma vez correlacionadas, tornam-se ferramentas indispensáveis também no estabelecimento do controle estatístico de um processo.

O planejamento experimental, que também pode ser denominado delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (Pontes, 2012).

Existem diversas técnicas de experimentos que podem ser utilizadas na hora da realização de um experimento ou no controle de um processo fabril. Dentre as técnicas mais utilizadas para a realização do projeto e análise de experimentos, destacam-se as seguintes: planejamento fatorial completo  $2^k$ , planejamento fatorial fracionado  $2^{(k-p)}$ , metodologia da superfície de resposta (COLOMBARI, 2004). Neste trabalho optamos pela utilização do planejamento fatorial completo.

Um experimento fatorial com  $k$  fatores, cada um deles com dois níveis, são denominados de experimento fatorial  $2^k$ . O processo experimental dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental. Após esses testes, são determinados e interpretados os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e dessa forma pode-se identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação (GALDÁMEZ, 2002).

O experimento da dissertação possui 2 fatores que são tempo e pressão. O fator tempo possui dois níveis de 20 minutos e 40 minutos e o fator pressão possui dois níveis que são 2 bar e 4 bar. Optamos por realizar para o tratamento por vibrações um experimento fatorial  $2^2$  com repetição totalizando um total de 8 experimentos. A tabela 7 mostra o planejamento experimental obtido para  $2^2$  com repetição que será usado no trabalho. Para o tratamento térmico optamos para título de comparação realizar o tratamento em juntas soldadas, totalizando 12 juntas soldadas.

Tabela 7- Matriz de planejamento experimental da dissertação

Nº do Teste	Ordem do Teste	Fatores de controle		Respostas	
		A	B		
1	3	(-1) 20 min	(-1) 2 bar	Y <sub>1</sub>	Y <sub>5</sub>
2	1	(+1) 40 min	(-1) 2 bar	Y <sub>2</sub>	Y <sub>6</sub>
3	4	(-1) 20 min	(+1) 4 bar	Y <sub>3</sub>	Y <sub>7</sub>
4	2	(+1) 40 min	(+1) 4 bar	Y <sub>4</sub>	Y <sub>8</sub>

Fonte: (Autoria Própria)

As juntas para a realização dos tratamentos foram divididas em grupos da seguinte maneira: quatro juntas foram submetidas a tratamento térmico; quatro juntas foram tratadas por vibrações numa pressão de 2 bar em tempos de 20 minutos para duas dessas juntas e de 40 minutos para as demais. As juntas restantes foram tratadas por vibração numa pressão de 4 bar em tempos de 20 minutos para duas das juntas de 40 minutos para as juntas restantes.

### 3.3.2. Corte e preparação das amostras

Na preparação das amostras uma chapa de aço ASTM A516 Gr 60 foi cortada por guilhotina de tal forma a produzir juntas com dimensões de 40 x 310 x 6 mm e 40 x 200 x 6 mm (Fig. 25).

Considerando que o material estudado continha camadas superficiais de óxidos, devido ao tempo que estavam armazenadas no laboratório, e outras impurezas, antes da soldagem as superfícies foram preparadas através de esmerilhamento, a fim de evitar a desestabilização do arco e inclusão de impurezas durante o processo de soldagem, o que poderia acarretar defeitos, tais como poros nas juntas soldadas.

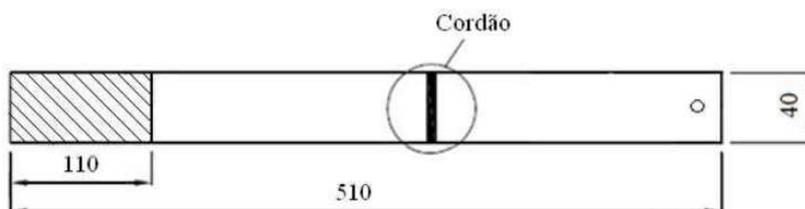
Posteriormente, foi realizada a soldagem de topo nas juntas obtendo assim uma viga padronizada de dimensões 40 x 510 x 6 mm, conforme ilustrada na Fig. 26. As amostras soldadas foram divididas em 5 grupos, para que posteriormente fossem realizados em um desses grupos tratamento térmico e nos demais grupos tratamento por vibração mecânica, onde foram variados tempo e frequências de excitação.

Figura 25- Plano de corte da chapa ilustrando as dimensões das amostras.



Fonte: (Autoria Própria)

Figura 26 - Ilustração das dimensões da viga e do cordão de solda



Fonte: (Autoria Própria)

### 3.3.3. Soldagem das juntas

Para a realização da soldagem das amostras foi necessário definir os parâmetros de soldagem. Neste trabalho foram adotados os mesmos parâmetros de soldagem de outro estudo realizado com o mesmo processo e material (Teske, 2006), conforme Tab. 8.

Tabela 8- Parâmetros utilizados para a soldagem das amostras

Tensão (V)	34,0
Velocidade de alimentação (m/s)	0,1417
Distância Bico de contato Peça (m)	0,016
Vazão do gás (m <sup>3</sup> /s)	0,00023
Velocidade de soldagem (m/s)	0,0067
Corrente média (A)	220
Gás de Proteção	Ar + 25% He
Corrente (A)	239,5
Temperatura de Interpasse	120°C

Fonte: (Autoria Própria)

### 3.3.4. Tensometria por difração de raios X

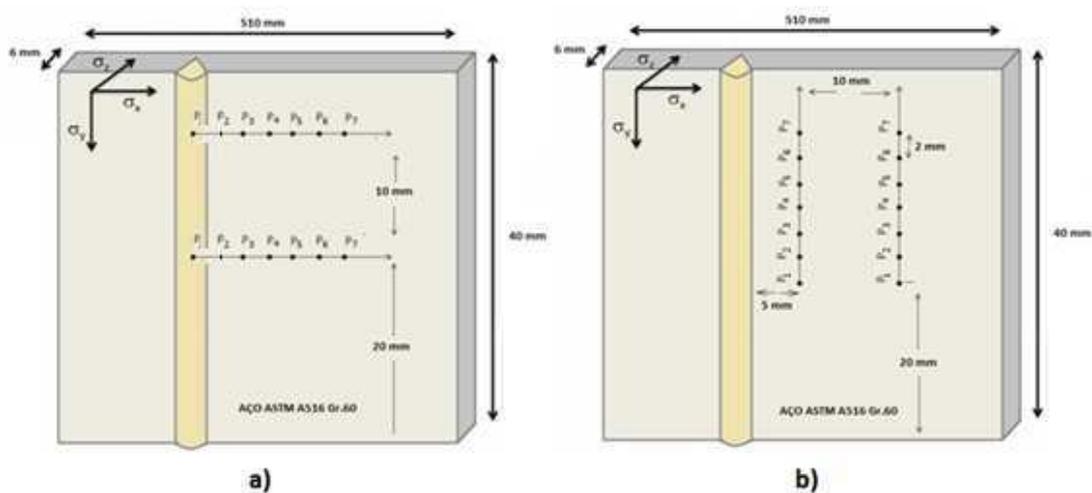
O método empregado para a análise foi o  $sen^2\phi$ , com medidas realizadas feitas para  $\phi = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$  e  $45^\circ$ .

Foram realizadas duas medições de tensões residuais: uma depois de finalizada a soldagem e outra depois de concretizado os tratamentos térmicos e de vibração mecânica. Em ambas as medições foram retiradas medições para tensões transversais e para tensões longitudinais ao longo do cordão de solda.

Para as tensões transversais foram realizadas duas medições em cada junta, em duas linhas, uma linha central ao cordão de solda e outra distanciada da central em 10 mm, conforme figura 27a. Cada linha contém um total de sete pontos de leitura distantes entre si de 5 mm. Dessa forma pode-se obter as características das tensões residuais tanto ao longo da junta soldada como em direção a lateral da junta.

As tensões longitudinais foram obtidas também em duas medições para cada junta, num total de duas linhas, uma linha distante do cordão de solda de 5 mm e com o seu ponto inicial tomando como referência o centro do cordão de solda e outra distanciada da primeira em 10 mm, conforme figura 27b. Cada linha na leitura longitudinal contém um total de sete pontos de leitura distantes entre si de 2 mm. Com isso pode-se observar a distribuição das tensões longitudinais tanto ao longo da solda como em direção à lateral da junta.

Figura 27 - a) Linhas para medição das tensões transversais; b) Linhas para medição das tensões longitudinais



Fonte: (Autoria Própria)

### 3.3.5. Interface gráfica

Depois de finalizadas as medições de tensões residuais tanto nas juntas após a realização do processo de soldagem como terminada após os tratamentos de alívio de tensões, teríamos que realizar a comparação dos resultados obtidos com as tensões estipuladas pela norma API 579. Para auxiliar no cálculo das tensões da norma e na comparação dos resultados criamos uma interface gráfica na plataforma Matlab, conforme figura 28.

**Figura 28 - Interface gráfica construída na plataforma Matlab .**

**Fonte: (Rodrigues, 2013)**

A interface foi construída tomando como base para seu algoritmo as equações 16 e 17 para vasos de pressão cilíndricos da norma API. Como vimos anteriormente, as equações possuem um fator de redução de tensão ( $R_r$ ) já em sua composição que depende do fator  $T_p$  chamado de teste de pressão. Esse fator de redução está expresso na equação tendo em vista que todo vaso de pressão depois de finalizada sua fase de construção, passa por um teste de pressão para obter parâmetros de segurança que determinam se o vaso de pressão estará apto para trabalhar nas pressões que o mesmo se propõe a trabalhar.

Na fase dos testes de pressão já ocorre uma redução do nível de tensões residuais que é representada nas equações exatamente pelo fator  $R_r$ . Tendo em vista que nossas amostras soldadas passaram apenas pelo processo de soldagem em si, não sendo submetido a qualquer teste de pressão, optamos por retirar o fator de redução de tensão, produzindo

assim pelas equações, em seus resultados, apenas tensões originárias do processo de soldagem estipuladas pela norma.

A interface é composta de três regiões. A primeira região, nomeada de “Dados para Análise” (Fig. 29a), correspondente à área da interface onde serão inseridos os principais parâmetros de entrada para o cálculo das tensões da norma API. Os parâmetros de entrada solicitados são o limite de escoamento do material a ser soldado, o raio médio do componente, no caso o raio do vaso de pressão cilíndrico, o comprimento do componente que corresponde ao tamanho da peça onde se deseja que sejam calculadas as tensões, a espessura do material a ser soldado e a largura da solda depois de concretizada a soldagem (Rodrigues, 2013).

Ainda na primeira região existe uma caixa nomeada de direção da tensão residual onde pode ser escolhida a direção em que se deseja calcular as tensões residuais com relação ao cordão de solda. A segunda região da interface é nomeada de “Resultados das Tensões Residuais” (Fig. 29b) onde é expressa a máxima tensão da junta soldada e da norma. Por último temos a região nomeada de “Resultados da Inspeção” (Fig. 29c) onde a interface mostra para o usuário se a junta soldada passou ou não nas condições propostas pela norma API.

**Figura 29 - Regiões da interface gráfica. a) Dados para Análise; b) Resultados das tensões residuais; c) Resultados da inspeção**

Figura 29a: Dados para Análise

Limite de Escoamento do Material :	<input type="text" value="220"/>	MPa
Raio Medio do Componente :	<input type="text" value="400"/>	mm
Comprimento do Componente :	<input type="text" value="50"/>	mm
Espessura do Componente :	<input type="text" value="6"/>	mm
Largura da Solda :	<input type="text" value="13"/>	mm
Direção da Tensao Residual :	<input type="text" value="Paralela ao Cordao"/>	

Figura 29b: Resultados das Tensões Residuais

Maxima Tensao pela API 579 :	0
Maxima Tensao pela Analise:	0

Figura 29c: Resultados da Inspeção

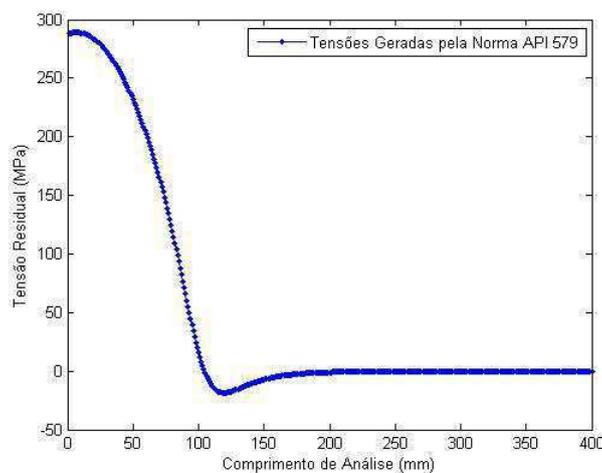
Área vazia para resultados de inspeção.

**Fonte: (Autoria Própria)**

A interface também gera um gráfico mostrando a curva das tensões obtidas pela norma (Fig. 30), com o objetivo de fazer a comparação com a curva obtida da análise de tensões nas amostras. Para a análise na interface tomamos como parâmetros de entrada os

seguintes valores: limite de escoamento do material de 220 MPa (aço ASTM em estudo), raio médio do cilindro de 400 mm correspondente ao de um vaso de pressão de médio porte de refinaria. Para o comprimento e espessura da chapa estabelecemos os valores de 50 mm e 6 mm respectivamente e a largura do cordão de solda de 13 mm, valor esse correspondente ao das juntas soldadas das amostras. Com esses dados conseguimos obter para as tensões residuais da norma os valores médios de 288,85 MPa para a condição transversal ao cordão e 284,13 MPa para a condição longitudinal ao cordão.

**Figura 30 - Gráfico de tensões residuais transversais da norma gerada pela interface gráfica**



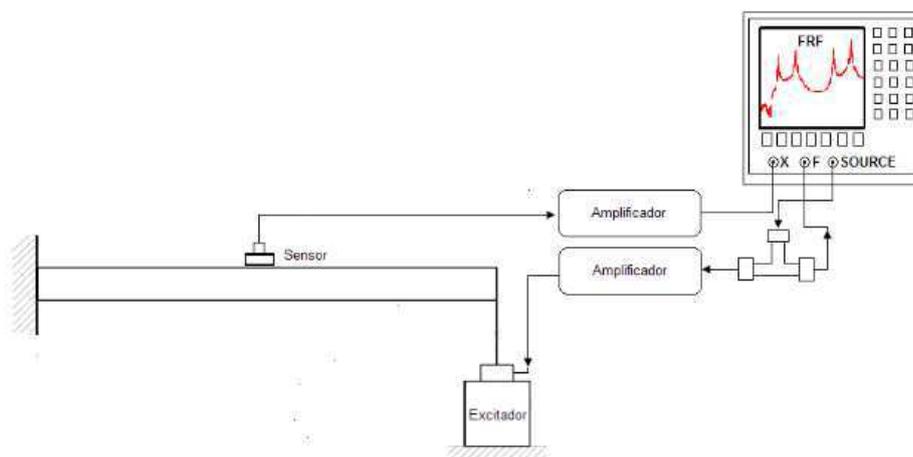
**Fonte: (Autoria Própria)**

### 3.3.6. Análise modal experimental

A análise modal é uma técnica de caráter tanto teórico como experimental que visa à construção de modelos representativos do comportamento dinâmico dos sistemas e determinação dos seus parâmetros modais, ou seja, frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibrar (Inman, 2001).

A análise modal experimental de uma estrutura se inicia com a medição da resposta da estrutura pelas Funções de Resposta em Frequência (FRF's). A cadeia experimental é basicamente composta pela estrutura de teste, sensores de leitura do sinal de vibração, *shaker* ou excitador da estrutura e analisador de frequência, responsável pela coleta e processamento dos sinais. Um esquema do procedimento modal experimental é mostrado na figura 31.

**Figura 31 - Esquema de um procedimento modal experimental**

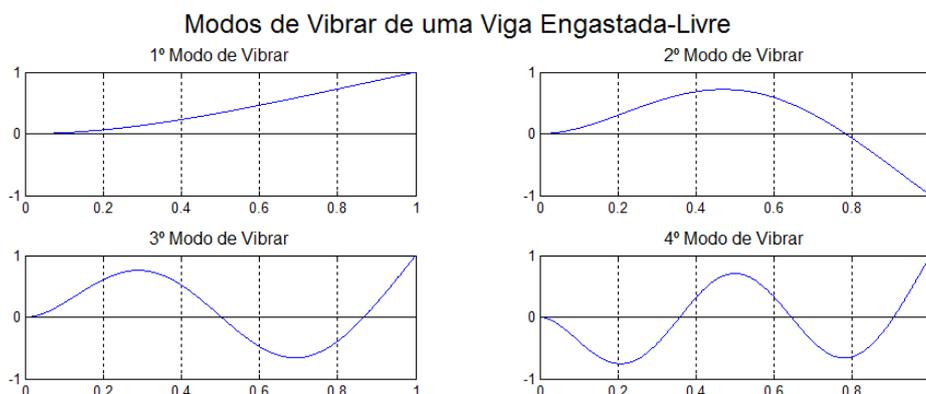


**Fonte: (Irmão, 2012)**

No caso de análise de vigas a obtenção dos modos de vibração e respectivas frequências naturais variam de acordo com a condição de engaste, geometria da seção transversal e material. A figura 32 ilustra os quatro primeiros modos de vibração de uma viga engastada-livre, onde observa-se que ao longo do comprimento (eixo x) ocorrem pontos nodais que resultam em medidas de deslocamentos nulos.

Assim, na escolha de frequências de tratamento baseadas nos modos de vibração, deve-se selecionar um modo que apresente o máximo de deformação na região de interesse para aliviar as tensões residuais, que no presente estudo seria próximo ao cordão de solda.

**Figura 32 - Modos de vibração para uma viga na condição engastada-livre**



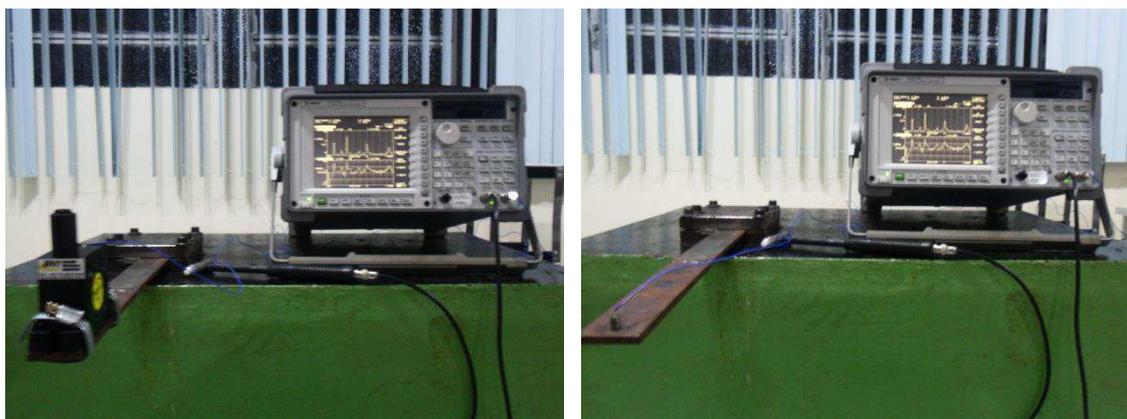
**Fonte: (Irmão, 2012)**

A análise experimental para escolhas das frequências de tratamento foi realizada em duas etapas. Primeiramente foi realizado testes com martelo de impacto com o objetivo de identificar as primeiras frequências naturais das vigas na condição engastada-livre. Na segunda parte da análise experimental foram realizados testes com o excitador pneumático acoplado a extremidade livre da viga, funcionando com o objetivo de ajustar as frequências nas quais seriam realizados os tratamentos por vibração, através do controle das pressões de trabalho.

Para a primeira parte do experimento foram retiradas três vigas dos grupos de juntas soldadas que foram separados para sofrerem tratamento por vibração. Cada uma das três vigas foi submetida a três testes de impacto utilizando o analisador Agilent, em duas condições, sem e com o excitador pneumático, sendo cada teste diferenciado entre si pelo número de impactos seguidos pelo cálculo de suas médias (Average) que eram realizadas na estrutura, conforme a figura 33. Foram realizados testes para 1, 3 e 5 marteladas e a partir daí obtidos os resultados experimentais referentes a frequências naturais.

Para a segunda parte da análise experimental, foram utilizados os dois analisadores para extrair as frequências que o excitador pneumático estava provocando na estrutura de forma que com os resultados pudéssemos escolher as melhores pressões e conseqüentemente as melhores frequências para realização do tratamento.

**Figura 33 - Setup de análise modal experimental nas amostras com e sem o excitador de vibração.**



**Fonte: (Autoria Própria)**

### 3.3.7. Tratamento térmico

O tratamento térmico nas juntas soldadas foi realizado em parceria com a empresa StarGesso de Botucatu (São Paulo) que possui sede em Juazeiro do Norte (Ceará). Os parâmetros estabelecidos para o tratamento térmico foram os recomendados pela norma AWS (American Welding Society). Pela norma para materiais com espessuras abaixo de 19 mm o tratamento térmico para alívio de tensões se torna opcional, devendo o operador ou técnico tomar a decisão analisando a utilização e importância da junta.

Baseado na ideia do nosso material de estudo ser empregado na construção de vasos de pressão optamos pelo uso de tratamento térmico para obtermos um termo comparativo com os resultados obtidos com o tratamento por vibração. Para o tratamento das juntas soldadas optou-se por um tratamento térmico a uma temperatura controlada entre 300 e 320 °C, numa estufa da QUIMIS modelo Q314M-243, durante um período de tratamento de 2 horas (Fig. 34), tendo em vista que a norma afirma que para se obter redução considerável de tensões residuais é necessário temperaturas de tratamento a partir de 150°C. Completado o tratamento térmico as juntas foram resfriadas até a temperatura ambiente dentro do próprio equipamento.

Concluída a fase de tratamento térmico, que compreende desde o tratamento de 2 horas até o completo resfriamento, as juntas foram submetidas às novas medições de tensões residuais com o intuito de verificar o nível de redução que o tratamento proporcionou na junta soldada.

Figura 34 - a) Montagem das vigas na estufa de tratamento; b) Painel com temperatura de tratamento.



a)



b)

Fonte: (Autoria Própria)

### 3.3.8. Tratamento por vibração mecânica

Para o tratamento por vibrações mecânicas foi utilizado um excitador pneumático do tipo vibrador industrial (modelo NCR 10) ligado a um compressor de ar com capacidade de pressão máxima de 10 bar. O ar sai do compressor e passa direto por um conjunto de filtro de ar e manômetro com o objetivo de retirar impurezas do ar e ajustar a pressão de trabalho.

Saindo do filtro de ar o ar aspirado pelo compressor passará ainda pelo lubrificador, de forma a deixar o ar com certa quantidade de partículas de óleo, que tem como objetivo lubrificar os rolamentos internos do excitador pneumático e deixá-lo dentro das especificações de funcionamento sugeridas pelo fabricante.

Finalmente, o fluxo de ar passa direto para o vibrador pneumático excitando a estrutura e realizando com isso o tratamento para alívio e tensões. Seguindo as especificações do fabricante para funcionamento do equipamento e dentro do que foi possível manter em termos de pressão estável no período de tempo, optou-se por duas pressões de tratamentos (2 bar e 4 bar). A figura 35 mostra o bancada experimental para realização do tratamento por vibrações.

**Figura 35 - a) Bancada experimental para realização do tratamento por vibração; b) Detalhe do vibrador pneumático.**



Fonte: (Autoria Própria)

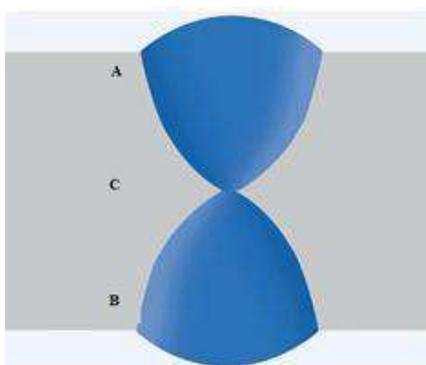
### 3.3.9. Preparação e Análise Metalográfica

O ensaio de metalografia foi realizado em duas amostra de aproximadamente 40 mm de largura da região compreendida entre a ligação do aço ASTM A516 Gr.60 e o

metal de adição ER CrNiMo-3. As amostras foram obtidas de duas juntas, uma onde foi realizada o tratamento térmico e a segunda onde foi realizado tratamento por vibração. As amostras, depois de cortadas, foram lixadas (da granulação 80 até a granulação 1200  $\mu\text{m}$ ), polidas com alumina 4 ( 1 $\mu\text{m}$ ), 3 (0,3 $\mu\text{m}$ ) e 2 (0,05 $\mu\text{m}$ ) e, por fim, foram atacadas quimicamente com Nital 2% a fim de revelar a microestrutura do metal de base (MB) e a zona termicamente afetada (ZTA).

A microestrutura das regiões acima citadas em um microscópio óptico acoplado a um computador e um software analisador de imagens, foram utilizadas aumentos de 20 e 50 vezes. A análise de microestruturas na ZTA foi realizada dividindo as amostras em três regiões da junta conforme a Fig. 36: região A perto do primeiro cordão de solda, região B perto do segundo cordão de solda e região C na região entre os dois cordões.

**Figura 36 - Ilustração das regiões utilizadas na análise microestrutura das amostras.**



**Fonte: (Autoria Própria)**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Energia de soldagem e distribuição de temperatura

Nos processos de soldagem, o cordão de solda e pontos adjacentes a ele passa por ciclos térmicos que variam de acordo com suas localizações em relação à fonte de calor. Os pontos da região mais próxima da fonte de calor experimentam temperaturas mais elevadas e por tempos mais longos e todo esse efeito é mensurado a partir do cálculo da energia de soldagem, ou aporte térmico, dado pela equação:

$$H_t = \frac{V \cdot I}{v} \quad (20)$$

Onde:

$H_t$  = aporte de calor (J/cm);

$V$  = tensão no arco (V);

$I$  = corrente de soldagem (A);

$v$  = velocidade de soldagem (cm/s).

Entretanto, na soldagem, a energia produzida não é totalmente transferida para a peça. Para cada processo define-se um coeficiente  $\eta$  de eficiência de transferência de energia. Para o caso específico da soldagem MIG a literatura relata que  $\eta$  se encontra entre 0,65 e 0,85, onde foi adotado o valor intermediário  $\eta = 0,75$ . Com isso, o aporte de calor líquido ( $H_1$ ) é definido por:

$$H_1 = \eta \frac{VI}{v} \quad (21)$$

A energia de soldagem para as chapas de 6 mm foi calculada a partir dos parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 8. Substituindo os dados na equação 20 obtemos:

$$H_1 = \eta \frac{VI}{v} \rightarrow H_1 = 0,75 * \frac{34 * 239,5}{0,67} \rightarrow H_1 = 9,1 \text{ kJ/cm}$$

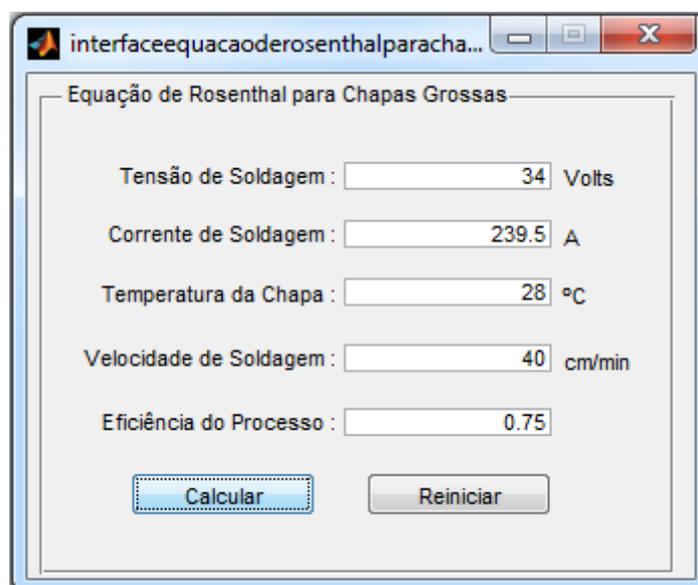
Portanto, para cada cordão de solda houve um aporte térmico de 9,1 kJ/cm. Encontrado a energia gerada durante o processo de soldagem, a próxima etapa seria encontrar a distribuição de temperatura na junta soldada. Para obtenção da distribuição das temperaturas utilizamos da equação de Rosenthal para chapas grossas, pois, consideramos que a distribuição na chapas em questão se dá em três direções estado que configura a

chapa na classificação de grossa para as equações de Rosenthal. Pegando a equação 1 e fazendo os devidos ajustes matemáticos obtivemos para a temperatura num determinado ponto x a seguinte equação:

$$T(x) = \frac{Qe^{\frac{Vx}{2\alpha}}K_0\frac{Vr}{2\alpha}}{2\pi k*g} + T_0 \quad (22)$$

Considerando que o eixo x tem seu sentido positivo sobre o cordão de solda já depositado, o eixo z está orientado para dentro da placa, penetrando-a e o sistema de eixos é dextrógiro. Para auxiliar no cálculo das distribuições de temperaturas foi desenvolvido um simples algoritmo em interface gráfica (Código no anexo B) na plataforma Matlab para nosso estudo em questão, conforme figura 37.

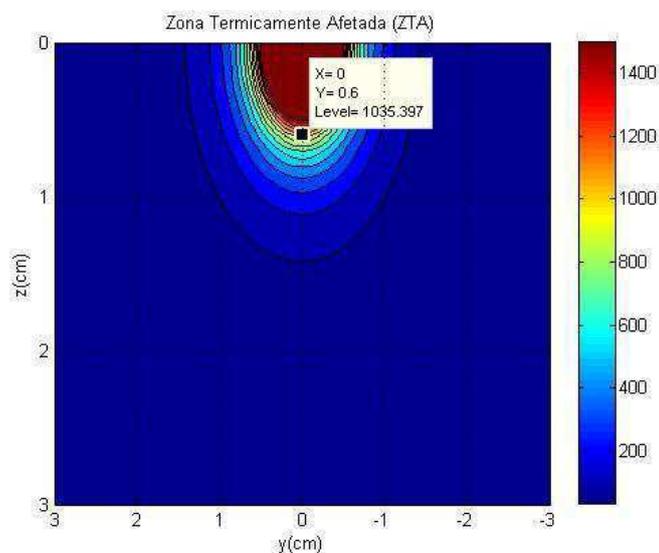
**Figura 37 - Interface para auxílio no cálculo da distribuição de temperaturas na soldagem.**



**Fonte: (Autoria Própria)**

A partir dos parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 8 e tomando a condutividade térmica  $k$  e difusividade térmica  $\alpha$  como  $k = 36,3 \text{ J/m}$  e  $\alpha = 1,07 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  e a temperatura da chapa no momento da soldagem como sendo de  $28^\circ\text{C}$ , obteve-se os seguintes resultados, mostrado na figura 38, para a distribuição de calor na zona termicamente afetada.

**Figura 38 - Resultado da distribuição de temperaturas na espessura da chapa.**



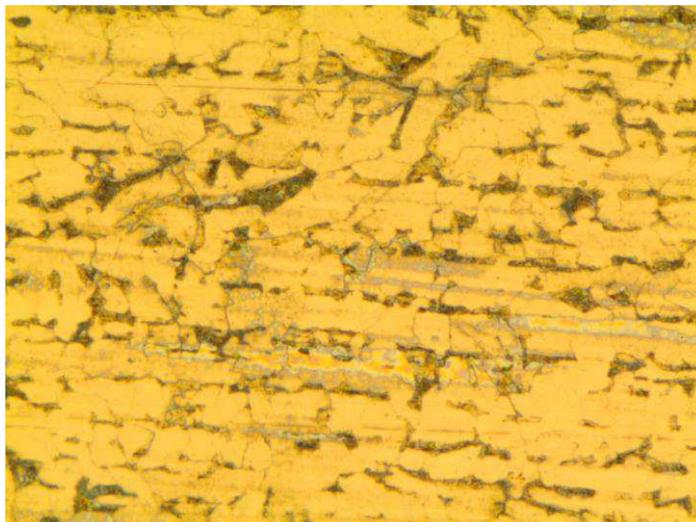
**Fonte: (Autoria Própria)**

Podemos observar que a distribuição de temperatura na espessura da chapa ultrapassa 1 cm. Fazendo uma marcação em 6 mm ( $X=0$  e  $Y=0,6$  cm), posição essa referente a espessura da junta soldada, a mesma se encontra ainda com temperatura entre 900 e 1000°C. Essas temperaturas elevadas encontradas na altura da espessura levaram a uma influência sobre o nível de tensões residuais do segundo passe sobre o primeiro quando o mesmo promove uma nova distribuição não uniforme de temperatura na junta e escorregamentos localizados. (PONTES apud HAUKE, 2012). Essas temperaturas elevadas encontradas em 6 mm também pode vir a interferir na microestrutura do material na região do primeiro cordão com o fim da execução do segundo passe.

#### **4.2. Análise Microestrutural**

Primeiramente foi realizada uma análise microestrutural no aço ASTM A516 Gr.60 como recebido (Fig. 39). A análise feita no aço mostrou uma composição semelhante a encontrada na literatura para o aço em estudo, uma região de grãos ferríticos com contornos perlítico. Podemos visualizar na imagem a direção de laminação do aço em estudo (linhas horizontais).

**Figura 39 - Microestrutura do Aço ASTM A516 Gr.60. Ataque: Nital 2% Aumento: 50x**

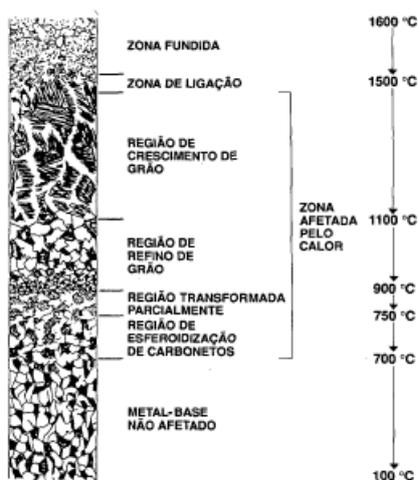


**Fonte: (Autoria Própria)**

Em seguida realizou-se uma análise nos corpos de provas. A análise das amostras mostrou que foi produzida uma junta soldada a MIG de boa qualidade e penetração total, sem evidências de defeitos visuais. Na zona termicamente afetada (ZTA) a largura foi de cerca de 1,2 - 2,0mm.

A ZTA de uma junta soldada pode ser dividida, com base na temperatura a que foram submetidas, nas seguintes regiões (Fig. 40): região de crescimento de grão, região de refino de grão, região transformada parcialmente e região de esferoidização. (WAINER, 2004).

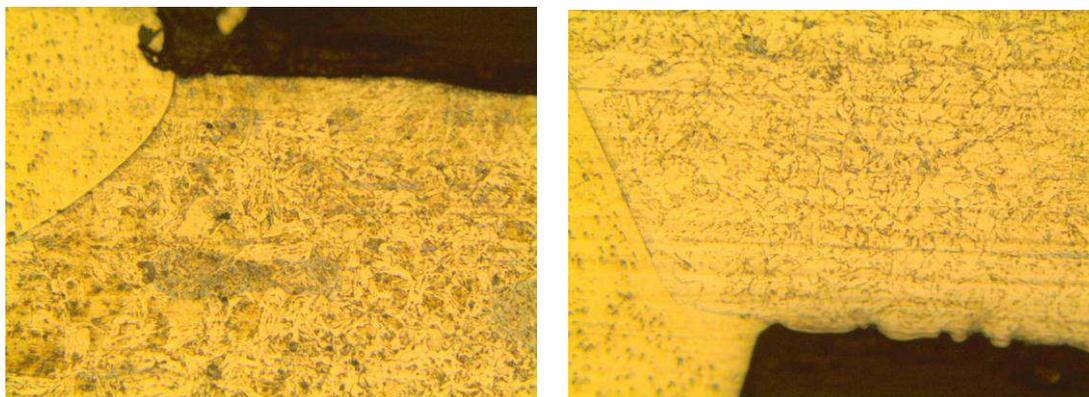
**Figura 40 - Regiões da ZTA e suas respectivas temperaturas.**



**Fonte: (WAINER, 2004)**

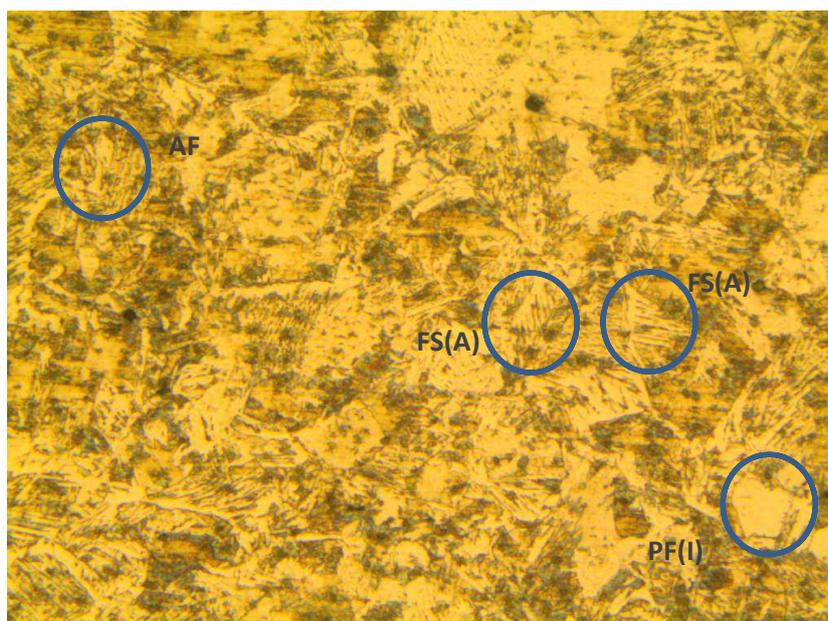
As figuras 41 e 42 mostram as regiões analisadas para duas amostras obtidas após o tratamentos por vibrações e térmico.

**Figura 41 - Microestrutura da amostra submetida a tratamento por vibrações. a) Região A (20x); b) Região B (20x); c) Região C (50x). Ataque: Nital 2%**



a)

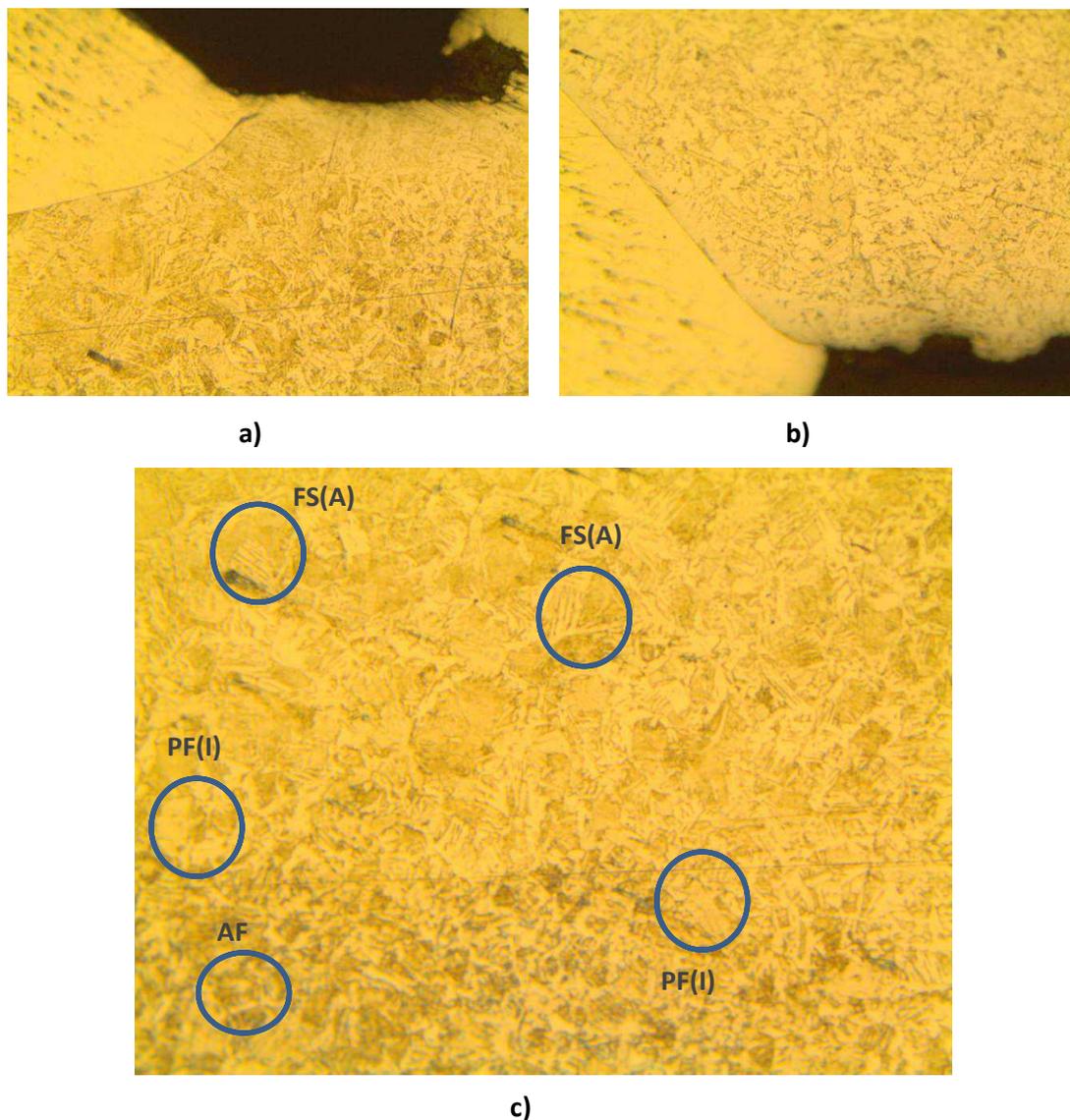
b)



c)

Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 42 - Microestrutura da amostra submetida a tratamento térmico. a) Região A (20x); b) Região B (20x); c) Região C (50x). Ataque: Nital 2%**



**Fonte: (Autoria Própria)**

Para todas as amostras analisadas, independente do tipo de tratamento submetido, a microestrutura apresentou-se bastante similar, tendo em vista a utilização dos mesmos parâmetros de soldagem para todos os depósitos de solda executados.

Para as duas primeiras regiões houve uma mudança na microestrutura original do aço, onde para a região B houve um crescimento dos grãos tendo em vista que a região foi afetada por temperaturas elevadas do segundo passe que são propícias para o crescimento granular da região. A região A de ambas as amostras se mostraram com uma região de granulometria mais fina. Esse refino dos grãos da região A, provavelmente, deve-se a influência que essa região sofreu quando o segundo passe foi executado promovendo na

região uma distribuição de temperatura mais elevadas (em torno de 900°C na simulação), temperatura propícia para o refino de grão como vimos na literatura (figura 39).

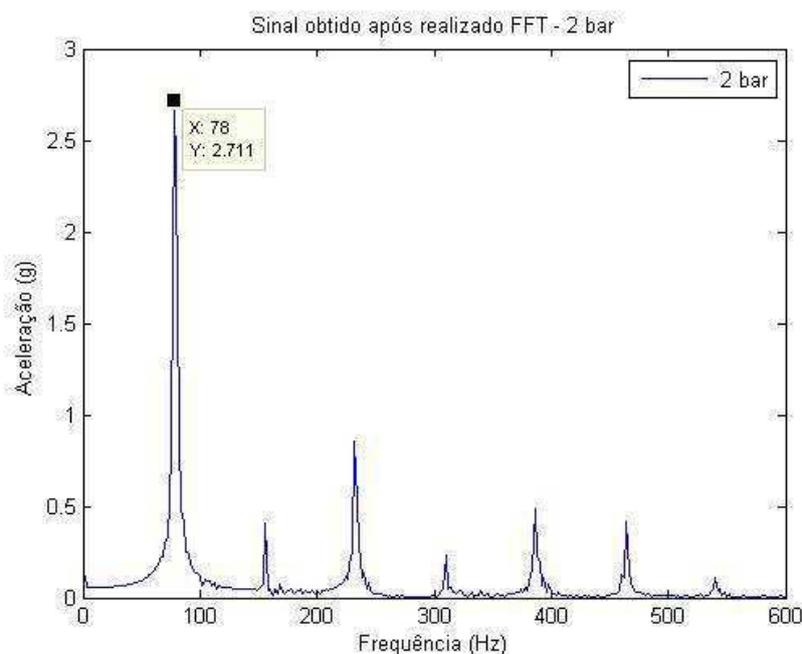
Por último, analisando as regiões C de ambas as amostras, nota-se que elas sofreram influência de ambos os passes e que devido a sua exposição a temperaturas elevadas propiciou o refino de grão na região. As microestruturas da região C das duas amostras analisadas para ambos os tratamentos se mostraram com uma composição microestrutural bem heterogênea com presença de ferrita poligonal intragranular (PF(I)), ferrita acicular (AF) e de ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)).

### 4.3. Análise modal experimental das amostras soldadas

#### 4.3.1. Determinação da faixa de frequência de excitação

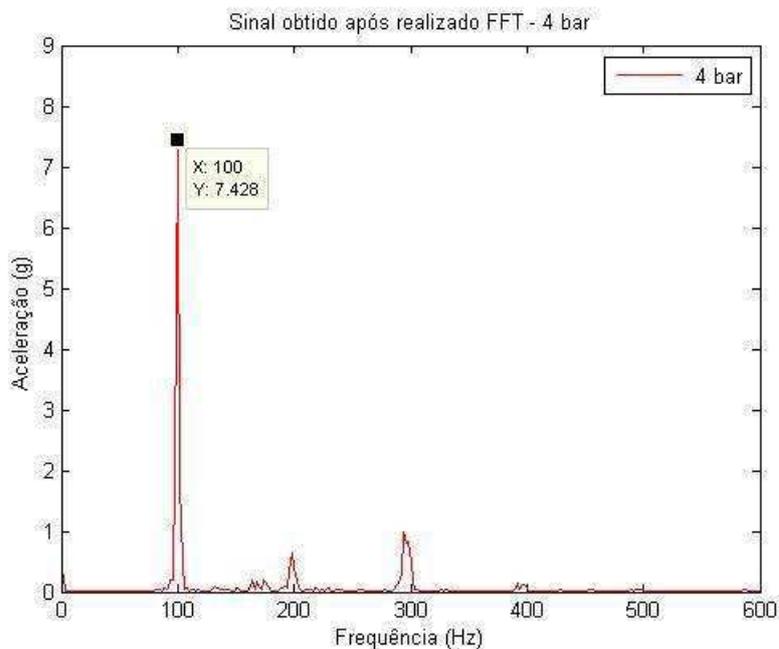
Numa primeira etapa foi realizada uma análise modal experimental para se obter as frequências de excitação reais que estavam sendo geradas com o excitador nas pressões de tratamento (2 e 4 bar). Para tal análise foram utilizados os dois equipamentos (Analisador de sinais dinâmico Agilent e Coletor de sinais Vibtron) para validar os resultados. As figuras 43 e 44 mostram dois espectros típicos de aceleração obtidos do analisador de sinal dinâmico Agilent com o excitador em funcionamento para as pressões de trabalho adotadas. Para a pressão de 2 bar obteve-se uma frequência de pico de 78 Hz (figuras 43) e para 4 bar uma frequência de pico de 100 Hz (figuras 44).

**Figura 43 - Espectro de frequência obtido para 2 bar (Agilent).**



Fonte: (Autoria Própria)

Figura 44 - Espectro de frequência obtido para 4 bar (Agilent)



Fonte: (Autoria Própria)

#### 4.3.2. Determinação das frequências naturais das amostras

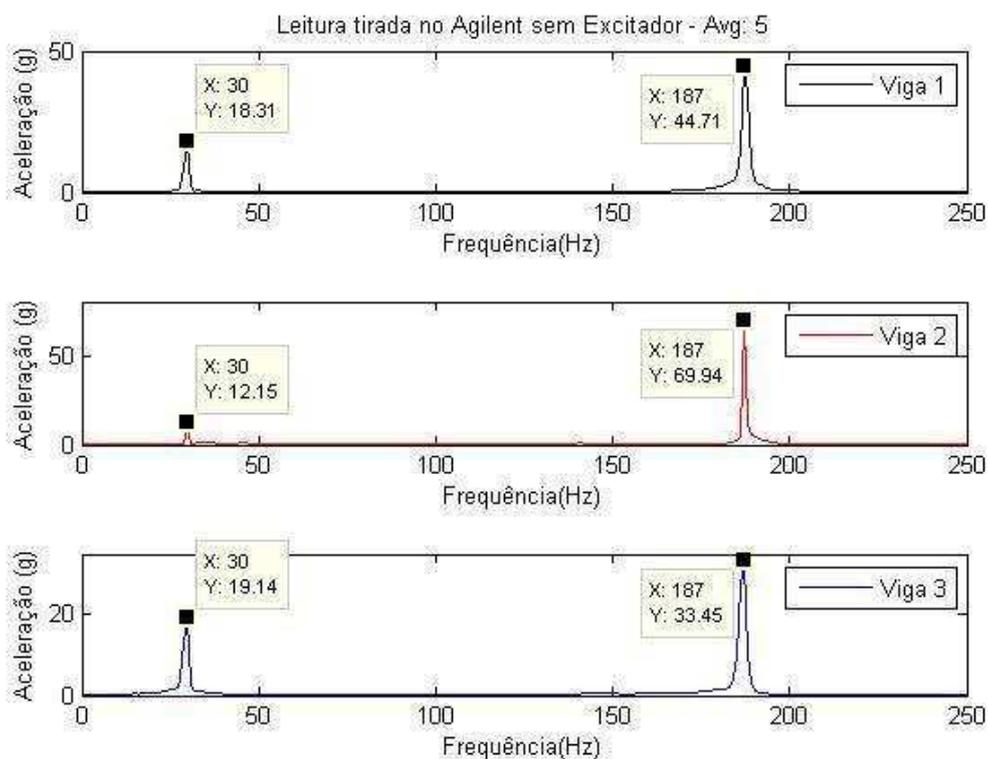
Numa segunda análise modal experimental realizada com a viga na condição engastada-livre desconsiderou-se o vibrador acoplado na extremidade, para o caso de se utilizar um excitador tipo *shaker* e servir de referência para análise. Os valores obtidos para a primeira e segunda frequências naturais foram respectivamente de 30 Hz e 187 Hz. Porém, foi observado que para a condição com o vibrador fixado na extremidade livre da viga essas frequências naturais passaram a ser de 17 Hz e 146 Hz, respectivamente, devido ao efeito da massa adicional do vibrador que funciona como uma carga aplicada na extremidade da viga. Os resultados podem ser verificados na tabela 9 e nas figuras 45 e 46.

Tabela 9 - Resultados experimentais para a análise modal nas juntas soldadas (Avg:5)

Viga 1	Sem vibrador na extremidade	Com vibrador na extremidade
	Avg: 5 f1 = 30 Hz f2 = 187 Hz	Avg: 5 f1 = 17 Hz f2 = 145 Hz
Viga 2	Sem vibrador na extremidade	Com vibrador na extremidade
	Avg: 5 f1 = 30 Hz f2 = 187 Hz	Avg: 5 f1 = 17 Hz f2 = 146 Hz
Viga 3	Sem vibrador na extremidade	Com vibrador na extremidade
	Avg: 5 f1 = 30 Hz f2 = 187 Hz	Avg: 5 f1 = 17 Hz f2 = 140 Hz

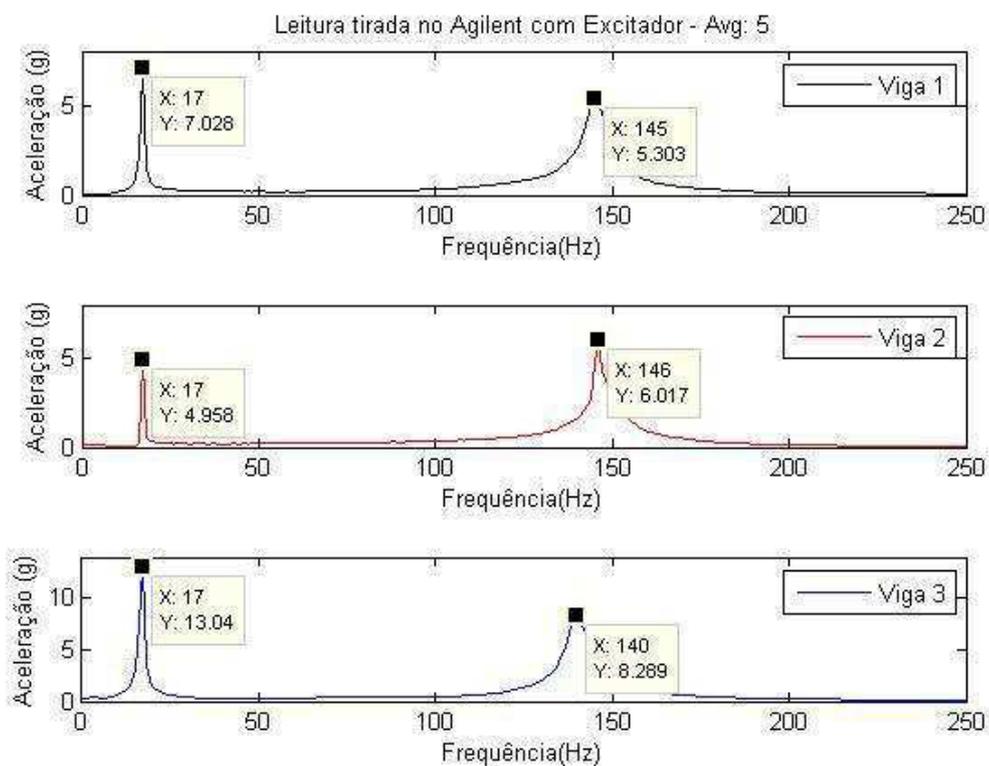
Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 45 - Espectro das frequências naturais das amostras sem excitador (Avg:5)**



Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 46 - Espectro das frequências naturais das amostras com excitador (Avg:5)**



Fonte: (Autoria Própria)

Podemos observar que, de modo geral, ambas as frequências de tratamento obtidas nas pressões de trabalho (2 e 4 bar) estão situadas entre as duas primeiras frequências naturais das vigas na condição com o excitador na extremidade da junta. Com esses resultados pode-se esperar que a frequência na pressão de 4 bar possa vir a provocar um maior alívio de tensões residuais no tratamento tendo em vista se encontrar mais próxima da segunda frequência de excitação, e como consequência, vir a causar maior deformação durante o tratamento.

#### 4.4. Tensões residuais pré-tratamento

As tensões residuais na fase de medições pré-tratamento, foram mensuradas em duas etapas: uma antes de serem soldadas as juntas e outra depois de concluída a soldagem. As tensões residuais superficiais foram analisadas no material na condição como recebido, obtendo-se um valor médio de 139,00 MPa.

Realizados todos os cordões de solda nas juntas, as mesmas foram levadas para que fossem mensuradas as tensões remanescentes devido ao ciclo térmico provocado pela soldagem. Os resultados para as tensões transversais e longitudinais ao cordão em duas linhas distantes entre si por 10 mm, conforme ilustrado na figura 27, são resumidos nas tabelas 10 e 11.

**Tabela 10 - Tensões residuais transversais obtidas das juntas soldadas (sem tratamento)**

Junta	Transversal 1 (MPa)	Var	CV	Transversal 2 (MPa)	Var	CV
Junta 1	374,86	60,12	0,16	238,71	59,41	0,25
Junta 2	306,43	69,34	0,23	273,86	48,78	0,18
Junta 3	259,71	60,64	0,23	224,71	51,47	0,23
Junta 4	360,57	46,55	0,13	310,00	49,64	0,16
Junta 5	279,57	35,22	0,13	297,00	28,08	0,09
Junta 6	372,00	51,30	0,14	314,86	63,74	0,20
Junta 7	335,29	77,31	0,23	307,86	45,19	0,15
Junta 8	316,57	65,29	0,21	306,14	57,42	0,19
Junta 9	296,71	41,44	0,14	292,00	43,62	0,15
Junta 10	410,71	53,59	0,13	288,71	48,56	0,17
Junta 11	323,43	48,85	0,15	249,71	30,01	0,12
Junta 12	391,14	49,40	0,13	304,43	53,42	0,18
<b>Média</b>	<b>335,58</b>	<b>54,92</b>	<b>0,17</b>	<b>284,00</b>	<b>48,28</b>	<b>0,17</b>

Fonte: (Autoria Própria)

Tabela 11 - Tensões residuais longitudinais obtidas das juntas soldadas (sem tratamento)

Junta	Longitudinal 1 (MPa)	Var	CV	Longitudinal 2 (MPa)	Var	CV
Junta 1	313,29	58,86	0,19	285,43	40,00	0,14
Junta 2	377,71	74,37	0,20	358,71	74,22	0,21
Junta 3	351,86	60,45	0,17	349,29	56,50	0,16
Junta 4	374,00	29,58	0,08	339,29	24,29	0,07
Junta 5	357,14	42,10	0,12	334,86	43,20	0,13
Junta 6	321,29	50,78	0,16	334,43	68,90	0,21
Junta 7	352,29	59,67	0,17	328,71	39,52	0,12
Junta 8	337,57	35,40	0,10	316,71	39,18	0,12
Junta 9	332,86	43,13	0,13	330,71	50,14	0,15
Junta 10	340,14	47,34	0,14	343,00	63,09	0,18
Junta 11	324,29	41,40	0,13	341,57	37,24	0,11
Junta 12	340,00	69,41	0,20	363,86	74,16	0,20
<b>Média</b>	<b>343,54</b>	<b>51,04</b>	<b>0,15</b>	<b>335,55</b>	<b>50,87</b>	<b>0,15</b>

Fonte: (Autoria Própria)

Podemos observar dos resultados obtidos que as tensões médias nas linhas de medição transversais e longitudinais se mostraram trativas. As tensões transversais apresentam uma média de 335,58 MPa para a linha 1 e de 284,0 MPa para linha 2 . Para as tensões longitudinais obteve-se 343,54 MPa para a primeira linha e de 335,55 MPa para a segunda linha. Constatamos de forma geral que pelos resultados obtidos, após a soldagem houve aumento relativo nas tensões residuais transversais e longitudinais em relação às amostras como recebida. Podemos também, observar nas tabelas os valores referentes à variância (Var), que se trata de uma medida da sua dispersão estatística, indicando quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado.

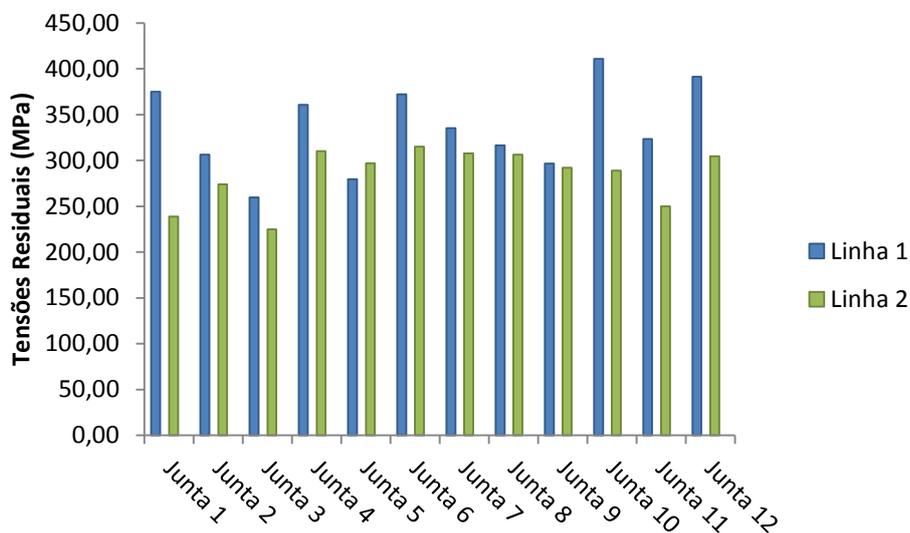
Outros valores que também foram calculados e que se encontra nas tabelas 10 e 11 foi o coeficiente de variação (CV). O coeficiente de variação é uma medida de dispersão empregada para estimar a precisão de experimentos e representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média. (MOHALLEM, 2008). O CV é interpretado como a variabilidade dos dados em relação à média. Quanto menor o CV mais homogêneo é o conjunto de dados. Um CV é considerado baixo (indicando um conjunto de dados razoavelmente homogêneo) quando for menor ou igual a 25%. Entretanto, esse padrão varia de acordo com a aplicação (SILVIA, 2013).

Para todos os 48 CVs calculados para as 12 juntas soldadas os CVs estão com seus valores abaixo de 0,25 indicando que as tensões residuais médias aferidas são confiáveis, conforme Pontes (2012) e Silvia (2013).

As figuras 47 e 48 mostram gráficos comparativos entre as medias das tensões transversais e longitudinais obtidos nas duas linhas de medições. Observamos que as tensões transversais obtidas pela linha dois são sempre menores do que as da linha 1, ocorrendo a única divergência para a junta 5 onde as tensões da linha 2 foram um pouco maior do que a linha 1. Acreditamos que essa diferença deve-se ao fato da linha 2 estar mais próxima da borda da viga o que caracteriza uma redução no volume de material próximo ao ponto de medida, levando a região ter uma dilatação térmica maior do que os pontos que se encontram na região de medição da linha 1.

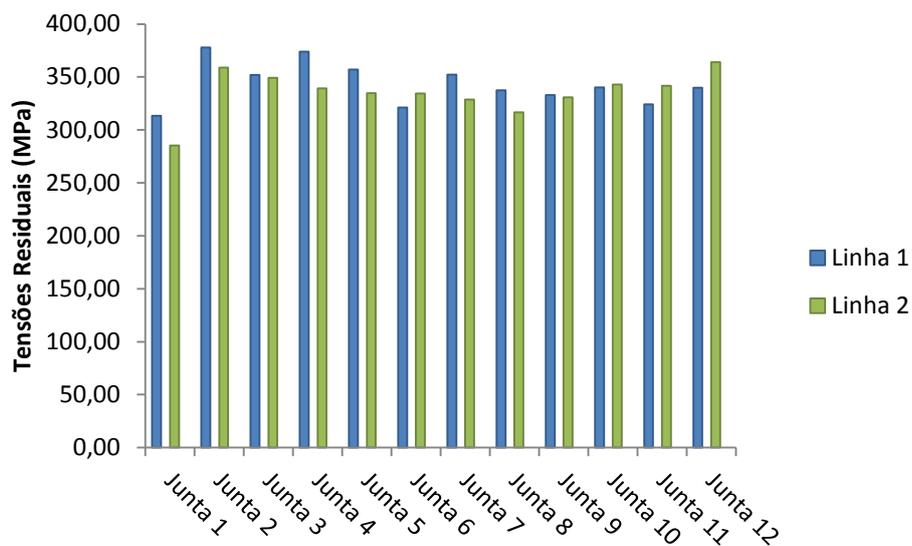
Para as tensões longitudinais observamos um queda nos resultados obtidos na linha 2 em relação as da linha de medição 1. A redução acreditamos que se deve ao fato da linha de medição 2 estar mais afastada da zona mais afetada pelas altas temperaturas.

**Figura 47 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais transversais (sem tratamento)**



Fonte: (Autoria Própria)

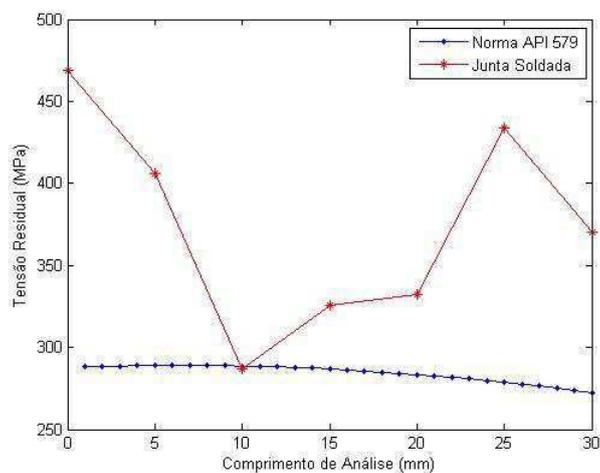
**Figura 48 – Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais longitudinais (sem tratamento)**



**Fonte: (Autoria Própria)**

Realizado o estudo sobre as tensões residuais, tanto na direção transversal como longitudinal ao cordão de solda, a próxima etapa foi comparar esse resultados com as tensões geradas pela norma API 579 com a ajuda da interface gráfica. Os gráficos comparativos entre a curvas geradas pelas tensões residuais das amostras e da norma mostram que as amostras estão com seus níveis de tensões residuais transversais e longitudinais em sua grande maioria sempre superiores aos limites estabelecidos pela norma. A figura 49 mostra uma dessas curvas, representativa das tensões residuais transversais geradas na amostra 1 (linha 1) em relação à curva gerada pela norma. Mais detalhes sobre os demais gráficos comparativos encontra-se no Apêndice A.

**Figura 49 - Gráfico comparativo das curvas de tensões residuais transversais da amostra versus tensões da norma API 579.**

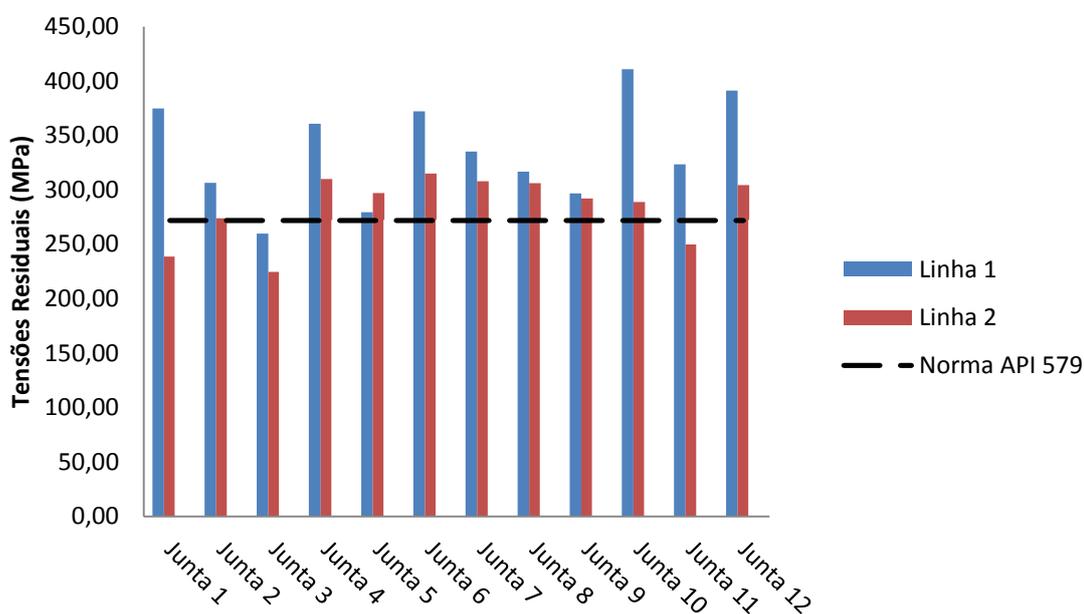


**Fonte: (Autoria Própria)**

As figuras 50 e 51 mostram os resultados das tensões médias das juntas em comparação com as geradas pela norma, obtidas das juntas soldadas (sem tratamento). Podemos observar que as tensões transversais estão em sua grande maioria acima da tensão de 288,85 MPa estipulada pela norma, tanto pela linha 1 como para a linha 2. Os aumentos de tensões atingiu máximos de até 51,08% para a linha 1 e de 15,82% para a linha 2.

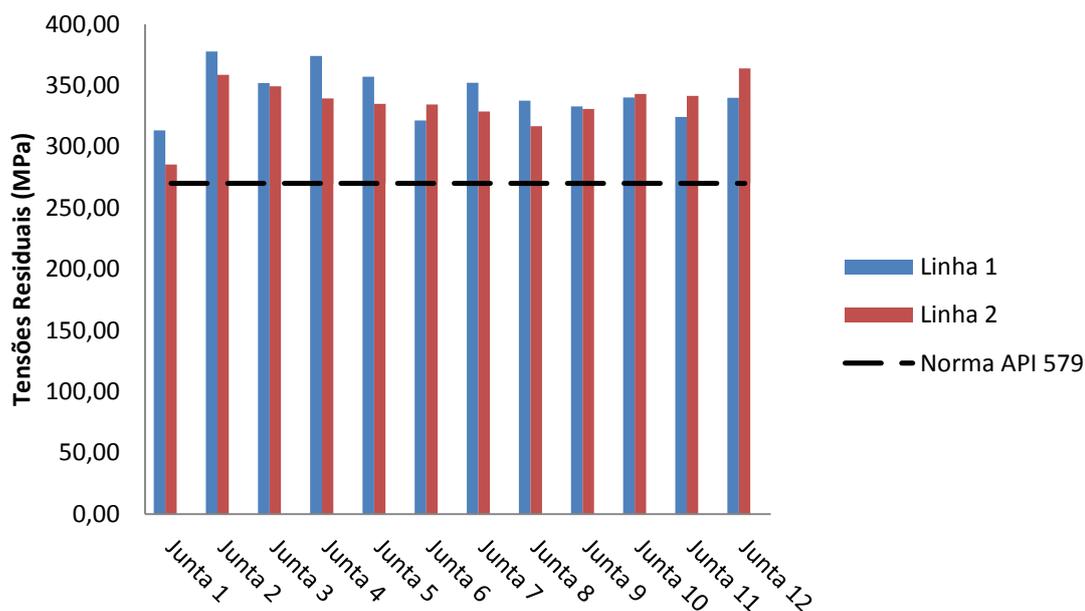
Para as tensões longitudinais podemos notar que todas as tensões obtidas nas juntas, tanto nas linhas 1 como a 2 também ficaram acima das estipuladas de 284,13MPa pela norma. As tensões longitudinais se mostraram um aumento máximo de tensões de 39,83% para a linha 1 e de 34,7% para a linha 2. Essa constatação obtida nos resultados nos mostra que as juntas nas condições de tensões residuais depois de soldadas necessitam de um tratamento de alívio de tensões para que as mesmas possam estar dentro dos limites de tensões estabelecidos pela norma.

**Figura 50 - Comparativo entre as tensões residuais transversais com as geradas pela norma API 579 (sem tratamento)**



Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 51 - Comparativo entre as tensões residuais longitudinais com as geradas pela norma API 579 (sem tratamento)**



Fonte: (Autoria Própria)

#### 4.5. Tensões residuais pós-tratamento

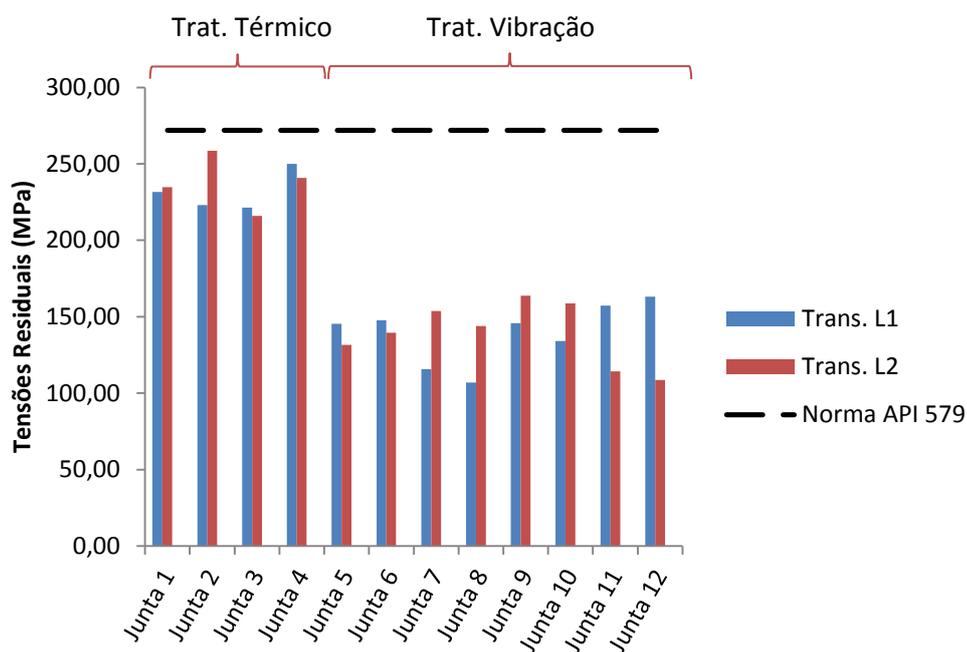
Finalizadas as fases de tratamentos térmicos (Juntas de 1 a 4) e por vibrações (Juntas de 5 a 11) para alívios de tensões residuais, todas as juntas foram levadas para serem mensuradas as tensões remanescentes pós-tratamentos. As tabelas 12 e 13 e as figuras 52 e 53 mostram todos os resultados das médias obtidas nas linhas 1 e 2 de todas as juntas em ambas as direções transversal e longitudinal.

**Tabela 12 - Tensões residuais transversais obtidas das juntas soldadas (pós-tratamentos)**

Junta	Transversal 1 (Mpa)	Var	CV	Transversal 2 (Mpa)	Var	CV
Junta 1	231,57	19,20	0,08	234,71	18,64	0,08
Junta 2	223,00	35,29	0,16	258,57	31,07	0,12
Junta 3	221,43	51,70	0,23	215,86	48,16	0,22
Junta 4	250,00	28,29	0,11	240,71	31,09	0,13
<b>Média</b>	<b>231,50</b>	<b>33,62</b>	<b>0,15</b>	<b>237,46</b>	<b>32,24</b>	<b>0,14</b>
Junta 5	145,29	31,99	0,22	131,54	28,11	0,19
Junta 6	147,67	26,36	0,10	139,56	31,95	0,20
Junta 7	115,70	26,03	0,15	153,64	23,99	0,14
Junta 8	107,00	21,65	0,15	143,92	21,18	0,14
Junta 9	145,71	25,70	0,18	163,71	28,40	0,17
Junta 10	134,00	14,47	0,08	158,70	17,35	0,11
Junta 11	157,35	32,38	0,20	114,20	23,32	0,17
Junta 12	163,15	41,11	0,22	108,56	37,80	0,24
<b>Média</b>	<b>139,48</b>	<b>27,46</b>	<b>0,16</b>	<b>139,23</b>	<b>26,51</b>	<b>0,17</b>

Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 52 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais transversais (pós-tratamentos)**



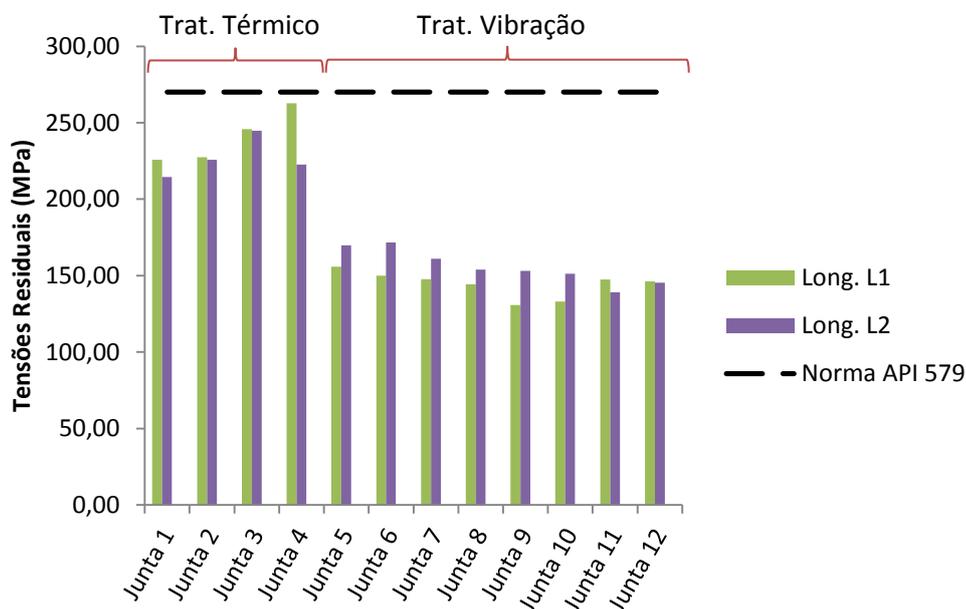
Fonte: (Autoria Própria)

**Tabela 13 - Tensões residuais longitudinais obtidas das juntas soldadas (pós-tratamentos)**

Junta	Longitudinal 1(Mpa)	Var	CV	Longitudinal 2(Mpa)	Var	CV
Junta 1	225,86	25,48	0,11	214,43	30,36	0,14
Junta 2	227,43	26,97	0,12	225,86	45,65	0,20
Junta 3	245,86	26,95	0,11	244,86	54,54	0,22
Junta 4	262,71	44,96	0,17	222,57	40,67	0,18
<b>Média</b>	<b>240,46</b>	<b>31,09</b>	<b>0,13</b>	<b>226,93</b>	<b>42,80</b>	<b>0,19</b>
Junta 5	150,00	31,43	0,20	169,86	29,42	0,17
Junta 6	144,57	27,24	0,19	171,71	14,34	0,08
Junta 7	147,57	29,89	0,20	161,00	13,79	0,08
Junta 8	144,43	28,86	0,20	154,00	32,65	0,21
Junta 9	130,86	23,13	0,18	153,00	18,01	0,12
Junta 10	133,00	26,73	0,20	151,29	26,62	0,17
Junta 11	147,45	29,75	0,22	139,14	15,57	0,11
Junta 12	146,29	24,13	0,16	145,29	32,90	0,21
<b>Média</b>	<b>143,02</b>	<b>27,64</b>	<b>0,19</b>	<b>155,66</b>	<b>22,91</b>	<b>0,14</b>

Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 53 - Comparativo entre as duas linhas de medição das tensões residuais longitudinais (pós-tratamentos)**



Fonte: (Autoria Própria)

Podemos observar que para ambas as direções obtivemos reduções significativas nas tensões residuais deixando as mesmas com magnitudes sempre abaixo de 300,00 MPa. Todas as tensões residuais obtidas depois do tratamento por vibração se mostraram com magnitudes bem inferiores às obtidas pelo tratamento térmico. Outros parâmetros que também foram calculados e que se encontram nas tabelas 12 e 13 foram os coeficientes de variação (CV). Todos os CVs estão com seus valores menores do que 0,25 indicando que as tensões residuais médias aferidas são confiáveis.

As tabelas 14 e 15 e as figuras 54 e 55 mostram os níveis de reduções provocadas por cada tratamento nas duas direções de análise em caráter percentual, onde os símbolos AT e DT representam, Antes do Tratamento e Depois do Tratamento, respectivamente.

**Tabela 14- Níveis de redução percentual das tensões residuais transversais provocadas pelos dois tratamentos**

Juntas	Tensões Transversais ao Cordão (MPa)					
	Linha 1			Linha 2		
	AT	DT	Porc. Red.	AT	DT	Porc. Red.
Junta 1	374,86	231,57	38,22%	238,71	234,71	1,68%
Junta 2	306,43	223,00	27,23%	273,86	258,57	5,58%
Junta 3	259,71	221,43	14,74%	224,71	215,86	3,94%
Junta 4	360,57	250,00	30,67%	310,00	240,71	22,35%
<b>Média T. T</b>	<b>325,39</b>	<b>231,50</b>	<b>27,71%</b>	<b>261,82</b>	<b>237,46</b>	<b>8,39%</b>
Junta 5	279,57	145,29	48,03%	297,00	131,54	55,71%
Junta 6	372,00	147,67	60,30%	314,86	139,56	55,68%
Junta 7	335,29	115,70	65,49%	307,86	153,64	50,09%
Junta 8	316,57	107,00	66,20%	306,14	143,92	52,99%
Junta 9	296,71	145,71	50,89%	292,00	163,71	43,93%
Junta 10	410,71	134,00	67,37%	288,71	158,70	45,03%
Junta 11	323,43	157,35	51,35%	249,71	114,20	54,27%
Junta 12	391,14	163,15	58,29%	304,43	108,56	64,34%
<b>Média T. V.</b>	<b>334,80</b>	<b>174,87</b>	<b>58,49%</b>	<b>282,29</b>	<b>177,01</b>	<b>52,76%</b>

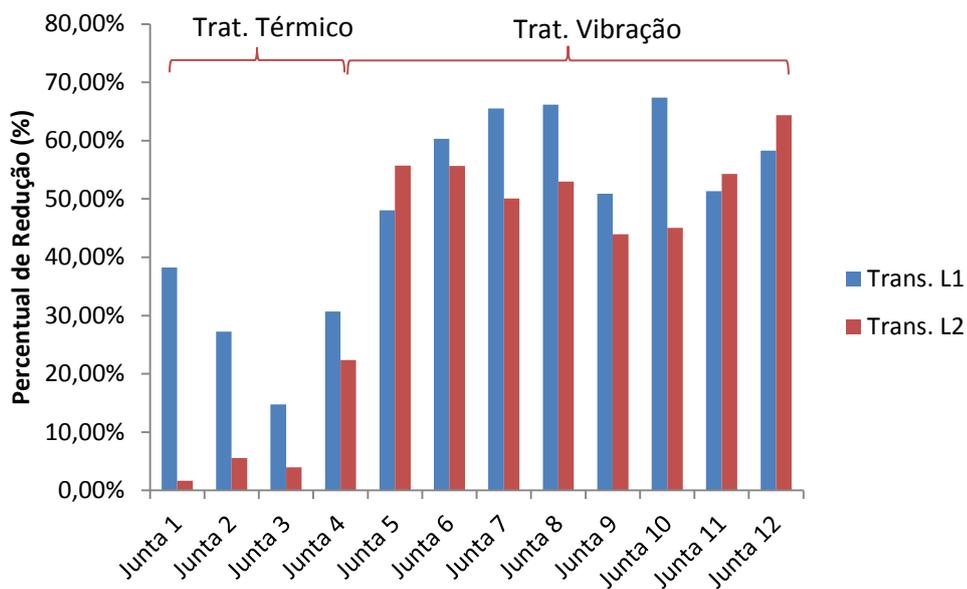
Fonte: (Autoria Própria)

**Tabela 15 - Níveis de redução percentual das tensões residuais longitudinais provocadas pelos dois tratamentos**

Juntas	Tensões Longitudinal ao Cordão (MPa)					
	Linha 1			Linha 2		
	AT	DT	Porc. Red.	AT	DT	Porc. Red.
Junta 1	313,29	225,86	27,91%	285,43	214,43	24,87%
Junta 2	377,71	227,43	39,79%	358,71	225,86	37,04%
Junta 3	351,86	245,86	30,13%	349,29	244,86	29,90%
Junta 4	374,00	262,71	29,76%	339,29	222,57	34,40%
<b>Média T. T</b>	<b>354,21</b>	<b>240,46</b>	<b>31,89%</b>	<b>333,18</b>	<b>226,93</b>	<b>31,55%</b>
Junta 5	357,14	155,86	56,36%	334,86	169,86	49,27%
Junta 6	321,29	150,00	53,31%	334,43	171,71	48,65%
Junta 7	352,29	147,57	58,11%	328,71	161,00	51,02%
Junta 8	337,57	144,43	57,22%	316,71	154,00	51,38%
Junta 9	332,86	130,86	60,69%	330,71	153,00	53,74%
Junta 10	340,14	133,00	60,90%	343,00	151,29	55,89%
Junta 11	324,29	147,45	54,53%	341,57	139,14	59,26%
Junta 12	340,00	146,29	56,97%	363,86	145,29	60,07%
<b>Média T. V.</b>	<b>344,36</b>	<b>181,37</b>	<b>57,26%</b>	<b>335,37</b>	<b>183,07</b>	<b>53,66%</b>

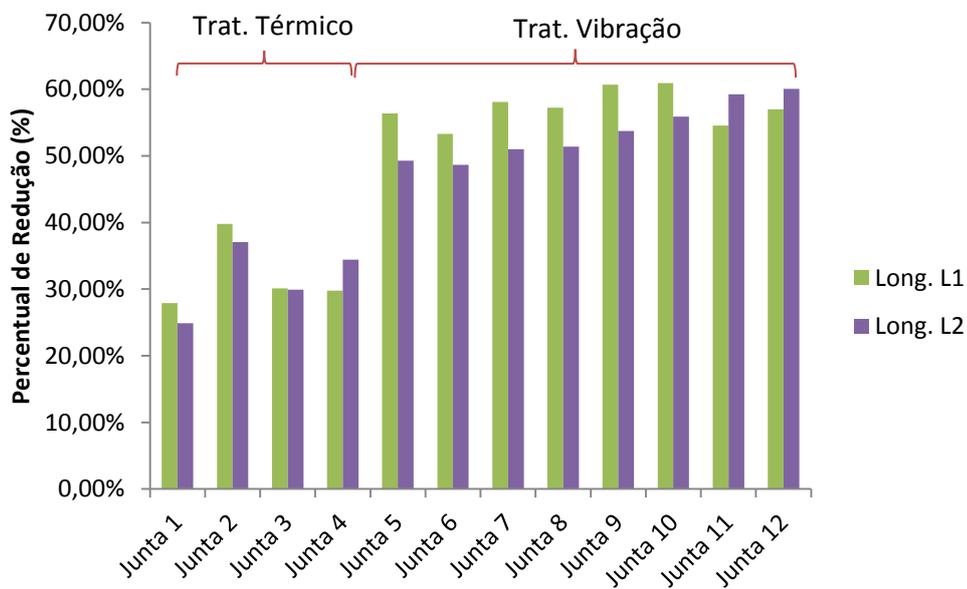
Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 54 - Comparativo entre as porcentagens de reduções das tensões residuais transversais nas duas linhas de medição**



Fonte: (Autoria Própria)

**Figura 55 - Comparativo entre as porcentagens de reduções das tensões residuais longitudinais nas duas linhas de medição**



Fonte: (Autoria Própria)

Analisando as tabelas e gráficos acima, notamos que o fator tempo de tratamento por vibrações (20 ou 40 min), não foi determinante, pois, sua mudança para valores maiores dentre os tratamentos não proporcionou muitas mudanças no nível de tensões residuais pós-tratamento, permanecendo o nível de redução de caráter similar aos tratamentos em tempos menores. Pudemos comprovar ainda que o tratamento por vibrações se mostrou muito mais efetivo do que o tratamento térmico no fator redução principalmente na direção transversal ao cordão de solda onde ele obteve maiores taxas de redução.

O próximo passo foi comparar as tensões residuais pós-tratamento com as tensões geradas pela norma API. As figuras 52 e 53 mostra um comparativo entres as tensões obtidas nas amostras depois dos tratamentos com as geradas pela norma API 579.

As figuras nos permitem observar de forma clara que todos os tratamentos fizeram com que os níveis de tensões residuais transversais e longitudinais das amostras ficassem abaixo dos limites estipulados pela norma de 288,85 MPa para a condição transversal ao cordão e 284,13 MPa para a condição longitudinal. Porém, o tratamento por vibrações mecânicas nessa situação se mostrou bem superior ao tratamento térmico obtendo níveis de reduções significativas

Devido ao caráter heterogêneo do conjunto de valores das tensões residuais depois de ambos os tratamentos, quando comparados com os da norma API foi necessária a avaliação dos resultados também em valores percentuais (Tabela 16 e figura 56), a fim de auxiliar nas análises quanto à eficiência dos tratamentos. Para esses cálculos foi criado um fator  $R_{API}$  para definir o percentual de redução com relação a norma, dado por:

$$R_{API} = \frac{TR_{API} - TR_{Pós}}{TR_{API}} \% \quad (23)$$

Onde:

$TR_{API}$  = Tensões residuais geradas pela norma

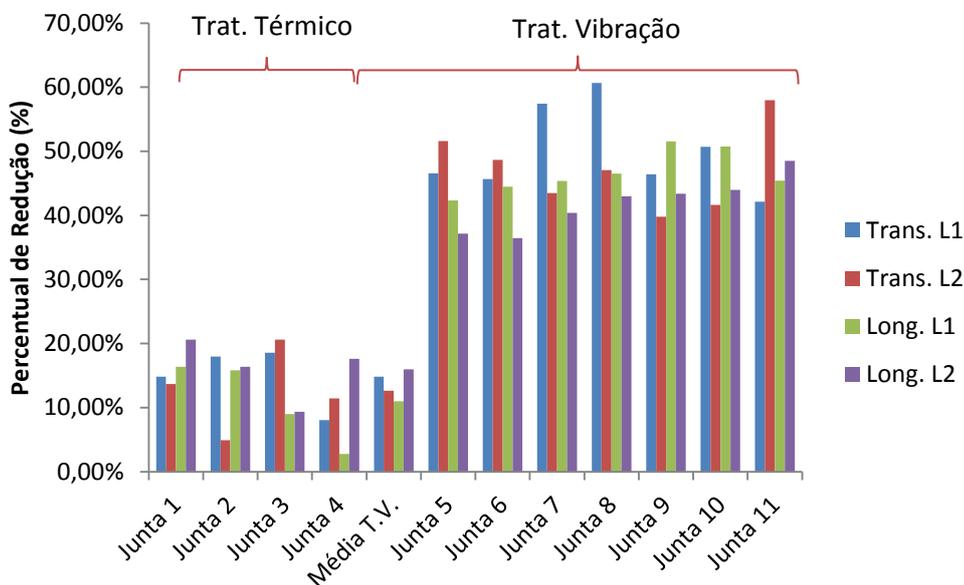
$TR_{Pós}$  = Tensões residuais retiradas das amostras depois dos tratamentos.

Tabela 16 - Percentuais de redução das tensões residuais pós-tratamentos em relação à norma API 579

Juntas	Transversais		Longitudinais	
	L1	L2	L1	L2
Junta 1	14,82%	13,66%	16,39%	20,62%
Junta 2	17,97%	4,88%	15,81%	16,39%
Junta 3	18,55%	20,60%	8,99%	9,36%
Junta 4	8,04%	11,45%	2,75%	17,61%
<b>Média T.V.</b>	<b>14,84%</b>	<b>12,65%</b>	<b>10,98%</b>	<b>15,99%</b>
Junta 5	46,56%	51,61%	42,30%	37,12%
Junta 6	45,68%	48,66%	44,47%	36,43%
Junta 7	57,44%	43,48%	45,37%	40,40%
Junta 8	60,64%	47,06%	46,53%	42,99%
Junta 9	46,40%	39,78%	51,56%	43,36%
Junta 10	50,71%	41,62%	50,76%	43,99%
Junta 11	42,12%	57,99%	45,42%	48,49%
Junta 12	39,99%	60,07%	45,85%	46,21%
<b>Média T.V.</b>	<b>48,69%</b>	<b>48,78%</b>	<b>46,53%</b>	<b>42,38%</b>

Fonte: (Autoria Própria)

Figura 56 - Comparativo entre os percentuais de redução das tensões pós-tratamentos em relação à norma API 579



Fonte: (Autoria Própria)

Podemos visualizar tanto na tabela 16 como no gráfico 56 que o tratamento por vibrações se manteve sempre com percentuais de reduções maiores do que o térmico com faixa de redução sempre entre 40 e 60 % enquanto o térmico variou entre 10 e 20%. Isso

demonstra que o tratamento por vibrações se mostrou mais eficaz quanto a manter as tensões dentro dos limites estipulados pela norma. A interface gráfica também gerou gráficos de comparação entre as curvas de medições pós-tratamento versus os limites da norma API, mostrando que quase todos os pontos de análise pós-tratamentos se mantiveram dentro dos limites da norma. Mais detalhes sobre as curvas são encontradas no Apêndice B.

#### 4.6. Planejamento Experimental

De posse dos valores de tensões residuais mostradas nas tabelas 13 e 14 foi feita uma análise de variância (ANOVA) com base na metodologia do planejamento experimental fatorial para descobrirmos se o experimento encontra-se bem ajustado. Uma análise de variância visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Os resultados da ANOVA são geralmente mostrados numa quadro ou tabela. (GALDAMEZ, 2002) A tabela 17 mostra uma tabela para calculo da ANOVA de um experimento para  $2^k$ .

Tabela 17 - Tabela para calculo da ANOVA de um planejamento fatorial 2k

<b>ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA</b>				
FONTE DE VARIÂÇÃO	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	Teste F
<b>Regressão</b>	$S.Q_R$	$(p-1)$	$S.Q_R/(p-1)$	$Q.M_R/ Q.M_{Res}$
<b>Resíduos</b>	$S.Q_{Res.}$	$(n-p)$	$S.Q_{Res.}/(n-p)$	1
<b>Falta de Ajuste</b>	$S.Q_{F.A}$	$(m-p)$	$S.Q_{F.A}/(m-p)$	$Q.M_{F.A}/ Q.M_{Res}$
<b>Erro Puro</b>	$S.Q_{E.P}$	$(n-m)$	$S.Q_{E.P}/(n-m)$	$Q.M_{E.P}/ Q.M_{Res}$
<b>Total</b>	$S.Q_{Total}$	$(n-1)$	-	-
<b>R<sup>2</sup> (Coeficiente de Correlação ou % Porcentagem de Variação explicada)</b>	$R^2 = \left( \frac{S.Q_{TOTAL} - S.Q_{Res.}}{S.Q_{TOTAL}} \right) \times 100$		-	-

$p = N^\circ$  de Coeficientes do Modelo;  
 $n = N^\circ$  de Experimentos;  
 $m = N^\circ$  de Experimentos únicos;  
 $r = N^\circ$  de repetições.

$$S.Q_R = \sum S.Q_{EFEITOS} \quad S.Q_{Res.} = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

$$\sum S.Q_{EFEITOS} = S.Q_{TOTAL} - S.Q_{Res.} \quad S.Q_{Res.} = S.Q_{F.A} + S.Q_{E.P}$$

$$S.Q_{EFEITOS} = \frac{(\text{Valor do Contraste com Totais})^2}{S.Q_{Coeficientes} \cdot r} \quad S.Q_{TOTAL} = S.Q_R + S.Q_{Res.}$$

Fonte: (Adaptado de RODRIGUES & LEMMA, 2009)

Analisando a tabela 16 podemos ver que existe quatro colunas de resultados que são: soma dos quadrados, graus de liberdade, quadrado da média e teste F. A soma de quadrados corresponde à soma de quadrados dos desvios de todas as observações em relação à média. Os graus de liberdade é a propriedade pela qual qualquer uma das (n-1) observações de uma amostra completamente determina a outra observação. (GALDAMEZ, 2002) O quadrado da média corresponde a divisão entre a soma dos quadrados da fonte de variação pelo grau de liberdade da mesma fonte.

A última coluna corresponde à coluna onde será realizado o teste F. O teste F é utilizado para comparar variâncias. Ele é em geral, o quociente entre os quadrados médios de tratamentos e resíduos. Esse quociente tem uma distribuição F com  $n_1$ =graus de liberdade do tratamento e  $n_2$ =graus de liberdade do resíduo. Após calculado o valor de F, compara-se com o valor de F tabelado para algum nível de significância com o objetivo de analisar o ajuste do experimento. Para um modelo experimental bem ajustado o F calculado deve estar muito acima do F tabela, algo em torno de 4 vezes.

Com base nas formulas da tabela 16 foi realizado o calculo do ANOVA para a as tensões transversais e longitudinais em ambas as linhas de medição As tabelas 18, 19,20 e 21 mostram os resultados obtidos para a ANOVA das tensões.

**Tabela 18 - ANOVA para as tensões residuais transversais (linha 1)**

ANOVA				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado da Media (QM)	Teste F
<u>Regressão</u>	2543,660738	3	847,8869125	26,90439
<u>Resíduos</u>	126,05925	4	31,5148125	1
<u>Falta de Ajuste</u>	110,3018438	0	-	-
<u>Erro Puro</u>	15,75740625	4	3,939351563	0,125
<u>Total</u>	2669,719988	7	-	-
$R^2$	F Tabelado	F Calculado	Modelo Bem Ajustado	
95,28%	6,59	26,90439337		

Fonte: (Autoria Própria)

Tabela 19 - ANOVA para as tensões residuais transversais (linha 2)

ANOVA				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado da Média (QM)	Teste F
<u>Regressão</u>	2726,536038	3	908,8453458	33,70643
<u>Resíduos</u>	107,85425	4	26,9635625	1
<u>Falta de Ajuste</u>	94,37246875	0	-	-
<u>Erro Puro</u>	13,48178125	4	3,370445313	0,125
<u>Total</u>	2834,390288	7	-	-
R <sup>2</sup>	F Tabelado	F Calculado	Modelo Bem Ajustado	
96,19%	6,59	33,70642681		

Fonte: (Autoria Própria)

Tabela 20 - ANOVA para as tensões residuais longitudinais (linha 1)

ANOVA				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado da Média (QM)	Teste F
<u>Regressão</u>	473,83695	3	157,94565	25,20859
<u>Resíduos</u>	25,0622	4	6,26555	1
<u>Falta de Ajuste</u>	21,929425	0	-	-
<u>Erro Puro</u>	3,132775	4	0,78319375	0,125
<u>Total</u>	498,89915	7	-	-
R <sup>2</sup>	F Tabelado	F Calculado	Modelo Bem Ajustado	
94,98%	6,59	25,20858504		

Fonte: (Autoria Própria)

Tabela 21 - ANOVA para as tensões residuais longitudinais (linha 2)

ANOVA				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado da Média (QM)	Teste F
<u>Regressão</u>	850,5489375	3	283,5163125	24,34424
<u>Resíduos</u>	46,58455	4	11,6461375	1
<u>Falta de Ajuste</u>	40,76148125	0	-	-
<u>Erro Puro</u>	5,82306875	4	1,455767188	0,125
<u>Total</u>	897,1334875	7	-	-
R <sup>2</sup>	F Tabelado	F Calculado	Modelo Bem Ajustado	
94,81%	6,59	24,34423537		

Fonte: (Autoria Própria)

Analisando essas tabelas, nota-se que o F tabelado para um nível de significância de 95% (tabela em Anexo) para ambos os testes foi de 6,59. Portanto, podemos avaliar que para todas as análises de variância o F calculado foi superior em no mínimo 4 vezes o F tabelado, portanto o experimento esta bem ajustado com 95% de confiabilidade.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1. Conclusões

O presente trabalho, que teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento de alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas (VSR) em juntas soldadas de aço ASTM A516 Gr.60, permite as seguintes conclusões:

1. As juntas soldadas pelo processo MIG apresentaram boa qualidade, com distorções desprezíveis e ótima penetração. Conforme esperado, as tensões residuais superficiais geradas no processo são tratativas, da ordem do limite de escoamento do material para as amostras (variando entre 200 e 400 MPa).
2. As tensões de elevadas magnitudes em tração encontradas após a soldagem das amostras pode ser consequência do elevado aporte térmico empregado no processo (9,1 kJ/cm) e devido a influência na distribuição de temperatura provocada entre os dois passes.
3. As amostras apresentaram microestruturas semelhantes e sem mudanças significativas após os tratamentos térmico e por vibração, tendo em vista que não foram variados os parâmetros de soldagem.
4. O efeito do tratamento por vibração mecânica no alívio das tensões residuais nas juntas soldadas do aço estudado foi expressivo em ambas as direções transversal e longitudinal do cordão de solda, obtendo-se em média uma porcentagem de redução da ordem de 58,49% para a direção transversal e de 57,26% para a longitudinal.
5. O tratamento por vibração mecânica mostrou-se mais eficaz quando comparado ao tratamento térmico, sempre tendo uma média percentual de redução maior do que a térmica em todas as linhas de medição, da ordem de 44,37% para as transversais e de 25,37% para as longitudinais.
6. O tratamento por vibração atendeu melhor a norma API 579 do que o tratamento térmico conseguindo percentuais de redução máxima de 48,78% para as tensões transversais e de 46,53% para as longitudinais quando comparadas com as tensões limites admissíveis pela norma.
7. Os resultados do planejamento experimental foram validados com confiabilidade de 95% tendo em vista que no teste F feito para todas as linhas de medição o  $F_{Calc}$  foi sempre 4 vezes superior ao  $F_{Tab}$ .

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

1. Realizar mais experimentos com tratamentos por vibração mecânica durante a soldagem de outros materiais e após a soldagem com o objetivo de verificar o nível e redução em ambos os casos.
2. Realizar tratamento por vibração durante e após a soldagem com o objetivo de estudar a sua influencia na susceptibilidade da junta soldada a fragilização por hidrogênio.
3. Verificar o efeito da excitação mecânica na transformação de fases que eventualmente ocorrem no processo de soldagem.
4. Verificar, para diferentes materiais, os valores de frequência de vibração mais significativos para redução das tensões residuais.
5. Verificar, para diferentes materiais e configurações, os valores de frequência de vibração, durante a soldagem, mais significativos para alteração microestrutural da solda.
6. Verificar o efeito desta técnica na prevenção de trincas de solidificação nos aços ARBL.

## 6. Referências Bibliográficas

ALBARRAN, J. L., MARTINEZ, L., LOPEZ, H. F., **Effect of heat treatment on the stress corrosion resistance of a microalloyed pipeline steel**. Corrosion Science, v. 41 (1999), pp. 1037-1049.

ALMEIDA, J. I. L., **Análise numérica da integridade estrutural de vasos de pressão com corrosão usando a norma api 579**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2012.

ANTUNES, A. E. B., **Tensões Residuais na Soldagem, Aspectos Básicos**, Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, v. VII, n. 4, PP. 394 – 403, 1995.

AOKI, S., NISHIMURA, T., HIROI, T., HIRAI, S. **“Reduction method for residual stress of welded joint using harmonic vibrational load”**, Nuclear Engineering and Design, vol.237, pp. 206-212, 2007.

AOKI, S., NISHIMURA, T., HIROI, T. **“Reduction method for residual stress of welded joint using random vibration”**, Nuclear Engineering and Design, vol. 235, pp. 1441-1445, 2005.

**API 510 Pressure Vessel Inspection Code: Maintenance Inspection, Rating, Repair & Alteration**, June 2006

**API 570 Piping inspection code: in-service inspection, rating, repair, and alteration of piping systems**, June 2006

**API 579 Fitness-For-Service**, Second Edition, 5 June 2007

**API 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction**, December 1999

BAILEY, N., COE, F. R., GOOCH, T. G., HART, R. H. M., JENKINS, N. & PARGETER, R.J., 1993, **Welding steels without hydrogen cracking**, Abington Publishing for TWI, Cambridge.

BEDNAR, H.H. **Pressure vessel design handbook**. 2ed. Malabar: Krieger, Publishing Company, 1986

BEREZHNITS'KA, M. P. , **Methods for determining residual welding stresses and their relief (A Review)**, Materials Science, Vol. 37, No. 6, 2001

BRAGA, E. D. M. **A Vibração como elemento de alívio de tensões residuais em cordões de solda**, I Workshop de Vibrações e Acústica da Região Norte, 2011.

CARDOZO, F. I. B., **Previsão da dureza em junta soldada de um aço ASTM A 516 Grau 60 sujeito à corrosão sob tensão com H<sub>2</sub>S**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

CHUVAS, T. C., **Estudo da Influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, 2012.

CICALA, E., DUFFET, G., ANDRZEJEWSK, H., GREVE, D., IGNAT, S., **Hot cracking in Al - Mg - Si alloy laser welding – operating parameters and their effects**, Materials Science and Engineering A 395 (2005) 1–9

COLOMBARI, R. R., **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda a projeção**. Itajubá 2004, Dissertação de mestrado em engenharia de produção, pela universidade Federal de Itajubá.

COSTA, A. D. S. B.; DE ABREU, H. F. G.; TEIXEIRA, L.; DE MIRANDA, H. C.; DE SOUZA COSTA, R. C.; SILVA, C. C. **Comparação dos níveis de tensões residuais para diferentes parâmetros utilizados no processo de soldagem TIG automático em aços de tubos ASTM A106 Gr. B.**, 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2007.

COSTA, A. D. S. B., COSTA, R. C. S., SILVA, C. C., **Análise de tensões residuais em tubulações soldadas**, Artigo 62º Congresso Anual da ABM, 2007.

DA CRUZ, C. A. O., SILVA, G. M. A., NR-13: **Análise do pré-requisito de 1º grau necessário para capacitação dos profissionais que participam dos treinamentos de segurança**, Universidade Federal da Bahia, Monografia, 2008.

FIGUEIREDO, N. C. et al. **Avaliação do desempenho da soldagem em liga de aço 9Cr-5Mo**. *Soldag. insp.*, vol.17, n.1, pp. 49-57. ISSN 0104-9224, 2012

GALDÀMEZ, E. V. C., **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2002.

GODOY, A. F., **Estudo da Suscetibilidade a trinca a frio em juntas soldadas de aço SAR – 80 BT**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1989.

GUIMARÃES, R. F., **Efeito do teor de molibdênio na microestrutura de juntas soldadas em ligas Fe-Cr-Mo**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, 2011.

IRMÃO, M. A. S., **Identificação de parâmetros modais aplicada à integridade de estruturas tipo vigas sujeitas a danos progressivos**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2012

INMAN, D. J., "Engineering Vibration". New Jersey: Prentice Hall, 2001.

JUNIOR, L. G., **Tratamento Térmico Em Juntas Soldadas**, Apostila, edição 1997.

Kobelco, Trinca a quente – Site: [http://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC\\_2002-01.html](http://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_2002-01.html), Visitado: 21/07/2013

Kobelco, Trinca a frio – Site: [http://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC\\_2002-01.html](http://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_2002-01.html), Visitado: 21/07/2013

KWOFIE, S., “**Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief**”, Materials Science and Engineering A, vol. **516**, pp. 154-161, 2009.

Machado, I. G., **Soldagem e Técnica Conexas: Processos**, livro, Editado pelo Autor, Porto Alegre, 2007

Manutenção & Suprimentos, Corrosão Sob Tensão no aço inoxidável – Site: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4171-corrosao-sob-tensao-no-aco-inoxidavel/> - Visitado em 15/07/2013.

MARTINS, C. A. P., MORILLA, J. C., MARQUES, P. V., DELIJAICOV, S., **Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes**, UNISANTA - Science and Technology, p. 69 - 75, Vol. 1, No 2, 2012

META-LAX- Site: <http://www.meta-lax.com/Home/Benefits/benefits.html> Visitado em: 25/07/2013

MATTHEWS, C., **Engineers' Guide to Pressure Equipment**, Edit. Professional Engineering Publishing, 2001

Modenesi, P. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**, DEMM – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

Munsi, A. S. M. Y, Waddell, A. J., Walker, C. A. , **The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: a comparison with thermal stress relief**, The British Society for Strain Measurement, 2001.

**National board:** accidents report. Disponível em: < [www.nationalboard.org](http://www.nationalboard.org) > . Acesso em: 10 abr.2013.

NGUYEN, T. N., WAHAB, M. A., **A theoretical study of the effect of weld geometry parameters on fatigue crack propagation life**. Engineering Fracture Mechanics, v. 51, n. 1, pp 1-18, 1995a.

NGUYEN, T. N., WAHAB, M. A., **The effect of residual stress and weld geometry on the fatigue life**. Journal of Materials Processing Technology, v. 48, pp 1995b.

NGUYEN, T. N., WAHAB, M. A., **The effect of undercut and residual stresses on fatigue behavior of misaligned butt joints**. Engineering Fracture Mechanics, v. 55, n. 3, pp 453-469, 1996.

NGUYEN, T. N., WAHAB, M. A., **The effect of weld geometry and residual stress on the fatigue of welded joints under combined loading**. Journal of Materials Processing Technology, v. 77, pp 201-208, 1998.

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C., Engenharia de Soldagem e aplicações, Livro, Editora LTC, Rio de Janeiro, 1982.

PARANHOS, R., DA SILVA, C. L. J., **Fissuração a quente**, Apostila Infosolda, 2003.

PAULI, E. A., Uliana, F. S., **Tratamentos Térmicos – Mecânica**, Apostila Senai, CPM - Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção, 1997.

PONTES, M. K. G., **Estudo da compatibilidade metalúrgica de juntas soldadas de metais dissimilares utilizados no setor de petróleo e gás**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2012

RIBEIRO, J. C. R. D. S., **Análise de tensões residuais e deformações em soldadura**. Dissertação (mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, 2010.

RODRIGUES, R. N., SILVA, A. A., MACIEL, T. M., Dos SANTOS, A. X. , LAURSEN, A. **Interface gráfica na plataforma Matlab para análise de tensões residuais segundo a norma API 579 em soldas feitas em vasos de pressão usados na indústria de petróleo e gás**, 12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 18 a 21 de junho 2013.

RODRIGUES, M. I. ; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. Campinas-SP. Editado pela AMIC, 2009.

RODRIGUES, T. V., **Tratamento térmico pós-soldagem para alívio de tensões residuais em chapas de aço soldadas: modelagem e análise experimental**, Dissertação de mestrado, Cefet – Rj, Rio de Janeiro, setembro de 2011

ROSADO, T. M. V. B., **Inovação do Processo MIG/MAG – Análise de produtividade e emissão de fumos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2008

ROSENTHAL, D., 1941, Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. **Welding Journal**, v. 20, n. 5, pp. 220-234.

ROSENTHAL, D., 1946, The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. **Transactions of the ASME**, pp. 849-866.

Silvia - Introdução à probabilidade e aplicação em testes diagnósticos – Site: <http://leg.ufpr.br/~shimakur/CE055/node26.html> - Visitado em: 31/07/2013

SILVA, C. C. **Avaliação das tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diâmetro usadas em refinaria de petróleo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2007.

SUN, M.C., SUN, Y.H., WANG, R. K. “**The vibratory stress relief of a marine shafting of 35# bar steel**”, *Materials Letters*, vol. **58**, pp. 299-303, 2004.

SUN, M.C., SUN, Y.H., WANG, R. K. “**Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel**”, Materials Letters, vol. **58**, pp. 1396-1399, 2004.

SKINNER, R. D. **An investigation Into the Theory Behind Sub-ressonant Stress Relieve: 1987** – Relatório “Lockheed Missiles and Aerospace Report”. USA. p.10

TANIGUCHI, H., **Contribuição ao projeto estrutural de cilindros em compósitos para armazenamento de oxigênio sob alta pressão**, Dissertação de Mestrado, USP, 2008

Tecweldshop – Site: <http://tecweldshop.com/ALVIO-DE-TENSOES/equipamento-para-alivio-de-tenses-formula-62.phtml>, visitado em : 12/07/2013

TELLES, P. C. D. S., **Vasos de Pressão**, Livro,Edit. LTC, 2ª Edição Atualizada, 2001.

TESKE, M., **Influência da composição do gás de proteção na soldagem do aço ASTM A516 pelo Processo GMAW**, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TURIBUS, S. N., **Análise de tensões residuais pela técnica de difração de raios X em processos de soldagem MIG**, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2011.

WAINER, E., BRANDI, S. D., DE MELLO, F. D. H., **Soldagem: Processos e Metalurgia**, Livro, Edit. Edgar Blucher Ltda., 4ª reimpressão, p. 1, 2004.

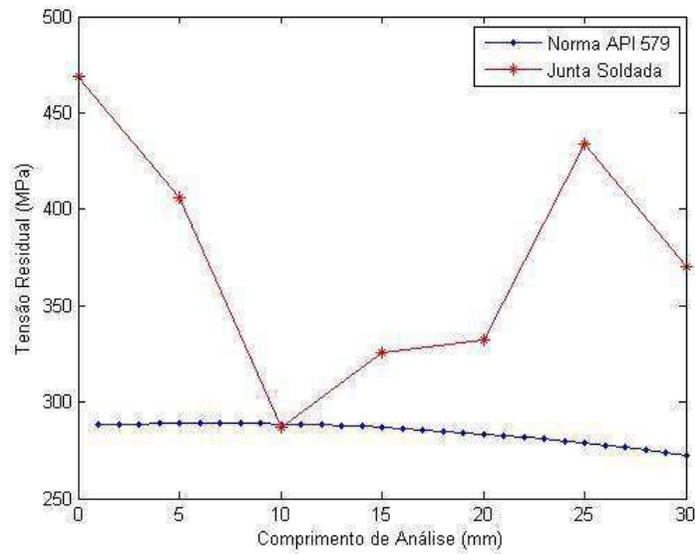
**WELDING HANDBOOK**, Vol. 1, 8th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1991, pp.2–32.

WITHERS, P. J., BHADESHIA, H. K. D. H., 2001a. Residual stress. Part 1 –Measurement techniques. **Materials Science and Technology**. v. 17, pp. 355-365.

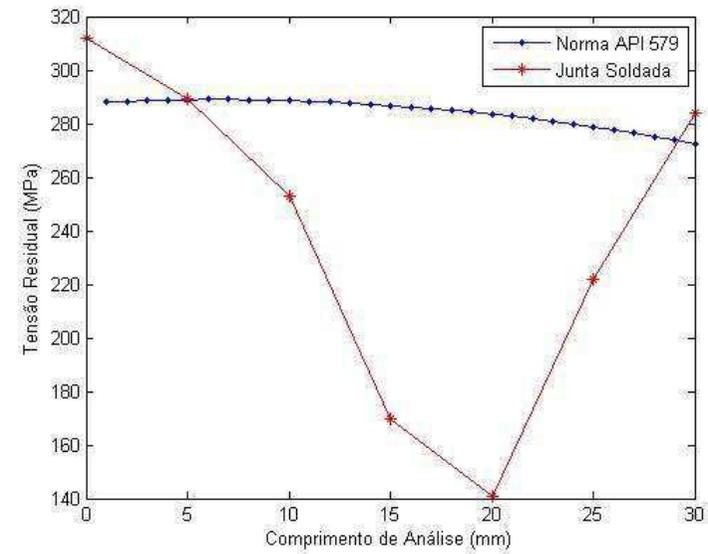
**APÊNDICE A – Gráficos comparativos de curvas de tensões residuais pré-tratamento versus tensões da norma API 579**

## Junta Soldada 1

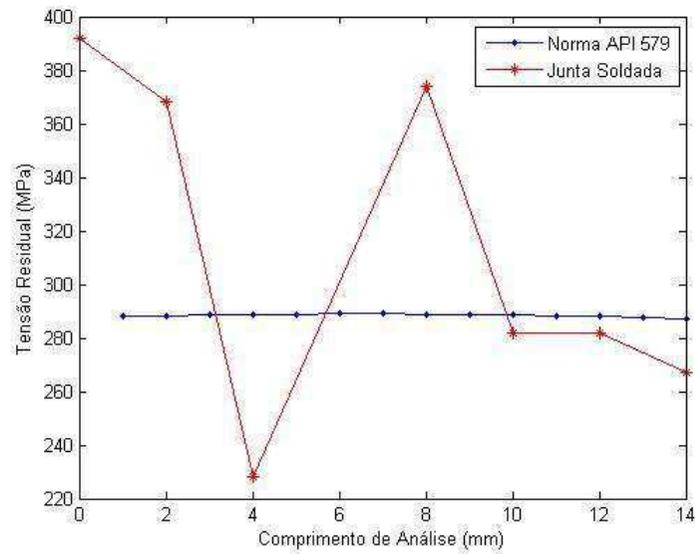
### Transversal Linha1



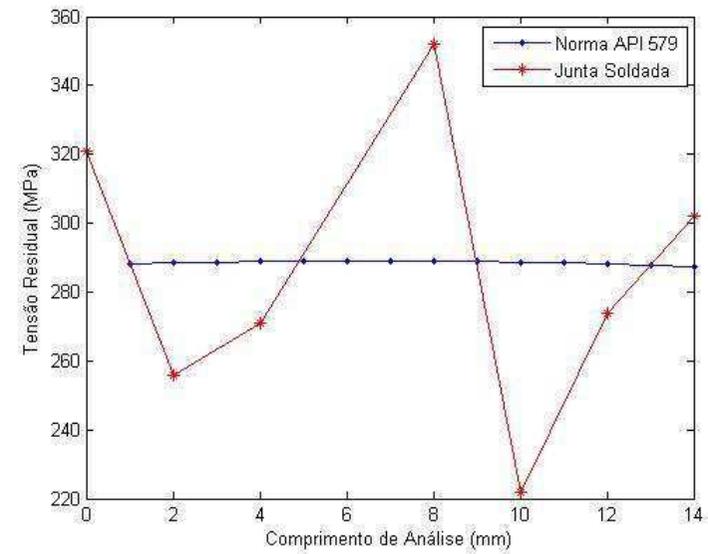
### Transversal Linha2



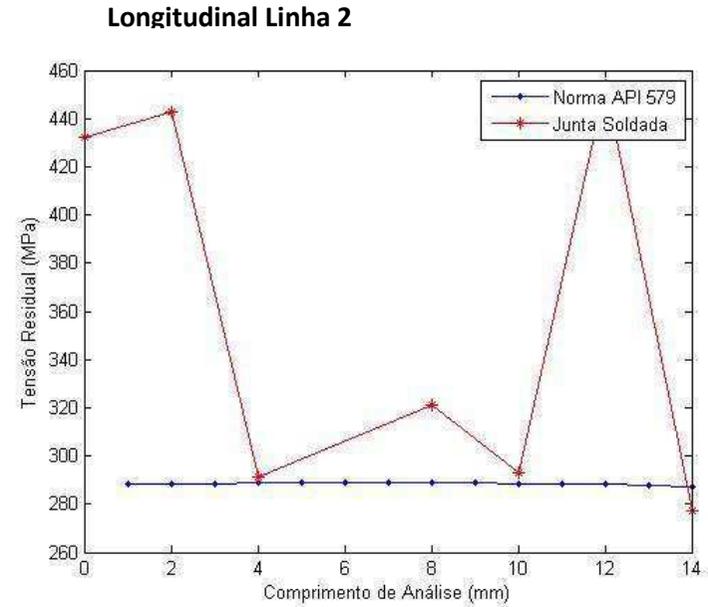
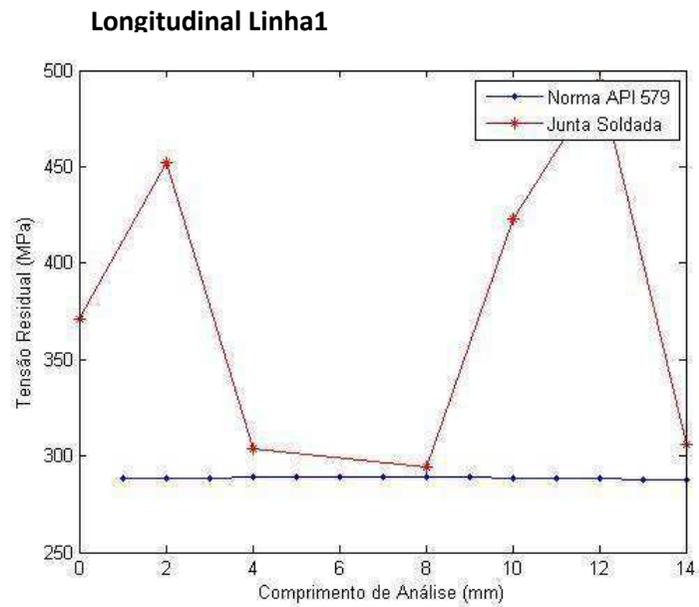
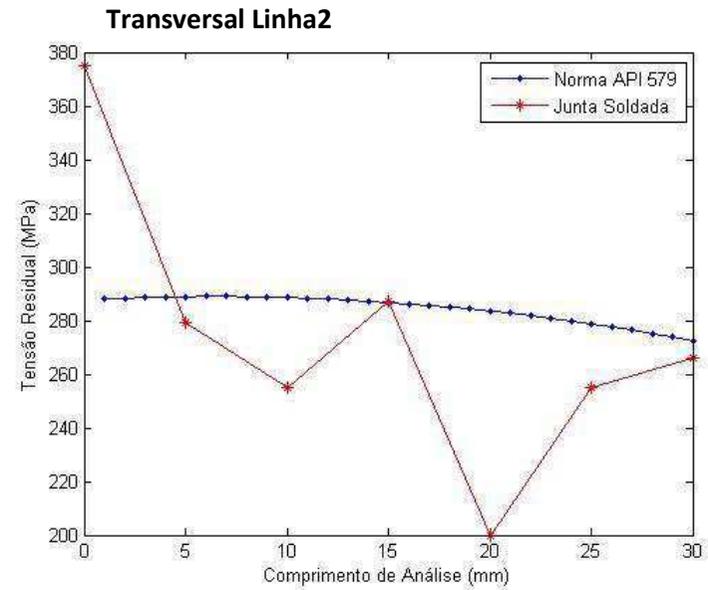
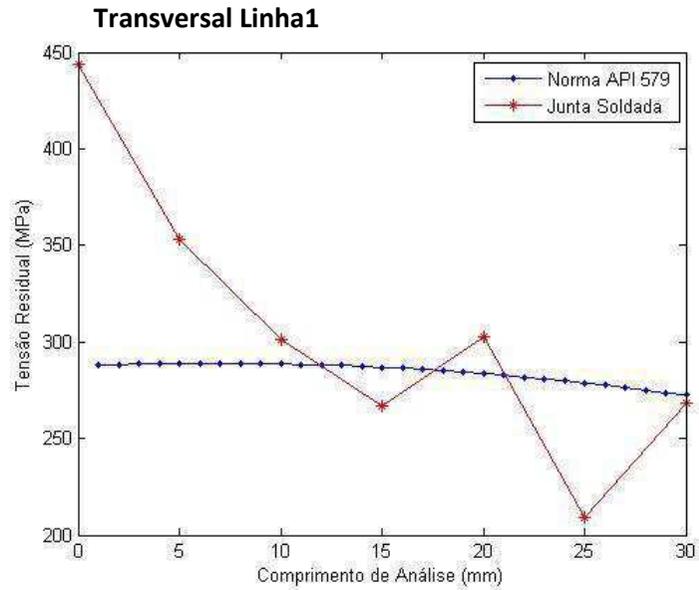
### Longitudinal Linha1



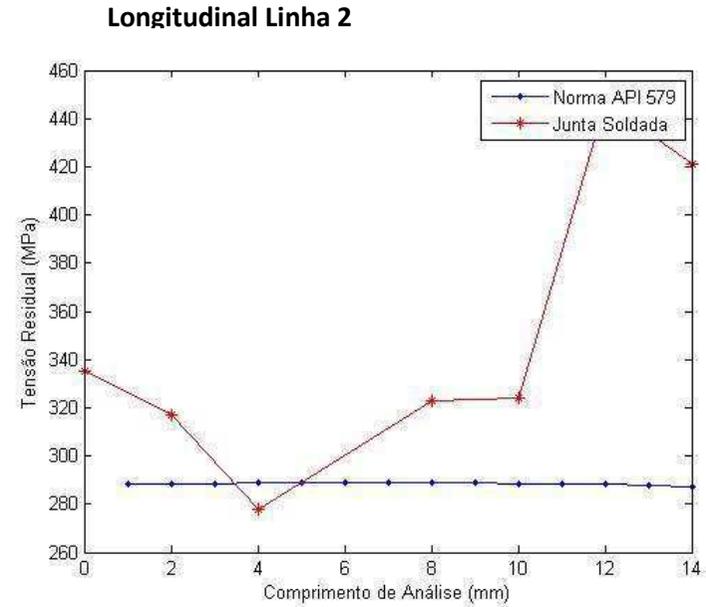
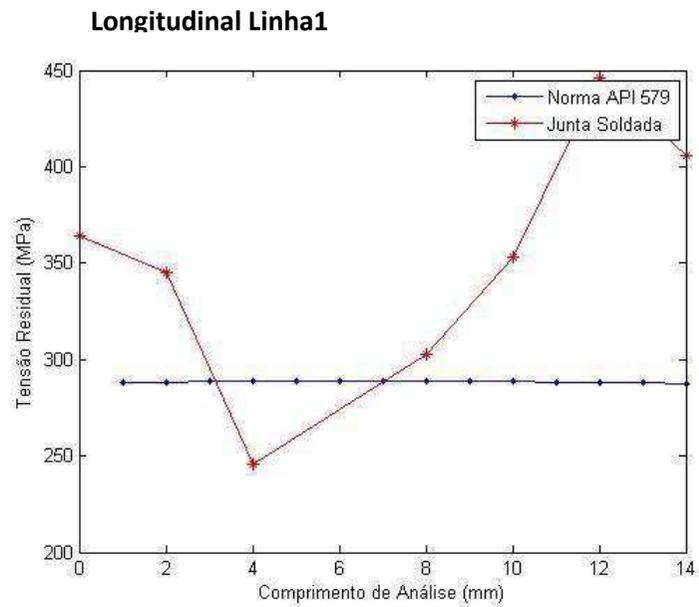
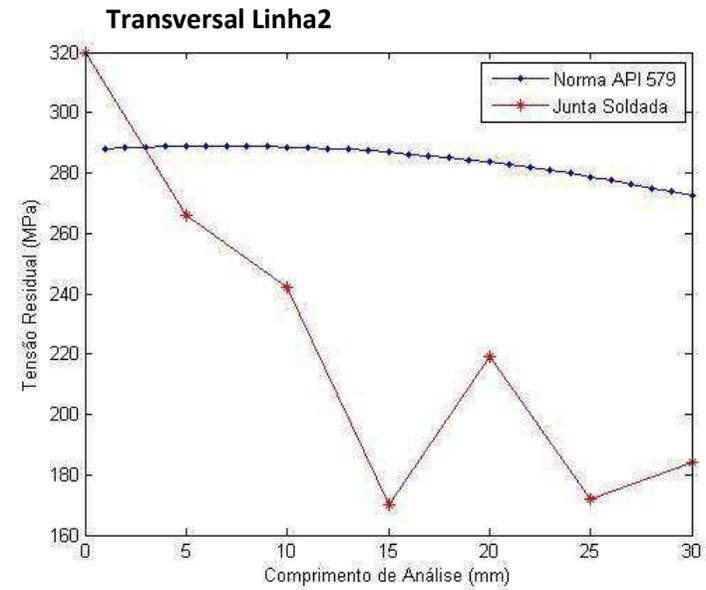
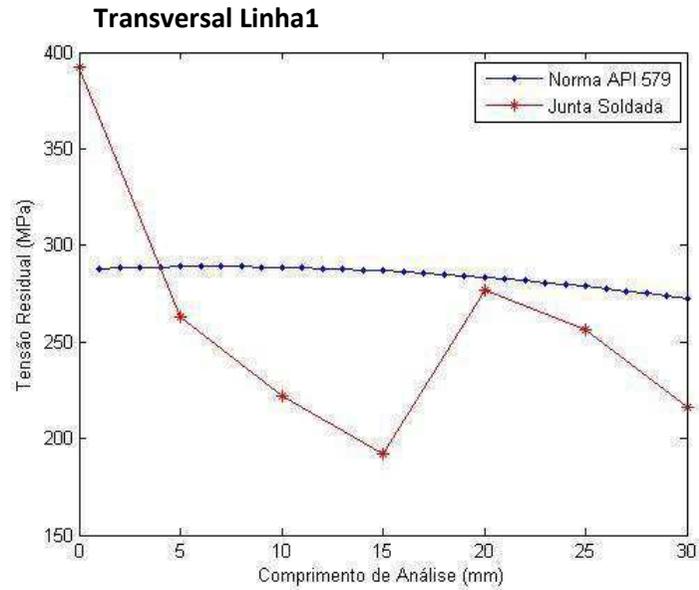
### Longitudinal Linha 2



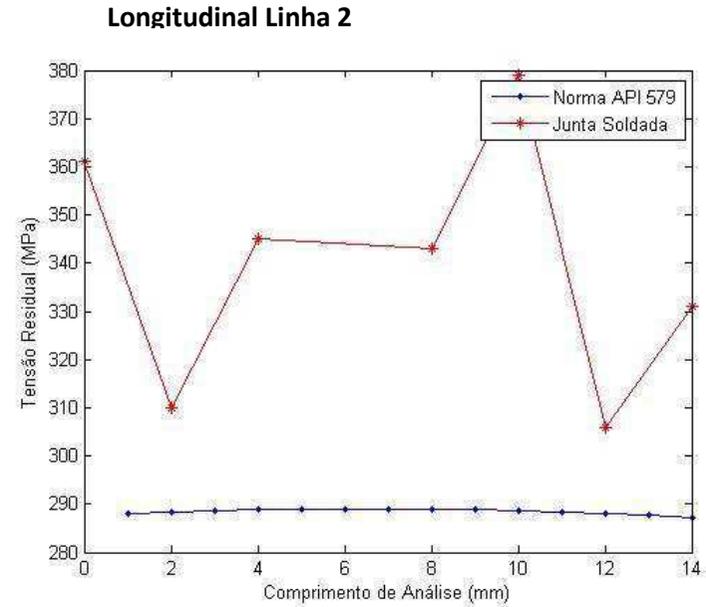
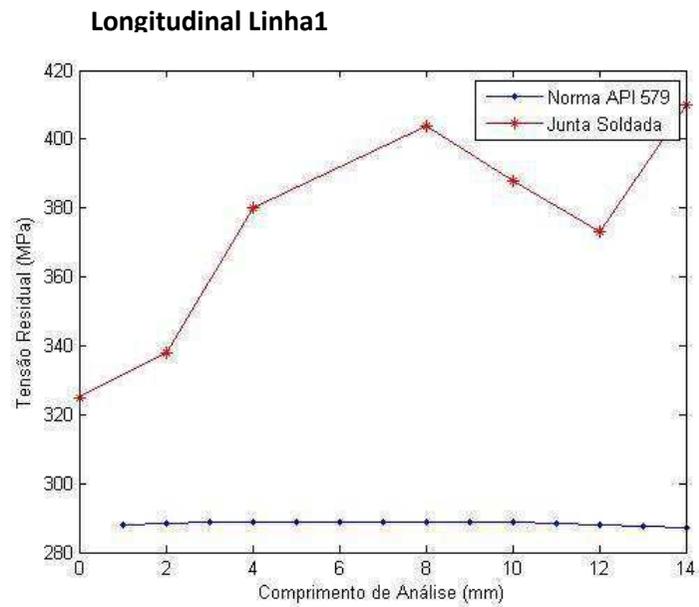
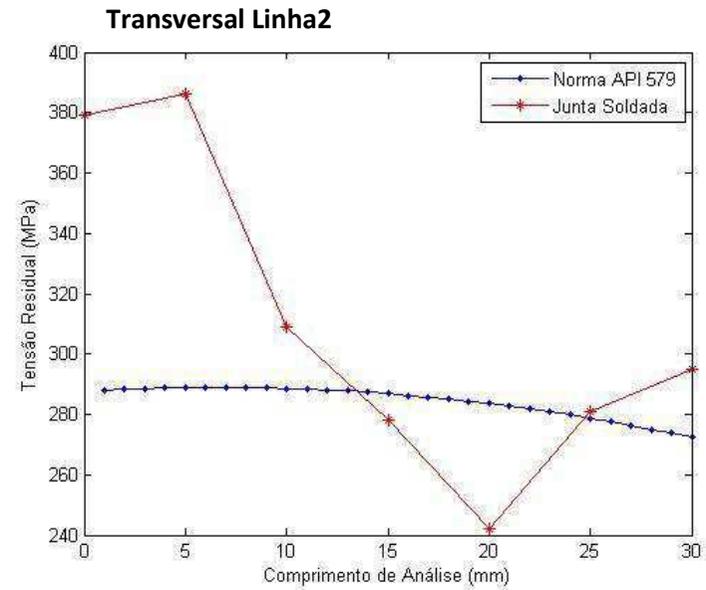
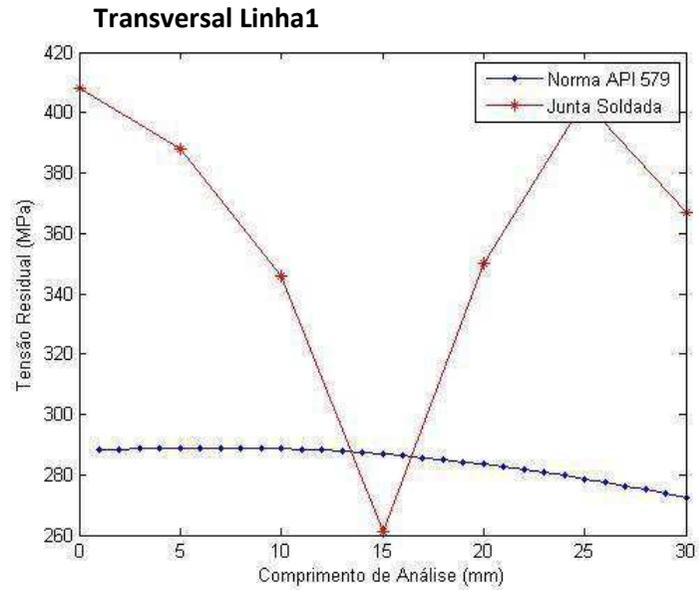
# Junta Soldada 2



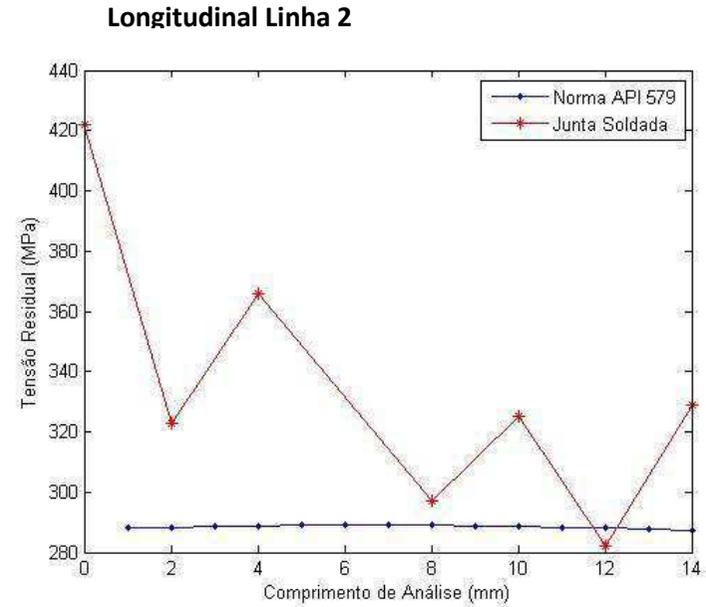
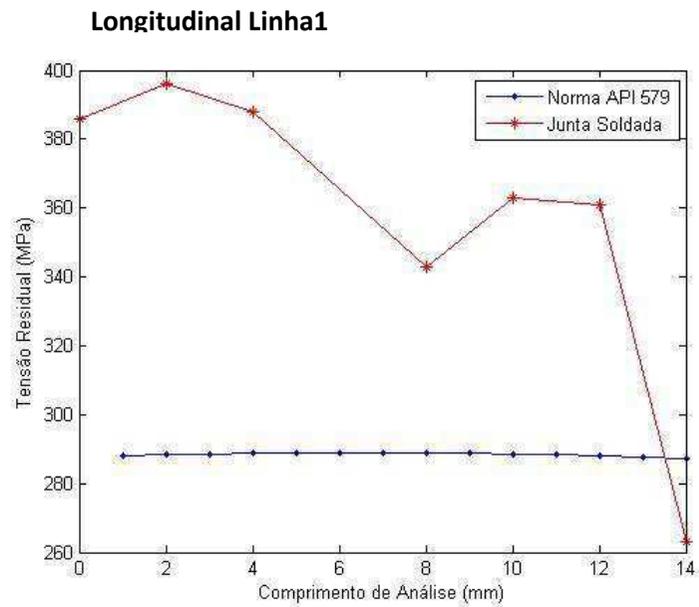
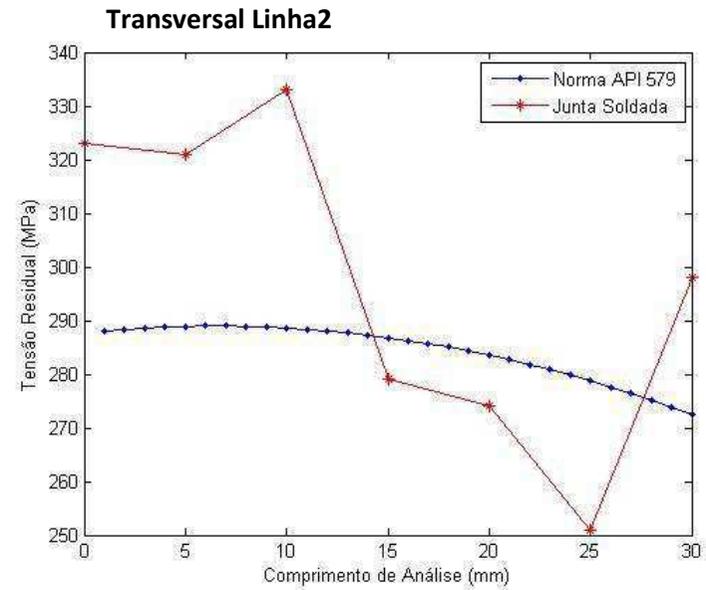
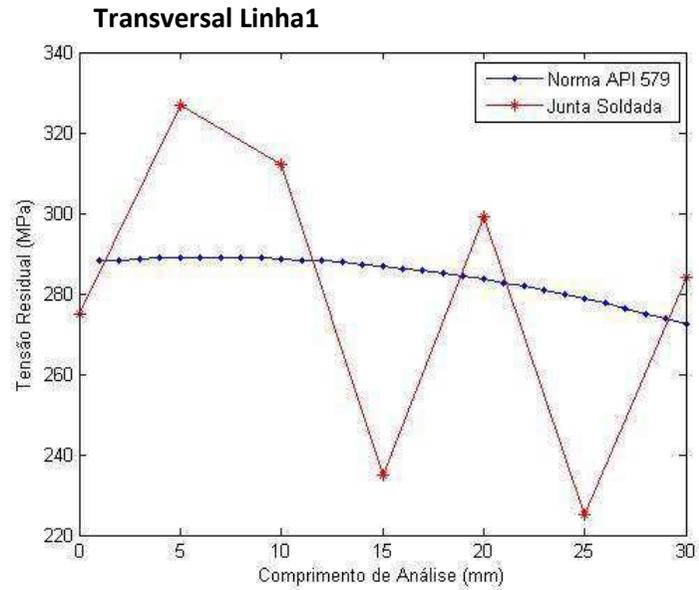
### Junta Soldada 3



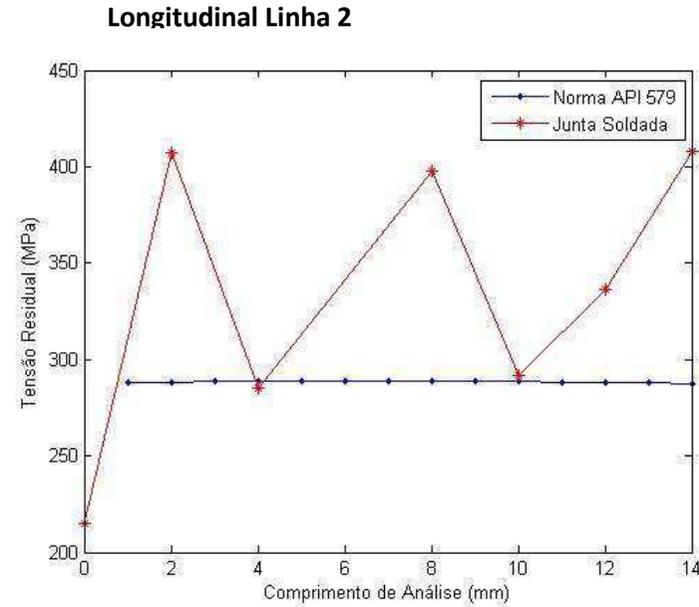
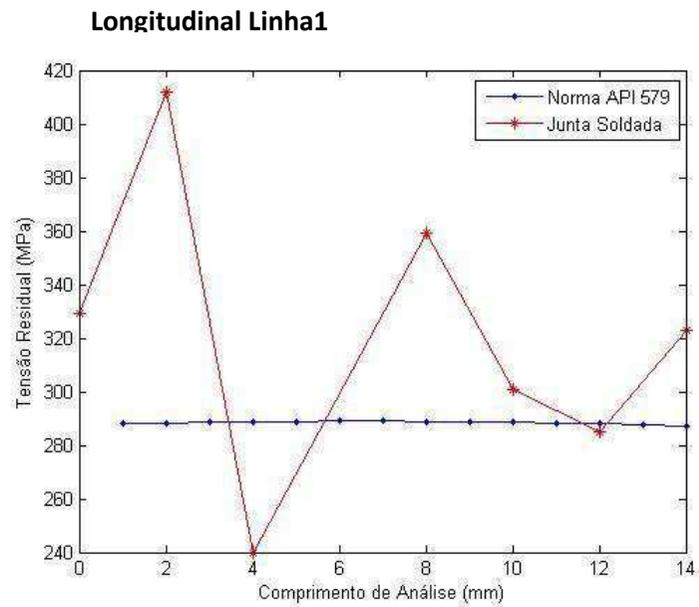
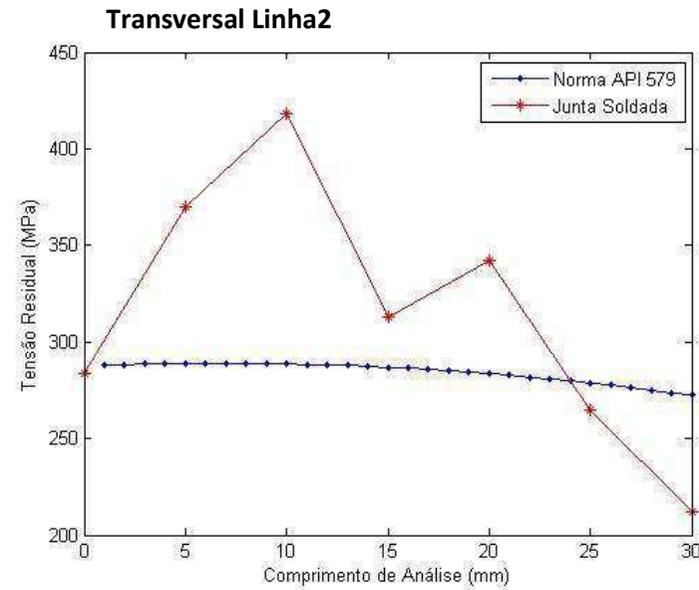
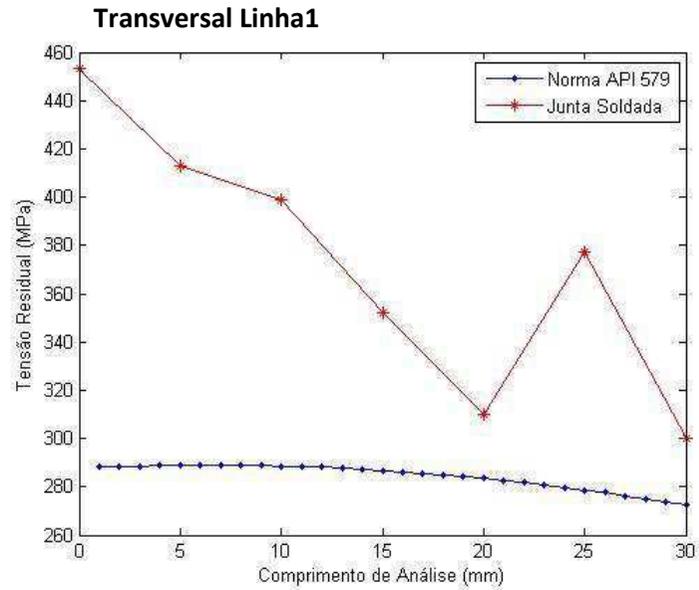
# Junta Soldada 4



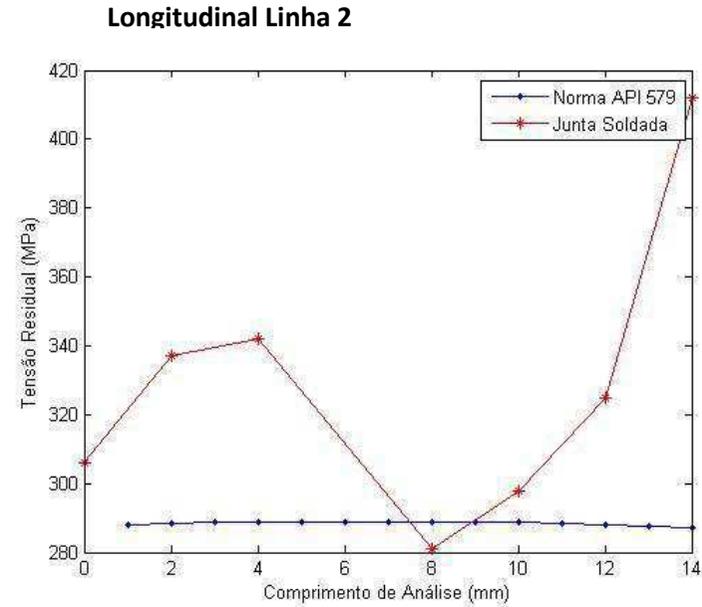
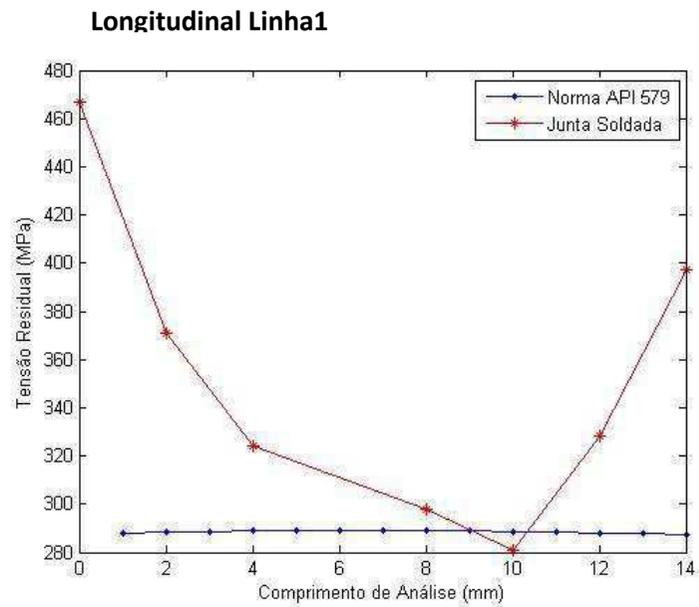
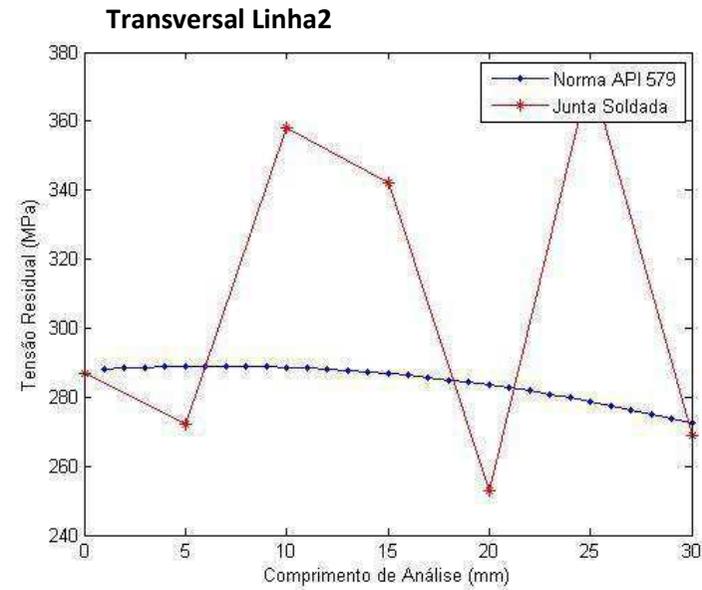
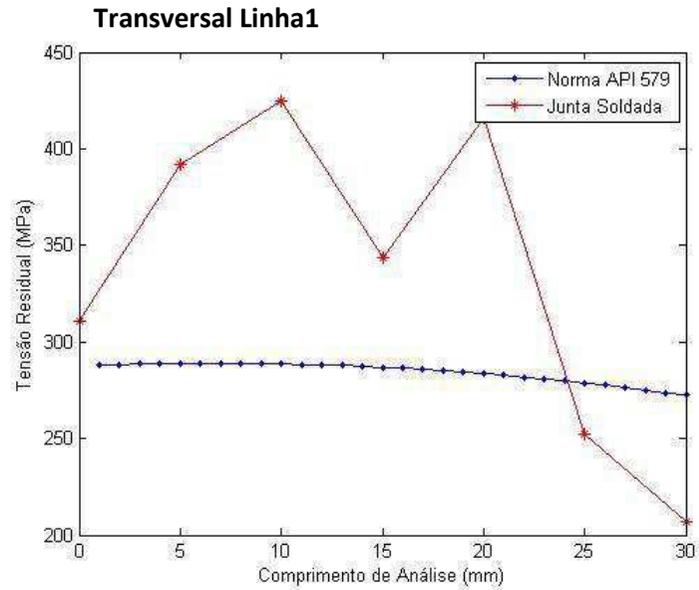
# Junta Soldada 5



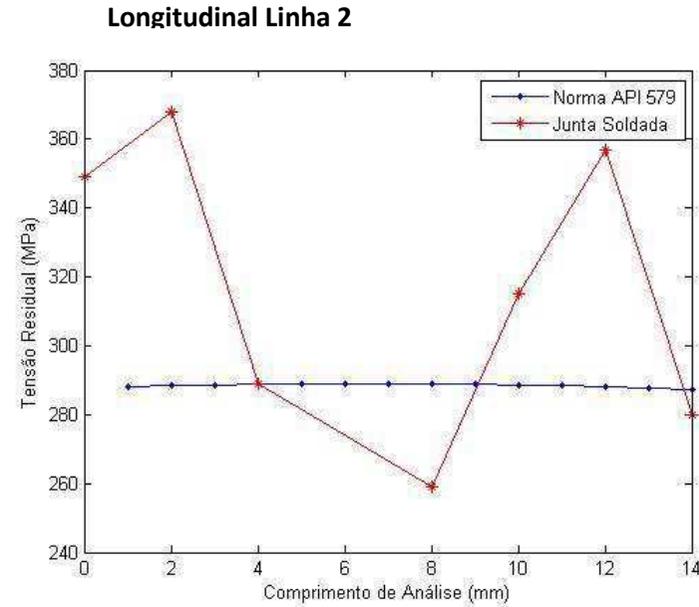
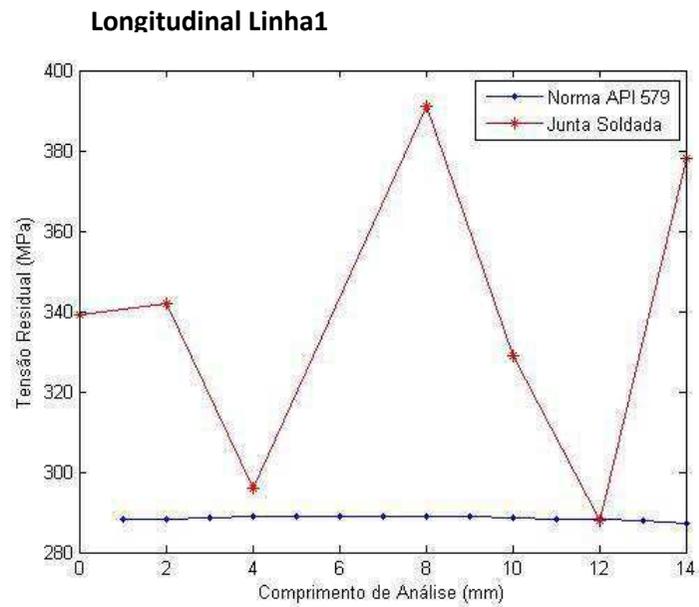
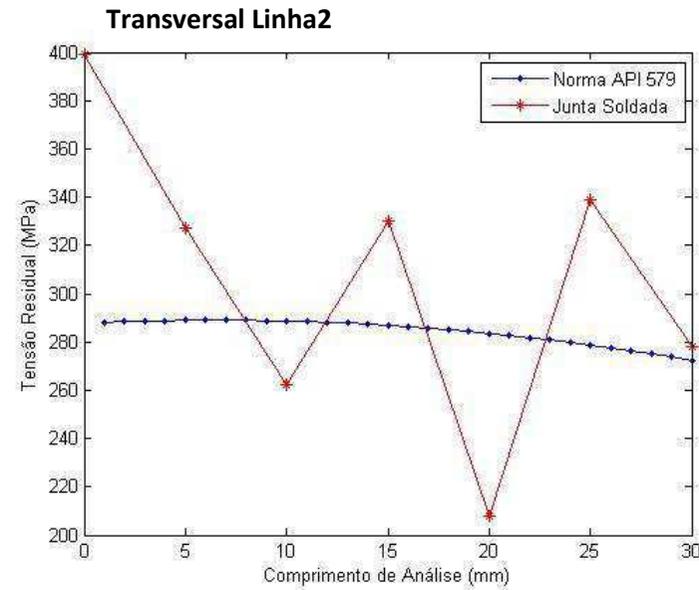
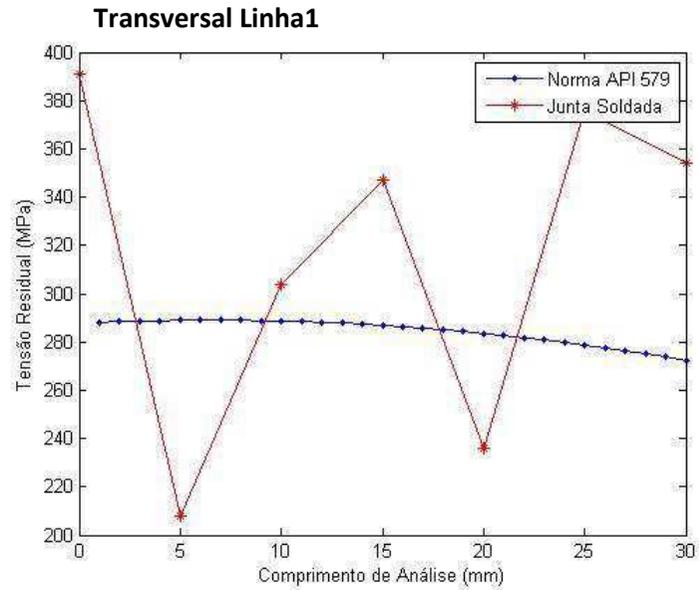
# Junta Soldada 6



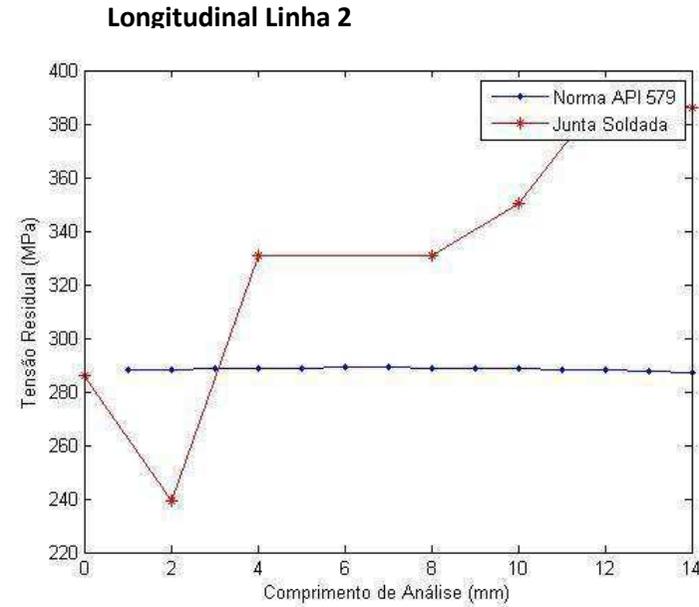
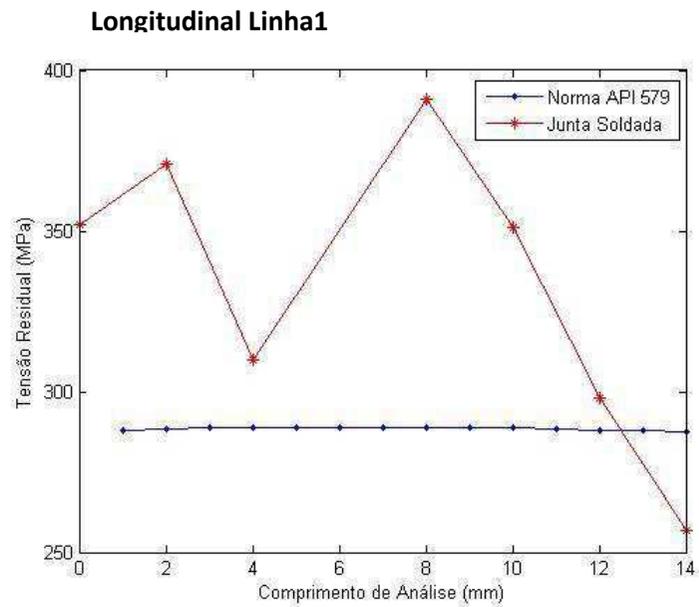
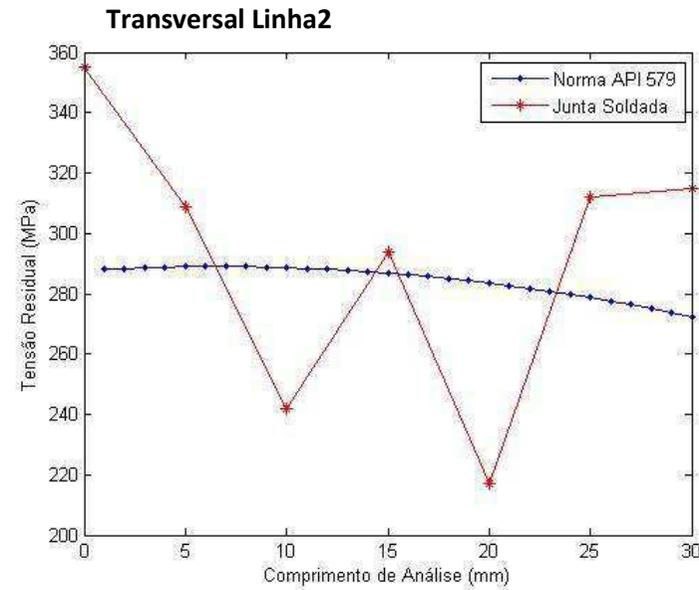
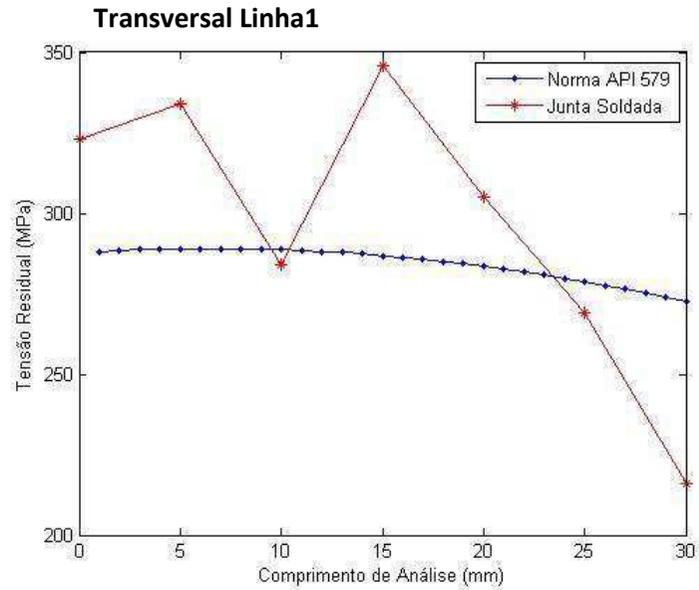
# Junta Soldada 7



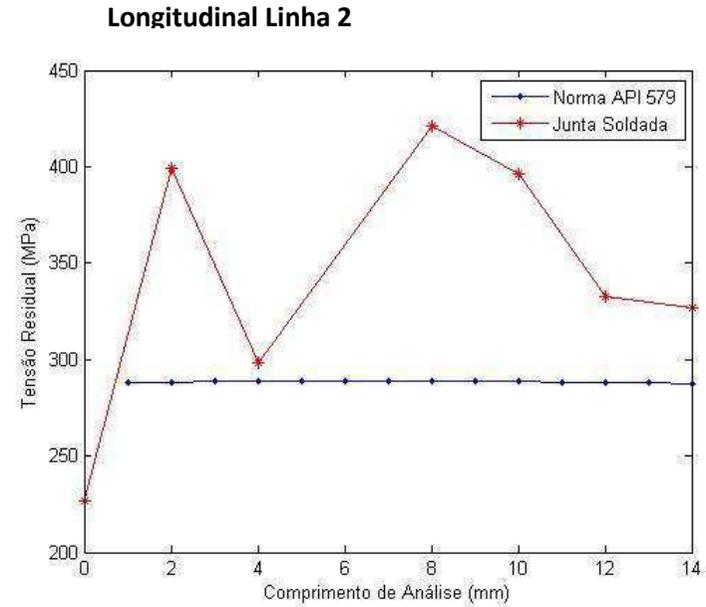
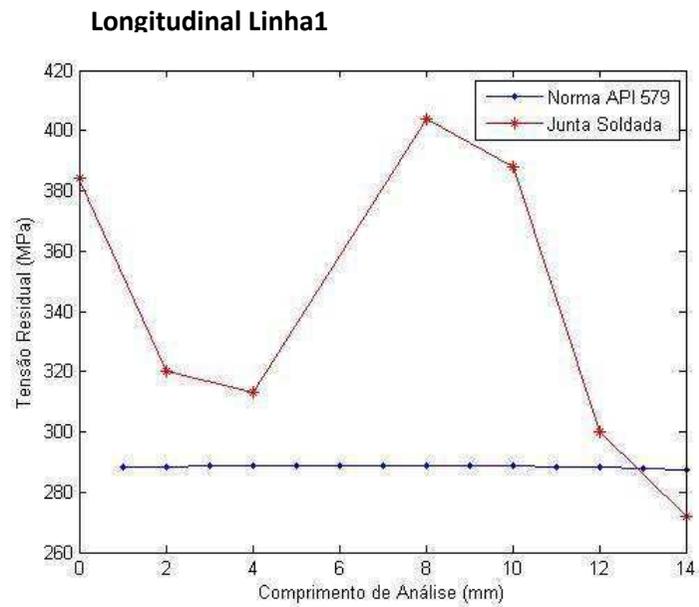
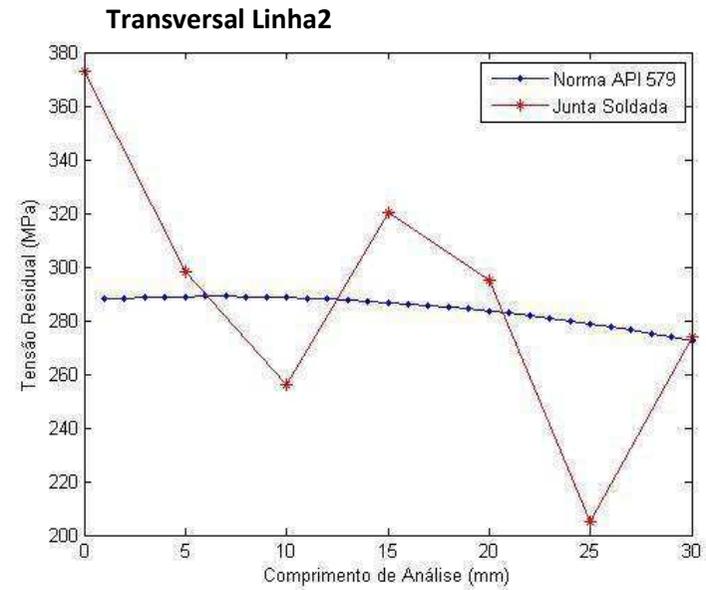
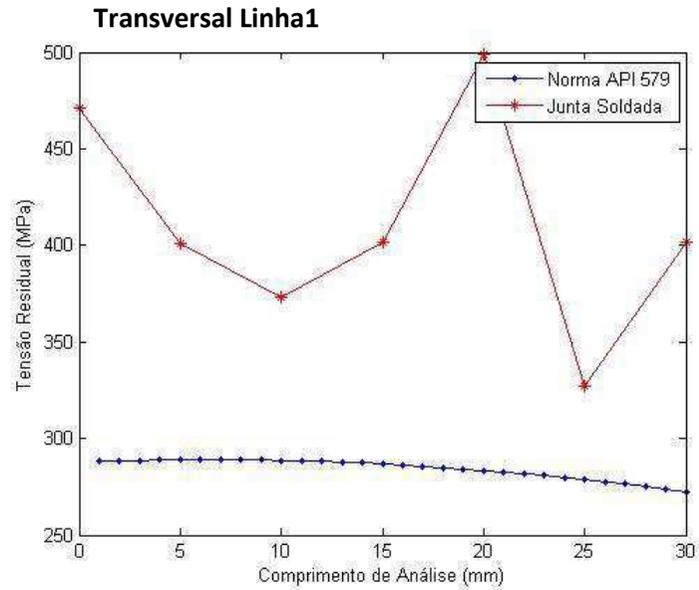
# Junta Soldada 8



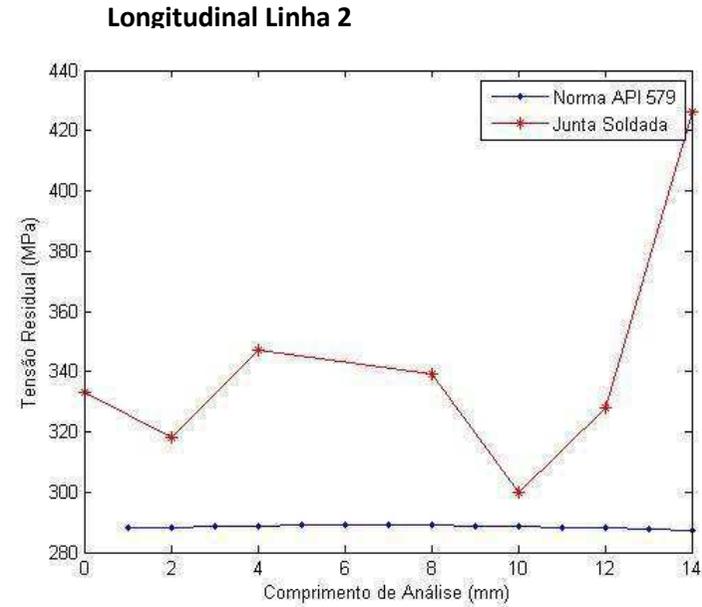
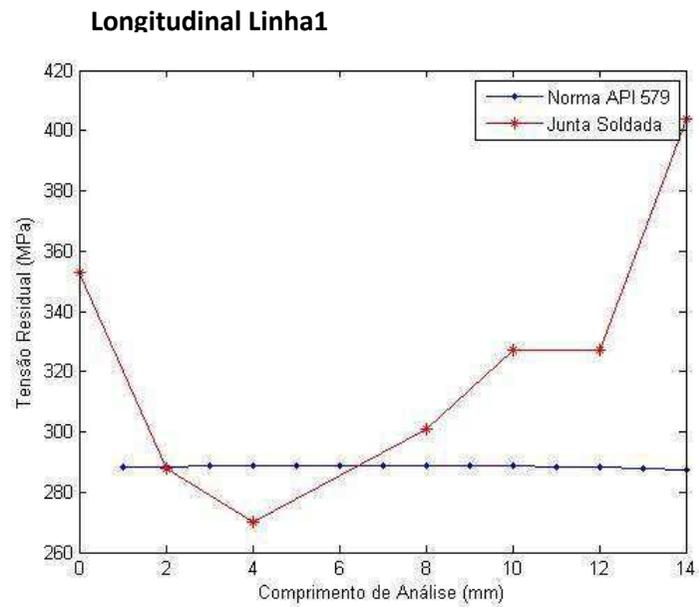
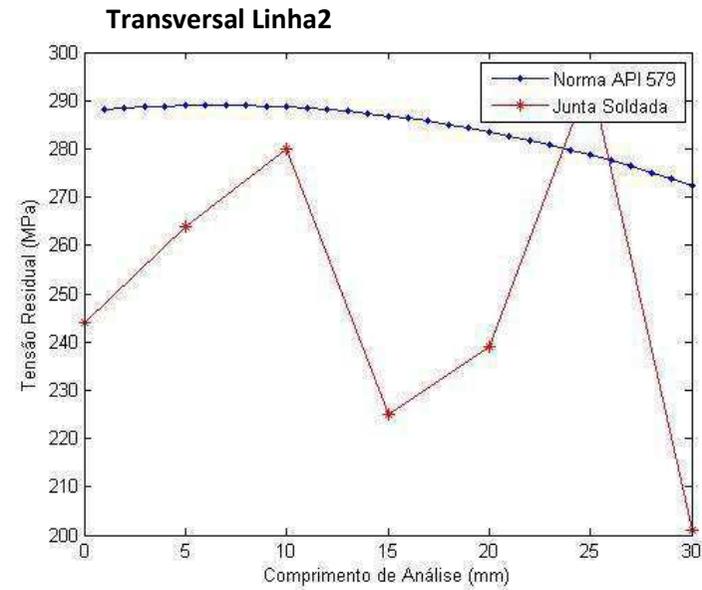
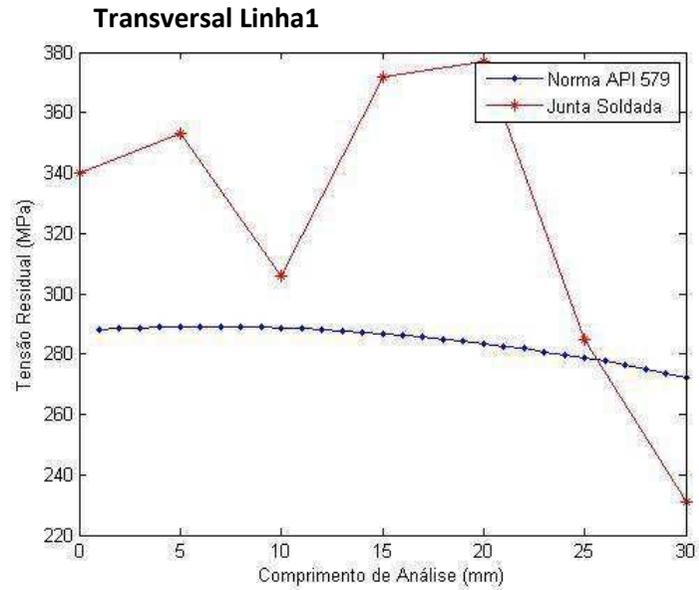
# Junta Soldada 9



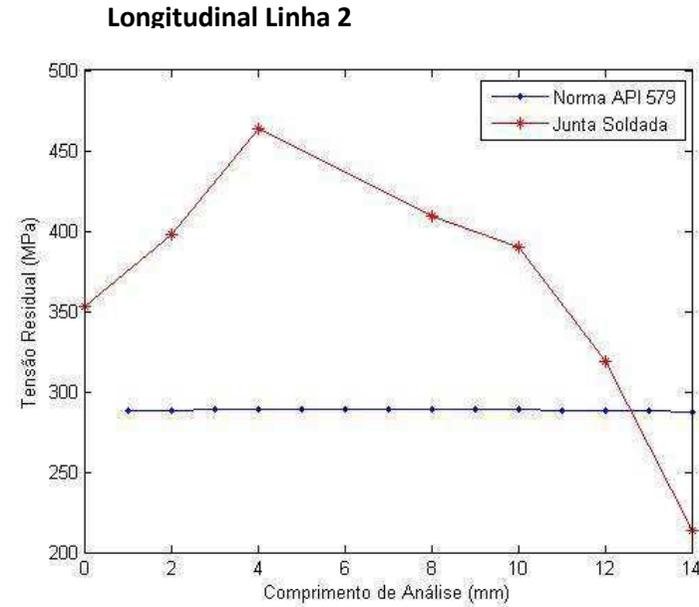
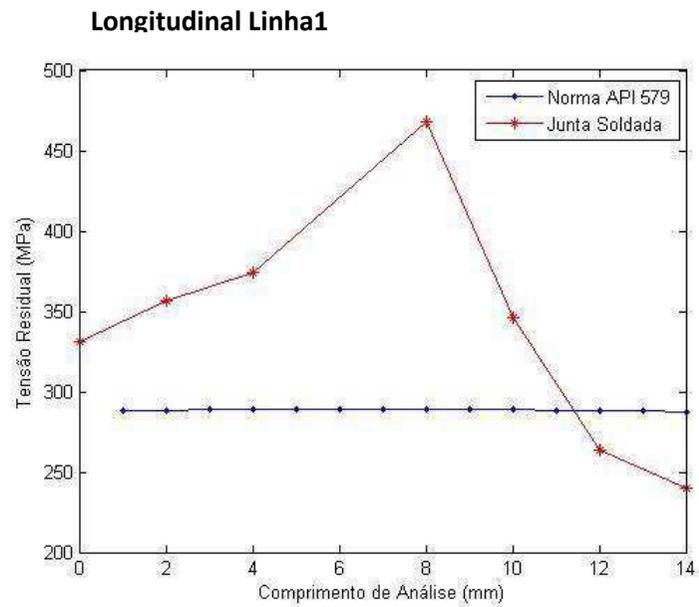
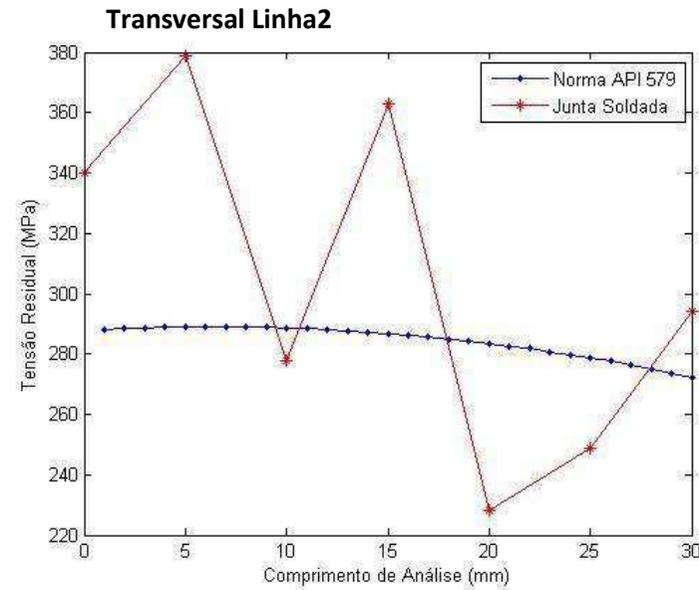
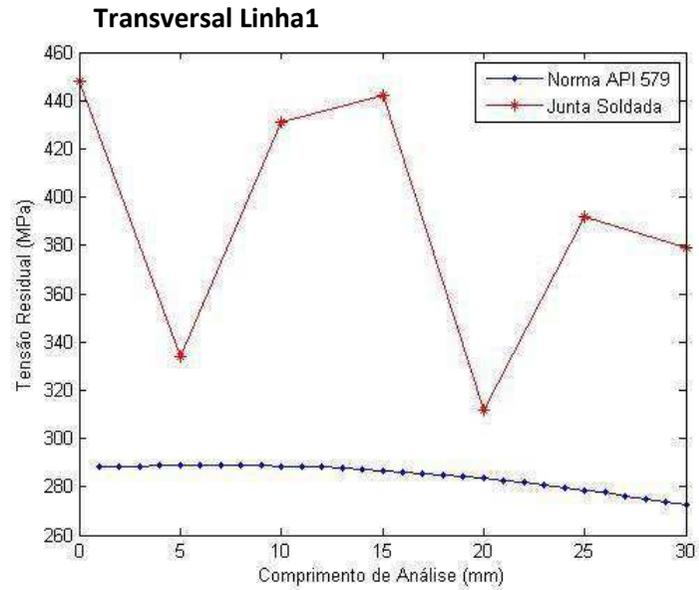
# Junta Soldada 10



# Junta Soldada 11



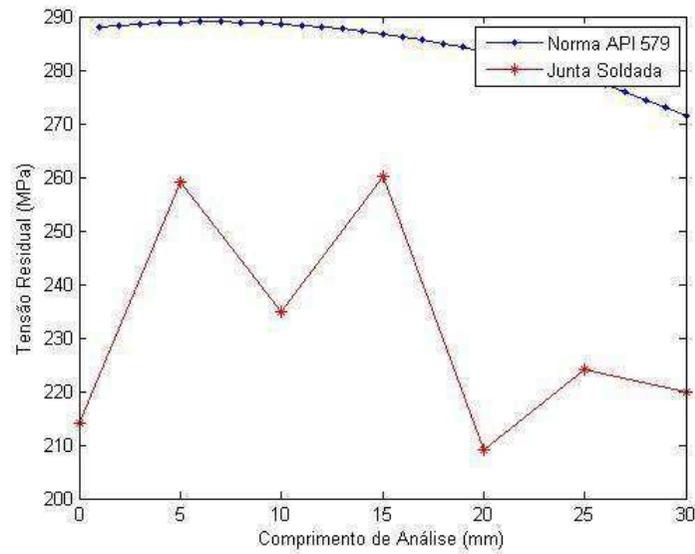
# Junta Soldada 12



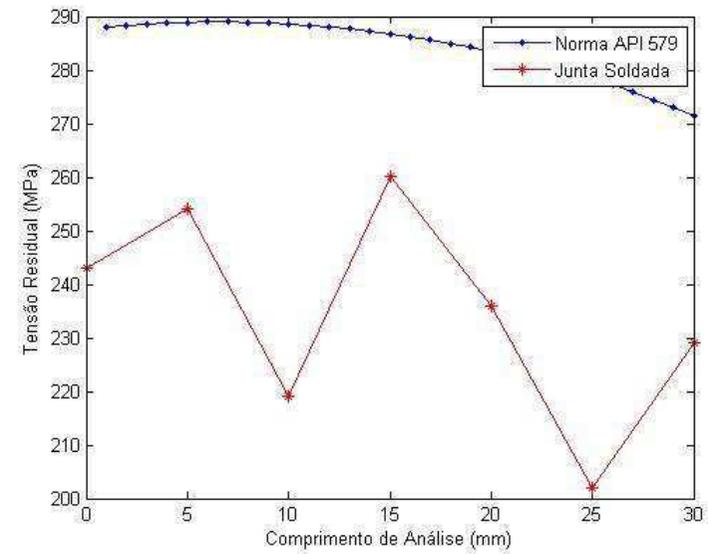
**APÊNDICE B – Gráficos comparativos de curvas de tensões residuais pós-tratamento versus tensões da norma API 579**

## Junta Soldada 1

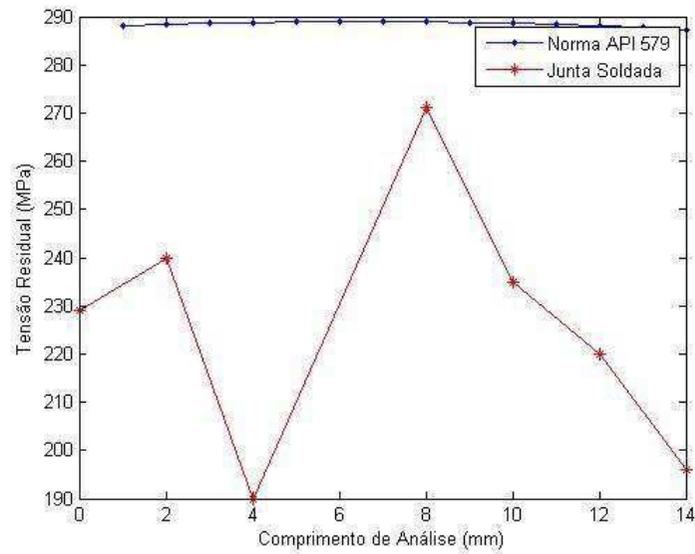
### Transversal Linha1



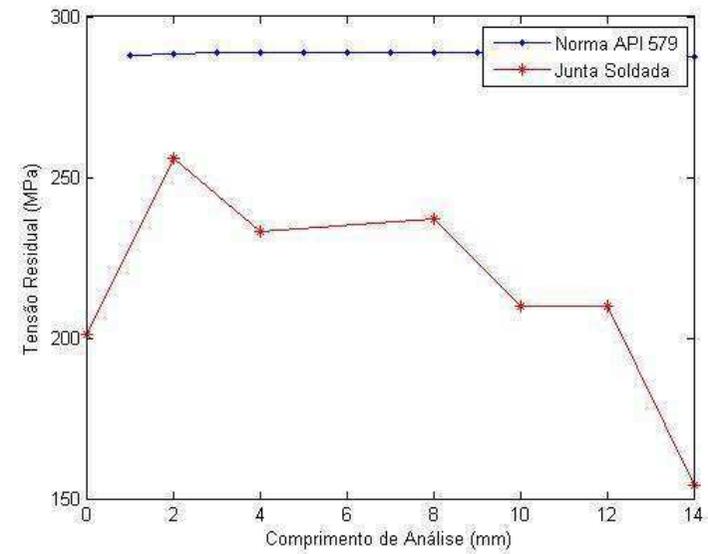
### Transversal Linha2



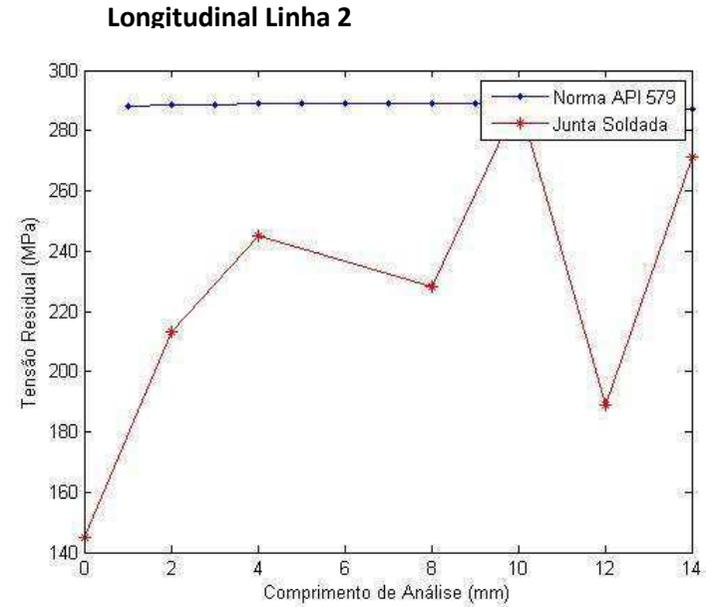
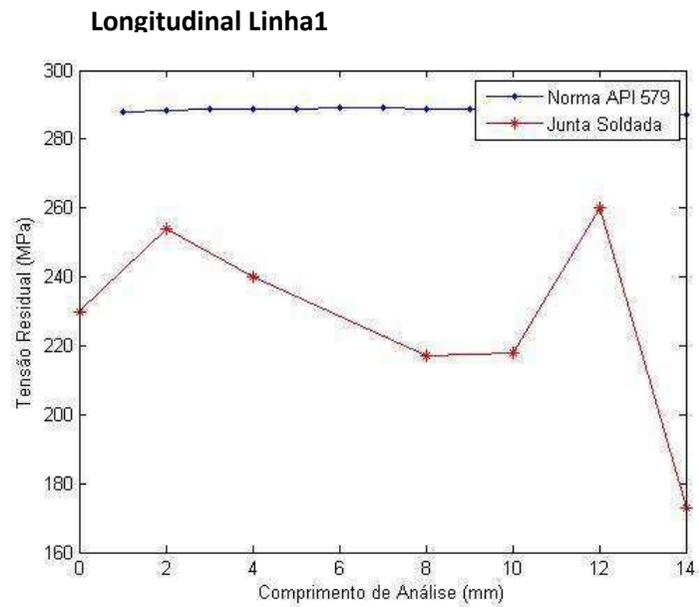
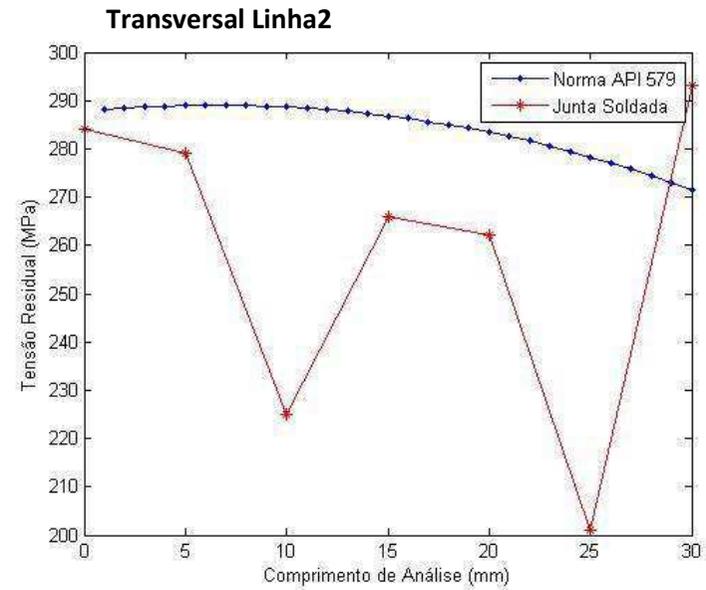
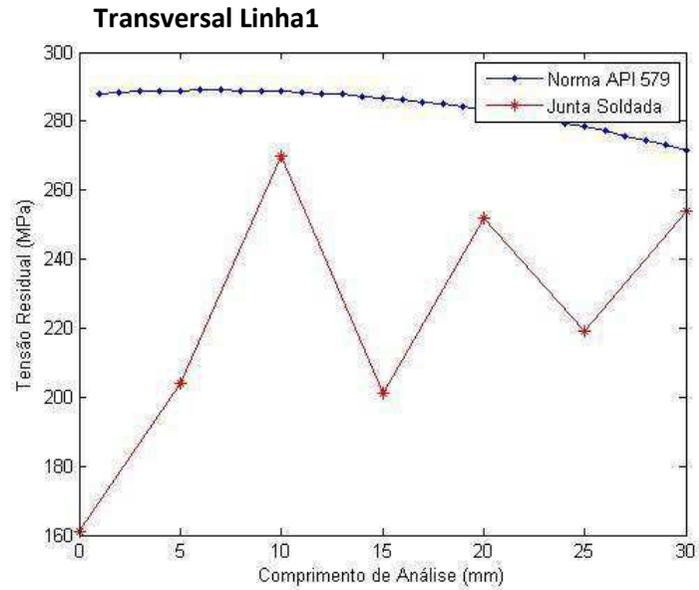
### Longitudinal Linha1



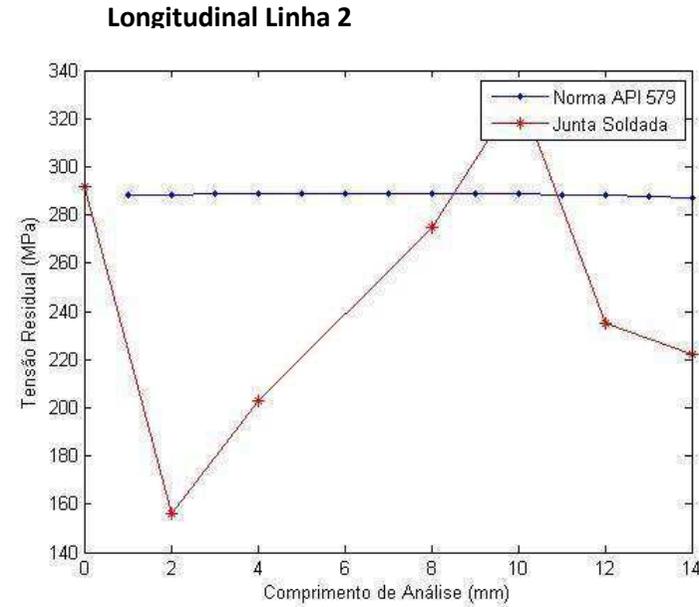
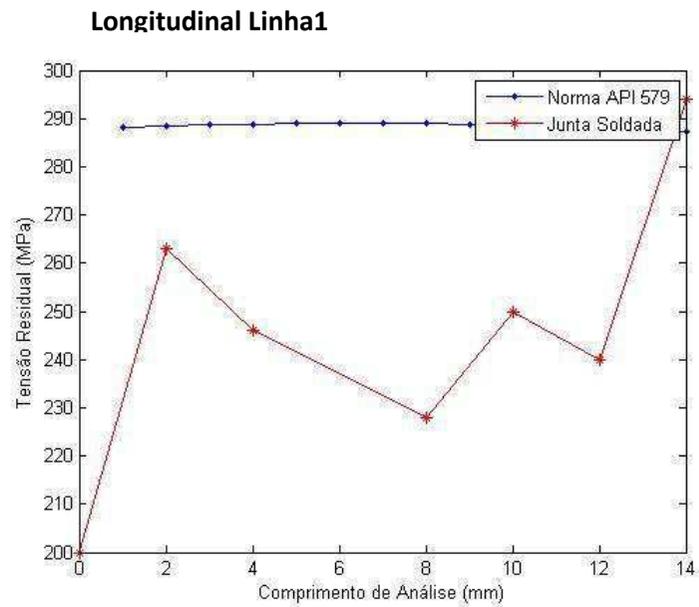
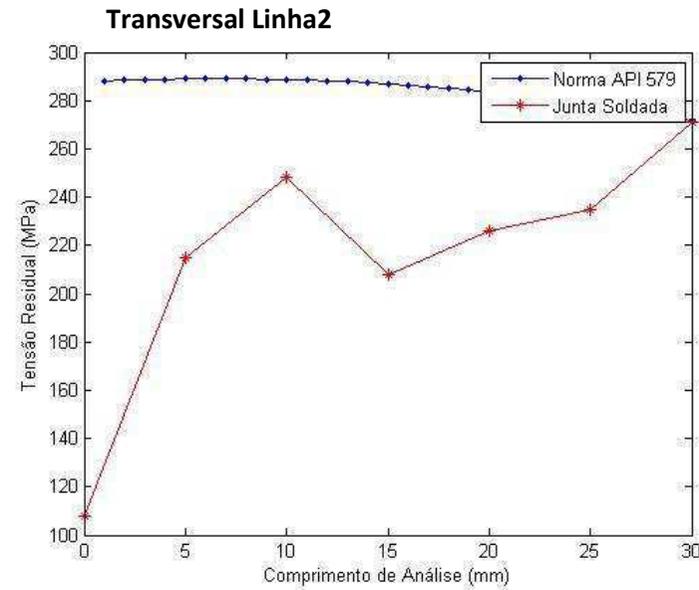
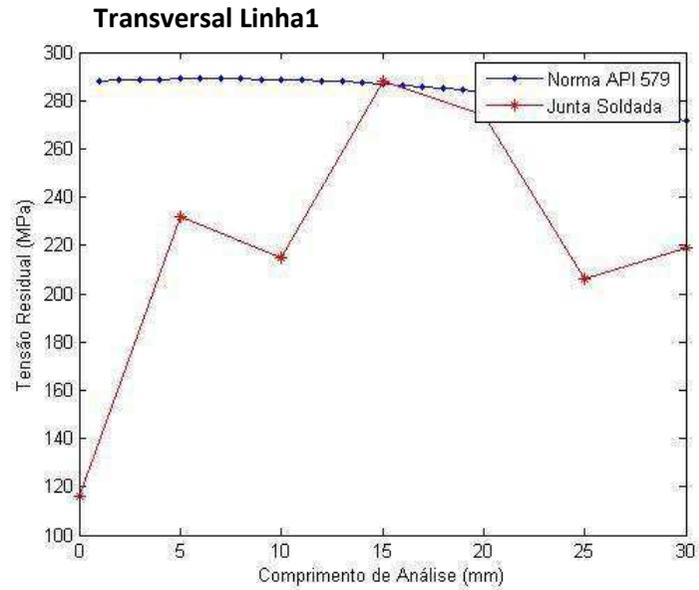
### Longitudinal Linha 2



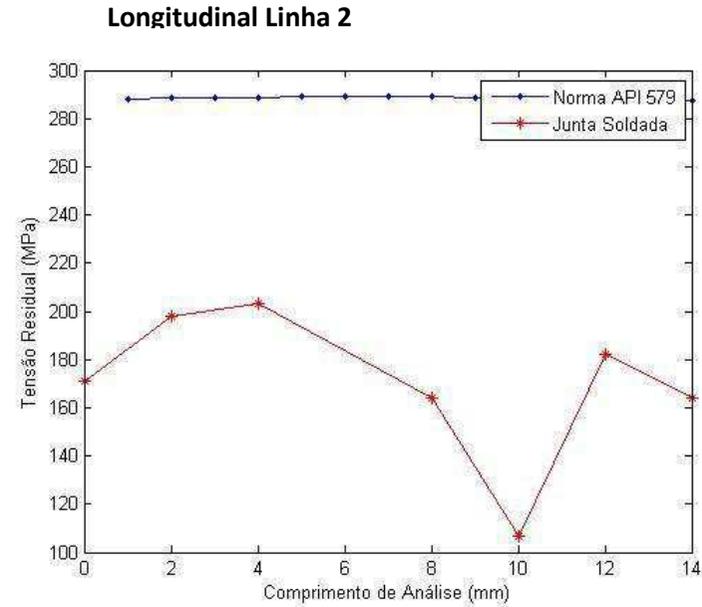
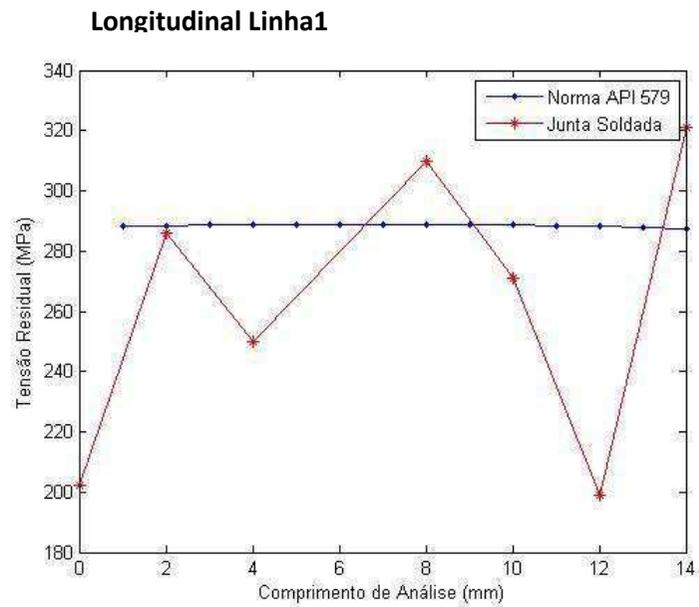
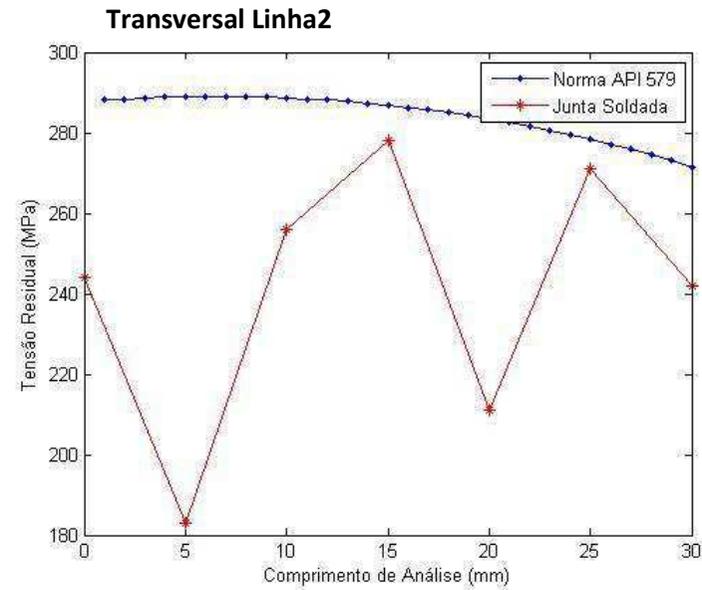
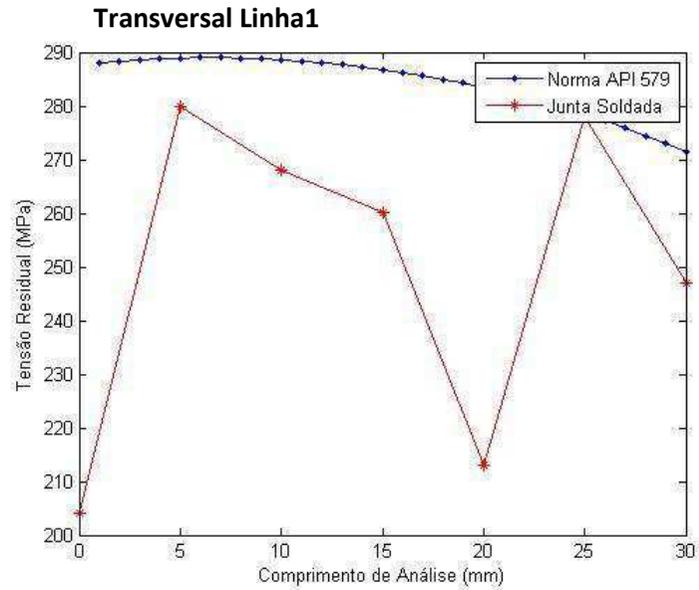
# Junta Soldada 2



# Junta Soldada 3

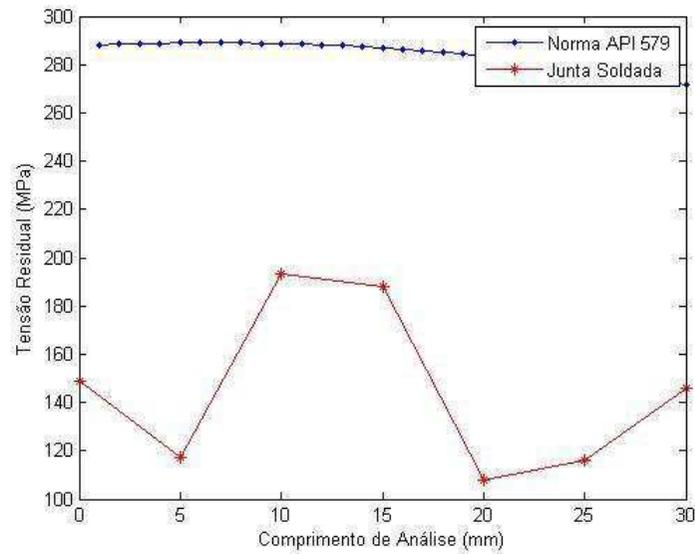


# Junta Soldada 4

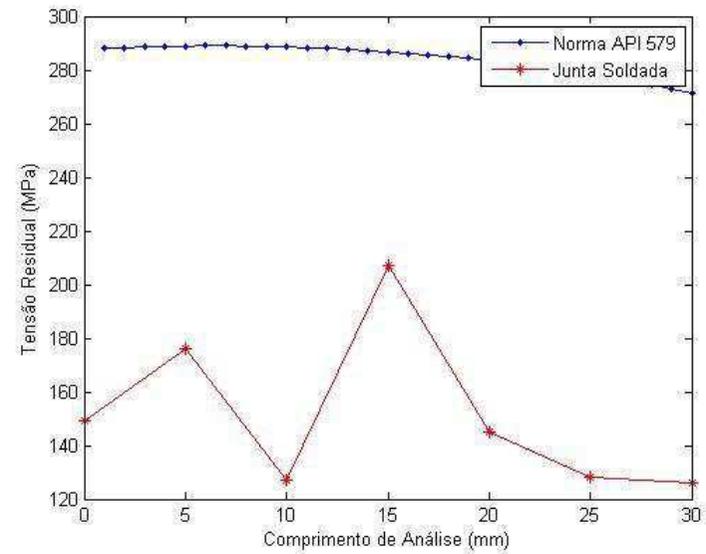


# Junta Soldada 5

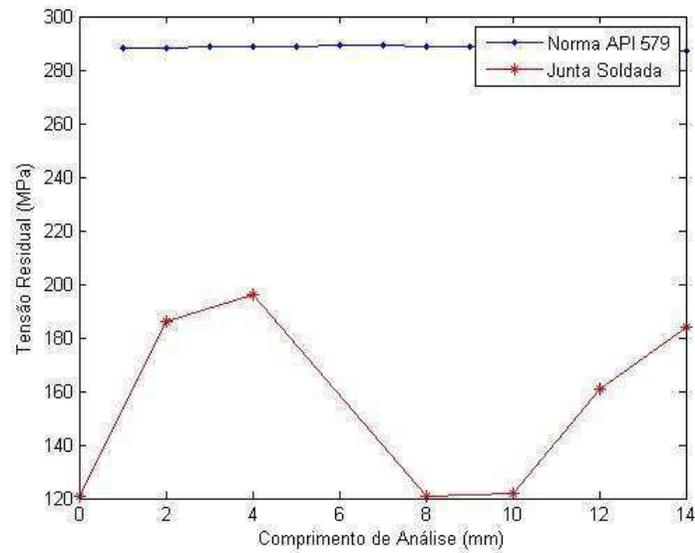
### Transversal Linha1



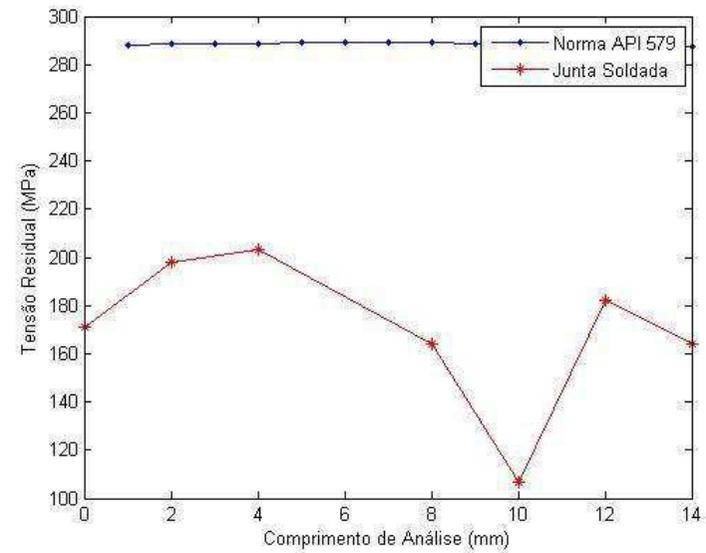
### Transversal Linha2



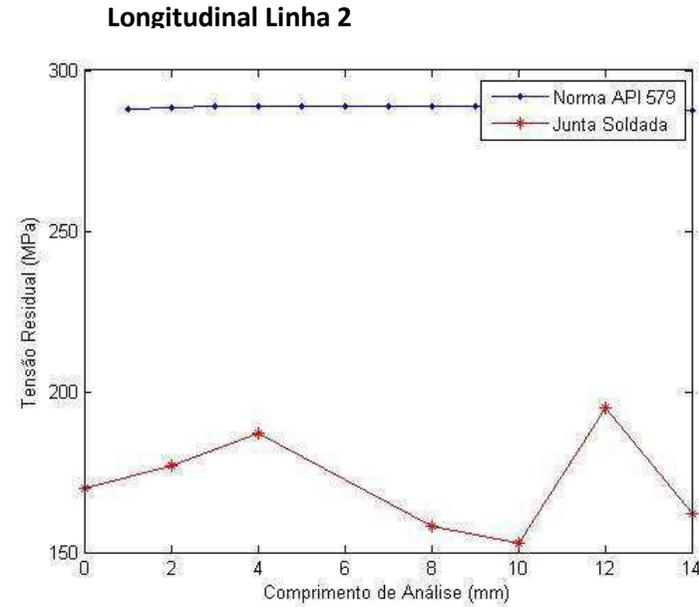
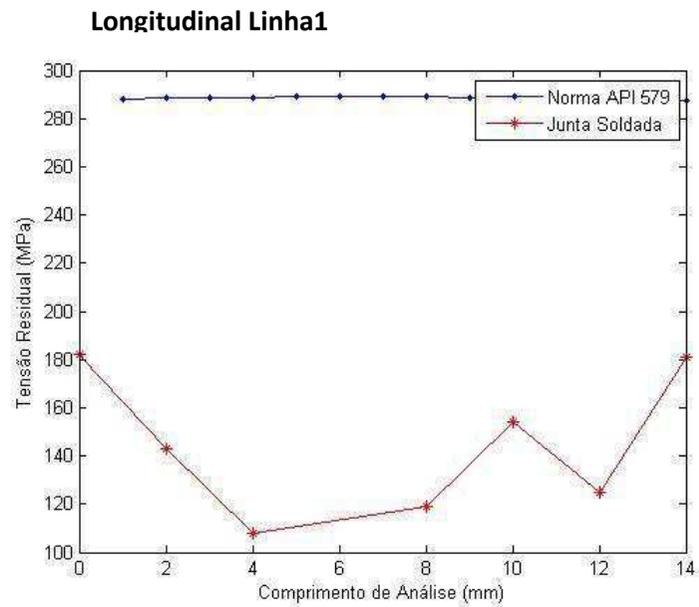
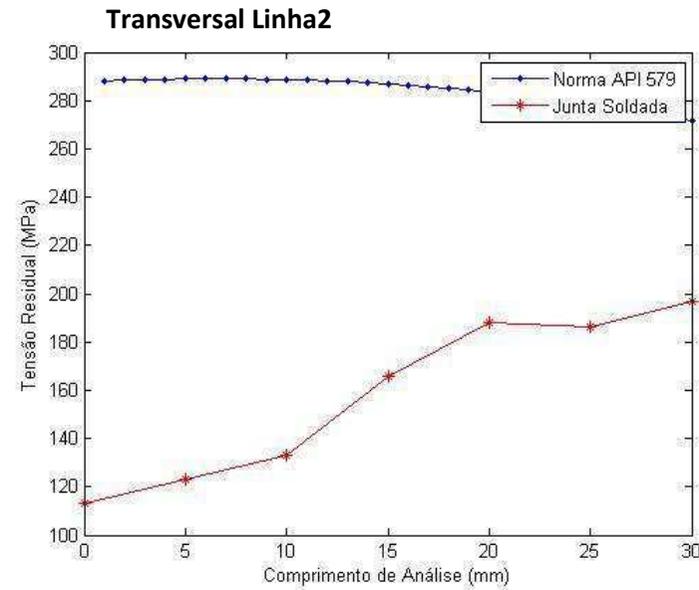
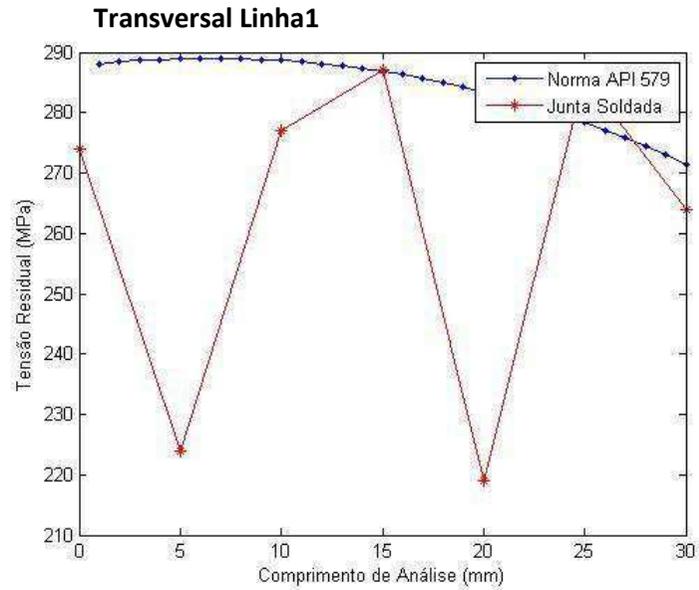
### Longitudinal Linha1



### Longitudinal Linha 2

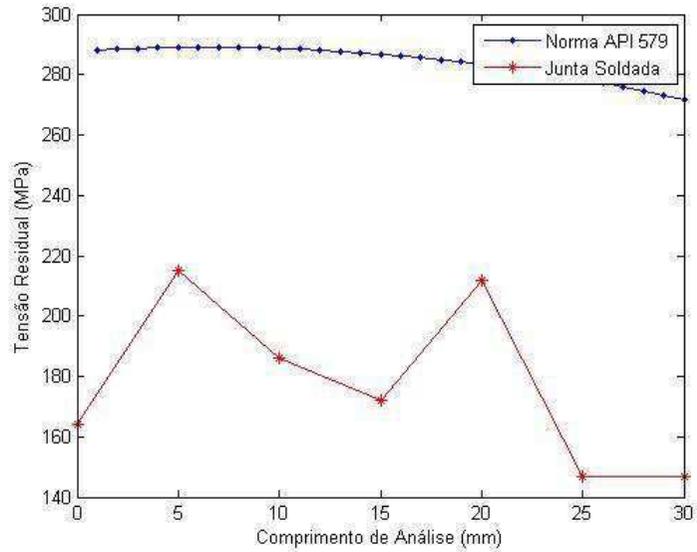


# Junta Soldada 6

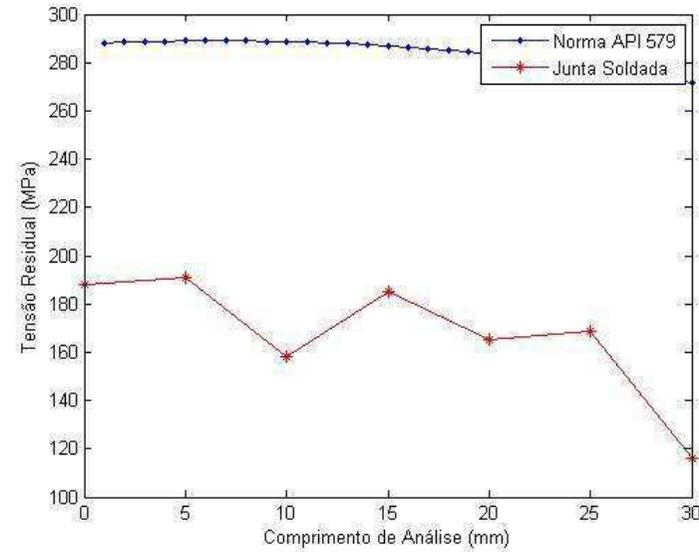


# Junta Soldada 7

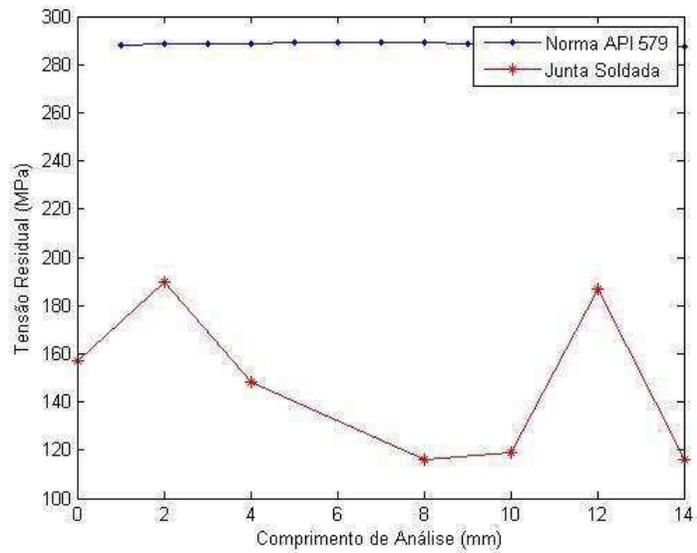
### Transversal Linha1



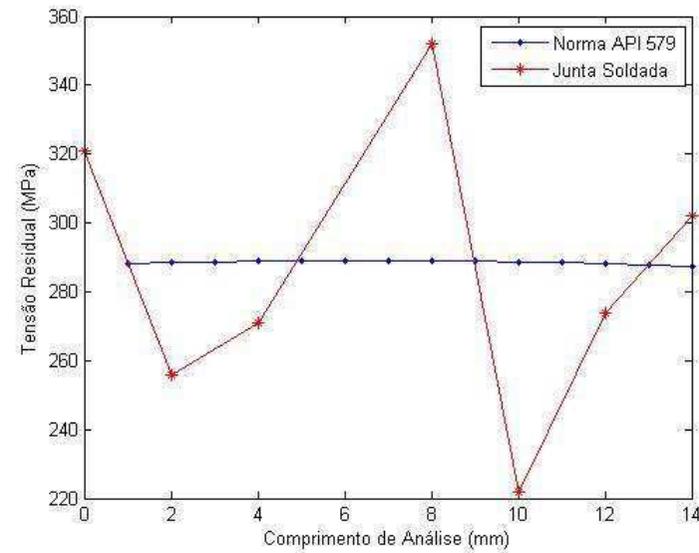
### Transversal Linha2



### Longitudinal Linha1

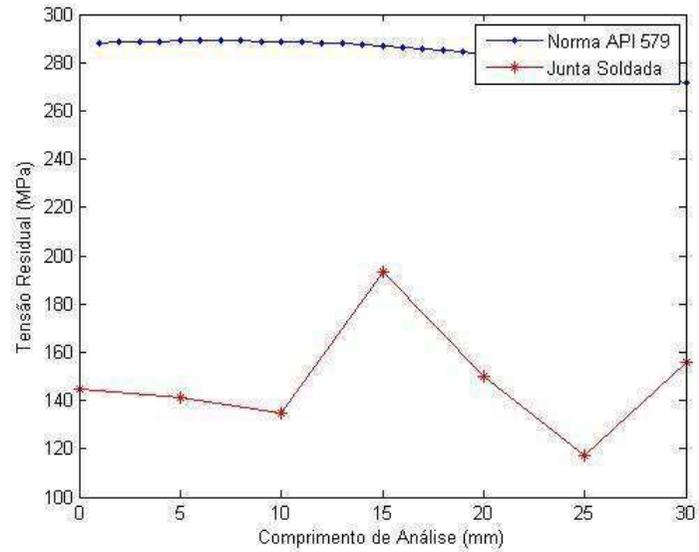


### Longitudinal Linha 2

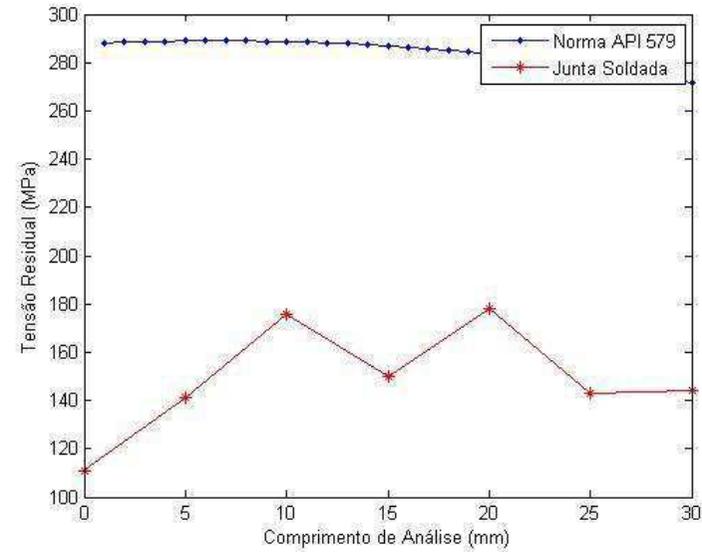


# Junta Soldada 8

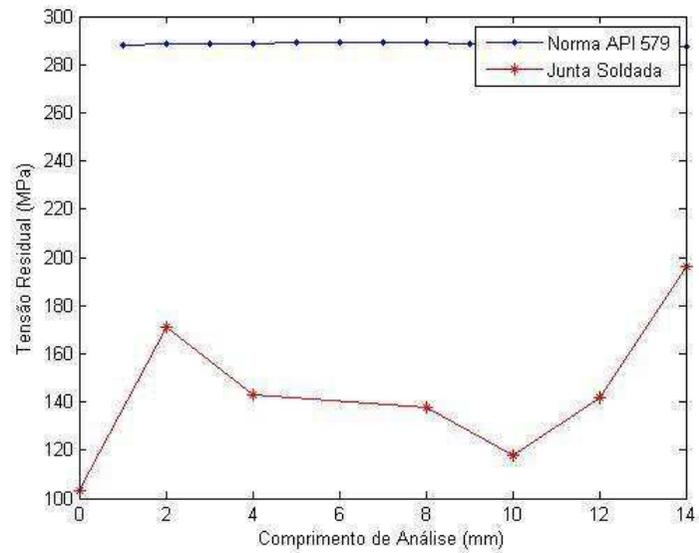
### Transversal Linha1



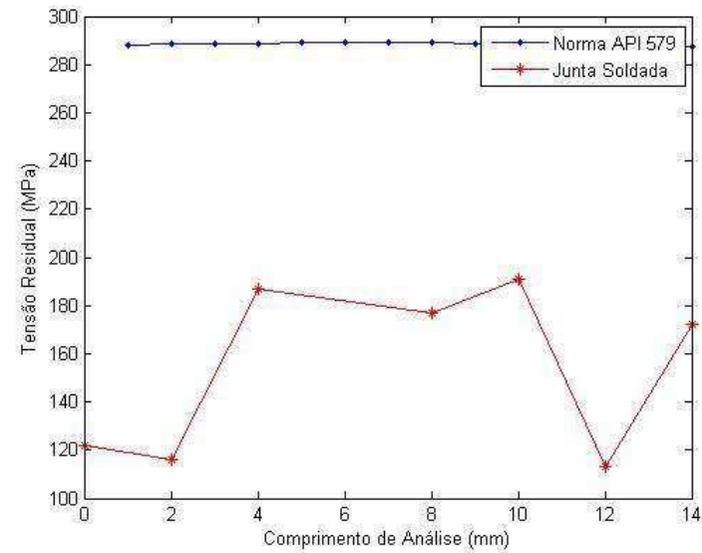
### Transversal Linha2



### Longitudinal Linha1

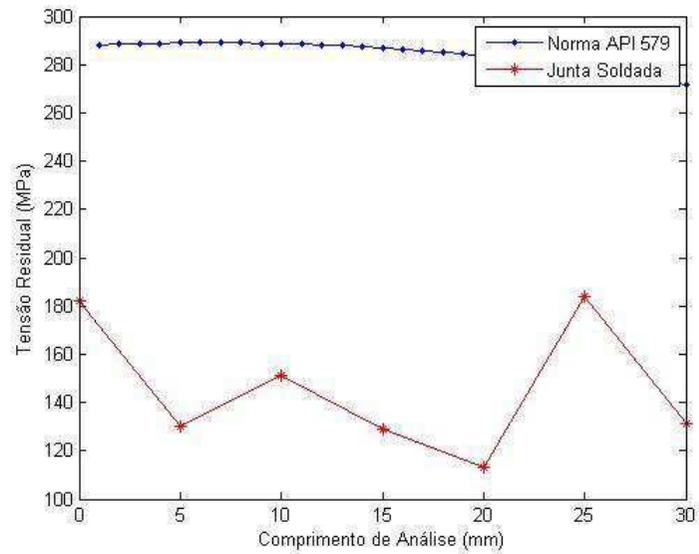


### Longitudinal Linha 2

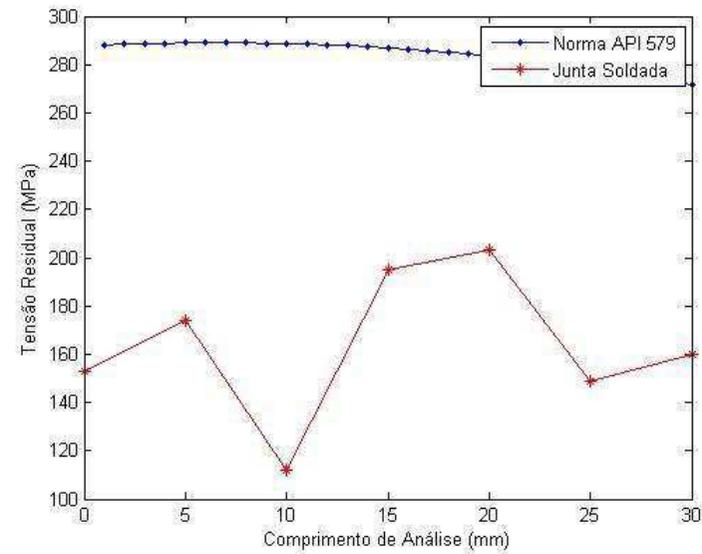


# Junta Soldada 9

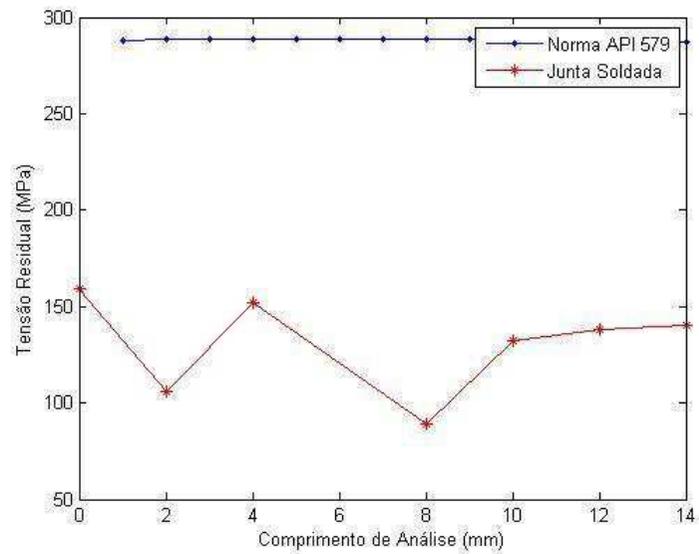
### Transversal Linha1



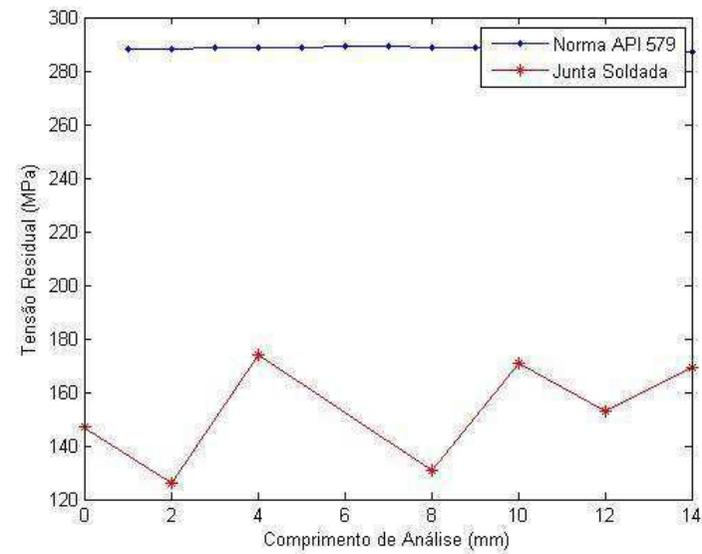
### Transversal Linha2



### Longitudinal Linha1

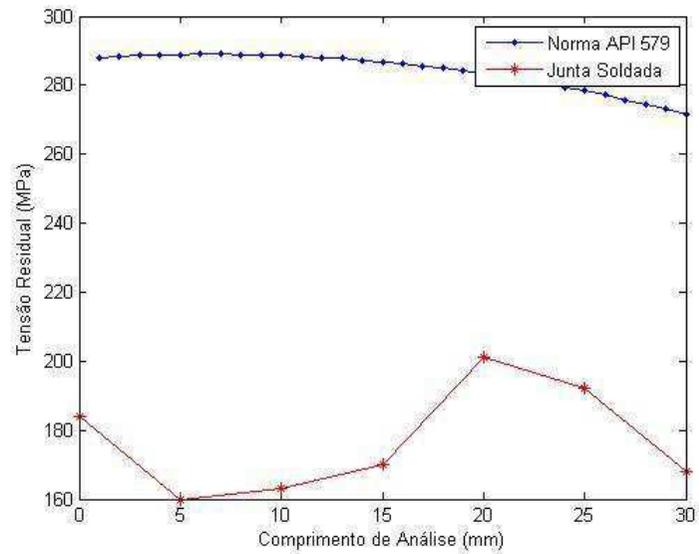


### Longitudinal Linha 2

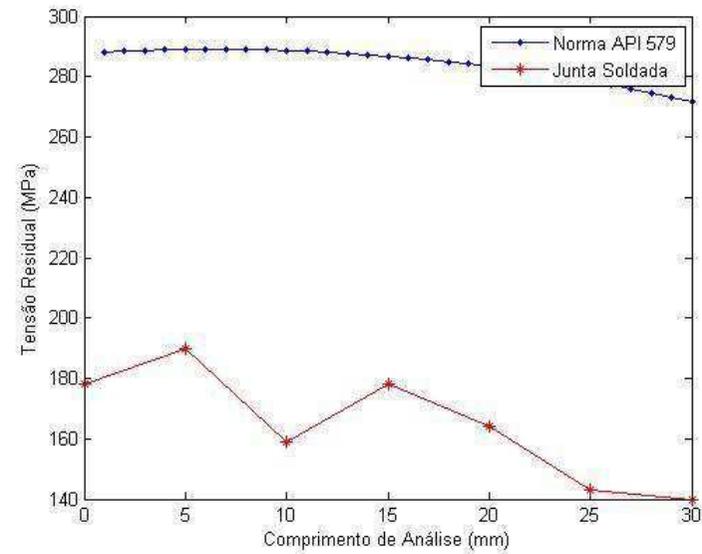


# Junta Soldada 10

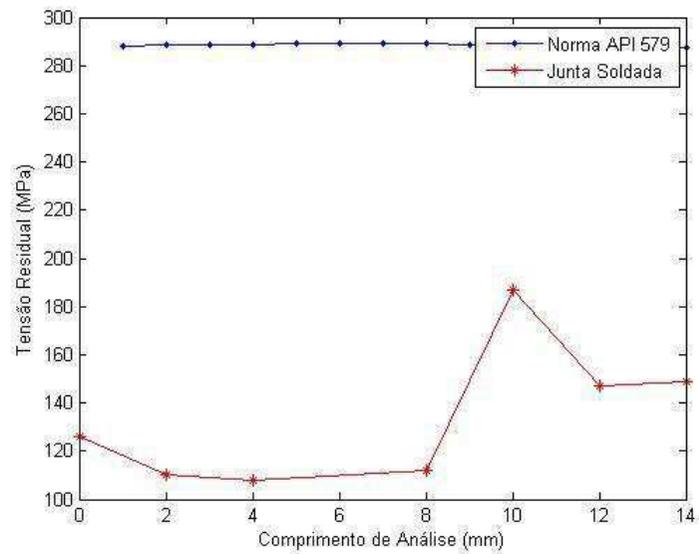
### Transversal Linha1



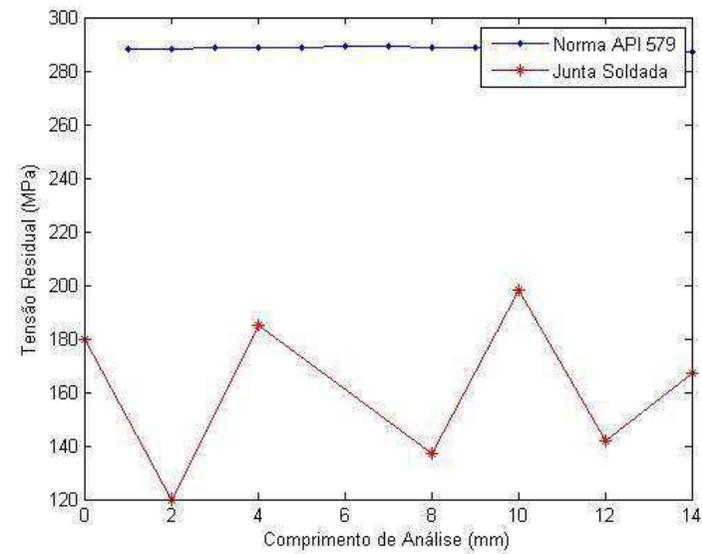
### Transversal Linha2



### Longitudinal Linha1

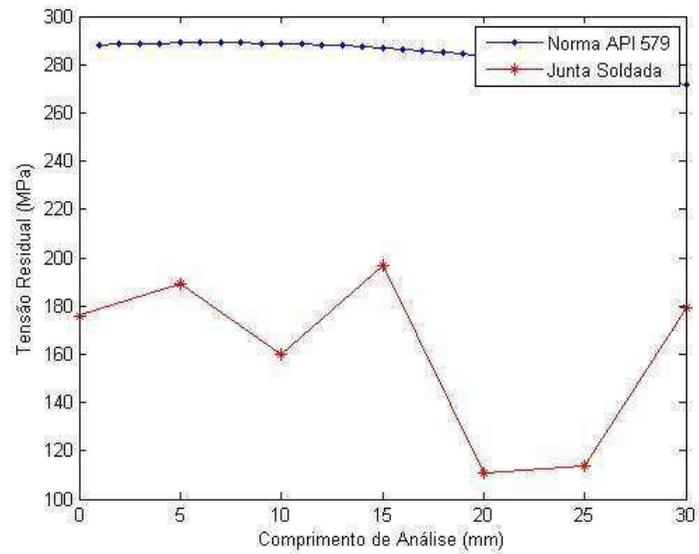


### Longitudinal Linha 2

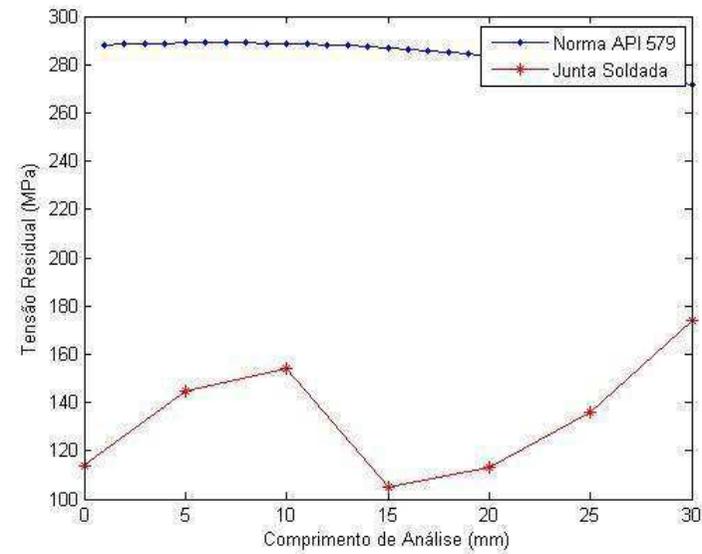


# Junta Soldada 11

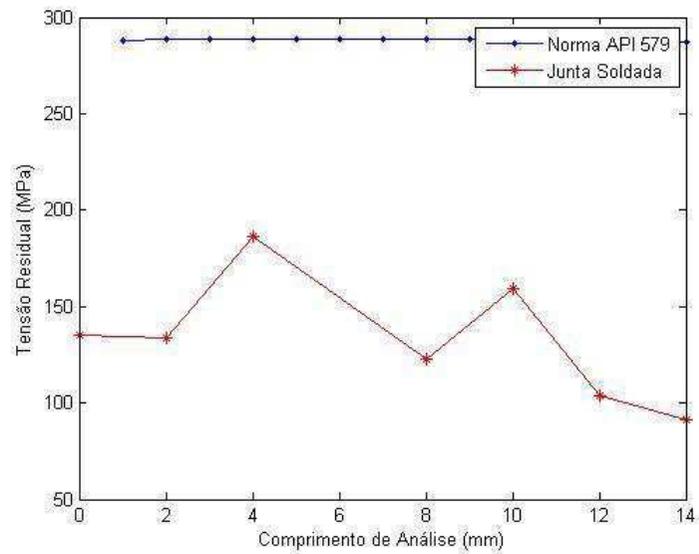
### Transversal Linha1



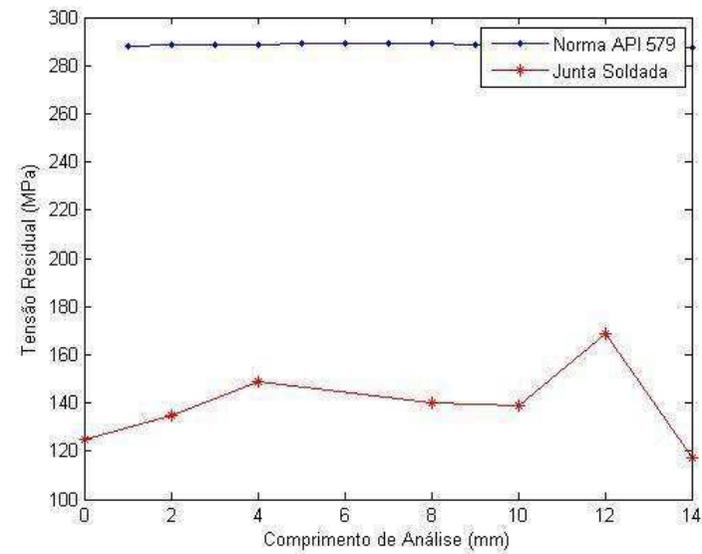
### Transversal Linha2



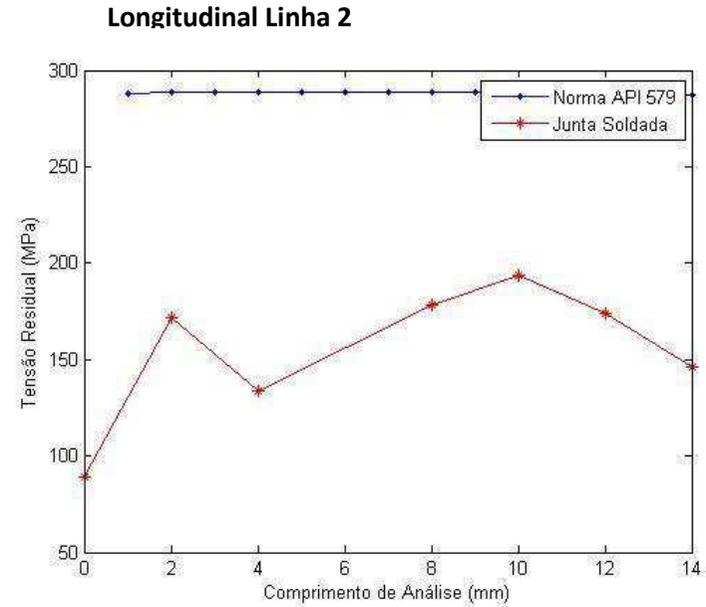
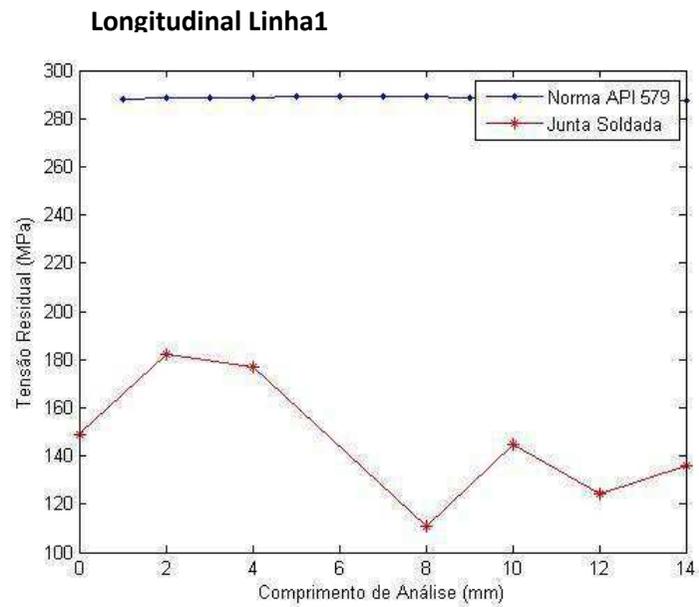
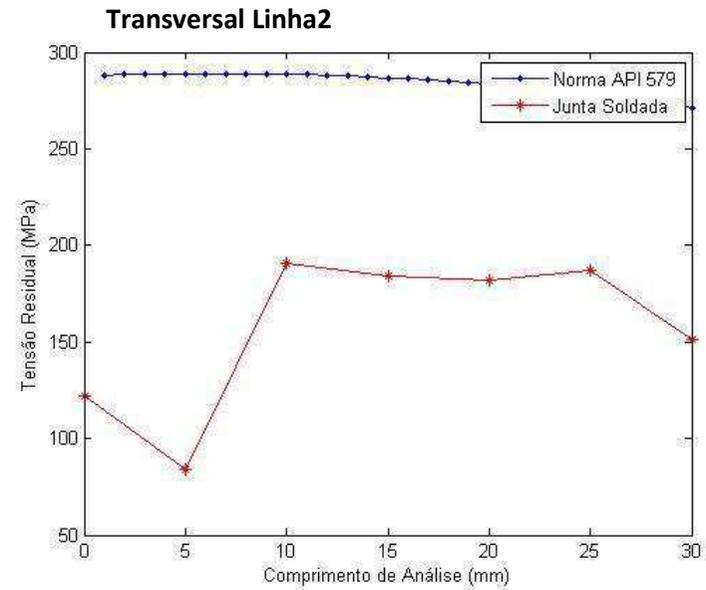
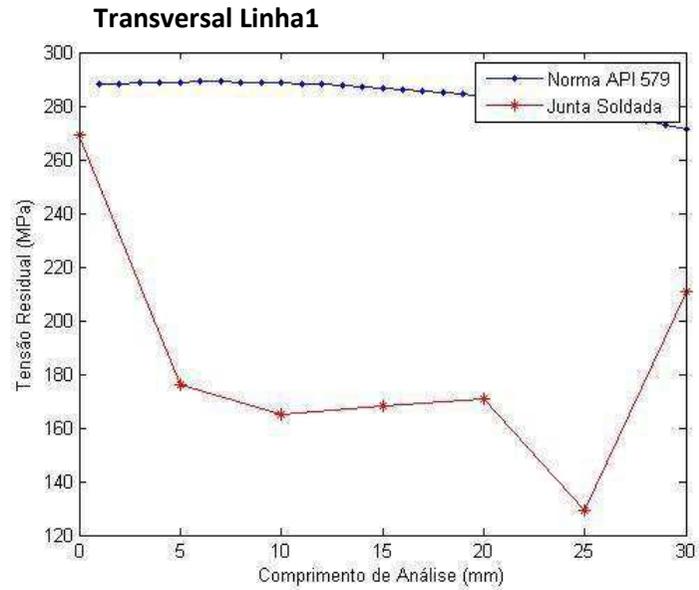
### Longitudinal Linha1



### Longitudinal Linha 2



# Junta Soldada 12



## ANEXO – PONTOS DE PORCENTAGEM DA DISTRIBUIÇÃO F, 5%.

V1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	25	30
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	242,98	243,90	245,95	248,02	249,05	249,26	250,10
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,46
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74	8,70	8,66	8,64	8,63	8,62
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,94	5,91	5,86	5,80	5,77	5,77	5,75
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68	4,62	4,56	4,53	4,52	4,50
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,94	3,87	3,84	3,83	3,81
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57	3,51	3,44	3,41	3,40	3,38
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28	3,22	3,15	3,12	3,11	3,08
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07	3,01	2,94	2,90	2,89	2,86
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91	2,85	2,77	2,74	2,73	2,70
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79	2,72	2,65	2,61	2,60	2,57
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69	2,62	2,54	2,51	2,50	2,47
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60	2,53	2,46	2,42	2,41	2,38
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,57	2,53	2,46	2,39	2,35	2,34	2,31
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48	2,40	2,33	2,29	2,28	2,25
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,46	2,42	2,35	2,28	2,24	2,23	2,19
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,38	2,31	2,23	2,19	2,18	2,15
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,27	2,19	2,15	2,14	2,11
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31	2,23	2,16	2,11	2,11	2,07
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28	2,20	2,12	2,08	2,07	2,04
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,18	2,10	2,05	2,05	2,01
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23	2,15	2,07	2,03	2,02	1,98
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,24	2,20	2,13	2,05	2,01	2,00	1,96
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,22	2,18	2,11	2,03	2,01	2,00	1,96
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,09	2,01	1,96	1,96	1,92
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,07	1,99	1,95	1,94	1,90
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,17	2,13	2,06	1,97	1,93	1,92	1,88
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,04	1,96	1,91	1,91	1,87
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,03	1,94	1,90	1,89	1,85
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,13	2,09	2,01	1,93	1,89	1,88	1,84
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,49	2,37	2,29	2,22	2,16	2,11	2,07	2,04	1,96	1,88	1,83	1,82	1,79
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00	1,92	1,84	1,79	1,78	1,74