



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



**MARIA DO SOCORRO SILVA SOUSA LIMA**

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS DE JUNTAS SOLDADAS**  
**DO AÇO API 5L X80 UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

**CAMPINA GRANDE**

**2013**

MARIA DO SOCORRO SILVA SOUSA LIMA

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS DE JUNTAS SOLDADAS  
DO AÇO API 5L X80 UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Theophilo Moura Maciel

**CAMPINA GRANDE**

**2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L732a Lima, Maria do Socorro Silva Sousa.  
Avaliação das tensões residuais de juntas soldadas do aço API 5L X80 utilizado na indústria de petróleo / Maria do Socorro Silva Sousa Lima. – Campina Grande, 2013.  
80 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel".

Referências:

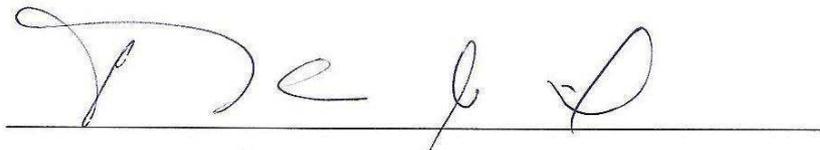
1. Soldagem. 2. Aço API 5L X80. 3. Junta Soldada. 4. Tensão Residual. 5. Microestrutura. I. Maciel, Theophilo Moura. II. Título.

CDU 621.791(043)

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DO AÇO API  
5LX80 UTILIZADO EM TUBULAÇÕES NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO.**

**MARIA DO SOCORRO SILVA SOUSA LIMA**

Dissertação Aprovada em 28/02/2013 pela banca examinadora constituída dos  
seguintes membros:



Dr. Theophilo Moura Maciel

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marco Antônio dos Santos

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Walman Benício de Castro

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

## **AGRADECIMENTO**

Há tantos a agradecer...

Primeiramente a Deus por ter me concedido a vida e ao longo dela ter colocado pessoas maravilhosas no meu caminho.

A minha família, que nos momentos de minha ausência dedicados a este trabalho, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Aos meus amigos e amigas, que fortaleceram laços de igualdade, num ambiente fraterno e respeitoso. Jamais lhes esquecerei!

Ao Professor e orientador Dr. Theophilo Moura Maciel pelo qual mantenho respeito e admiração, agradeço não só por seu apoio incentivo e orientação mais também, pela paciência demonstrada no decorrer do trabalho.

Aos Professores Dr. Marco Antonio dos Santos, Dr. Marcelo Bezerra Grilo, Dr. João Baptista da Costa Agra Melo e Manassés da Costa Agra Mello pelo apoio permanente e amizade.

Ao Professor Dr. Juscelino de Farias Maribondo pela motivação permanente, colaboração e amizade.

A Raphael Henrique, Mariana Karla, Adriana Bispo, Lívia Marques, Verônica Pinto, Siderley Fernandes, Bruno Allysson e Marcos Mesquita pelos seus auxílios e ensinamentos. Valorosas contribuições ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos que tanto se dedicaram a mim, não somente por terem ensinado, mas por terem me feito aprender.

Meu eterno agradecimento.

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as tensões residuais em três juntas soldadas em um aço API 5L X80, utilizando processos de soldagens manuais já consolidados pela norma API. Foram analisados os níveis de tensões residuais transversais e longitudinais que se desenvolveram nas superfícies superiores e inferiores das mesmas. As amostras foram soldadas usando a técnica de múltiplos passes, empregando o processo SMAW e a combinação dos processos GTAW e SMAW. Na soldagem foram empregados consumíveis de diferentes especificações. As medições das tensões residuais foram realizadas por Difractometria de Raios-X, utilizando-se um difratômetro portátil e o respectivo software para a análise dos resultados. Com o auxílio dos gráficos das tensões residuais buscou-se justificar o comportamento das tensões residuais relacionando-as as microestruturas.

Na região superior das juntas soldadas foi observado que quanto mais elevado foi o aporte térmico, mais compressivos foram os níveis de tensões residuais transversais, e mais deslocados ficaram os picos de tensões residuais trativas. O comportamento compressivo do metal de solda na superfície superior poderia estar associado à formação de microestruturas aciculares que é tenaz e capaz de acomodar melhor as tensões residuais. Na região inferior das juntas soldadas foi observado que quanto mais elevado foi o aporte térmico, mais trativas foram os níveis de tensões residuais na região do metal de solda e menores foram os níveis de tensões residuais na zona termicamente afetada (ZTA). Para os parâmetros de soldagem utilizados, a amostra ER1, que teve todos os passes soldados com o processo SMAW foi a que apresentou os menores níveis de tensões residuais.

**Palavras Chave:** Aço API 5L X80, Juntas soldadas, Tensão Residual, Microestrutura.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the residual stresses in three welded joints in a steel API 5L X80 , using manual welding processes already established by the API standard . The levels of transverse and longitudinal residual stresses developed in the upper and lower surface thereof , were analyzed. The samples were welded using the multi-pass technique, using the process combination of the GTAW and SMAW and SMAW processes. In welding consumables of different specifications were used. The residual stress measurements were carried out by X-ray diffractometry using a portable diffractometer and its software to analyze the results. With the aid of the graphs of residual stresses is sought to justify the behavior of the residual stresses relating them to the microstructures. In the upper region of the welded joints was observed that the higher was the more compressive heat input levels are transverse residual stresses, and more peaks were shifted from tensile residual stresses. The compressive behavior of weld metal on the top surface could be associated with the formation of acicular microstructures which is tenacious and able to better accommodate the residual stresses. In the lower region of the welded joints was observed that the higher the heat input was more trative were the levels of residual stress in the weld metal region and were lower levels of residual stresses in the heat affected zone (HAZ). For the welding parameters used, the ER1 sample had all passes welded with the SMAW process was that and had the lowest levels of residual stresses.

**Keywords:** API 5L X80 steel, welded joint, Residual Stress, microstructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema do processo de soldagem SMAW .....	23
Figura 2	Esquema do processo de soldagem GTAW .....	29
Figura 3	Conjunto de três barras paralelas fixadas nas extremidades .....	31
Figura 4	Variação da tensão ( $\sigma$ ) em função do aquecimento da barra central. .....	32
Figura 5	Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras metálicas e no cordão de solda de uma junta de topo.....	33
Figura 6	Difração de raios-X para distância interplanar. ....	37
Figura 7	Tensão plana em uma superfície mostrando a mudança no espaçamento interplanar com a inclinação $\psi$ para tensão uniaxial $\sigma\varphi$ paralela a superfície.....	38
Figura 8	Dependência linear de $2\theta$ em relação a $\text{sen}^2\Psi$ .....	38
Figura 9	Curva plotada de uma função de Gauss para um pico de difração medido. ....	39
Figura 10	Fluxograma das etapas deste trabalho de pesquisa.....	42
Figura 11	Ilustração da área reservada para realização dos ensaios.....	43
Figura 12	Croqui e dimensões das chapas.....	44
Figura 13	Geometria do chanfro .....	45
Figura 14	Representação esquemática dos passes nas juntas soldadas das amostras ER1, TIG1 e TIG2. ....	46
Figura 15	Esquema da célula eletrolítica. ....	48
Figura 16	Localização das regiões de análise das tensões residuais.....	49
Figura 17	Foto do difratômetro portátil utilizado na análise de tensões residuais. ....	50
Figura 18	Fotos das máquinas utilizadas para preparação de corpos de prova para realização de ensaios metalográficos. ....	51
Figura 19	Mapeamento dos corpos de prova para realização dos testes de dureza.....	53
Figura 20	Perfis das tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da superfície superior da amostra ER1.....	55
Figura 21	Perfis das tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da superfície superior da amostra TIG1.....	56

<b>Figura 22 Perfis das tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da superfície superior da amostra TIG2.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 23 Perfis de tensões residuais longitudinais e transversais da superfície inferior da amostra ER1.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 24 Perfis de tensões residuais longitudinais e transversais da superfície inferior da amostra TIG1.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 25..Perfis de tensões residuais longitudinais e transversais da superfície inferior da amostra TIG2.....</b>	<b>60</b>
<b>. Figura 26 Micrografias do metal de base (MB) como recebido.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 27 Microscopia ótica do passe de raiz das amostras ER1, TIG1 e TIG2. ....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 28 Microscópias óticas dos passes quente das amostras ER1, TIG1 e TIG2.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 29 Micrografias óticas dos passes de enchimento das amostras ER1, TIG1 e TIG2. ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 30 Microscopias óticas (MO) dos passes de acabamento das juntas das amostras ER1, TIG1 e TIG2. ....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 31 Perfis de dureza na seção transversal das amostras TIG1, TIG2 e ER1.....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos aços API 5L com especificações PSL1 e PSL2. ....	18
Tabela 2. Graus API típicos e aplicações dos aços API 5L.....	19
Tabela 3. Especificações de eletrodos revestidos conforme AWS.....	26
Tabela 4. Tipos de revestimento dos eletrodos revestidos.....	27
Tabela 5. Composição química do aço API 5L X80.....	40
Tabela 6. Composições químicas nominais dos consumíveis utilizados.....	41
Tabela 7. Classificação dos consumíveis quanto ao tipo de revestimento.....	41
Tabela 8. Combinações dos processos de soldagem e consumíveis em cada amostra e diferentes passes.....	45
Tabela 9. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem da amostra TIG1.....	47
Tabela 10. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem da amostra TIG2.....	47
Tabela 11. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem da amostra ER1.....	48
Tabela 12. Tensões residuais presentes na amostra ER1. ....	77
Tabela 13. Tensões residuais presentes na amostra TIG1. ....	78
Tabela 14. Tensões residuais presentes na amostra TIG2.....	79
Tabela 15. Valores de dureza – Junta TIG 1.....	80
Tabela 16. Valores de dureza - Junta TIG 2.....	81
Tabela 17. Valores de dureza - Junta ER 1.....	82

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
3.1	AÇOS ARBL	16
3.2	AÇOS API 5L X80	17
3.3	SOLDABILIDADE DOS AÇOS API 5L X80	19
3.4	SOLDAGEM	21
3.5	PROCESSOS DE SOLDAGEM	23
3.5.1	PROCESSO AO ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW)	23
3.5.2	PROCESSOS AO ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO DE TUNGSTÊNIO E COM PROTEÇÃO GASOSA (TIG OU GTAW)	28
3.6	TENSÕES RESIDUAIS	29
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
4.1	MATERIAIS	40
4.2	METODOLOGIA	42
4.2.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS (CORTE DAS CHAPAS E PREPARAÇÃO DOS CHANFROS)	44
4.2.2	SOLDAGEM DAS CHAPAS	45
4.2.3	ATAQUE ELETROLÍTICO	48
4.2.4	MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	49
4.2.5	ANÁLISE METALOGRÁFICA	50
4.2.5.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A ANÁLISE METALOGRÁFICA	50
4.2.5.2	MICROSCOPIA ÓTICA	52
4.2.5.3	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	52
4.2.6	ENSAIOS DE DUREZA	52
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>54</b>
5.1	DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS	54
5.2	AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA	62
5.3	AVALIAÇÃO DA DUREZA	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>77</b>

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Contextualização do problema

O óleo bruto, da sua extração até a transformação em produtos derivados passa por diversos processos químicos. O transporte e a distribuição desses importantes insumos são preferencialmente realizados através de sistemas integrados compostos por tubulações e dutos. Dependendo do produto que está sendo escoada em seu interior, essas tubulações recebem diferentes denominações, tais como gasodutos e oleodutos.

Estas tubulações e dutos devem ser fabricados com materiais que lhes proporcione excelentes propriedades mecânicas e integridade física, buscando de forma diminuir os riscos de que ocorram desastres que causem danos ao meio ambiente e aos seres humanos e, conseqüentemente, prejuízos às empresas dos segmentos de petróleo e gás.

Diante deste cenário, torna-se imprescindível que sejam utilizados aços que apresentem boa resistência mecânica e alta tenacidade, na fabricação de tubulações e acessórios, equipamentos e de elementos estruturais utilizados em todos os segmentos das indústrias petrolíferas.

Os materiais utilizados para a fabricação desses elementos devem possuir características que lhes proporcione além de excelentes propriedades mecânicas e a capacidade de resistir aos ataques químicos dos fluidos contidos no seu interior e agressividade do ambiente no qual está instalado, mantendo assim, a sua integridade física e a das instalações. Este é o caso, por exemplo, das tubulações que são utilizadas no transporte e na distribuição de petróleo e seus derivados, podendo estes, estarem no estado líquido ou gasoso.

Um grande desafio para os fabricantes de tubulações utilizadas na indústria petrolífera tem sido o de desenvolver materiais que apresentem propriedades mecânicas e físicas, tais como alta resistência mecânica, boa soldabilidade e baixa temperabilidade, para atender a crescente demanda mundial pelo uso de petróleo e seus derivados. Dentre os materiais utilizados na indústria do petróleo estão os aços classificados como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL). Esses aços são produzidos em atendimento aos requisitos da norma elaborada pelo American Petroleum Institute (API), a norma API 5L – Specification for Line Pipe (API 5L, 2007).

Tanto na fabricação como na construção, montagem e manutenção das tubulações destinadas ao transporte de petróleo e derivados, os processos construtivos mais empregados são os processos de soldagem. Para realizar a soldagem destas tubulações as recomendações e requisitos para a qualificação de soldadores e dos procedimentos de soldagem encontram-se na norma API 1104 – Weldings of Pipelines and Related Facilities (API 1104, 2008).

Entretanto, devido aos ciclos térmicos impostos aos materiais durante os processos de soldagem, tensões residuais podem surgir e permanecer nas juntas soldadas (MODENESI, 2001). Essas tensões residuais podem ser os elementos impulsionadores de mecanismos que provocam a fragilização das juntas soldadas e dos próprios metais de base, através da diminuição das propriedades mecânicas dos materiais, tais como o limite de resistência mecânica e o limite de escoamento. Outras tensões externas associadas a essas tensões podem acelerar o processo de surgimento de trincas (a quente e a frio), as fraturas por fadiga e o desgaste superficial dos componentes (SOARES, 2011).

A presença de tensões residuais de elevado nível pode comprometer a integridade física dos dutos, e a ruptura (rompimento) destes elementos podendo ter consequências catastróficas, uma vez que estes dutos transportam produtos que, em caso de vazamentos podem causar danos ao meio ambiente e ao ser humano (ALMEIDA, 2008).

O conhecimento dos níveis das tensões residuais presentes no metal de base e nas juntas soldadas, dos tubos de aços API 5L é de suma importância para a prevenção e eliminação dos danos que estas podem causar, bem como, para a definição dos processos de soldagem e dos parâmetros de soldagem a serem utilizados.

Portanto, através deste estudo observou-se a influência dos parâmetros de soldagem e do tipo de processo de soldagem sobre os níveis de tensões residuais presentes em juntas soldadas do Aço API 5L X80.

Espera-se que as informações técnicas apresentadas neste trabalho contribuam com os profissionais da área de soldagem na definição de processos e procedimentos de soldagem que provoquem os menores níveis de tensões residuais nas juntas soldadas.

## CAPÍTULO II

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1 Objetivo geral

Avaliar os níveis de tensões residuais presentes em juntas soldadas em aços empregados em tubulações da indústria de petróleo e gás, o aço API 5L X80.

#### 2.2 Objetivo específico

Avaliar o comportamento dos níveis de tensões residuais em juntas soldadas pelos processos manuais GTAW e SMAW.

Avaliar o efeito da energia de soldagem e da especificação de diferentes consumíveis sobre os perfis e níveis das tensões residuais presentes nas juntas soldadas.

Correlacionar os níveis de tensões residuais com aspectos metalúrgicos e mecânicos (microestrutura e dureza) das juntas soldadas.

## CAPÍTULO III

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar ao leitor as principais características dos aços API 5L, utilizados em tubulações de petróleo, a sua soldabilidade, alguns processos de soldagem e os consumíveis utilizados, as tensões residuais oriundas desses processos de soldagem e seus efeitos na junta soldada.

#### 3.1 Aços ARBL

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) apresentam na sua composição química, baixo teor de carbono e alguns elementos microligantes como Mo, Cr, Ni, Nb, Ti, V, B e Zr. Esses aços possuem microestrutura com grãos finos. Foram desenvolvidos com o objetivo de responder com boa tenacidade a baixas temperaturas, níveis relativamente altos de resistência mecânica e boa soldabilidade.

O processo empregado para produção desses aços é o termomecânico, que consiste em vários estágios de laminação com temperatura controlada, quantidade de redução pré-determinada em cada passe e uma temperatura de acabamento estabelecida, tudo isso associado a uma composição química cuidadosamente elaborada.

Durante a laminação, os grãos da austenita são deformados em uma temperatura onde a recristalização não ocorre, e procura-se a maior redução possível em intervalos de temperatura, antes do início da transformação da ferrita, para que a austenita se deforme sem recristalizar.

Os princípios metalúrgicos necessários no desenvolvimento dos aços ARBL, são:

- Reduzir o teor de carbono para melhorar a soldabilidade e a tenacidade à fratura.
- Diminuir o teor de impurezas (Enxofre e Fósforo) para melhorar a tenacidade e homogeneizar a chapa ao longo da espessura.

- Diminuir o tamanho de grão da bainita e/ou ferrita realizada através da adição de elementos de liga (Vanádio, Alumínio e Nióbio) e por algum tratamento termomecânico.
- Adição de Níquel, Cromo, Molibdênio e Cobre para a formação de solução sólida e endurecimento por precipitados, especialmente nos níveis de aços com maiores resistências mecânicas.

Portanto, os aços ARBL resultam de um balanço perfeito entre endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos microligantes associados a diferentes escalas de passes de temperaturas de laminação.

Esses aços encontram grande aplicação na fabricação de maquinarias pesadas, estruturas metálicas, embarcações, oleodutos e vasos de pressão.

### **3.2 Aços API 5L X80**

Os aços ARBL para tubulações na indústria do petróleo são classificados segundo a norma API. Quando são utilizados especificamente na fabricação de tubos destinados ao transporte (ou escoamento) de produtos seguem a classificação API 5L.

A norma API 5L classifica os aços de acordo com a sua composição química, o limite de escoamento e o limite de resistência a tração. A nomenclatura desses aços se dá pelos valores de seus limites de escoamento que são precedidos das letras A, B e X. Além dessa classificação, existem dois níveis que estabelece o emprego desses materiais. Para situações onde o uso não representa riscos, esses aços recebem a classificação denominada PSL1, e PSL2 em situações onde o uso do tubo representa risco de vida e/ ou ao meio ambiente.

A especificação PSL1 apresenta limites de resistência a tração e escoamento mínimos, enquanto a especificação PSL2 apresenta os limites de escoamento e resistência a tração mínimos e máximos, estabelecem requisitos obrigatórios de carbono equivalente, tenacidade à fratura, além de proibições a reparos por soldas.

Na Tabela 1 são apresentadas propriedades mecânicas de acordo com a norma API, para os aços API 5L com as especificações PSL1 e PSL2.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos aços API 5L com especificações PSL1 e PSL2.

	Limite de escoamento mínimo Ksi (MPa)		Limite de escoamento máximo Ksi (MPa)		Limite de resistência mínimo Ksi (MPa)		Limite de resistência máximo Ksi (MPa)	
	PSL1	PSL2	PSL1	PSL2	PSL1	PSL2	PSL1	PSL2
<b>A</b>								
<b>A25</b>	25(175)	-	-	-	45(310)	-	-	-
<b>A</b>	30(207)	-	-	-	48(331)	-	-	-
<b>B</b>	35(241)	-	-	-	60(414)	-	-	-
<b>X42</b>	42(290)	42(290)	-	72(496)	60(414)	60(414)	-	110(758)
<b>X46</b>	46(317)	46(317)	-	76(524)	63(434)	63(434)	-	110(758)
<b>X52</b>	52(359)	52(359)	-	77(531)	66(455)	66(455)	-	110(758)
<b>X56</b>	56(386)	56(386)	-	79(544)	71(490)	71(490)	-	110(758)
<b>X60</b>	60(414)	60(414)	-	82(565)	75(517)	75(517)	-	110(758)
<b>X65</b>	65(448)	65(448)	-	87(600)	77(531)	77(531)	-	110(758)
<b>X70</b>	70(483)	70(483)	-	90(621)	82(565)	82(565)	-	110(758)
<b>X80</b>	-	80(552)	-	100(690)	-	90(621)	-	120(827)

Fonte: API 5L, 2007.

De um modo geral, os aços utilizados na fabricação de tubulações para as indústrias de petróleo e gás podem ser divididos em grupos de acordo com o seu limite de escoamento e aplicação. Na Tabela 2 são apresentadas as características de três aços API 5L.

Tabela 2. Graus API típicos e aplicações dos aços API 5L.

<b>GRAU TÍPICO</b>	<b>Classe (LE) (mínimo)</b>	<b>USO</b>
API 5L X60	414 MPa	Dutos submetidos a médias e altas pressões onde a preocupação com a economia em peso é considerada.
API 5L X70	483 MPa	Dutos submetidos a altas pressões onde a economia em peso é importante para o projeto.
API 5L X80	552 MPa	Dutos submetidos a altas pressões onde a economia em peso é muito importante para o projeto.

Fonte: API 5L, 2007.

O aço utilizado neste trabalho de dissertação é o API 5L X80, com limite de escoamento de 80 Ksi (552 MPa) e é classificado como PSL2.

### 3.3 Soldabilidade dos aços API 5L X80

Um aço com boa soldabilidade apresenta após a soldagem, na região correspondente a junta soldada, propriedades metalúrgicas adequadas e compatíveis com as do metal de base, além de conferir boa resistência à iniciação da propagação de uma trinca quando em serviço, a partir de um defeito pré-existente.

Os fatores relevantes que influenciam na soldabilidade são:

- A composição química do metal base e do consumível;
- O procedimento de soldagem empregado;
- As transformações produzidas na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e,
- As tensões residuais geradas durante a soldagem.

A norma API não faz uma restrição severa em relação aos elementos de liga, mas é bem verdade que seus teores influenciam na temperabilidade e na dureza final do aço, sendo o carbono o elemento que dá a maior contribuição nesse efeito endurecedor.

Diante esta constatação, foram desenvolvidos, por vários metalurgistas, índices conhecidos como Carbono Equivalente (CE), com o objetivo de avaliar a relação da composição química do carbono e de cada elemento da liga no efeito da temperabilidade do aço. Esse índice é muito empregado para expressar a susceptibilidade de um aço à trinca a frio.

Costuma-se relacionar o aumento da soldabilidade com a diminuição do teor de carbono e com o valor de Carbono Equivalente.

Atualmente existem duas equações (Eq.1 e Eq.2), amplamente empregadas para a determinação do Carbono Equivalente dos aços ARBL, são elas:

$$CE_{(iiw)} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad \text{Eq. (1)}$$

e

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Eq. (2)}$$

O Carbono Equivalente CE (iiw) é um dos índices mais empregados e foi desenvolvido na década de 40 pelo IIW (International Institute of Welding). Se o valor é superior a 0,45%, diz-se que o aço é sensível á fissuração a frio e medidas apropriadas no procedimento de soldagem devem ser tomadas para evitar este tipo de falha.

O  $P_{cm}$  é conhecido como parâmetro do Carbono Equivalente ou fórmula de Ito-Bessyo. Este parâmetro foi desenvolvido na década de 60, no Japão, especialmente para os novos aços com teor de carbono mais baixo.

A norma API 5L especifica que para os aços com teor de carbono menor que 0,12% deve ser utilizada a Eq. 2 ( $P_{cm}$ ), e acima de 0,12%, a Eq. 1 ( $CE_{IIW}$ ).

Os aços API 5L X60, X65 e X70, segundo recomendação da norma API 1104, podem ser soldados com o processo ao arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) utilizando eletrodos celulósicos do tipo AWS E7010 e AWS E8010. Estes eletrodos apresentam como principais características a boa penetração, facilidade de soldar em todas as posições e a produção de cordões com propriedades compatíveis com as do metal de base, porém, como desvantagem confere elevado teor de hidrogênio a junta soldada. Para os aços X80 recomenda-se o uso de eletrodo básico, inclusive no passe de raiz (API 1104).

A literatura destaca a importância que se deve ter com relação ao controle da dureza na ZTA. Constatou-se que devido aos severos ciclos térmicos durante a soldagem ocorrem transformações microestruturais, crescimento de grão e formação de precipitados que contribuem potencialmente para o desenvolvimento de problemas do tipo trincamento a frio e corrosão sob tensão (SOUZA, 2011).

Uma forma de minimizar esses efeitos e obter melhores estruturas na região de crescimento de grãos (região de grãos grosseiros) é o controle da temperatura de interpasses na soldagem manual com eletrodo revestido básico e um pós-aquecimento (SILVA, 2009).

Na avaliação do grau de soldabilidade dos aços ARBL, além do índice de Carbono Equivalente deve-se levar em consideração o teor de hidrogênio difusível, a estrutura metalúrgica formada e o nível de tensões residuais presentes.

Portanto, a soldabilidade dos aços API 5L X80 vai depender do emprego dos consumíveis adequados (com baixo índice do carbono equivalente), dos processos e procedimentos de soldagem adotados (em conformidade com normas já consolidadas), das condições ambientais e da qualidade da mão de obra.

### **3.4 Soldagem**

A soldagem é um processo que visa a união localizada de materiais, similares ou não, de forma permanente, baseada na ação de forças em escala atômica semelhantes às existentes no interior do material, com ou sem metal de adição,

destacando-se como a forma mais importante de união permanente de peças usadas industrialmente.

Existem basicamente dois grandes grupos de processos de soldagem.

- O primeiro se baseia no uso de calor, aquecimento e fusão parcial das partes a serem unidas, e é denominado processo de soldagem por fusão.
- O segundo conhecido por soldagem por pressão ou de soldagem no estado sólido se baseia na deformação localizada das partes a serem unidas, que pode ser auxiliada pelo aquecimento dessas até uma temperatura inferior à temperatura de fusão.

Os processos de soldagem tem um amplo campo de aplicação, incluindo, entre outros a indústria naval, fabricação e montagem de estruturas metálicas, fabricação de equipamentos de uso geral, fabricação e montagem de tubulações, usinas hidrelétrica, componentes nucleares e demais atividades industriais. Além de ser amplamente utilizada na fabricação a soldagem é empregada em grande escala em serviços de reparo e manutenção.

Diante da grande diversidade de aplicação busca-se obter, a cada dia, a evolução dos processos de soldagem, o desenvolvimento de melhores procedimentos, o conhecimento dos aspectos físicos e metalúrgicos envolvidos, bem como, o desenvolvimento de métodos confiáveis de ensaio para avaliação das juntas soldadas.

Dentre os efeitos metalúrgicos intrínsecos aos processos de soldagem, diversos estudos identificaram o surgimento de tensões residuais. Ainda, segundo estes estudos, caso elas não sejam tratadas poderão ser responsáveis por falhas em equipamentos e estruturas metálicas. Conhecer o seu desenvolvimento, em alguns desses processos de soldagem que estão em conformidade com as normas API 5L, em juntas soldadas do aço API 5L X80 é um dos objetos de estudo deste trabalho.

### 3.5 Processos de Soldagem

Os processos mais empregados na soldagem de tubulações da indústria de petróleo e gás são: Processo ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding - SMAW), Processo com Gás Inerte e Eletrodo de Tungstênio (Tungsten Gas Inert - TIG) ou (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW), Processo ao Arco Submerso (Submerged Arc Welding - SAW), Processo ao Arco com proteção por gás e eletrodo consumível (Gas Metal Arc Welding -GMAW) e Processo ao Arco Elétrico com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW). Cada processo de soldagem tem suas vantagens e limitações, e o adequado balanço dessas características irá determinar suas aplicações típicas.

Neste estudo foram empregados os processos SMAW e GTAW.

#### 3.5.1 Processo ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW)

O processo SMAW consiste na união de metais na presença de um arame de material adequado, coberto com material fundente, e que é consumido através de um arco gerado entre a sua extremidade livre e o metal que se deseja soldar, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 Esquema do processo de soldagem SMAW



Fonte: ESAB

O arco é a fonte de energia necessária para promover a fusão, ele também auxilia na transferência do eletrodo fundido em forma de gota para a poça de fusão. O modo dessa transferência é função da corrente de soldagem, da composição química do revestimento e do ponto de fusão do eletrodo. Estas gotas serão finas e numerosas quando a corrente for de alta intensidade e com formato de glóbulos maiores no caso de baixas intensidades de corrente.

A qualidade da solda está ligada ao modo de transferência dessas gotas e do seu formato, de modo que, gotas menores promovem melhor transferência, conseqüentemente, melhores uniões soldadas.

O revestimento do eletrodo e as impurezas do material de base, na fusão, formam uma escória que flutua para a superfície e cobre a poça de fusão protegendo-a da contaminação atmosférica e também controlando a taxa de resfriamento.

A soldagem com eletrodos revestidos é utilizada na fabricação e montagem de diferentes equipamentos e estruturas, tanto em oficina como no campo, em operação manual ou mecanizada por gravidade. As fontes empregadas nesse processo de soldagem a arco elétrico pode ser corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA).

#### **3.5.1.1 Eletrodos**

Um eletrodo revestido é constituído por uma vareta metálica, a alma, recoberto por uma camada de fluxo, que é o revestimento. Possui um diâmetro entre 1,5 e 8 mm e comprimento entre 23 e 45 cm. Quando é empregado na soldagem por gravidade o comprimento é de 55 e 70 cm. A composição do revestimento tem um papel fundamental no processo, pois influencia na composição e nas propriedades

do metal de solda e atua diretamente de diferentes formas com diferentes funções, como:

- **Funções Elétricas** – atua como mal condutor, isola a alma do eletrodo evitando aberturas de arco laterais, orientando o arco para locais de interesse.  
O revestimento contém silicatos de sódio e potássio que ionizam a atmosfera do arco que facilita a passagem da corrente elétrica, dando origem a um arco estável.
- **Funções Físicas e Mecânicas** – fornece gases para formação da atmosfera protetora das gotículas do metal contra a ação do hidrogênio da atmosfera.  
Formam uma escória de material não metálico que protege o cordão da oxidação pela atmosfera normal, enquanto a solda está esfriando. Além de facilitar a soldagem nas diversas posições.  
Proporciona o controle da taxa de resfriamento.
- **Funções Metalúrgicas do Revestimento** - contribui com elementos de liga, de maneira a alterar as propriedades da solda.  
Dissolve óxidos e contaminações na superfície da junta;  
Realiza e possibilita reações de refino metalúrgico, tais como desoxidação, dessulfuração, etc.

#### **3.5.1.1.1 Classificação dos eletrodos**

Os eletrodos são classificados de acordo com sistemas propostos por diferentes sociedades (AWS, DIN, AFNOR, ABN, ISO e etc.) baseados nas características operacionais e aplicação para os diferentes materiais. Na Tab.3 apresenta a classificação segundo a American Welding Society (AWS).

Tabela 3. Especificações de eletrodos revestidos conforme AWS.

Cificação	Tipo de eletrodo
AWS A5.1	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços ao carbono
AWS A5.3	Eletrodos revestidos para soldagem a arco do alumínio e suas ligas
AWS A5.4	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços inoxidáveis
AWS A5.5	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aços de baixa liga
AWS A5.6	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de cobre e suas ligas
AWS A5.11	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de níquel e suas ligas
AWS A5.13	Eletrodos revestidos para revestimento por soldagem a arco
AWS A5.15	Eletrodos e varetas para soldagem do ferro fundido

Fonte: Soldagem Fundamentos e Tecnologia (2009)

As Normas AWS, para eletrodos para soldagem de aços, caracterizam o eletrodo pela letra E inicial e em seguida pelo número de 4 ou 5 algarismos, onde a primeira parte se refere à resistência do material em unidades de mil libras por polegadas quadrada variando de 60 a 120. O penúltimo algarismo refere-se à posição de soldagem, onde 1 corresponde a soldagem em todas as posições e o 2 refere-se a posição plana e horizontal.

O último algarismo refere-se à característica da corrente e ao revestimento.

Os tipos revestimentos dos eletrodos revestidos podem ser classificados de acordo com a sua formulação, como apresentado na tabela 4.

Tabela 4. Tipos de revestimento dos eletrodos revestidos.

<b>TIPO DE REVESTIMENTO</b>	<b>CARACTERISTICA</b>	<b>APLICAÇÃO</b>
<b>CELULÓSICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• não pode ser ressecados,</li> <li>• alta penetração,</li> <li>• pouca escória, facilmente destacável,</li> <li>• gera grande volume de respingos,</li> <li>• elevada quantidade de material orgânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• soldagem fora da posição plana;</li> <li>• soldagem circunferencial de tubulações;</li> <li>• passe de raiz em geral</li> </ul>
<b>RUTÍLICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• média penetração</li> <li>• consumível de uso geral</li> <li>• escória de rápida solidificação, facilmente destacável,</li> <li>• fácil manipulação;</li> <li>• produz cordão de bom aspecto, com média ou baixa penetração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• uso geral</li> </ul>
<b>BÁSICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• boas propriedades mecânicas;</li> <li>• penetração média</li> <li>• não possui substancia orgânica;</li> <li>• altamente higroscópicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• soldagem de grande espessura;</li> <li>• estrutura de alta rigidez</li> <li>• soldagem de aço com composição desconhecida;</li> </ul>

Os consumíveis empregados nesse trabalho respondem a norma API 1104 e foram eles: AWS E6010, AWS E8010 e AWS E9010 classificados como eletrodo revestido celulósico e os AWS E8018-G e AWS E9018-G estes classificados como eletrodo revestido básico.

### 3.5.2 Processos ao Arco Elétrico com Eletrodo de Tungstênio e com Proteção Gasosa (TIG ou GTAW)

O processo de soldagem TIG também conhecido como GTAW consiste na união de peças metálicas aquecidas e fundidas por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de Tungstênio, não consumível, e o metal de base, envolto em gás inerte, geralmente Argônio, podendo ser usado também Hélio ou misturas destes dois gases com  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . O gás inerte atua protegendo o arco e a poça de fusão dos contaminantes da atmosfera.

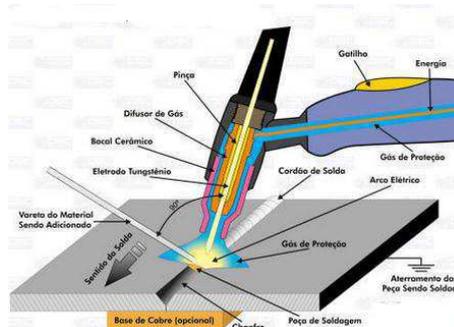
A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição e quando utilizado, é fundido diretamente na poça de fusão. O processo GTAW pode ser classificado em duas categorias:

- GTAW manual, em que o arame de enchimento (metal de adição) é alimentado manualmente na poça de fusão;
- GTAW semi ou totalmente automatizado, em que o arame de enchimento metal de adição é introduzido na poça de fusão por meio de um alimentador mecanizado.

A soldagem GTAW pode ser feita utilizando corrente contínua (CC- ou CC+) ou corrente alternada (CA). Cada uma dessas alternativas irá influenciar fortemente os mecanismos de emissão de elétrons e conseqüentemente as características de soldabilidade.

Podem-se citar como principais vantagens do processo GTAW a excelente qualidade dos depósitos, o bom acabamento superficial, o menor aquecimento do conjunto soldado, ausência de respingos, além da baixa sensibilização à corrosão intergranular dos conjuntos soldados. No entanto, o processo GTAW apresenta algumas limitações como: inadequado para soldagem de chapas espessas, baixa produtividade (devido à baixa taxa de deposição do material), é altamente dependente da habilidade do soldador quando da operação manual, além de dificuldade de utilização quando em presença de correntes de ar, impossibilitando muitas vezes as operações em campo.

Figura 2 Esquema do processo de soldagem GTAW



Fonte: [www.oxigenio.com](http://www.oxigenio.com)

### 3.6 Tensões Residuais

As tensões presentes em estruturas podem ser classificadas como tensões internas atuantes ou tensões residuais. As tensões atuantes surgem devido a esforços aplicados, enquanto que as tensões residuais permanecem após ter cessado o esforço externo aplicado.

Portanto, tensões residuais são tensões que se mantêm instaladas nos elementos de uma estrutura na ausência de cargas ou restrições. Segundo Ribeiro et al (2005) estas tensões quando presentes, são internas e auto-equilibrantes. Já a força e o momento ( $M$ ) resultantes destas tensões, devem ser nulos (MODENESI, 2008).

As tensões residuais atuam em, praticamente, todas as peças rígidas, metálicas ou não, sua ocorrência é praticamente inevitável. Elas geralmente surgem durante os tratamentos mecânicos, termomecânicos e térmicos dos processos de fabricação sempre que uma dada região de um material é deformada elásticamente ou plasticamente de modo não homogêneo fazendo surgir incompatibilidades do estado de deformação. Essas tensões influenciam substancialmente nas características de resistência mecânica e do funcionamento dos elementos de uma estrutura.

Os materiais, amostras ou elementos de uma estrutura contendo tensões residuais não evidenciam de forma visível a sua presença, sendo preocupante o desconhecimento de sua magnitude, seu sinal e a sua distribuição.

### **3.6.1 Classificação das Tensões Residuais**

Costuma-se classificar as tensões residuais de acordo com o processo que a originou (origem térmica, mecânica) e segundo a extensão na qual estão auto-equilibradas.

Com base na extensão de atuação na peça, essas tensões residuais podem variar muito em escala, desde a ordem de grandeza atômica até grandes volumes de material, sendo classificadas em macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas, conforme MASUBUCHI (MASUBUCHI,1980).

As tensões macroscópicas são tensões ao longo de áreas relativamente extensas (vários grãos) e estão em equilíbrio ao longo de todo o material; qualquer interferência no equilíbrio de forças e momentos trará como consequência uma alteração das suas dimensões. Um exemplo típico de tensões desse tipo é normalmente encontrado em uma união soldada.

As tensões microscópicas também conhecidas como tensões intergranulares são aproximadamente homogêneas ao longo de um grão ou de parte de um grão. Muito presente nos materiais policristalinos cujos grãos possuem orientação aleatória. A causa dessas tensões em um metal com grãos orientados aleatoriamente é o escoamento. Grãos com planos de deslizamento coincidindo com os planos de tensão de cisalhamento máximo sofrem escoamento e mantem sua deformação plástica permanente, os não coincidentes, após a remoção da carga retomam a geometria original.

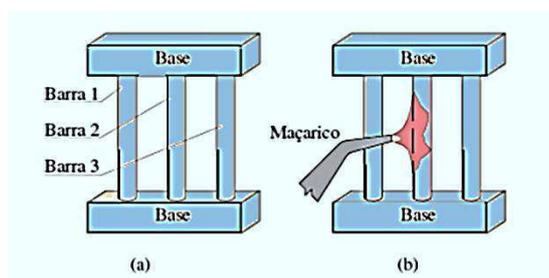
As tensões submicroscópicas são heterogêneas à escala de algumas distâncias interatômicas estando em equilíbrio só ao longo de regiões muito reduzidas de um grão de algumas células unitárias. São resultantes de imperfeições da rede cristalina e surgem devido a um ou mais deslocamentos das discordâncias na rede cristalina.

### **3.6.2 Origem das Tensões Residuais**

Para compreender o mecanismo de formação das tensões residuais por efeito térmico será adotado um esquema de um conjunto de três barras fixadas em suas extremidades com barras de maiores dimensões, conforme apresentado na Figura 3.

Considerando que o sistema é constituído de um mesmo material e que as três barras paralelas possuem mesmas dimensões. Quando as três barras são aquecidas uniformemente, sobre condições controladas, elas se dilatarão e em seguida se contrairão de maneira uniforme e não induzirão em suas estruturas nenhuma tensão. Porém, se esse aquecimento for localizado na barra c, se formará a partir daí em gradiente térmico que dependendo do valor da temperatura vai promover maior ou menor dilatação na barra central levando a mesma a um estado de compressão.

**Figura 3 Conjunto de três barras paralelas fixadas nas extremidades**



(a) Conjunto de barras (b) Barra 2 em aquecimento

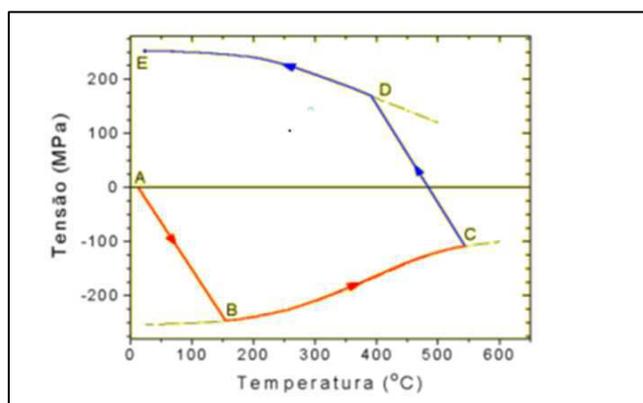
Fonte: Modenesi (2001).

Para melhor compreensão da evolução dessas tensões na Barra 2 a Figura 4 relaciona as tensões em função da temperatura.

O ponto A, indica o nível das tensões internas na Barra 2 que é nulo, quando a temperatura é ambiente. À medida que a barra é aquecida e a temperatura vai aumentando ela começa a se expandir, porém é limitada pela ação das barras transversais em suas extremidades e pelas duas das laterais, porque permaneceram na temperatura ambiente. A Barra 2 será submetida a esforços de compressão que aumentam de acordo com a elevação da temperatura. Portanto, no segmento AB a

barra deforma-se elasticamente até atingir o limite de escoamento em compressão (ponto B).

Figura 4 Variação da tensão ( $\sigma$ ) em função do aquecimento da barra central.



Fonte: Modenesi (2001).

Como o aquecimento é mantido, a partir do ponto B a barra deforma-se plasticamente em compressão. A deformação plástica leva a uma redução do seu comprimento e um aumento em sua seção transversal que é compensado pela dilatação térmica. O aumento da temperatura na região plástica diminui o nível de tensão interna, que pode ser observado no segmento BC.

No ponto C, o aquecimento é retirado e a barra está submetida a esforços de compressão da ordem do limite de escoamento em compressão na temperatura do final do aquecimento.

A barra central durante o resfriamento se contrai termicamente e as tensões de compressão presentes começam a diminuir, até se anular para uma dada temperatura acima da temperatura inicial, ponto D.

Durante o resfriamento a Barra 2 tentará se contrair, mas como diminui de tamanho durante a deformação plástica, no aquecimento, será restringida pela ação das barras transversais em suas extremidades e as duas laterais. Assim, a barra central estará sobre esforço de tração e uma deformação elástica crescente até atingir o limite de escoamento em tração, ponto D. Ultrapassando o limite de

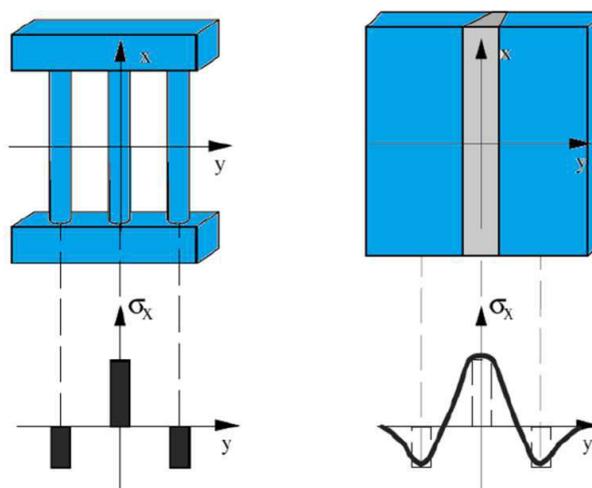
escoamento em tração, a barra passa a se deformar plasticamente em tração, até atingir a temperatura ambiente, ponto E.

Portanto, para uma barra, sobre condições de restrição de barras laterais, que inicialmente estava isenta de tensões, após submeter-se a um aquecimento localizado e crescente desenvolve no seu interior tensões residuais da ordem do limite de escoamento a tração e as barras laterais estão sujeitas a tensões compressivas para manter o equilíbrio entre elas.

Da descrição acima pode ser feita uma analogia do que acontece durante a soldagem de peças metálicas. A barra central atua como se fosse o cordão de solda e região adjacente (ZTA), as duas barras nas laterais simulam as regiões mais afastadas correspondem ao metal de base.

Por este raciocínio, pode-se esperar como consequência da operação de soldagem, o desenvolvimento de tensões residuais de tração na região da solda (cordão de solda e ZTA) e de tensões de compressão no metal de base. A Figura 5 compara, esquematicamente, a distribuição de tensões residuais na montagem das barras com a esperada em uma junta soldada

Figura 5 Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras metálicas e no cordão de solda de uma junta de topo



Fonte: Modenesi (2001).

Muitas falhas que ocorrem em estruturas e/ou equipamentos em que se utiliza a soldagem no processo de fabricação são devido a fadiga, trincas induzidas por hidrogênio e corrosão sob tensão que são intensificados quando existe a presença de um alto nível de tensão residual (FRANCIS *et al.*, 2007).

### **3.6.3 Efeito das Tensões Residuais sobre a resistência a fadiga**

Tensões residuais podem ter um efeito significativo sobre a vida em fadiga de componentes de engenharia (CHAMPOUX *et al.* 1988 *apud* WEBSTER & EZEILO, 2001). Em particular, tensões de tração próximas à superfície tendem a acelerar a iniciação, e crescimento, das fases que compõem o processo de fadiga enquanto que tensões compressivas próximas às superfícies prolongam a vida em fadiga. Para uma precisão maior em análise de fadiga é importante o conhecimento dos perfis de tensões residuais gerados pelos diferentes processos de fabricação (WEBSTER & EZEILO, 2001).

### **3.6.4 Efeito das Tensões Residuais sobre a trincas induzida pelo hidrogênio**

As trincas são as principais fontes de falhas em soldagem, sendo a sua propagação o mecanismo responsável por causar o colapso das estruturas ou componentes. No entanto, para que as trincas se formem e se propaguem, é de fundamental importância a presença de um nível elevado de tensões trativas, da ordem da tensão de escoamento. Se o material trabalha submetido a esforços desta natureza, torna-se necessária minimizar as 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 de trincas. Em alguns casos é possível que o material rompa somente sob o efeito das tensões residuais, sem qualquer ação de forças externas.

Um dos principais tipos de fratura em juntas soldadas são as trincas a frio. As trincas a frio em soldagem ocorrem como o resultado da simultânea presença de três fatores principais: hidrogênio no metal de solda, tensões residuais e microestrutura frágil (LANCASTER, 1999).

### 3.6.5 Efeito das Tensões Residuais sobre a corrosão sob tensão

Na corrosão sob tensão, tem-se a deterioração de materiais devido a ação combinada de tensões residuais ou aplicadas e meios corrosivos. Há uma ação sinérgica da tensão e do meio corrosivo, ocasionando fratura em um tempo mais curto do que a soma das ações isoladas de tensão e da corrosão. Diferentemente da corrosão sob fadiga, onde solicitações mecânicas são cíclicas ou alternadas, na corrosão sob tensão têm-se solicitações estáticas (GENTIL, 2007).

As tensões residuais que causam corrosão sob tensão são geralmente provenientes de operações de soldagem e deformações a frio, como estampagem e dobramento. A estrutura cristalina também influencia a corrosão sob tensão fraturante, assim o aço inoxidável ferrítico (cúbica de corpo centrado, *C.C.C.*) é muito mais resistente a corrosão sob tensão fraturante quando exposto a soluções aquosas de cloreto do que o aço inoxidável austenítico (cúbica de face centrada, *C.F.C.*) (GENTIL, 2007).

### 3.6.6 Métodos para determinação das tensões residuais

As técnicas de medição de tensões residuais dividem-se em destrutivas, e não destrutivas. São destrutivas as técnicas que, para colherem informações de deformação suficientes para a análise das tensões residuais existentes, comprometem ou impossibilitam o uso do espécime medido. As técnicas não-destrutivas não precisam da remoção material e não provocam qualquer tipo de dano no espécime para a medição de tensões residuais. Os principais métodos destrutivos são: furo cego, remoção de camadas e o método do seccionamento. Os principais métodos não-destrutivos são: difração de raios-x, ultra-som e difração de nêutrons.

Os princípios da tensometria por raios-X baseiam-se, por um lado, na teoria de difração de raios-X para materiais cristalinos, e por outro em mecânica dos materiais e, em particular, na teoria da elasticidade do corpo sólido. Os valores das tensões são definidos a partir da deformação da estrutura cristalina causada pela ação destas tensões. As deformações são medidas por sua vez, conforme a lei de

Bragg, através do deslocamento da linha de difração. Os princípios de técnica de dupla exposição, usada para medição de tensões utilizando o equipamento portátil descrito acima, baseiam-se em determinação de duas componentes de deformação:  $\varepsilon_{\varphi,\psi_1}$  e  $\varepsilon_{\varphi,\psi_2}$ . Se a deformação é determinada por (Eq. 3):

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi - \frac{\nu (\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad \text{Eq.(3)}$$

Então a diferença entre duas componentes da deformação é (Eq. 4):

$$\varepsilon_{\varphi,\psi_2} - \varepsilon_{\varphi,\psi_1} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{\varphi} (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1) \quad \text{Eq.(4)}$$

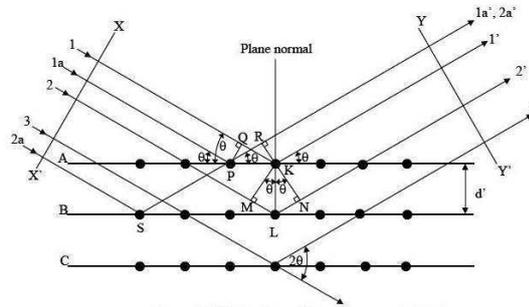
Onde  $E$  e  $\nu$  são constantes elásticas do material,  $\psi$  e  $\varphi$  são os ângulos polar e azimutal,  $\sigma_{\varphi}$  componente medida da tensão,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são tensões principais. Da Eq.(3), a componente  $\sigma_{\varphi}$  é igual a (Eq. 5):

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1 + \nu} \frac{\varepsilon_{\varphi,\psi_2} - \varepsilon_{\varphi,\psi_1}}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad \text{Eq.(5)}$$

A lei de Bragg é expressa por  $n\lambda = 2d \sin \theta$ .

A Figura 6 ilustra o espalhamento das ondas de raios-X devido à distribuição atômica regular do material cristalino. Ela expressa a relação entre a distância interplanar,  $d$ , o comprimento de onda da radiação de raios-X,  $\lambda$ , a ordem de difração  $n$ , e o ângulo de difração medido  $\theta$ .

Figura 6 Difração de raios-X para distância interplanar.



Fonte: National Physical Laboratory ( 2005).

Derivando a lei de Bragg, com  $n=1$ , obtém-se a Eq. (6):

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0) \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde  $d_{\varphi, \psi}$ ,  $d_0$  e  $\theta_{\varphi, \psi}$ ,  $\theta_0$  são distâncias interplanares e os ângulos de difração para materiais com e sem tensão respectivamente. Usando as Eq.(5) e (6), obtém-se a Eq. (7):

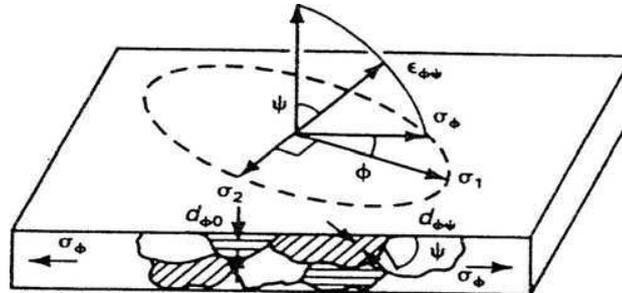
$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\cot \theta (\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad \text{Eq.(7)}$$

Logo, para  $n$  ângulos  $\psi$  o modelo se apresenta conforme Eq. (8):

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\cos \theta \Delta \theta}{\sin^2 \psi} \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde  $\sigma_{\varphi}$  é a tensão residual superficial;  $d_{\varphi, \psi}$  é o espaçamento interplanar definida pelos ângulos  $\Phi$  e  $\psi$ , obtida a partir da posição do pico de difração para um dado plano do retículo cristalino ( $hkl$ );  $d_0$  é o espaçamento interplanar livre de tensão do plano ( $hkl$ ) do retículo cristalino,  $E$  e  $\nu$  o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, respectivamente (Figura 7).

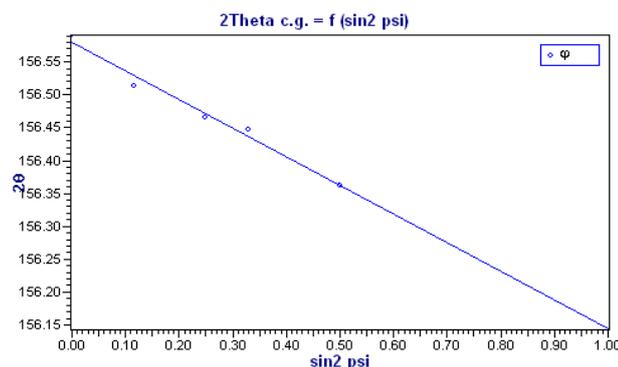
Figura 7 Tensão plana em uma superfície mostrando a mudança no espaçamento interplanar com a inclinação  $\psi$  para tensão uniaxial  $\sigma_\phi$  paralela a superfície.



Fonte: Prev y (1986).

O termo  $E/(1 + \nu)$  é uma constante. A relação linear na Eq. (5) para tensão residual implica que a plotagem da deformação do retículo cristalino contra  $\sin^2 \psi$  será uma reta, na qual o gradiente é função de  $\sigma_\phi E/\nu$ . O valor de  $\sigma_\phi$  pode ser calculado a partir do gradiente da linha reta para vários ângulos de inclinação  $\psi$ , conforme a Figura 8.

Figura 8 Dependência linear de  $2\theta$  em relação a  $\sin^2 \psi$ .

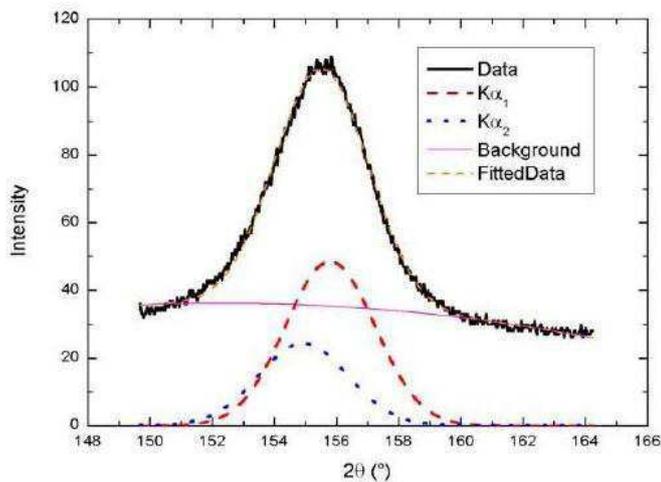


Fonte: Araújo et al. (2010)

Os valores aferidos de  $2\theta$  para os vários ângulos  $\psi$  são determinados através de modelos estatísticos de inferência a partir dos dados coletados. O modelo utilizado com maior frequência é o da distribuição normal e/ou o de aproximação da

binomial pela normal. Sendo assim, toda medida aferida apresentará uma média e respectiva variância ( $\sigma^2$ ). Um exemplo da aquisição de dados de pico de difração é mostrado na Figura 9.

Figura 9 Curva plotada de uma função de Gauss para um pico de difração medido.



Fonte: National Physical Laboratory (2005).

## CAPÍTULO IV

### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais, equipamentos e metodologia de ensaios utilizados para a análise das tensões residuais presentes nas amostras de juntas soldadas com chapas de aço API 5L X80.

#### 4.1 Materiais

##### 4.1.1 Metal de base

Foi utilizada uma chapa de aço API 5L X80 como metal de base. A chapa, de fabricação nacional, foi produzida pelo processo termomecânico na Usiminas. A composição química do aço é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Composição química do aço API 5L X80.

<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>	<b>%Al</b>	<b>%P</b>	<b>%V</b>	<b>%Cr</b>
0,084	1,610	0,230	0,035	0,011	0,015	0,135
<b>%Ni</b>	<b>%Mo</b>	<b>%S</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Nb</b>	<b>%Ti</b>	
0,011	0,170	0,011	0,029	0,000	0,000	

Fonte: Usiminas

##### 4.1.2 Consumíveis

Para a obtenção das juntas soldadas foram utilizados seis tipos de consumíveis como metal de adição. Nas duas juntas onde o passe de raiz foi realizado com o processo de soldagem GTAW, utilizou-se o Argônio como gás de proteção. As composições químicas dos consumíveis são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Composições químicas nominais dos consumíveis utilizados.

CONSUMÍVEIS	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Ni	%Mo	%Cr	%V
AWS ER70S-3	0,100	1,100	0,600						
AWS E6010	0,090	0,350	0,150	0,010	0,010				
AWS E8010	0,070	0,600	0,130			0,700	0,300		
AWS E9010	0,100	0,900	0,200	0,019	0,009	0,800	0,500	0,015	0,008
AWS E8018-G	0,060	1,100	0,400			1,650			
AWS E9018-G	0,050	1,100	0,500			1,600	0,200		

Fonte: ESAB

Na Tabela 7 é apresentada a classificação dos consumíveis em função do tipo de revestimento e a sua nomenclatura segundo as normas da AWS.

Tabela 7. Classificação dos consumíveis quanto ao tipo de revestimento.

TIPO	CLASSIFICAÇÃO AWS		
Eletrodo Revestido (vareta) Celulósico	E6010 $\Phi = 3,25\text{mm}$	E8010 $\Phi = 4,00\text{mm}$	E9010 $\Phi = 4,00\text{mm}$
Eletrodo Revestido (vareta) Básico	E8018-G $\Phi = 4,00\text{mm}$	E9018-G $\Phi = 4,00\text{mm}$	-
Consumível Arame	ER70S-3 $\Phi = 2,00\text{mm}$		

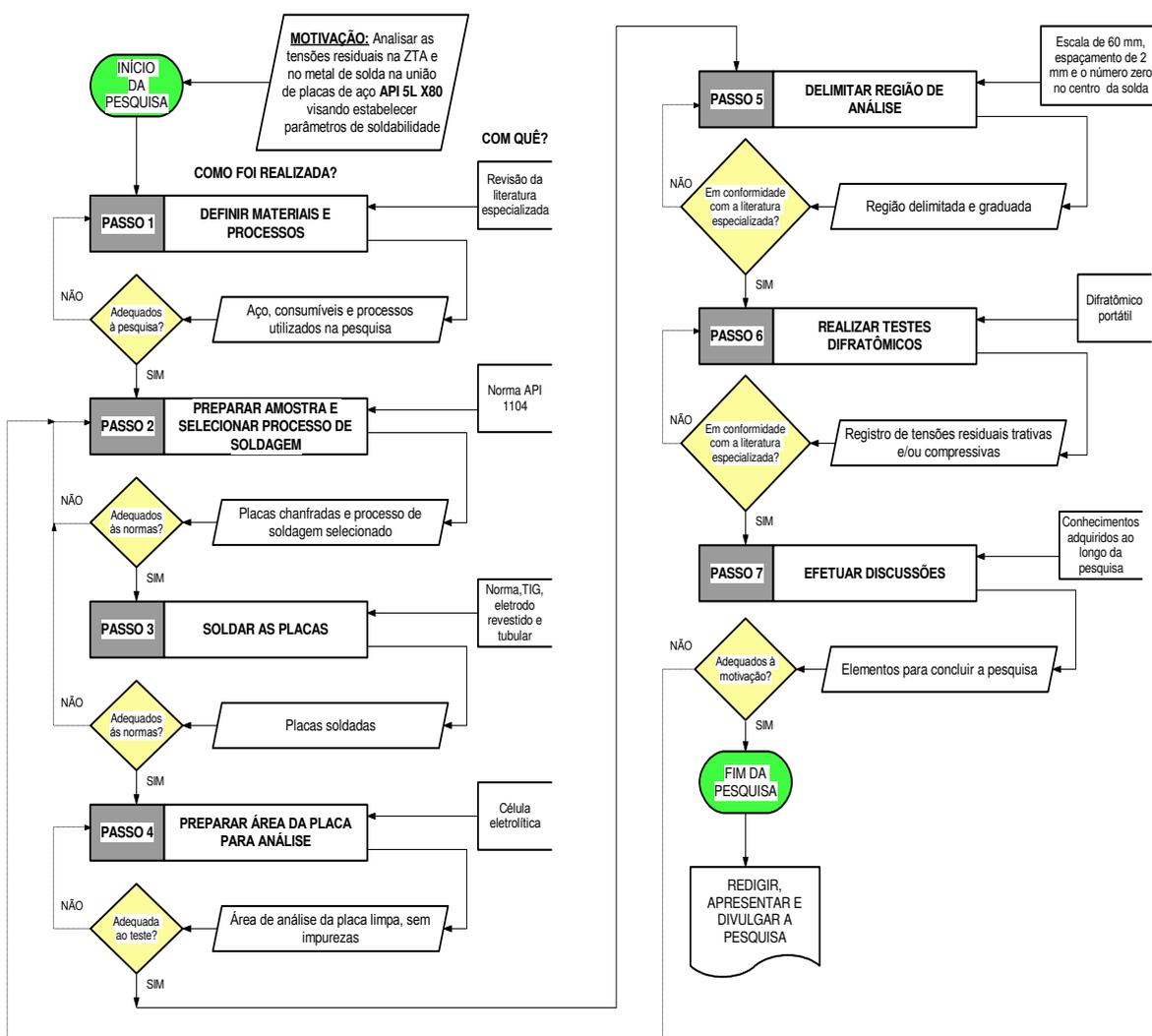
Fonte: ESAB

## 4.2 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho surgiu a partir da necessidade de se avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre o surgimento das tensões residuais nas regiões da zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda, em juntas soldadas do aço API 5L X80. O estudo se baseou na avaliação das surgidas em soldagens realizadas com os processos de soldagem SMAW e GTAW.

Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido em sete etapas, ou passos, bem definidos, conforme descrição a seguir e ilustração do fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10 Fluxograma das etapas deste trabalho de pesquisa



A primeira etapa consistiu em se realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema, utilizando-se para isso os recursos eletrônicos e físicos, ou seja, foram realizadas consultas em sites, livros, monografias e publicações especializadas. De posse do embasamento teórico adquirido foram feitas as definições dos materiais (de base e de adição), os parâmetros e processos de soldagem, os ensaios e as análises que seriam realizadas.

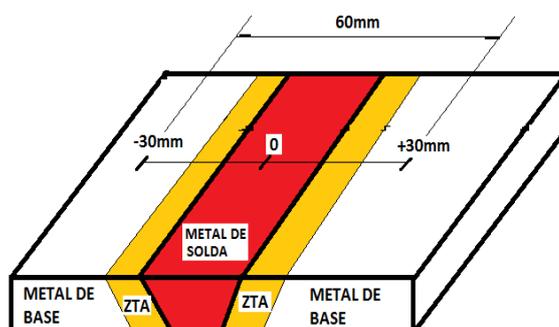
Na segunda etapa fez-se a seleção dos processos de soldagem e, em conformidade com as recomendações da norma API 1104, realizou-se a preparação das chapas para se executar as soldagens. O procedimento consistiu em cortar as placas e preparar os chanfros nas dimensões e configurações pré-definidas pela norma.

A terceira etapa consistiu em realizar a soldagem das placas chanfradas, em conformidade com a Norma API 1104. Na soldagem foram utilizados os processos GTAW (TIG) e SMAW (eletrodo revestido).

A quarta etapa consistiu na preparação das superfícies superior e inferior das chapas soldadas para realização de ensaios nestas áreas. Foram realizados ataques eletrolíticos, com o intuito de se obter superfícies limpas e sem impurezas.

Na quinta etapa delimitou-se a área reservada para a realização dos ensaios. Como se observa na Figura 11, a partir do centro do cordão de solda (definido como ponto zero) foi reservada uma extensão de 60 mm em cada chapa.

Figura 11 Ilustração da área reservada para realização dos ensaios.



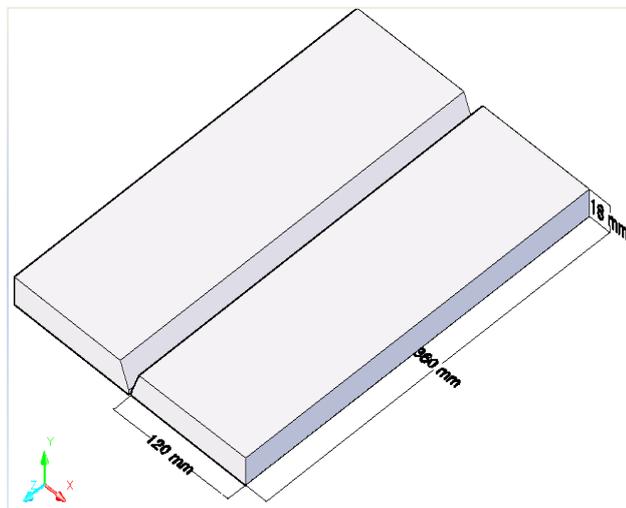
Na sexta etapa foram realizadas as medições das tensões residuais através de exames por difração de raios-X.

Na sétima etapa do trabalho foram analisados os dados obtidos em todos os ensaios executados as fases de discussão dos resultados obtidos.

#### 4.2.1 Preparação das amostras (corte das chapas e preparação dos chanfros)

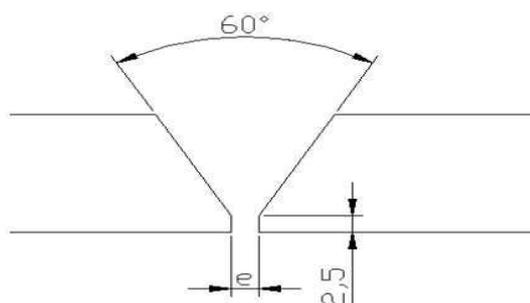
A chapa de aço API 5L X80, com espessura de 18 mm foi cortada nas dimensões de 120 mm x 360 mm, para preparação de três juntas, utilizando o processo oxi-corte. Esta operação foi realizada no Laboratório de Soldagem (LABSOL) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A Figura 12 apresenta a configuração final da chapa.

Figura 12 Croqui e dimensões das chapas.



A geometria do chanfro foi confeccionada segundo a recomendação da norma API 1104. A norma especifica que para o chanfro em **V** o ângulo do bisel deve ser de  $60^\circ$  e nariz de 2,5 mm. O espaçamento (abertura) entre as duas peças da junta correspondeu ao diâmetro do eletrodo ou vareta utilizado para realizar o passe de raiz. A Figura 13 apresenta a geometria do chanfro.

Figura 13 Geometria do chanfro



#### 4.2.2 Soldagem das chapas

Os processos de soldagem utilizados foram os processos manuais ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW - Shielded Metal Arc Welding) e o com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTAW – Gas Tungsten Arc Welding).

Os passes de raiz foram realizados com os processos SMAW e GTAW, os passes: quente, de enchimentos e de acabamentos pelos processos SMAW.

Foram obtidas três amostras, identificadas como ER1, TIG1 e TIG2. A combinação dos processos de soldagem e consumíveis empregados em cada amostra estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Combinações dos processos de soldagem e consumíveis em cada amostra e diferentes passes.

AMOSTRA		PASSE DE RAIZ	PASSE QUENTE	PASSE DE ENCHIMENTO	PASSE DE ACABAMENTO
ER1	CONSUMÍVEL PROCESSO	E6010 (SMAW)	E8010 (SMAW)	E8018-G (SMAW)	E8018-G (SMAW)
TIG1	CONSUMÍVEL PROCESSO	ER70S-3 (TIG)	E8010 (SMAW)	E8018-G (SMAW)	E8018-G (SMAW)
TIG2	CONSUMÍVEL PROCESSO	ER70S-3 (TIG)	E9010 (SMAW)	E9018-G (SMAW)	E9018-G (SMAW)

Conforme apresentado na Tabela 8, foram adotadas as seguintes seqüências de passes:

Para a soldagem da amostra ER1 todos os passes foram realizados com o processo SMAW. Foi utilizado o eletrodo AWS E6010 para o passe de raiz, para o passe quente o eletrodo AWS E8010, para os passes de enchimento e acabamento o eletrodo AWS E8018-G.

Para a soldagem da amostra TIG1 o passe de raiz foi realizado com o processo GTAW e para os demais passes foi utilizado o processo SMAW. Foi utilizada a vareta ER70S-3 para realizar o passe de raiz, o passe quente foi realizado com o eletrodo AWS E8010 e nos passes de enchimento e de acabamento foi utilizado o eletrodo AWS E8018-G.

Para a soldagem da amostra TIG2 o passe de raiz foi realizado com o processo GTAW e para os demais passes foi utilizado o processo SMAW. Foi utilizada a vareta ER70S - 3 para realizar o passe de raiz, para o passe quente foi utilizado o eletrodo AWS E9010 e nos passes de enchimento e de acabamento o eletrodo AWS E9018-G.

Para a obtenção das juntas soldadas, as chapas foram dispostas lado a lado, sem restrições. Foram executados oito passes para completar as juntas. A temperatura de interpasses foi de 175°C e as soldas foram realizadas com as chapas sem restrição. Para o calculo do aporte térmico o rendimento térmico da fonte de energia adotado para o processo SMAW foi de 0,8 e para o processo GTAW foi de 0,65 (MACHADO,2000).

Na Figura 14 é apresenta uma representação gráfica do numero de passes executados em cada junta soldada.

Figura 14 Representação esquemática dos passes nas juntas soldadas das amostras ER1, TIG1 e TIG2.



Nas Tabelas 9 , 10 e 11 são apresentados os parâmetros de soldagem adotados para a realização das juntas soldadas. As juntas soldadas foram executadas no Laboratório de Soldagem (LABSOL) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Tabela 9. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem da amostra TIG1.

Passes		I (A)	V (V)	v (mm/s)	E (KJ/cm)
1	Raiz	152,4	12,04	1,25	9,54
2	Quente	68,8	33,38	1,50	12,25
3	Enchimento	110,9	20,88	1,15	16,11
4	Enchimento	130,6	20,11	2,27	9,26
5	Enchimento	130,9	20,52	1,73	12,42
6	Acabamento	130,8	20,85	2,12	10,29
7	Acabamento	130,8	20,16	2,37	8,90
8	Acabamento	130,7	19,73	2,09	9,87

Tabela 10. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem da amostra TIG2.

Passes		I (A)	V (V)	v (mm/s)	E (KJ/cm)
1	Raiz	156,6	12,56	0,96	13,32
2	Quente	86,5	34,56	1,58	15,14
3	Enchimento	113,4	23,49	1,21	17,61
4	Enchimento	116,6	21,68	1,87	10,81
5	Enchimento	116,5	21,74	2,12	9,56
6	Acabamento	116,5	21,42	1,84	10,85
7	Acabamento	116,7	22,29	2,39	8,71
8	Acabamento	118,5	21,85	2,62	7,91

Tabela 11. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem da amostra ER1.

Passes		I (A)	V (V)	v (mm/s)	E (KJ/cm)
1	Raiz	54,2	35,76	1,00	15,51
2	Quente	81,8	33,17	1,54	14,10
3	Enchimento	160,5	21,78	1,78	15,71
4	Enchimento	165,5	21,20	2,72	10,32
5	Enchimento	165,3	22,19	2,74	10,71
6	Acabamento	165,1	22,40	2,50	11,83
7	Acabamento	165,4	22,19	2,89	10,16
8	Acabamento	165,3	22,52	3,14	9,48

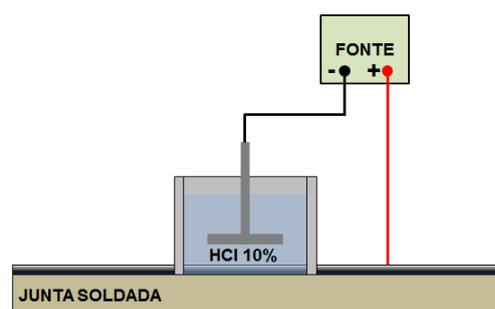
#### 4.2.3 Ataque eletrolítico

Com o objetivo de remover uma fina camada de oxido e de preparar as superfícies superior e inferior para a realização dos ensaios de difração de raios-x, as três amostras foram submetidas ao processo de desbaste eletrolítico. As amostras foram exposta a uma solução a base de HCl com 10% de concentração numa densidade de corrente de  $0,25 \text{ A/cm}^2$  por um tempo de 20 minutos.

Os ataques eletrolíticos foram realizados no Laboratório de Engenharia Eletroquímica do Departamento de Engenharia Química da UFCG.

A Figura 15 ilustra, de forma esquemática, a célula eletrolítica utilizada durante o ataque eletrolítico das juntas soldadas.

Figura 15 Esquema da célula eletrolítica.



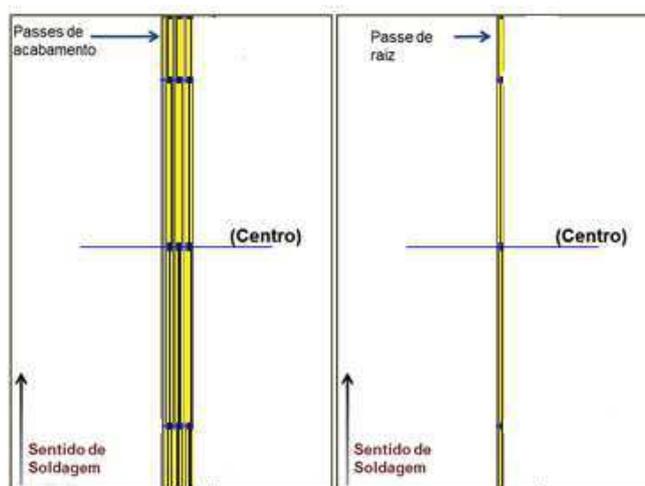
#### 4.2.4 Medição de Tensões Residuais

Para a realização das medições das tensões residuais presentes nas três amostras do aço API 5L X80, foi utilizado o plano de difração (211) com comprimento de onda ( $\lambda$ ) igual a 2,2911 Å. O método empregado foi o  $\text{sen}^2\psi$  com medidas realizadas com ângulo  $\psi$  igual a  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  e  $45^\circ$ .

Como podem ser observados na Figura 16, os ensaios foram realizados na região central das amostras, no sentido perpendicular aos cordões de soldas, tanto na superfície superior quanto inferior. As medições se estenderam em uma região que englobou o metal de solda (MS), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal base (MB).

Foi tomado como marco zero o centro do cordão de solda e a partir deste marco foram medidos 15 pontos a esquerda e 15 pontos a direita. O espaçamento entre os pontos foi de 2mm.

Figura 16 Localização das regiões de análise das tensões residuais.



As medições foram realizadas no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, utilizando-se um difratômetro de raios-X portátil, Portable Stress Analyser STRESSRAD (RADICON Ltd. Scientific Instruments), juntamente com o software de análise do equipamento. Na Figura 17 é apresentada uma fotografia do difratômetro utilizado.

Figura 17 Foto do difratômetro portátil utilizado na análise de tensões residuais.



#### **4.2.5 Análise metalográfica**

##### **4.2.5.1 Preparação das amostras para a análise metalográfica**

Na preparação das amostras para a análise metalógrafas os corpos de prova foram cortados utilizando-se uma máquina policorte. Após o corte as amostras foram embutidas com resina acrílica. Posteriormente as amostras embutidas foram submetidas ao lixamento. Para a operação de lixamento foi utilizada a lixadeira mecânica. Forma utilizadas lixas de diferentes granulometria, desde 180 até 1200. Por último, as amostras foram polidas na politriz, utilizando as soluções de Alumina em 1,0  $\mu\text{m}$ ; 0,5  $\mu\text{m}$  e 0,03  $\mu\text{m}$ .

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG.

Figura 18 Fotos das máquinas utilizadas para preparação de corpos de prova para realização de ensaios metalográficos.



(a) Máquina de corte



(b) Máquina de lixamento



(c) Máquina de polimento

Depois das amostras terem sido polidas, suas superfícies foram submetidas ao ataque químico com reagente Nital 2,0% com o objetivo de revelar as microestruturas.

#### **4.2.5.2 Microscopia ótica**

As análises micrográficas foram realizadas no microscópio ótico OLYMPUS BX 51M, interligado a um computador contendo o software MSQ® Materials Analysis, programa de análise de imagens microestruturais.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG.

#### **4.2.5.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Para a análise por MEV foram realizados dois ataques proposto por IKawa et al. (1980) para identificação dos microconstituintes do metal de base (MB). Os parâmetros empregados foram os mesmos adotados para juntas soldadas de aço API 5L X80 (Ballesteros, 2010). No primeiro ataque foram utilizados 5g de EDTA, 0,5g de NaF e 100 ml de água destilada a 5V por 15 segundos. Para o segundo ataque foram utilizados 5g de ácido pícrico, 25 de NaOH e 100ml de água destilada a 5V por 100 segundos.

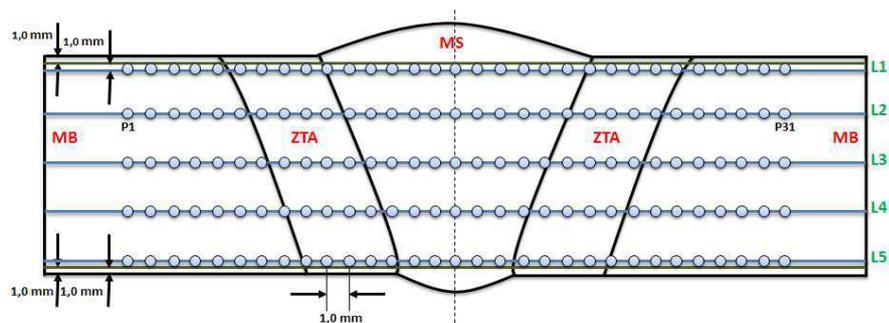
#### **4.2.6 Ensaios de dureza**

Para realização dos ensaios de Dureza seguiu-se as recomendações da Norma Técnica N-133 - Soldagem, emitida pela PETROBRÁS, que especifica a medição de dureza Vickers com carga 5 kgf.

As medições foram realizadas na região transversal, correspondente a espessura da chapa. Foram realizadas 150 medições em cada junta soldada. Estas regiões abrangem a zona fundida, a zona termicamente afetada e o metal de base.

Na Figura 19 é apresentada a ilustração do mapeamento para a realização dos ensaios de dureza.

Figura 19 Mapeamento dos corpos de prova para realização dos testes de dureza.



## CAPITULO V

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 Determinação dos Níveis de Tensões Residuais

A partir dos dados obtidos por Difração de Raios-X foi possível plotar os gráficos dos perfis das tensões residuais presentes nas juntas analisadas. Os experimentos foram realizados inicialmente na superfície superior e posteriormente na superfície inferior das juntas soldadas.

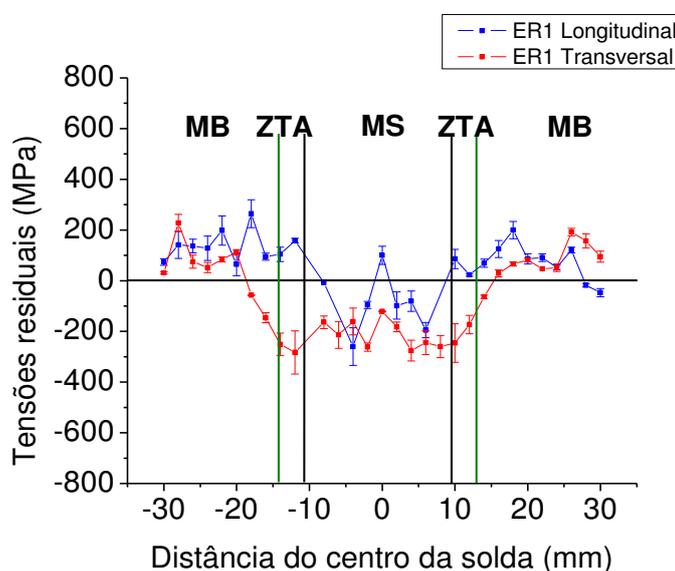
Nas Figuras 20 a 25 são apresentados os perfis das tensões residuais longitudinais e transversais presentes no metal de solda (MS), na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de base (MB) das superfícies superiores e inferiores das juntas das amostras ER1, TIG1 e TIG2. Nas Figuras 20, 21 e 22 são apresentados os perfis das tensões residuais nas superfícies superiores e nas Figuras 23, 24 e 25 os perfis das tensões residuais nas superfícies inferiores.

Na Figura 20, da amostra ER1, foi possível observar que as tensões residuais transversais são predominantemente compressivas na região composta pelo metal de solda (MS) e pela zona termicamente afetada (ZTA). Essas tensões residuais podem estar associadas às microestruturas aciculares, apontadas como sendo fonte de tensões residuais compressivas. Essas microestruturas se formam a partir do carbono rejeitado, durante a transformação da austenita em ferrita poligonal, e se concentram numa pequena fração de austenita remanescente, assim ganham temperabilidade e se estabilizam momentaneamente. Esta austenita remanescente enriquecida de carbono irá se transformar posteriormente sobre o efeito de temperaturas relativamente baixas, formando constituintes aciculares, como ferrita acicular, bainita ou mesmo martensita. O volume desses constituintes é significativamente maior em relação à austenita que lhe deu origem. Isto gera tensões de compressão na matriz de ferrita poligonal já existente, deformando-a localmente. Portanto, esse mecanismo de transformação induz um estado de tensão residual compressivo devido a componente de deformação cisalhante de sua transformação (Bhadeshia, 2002 apud Oliveira et al., 2010). É observado na Figura

20 que os maiores valores de tensões residuais trativas localizam-se no metal de base e foram medidas na direção longitudinais.

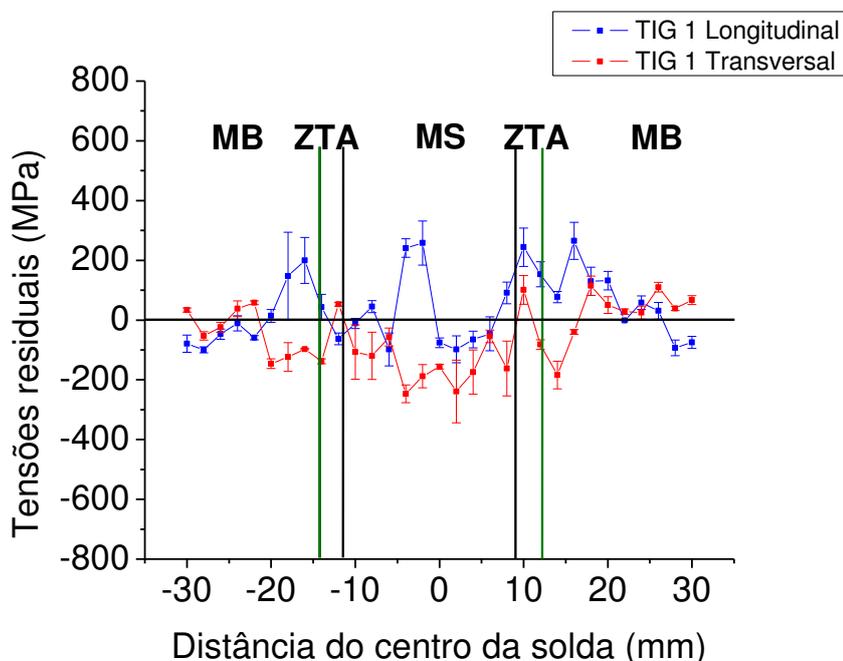
Como se observa na Tabela 13 (Anexo I), na região do metal de solda não se conseguiu obter todos os valores das tensões residuais presentes na amostra analisada. Nesta região os grãos são grosseiros e, como já fora constatado por CEGLIAS (CEGLIAS,2012), os grãos grosseiros dificultam a realização da análise de tensões residuais através da técnica de difração de raios-X. Além disso, os passes de acabamento introduzem descontinuidades geométricas do tipo convexidade ou concavidade na superfície superior do cordão de solda e, estas alterações são mais acentuadas na região de sobreposição dos cordões, impossibilitando a realização das medições por difração de raio-X (CEGLIAS, 2012).

Figura 20 Perfis das tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da superfície superior da amostra ER1.



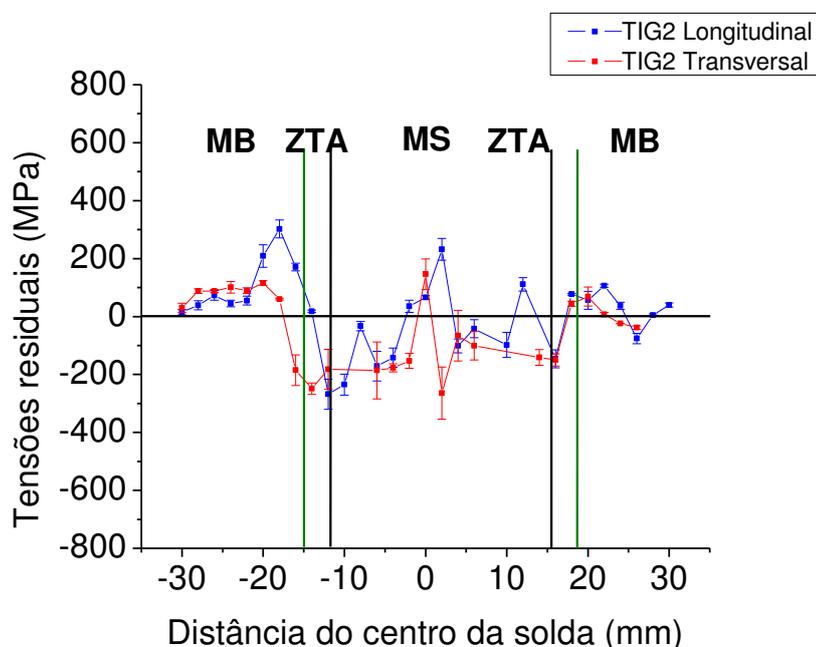
A amostra TIG1 apresentou um perfil de tensões residuais semelhantes ao da amostra ER1, exceto pela presença de alguns picos de tensões residuais trativas na região do metal de solda (MS) conforme Figura 21. Esses picos trativos podem está associados à presença de prováveis falhas (descontinuidades), bastante comum no cordão de solda no ultimo passe (MODENESI, 2001).

Figura 21 Perfis das tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da superfície superior da amostra TIG1.



Ao analisar o perfil das tensões residuais encontradas na superfície superior da amostra TIG2, apresentado na Figura 22, foi possível verificar que na região do metal de solda (MS), ou seja, na zona fundida, o comportamento das tensões residuais é diferente daquele observado nas amostras ER1 e TIG1. Este comportamento foi observado nas medições das tensões nas duas direções, isto é, as tensões residuais longitudinais e transversais. Nesta junta foi verificado que os valores (em valores absolutos) das tensões residuais compressivas são inferiores aos valores medidos nas demais amostras. Quando são analisados os parâmetros de soldagem utilizados para execução dos passes de acabamento constata-se que esta amostra foi submetida a menores valores de energia de soldagem e foram empregadas corrente de menor intensidade, em comparação com as duas outras amostras, portanto, o efeito do ciclo térmico foi menor, principalmente na região próxima à ZTA.

Figura 22 Perfis das tensões residuais longitudinais e transversais ao longo da superfície superior da amostra TIG2.



As regiões das superfícies superiores das juntas soldadas onde foram realizadas as análises de tensões residuais são compostas pela camada superior dos passes de acabamento e pelo MB. Os valores dos aportes térmicos (considerando-se a média dos três passes de acabamento) nos passes de acabamento das amostras ER1, TIG1 e TIG2 foram 10,49 KJ/cm, 9,68 KJ/cm e 9,13 KJ/cm, respectivamente e, os valores de correntes (também considerando-se a média dos três passes de acabamento) empregadas para a realização desses passes nas amostras ER1, TIG1 e TIG2 foram de 165,27 A, 130,77 A e 117,23 A, respectivamente.

Como se vê na Tabela 8, para executar os passes de acabamento das amostras TIG1 e ER1 foram utilizados eletrodos com a mesma especificação (E-8018-G). Neste trabalho constatou-se que o emprego de maior aporte térmico na amostra ER1 acarretou em uma intensidade ligeiramente maior das tensões residuais compressivas no MS e ZTA, como pode ser observado no perfil de tensões residuais da amostra ER1.

Na mesma Tabela 8, pode ser visto que os passes de acabamento da amostra TIG2 foram realizados utilizando-se um eletrodo E-9018-G, portanto, com especificação diferente do utilizado nas amostras ER1 e TIG1.

Comparando as amostras TIG2 e ER1, nas quais os passes de acabamentos foram realizados consumíveis diferentes e, analisando a composição química dos consumíveis, observa-se a presença de pequenas porcentagens de fósforo (P) e enxofre (S) na amostra TIG2. A literatura destaca que, mesmo em baixas concentrações, esses elementos podem favorecer a presença de falhas, como a formação de trincas de solidificação e estas falhas podem ter provocado os picos trativos observados na região do metal de solda.

Com relação à energia de soldagem e a corrente empregada, na amostra TIG2 foram utilizados valores inferiores aos da amostra ER1, evidenciando mais uma vez o efeito dos parâmetros de soldagem sobre as tensões residuais.

Sabe-se que o emprego de um maior aporte térmico gera um maior nível de tensões residuais trativas (FRANCIS et al., 2007; MARQUES et al, 2009), entretanto, deve-se salientar que os casos apresentados na literatura são muitas vezes decorrentes de diferentes processos de soldagem, juntamente com diferentes condições e geometrias de juntas soldadas. Estudando as tensões residuais em soldas de aço HSLA-100, Gao et al. (1997) encontraram resultados semelhantes aos aqui encontrados, onde as tensões residuais eram sempre compressivas sobre a superfície da solda, e nas proximidades da ZTA até o metal de base as tensões residuais vão tornando-se gradualmente trativas, sendo esse fenômeno atribuído ao efeito de transformações de fase no aço, uma vez que a expansão volumétrica associada à transformação da austenita pode aumentar o nível de tensões compressivas.

Os perfis das tensões residuais longitudinais e transversais das superfícies inferiores das amostras ER1, TIG1 e TIG2 são apresentados nas Figuras 23, 24 e 25.

Diferentemente do observado na região superior da chapa, na região inferior verifica-se que os perfis de tensões residuais ao longo da junta apresentam uma melhor regularidade, próximo ao perfil de tensões residuais clássico apresentado por KOU (2001). A região do metal de solda do passe de raiz apresenta menores dimensões em comparação com a região dos passes de acabamento.

Figura 23 Perfis de tensões residuais longitudinais e transversais da superfície inferior da amostra ER1.

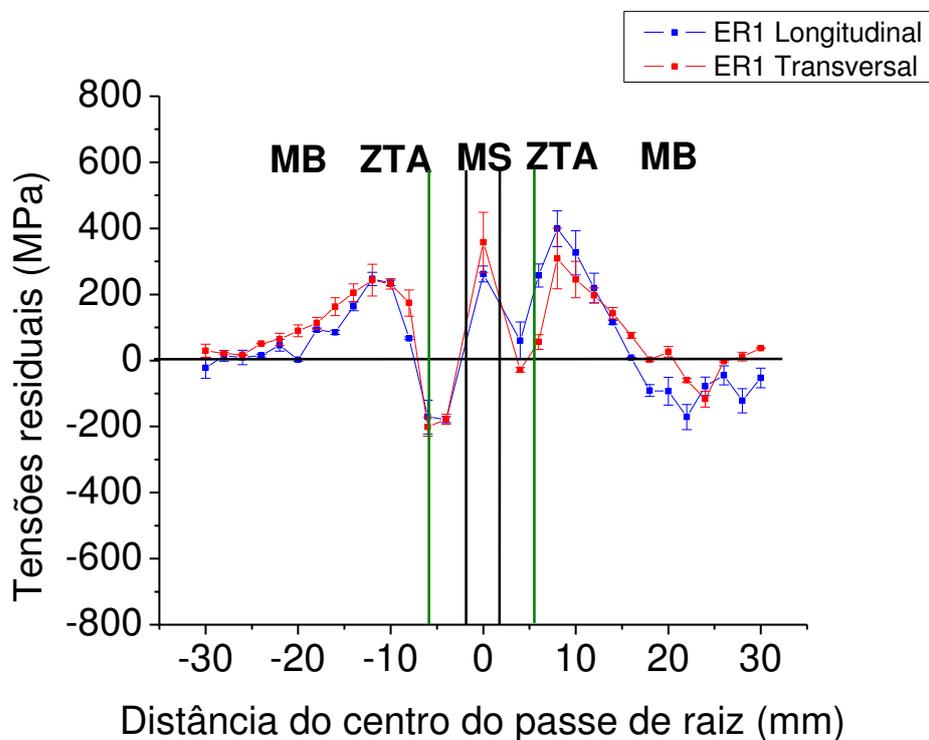


Figura 24 Perfis de tensões residuais longitudinais e transversais da superfície inferior da amostra TIG1.

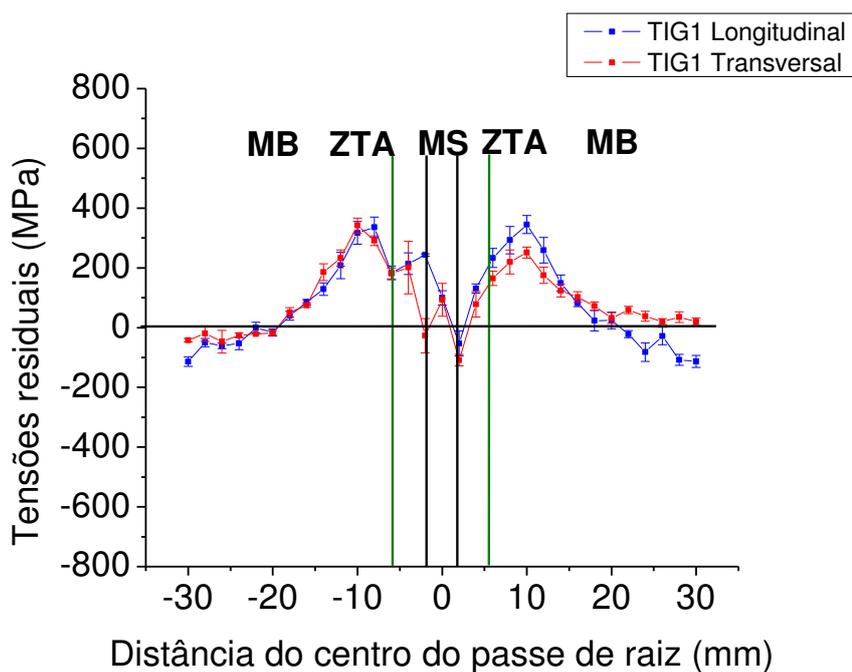
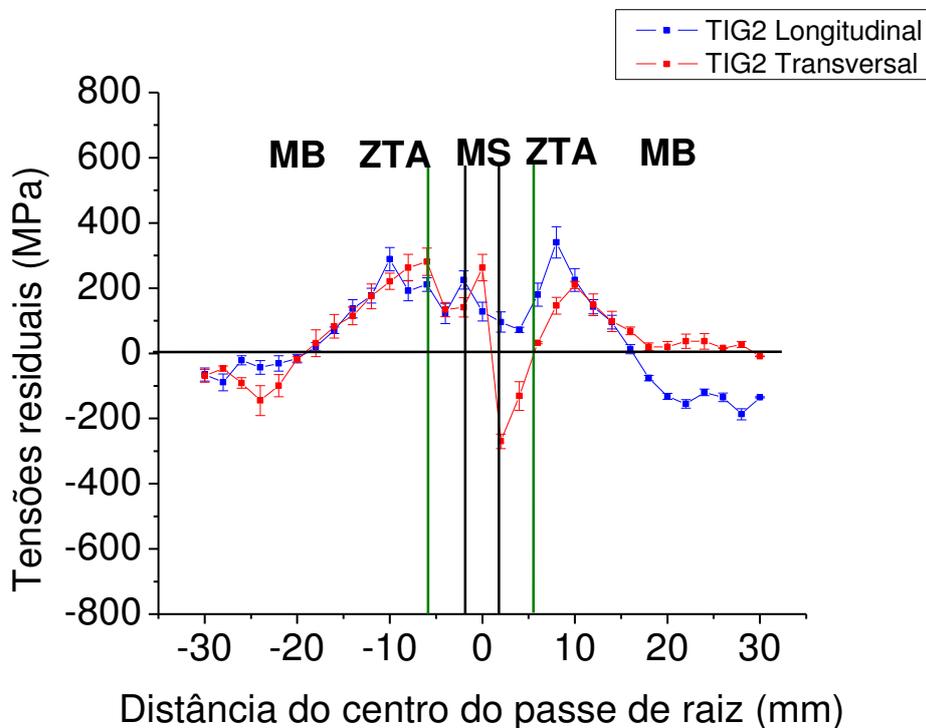


Figura 25..Perfis de tensões residuais longitudinais e transversais da superfície inferior da amostra TIG2.



Os passes de raiz da amostra ER1 foi realizado pelo processo SMAW e os das amostras TIG1 e TIG2 foram soldados pelo processo GTAW. Os aportes térmicos médios entre o passe de raiz e passe quente das juntas foram 14,80 KJ/cm, 10,89 KJ/cm e 14,23 KJ/cm, respectivamente. As correntes médias empregadas foram, respectivamente, 68,00 A, 110,60 A e 121,55 A.

Comparando-se as Figuras 23, 24 e 25, é possível verificar que o emprego de maiores aportes térmicos implicam em maiores níveis de tensões residuais transversais e longitudinais trativas no MS. As juntas das amostras TIG1 e TIG2 foram executadas com mesmos processos de soldagem na execução dos passes de raiz (GTAW) e empregados o mesmo consumível. Uma vez que para realizar o passe de raiz da amostra TIG2 foi imposto maior aporte térmico do que na amostra TIG1, maiores níveis de tensões residuais transversais foram encontrados na amostra TIG2. Como o passe da raiz da amostra ER1 foi realizado pelo processo SMAW com maior aporte térmico (14,80 KJ/cm), maiores níveis de tensões residuais transversais foram apresentados em relação às juntas das amostras TIG1 e TIG2.

Nas regiões da ZTA observa-se que as tensões residuais foram menores do que a do MS e tenderam a ser compressivas. Já no MB, os níveis de tensões residuais foram semelhantes para as três condições de soldagem empregadas. Ou seja, a diferença de aportes térmicos não foi suficiente para promover variações significativas nas magnitudes das tensões residuais nas regiões mais afastadas de calor, embora tenha sido suficiente para promover variações nos níveis de tensões residuais na região do MS.

Diante da importância do efeito das tensões residuais transversais sobre processos de fragilização de juntas soldadas será traçado um comparativo entre os níveis de tensões residuais transversais nas juntas soldadas em estudo.

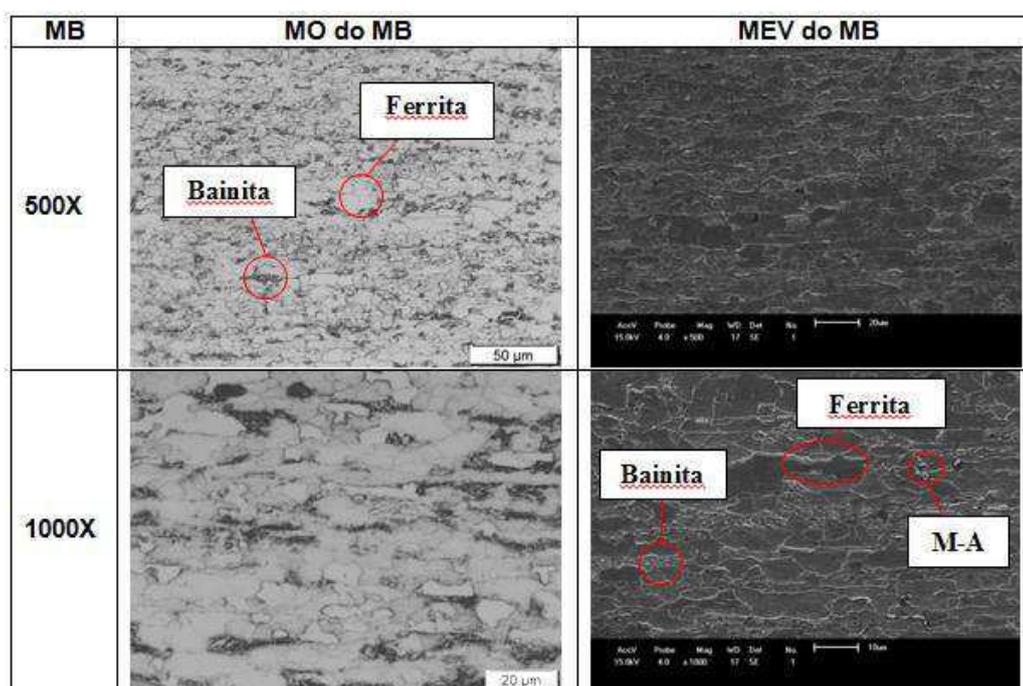
Analisando os perfis de tensões residuais transversais apresentados nas Figuras 20, 21 e 22 pode-se perceber, conforme já mencionado em discussão anterior, que nas regiões superiores das juntas soldadas quanto maior o aporte térmico empregado, mais compressivas foram as tensões residuais transversais. Nas regiões inferiores das juntas soldadas, conforme mostrado nas Figuras 23, 24 e 25, quanto maior o aporte térmico empregado, mais trativas foram às tensões residuais no MS, entretanto, menores foram os níveis de tensões residuais ao longo da região da ZTA.

Sabendo-se que as tensões residuais desempenham importante papel na susceptibilidade ao trincamento em condições de serviço, em ambientes ricos em  $H_2S$ , por exemplo, as tensões residuais junto ao “pé” do passe de raiz precisam ser analisadas, pois são regiões preferenciais para o surgimento de trincamento em serviço (PARADOWSKAA. A, 2006). Sendo assim, foi verificado que o emprego de maior aporte térmico junto ao passe de raiz apesar de aumentar as tensões residuais trativas no metal de solda conduz a maiores níveis de tensões residuais compressivas na ZTA junto ao passe de raiz. Como normalmente esta é a região mais crítica da junta soldada tendo em vista a maior granulometria e a maior possibilidade de regiões com estruturas martensíticas, isto pode diminuir a susceptibilidade ao trincamento em serviço

## 5.2 Avaliação da microestrutura

Foi realizada a caracterização microestrutural do metal de base na condição de como recebido, do aço API 5L X80, e do metal de solda considerando-se as regiões referentes aos passes de raiz, enchimento e acabamento. A Figura 26 apresenta a microestrutura do metal de base como recebido examinados com Microscópio Óptico (MO) e com um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com aumento de 500 e 1000X, respectivamente. Conforme observado na Figura 26 a microestrutura é constituída predominantemente por Ferrita e Bainita.

. Figura 26 Micrografias do metal de base (MB) como recebido.



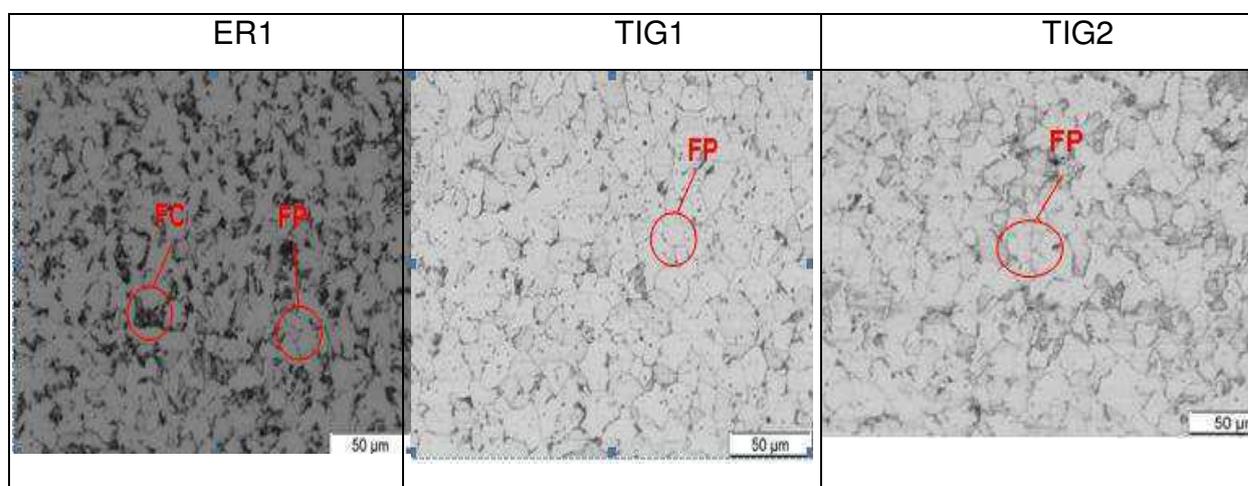
Nas Figuras 27 a 30 são mostradas as micrografias resultantes das análises metalográficas realizadas nas juntas soldadas das amostras ER1, TIG1 e TIG2, nas regiões do passe de raiz, passe quente, passe de enchimento e passe de acabamento.

Na Figura 27 são apresentadas imagens das micrografias realizadas nos passes de raiz das três amostras. Comparando as imagens observa-se que a microestrutura predominante é a ferrítica. Na amostra ER1 também foi evidenciado a presença do agregado Ferrita Carboneto (FC). O microconstituente FC se forma a partir da austenita enriquecida de Carbono que é rejeitado pela ferrita. Este constituinte apresenta-se em pequenas quantidades sobre altas temperaturas (DA SILVA, 2010).

O consumível empregado no passe de raiz das amostras TIG1 e TIG2 foi o AWS ER70S-3, que tem na sua composição maiores teores de Mn e Si (Tabela 6), elementos que poderiam reduzir a quantidade de ferrita poligonal (PF) (PINTO, 2006). Porém os altos valores de correntes associados a uma concentração maior de calor devido ao processo empregado pode ter sido o responsável para formação de uma microestrutura ferrítica.

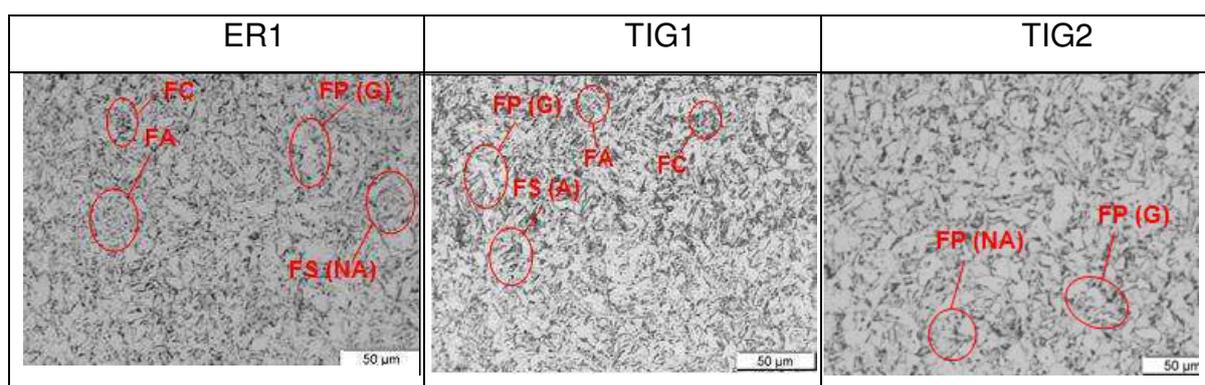
Para execução do passe quente, de enchimento e de acabamento das juntas nas amostras ER1, TIG1 e TIG2, o processo de soldagem empregado foi o SMAW. No passe quente das juntas ER1 e TIG1 foram empregados o mesmo consumível o AWS E8010 e para junta TIG2 o consumível AWS E9010.

Figura 27 Microscopia ótica do passe de raiz das amostras ER1, TIG1 e TIG2.



Analisando a micrografia da amostra ER1, observa-se uma maior proporção de ferrita secundária não alinhada (FS(NA)), apresentando também áreas com ferrita acircular (FA). Para a amostra TIG1 a microestrutura no passe quente apresentou-se como sendo ferrita primária de contorno de grão (FP(G)) com FS(NA), contendo, também, áreas com FA e FC. A microestrutura da junta TIG2 é a FP com FS(NA). Apesar da junta TIG2 apresentar a estrutura com grãos alongados e com alto ângulo, a relação comprimento/espessura é insuficiente para ser considerada uma microestrutura FS(NA), portanto deve ser considerada como sendo FP(G) ou ferrita primária intergranular (FP(I)) (DA SILVA,2010). A Figura 28 mostra os microconstituintes formados.

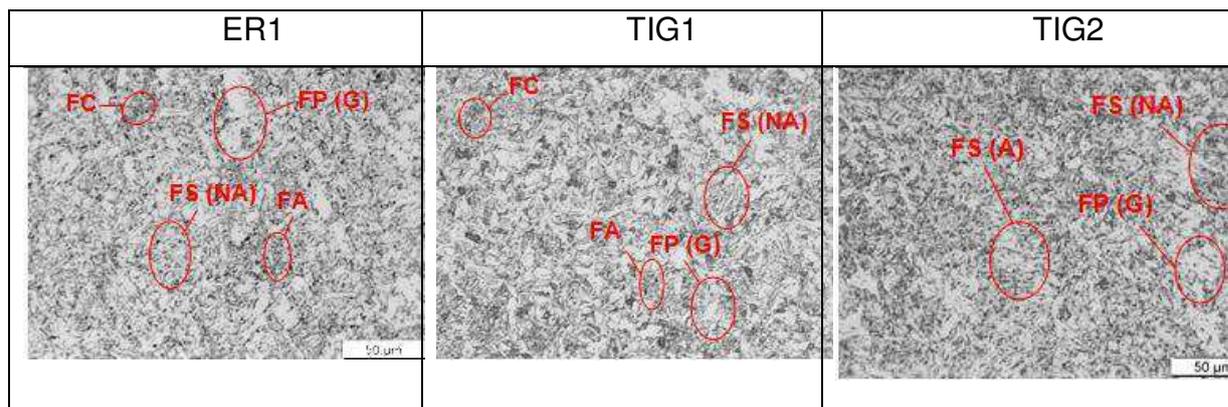
Figura 28 Microscópias óticas dos passes quente das amostras ER1, TIG1 e TIG2



No passe de enchimento as três amostras foram soldadas pelo mesmo processo, o SMAW, variando os consumíveis e a energia empregada. As amostras TIG1 e ER1 utilizaram os mesmos consumíveis AWS E8018-G variando os parâmetros de soldagem, os passes da junta TIG2 foram executados com AWS E9018-G.

Na Figura 29 são apresentadas as micrografias óticas (MO) dos passes de enchimento das amostras ER1, TIG1 e TIG2.

Figura 29 Micrografias óticas dos passes de enchimento das amostras ER1, TIG1 e TIG2.



Os passes de enchimento nas três amostras foram executados pelo mesmo processo, o SMAW, variando-se os consumíveis e as energias de soldagem empregadas. As amostras TIG1 e ER1 utilizaram os mesmos consumíveis, o eletrodo AWS E8018-G e os passes da amostra TIG2 foram executados com o eletrodo AWS E9018-G.

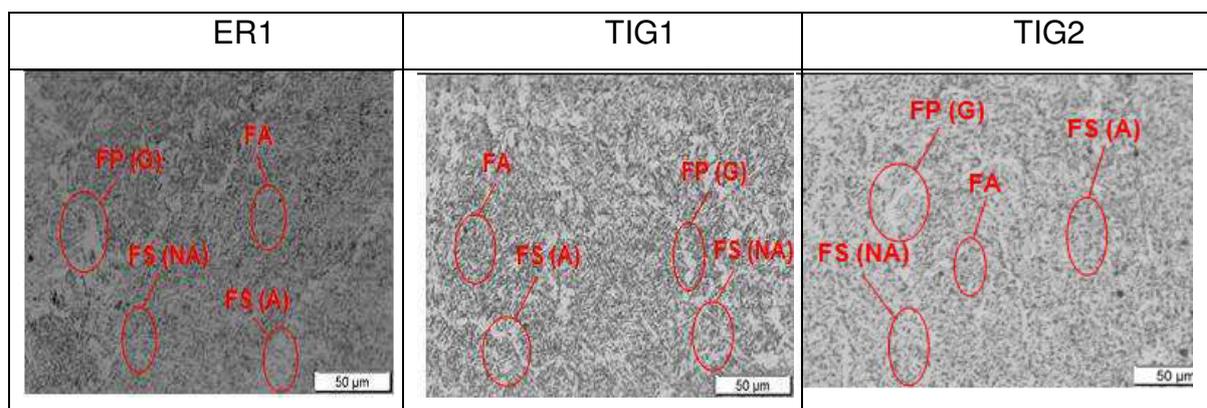
O aporte térmico (médias dos três passes) empregado na amostra ER1 foi 12,25 KJ/cm ( $I=163,77A$ ,  $v=2,41$  mm/s), na amostra TIG1 foi 12,60 KJ/cm ( $I=124,13A$ ,  $v=1,71$  mm/s) e na amostra TIG2 foi 12,66 KJ/cm ( $I=115,30$  A,  $v=1,73$  mm/s). Comparando a amostras TIG1 com a TIG2 é possível verificar uma maior incidência de FP(G) e FP(I) na amostra TIG1, enquanto que a amostra TIG2 apresentou uma maior incidência de FS(A). Na amostra ER1 observa-se uma FP(G) mais grosseira que nas demais amostras, também foi identificada maior área contendo FA.

A amostra ER1 foi executada com aporte térmico próximo ao da junta da amostra TIG2, porém a maior intensidade da corrente, aliada com uma maior velocidade de soldagem pode ter influenciado na formação de FA, conforme observado por Oliveira et al.(2010). As pequenas variações dos teores dos elementos de liga C e Ni, presentes nos eletrodos podem ter contribuído para a variação dos microconstituintes formados, já que o C, Ni e Mn tem influência marcante nos percentuais de FA presente no metal de solda (PINTO, 2006)(BHADESHIA,2011).

Na soldagem dos passes de acabamento das amostras ER1 e TIG1 os processos de soldagem e os consumíveis empregados foram os mesmos utilizados para o passe de enchimento. As juntas das amostras ER1 e TIG1 utilizaram o mesmo consumível, variando os parâmetros de soldagem (Tabelas 9 e 10).

Para a junta da amostra TIG2 (Tabela 11) foi empregado o consumível E9018-G. Observa-se através da Figura 30 que as três amostras apresentam similaridade nos microconstituintes formados.

Figura 30 Microscopias óticas (MO) dos passes de acabamento das juntas das amostras ER1, TIG1 e TIG2.



Comparando-se as microestruturas das juntas TIG1 e TIG2, que foram soldadas com consumíveis diferentes, observa-se que a microestrutura da junta TIG2 apresenta-se mais refinada. Isto, possivelmente está associado ao emprego de um menor aporte térmico e uma velocidade de soldagem maior, como também aos elementos de liga presentes.

Comparando agora as juntas das amostras ER1 e TIG1, onde os processos e o consumível empregado foram os mesmos, observa-se na junta da amostra ER1 a presença de FP(G) com um aspecto mais grosseiro, como também uma maior área de FA de um aspecto mais refinado.

A presença de FA é proporcionada por taxas de resfriamento intermediárias e pela presença de elementos de liga tais como Mn, Ni, Mo etc. Os teores desses elementos de liga são de grande relevância. O Mn promove um refinamento na

microestrutura. Teores até 1,5% favorece a formação de ferrita acicular em lugar da ferrita primária de contorno de grão e de placas laterais de ferrita. As adições crescentes e acima de 1,5% de molibdênio deterioram a tenacidade.

O Ni influencia de forma similar, porém com menos intensidade que o Mn, favorecendo o refinamento da estrutura e a formação de ferrita acicular. Em termos de propriedades mecânicas, o Ni tem um importante efeito benéfico na tenacidade da solda (MODENESI,2004).

Nas juntas das amostras ER1 e TIG1 foi utilizado no ultimo passe (passe de acabamento) o consumível AWS E8018-G. Neste consumível não há presença de Mo, diferentemente do consumível que foi utilizado para realizar o passe de acabamento na junta da amostra TIG2. Nesta junta foi empregado o eletrodo AWS E9018-G que contem que 0,20% de Mo. A presença do Mo estabiliza a ferrita, aumenta a temperabilidade fortemente e tende a reduzir a quantidade de ferrita de contorno de grão, favorecendo a formação de ferrita acicular.

Ainda na Figura 30 observa-se que a junta da amostra TIG2 apresenta um contorno de grão menos grosseiro do que a junta da amostra ER1, possivelmente devido à presença do Mo na composição do seu consumível. Esse resultado pode estar também associado ao emprego de um menor aporte térmico.

Para todas as juntas analisadas as microestruturas encontradas foram muito similares. Comparando a análise microestrutural das juntas das amostras TIG1 e TIG2, verifica-se que a junta da amostra TIG2 apresenta-se mais refinada.

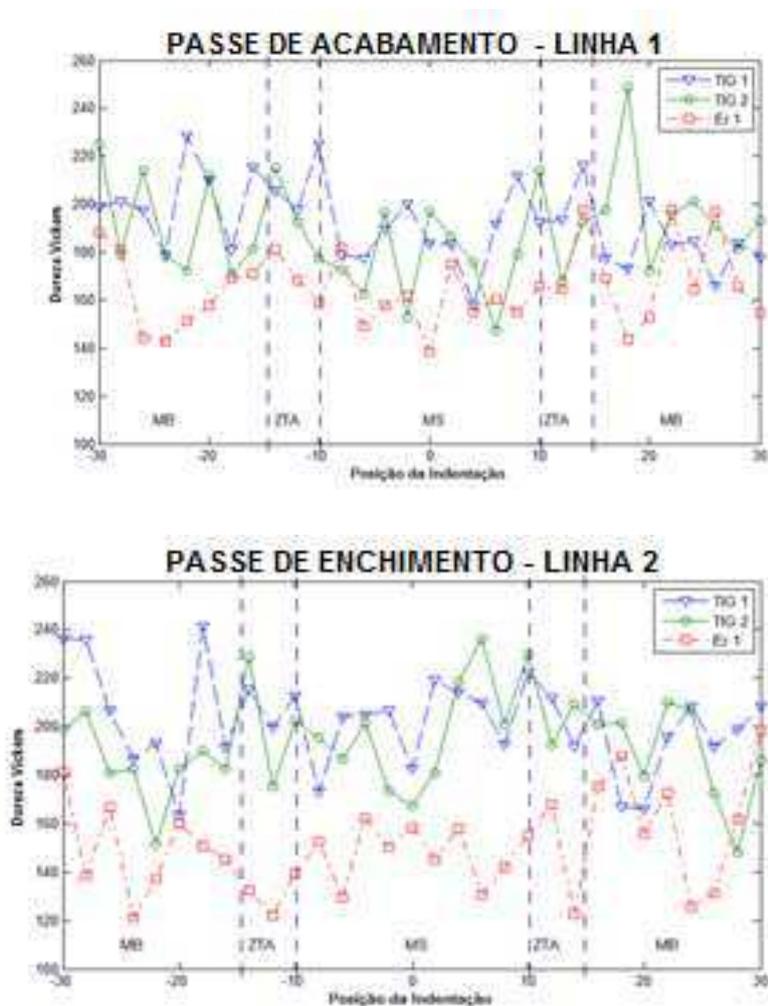
A Ferrita Acicular é o microconstituente mais desejável para a obtenção de uma boa tenacidade (DA SILVA,2010). Ele é responsável por induzir tensões residuais compressivas, justificando assim a maior ocorrência de tensões residuais compressivas na junta da amostra ER1.

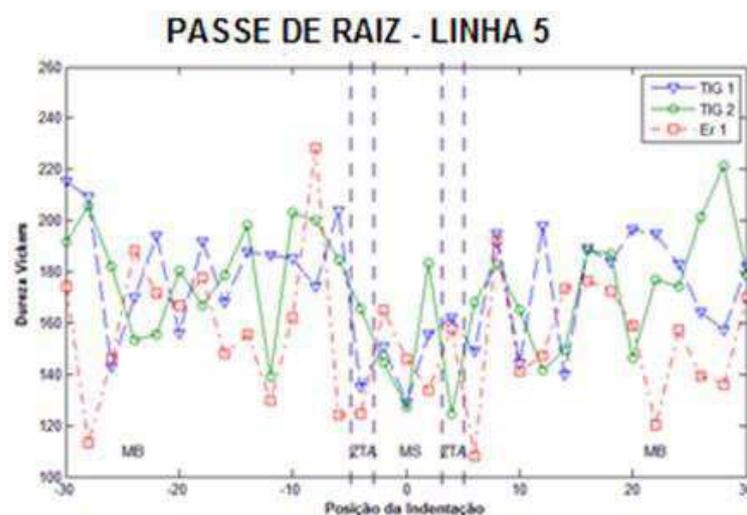
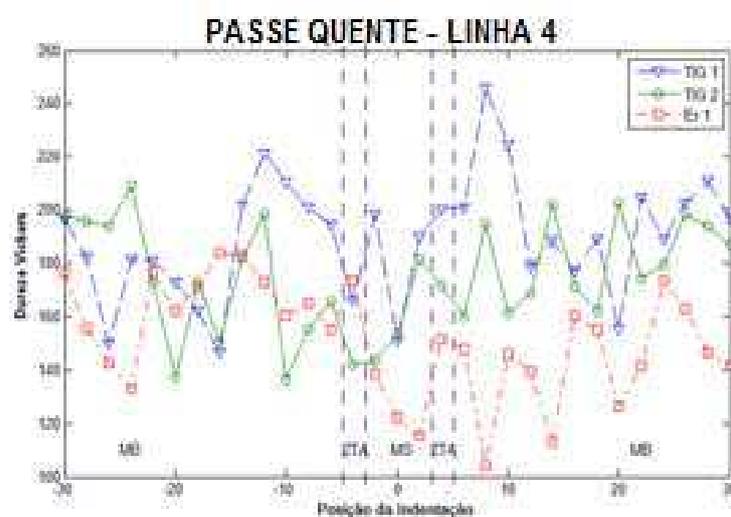
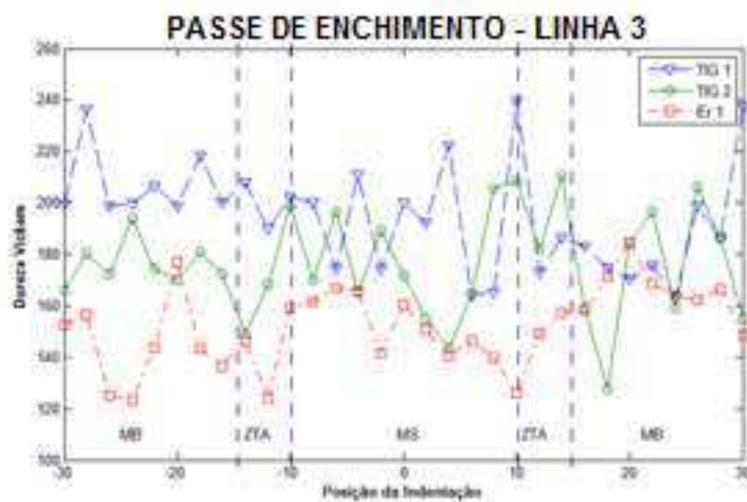
### 5.3 Avaliação da dureza

Os perfis de dureza obtidos nas amostras ER1, TIG1 e TIG2 estão apresentados na Figura 31. As medições, que estão nas Tabelas 15, 16 e 17 no anexo, foram realizadas na seção transversal das juntas soldadas e as linhas indicadas no mapeamento mostrado na Figura 19 estão localizadas em regiões distintas do cordão de solda, ou seja, nos passes de raiz, quente, de enchimento e de acabamento, conforme identificação a seguir:

- Linha 1 localizada na altura dos passes de acabamento
- Linha 2 localizada na altura dos passes finais de enchimento
- Linha 3 localizada na altura do primeiro passe de enchimento
- Linha 4 localizada na altura do passe quente
- Linha 5 localizada na altura do passe de raiz.

Figura 31 Perfis de dureza na seção transversal das amostras TIG1, TIG2 e ER1.





Observa-se nos gráficos da Figura 31 das três amostras analisadas que nas juntas TIG1 e TIG2 os valores de dureza em todos os passes são semelhantes e que os menores valores foram obtidos na junta da amostra ER1.

No gráfico da Linha 1, que corresponde a região do passe de acabamento é verificado uma similaridade entre os perfis de dureza das juntas das amostras TIG1 e TIG2. Embora a junta TIG2 tenha sido soldada com o consumível de maior resistência mecânica (AWS E9018-G), comparando-se com a junta da amostra TIG1(AWS E8018-G), ela não apresentou valores de dureza maiores, esse resultado pode ser atribuído a menor energia de soldagem empregada, menor corrente e maior velocidade de soldagem promovendo menores efeitos do ciclo térmico na ZTA e no metal de solda devido à formação de constituintes de menor valor de dureza.

Na junta da amostra ER1, empregou-se o mesmo consumível da junta TIG1, porém o aporte térmico foi maior levando a uma conseqüente diminuição da taxa de resfriamento, promovendo assim a formação de microconstituente de menor valor de dureza. Em aço de baixo carbono comprova-se a redução da dureza com o aumento dessa energia de soldagem (EROGLU & AK SOY, 2000 apud SANTOS NETO, 2003).

Na linha 2, tem-se a região correspondente ao passe de enchimento, se evidencia a região de menores valores de dureza da amostra ER1.

Analisando as linhas 3 e 4 observa-se que houve uma variação mais significativa nos valores de dureza.

Para o passe quente (linha 4) foi utilizado o processo SMAW, nas juntas TIG1 e ER1 foi empregando o consumível AWS E8010, enquanto para a junta TIG2 foi empregado o consumível AWS E9010.

No caso da junta TIG1 foi imposto um menor aporte térmico (9,55 KJ/cm para o passe de raiz e 12,22 KJ/cm para o passe quente) enquanto que para a junta TIG2 um aporte térmico maior (13,23 KJ/cm para passe de raiz e 15,13 KJ/cm e para o passe quente) e para a junta ER1 foi empregado o maior aporte térmico entre as três juntas (15,50 KJ/cm para passe de raiz e 14,09 KJ/cm e para o passe quente). Foi possível verificar que o emprego de menores aportes térmicos resultou em maiores níveis de dureza na junta TIG1. Isso se dá devido ao emprego de maiores taxas de

resfriamento o que por sua vez acarreta em microestruturas de maiores valores de dureza.

Na linha 5 é a linha que intercepta apenas o passe de raiz, foi observado mesmo utilizando diferentes consumíveis e processos, que os valores de dureza foram bastantes similares para as três juntas soldadas. Os passes de raiz das juntas TIG1 e TIG2 foram executados pelo mesmo processo de soldagem (GTAW) e empregando-se o mesmo consumível AWS ER70S-3. A junta ER1 foi executado pelo processo SMAW empregando-se o consumível AWS E6010.

A ligeira redução nos valores de dureza Vickers apresentados nos perfis da amostra ER1 pode ser atribuída a maior energia de soldagem, levando a menores taxas de resfriamento.

As juntas soldadas das amostras TIG1 e TIG2 apresentam perfis de dureza bem parecidos, apesar das variações de energia de soldagem observadas. A compensação nos valores de dureza identificados pode ser atribuída às variações da composição química, como observado por Araújo (2011) onde variações nos teores de Mn e Al levaram as compensações nos valores de dureza observados. Estes elementos químicos favorecem o aumento localizado da dureza, tanto na formação de microconstituintes com maior dureza, como também na dissolução de elementos desfavoráveis à dureza. Segundo Omweg et al. (2003) microestruturas de elevada dureza na região da solda apresentam menores valores de ductilidade, estas microestruturas diminuem a capacidade de acomodação das tensões residuais.

## CAPÍTULO VI

### 6 CONCLUSÕES

Com base nas análises dos dados obtidos nos ensaios e testes realizados nas amostras ER1, TIG1 e TIG2 é possível concluir que:

- Na superfície superior das amostras as tensões residuais transversais e longitudinais presentes na região do metal de solda (MS) são predominantemente compressivas, sendo mais intensas a medida que os aportes térmicos foram maiores;
- Ainda na superfície superior, as tensões residuais foram se transformando em trativas, nas regiões da ZTA e no metal de base (MB);
- Na superfície inferior das amostras as tensões residuais transversais e longitudinais presentes são predominantemente trativas. Este tipo de tensão foi observado em toda a superfície inferior, sendo mais intensa no metal de base (MB), próximo a ZTA, diminuindo gradativamente a medida que vai se distanciando do centro do cordão de solda;
- Na superfície inferior os maiores aportes térmicos implicaram em maiores níveis de tensões residuais trativas no MS e menores níveis de tensões na ZTA;
- Na análise metalográfica das amostras soldadas com o processo SMAW foi identificada a presença de Ferrita Acicular (AF) e agregados de ferrita, sendo uma possível causa para as tensões compressivas na região do metal de solda;
- Na superfície inferior a amostra ER1, na qual o passe de raiz foi soldado com o processo SMAW, apresentou um melhor perfil de tensão residual, quando comparado com as amostras soldadas pelo processo GTAW;
- Na região inferior das juntas soldadas, quanto maiores os aportes térmicos, mais trativas foram as tensões residuais no metal de solda (MS), proveniente possivelmente do ligeiro aumento dos aglomerados de Ferrita e Carbonetos nessa região e menores foram os níveis de tensões residuais ao longo da ZTA.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. P., Análise de Falha e Risco Associados aos Dutos de Gás Antes e Após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões. Soldagem Insp., Vol. 10, 2008.

API 1104, American Petroleum Institute Welding of pipeline and related facilities. API Standard 1104. 20<sup>th</sup> Edition. (2008).

API 5L, American Petroleum Institute. Specification for line pipe steel API 5L, 43 ED New York, 2007.

ARAÚJO, B.A.; SOARES, E.P.; MACIEL, T.M.; ARAÚJO, J.G.M; SILVA, A.A. Avaliação do nível de tensões residuais de diferentes juntas soldadas de aço API 5L X80. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6, 2011, Anais do 6<sup>º</sup> COBEF – 11 a 15 de abril de 2011 – Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

BALLESTEROS, A.F. Avaliação da resistência de juntas soldadas circunferências de aço API 5L X-80 à corrosão sob tensão na presença de sulfetos e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. 2010. 290p. Tese (Doutorado) – Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CEGLIAS R. B.A. Análise de tensão residual em tubo de aço API 5L X70. 2012. 110p. Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.

COSTA, S. C.;

RIBEIRO, L. G. Otimização dos Parâmetros de Pulso de um Processo de Soldagem Mig Através de Análise Fatorial em dois Níveis. In: XXI Encontro de Engenharia de Produção, Salvador - BA, Anais do XXI Encontro de Engenharia de Produção, Salvador-BA: ENEGEP, 2001

DA SILVA, Edgard Suzano - Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Circunferenciais de Aços para Risers Rígidos da classe API 5L grau X80 - . Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2010.

FRANCIS, J.A, et al. Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels.In: Proceedings of PVP2007 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference July 22-26, 2007, San Antonio, Texas., 2009.

GAO, H. Et al. Determination of residual stress by x-ray diffraction in HSLA-100 steel weldments. Proceedings of the International Conference on Residual Stress, Linkoping, Sweden, June 1997.

GENTIL, V., Corrosão, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2007 353p.

KOU, S. Welding metallurgy, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2003. LANCASTER, J.F, Metallurgy of Welding, 6 Ed, Woodhead Publishing Limited Cambridge, England, 1999.

LANCASTER, J.F, Metallurgy of Welding, 6 Ed, Woodhead Publishing Limited Cambridge, England, 1999.

MACHADO, I.G; “Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicação ”, 2000.

MASUBUCHI, K., 1983, Residual stress and distorsion, Metals Handbook, 9th ed., vol 6. Metals Park, OH, American Society for Metals – ASM.

Metals Park: American Society for Metals, p.380-392, 1986.

MODENESI, P.J. Efeitos mecânicos do ciclo térmico. Apostila. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2001

OLIVEIRA, G.L.G.; SILVA, T.F.; MIRAND, H.C.; MOTTA, M.F. Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem sobre as Tensões Residuais Resultantes em Juntas Soldadas com Multipasse. *Soldagem & Inspeção*, v.15, n.3, pp.218-224, 2010.

OMWEG, G. M., FRANKEL, G. S.; BRUCEA, W. A.; RAMIREZ, J. E.; KOCHA, G. Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in Sour Environments, *Corrosion*, v.59, n.7, p.640-652, 2003.

PARADOWSKAA, A., PRICE, J.W.H., IBRAHIM, R., FINLAYSON, T.R., BLEVINSC, R., PIPELYC, M. Residual stress measurements by neutron diffraction in multi-bead welding. *Physica B*, Vol. 385–386, p. 890–893, 2006.

PINTO, P. M. A. S. Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processos manual/semi-automático. 2006. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PREVÉY, P.S. X-RAY Diffraction Residual Stress Techniques. *Metals Handbook*, 10, SILVA, E.S. (2010) Propagação de trincas de fadiga em juntas soldadas circunferenciais de aços para Risers rígido da classe API 5L Grau X80. 2009.

SOARES, E.P. Avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio de juntas soldadas de aço API 5L X80 com diferentes combinações de consumíveis. 2011. 99p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SOUZA, F. H. L. Avaliação da tenacidade à fratura pela técnica de CTOD para o tubo de aço API 5L X65 hidrogenado em ambiente com H<sub>2</sub>S, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte .

TSUJIKAWA, S.; MIYASAKA, A.; JEDA, M.; ANDO, S.; SHIBATA, T.; HARUNA, T.;KATAHIRA, M.; YAMANE, Y; AOKI, T.; YAMADA, T. Alternative for Evaluating Sour Gas resistance of Low-Alloy Steels and Corrosion-Resistant Alloys. *Corrosion*, v.49, n.5, pp.409-419, 1993.

WEBSTER, G.A.; EZEILO, A.N. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. *International Journal of Fatigue*, v.23, p.375-383, 2001.

## 8 ANEXOS

Tabela 12. Tensões residuais presentes na amostra ER1.

TENSÕES RESIDUAIS DA JUNTA ER1									
Ponto	Dist. do centro da solda	SUPERFÍCIE INFERIOR				SUPERFÍCIE SUPERIOR			
		$\sigma_L$	Desvio	$\sigma_t$	Desvio	$\sigma_L$	Desvio	$\sigma_t$	Desvio
-15	-30	-22	32	29	20	74	13	31	4
-14	-28	14	16	21	3	141	53	228	34
-13	-26	9	22	17	2	137	27	75	26
-12	-24	15	4	51	1	128	48	52	20
-11	-22	46	18	64	19	198	58	84	10
-10	-20	2	4	90	18	64	44	112	11
-9	-18	93	5	113	18	264	55	-57	1
-8	-16	85	6	163	27	95	14	-146	20
-7	-14	164	13	205	27	104	28	-251	44
-6	-12	247	20	243	48	158	9	-283	85
-5	-10	235	8	232	16	--	--	--	--
-4	-8	67	4	174	40	-7	0	-164	25
-3	-6	-171	51	-201	28	--	--	-214	53
-2	-4	-179	9	-178	15	-260	74	-161	53
-1	-2	--	--	--	--	-96	14	-262	16
0	0	262	24	358	91	100	36	-121	2
1	2	--	--	--	--	-98	54	-182	19
2	4	60	57	-28	7	-81	40	-276	41
3	6	257	35	56	22	-195	30	-244	47
4	8	399	54	309	92	--	--	-260	44
5	10	326	67	245	55	86	38	-246	76
6	12	219	45	197	23	23	5	-173	36
7	14	116	6	143	17	69	16	-63	7
8	16	8	1	76	9	125	34	29	14
9	18	-91	18	2	5	200	34	66	8
10	20	-93	42	26	16	86	20	82	7
11	22	-171	38	-60	6	91	15	47	0
12	24	-78	28	-117	24	52	10	51	15
13	26	-45	29	-2	3	121	11	192	15
14	28	-122	37	12	13	-18	7	157	28
15	30	-53	30	37	2	-47	16	95	22

Tabela 13. Tensões residuais presentes na amostra TIG1.

TENSÕES RESIDUAIS TIG1									
Ponto	Dist. do centro da solda	SUPERFÍCIE INFERIOR				SUPERFÍCIE SUPERIOR			
		$\sigma_L$	Desvio	$\sigma_t$	Desvio	$\sigma_L$	Desvio	$\sigma_t$	Desvio
-15	-30	-114	16	-42	6	-79	29	34	7
-14	-28	-50	14	-20	26	-100	10	-53	14
-13	-26	-61	9	-47	38	-47	17	-24	17
-12	-24	-53	21	-26	8	-11	25	38	26
-11	-22	0	18	-21	1	-59	7	58	6
-10	-20	-16	12	-18	8	14	21	-146	16
-9	-18	40	15	51	16	147	147	-124	48
-8	-16	85	9	75	7	200	77	-97	2
-7	-14	129	21	186	28	43	43	-138	8
-6	-12	208	44	233	27	-63	20	53	6
-5	-10	317	38	342	25	-11	17	-107	91
-4	-8	336	34	291	16	45	20	-120	79
-3	-6	183	23	181	18	-98	55	-57	30
-2	-4	214	36	201	88	241	31	-247	30
-1	-2	243	4	-27	57	258	74	-188	39
0	0	100	24	93	55	-76	16	-156	8
1	2	-53	42	-109	19	-98	45	-239	105
2	4	131	15	78	43	-65	28	-174	74
3	6	233	32	165	24	-46	57	-55	21
4	8	293	46	220	40	91	36	-162	92
5	10	345	30	251	19	244	64	101	48
6	12	259	43	175	27	153	42	-82	16
7	14	149	27	124	21	77	19	-184	46
8	16	82	12	102	18	265	62	-40	8
9	18	23	34	72	14	130	47	115	32
10	20	24	28	32	18	132	31	50	28
11	22	-22	12	59	12	-1	1	28	9
12	24	-82	31	38	17	58	23	25	22
13	26	-28	29	20	10	31	28	110	16
14	28	-108	18	35	18	-93	26	39	7
15	30	-113	20	20	13	-75	20	67	15

Tabela 14. Tensões residuais presentes na amostra TIG2.

TENSÕES RESIDUAIS TIG2									
Ponto	Dist. do centro da solda	SUPERFÍCIE INFERIOR				SUPERFÍCIE SUPERIOR			
		$\sigma_L$	Desvio	$\sigma_t$	Desvio	$\sigma_L$	Desvio	$\sigma_t$	Desvio
-15	-30	-65	20	-69	20	15	9	30	16
-14	-28	-89	26	-47	8	39	16	88	8
-13	-26	-21	14	-91	16	73	17	88	5
-12	-24	-43	21	-145	46	45	11	101	20
-11	-22	-31	24	-99	34	55	15	89	10
-10	-20	-16	13	-18	9	209	39	116	8
-9	-18	20	13	31	41	302	31	60	3
-8	-16	71	10	83	36	171	13	-185	53
-7	-14	137	28	115	27	18	4	-249	20
-6	-12	177	23	175	38	-268	52	-182	69
-5	-10	289	36	221	25	-235	36	--	--
-4	-8	192	31	263	41	-33	16	--	--
-3	-6	211	21	281	42	-171	51	-186	98
-2	-4	122	31	134	22	-142	33	-177	14
-1	-2	225	28	141	30	35	21	-153	26
0	0	128	29	263	41	66	6	146	53
1	2	96	31	-270	22	232	38	-264	90
2	4	72	8	-131	44	-101	24	-66	87
3	6	180	35	32	3	-42	31	-101	49
4	8	340	48	146	26	--	--	--	--
5	10	225	35	210	11	-98	43	--	--
6	12	143	22	149	33	111	23	--	--
7	14	96	21	98	31	--	--	-141	27
8	16	13	14	69	12	-146	31	-150	21
9	18	-76	8	20	12	77	3	44	9
10	20	-132	9	20	16	56	31	69	33
11	22	-155	13	37	22	106	5	7	7
12	24	-120	10	37	24	37	12	-24	1
13	26	-135	13	16	1	-76	18	-38	6
14	28	-187	17	27	9	5	4	--	--
15	30	-135	2	-9	1	40	7	--	--

Tabela 15. Valores de dureza – Junta TIG 1.

EIXO	LINHA 1		LINHA 2		LINHA3		LINHA 4		LINHA 5	
	Méd.	Desv.								
30	198,794	41,903	236,103	13,400	199,592	27,937	196,370	26,619	215,220	26,487
28	201,216	15,646	235,813	6,951	236,103	13,400	182,208	24,442	209,191	31,247
26	197,284	31,872	206,571	64,552	198,893	51,571	149,966	22,544	143,031	11,225
24	178,420	80,256	186,696	50,444	199,631	44,693	181,256	57,088	169,841	26,625
22	228,367	13,400	193,206	57,446	206,616	61,503	180,998	34,973	193,820	45,631
20	210,099	66,809	163,572	10,643	198,839	39,908	172,821	61,730	156,111	23,417
18	180,998	34,973	241,667	30,390	218,224	22,704	161,991	18,579	191,895	33,926
16	215,211	48,422	191,492	69,392	200,253	54,641	146,432	3,326	168,232	66,598
14	205,622	81,593	215,338	58,402	207,985	21,111	201,799	41,447	187,933	28,556
12	197,696	51,719	199,415	66,791	189,856	37,315	221,395	18,023	186,683	16,884
10	224,898	44,037	212,586	51,166	202,354	53,041	210,647	51,912	185,424	54,059
8	178,864	67,585	172,980	8,808	200,093	31,955	201,102	38,859	174,358	22,912
6	177,352	69,060	204,106	38,095	174,248	49,925	194,449	68,908	204,023	10,784
4	189,405	78,567	204,677	19,351	210,989	18,023	165,962	45,708	134,947	49,170
2	200,219	62,101	206,571	64,552	174,476	50,393	198,093	65,676	150,867	12,308
0	183,384	78,753	182,664	39,703	200,253	54,641	150,977	28,908	128,803	2,797
2	183,389	93,610	219,061	59,258	192,365	17,501	189,905	21,226	155,576	30,631
4	157,718	30,409	214,211	15,981	222,403	27,372	200,219	62,101	162,036	46,599
6	191,867	64,828	209,788	34,285	163,840	13,911	200,943	64,156	149,166	29,851
8	211,860	25,483	192,807	48,192	165,254	39,367	246,002	31,752	194,773	10,065
10	192,667	50,633	222,403	27,372	239,826	6,951	224,616	12,442	144,364	22,697
12	193,489	56,492	211,998	27,942	173,132	11,243	178,605	44,474	197,759	63,708
14	216,352	51,780	191,656	34,961	186,683	16,884	188,735	48,192	139,888	16,103
16	177,333	60,022	210,411	60,054	182,965	54,913	176,776	23,094	189,148	55,943
18	172,980	8,808	167,005	21,507	174,737	26,120	189,347	45,492	183,877	16,357
20	201,256	74,562	165,881	30,635	170,517	53,142	155,576	30,631	196,626	44,899
22	183,222	45,132	195,644	21,639	175,758	12,805	205,020	41,680	194,773	10,065
24	184,726	58,342	208,481	42,749	163,545	41,262	189,010	61,441	183,166	32,629
26	166,207	93,626	191,781	48,325	198,834	59,004	202,853	45,142	164,158	17,617
28	184,084	84,203	198,834	59,004	186,341	55,972	210,788	38,917	157,314	56,027
30	177,362	26,593	208,481	42,749	237,391	29,031	196,370	26,619	182,124	39,030

Tabela 16. Valores de dureza - Junta TIG 2.

EIXO	LINHA 1		LINHA 2		LINHA 3		LINHA 4		LINHA 5	
	Médio	Desvio								
30	224,907	17,198	198,577	38,198	166,154	39,781	198,295	40,174	191,658	45,269
28	178,952	48,279	206,313	46,374	180,246	44,647	195,618	38,904	205,512	26,187
26	213,948	11,574	180,998	34,973	172,277	26,390	193,820	45,631	182,220	53,452
24	178,943	20,059	182,623	27,894	193,820	45,631	209,191	31,247	153,408	30,287
22	172,008	24,960	151,466	18,119	174,316	23,719	172,817	29,074	155,406	17,446
20	211,662	44,490	182,623	27,894	169,812	24,942	137,200	30,675	180,246	44,647
18	170,756	75,149	189,856	37,315	180,998	34,973	172,817	29,074	167,005	21,507
16	181,251	17,145	182,623	27,894	172,564	42,049	150,510	6,858	178,664	34,051
14	215,220	26,487	228,630	17,018	149,158	15,183	181,569	19,853	198,450	19,664
12	192,613	38,676	175,144	39,718	168,281	57,282	198,450	19,664	139,182	8,345
10	177,538	29,114	202,051	23,764	198,839	39,908	136,403	15,969	203,128	48,969
8	172,767	52,340	195,116	35,582	169,812	24,942	155,703	32,815	199,881	67,263
6	162,758	24,952	186,395	33,299	196,370	26,619	165,781	71,331	184,830	76,979
4	196,530	51,719	201,455	18,755	165,258	50,747	142,056	19,189	165,506	61,522
2	153,046	47,715	173,320	53,388	189,148	55,943	143,382	43,635	144,621	6,462
0	196,929	60,398	167,193	56,479	171,922	35,628	153,347	49,332	127,106	41,715
2	186,395	33,299	180,998	34,973	155,342	16,123	181,371	17,666	183,332	8,150
4	175,787	13,669	218,390	23,227	143,466	27,203	171,586	42,658	124,646	37,454
6	147,405	17,745	236,103	13,400	164,797	23,387	160,112	35,155	168,365	12,805
8	179,126	62,876	200,755	37,520	205,512	26,187	194,880	46,548	183,151	0,000
10	214,049	51,598	229,742	28,185	208,191	40,892	161,381	11,283	165,144	39,062
12	168,001	27,925	192,613	38,676	181,569	19,853	168,505	14,351	141,809	16,910
14	192,667	50,633	208,993	30,178	210,498	36,896	202,300	41,798	149,427	17,955
16	197,579	5,204	201,102	38,859	158,918	28,278	171,311	18,785	188,735	48,192
18	248,851	20,032	201,455	18,755	127,802	22,959	161,991	18,579	186,843	47,497
20	172,277	26,390	179,401	23,285	184,259	51,598	202,553	28,314	146,284	22,716
22	195,825	22,976	210,036	48,498	196,370	26,619	174,476	50,393	177,039	39,815
24	201,216	15,646	206,775	34,131	158,918	28,278	179,499	39,191	174,248	49,925
26	190,902	45,976	172,564	42,049	206,313	46,374	198,295	40,174	201,455	18,755
28	181,411	45,164	148,323	23,262	186,083	33,178	193,759	60,049	221,395	18,023
30	193,210	43,847	186,083	33,178	155,260	40,504	187,098	21,451	178,691	36,466

Tabela 17. Valores de dureza - Junta ER 1

EIXO	LINHA 1		LINHA 2		LINHA 3		LINHA 4		LINHA 5	
	Méd.	Desv.								
30	188,434	29,809	181,273	51,787	152,699	46,091	176,438	34,313	174,484	40,081
28	180,955	42,643	138,442	18,455	156,402	43,248	155,398	31,768	113,260	9,822
26	144,334	48,758	166,837	34,288	124,876	37,886	142,372	22,236	145,929	32,577
24	143,033	50,002	121,158	2,505	123,537	14,716	132,883	15,061	188,139	51,035
22	151,016	60,323	137,473	9,422	143,987	20,705	176,652	38,606	171,922	35,628
20	157,557	64,333	159,744	56,065	176,822	52,752	162,218	32,564	167,064	37,510
18	169,113	55,310	150,977	28,908	143,388	15,442	171,212	45,178	177,734	39,578
16	170,728	53,515	145,199	14,645	136,455	26,084	184,044	36,148	148,323	23,262
14	181,251	17,145	132,322	8,893	146,541	25,379	183,173	30,156	155,634	19,084
12	168,178	57,996	122,029	29,246	124,072	18,409	173,114	40,028	129,897	17,260
10	158,423	54,079	139,398	25,621	159,027	28,733	160,490	50,002	161,942	51,799
8	181,677	58,709	152,592	26,986	161,523	42,198	164,609	43,935	228,367	13,400
6	149,048	41,374	129,491	13,284	167,135	42,323	155,361	56,701	124,068	32,075
4	157,713	64,491	161,920	17,141	165,775	37,623	173,433	31,414	124,708	35,260
2	161,523	42,198	150,271	24,100	141,679	16,708	138,449	19,505	165,045	24,742
0	138,444	54,906	158,341	47,742	160,332	40,815	121,842	23,623	145,895	54,793
2	174,731	40,798	145,091	43,064	150,781	28,150	115,669	6,316	133,876	31,217
4	155,361	56,701	157,802	19,254	140,242	30,665	151,695	56,957	157,802	19,254
6	160,389	54,006	130,816	38,902	146,541	25,379	147,543	17,925	108,025	7,492
8	155,148	69,429	142,056	19,189	139,888	16,103	104,315	5,406	192,184	15,646
10	165,584	40,275	154,985	12,660	125,829	6,984	145,593	39,817	141,220	11,756
12	164,677	33,474	167,930	46,430	148,998	38,059	139,477	47,165	147,251	36,463
14	197,284	31,872	122,331	17,654	157,314	56,027	112,851	2,253	173,529	42,358
16	169,113	55,310	175,144	39,718	158,403	36,910	160,496	53,480	176,397	19,451
18	143,336	14,315	187,638	48,434	171,212	45,178	154,962	48,111	172,437	26,188
20	152,946	13,263	156,110	65,549	184,475	36,593	126,209	28,375	158,944	7,752
22	197,995	13,734	172,653	56,917	168,604	45,056	141,795	34,243	120,112	10,323
24	164,271	63,201	125,441	18,087	163,863	50,820	173,631	32,766	157,180	39,732
26	197,088	32,308	131,276	26,450	161,922	33,482	162,958	42,476	139,511	12,954
28	165,542	27,281	161,791	48,054	166,623	51,416	146,551	6,858	135,770	22,885
30	154,883	39,578	198,450	19,664	148,598	45,021	141,805	41,745	169,841	26,625

