

RACHEL CRISTINA COFIÑO

**ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS EM UMA JUNTA
SOLDADA EM CONDIÇÃO OVERMATCH**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao Centro Universitário da
FEI, orientada pelo Prof. Dr. Rodrigo
Magnabosco.

São Bernardo do Campo

2010

Cofiño, Rachel Cristina

Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição
overmatch / Rachel Cristina Cofiño. - São Bernardo do Campo, 2010.

82 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

1. Difractometria de Raio-X. 2. Preparação Metalográfica. 3. Tensões
Residuais. I. Magnabosco, Rodrigo, orient., II. Título.

CDU 620.18

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco pela orientação e por acreditar na minha capacidade.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais, em especial ao Daniel e Geleci, por me auxiliarem sempre e tornarem as horas de trabalho mais animadas.

E por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos de sala, que tornaram os cinco anos de faculdade os melhores da minha vida!

*"Que os vossos esforços desafiem
as impossibilidades, lembrai-vos de que
as grandes coisas dos homens foram
conquistadas do que parecia impossível."*

Charles Chaplin

RESUMO

O presente trabalho analisa as tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch e a influência da preparação superficial sobre as medidas. As amostras foram submetidas a diferentes métodos de preparação e suas tensões foram medidas por difração de Raios-X. Verificou-se que as condições de preparação da superfície das amostras têm grande influência nos valores de tensões, e que o melhor método de preparação é o polimento eletrolítico, já que este fornece um bom aspecto superficial sem indução de tensões, de modo que as tensões medidas são provenientes somente do processo de soldagem, característica desejada.

Palavras-Chave: Tensões Residuais; Preparação Metalográfica; Difractometria de Raios-X; Furo Cego.

ABSTRACT

This work analyses the residual stresses in a welded joint in overmatch condition and the influence of surface preparation on the measures. The samples were subjected to different preparation methods and their tensions were measured by X-Ray diffraction. It was found that the conditions of surface preparation of the samples have great influence on the values of stress, and that the best method is electro polishing, as it provides a good surface appearance without inducing stress, so that tensions measures are derived only from the welding process, as desired.

Key Words: Residual Stresses; Metallographic Preparation; X-Ray Diffraction

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de soldagem por eletrodo revestido. (FORTES, 2005)	18
Figura 2: Regiões de uma solda monopasse. (ASM,2003).....	20
Figura 3: Representação esquemática da estrutura da zona termicamente afetada pelo calor em uma solda multipasses. (ASM, 2003).....	21
Figura 4: Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada. (PUC RIO, 2010).....	24
Figura 5: Representação esquemática da relação entre tensões residuais e variações de temperatura durante o processo de soldagem. (a) Região da solda. (b) Gradiente de temperatura ao longo do cordão de solda. (c) Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda. (MODENESI, 2008)	26
Figura 6: Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais ao cordão de solda provenientes dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T. (ESTEFEN et al, 2008)	28
Figura 7: Representação da distribuição de tensões residuais em uma estrutura soldada após aplicação de tensões trativas (curvas 1 e 2) e após elas serem removidas (curvas 1' e 2') (AGGEN et al, 1998).....	29
Figura 8: Representação dos Raios-X difratados pelos planos AA' e BB'. (CALLISTER, 2007).....	34
Figura 9: a) Distância interplanar em um material não tensionado. b) Distâncias interplanares de grãos com diferentes orientações, de um corpo tensionado. As distâncias mudam de acordo com a posição relativa entre o campo e o grão. (PUC RIO, 2010)	35
Figura 10: Variação das distâncias interplanares de um material tensionado. (PUC RIO, 2010)	36
Figura 11: Porção de superfície de um material tensionado. (CULLITY, 1956).....	36
Figura 12: gráfico de $2\theta_{\psi}$ em função de $\sin^2\psi$ fornecido diretamente pelo difratômetro.....	38

Figura 13: Esquema do filme de polimento formado sobre a superfície a ser polida, e a diferença de espessura do mesmo sobre os picos A e C. (ASM, 2004)	40
Figura 14: Interferência da relação corrente-voltagem no polimento. (WILLIAMS; CARTER, 1996).....	41
Figura 15: esquema da sequência de passes realizados na soldagem da junta.	42
Figura 16: representação esquemática da junta em estudo.....	42
Figura 17: Esquema de localização das amostras cortadas e dos pontos em estudo na junta, com as medidas em mm.	43
Figura 18: Representação dos pontos de estudo D, E, F e G em uma macrografia do cordão de solda.....	44
Figura 19: Máquina STRUERS LECTROPOL utilizada para polimento eletrolítico das amostras.	46
Figura 20: Seção transversal da junta evidenciando o cordão de solda, na qual é possível visualizar os diversos passes realizados.	48
Figura 21: Foto da superfície da junta, na qual é possível diferenciar MB e MS e os cordões realizados em passes diferentes. Os furos presentes na junta são devido à técnica Hole Drilling executada anteriormente à realização da macrografia.	49
Figura 22: Foto da superfície da junta.	50
Figura 23: Distribuições das tensões na junta após polimento mecânico.....	52
Figura 24: Perfil de tensões ao longo da junta após polimento mecânico seguido por polimento eletrolítico.....	53
FigFigura 25: Perfil de tensões ao longo da junta.	55
Figura 26: Distribuição das tensões ao longo da junta após polimento eletrolítico.	56
Figura 27: Distribuição das tensões residuais ao longo da junta após ataque com Nital 10% e polimento eletrolítico.....	57

Figura 28: Micrografia do ponto A (MB) com aumento de 100x.	58
Figura 29: Micrografia do ponto A (MB) com aumento de 500x.	58
Figura 30: Micrografia do ponto B (MB) com aumento de 200x.	59
Figura 31: Micrografia do ponto C (MB) com aumento de 200x.	59
Figura 32: Micrografia do ponto D (ZTA) com aumento de 200x.....	60
Figura 33: Micrografia do ponto D (ZTA) com aumento de 500x.....	61
Figura 34: Micrografia do ponto D (ZTA) com aumento de 500x.....	61
Figura 35: Micrografia do ponto E (MS) com aumento de 200x.	62
Figura 36: Micrografia do ponto E com aumento de 500x.....	63
Figura 37: Micrografia do ponto F com aumento de 500x.....	63
Figura 38: Micrografia do ponto G (ZTA) com aumento de 500x.....	64
Figura 39: Micrografia do ponto G (ZTA) com aumento de 100x.....	64
Figura 40: Perfil de microdureza (HV 0,3) ao longo da junta (mm).	65
Figura 41: Perfil de Microdureza dos pontos D (ZTA), E (MS), F (MS) e G (ZTA).	66
Figura 42: Distribuição das tensões residuais transversais ao cordão de solda ao longo da junta.	67
Figura 43: Distribuição das tensões residuais longitudinais ao cordão de solda ao longo da junta.	68
Figura 44: Comparação das tensões transversais ao cordão de solda das amostras na condição original e após polimento mecânico.	69
Figura 45: Comparação das tensões longitudinais ao cordão de solda das amostras na condição original e após polimento mecânico.....	69

Figura 46: Comparação das tensões transversais ao cordão de solda das amostras polidas somente mecanicamente com as polidas mecânica e eletroliticamente.	70
Figura 47: Comparação das tensões longitudinais ao cordão de solda das amostras polidas somente mecanicamente com as polidas mecânica e eletroliticamente.	71
Figura 48: Comparação entre as tensões transversais ao cordão de solda das amostras submetidas ao polimento mecânico+eletrolítico e das polidas somente eletroliticamente.	72
Figura 49: Comparação entre as tensões longitudinais ao cordão de solda das amostras submetidas ao polimento mecânico+eletrolítico e das polidas somente eletroliticamente.	72
Figura 50: Comparação das tensões transversais entre as amostras na condição original, das submetidas ao ataque com Nital 10% e polidas eletroliticamente, e das somente polidas eletroliticamente.	73
Figura 51: Comparação entre as tensões longitudinais das amostras na condição original, das submetidas ao ataque com Nital 10% e polidas eletroliticamente, e das somente polidas eletroliticamente.	74
Figura 52: Comparação entre as tensões transversais das amostras polidas mecanicamente, das polidas mecanicamente e eletroliticamente, e das polidas somente eletroliticamente.	75
Figura 53: Gráficos fornecidos pelo método Hole-Drilling das tensões, transversais (eixo x) e paralelas (eixo y) ao cordão de solda, medidas em função da profundidade do furo. (DONATO, 2008).....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Condições de lixamento e polimento realizados nas amostras em análise pela politriz automática ABRAMIN, realizando polimento simultâneo de 4 amostras de 40mm de diâmetro.	45
Tabela 2: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MB, sendo estes os pontos A, B e C, e T= Transversal e L= Longitudinal.	51
Tabela 3: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados na ZTA, sendo estes os pontos D e G, e T= Transversal e L= Longitudinal.	51
Tabela 4: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MS, sendo estes os pontos E e F, e T= Transversal e L= Longitudinal.	51
Tabela 5: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MB, sendo estes os pontos A, B e C, e T= Transversal e L= Longitudinal.	52
Tabela 6: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados na ZTA, sendo estes os pontos D e G, e T= Transversal e L= Longitudinal.	53
Tabela 7: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MS, sendo estes os pontos D e G, e T= Transversal e L= Longitudinal.	53
Tabela 8: Valores de tensões residuais (MPa) e seus respectivos desvios padrões medidas nas amostras em condição original, sem que estas fossem submetidos a tratamentos de superfície envolvendo remoção de material.	54
Tabela 9: Tensões Residuais das amostras lixadas em lixa d'água #80 e polidas eletroliticamente.	55
Tabela 10: Tensões residuais nas amostras imersas em Nital 10% e polidas eletroliticamente.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVO	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Soldagem	17
3.2	Soldagem por eletrodo revestido	17
3.3	Metalurgia da soldagem.....	18
3.3.1	Soldas Monopasses.....	19
3.3.2	Soldas multipasses.....	20
3.4	Dissimilaridade mecânica das soldas.....	21
3.5	Tensões residuais	22
3.5.1	Tipos de tensões	23
3.5.2	Origem das Tensões Residuais	25
3.5.3	Tensões residuais geradas durante a soldagem.....	25
3.5.4	Alterações da distribuição de tensões residuais.....	28
3.6	Técnicas de medição de tensões residuais	30
3.6.1	Técnicas destrutivas.....	31
3.6.2	Técnicas semi-destrutivas.....	31
3.6.3	Técnicas não destrutivas	34
3.7	Polimento eletrolítico.....	40
3.7.1	Mecanismo	40

4	METODOLOGIA.....	42
4.1	Soldagem	42
4.2	Análise macrográfica	43
4.3	Difratometria de raios-X.....	43
4.3.1	Difratometria de raios-X das amostras polidas mecanicamente.....	45
4.3.2	Difratometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente após polimento mecânico.....	45
4.3.3	Difratometria de raios-X das amostras na condição original	46
4.3.4	Difratometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente.....	46
4.3.5	Difratometria de raios-X das amostras atacadas com Nital 10% e posterior polimento eletrolítico.....	47
4.4	Micrografias.....	47
4.5	Perfil de Microdureza	47
5	RESULTADOS	48
5.1	Análise macrográfica	48
5.2	Difratometria de raios-X das amostras polidas mecanicamente.....	50
5.3	Difratometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente após polimento mecânico.....	52
5.4	Difratometria de raios-X das amostras na condição original.....	54
5.5	Difratometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente.....	55
5.6	Difratometria de raios-X das amostras atacadas com Nital 10% e posterior polimento eletrolítico.....	56
5.7	Micrografias.....	57

5.8	Perfil de Microdureza	65
6	DISCUSSÃO	67
6.1	Difratometria de raios-X	67
6.2	Comparação entre as medidas obtidos por DFRX e HD	75
6.3	Perfil de Microdureza	77
7	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás exige padrões muito elevados dos aços fornecidos para vasos de pressão. Atendendo a essas normas, o aço ASTM A516 Grau 70 é utilizado em tal finalidade. Uma característica dessa classe é a boa tenacidade ao entalhe, ou seja, boa capacidade de absorção de energia quando uma falha está presente. (WINTERTON, 2010) Entretanto, não é suficiente que o material esteja dentro das especificações, sendo de suma importância também a qualidade no processo de conformação e de soldagem da chapa, já que possíveis tensões residuais podem ser geradas nesta etapa, prejudicando e comprometendo o comportamento do componente. O atual trabalho tratará principalmente do processo de soldagem.

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

As tensões residuais podem atuar benéficamente ou prejudicialmente no desempenho dos componentes mecânicos, mas representam um dos principais potenciais para provocar falhas prematuras e distorções na peça, comprometendo o comportamento e até mesmo diminuindo a vida útil do componente (MODENESI, 2008), sendo fundamental o conhecimento de suas características e de medidas para a sua prevenção e controle.

A medição, controle ou monitoramento de tensões residuais durante toda rota de processamento do material é de vital importância para assegurar os desvios de forma e dimensão previstos no projeto de engenharia em etapas subsequentes de processamento do material. Atualmente, existem muitos métodos para a medida e determinação das tensões residuais, cada um apresentando suas vantagens e limitações, entre elas técnicas de alívio de tensão e técnicas de difração de raios-X. No método pelo alívio da tensão a tensão residual é determinada medindo-se o relaxamento da tensão elástica que ocorre quando uma amostra do material é removida. Uma desvantagem dessa técnica é o fato do processo ser destrutivo. Em relação ao método de medição através da difração de raios-X, como o parâmetro de rede dos metais não tensionados é conhecido, é possível compará-lo em ambos os estados e obter o resultado, sem usinagem ou perfuração.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo analisar as tensões residuais em uma junta soldada em condição de *overmatch*, na qual o metal de base é um aço ASTM A516 grau 70, e a influência da preparação da superfície sobre as medidas. As medições de tensões serão realizadas através da técnica de difratometria de raios-X, e estas serão comparadas às medições já realizadas pelo método do furo cego. Em cada região de medição serão realizados ensaios de microdureza e micrografia, e um estudo para que tais resultados sejam relacionados com os valores de tensão residual.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Soldagem

Soldagem é a operação que visa à união de materiais, similares ou não, de forma permanente, assegurando na junta, a continuidade das propriedades químicas e físicas. Juntas soldadas são encontradas em praticamente todas as aplicações estruturais de engenharia e é a forma mais importante de união permanente de peças usadas industrialmente. (WIKIPEDIA, 2010)

Existem basicamente dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro é a soldagem por fusão, a qual consiste na aplicação de calor, com conseqüente aquecimento e fusão, e o segundo é a soldagem no estado sólido, que 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. No presente trabalho será tratada a soldagem por fusão. (WIKIPEDIA, 2010)

Independente do processo, projeto ou procedimento de soldagem, o material fundido e suas adjacências são expostos a ciclos de deformação, ciclos térmicos e, principalmente, transformações metalúrgicas severas, as quais acarretam heterogeneidades de caráter metalúrgico, microestrutural e mecânico. Tais fenômenos têm profunda relação com a resistência mecânica, tenacidade, aparecimento e propagação de trincas, o que faz com que exerçam grande influência na segurança de estruturas soldadas. Do ponto de vista mecânico, portanto, surgem alterações na resposta estrutural dos componentes, ao mesmo tempo em que, do ponto de vista metalúrgico, as diferentes propriedades de material resultantes em cada área podem se mostrar fortemente deletérias à resistência à fratura do sistema. Assim, faz-se valiosa uma breve avaliação da metalurgia da soldagem e dos possíveis efeitos de tais procedimentos sobre os campos de tensão na proximidade de defeitos e tenacidade à fratura dos materiais empregados.

3.2 Soldagem por eletrodo revestido

O processo de soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido consiste, basicamente, na abertura e manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo revestido e a peça a ser soldada.

O calor produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos na combustão do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, protegendo o metal de solda a atmosfera durante a solidificação. Outras funções do revestimento são proporcionar estabilidade ao arco e controlar a forma do cordão de solda. (FORTES, 2005) O processo é esquematizado na Figura 1.

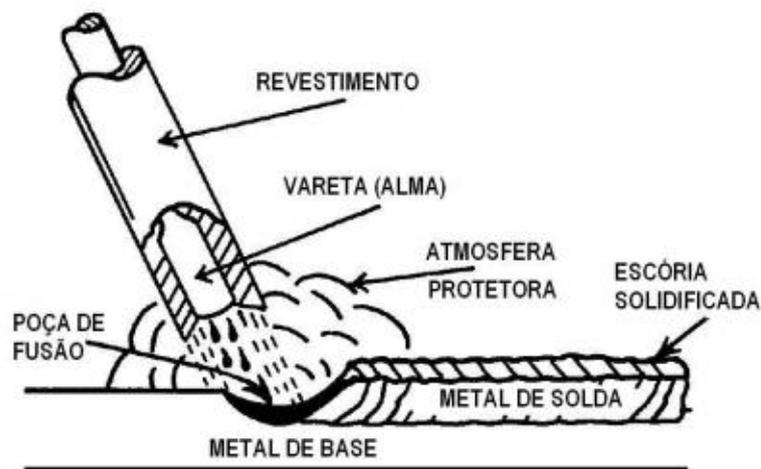


Figura 1: Esquema de soldagem por eletrodo revestido. (FORTES, 2005)

3.3 Metalurgia da soldagem

Sabe-se que a microestrutura resultante de uma estrutura soldada de aço depende da velocidade de resfriamento. Durante os processos de soldagem o aporte de calor é muito severo e localizado, gerando um gradiente térmico muito elevado. As dimensões da zona termicamente afetada, assim como de cada uma de suas regiões, são determinadas pelo aporte de calor aplicado durante o processo de soldagem. As fases e morfologias resultantes em cada região, por outro lado, são resultado direto das condições de resfriamento da junta. Elevadas taxas de resfriamento conduzem à formação exclusiva de martensita, enquanto taxas menores conduzem a combinações de martensita com bainita, ferrita e perlita respectivamente. Portanto, o conhecimento de tais microestruturas e seu controle desempenham um papel fundamental na avaliação da resistência à fratura de estruturas soldadas em geral. (ASM, 2003)

3.3.1 Soldas Monopasses

No caso de uma solda monopasse, a solda pode ser dividida em duas regiões: a zona de fusão e a zona termicamente afetada (ZTA). A zona de fusão é a região na qual houve a fusão dos metais de base e adição. É uma região de composição química e propriedades mecânicas fortemente dependentes da especificação dos consumíveis de soldagem, assim como da taxa de dissolução do metal de base, e é inerentemente mais susceptível a defeitos (porosidades, microtrincas, etc.) em relação ao metal de base. A composição química da zona termicamente afetada não é alterada pelo fato de que a temperatura que tais regiões alcançam são inferiores à temperatura de fusão, entretanto, há alterações microestruturais. O tamanho de grão austenítico diminui com o aumento da distância da zona de fusão, assim como a taxa de resfriamento varia de região para região. Devido à variação das condições térmicas de acordo com a distância da zona de fusão, pode se dividir a zona termicamente afetada em quatro regiões, descritas a seguir e visualizadas na Figura 2: (ASM, 2003)

- Região de grãos grosseiros (CGHAZ- coarse grain heat affected zone): região de rápido crescimento de grãos austeníticos devido às temperaturas próximas às de fusão. Os maiores tamanhos de grão favorecem a temperabilidade e tal região é muito susceptível à formação de martensita, com decorrente sensível endurecimento;
- Região de grãos intermediários (ICHAZ- intercritical zones): região na qual as temperaturas não são elevadas suficientemente para gerar crescimento de grão, mas suficientes para austenitizar o material e permitir formação de martensita caso as taxas de resfriamento sejam elevadas;
- Região de grãos refinados (FGHAZ- fine grain heat affected zone): o material é parcialmente austenitizado, gerando uma morfologia de grãos bastante finos;
- Região de aquecimento subcrítico (SCHAZ- subcritical zone): região pouco afetada pelo calor, na qual não ocorre austenitização e os grãos podem sofrer revenimento devido ao calor do processo de soldagem. Pode ocorrer amolecimento localizado.

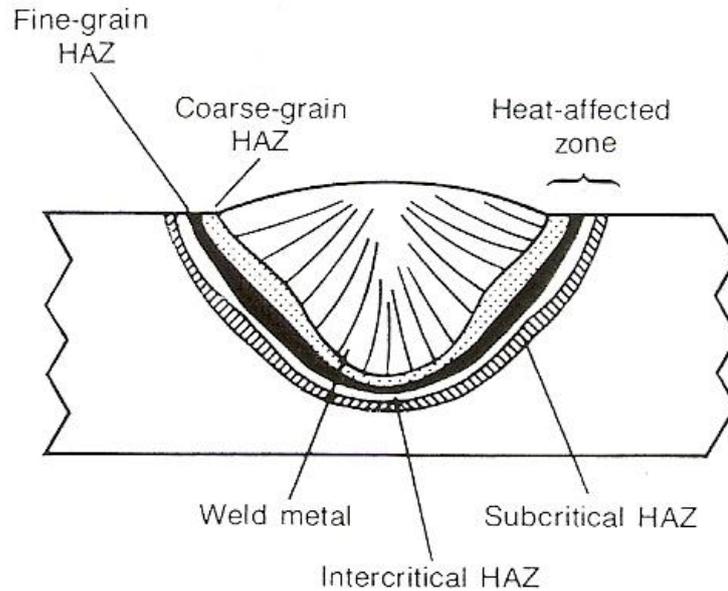


Figura 2: Regiões de uma solda monopasse. (ASM,2003)

3.3.2 Soldas multipasses

O caso de juntas soldadas multipasses é significativamente mais complexo, já que os ciclos térmicos de passes subsequentes alteram a microestrutura dos passes anteriores (já alterados em relação ao metal de base), fazendo com que a ZTA seja dividida em diversas regiões de acordo com a temperatura atingida ao longo dos múltiplos passes.

Na região intercriticamente reaquecida ocorre transformação parcial da perlita em austenita. Uma vez que a solubilidade do carbono na austenita é da ordem de 2% (contra solubilidade máxima de 0,022% do mesmo elemento na ferrita), ocorre a formação de uma fase austenítica rica em carbono. Com o subsequente resfriamento, esta austenita enriquecida transforma-se em “ilhas” contendo uma microestrutura frágil e de baixa tenacidade. Tais zonas de fragilidade (ZFLs) são extremamente danosas à tenacidade da ZTA e, conseqüentemente, à resistência à fratura da junta soldada. Consistem de uma região da CGHAZ inalterada, uma região de grãos grosseiros aquecida intercriticamente (IRCG), e uma região de grãos grosseiros aquecidos subcriticamente (SRCG), e encontram-se alinhadas adjacentes à zona de fusão, sendo um caminho curto e fácil para a propagação de trincas. Além disso, as zonas de fragilização localizada, além de ocorrer na ZTA também podem ocorrer no metal de adição de passes anteriores durante os ciclos de reaquecimento, caracterizando a região de deposição como extremamente delicada do ponto de vista de

fratura e integridade estrutural. (ASM, 2003). Essas regiões podem ser visualizadas na Figura 3.

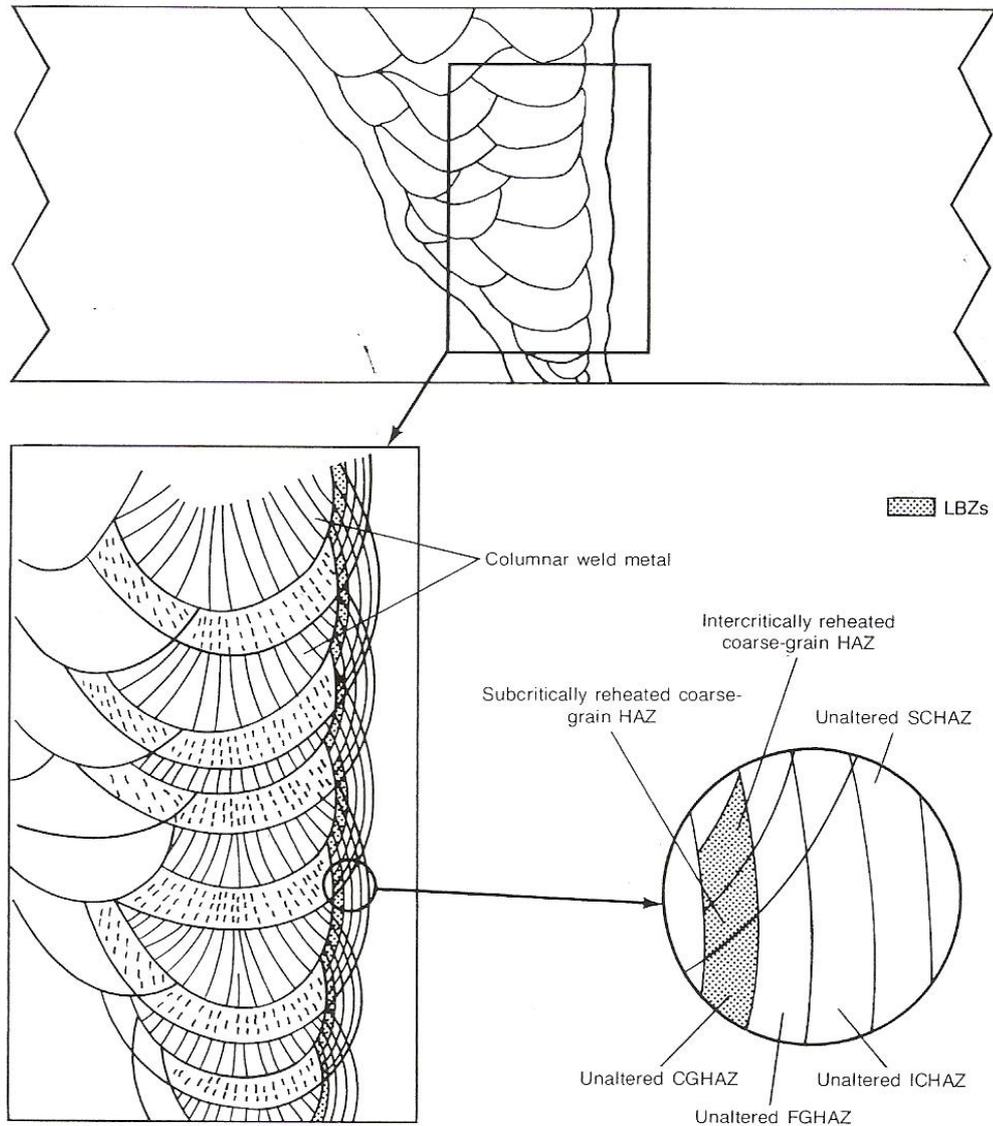


Figura 3: Representação esquemática da estrutura da zona termicamente afetada pelo calor em uma solda multipasses. (ASM, 2003)

3.4 Dissimilaridade mecânica das soldas

A qualidade metalúrgica do cordão de solda é inferior ao metal de base. Isso decorre da presença de tensões residuais e deformações na solda, alterações metalúrgicas e mecânicas e possíveis discontinuidades. Devido a essas características, o metal de solda e suas regiões adjacentes, a zona termicamente afetada (ZTA), apresentam reduzida tenacidade à fratura em

comparação com o metal de base, sendo, conseqüentemente, mais susceptível às fraturas. (MOREIRA, 2008)

Estudos demonstraram que a resistência à fratura de uma microestrutura na ZTA poderia ser alterada através da mudança nas propriedades do metal de base. (MOREIRA, 2008) Essa mudança é realizada através de uma condição chamada *Weld Strength Mismatch*, em português, Dissimilaridade Mecânica da Solda (DMS), na qual material de adição e material de base apresentam resistência diferentes. Existem três tipos de DMS:

- Metal de adição mais resistente (overmatch);
- Ambos os materiais de mesma resistência (evenmatch);
- Metal de adição menos resistente que o metal de base (undermatch).

Recomenda-se a fabricação de soldas em condições overmatch como forma de desviar grande parte das deformações para o metal de base menos resistente, o qual, presumivelmente, apresenta melhor controle microestrutural e menor presença de defeitos, e, conseqüentemente, suportará tensões maiores que o metal de solda sem a propagação de defeitos. (DONATO, 2008) Além disso, o nível de tensões residuais da solda multi-passes, em especial na direção transversal ao cordão, são menores quando há a condição overmatch na solda. (MOREIRA, 2008)

3.5 Tensões residuais

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem frequentemente em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera, etc.) e representam um dos principais potenciais para diversos problemas como a formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e uma maior tendência para a estrutura sofrer fratura frágil, diminuindo a vida útil do componente além de comprometer seu comportamento (MODENESI, 2008); entretanto, também podem atuar benéficamente. Em geral tensões residuais compressivas na superfície são mais favoráveis, pois aumentam a vida em fadiga de um componente mecânico, e o oposto ocorre com tensões residuais trativas, pois diminuem a vida em fadiga. (TOTTEN; HOWES, 2003)

As tensões residuais apresentam caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento local do material. Também se define as tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, uma tensão trativa irá se somar com outra tensão trativa, ou ainda, uma tensão trativa irá se subtrair com outra tensão compressiva e vice-versa. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura a qual a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material. Ou seja, neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas (escoamento do material) e serão aliviadas. (DONATO, 2008)

3.5.1 Tipos de tensões

A classificação mais comum das tensões residuais é quanto à área de abrangência, sendo elas tensões residuais macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas.

Como já dito, as tensões residuais são originadas devido a desajustes entre diferentes regiões. Quando esses desajustes atravessam grandes distâncias, por exemplo, aqueles causados por deformação plástica não uniforme ou por acentuados gradientes térmicos, como o que ocorre na soldagem ou tratamento térmico, as tensões residuais resultantes são do tipo macroscópicas, conhecidas como tipo I. (WITHERS; BHADESHIA, 2001) Um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas encontrado em chapas finas soldadas está apresentado na Figura 4. Tem-se o valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e ocorre uma redução deste valor na medida em que se afasta do cordão até que a tensão se torne compressiva, para manter o equilíbrio dos carregamentos internos, considerando-se que as tensões são constantes ao longo da espessura.

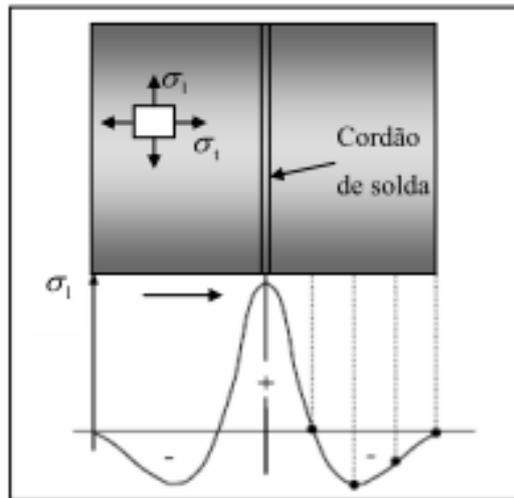


Figura 4: Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada. (PUC RIO, 2010)

Já as tensões residuais que variam de grão para grão (tipo II, ou intergranular) ou na escala atômica (tipo III) são tensões microscópicas. Em tais casos, as regiões de desajustes alcançam dimensões micro ou submicroscópicas. Um baixo nível de tensões tipo II quase sempre existe nos metais policristalinos simplesmente pelo fato de que as propriedades térmicas e elásticas de grãos vizinhos orientados diferentes não são as mesmas, e níveis mais elevados ocorrem quando há várias fases ou quando ocorrem transformações de fases. A categoria tipo III ocorre nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam discontinuidades na rede cristalina como vazios, impurezas, falhas de empilhamento, entre outros. Em um material bifásico, tensões macroscópicas são contínuas ao longo das fases, o que não ocorre com tensões microscópicas tipo II e III. (PUC RIO, 2010)

Um cuidado considerável deve haver na escolha da técnica de medição de tensão residual. Deve-se saber qual o tipo de tensões é importante ao projeto do componente para melhorar seu desempenho ou assegurar-se uma integridade estrutural. Por exemplo, em metálicos, tensões tipo II e III são geralmente desprezíveis, e a atenção é voltada as tensões macroscópicas tipo I. Como consequência, um comportamento inesperado pode não ser devido a medidas erradas de tensões, mas devido à medição do tipo errado de tensão pela escolha inadequada da técnica.

3.5.2 Origem das Tensões Residuais

Uma das principais causas de seu aparecimento é a ocorrência, ao longo de uma seção da peça, de deformações elásticas ou plásticas não uniformes, em escala macro ou microscópica, (TOTTEN; HOWES, 2003) as quais podem ser originadas por efeitos mecânicos ou térmicos.

Tensões residuais de soldagem também podem ser originadas por transformações de fase caso, durante o ciclo térmico, haja transformação de fase localizada que implique em variação volumétrica. A transformação de fase localizada/não homogênea no material pode ocorrer devido às diferentes temperaturas que as regiões do mesmo apresentam durante a soldagem, velocidades de resfriamento diferentes ou variações de composição química. (MODENESI, 2008)

3.5.3 Tensões residuais geradas durante a soldagem

Tensões residuais de soldagem são consequência da variação de temperatura heterogênea no material decorrentes da realização da soldagem. As etapas de aquecimento e resfriamento são de suma importância. Se um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais (dilatação e contração), estas não resultam em efeitos mecânicos importantes no objeto, isto é, após o ciclo térmico, o objeto não deverá apresentar nem tensões residuais nem distorções. Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver. Pode se dizer, portanto, que tensões residuais térmicas são aquelas resultantes de deformações plásticas não uniformes causadas por variações térmicas desiguais ao longo do material. (AGGEN et al, 1998)

Durante a soldagem por fusão a arco elétrico, por exemplo, ocorre no material de base um aquecimento muito localizado, que faz com que, num dado momento, uma pequena porção deste material atinja a fusão, formando a poça de fusão, que posteriormente se solidificará formando a zona fundida. Como existe uma continuidade no material, a região adjacente à zona fundida atinge uma temperatura bem próxima à de fusão do material. Sabe-se que quando um material metálico é aquecido, sofre dilatação, assim como sofre contração

quando é resfriado. No entanto, durante a soldagem, o metal aquecido é impedido de se expandir pelas regiões mais frias do material, resultando em tensões residuais de compressão nas regiões próximas à zona de fusão, e tensões residuais de tração nas regiões que impediram sua dilatação (as mais distantes da zona de fusão e mais frias). Caso as tensões residuais superem o limite de escoamento do material, este sofre deformação plástica para alívio de tensões. Agora, a mesma porção que foi aquecida e se encontra comprimida começa a resfriar, e então a tendência é de que o material se contraia. Inicialmente a região se alivia da compressão e, como não consegue reduzir seu tamanho, pois o restante do material não permite, ela acaba sendo tracionada. As tensões trativas inferiores ao limite de escoamento permanecem ao final da soldagem, sendo essas as residuais. (ZEEMANN, 2003) Um esquema mais detalhado da relação entre as variações de temperatura e tensões residuais desenvolvidas durante a soldagem em um componente pode ser visualizado na Figura 5.

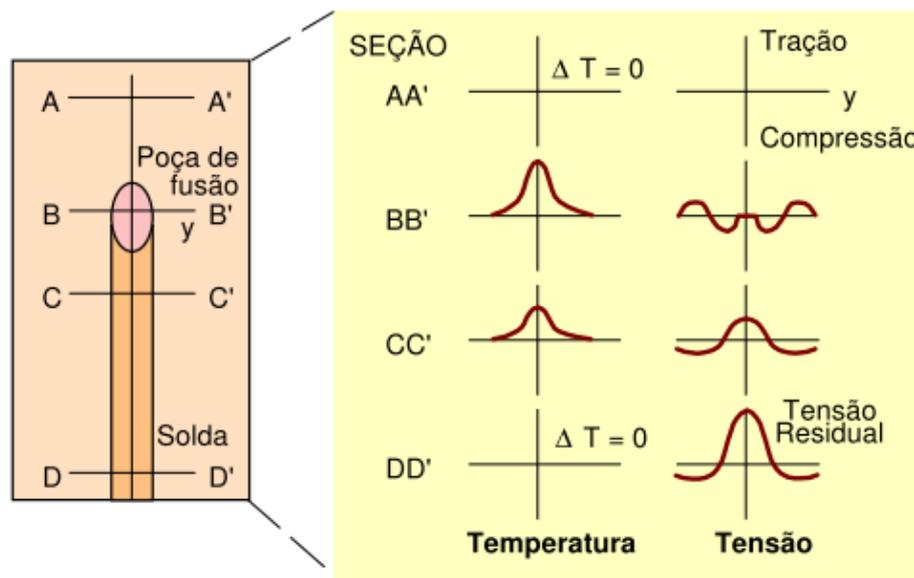


Figura 5: Representação esquemática da relação entre tensões residuais e variações de temperatura durante o processo de soldagem. (a) Região da solda. (b) Gradiente de temperatura ao longo do cordão de solda. (c) Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda. (MODENESI, 2008)

O arco elétrico está localizado na origem do sistema de coordenadas da Figura 5, e, portanto, há aí metal fundido, representado por uma elipse. A seção AA', distante da fonte de calor, ainda não sofreu variação térmica e está isenta de tensões. Na seção BB', o material aquecido é impedido pelas regiões mais frias da peça de se expandir por dilatação, gerando tensões de compressão nas regiões próximas à zona de fusão e tensões de tração nas regiões

um pouco mais afastadas. Na poça de fusão, como o metal está líquido, as tensões são nulas. A seção CC' está se resfriando e solidificando, com tendência à contração, porém é restringida pelas regiões mais afastadas da solda, gerando tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Após o resfriamento completo, seção DD', as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material. (MODENESI, 2008) A distribuição das tensões, considerando apenas o efeito da restrição da contração é mostrado na Figura 6 (a).

Além do gradiente de temperatura nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda, também há um gradiente ao longo da espessura da peça. Este gradiente pode ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais ao longo da espessura. Quando este gradiente for elevado, como no caso de chapas espessas, o nível de tensões será elevado. Se o resfriamento mais rápido da superfície fosse a única fonte de tensões residuais, seriam obtidas tensões compressivas na superfície e, em equilíbrio, tensões trativas em seu interior. A distribuição de tensões residuais devido somente ao efeito de resfriamento mais rápido da superfície é apresentada na Figura 6 (b).

Na soldagem, as tensões residuais também são decorrentes de transformações de fases. Os fenômenos de contração e transformação de fase se sobrepõem, e então a quantidade e sinal das tensões residuais dependem fortemente da temperatura na qual a transformação ocorre. (TOTTEN; HOWES, 2003)

No caso de aços, a transformação de austenita para ferrita, bainita ou martensita implica em expansão volumétrica, entretanto, as regiões vizinhas, frias e não transformadas impedem tal expansão, gerando tensões residuais compressivas no material transformado, e trativas na sua vizinhança. Dependendo do módulo de Young (E), rigidez do componente e coeficiente de expansão térmica, tensões compressivas ou até mesmo trativas resultam. Elevadas tensões residuais de tração são obtidas quando o fim da transformação ocorre em temperaturas relativamente altas. Sendo assim, o limite de escoamento à tração da microestrutura perlítica com ferrita pode ser superado pelas tensões residuais. Conseqüentemente, quanto menor a temperatura de transformação, mais significativos os efeitos das transformações na tensão residual resultante. (TOTTEN; HOWES, 2003)

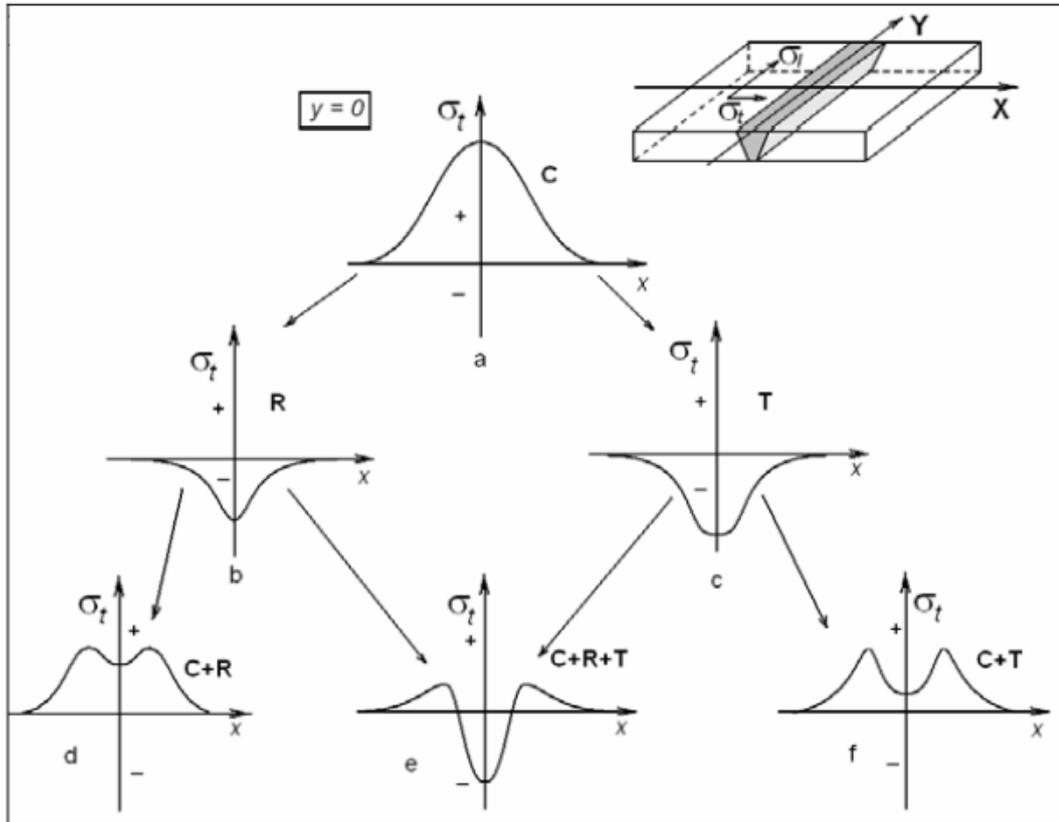


Figura 6: Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais ao cordão de solda provenientes dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T. (ESTEFEN et al, 2008)

O nível de tensões depende do grau de restrição da estrutura, na direção considerada. Na maioria dos casos, a restrição é total na direção longitudinal do cordão de solda.

Uma vez que as tensões residuais existem na ausência uma solicitação externa, pode-se afirmar que o sistema é auto-equilibrado e a força e o momento resultante destas tensões, em uma dada seção da peça, devem ser nulos, portanto, as tensões residuais compressivas e trativas são equilibradas. (AGGEN et al, 1998)

3.5.4 Alterações da distribuição de tensões residuais

Quando uma estrutura contendo tensões residuais é submetida a tensões trativas, são observadas mudanças nas tensões residuais, que podem ser visualizadas na Figura 7. A curva 0 representa a distribuição da tensão residual longitudinal da estrutura soldada. Após aplicação de certa tensão σ_1 , a tensão residual é alterada e resulta na curva 1. As tensões próximas ao cordão de solda, região de elevada tensão residual trativa, supera o limite de

escoamento, e na região mais afastada ocorre um grande aumento nas tensões residuais. Quando a tensão aplicada aumenta para σ_2 , a distribuição da tensão será como mostra a curva 2. Se a tensão aplicada for ainda maior, toda a secção tem seu limite de escoamento alcançado, como mostra a curva 3. Após toda a secção sofrer escoamento, a tensão residual não tem mais efeito. (AGGEN et al, 1998)

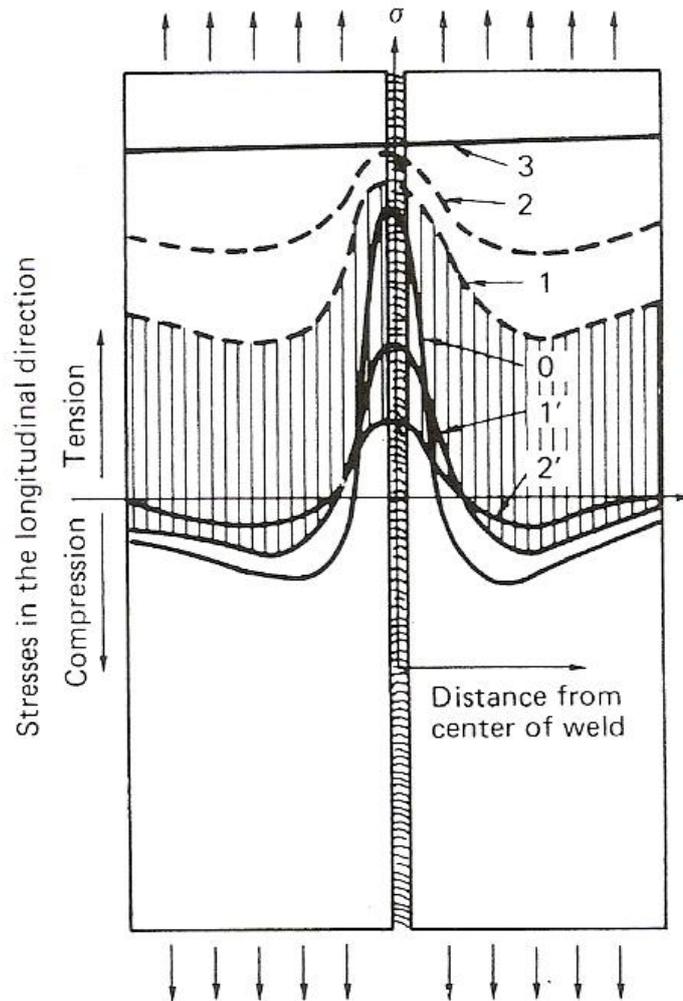


Figura 7: Representação da distribuição de tensões residuais em uma estrutura soldada após aplicação de tensões trativas (curvas 1 e 2) e após elas serem removidas (curvas 1' e 2') (AGGEN et al, 1998)

A curva 1' representa a tensão residual remanescente após a σ_1 ser aplicada e removida, e assim sucessivamente. Essa redistribuição de tensões residuais ocorre pois as tensões aplicadas à solda provocam deformação plástica localizada. Comparado com a distribuição original da tensão residual, representada pela curva 0, tais distribuições de tensões residuais são menos severas. Quanto maior o nível das tensões aplicadas, mais

uniforme é a distribuição de tensões residuais após retirada a carga. Tal fenômeno é conhecido por alívio mecânico de tensões.

O tratamento de alívio de tensões também pode ser térmico, de modo que a estrutura soldada é aquecida a temperaturas e tempos adequados, de acordo com o material e sua espessura, e resfriado lentamente. (AGGEN et al, 1998)

3.6 Técnicas de medição de tensões residuais

A medição de tensões residuais é particularmente difícil, pois, conforme explicado anteriormente, as tensões residuais estão presentes em componentes isentos de qualquer carregamento externo. Como as técnicas tradicionais de medição experimental de tensões em geral se baseiam na mudança de determinadas propriedades antes e depois da aplicação de um carregamento, elas não percebem as tensões residuais.

De uma forma geral, podem-se seguir dois caminhos para obter o valor das tensões residuais:

- Remover material e verificar as tensões aliviadas
- Comparar as propriedades do componente tensionado com as do componente isenta de tensões. (PUC RIO, 2010)

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

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

3.6.1 Técnicas destrutivas

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

O procedimento geral utilizado nestas técnicas é bastante similar e está descrito abaixo:

- Criação de um novo estado de tensões pelo alívio localizado das tensões residuais. Isto é normalmente feito pela retirada de material tensionado, através de usinagem ou retirada de camadas deste;
- Medição da deformação ou dos deslocamentos causados pelo alívio das tensões residuais;
- A partir destes dados, as tensões são calculadas, relacionando tensão e deformação através da teoria da elasticidade. (PUC RIO, 2010)

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

3.6.2 Técnicas semi-destrutivas

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

Nessa categoria a técnica mais conhecida e empregada pela indústria em geral é a técnica do furo-cego, mas também existem outras, como por exemplo, *Spot Annealing e Ring Coring* (Técnica do anel usinado).

3.6.2.1 Método do furo cego (*Hole-drilling - HD*)

Consiste em medir a mudança na deformação superficial decorrente do alívio mecânico, realizado através da introdução de um furo de pequenas dimensões na superfície do componente. O princípio é que a remoção de material implica em reajuste do estado de tensão do material adjacente, de modo a alcançar o equilíbrio. (TOTTEN; HOWES, 2003)

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

Na maioria dos casos, as tensões residuais não são uniformes ao longo da profundidade. Por exemplo, um material submetido a shot peening apresenta elevadas tensões compressivas próximas a superfície, e tensões trativas de magnitude muito inferior em seu interior. Em tais casos, não se pode aplicar um método que considera as tensões como uniformes. Alguns métodos matemáticos foram desenvolvidos de modo a calcular tensões residuais não uniformes em materiais de espessura considerável a partir de medidas obtidas pelo método Hole-Drilling. Esses métodos identificam as tensões residuais interiores considerando a evolução das deformações medidas conforme a profundidade do furo aumenta. Pelo fato de que as deformações são medidas por “strain-gages” fixados na superfície do material, a maior sensibilidade das tensões residuais é próxima a superfície, reduzindo rapidamente com a profundidade. Em profundidades em torno do raio da roseta a sensibilidade é nula. Essa é a limitação fundamental deste método, que implica na dificuldade de avaliar corretamente as tensões no interior do material. Pequenos erros nas medidas realizadas manualmente implicam em um grande erro no cálculo das tensões.

Há três métodos:

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

O método do furo cego é um dos mais utilizados na determinação de tensões residuais superficiais, pois apresenta relativo baixo custo, mobilidade do equipamento, e possibilidade de aplicação a uma vasta variedade de materiais, entretanto, apresenta limitações por ser semi-destrutivo. Existem restrições na aplicação da técnica do furo-cego, e, além da falta de sensibilidade dos gages com aumento da profundidade e os erros experimentais, já citados anteriormente, outra restrição refere-se ao fato de que tal método se aplica à casos nos quais o material se comporta de modo elástico-linear, portanto, na prática, resultados satisfatórios são obtidos quando as tensões residuais não ultrapassam 60% da tensão de escoamento do material. (AGGEN et al, 1998) Um material que apresenta tensões residuais superiores a este valor, ao ser submetido ao método do furo-cego poderá apresentar uma plastificação na borda do furo provocada pela redistribuição no estado de tensões na região onde houve a remoção de material e desta forma os resultados obtidos no ensaio não serão corretos, podendo superar a tensão de escoamento do material. Neste caso, os resultados obtidos pela técnica tradicional do furo cego não são confiáveis, pois o algoritmo de cálculo das tensões é baseado em teorias linear-elásticas. (ASTM, 2009)

3.6.3 Técnicas não destrutivas

Os métodos não destrutivos medem a deformação através da análise da estrutura cristalina do material metálico ou de algum parâmetro físico que sofra alteração em função do espaçamento interplanar do cristal. (TOTTEN; HOWES, 2003)

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

3.6.3.1 Difratomia de Raios-X (*X-Ray Diffraction – XRD*)

Quando um material cristalino é irradiado por um feixe de raios-X monocromático com comprimento de onda λ , ocorre o espalhamento deste feixe pelos átomos que compõem o material. Um feixe difratado pode ser definido como um feixe composto de um grande número de raios espalhados reforçando-se mutuamente. Devido à distribuição regular dos átomos no material, as ondas espalhadas tendem a interferir entre si de modo similar à difração de luz visível, como é possível verificar na Figura 8.

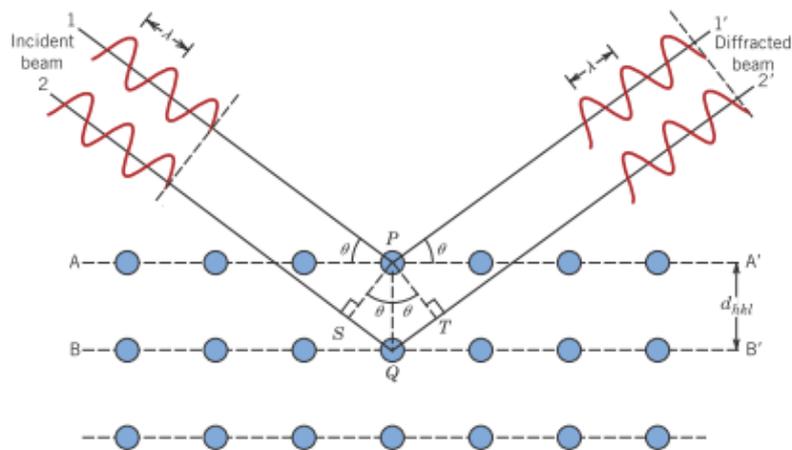


Figura 8: Representação dos Raios-X difratados pelos planos AA' e BB'. (CALLISTER, 2007)

As intensidades destas ondas se somam segundo uma interferência construtiva, se a seguinte condição, conhecida como lei de Bragg (Eq. 1), for satisfeita: (PUC RIO, 2010)

$$n * \lambda = 2 * d * \text{sen } \theta \quad (\text{Eq. 1})$$

Na qual:

n = número inteiro conhecido por ordem de difração

d = distância interplanar

λ = comprimento de onda do feixe incidente

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

O método de medição e de cálculo mais conhecido é chamado de *método do seno² ψ* . Tal método usa alguns pressupostos em relação à condição do material, e utiliza baixa energia de radiação, o que significa baixa penetração, de forma a reduzir os esforços necessários para se obter uma determinação precisa das tensões residuais. O pressuposto básico é que em um metal policristalino os cristais estão desordenados. (PAGEL-NITSCHKE, 2009) Em tal material, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos, entretanto quando tensionado, sendo esta tensão aplicada ou residual, o espaçamento interplanar se altera do seu valor livre de tensões para um novo, correspondente à magnitude dessas tensões. Esse efeito pode ser verificado na Figura 9. Se a tensão aplicada for trativa, as distâncias entre planos perpendiculares a estas aumentarão, enquanto para os planos paralelos ao campo de tensões, essas distâncias vão diminuir. (PUC RIO, 2010)

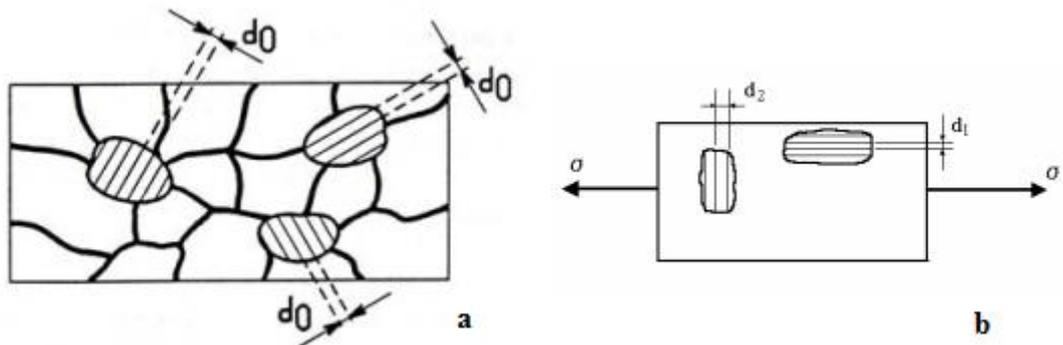


Figura 9: a) Distância interplanar em um material não tensionado. b) Distâncias interplanares de grãos com diferentes orientações, de um corpo tensionado. As distâncias mudam de acordo com a posição relativa entre o campo e o grão. (PUC RIO, 2010)

Sob uma determinada tensão, portanto, os cristais sofrerão uma alteração no seu espaçamento, e, sendo λ constante, uma variação da distância entre planos provocada pela aplicação de uma tensão, provocará uma mudança no ângulo de difração, como mostra a Figura 10. (SHIMADZU) Como a difração medida é proveniente somente dos cristais que se

encontram perpendiculares à normal entre os feixes incidentes e difratados, é possível verificar 2θ pelos picos de difração.

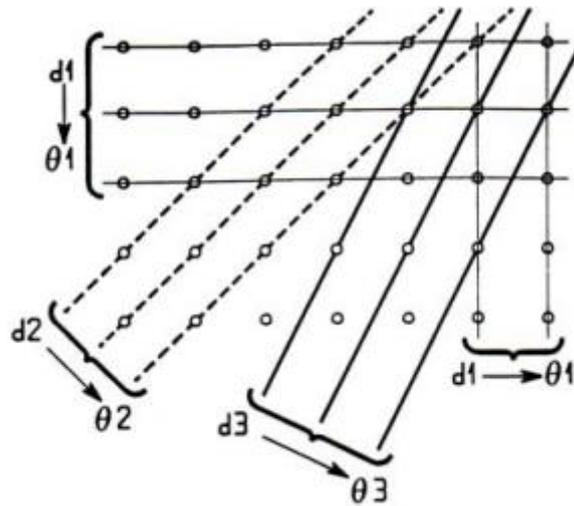


Figura 10: Variação das distâncias interplanares de um material tensionado. (PUC RIO, 2010)

Considerando-se uma porção de superfície de metal tensionado, como a Figura 11, as direções 1, 2 e 3 são as principais, perpendiculares entre si e perpendiculares aos planos nos quais não há tensões de cisalhamento. As tensões atuantes nessas direções são σ_1 , σ_2 e σ_3 , respectivamente. (CULLITY, 1956)

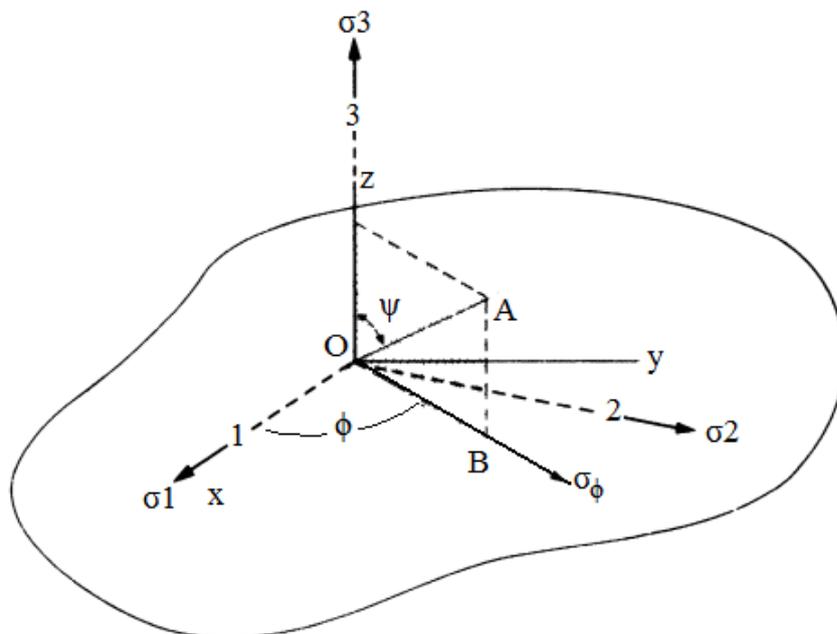


Figura 11: Porção de superfície de um material tensionado. (CULLITY, 1956)

Normalmente deseja-se medir a tensão em uma direção específica (σ_ϕ), a qual está a um ângulo ϕ da direção principal 1 e à Ψ de 3. (CULLITY, 1956) Pelo fato de que a difração medida é proveniente somente dos cristais que se encontram perpendiculares à normal entre os feixes incidentes e difratados, deve se variar o ângulo Ψ (PAGEL-NITSCHKE, 2009). A deformação em 0° corresponde à σ_3 . A teoria da elasticidade fornece a seguinte relação entre essas deformações:

$$\varepsilon_\psi - \varepsilon_3 = \frac{\sigma_\phi}{E} * (1 + \nu) * \Delta \text{sen}^2 \psi \quad [15] \quad (\text{Eq. 2})$$

Na qual:

ν = Coeficiente de Poisson do material

E = Módulo de elasticidade do material

E sabe-se também que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_i - d_0}{d_0} \quad (\text{Eq. 3})$$

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

Uma vez que a posição angular, 2θ , do raio difratado é obtida diretamente com o difratômetro, é mais simples escrever a deformação (eq. 3) em função de 2θ , no lugar de escrevê-la em função da distância entre planos. De acordo com a figura 7, a distância entre os planos é um vetor oposto ao ângulo θ e, portanto, a equação torna-se igual a:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\text{sen} \theta_\psi}{\text{sen} \theta} - 1 \quad (\text{Eq. 4})$$

Derivando a equação 4 tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\text{sen} \theta_\psi}{\text{sen} \theta} - 1 = -\text{cotg}(\theta) * \Delta \theta = -\text{cotg}(\theta) * \frac{\Delta(2\theta)}{2} \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

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

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

Unindo as equações 2 e 3 tem-se, portanto, que:

$$\sigma = -\frac{E}{2*(1+\nu)} * \cotg \theta_0 * \frac{\Delta(2\theta_\psi)}{\Delta(\text{sen}^2 \psi)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Tendo o valor de $2\theta_\psi$, que é o ângulo entre os raios incidentes e refratados, é possível plotá-los em um gráfico em função de seu $\text{sen}^2 \psi$ correspondente, o que teoricamente fornece uma reta, como mostra a Figura 12. A inclinação dessa reta (M) fornece o valor da parcela $\frac{\Delta(2\theta_\psi)}{\Delta(\text{sen}^2 \psi)}$ da equação.

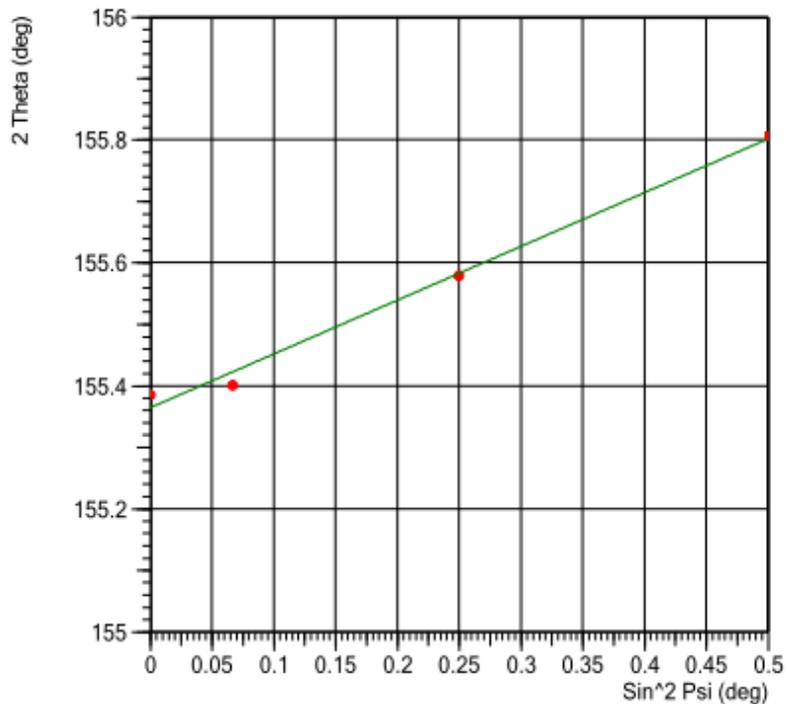


Figura 12: gráfico de $2\theta_\psi$ em função de $\text{sen}^2 \psi$ fornecido diretamente pelo difratômetro.

Baseado nesse método, por fim tem-se que:

$$\sigma = K * M \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

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

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

O termo K é, portanto uma constante do material, e para aços ao carbono, como é o caso no trabalho atual, tem valor igual a -318.128 MPa. (SHIMADZU)

A área da superfície analisada depende do diâmetro do feixe de raios-X. (SHIMADZU)

Os componentes das tensões residuais que efetivamente interessam são aqueles paralelos à superfície, pois interagem com as tensões mecânicas. Isso significa que, se a profundidade de penetração for pequena, usualmente alguns micrometros para XRD, a informação vem de uma porção de material na qual, do ponto de vista mecânico, as tensões na profundidade são iguais a zero. (PAGEL-NITSCHKE, 2009) A profundidade de penetração depende do ângulo de difração e do comprimento de onda utilizado, o qual depende do material do tubo de Raios-X utilizado. Os materiais mais comuns dos quais são feitos esses tubos são Cromo (para aços ferríticos, perlíticos, bainíticos ou martensíticos), Cobre (para ligas a base de Alumínio, Magnésio, Titânio e Níquel), e Manganês (para aços austeníticos). Quanto maior o ângulo de difração, maior o deslocamento do pico de tensão, portanto, a precisão das medidas aumenta com o aumento dos ângulos de difração. Por essa razão, a radiação é escolhida de forma a tornar possível a determinação da difração com elevada intensidade e grandes ângulos. (PAGEL-NITSCHKE, 2009)

As limitações do método de difração de raios-x estão intimamente atreladas a parâmetros metalúrgicos como as impurezas e vazios que são muitas vezes impossíveis de serem detectados para que correções possam ser feitas, e o tamanho de grão. É importante para a confiabilidade dos resultados que o material medido tenha uma granulometria refinada, comportamento linear elástico, seja homogêneo e isotrópico, e não possua gradientes de tensão na região analisada. Outros fatores limitantes para o emprego do método são: alto custo de seus equipamentos e a periculosidade devida à radiação atrelada ao processo.

3.7 Polimento eletrolítico

Quando o polimento eletrolítico é realizado corretamente, as superfícies preparadas são livres de riscos e a deformação proveniente de etapas anteriores, como corte ou lixamento, é removida. Este método é ideal para preparação de metais difíceis de polir mecanicamente, por exemplo, devido à baixa dureza, ou quando o polimento mecânico tem efeitos prejudiciais ao componente.

A relação corrente-voltagem é a principal variável o polimento e varia de acordo com o eletrólito utilizado e o metal. A amostra metálica atua como o anodo da célula eletrolítica, e a superfície é polida pela solução anódica quando a combinação correta de voltagem, densidade de corrente, temperatura do banho e tempo é aplicada.

3.7.1 Mecanismo

O anodo da célula eletrolítica é uma superfície rugosa, e uma camada viscosa de líquido imediatamente adjacente à superfície é produzida pela reação entre metal e eletrólito, a qual é conhecida como o filme de polimento e está esquematizada na Figura 13. Tal camada tem maior resistência elétrica que o restante da solução, controlando a remoção da rugosidade e o nivelamento da superfície. (ASM, 2004)

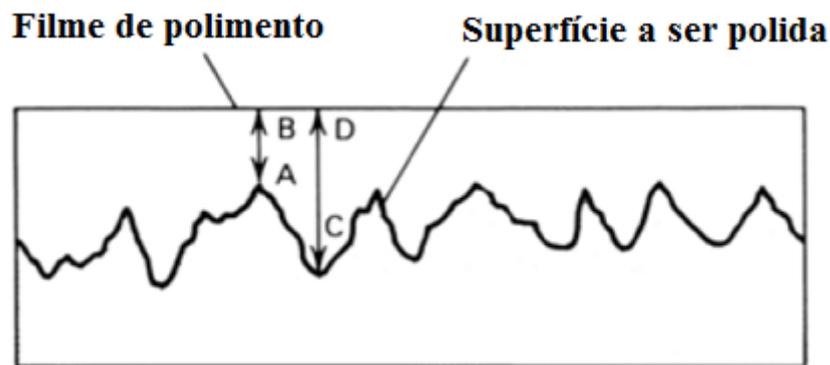


Figura 13: Esquema do filme de polimento formado sobre a superfície a ser polida, e a diferença de espessura do mesmo sobre os picos A e C. (ASM, 2004)

A resistência no pico A, representada pela distância A-B, é menor que na depressão C, representada pela distância C-D, devido à menor espessura do filme de polimento. A corrente em A será, portanto, muito maior que em C, resultando em maior taxa de dissolução do metal em A que em C, com o objetivo de, ao fim, A e C estarem no mesmo nível, levemente

ondulado. A difusão molecular e iônica mais rápida através do filme em A, assim como as diferenças na polarização anódica entre A e C, também contribuem para a remoção das asperezas.

O modo como a relação corrente-voltagem interfere no polimento é mostrado na Figura 14. Em baixas tensões, há a formação do filme na superfície de modo que muito pouca ou nenhuma corrente elétrica passe, ocasionando o ataque eletrolítico, mas não o polimento; em tensões intermediárias ocorre o polimento; e em tensões muito elevadas a superfície sofre corrosão. (ASM, 2004)

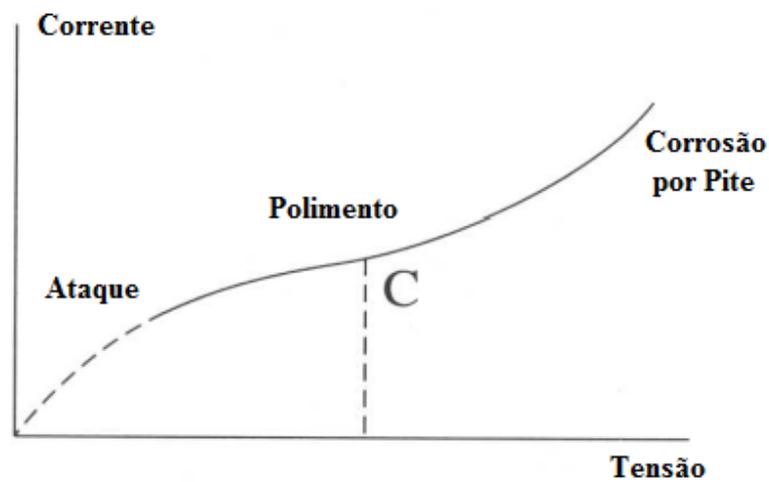


Figura 14: Interferência da relação corrente-voltagem no polimento. (WILLIAMS; CARTER, 1996)

O brilho presente na superfície após o processo é devido à remoção das impurezas de dimensão aproximada a $0,01 \mu\text{m}$ e pela supressão ao ataque na superfície metálica.

4 METODOLOGIA

4.1 Soldagem

As chapas de aço ASTM A516 grau 70 a serem unidas sofreram um pré aquecimento de 60°C. No momento da soldagem foram posicionadas em uma angulação inicial de -9° e encontravam-se livres. O processo de soldagem utilizado foi Eletrodo Revestido e realizou-se 17 passes, conforma esquematizado na Figura 15.

Sequência de Passes

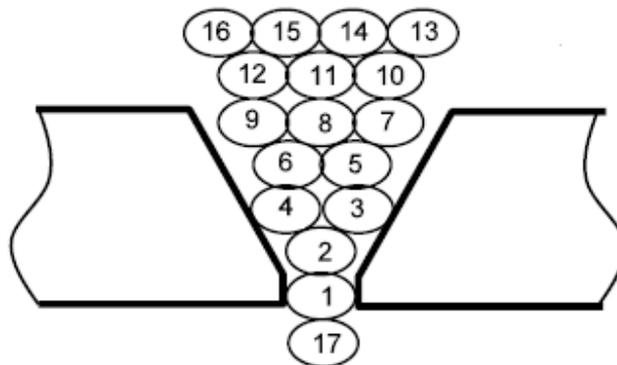


Figura 15: esquema da sequência de passes realizados na soldagem da junta.

Após a soldagem, uma certa região da junta foi submetida à eletro-erosão, de modo que por fim a junta apresentava a configuração esquematizada pela Figura 16.

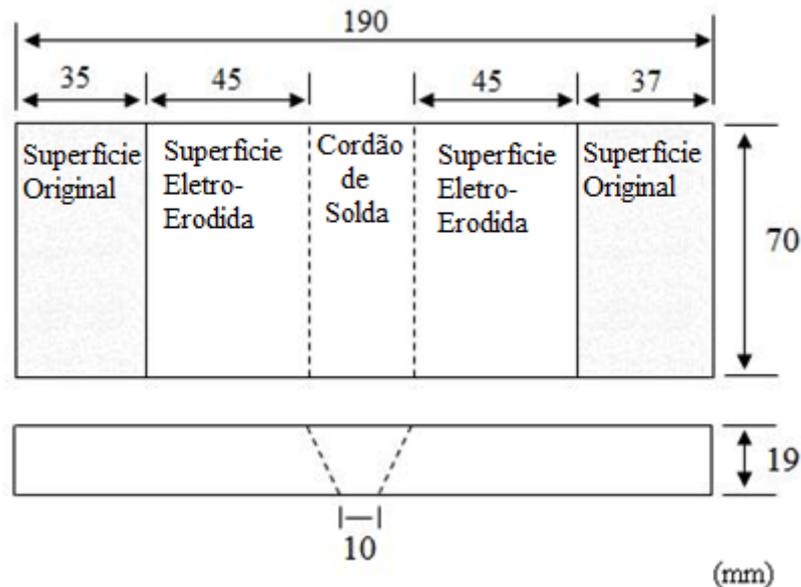


Figura 16: representação esquemática da junta em estudo

4.2 Análise macrográfica

Para realização da análise macrográfica a superfície da junta foi submetida a lixamento manual na lixa d'água de granulometria #80, caracterizada por sua elevada abrasão, visando remoção da camada oxidada e de outras possíveis impurezas. Posteriormente realizou-se o ataque químico, no qual a peça foi imersa em Nital 10% (ácido nítrico e álcool), revelando a geometria do cordão de solda, tanto da zona fundida (ZF) como da ZTA. Para interromper o ataque utilizou-se água, e a superfície a ser analisada foi seca através da evaporação de álcool etílico absoluto sob ar quente.

4.3 Difractometria de raios-X

Para a medição de tensões residuais através do difratômetro de raios-x foram cortadas quatro amostras de diferentes regiões da junta, as quais apresentam dimensão de 30 x 20 x 9,5 mm, aproximadamente. Um esquema da localização das amostras na junta, assim como dos pontos nos quais foram realizadas as medições de tensões residuais do estudo atual estão na Figura 17.

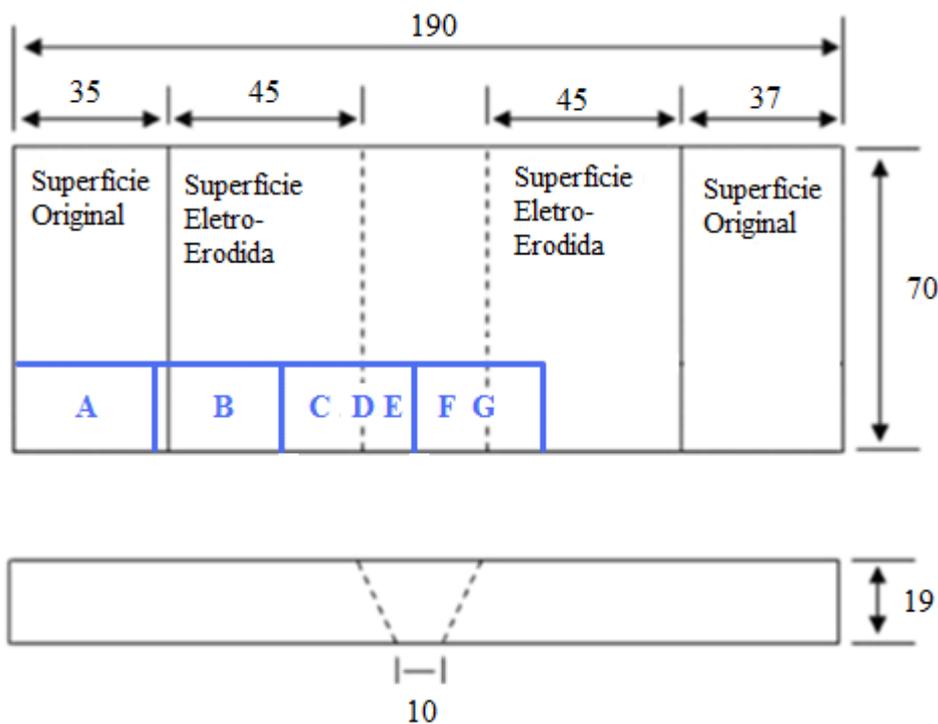


Figura 17: Esquema de localização das amostras cortadas e dos pontos em estudo na junta, com as medidas em mm.

Os pontos D, E, F e G podem ser melhor visualizados na Figura 18, uma macrografia do cordão de solda.

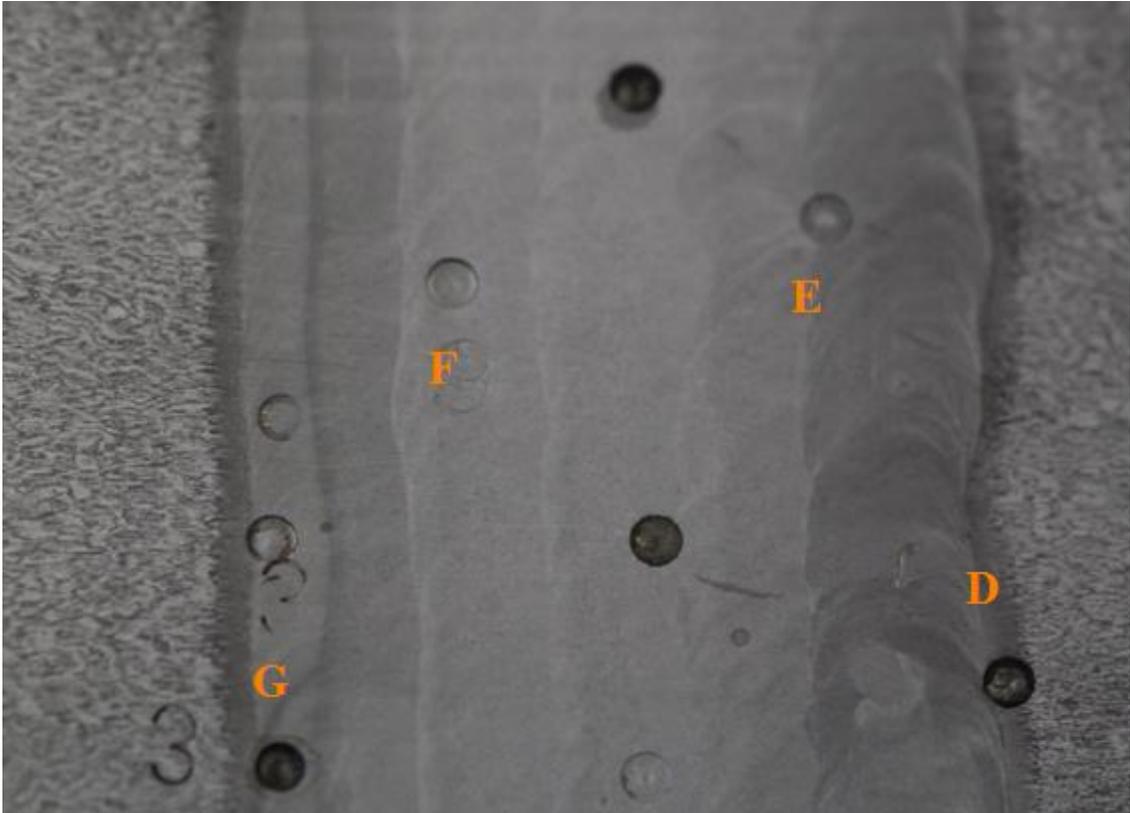


Figura 18: Representação dos pontos de estudo D, E, F e G em uma macrografia do cordão de solda.

As tensões residuais foram medidas no metal base (MB), representado pelos pontos A, B e C, na zona termicamente afetada (ZTA), pontos D e G, e no metal de solda (MS), pontos E e F.

A área da superfície analisada é igual a 10 mm^2 , restringida por esparadrapo, com o objetivo de que os raios-X não incidam fora da área de interesse da medida, e as medições foram realizadas na direção transversal (perpendicular ao cordão de solda) e longitudinal (paralela ao cordão de solda), sendo os ângulos Ψ utilizados igual a 0, 15, 30 e 45°. Além disso, para se ter garantia das medidas fornecidas, os ensaios foram realizados em duplicata.

Esses parâmetros foram seguidos em todos os ensaios, entretanto, em cada ensaio a superfície das amostras foram submetidas a preparações diferentes, e, portanto estavam sob condições distintas. Por esta razão cada ensaio de difração de Raios-X realizado está detalhado a seguir isoladamente.

4.3.1 Difractometria de raios-X das amostras polidas mecanicamente

Para o primeiro ensaio as amostras foram embutidas em resina termofixa de cura a quente (baquelite) e então sofreram preparação metalográfica, na qual foram lixadas com granulações #220, #320 e #400 e #600, e em seguida polidas com pasta de diamante de diâmetros 6, 3, e 1 μm . Nas etapas de lixamento o lubrificante utilizado foi água, e no polimento utilizou-se álcool etílico absoluto. Ambas as etapas foram realizadas na politriz automática STRUERS ABRAMIN, com o objetivo de que todas fossem submetidas à mesma pressão. É possível verificar as condições de lixamento e polimento realizados na politriz automática na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de lixamento e polimento realizados nas amostras em análise pela politriz automática ABRAMIN, realizando polimento simultâneo de 4 amostras de 40mm de diâmetro.

Etapa	Suporte	Granulometria	Lubrificante	Força (N)	Tempo (min)	RPM
1	Lixa	#220	Água	400	3	150
2	Lixa	#320	Água	400	3	150
3	Lixa	#400	Água	400	3	150
4	Lixa	#600	Água	400	3	150
5	Pano Magnético	6 μm	Álcool	400	3	150
6	Pano Magnético	3 μm	Álcool	400	3	150
7	Pano Magnético	1 μm	Álcool	400	3	150

4.3.2 Difractometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente após polimento mecânico

Após análise dos valores das tensões das amostras polidas mecanicamente, realizou-se polimento eletrolítico nas mesmas de modo que o encruamento ocasionado pelo polimento e as possíveis tensões residuais provenientes deste fossem removidas, objetivando que somente as tensões residuais resultantes da soldagem fossem medidas.

Como a amostra estava embutida em baquelite realizou-se um furo no mesmo de modo que fosse possível manter contato elétrico com o lado oposto da superfície a ser polida,

um dos requisitos fundamentais do processo. O polimento foi realizado no equipamento STRUERS LECTROPOL, Figura 19.



Figura 19: Máquina STRUERS LECTROPOL utilizada para polimento eletrolítico das amostras.

Uma série de combinação de parâmetros de processo foi testada e a qualidade do polimento foi avaliada visualmente pelo brilho resultante na peça e a eliminação de riscos. Por fim decidiu-se que as amostras deveriam ser lixadas com granulações de #80, #220, #320 e #400 e #600 antes do polimento, e que este deveria ser realizado com tensão igual a 45 V por 90 segundos, com vazão do eletrólito igual a 100% da capacidade do equipamento utilizado, estando este em contato com uma área de 5 cm² do metal a ser polido. O eletrólito utilizado é sugerido pela literatura, sendo a composição deste: 800 ml etanol (absoluto) e 60 ml HClO₄ (60%). (ASM, 2004)

4.3.3 Difratomia de raios-X das amostras na condição original

O objetivo desta condição é medir as tensões residuais exatamente na superfície da junta, de modo que neste ensaio as amostras analisadas encontram-se em sua condição inicial, sem serem submetidas a nenhum tratamento superficial de remoção de material além do lixamento na lixa d'água #80 realizado em toda a junta antes da análise macrográfica.

4.3.4 Difratomia de raios-X das amostras polidas eletroliticamente

Realizou-se o polimento eletrolítico nas amostras apenas lixadas para comparação com os valores de tensão das amostras polidas eletroliticamente após o polimento mecânico.

As amostras foram submetidas ao lixamento somente na lixa d'água de #80, para remoção da camada oxidada, e posteriormente sofreram polimento eletrolítico. A tensão

utilizada para polimento foi 45 V, por 130 segundos, com vazão do eletrólito igual a 75% da capacidade do equipamento utilizado, e este em contato com 2cm² do metal.

4.3.5 Difratometria de raios-X das amostras atacadas com Nital 10% e posterior polimento eletrolítico

Como alternativa ao lixamento, com o objetivo de não introduzir mais tensões, nesta etapa foi realizado imersão das amostras em solução de Nital 10% por alguns segundos antes do polimento eletrolítico. O polimento eletrolítico foi realizado sob tensão de 60 V por 60 segundos, com vazão do eletrólito igual a 100% da capacidade do equipamento utilizado e este em contato com 5cm² do metal.

4.4 Micrografias

As amostras embutidas foram submetidas à preparação metalográfica, na qual foram lixadas com granulações #220, #320 e #400 e #600, e em seguida polidas com pasta de diamante de diâmetros 6, 3, e 1 µm. Nas etapas de lixamento o lubrificante utilizado foi água, e no polimento utilizou-se álcool etílico absoluto. Ambas as etapas foram realizadas na politriz automática STRUERS ABRAMIN. É possível verificar as condições de lixamento e polimento realizados na politriz automática na Tabela 1.

Após a preparação as amostras sofreram ataque com Nital 2% por 5 segundos.

4.5 Perfil de Microdureza

Valores de microdureza foram obtidos através do equipamento Shimadzu, com carga de 3N aplicada por 15 segundos. As medidas foram realizadas a cada 1 mm no MB e MS, e a cada 0,1 mm na ZTA.

5 RESULTADOS

5.1 Análise macrográfica

Nas figuras 20 à 22 são apresentadas as imagens obtidas na análise macrográfica da junta soldada. Pode-se diferenciar nitidamente o MB, a ZTA e o MS, assim como é possível visualizar os diversos passes realizados durante a soldagem. Além disso, de acordo com a coloração dos contornos dos passes pode-se verificar dois mais escuros, que são o passe da base da junta e o do lado superior esquerdo, que correspondem ao último passe de todos e ao último passe realizado na parte superior, respectivamente, como descrito no relatório de registro de soldagem e visualizado pela Figura 15.

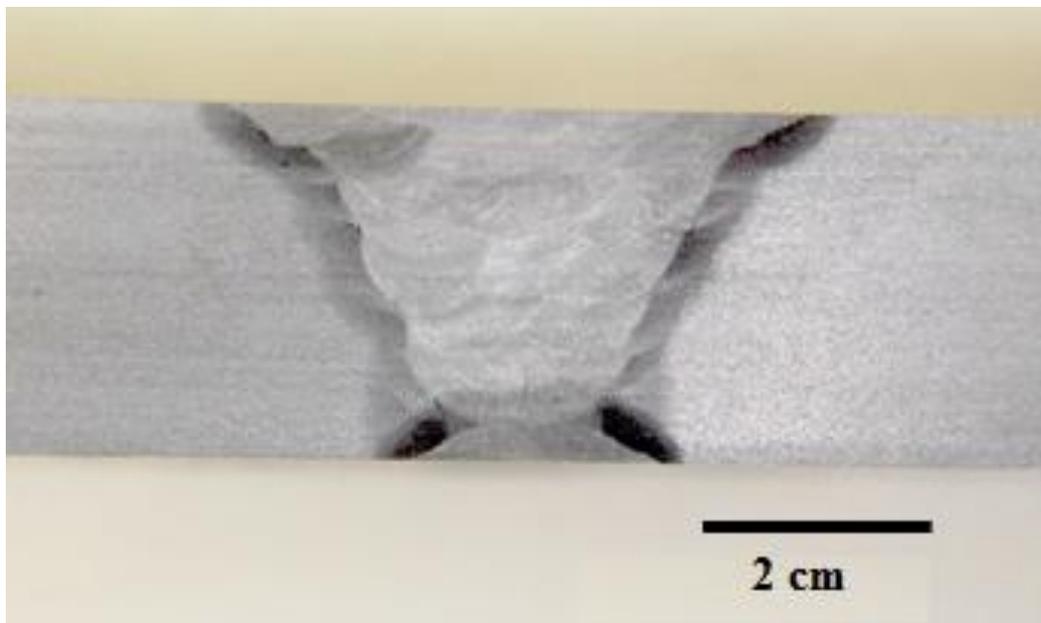


Figura 20: Seção transversal da junta evidenciando o cordão de solda, na qual é possível visualizar os diversos passes realizados.

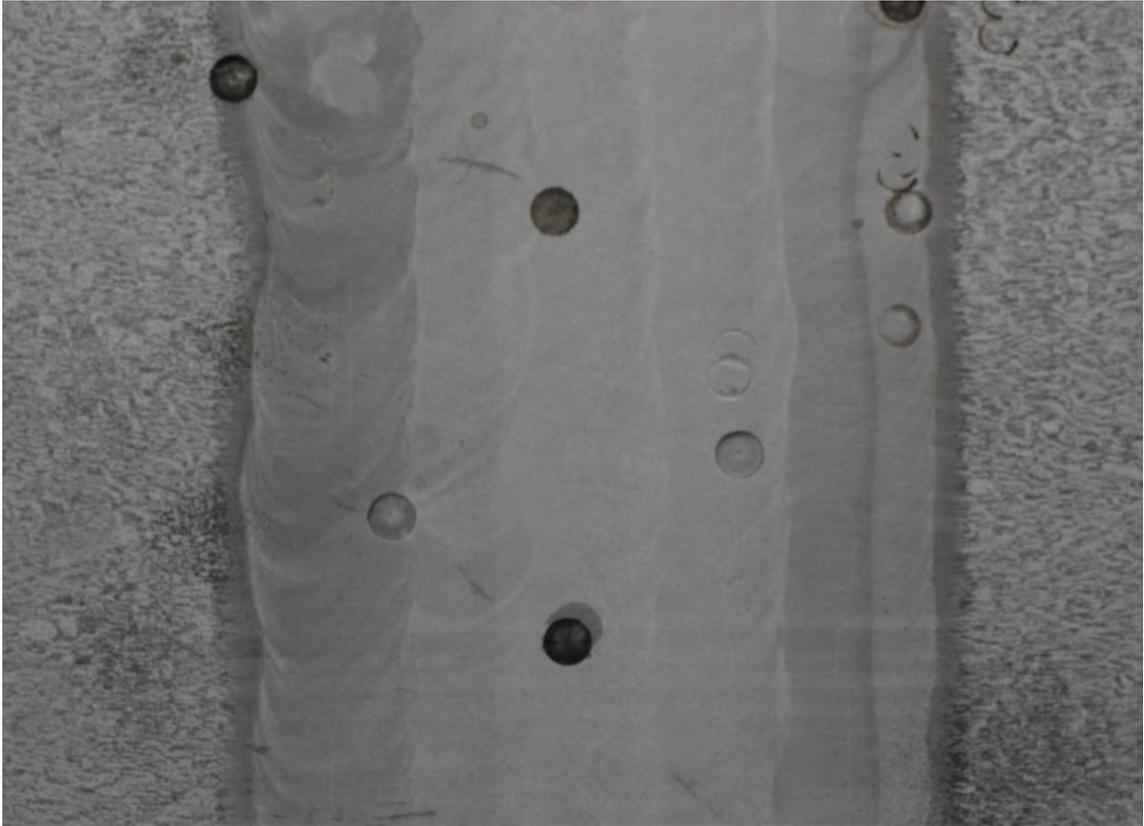


Figura 21: Foto da superfície da junta, na qual é possível diferenciar MB e MS e os cordões realizados em passes diferentes. Os furos presentes na junta são devido à técnica Hole Drilling executada anteriormente à realização da macrografia.

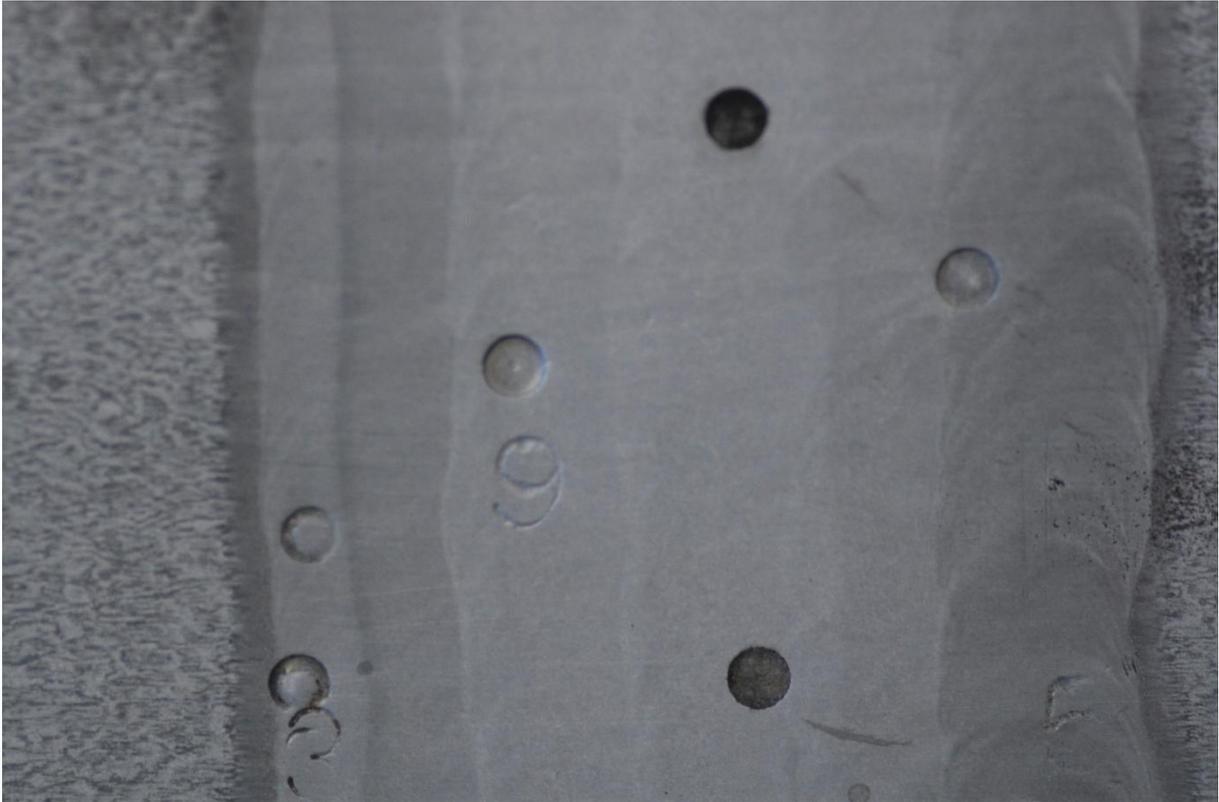


Figura 22: Foto da superfície da junta.

5.2 Difractometria de raios-X das amostras polidas mecanicamente

Os valores das tensões residuais obtidos através do método da difração de raios-X são apresentados nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4, de acordo com a região na qual se localizam na junta. Estes foram fornecidos diretamente pelo difratômetro através da fórmula $\sigma = K * M$, já apresentada anteriormente na revisão bibliográfica, na qual K é uma constante do material

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

() e para aços carbono tem valor igual a -318.128 MPa. Todos os valores obtidos, em qualquer região da junta, foram compressivos. Comparando os valores de tensões residuais medidos nos pontos referentes ao metal de base, sendo estes A, B e C, verifica-se que apresentam magnitude consideravelmente similar, com diferença razoável somente na direção longitudinal ao cordão de solda do ponto C, sendo este mais compressivo que A e B, como destacada em negrito na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MB, sendo estes os pontos A, B e C, e T= Transversal e L= Longitudinal.

Pontos	A	B	C
T	-167 +- 0.858	-162 +- 2.958	-160 +- 3.117
L	-140 +- 6.839	-144 +- 5.577	-192 +- 2.728

Na ZTA verifica-se que a interface D, correspondente ao último passe, apresentou tensões de magnitude bem mais elevada que a G, em ambas as direções, fato que pode ser observado na Tabela 3.

Já as tensões medidas no MS, expostas na Tabela 4 são as maiores em compressão em comparação com toda a junta.

Tabela 3: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados na ZTA, sendo estes os pontos D e G, e T= Transversal e L= Longitudinal.

Pontos	D	G
T	-222 +- 6.895	-131 +- 4.357
L	-186 +- 15.548	-154 +- 4.023

Tabela 4: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MS, sendo estes os pontos E e F, e T= Transversal e L= Longitudinal.

Pontos	E	F
T	-277 +- 10.817	-288 +- 9.076
L	-228 +- 3.048	-200 +- 12.001

A distribuição dessas tensões ao longo da junta é esquematizada na figura 23.

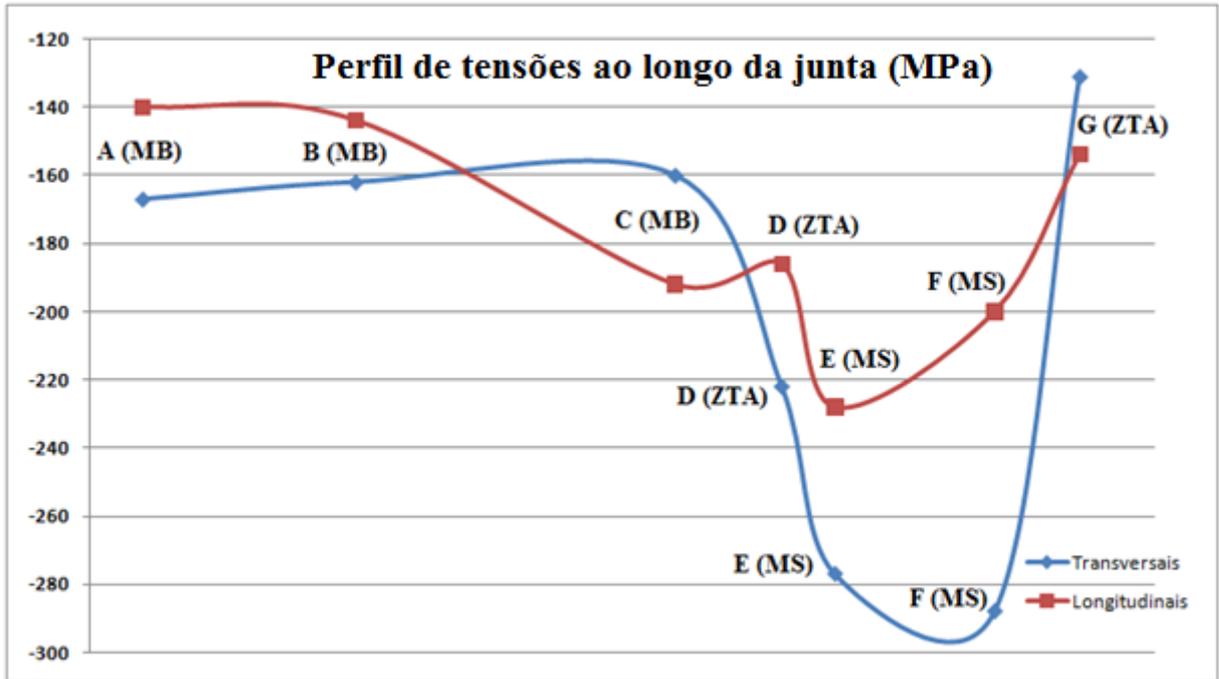


Figura 23: Distribuições das tensões na junta após polimento mecânico.

5.3 Difractometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente após polimento mecânico

Os valores de tensões residuais obtidos nas amostras submetidas ao polimento eletrolítico após o polimento mecânico são menos compressivos em comparação com os das amostras polidas somente mecanicamente, como é possível verificar nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MB, sendo estes os pontos A, B e C, e T= Transversal e L= Longitudinal.

Pontos	A	B	C
T	-35.3 +- 8.928	+12 +- 6.985	-42.7 +- 16.638
L	-85.4 +- 13.508	+10.8 +- 8.610	+20.6 +- 11.776

Tabela 6: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados na ZTA, sendo estes os pontos D e G, e T= Transversal e L= Longitudinal.

Pontos	D	G
T	-172 +- 8.996	+56.4 +- 1.357
L	+40.8 +- 4.567	+13.3 +- 7.385

Tabela 7: Valores de tensão residual (MPa) e seus respectivos desvios padrões dos pontos localizados no MS, sendo estes os pontos E e F, e T= Transversal e L= Longitudinal.

Pontos	E	F
T	-40 +- 16.122	-123 +- 21.2
L	-31.2 +- 15.129	-21.4 +- 0.878

A distribuição das tensões ao longo da junta é esquematizada na figura 24.

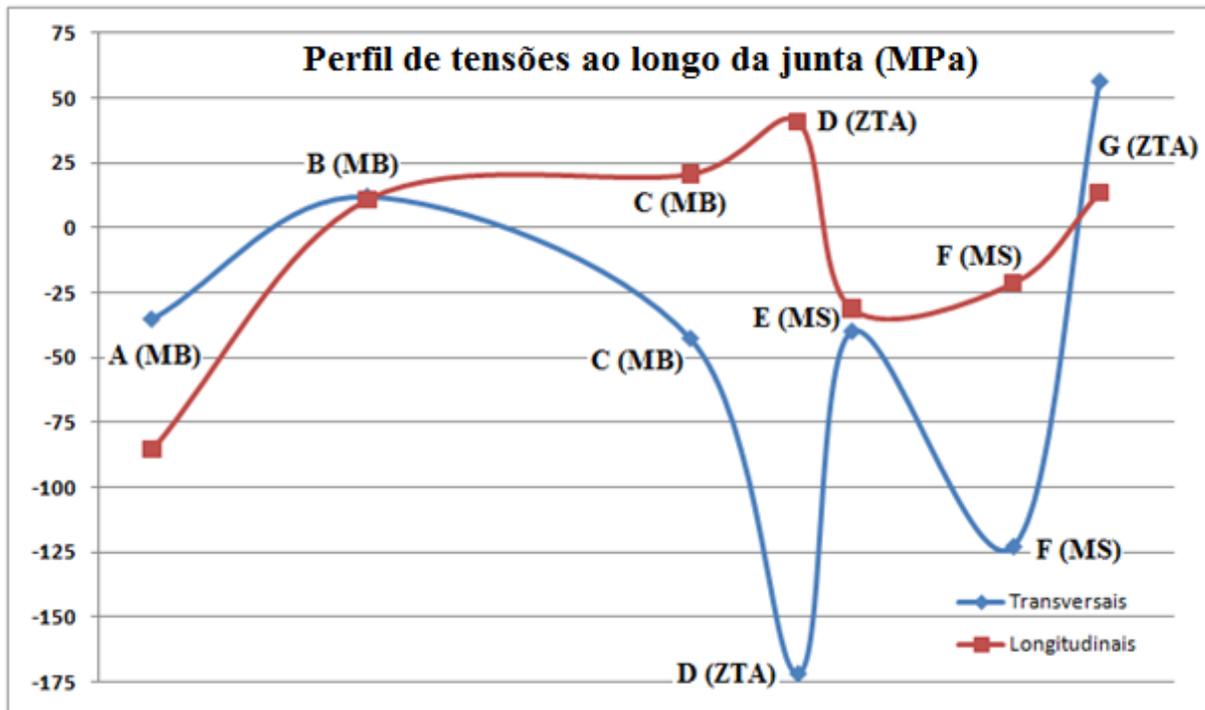


Figura 24: Perfil de tensões ao longo da junta após polimento mecânico seguido por polimento eletrolítico.

5.4 Difractometria de raios-X das amostras na condição original

Foram medidas as tensões residuais das amostras na condição original, sem polimento mecânico nem eletrolítico, para descartar qualquer possível influência da preparação das superfícies nos valores de tensão.

Na tabela 8 são apresentadas as tensões residuais medidas nas amostras que apenas foram lixadas em #80, não submetidas a nenhum outro tratamento superficial envolvendo remoção de material.

Tabela 8: Valores de tensões residuais (MPa) e seus respectivos desvios padrões medidas nas amostras em condição original, sem que estas fossem submetidos a tratamentos de superfície envolvendo remoção de material.

Pontos	Transversal	Longitudinal
A	-259 +- 9.58	-277 +- 10.2
B	-207 +- 4.77	-206 +- 2.93
C	-186 +- 18.1	+20.6 +- 11.7
D	-172 +- 8.99	+40.8 +- 4.56
E	-40 +- 16.1	-31.2 +- 15.1
F	-123 +- 21.2	-21.4 +- 0.87
G	+56.4 +- 1.35	+13.3 +- 7.38

O perfil das tensões ao longo da junta é representado pela figura 25.

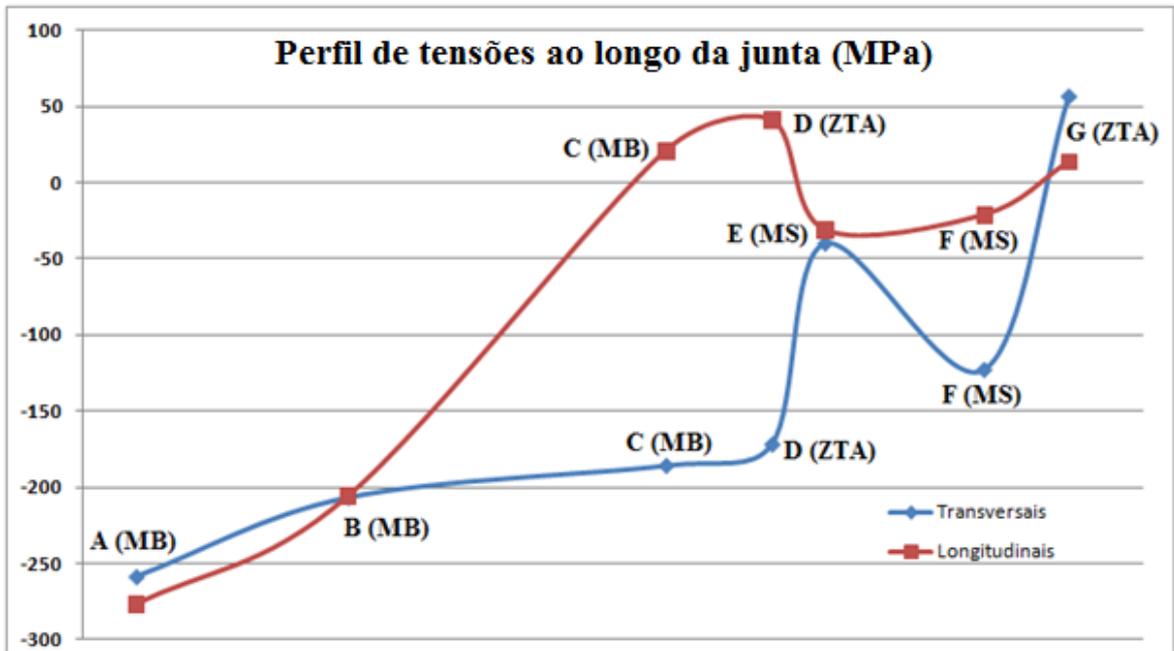


Figura 25: Perfil de tensões ao longo da junta.

5.5 Difractometria de raios-X das amostras polidas eletroliticamente

Essas amostras sofreram somente polimento eletrolítico, diferente das já citadas no item 5.3, que foram submetidas ao polimento eletrolítico após o polimento mecânico. Os resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Tensões Residuais das amostras lixadas em lixa d'água #80 e polidas eletroliticamente.

Pontos	Transversal	Longitudinal
A	9.2 +- 15.9	24.5 +- 16.1
B	16.1 +- 15.2	62.4 +- 4
C	-17 +- 2.91	-14.7 +- 8
D	-124 +- 9.52	-6.32 +- 8.17
E	-22.2 +- 7.65	-64.2 +- 12.7
F	-219 +- 2.77	-137 +- 6.22
G	18.8 +- 13.6	-95 +- 5.24

A distribuição dessas tensões ao longo da junta é representada no gráfico da figura 26.

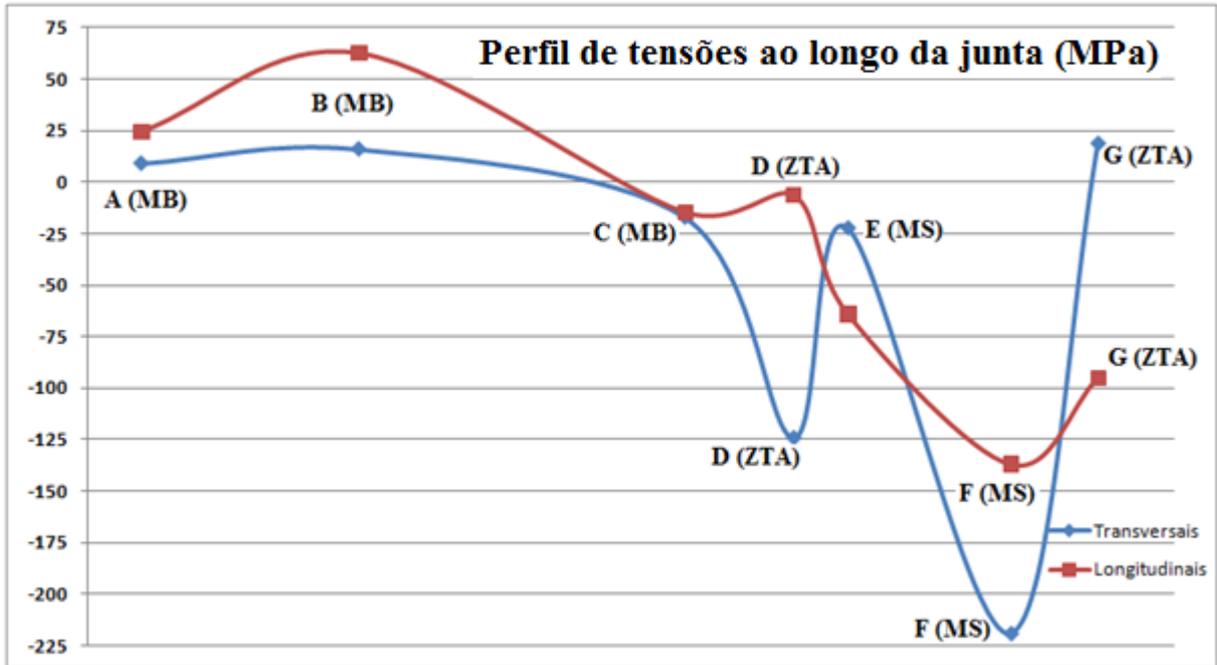


Figura 26: Distribuição das tensões ao longo da junta após polimento eletrolítico.

5.6 Difractometria de raios-X das amostras atacadas com Nital 10% e posterior polimento eletrolítico

Como alternativa ao lixamento, com o objetivo de não introduzir mais tensões, nesta etapa foi realizado imersão das amostras em solução de Nital 10% por alguns segundos antes do polimento eletrolítico.

Tabela 10: Tensões residuais nas amostras imersas em Nital 10% e polidas eletroliticamente.

Pontos	Transversal	Longitudinal
A	8,3 +- 6.33	1 +- 5.26
B	-198 +- 12.5	-186 +- 17.3
C	-183 +- 11.4	-213
D	-230 +- 3.8	-279
E	-392	-332+- 4.22
F	-85 +- 7.43	-203 +- 1.53
G	-165 +- 4.3	-242 +- 7.22

A distribuição das tensões ao longo da junta está representada na Figura 27.

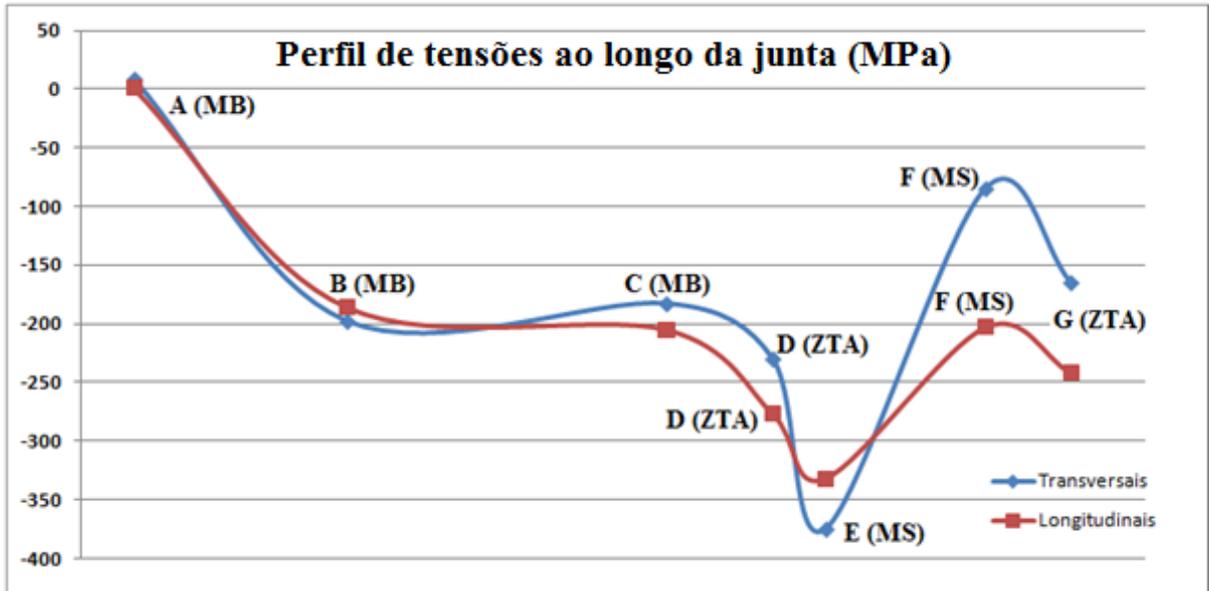


Figura 27: Distribuição das tensões residuais ao longo da junta após ataque com Nital 10% e polimento eletrolítico.

5.7 Micrografias

As figuras 28 a 31 são micrografias correspondentes ao metal de base da junta em estudo, representado pelos pontos A, B e C, evidenciando uma microestrutura composta por perlita e ferrita pró eutetóide.

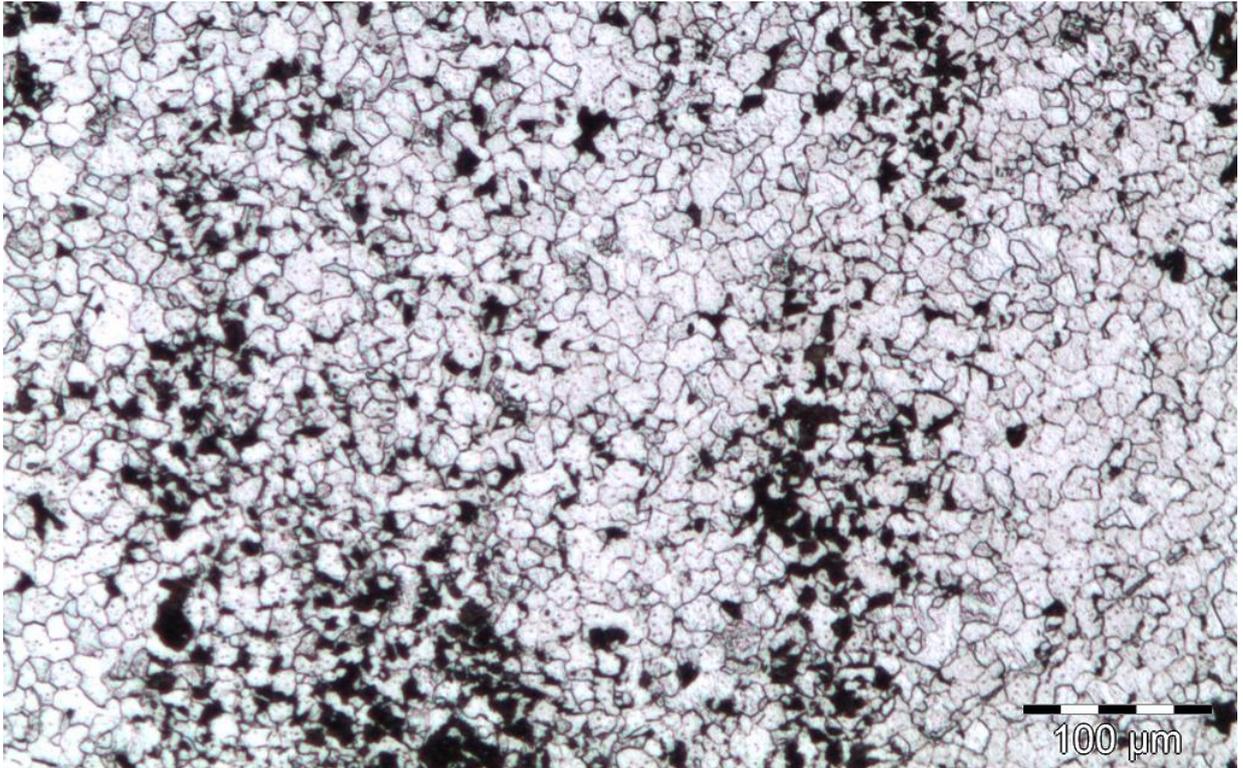


Figura 28: Micrografia do ponto A (MB) com aumento de 100x.

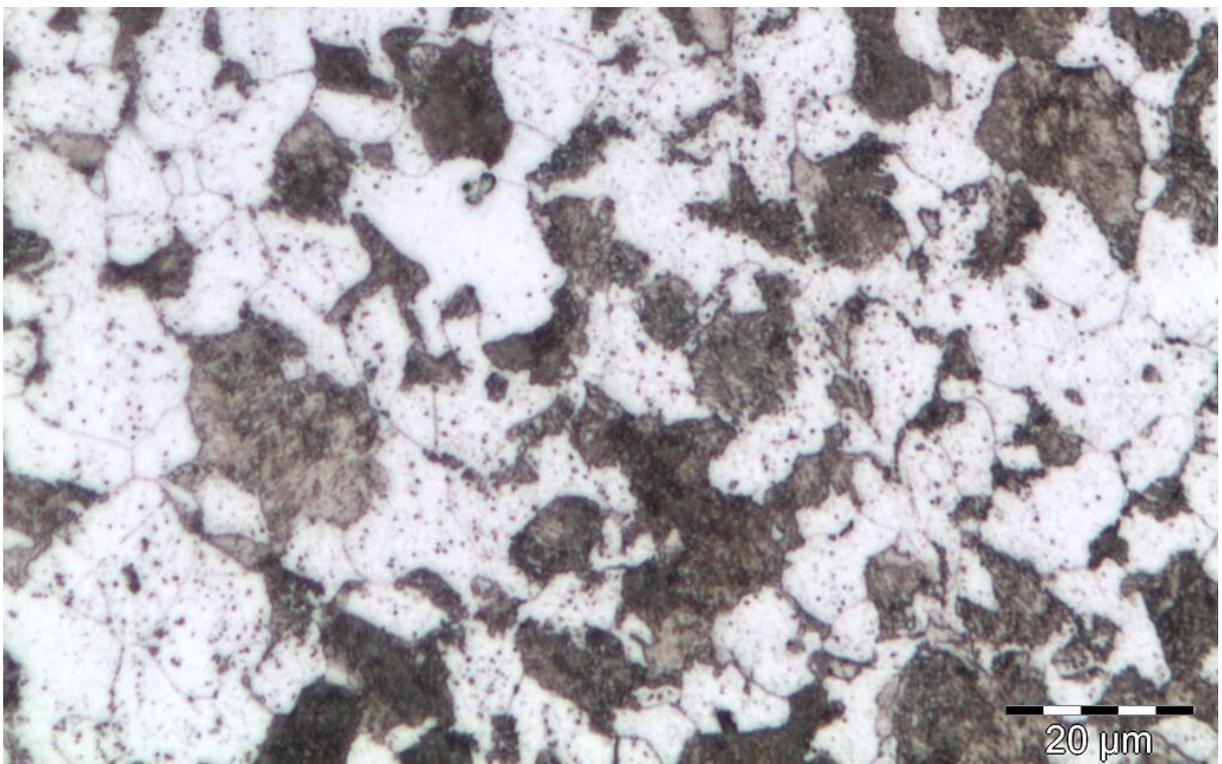


Figura 29: Micrografia do ponto A (MB) com aumento de 500x.

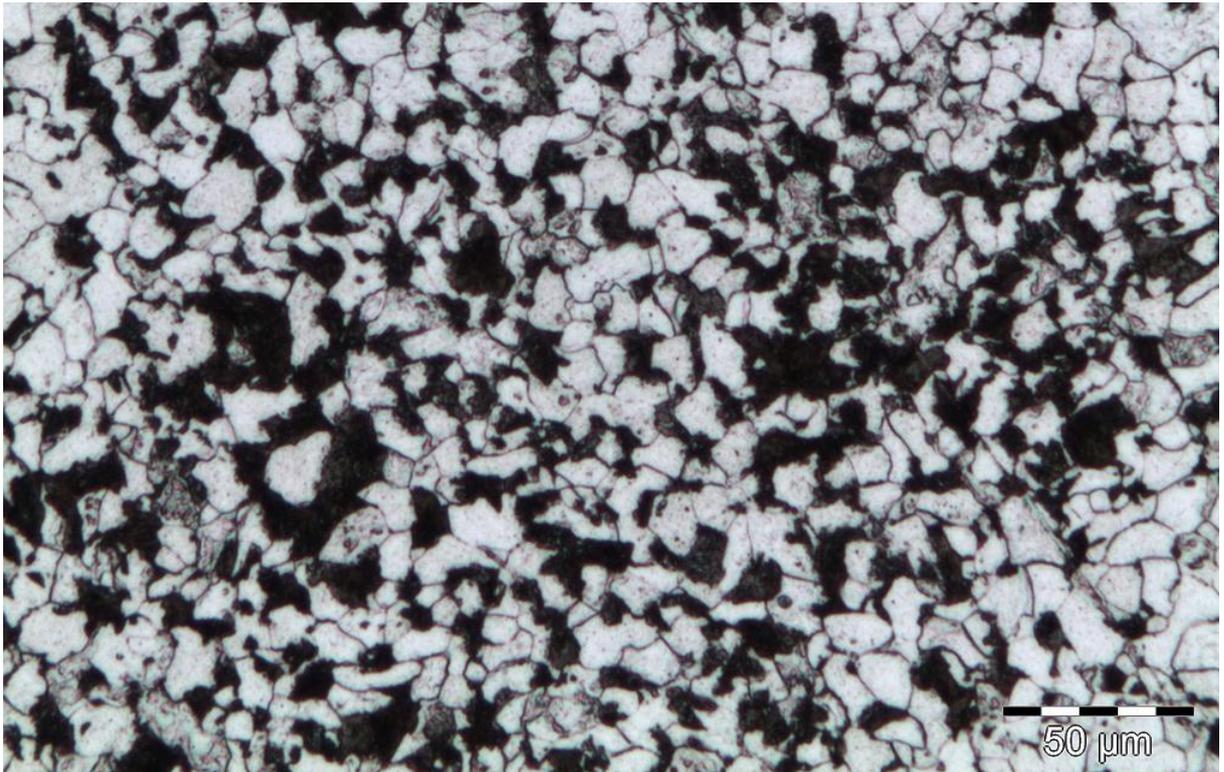


Figura 30: Micrografia do ponto B (MB) com aumento de 200x.

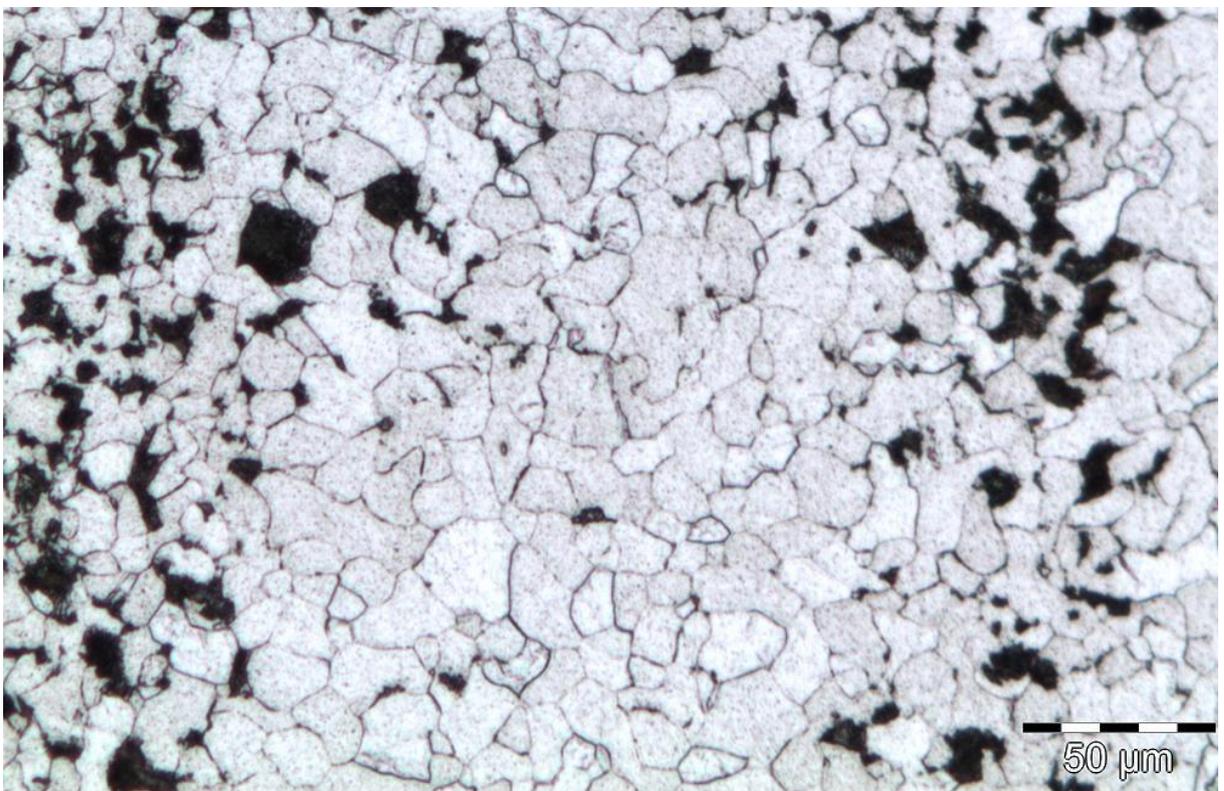


Figura 31: Micrografia do ponto C (MB) com aumento de 200x.

As figuras 32, 33 e 34 são micrografias do ponto D (ZTA), nas quais se verifica a presença de ferrita, bainita ou perlita fina e martensita, produtos de um resfriamento brusco ocasionado pelo gradiente térmico entre ZTA e MB.

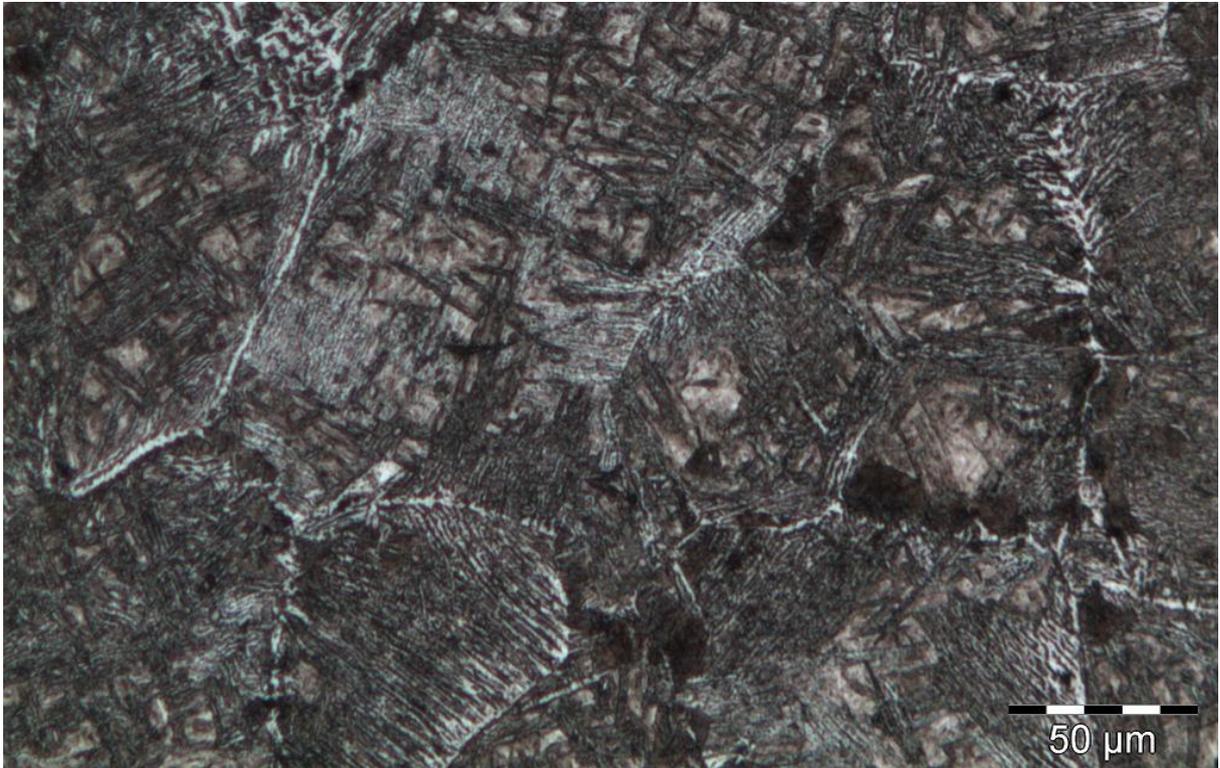


Figura 32: Micrografia do ponto D (ZTA) com aumento de 200x.

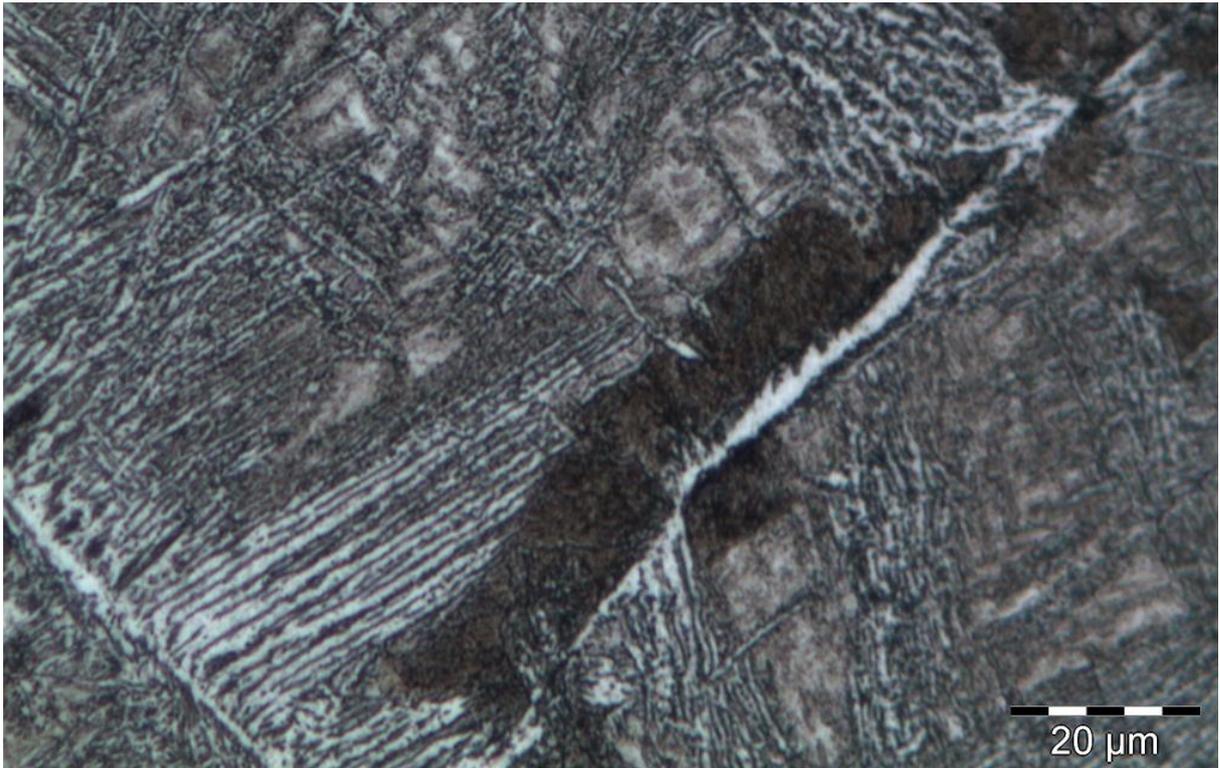


Figura 33: Micrografia do ponto D (ZTA) com aumento de 500x.



Figura 34: Micrografia do ponto D (ZTA) com aumento de 500x.

As figuras 35, 36 e 37 são micrografias do ponto E e F (MS), nas quais verifica-se a presença de ferrita, bainita e talvez martensita como esperado pela literatura para o metal de solda, submetido à um resfriamento não tão brusco como a ZTA.

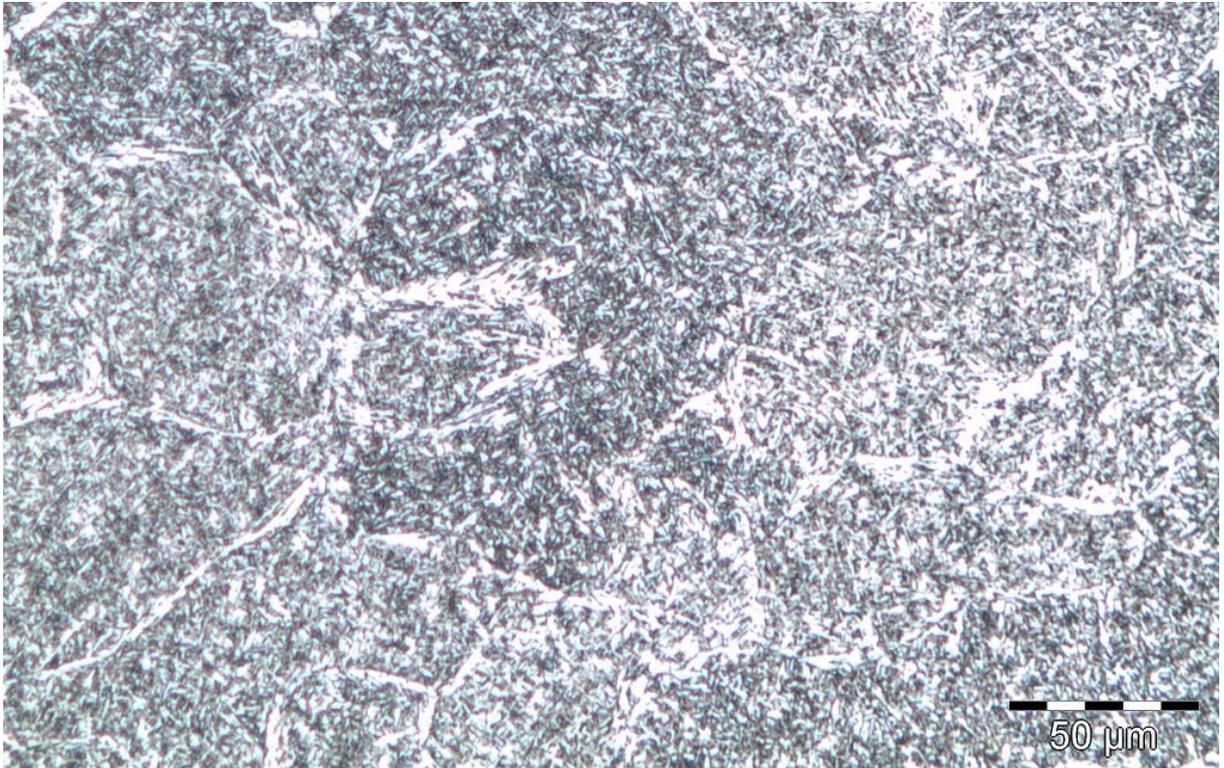


Figura 35: Micrografia do ponto E (MS) com aumento de 200x.

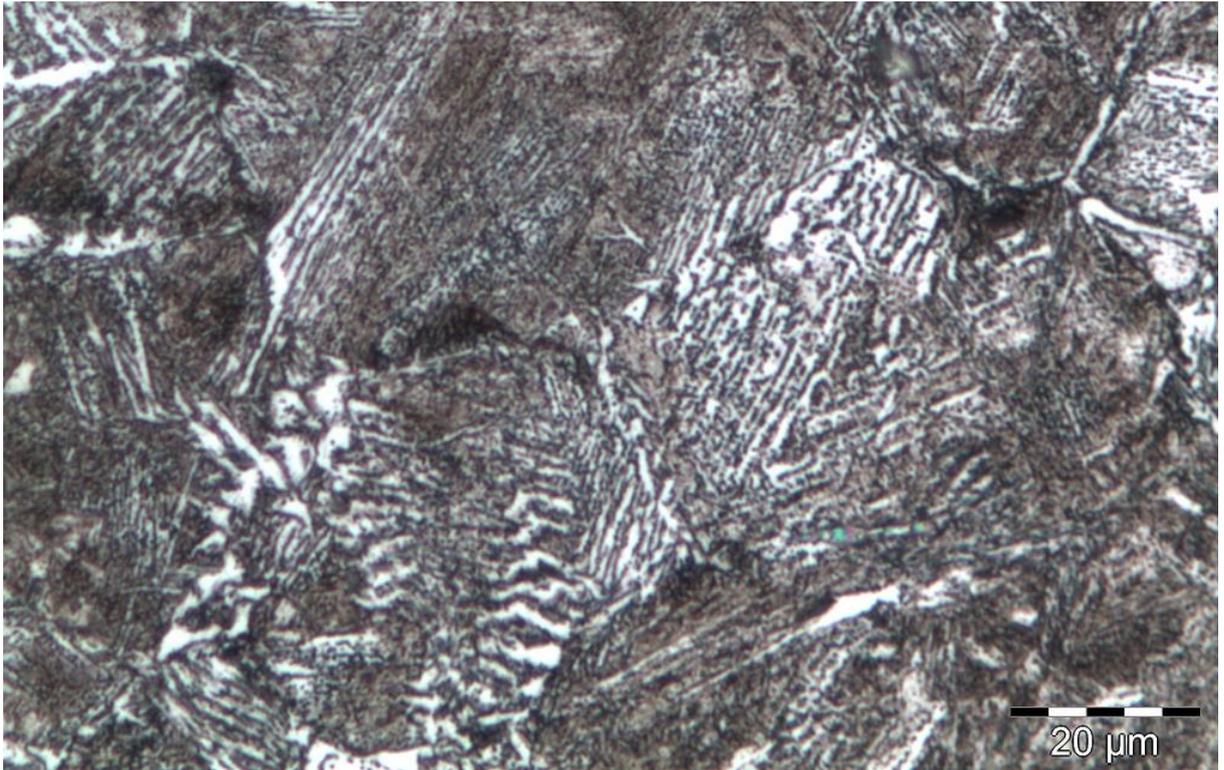


Figura 36: Micrografia do ponto E com aumento de 500x.

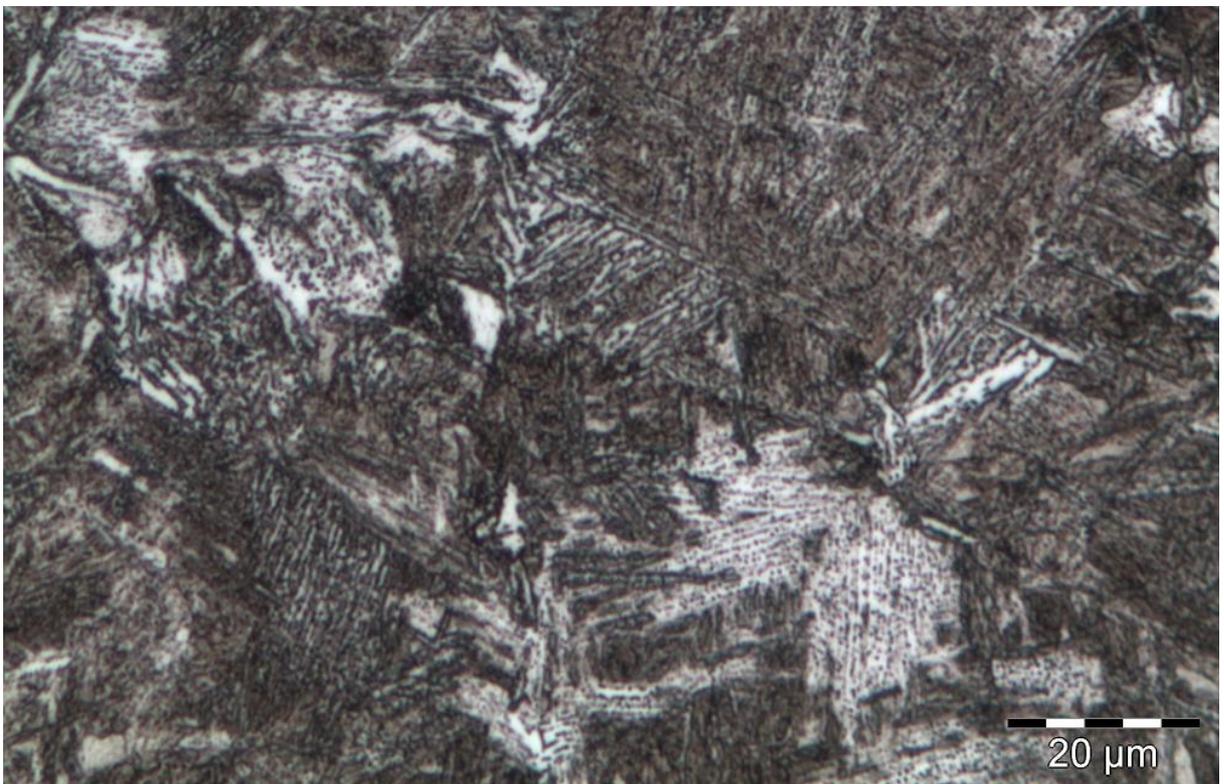


Figura 37: Micrografia do ponto F com aumento de 500x.

As Figuras 38 e 39 representam a microestrutura do ponto G (ZTA) e revelam uma estrutura composta por ferrita, bainita ou perlita fina e martensita.

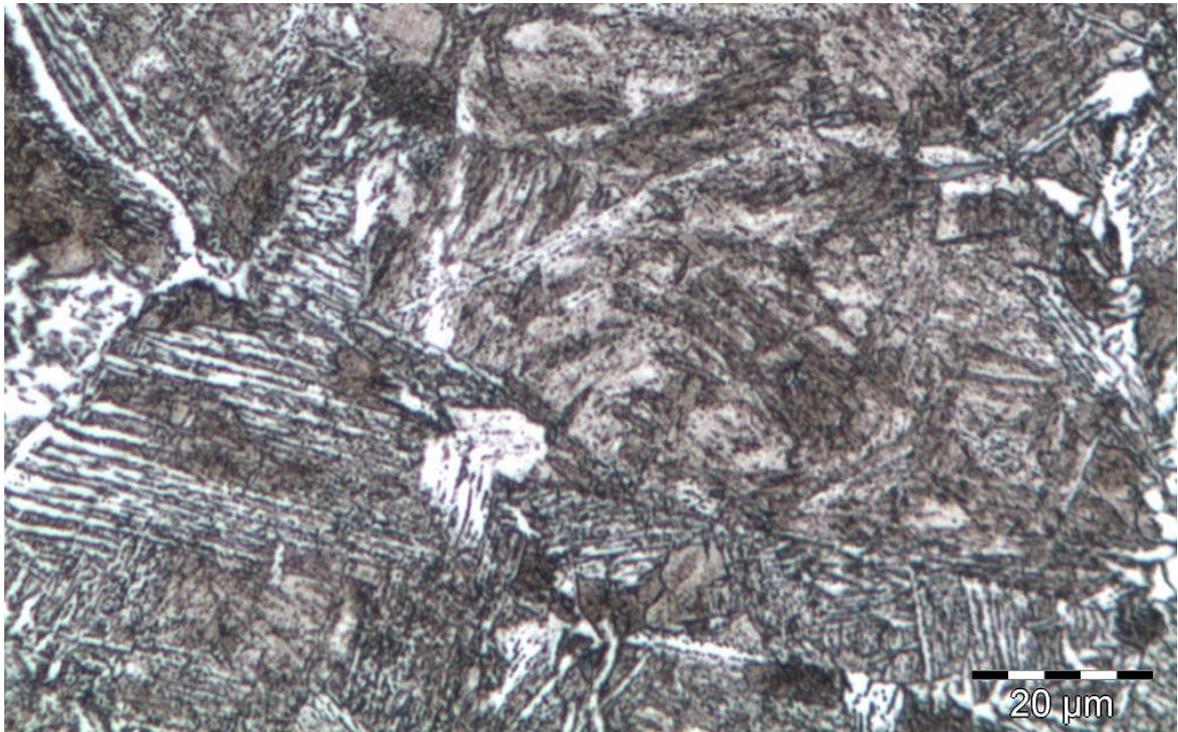


Figura 38: Micrografia do ponto G (ZTA) com aumento de 500x.

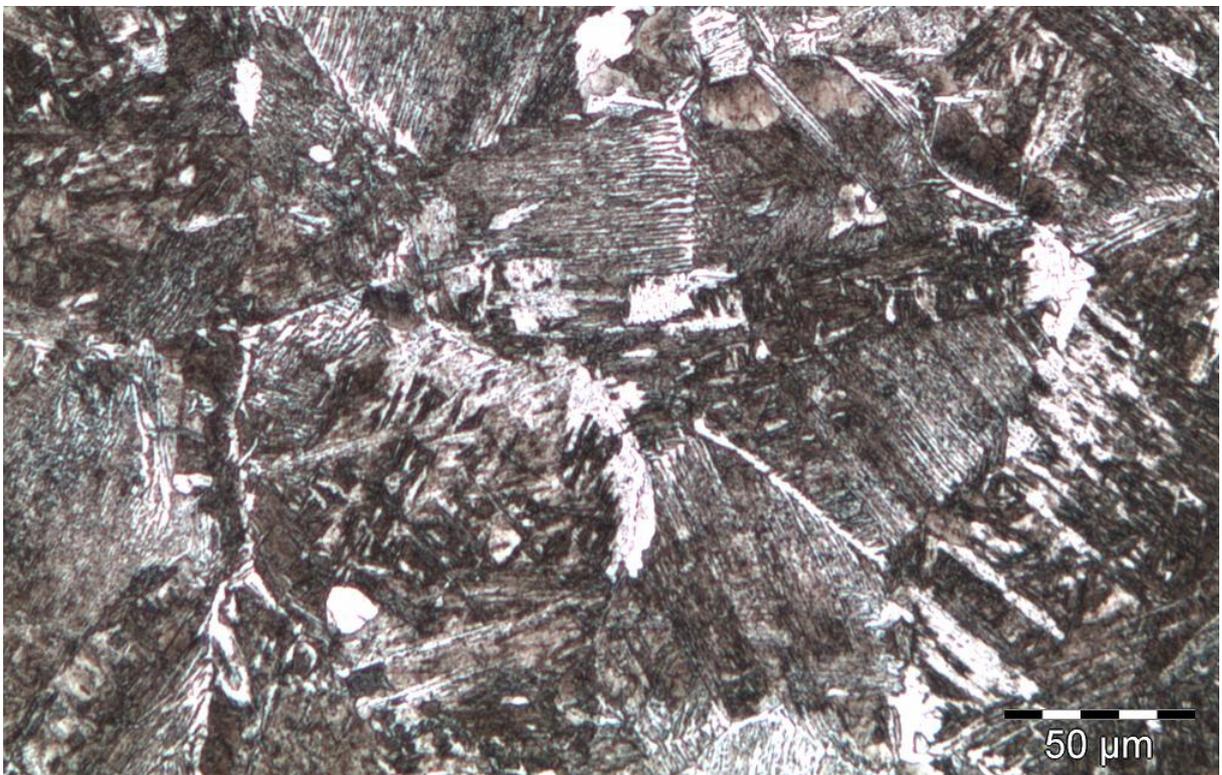


Figura 39: Micrografia do ponto G (ZTA) com aumento de 100x.

5.8 Perfil de Microdureza

Os valores de dureza medidos ao longo da junta podem ser visualizados no gráfico da figura 40.

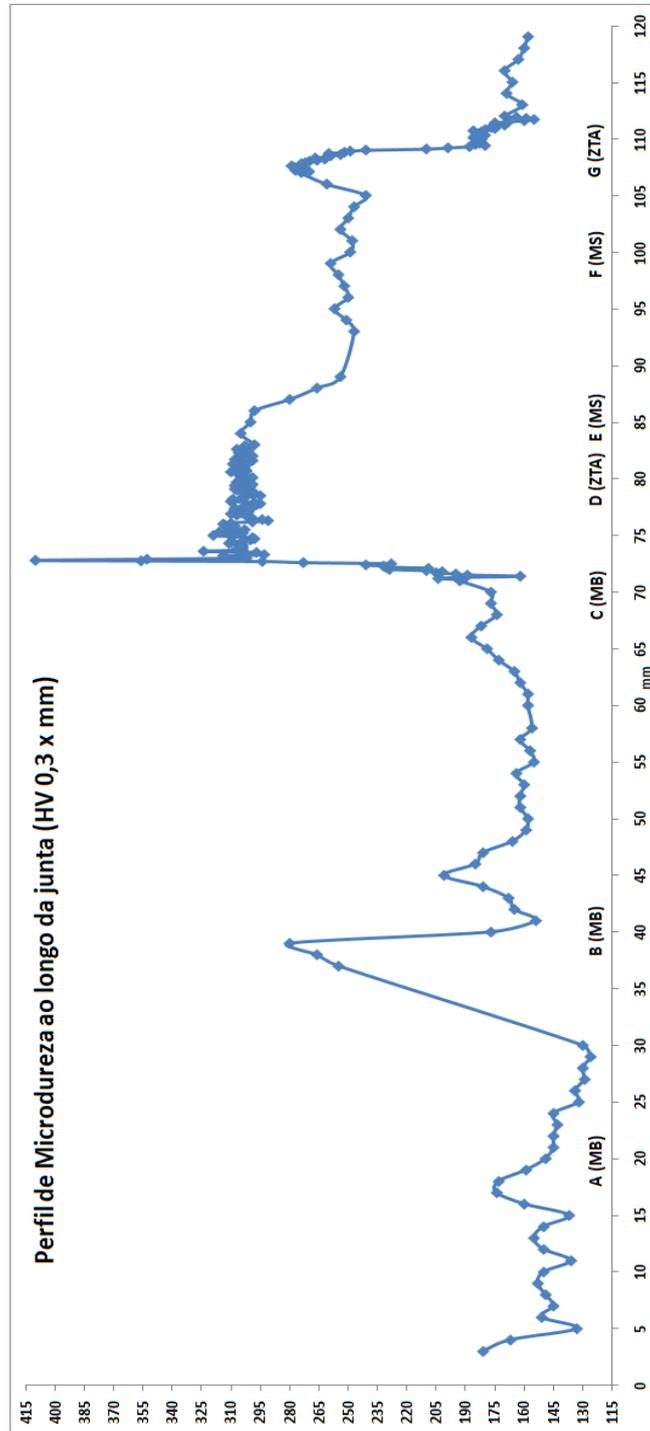


Figura 40: Perfil de microdureza (HV 0,3) ao longo da junta (mm).

Para uma melhor análise, a seguir, na figura 41, foco nos valores de dureza somente das ZTA e MS, região que tem início no ponto D, em 80 mm do início da junta, e fim no ponto G, a 108 mm do início da junta.

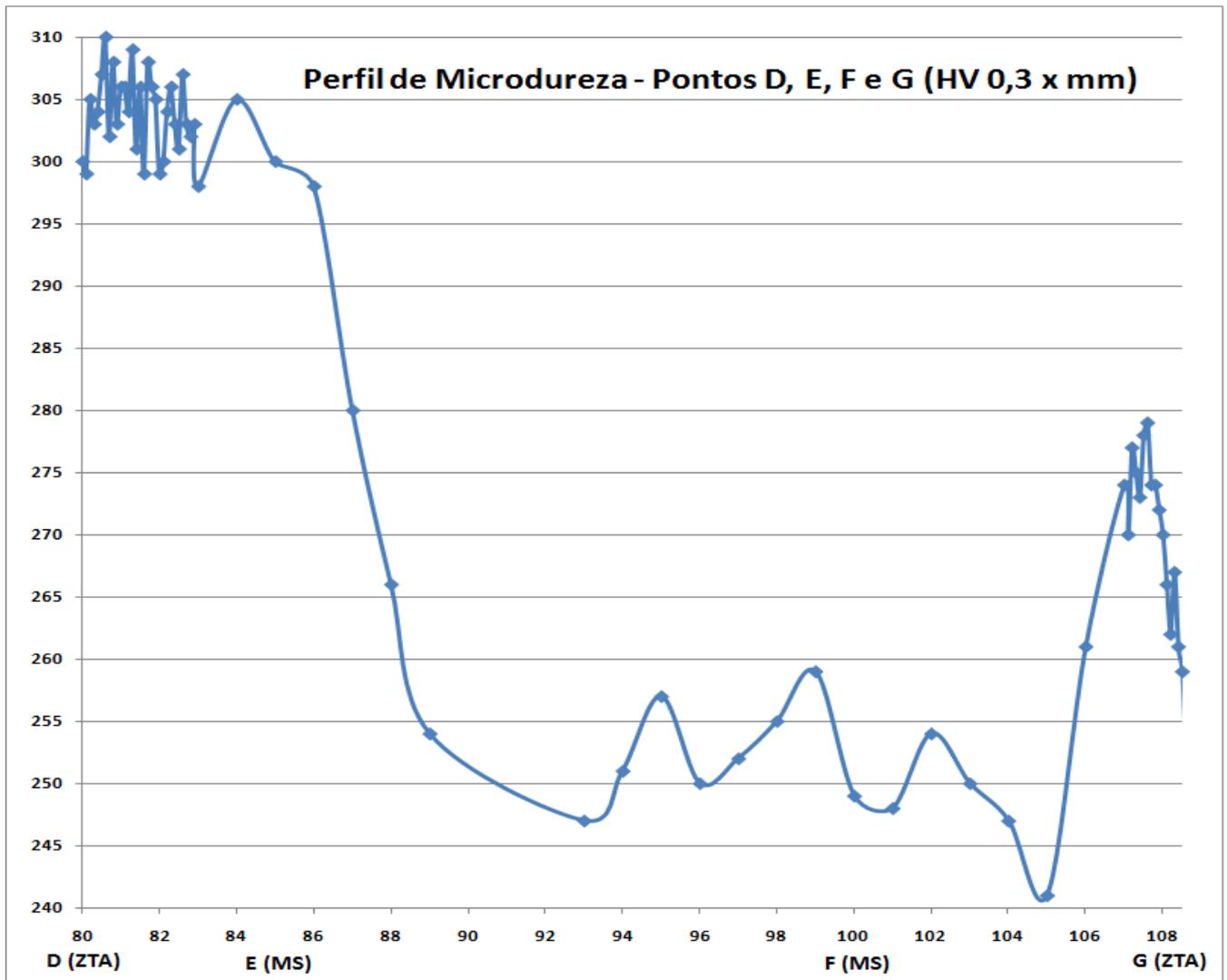


Figura 41: Perfil de Microdureza dos pontos D (ZTA), E (MS), F (MS) e G (ZTA).

6 DISCUSSÃO

6.1 Difractometria de raios-X

Na primeira condição, das amostras polidas mecanicamente, a tensão longitudinal do ponto C varia razoavelmente em comparação aos outros pontos do MB, como é possível verificar na Tabela 2. Essa diferença pode ser devido à maior proximidade deste ponto ao cordão de solda que os outros, e, portanto, este pode ter sofrido efeito do ciclo térmico de soldagem. Além disso, essa diferença só foi notada na direção longitudinal ao cordão de solda, pois é ela que provoca maior restrição à variação dimensional das regiões aquecidas, já que para tal seria necessário que o material de base se deformasse nessa direção, diferente do que ocorre na direção transversal ao cordão de solda, que permitiria a movimentação das regiões aquecidas, levando em consideração uma junta de pequenas dimensões, sem ter que se deformar.

O gráfico da figura 42 compara as tensões transversais ao cordão de solda medidas ao longo da junta sob as diferentes condições, e a figura 43 as tensões longitudinais ao cordão de solda.

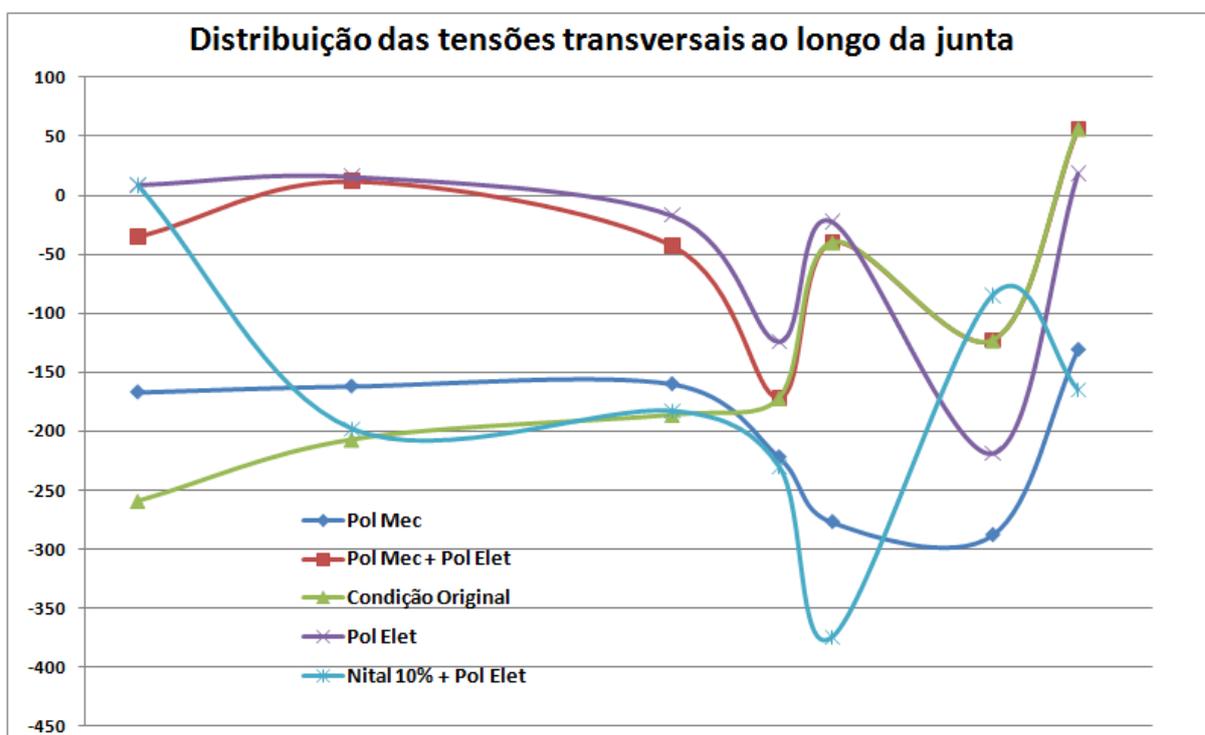


Figura 42: Distribuição das tensões residuais transversais ao cordão de solda ao longo da junta.

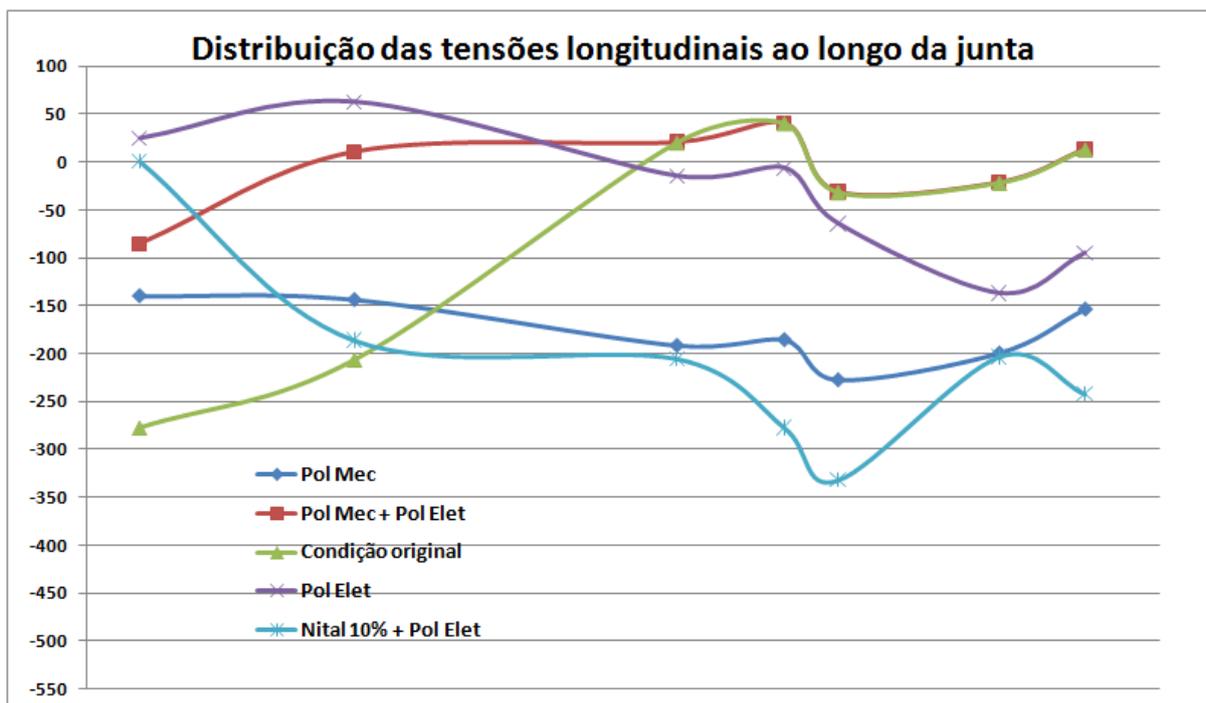


Figura 43: Distribuição das tensões residuais longitudinais ao cordão de solda ao longo da junta.

Nota-se que a curva verde, correspondente à condição original, na qual as amostras foram submetidas somente ao lixamento manual na lixa d'água #80, não assume um perfil nem ao menos similar ao das outras condições, tanto no sentido transversal como no longitudinal ao cordão de solda. Seus valores variam bruscamente de ponto para ponto, sem uma tendência explicável. Esse comportamento pode ser consequência do lixamento manual realizado. Como a pressão aplicada não é controlada, cada ponto pode ter sido submetido a uma pressão diferente, e, portanto, as tensões induzidas em cada um também foram diferentes.

Comparando a condição original às amostras polidas mecanicamente através das figuras 44 e 45 verifica-se alteração do comportamento. Essa mudança de perfil pode ser explicada pela realização do polimento mecânico automático nas amostras. O polimento após o lixamento remove a camada deformada, e, conseqüentemente, suas tensões, provenientes do lixamento. Isso remove o comportamento verificado na condição original. Entretanto, o polimento também introduzirá novas tensões, mas pelo fato do processo ser automatizado, a pressão imposta nas amostras é a mesma, e, portanto, a tensão induzida também. Retirada a 'bagunça' das tensões após o lixamento, verifica-se que a curva do polimento mecânico

apresenta perfil similar ao proposto pela teoria, entretanto, seus valores são todos compressivos. Isso sugere indução de alto nível de tensões pelo polimento mecânico.

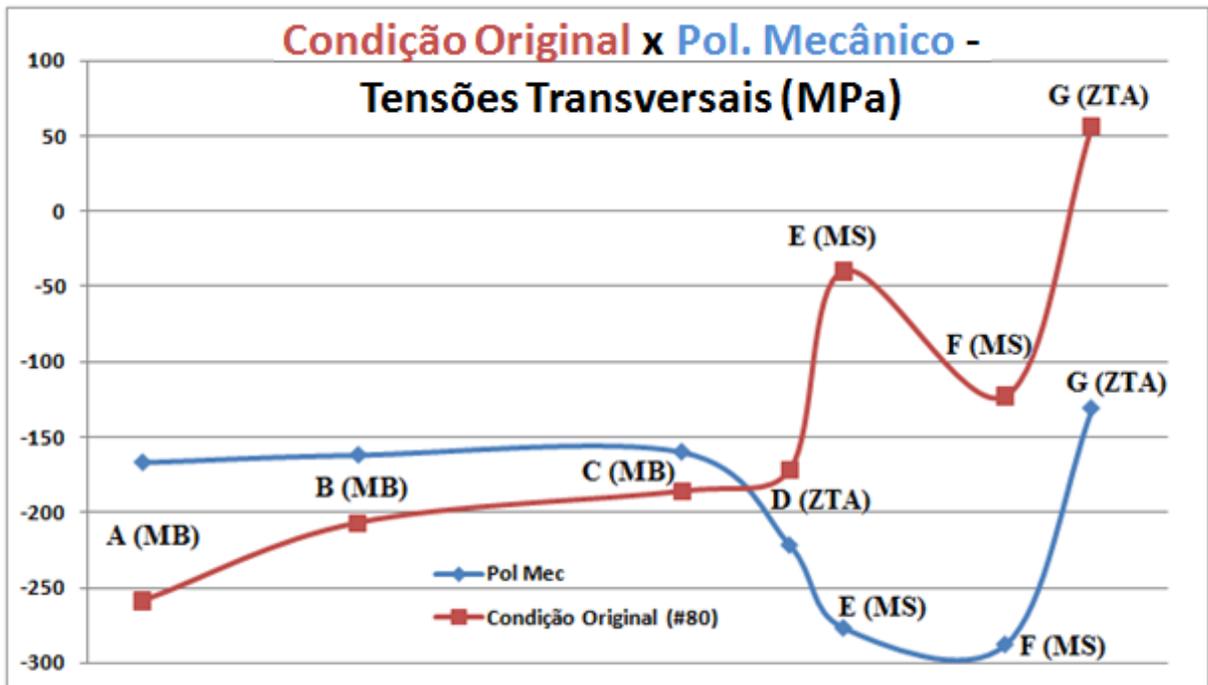


Figura 44: Comparação das tensões transversais ao cordão de solda das amostras na condição original e após polimento mecânico.

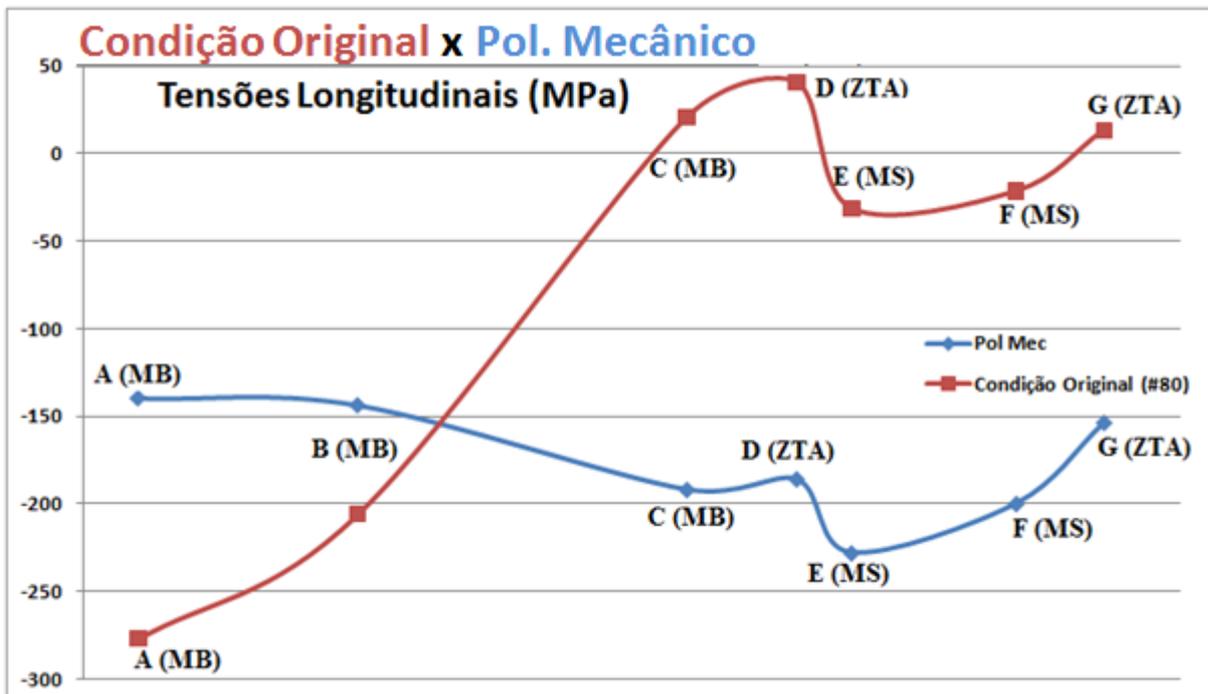


Figura 45: Comparação das tensões longitudinais ao cordão de solda das amostras na condição original e após polimento mecânico.

O polimento eletrolítico é um processo que, teoricamente, induz um nível baixo de tensões, por isso, foi realizado para remover a camada deformada pelo polimento mecânico, e, conseqüentemente, as tensões induzidas por este. Analisando as tensões antes e após o polimento eletrolítico através das figura 46 e figura 47 verifica-se que o perfil se manteve, mas os valores das tensões em si tornaram-se menos compressivos, comprovando o alto nível de tensões induzido pelo polimento mecânico.

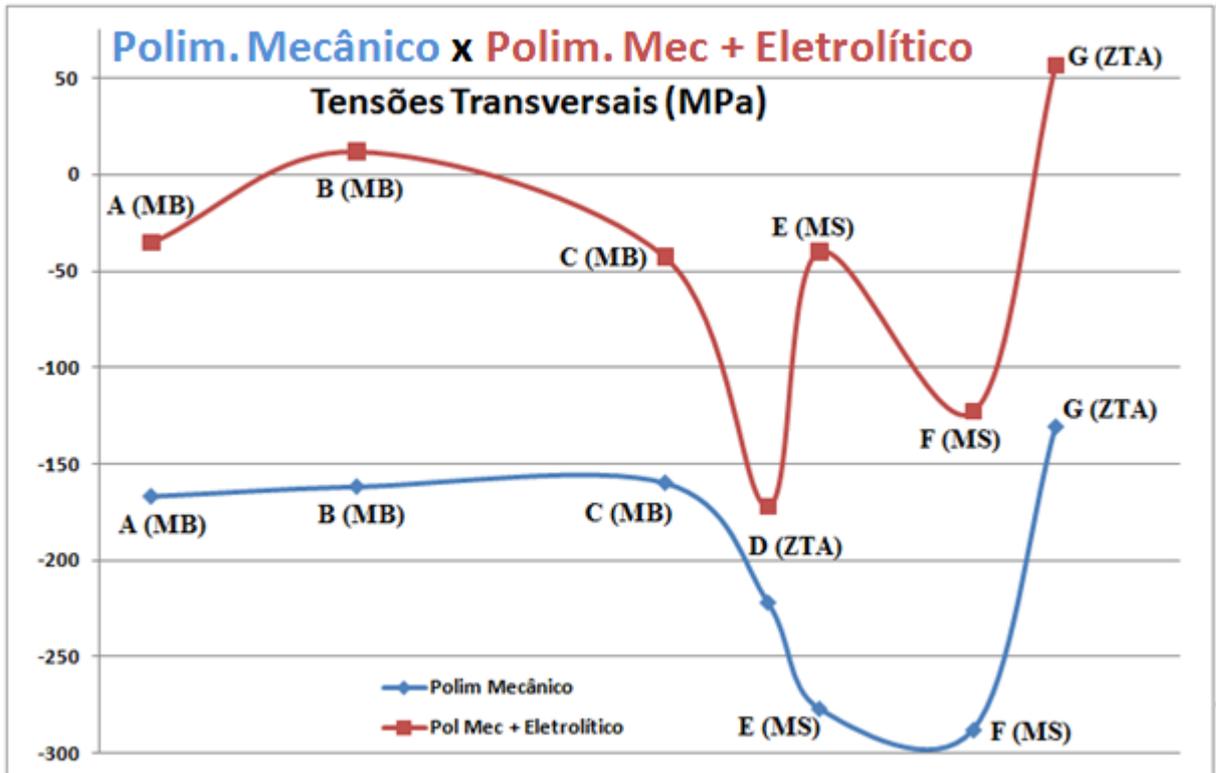


Figura 46: Comparação das tensões transversais ao cordão de solda das amostras polidas somente mecanicamente com as polidas mecânica e eletroliticamente.

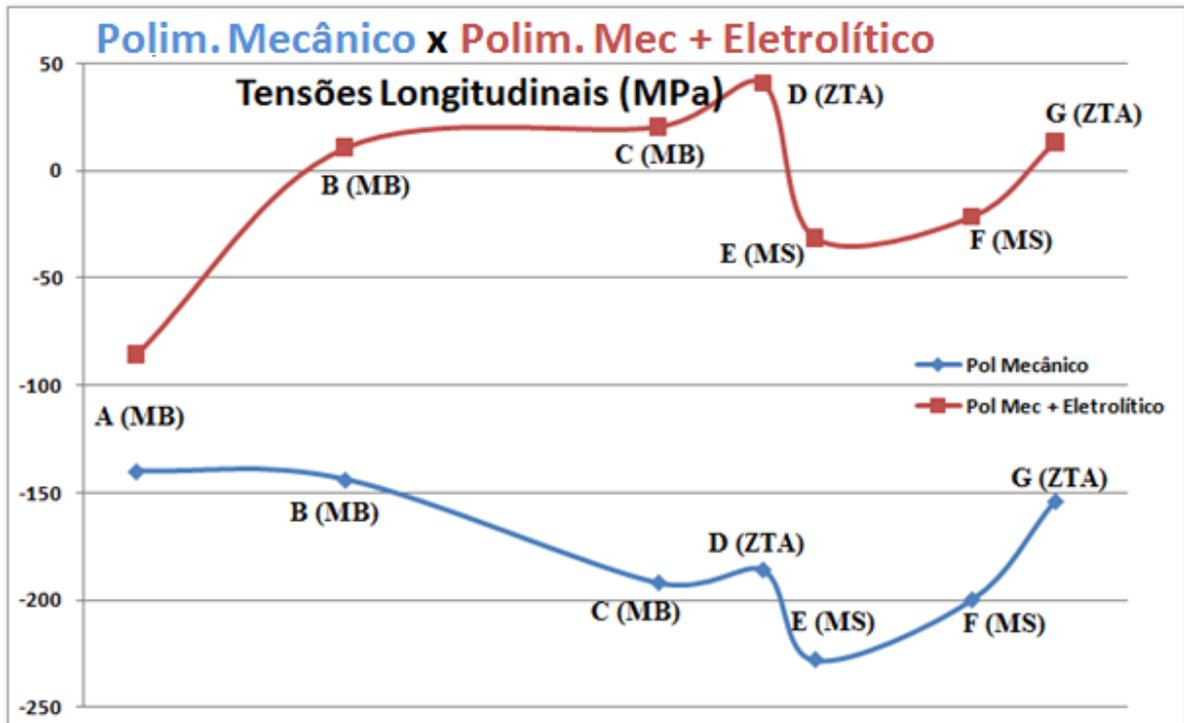


Figura 47: Comparação das tensões longitudinais ao cordão de solda das amostras polidas somente mecanicamente com as polidas mecânica e eletroliticamente.

Como o polimento eletrolítico foi um método eficaz na preparação da superfície da amostra e induz baixo nível de tensões, foi realizado o polimento eletrolítico em amostras apenas lixadas, para economizar a etapa de polimento mecânico. Comparando as tensões das amostras após o polimento eletrolítico através (figuras 48 e 49), tanto das amostras somente lixadas na lixa d'água #80, como nas que foram submetidas ao polimento mecânico, verificou-se que o nível de tensões foi muito similar, assim como foi possível obter bom acabamento da superfície, provando que o polimento mecânico pode ser descartado.

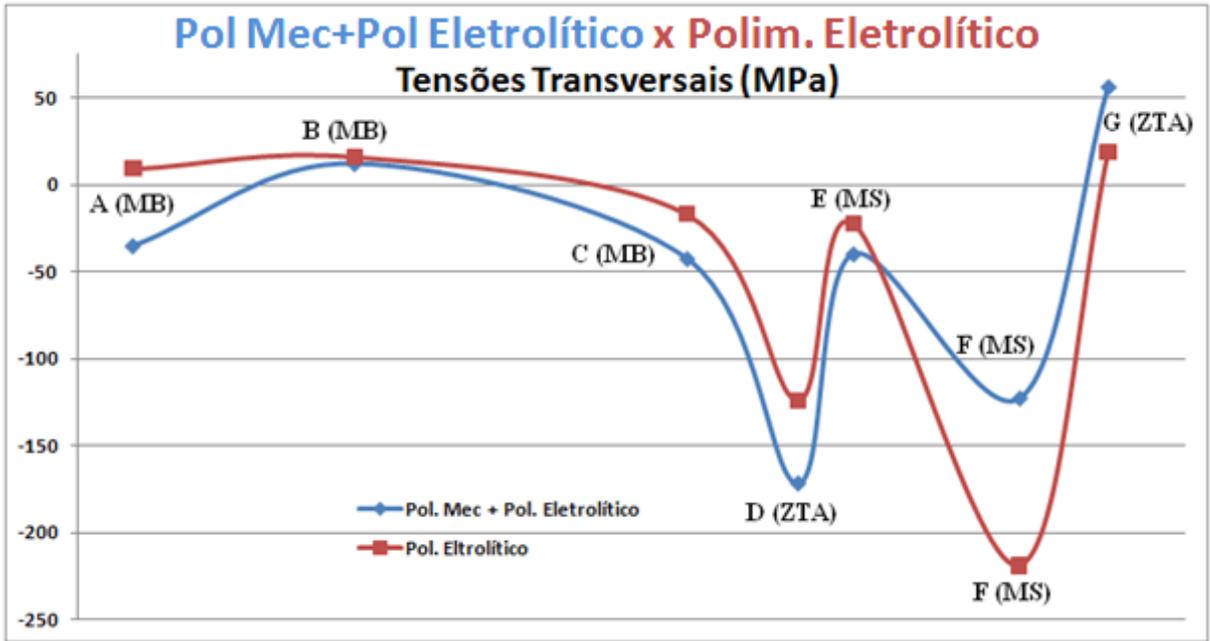


Figura 48: Comparação entre as tensões transversais ao cordão de solda das amostras submetidas ao polimento mecânico+eletrolítico e das polidas somente eletroliticamente.

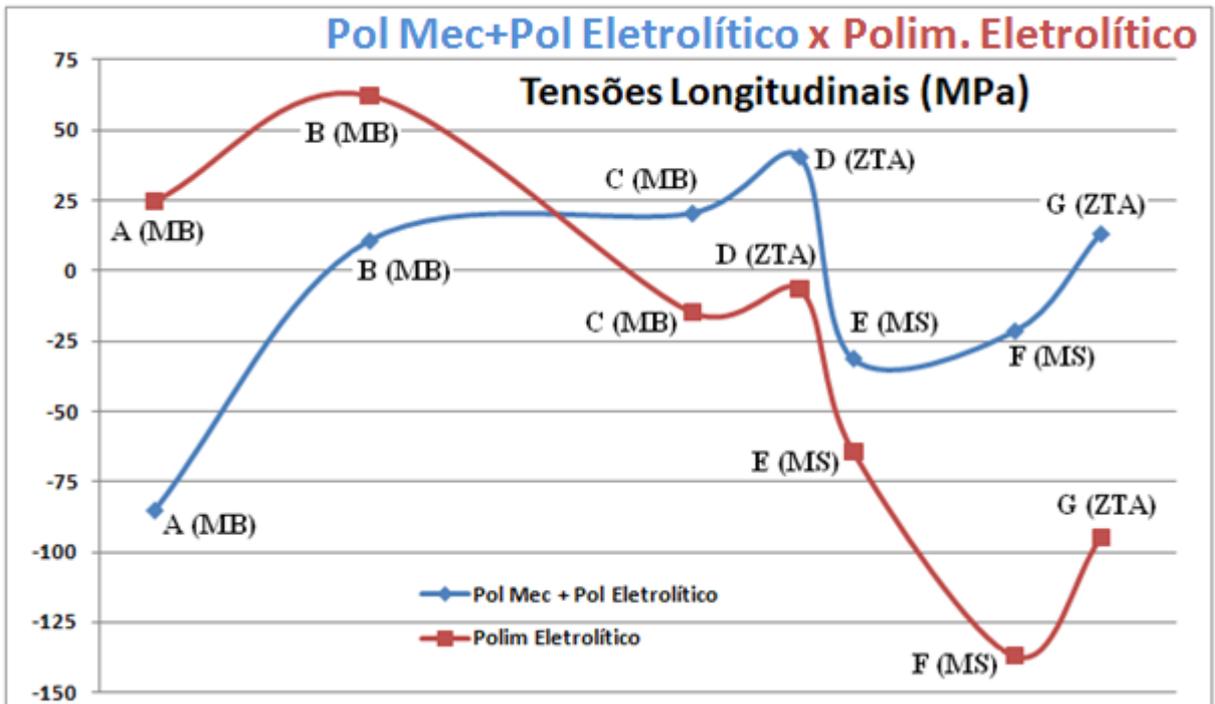


Figura 49: Comparação entre as tensões longitudinais ao cordão de solda das amostras submetidas ao polimento mecânico+eletrolítico e das polidas somente eletroliticamente.

Uma alternativa ao polimento mecânico poderia ser o ataque com Nital 10% antes do polimento eletrolítico, já que o ataque não induz tensões. Entretanto, o perfil apresentado pelas amostras atacadas com Nital 10% e submetidas ao polimento eletrolítico não é similar

aos das amostras polidas eletroliticamente e nem ao menos da condição original, como se pode visualizar nas figuras 50 e 51. O ataque com Nital 10% remove a deformação e as tensões induzidas pelo lixamento, entretanto, a remoção de material não é uniforme em toda a superfície, principalmente em regiões de ZTA e MS, devido às diferentes microestruturas que possivelmente existam, promovendo rugosidade superficial diferente em cada amostra. Isso prejudica o polimento eletrolítico, resultando em um perfil de tensões não representativo.

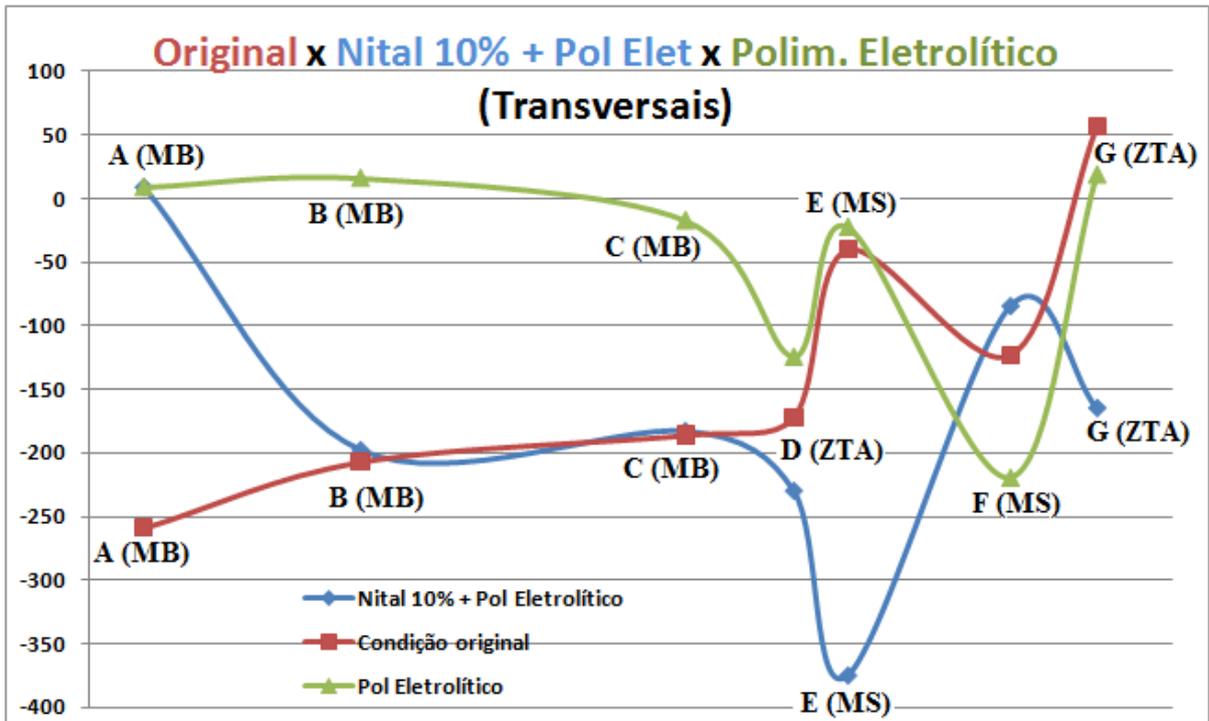


Figura 50: Comparação das tensões transversais entre as amostras na condição original, das submetidas ao ataque com Nital 10% e polidas eletroliticamente, e das somente polidas eletroliticamente.

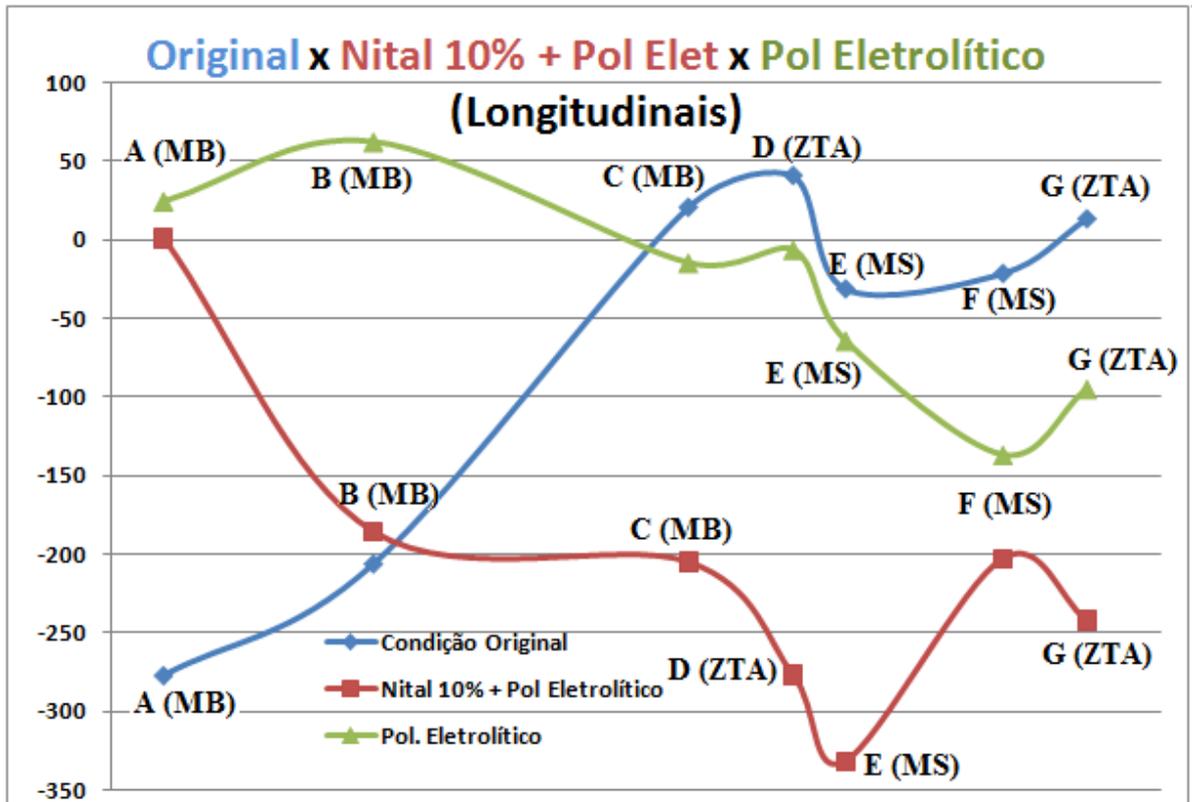


Figura 51: Comparação entre as tensões longitudinais das amostras na condição original, das submetidas ao ataque com Nital 10% e polidas eletroliticamente, e das somente polidas eletroliticamente.

Comparando as tensões transversais através da figura 52 das amostras polidas mecanicamente, das polidas eletroliticamente após o polimento mecânico, e das somente polidas eletroliticamente, verifica-se que o ponto E, em ambos os casos de polimento eletrolítico, apresentou valor mais trativo que seus pontos vizinhos, fato mascarado pelo polimento mecânico devido a seu alto nível de tensões induzidas.

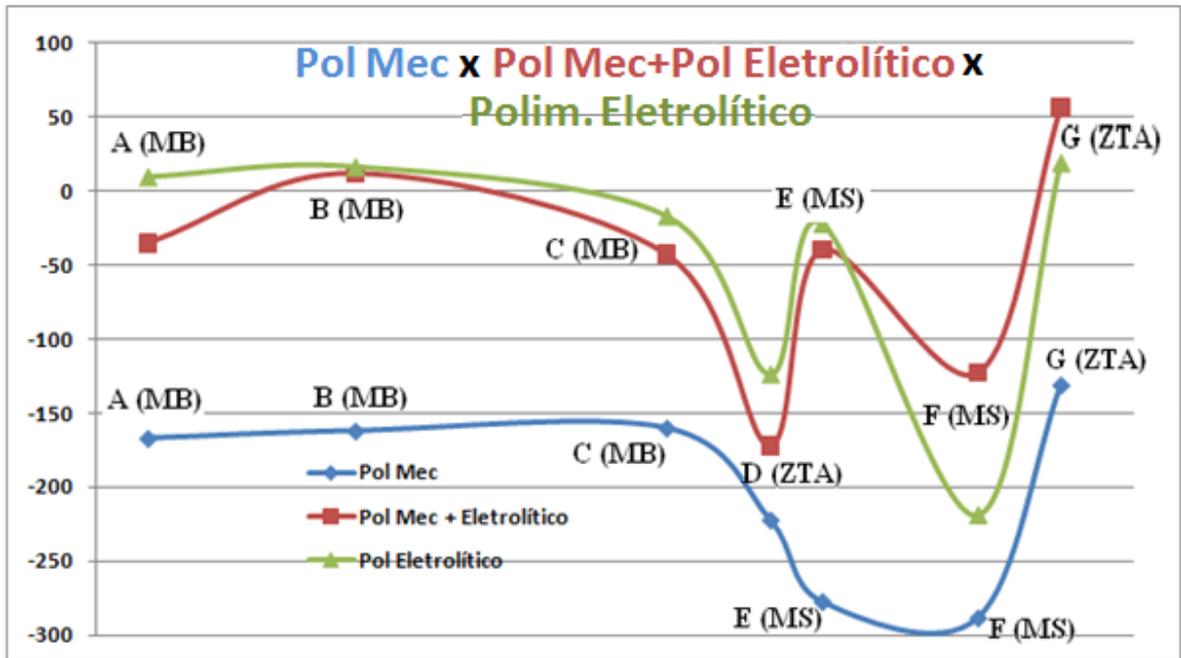


Figura 52: Comparação entre as tensões transversais das amostras polidas mecanicamente, das polidas mecanicamente e eletroliticamente, e das polidas somente eletroliticamente.

Por fim, analisando todos os gráficos verifica-se também que todas as tensões da ZTA e MS foram compressivas. Isso ocorre devido à formação de martensita, que sofreu restrição à sua expansão volumétrica pelo MB. Tal transformação de fase foi comprovada através da análise micrográfica.

Já em relação à ZTA, na maioria das condições o ponto D apresentou tensões de magnitude bem mais elevadas que G. Isso pode ser devido ao fato de que o calor proveniente dos cordões de solda realizados posteriormente ao de G ocasionou um alívio de tensões neste. Já o ponto D corresponde ao último cordão de solda, portanto, não foi submetido a este calor posterior.

6.2 Comparação entre as medidas obtidos por DFRX e HD

O método de medição de tensões residuais Hole-Drilling fornece gráficos da tensão em função da profundidade do furo, como é possível visualizar na Figura 53, que apresenta dados da mesma junta, anteriormente estudada por Donato (DONATO, 2008). O primeiro gráfico é das tensões transversais ao cordão de solda (eixo x), e o segundo é das tensões paralelas (eixo y) ao cordão de solda.

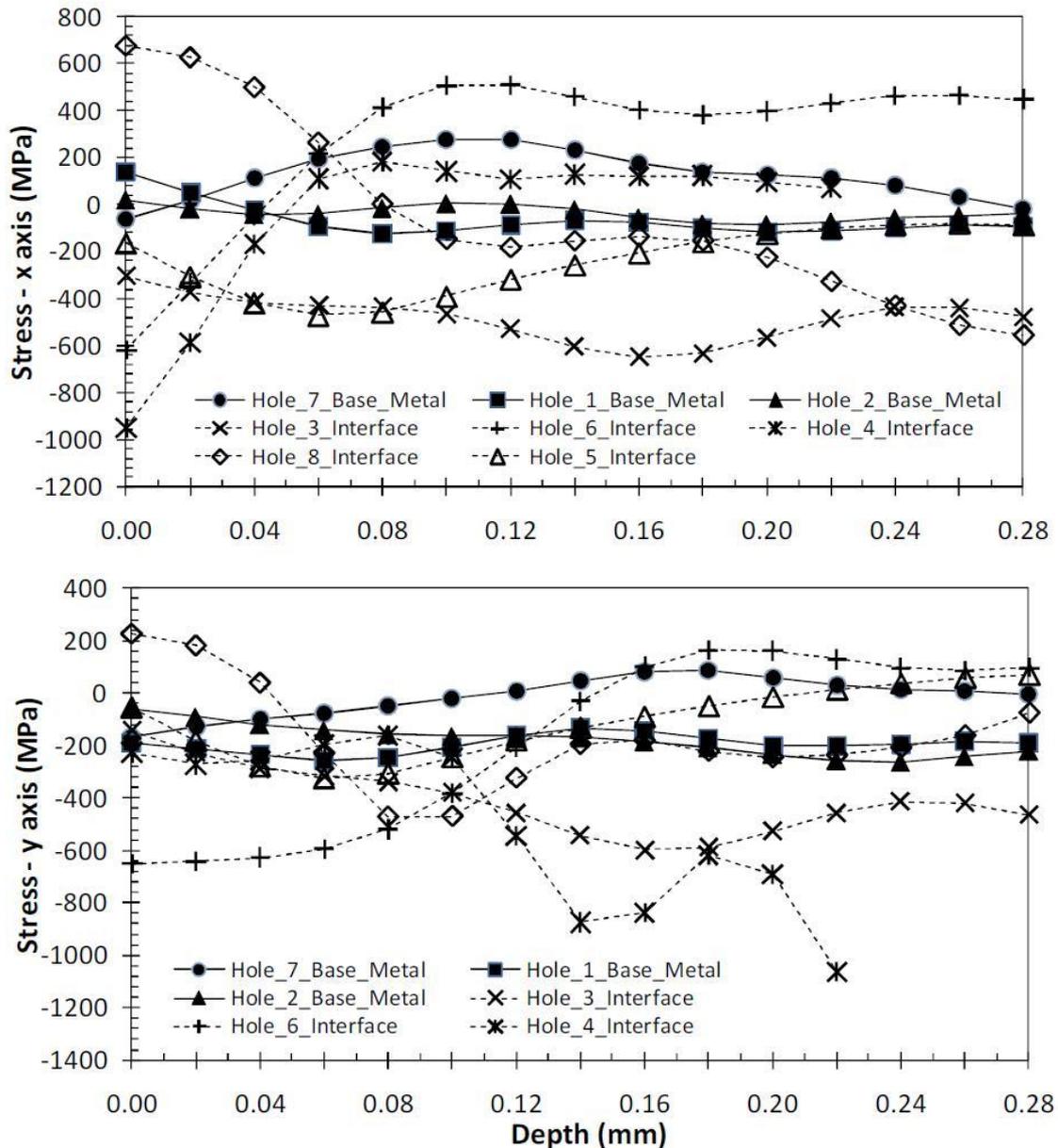


Figura 53: Gráficos fornecidos pelo método Hole-Drilling das tensões, transversais (eixo x) e paralelas (eixo y) ao cordão de solda, medidas em função da profundidade do furo. (DONATO, 2008)

Para comparar os valores obtidos através da difratometria de raios-X torna-se necessário, portanto, saber a espessura exata na qual a medição foi realizada. Como a remoção de material proveniente das etapas de preparação metalográfica (lixamento, polimento mecânico, polimento eletrolítico e ataque com Nital 10%) não foi controlada, houve a tentativa de comparar a espessura das amostras após os processos com o valor inicial, entretanto, a junta não havia sido retificada, e espessura atual de uma mesma amostra variava

significativamente, fato que impossibilitou a comparação dos valores obtidos através da técnica de difratometria de Raios-X com os do Furo Cego.

6.3 Perfil de Microdureza

Na figura 40 a condição de solda *overmatch* é muito nítida, sendo expressada através dos altos valores de dureza do MS em comparação ao MB. Além disso, os elevados valores de dureza obtidos na ZTA (pontos D e G) indicam a presença de constituintes frágeis, como a martensita, fato confirmado pelas micrografias.

7 CONCLUSÃO

As condições de preparação da superfície das amostras têm grande influência nos valores de tensões. O lixamento manual induz níveis de tensões diferentes ao longo da junta, devido à aplicação de pressão não controlada, resultando em um perfil de tensões falso e insignificante. Esse perfil pode ser removido através do polimento mecânico automático. O polimento mecânico automático remove a camada deformada pelo lixamento manual, e conseqüentemente suas tensões. Por aplicar pressão uniforme em todas as amostras, apresenta um perfil de acordo com o proposto pela teoria, com um sentido explicável, entretanto não é adequado devido ao alto nível de tensões que induz, sendo necessário após esse procedimento, caso ele seja realizado, o polimento eletrolítico. O polimento eletrolítico após o polimento mecânico é eficaz, diminuindo o nível de compressão das tensões, e é bem similar ao perfil das amostras somente polidas eletroliticamente. Como alternativa ao polimento mecânico, o ataque com Nital 10% não é válido, pois as diferentes microestruturas conseqüentes do processo de soldagem impedem um ataque uniforme, resultando em rugosidades diferentes, prejudicando o polimento eletrolítico posterior. Por fim, conclui-se que o melhor método de preparação das superfícies é o polimento eletrolítico.

Já de acordo com a distribuição das tensões residuais ao longo da superfície da junta, todas as tensões da ZTA e MS foram compressivas. Tal comportamento é devido a restrição à expansão volumétrica da martensita e/ou bainita pelo MB

A comparação entre os valores de tensões residuais obtidos pelo método do furo cego com os obtidos pela difração de raios-x não foi possível. O método de furo cego consiste em medir as tensões residuais ao longo da profundidade da junta, a cada 0,04 mm. Como a remoção de material nas etapas de preparação da superfície das amostras não foi controlada houve a tentativa de calculá-la medindo-se a espessura das amostras após o processo, entretanto, as dimensões da junta variavam bruscamente de ponto para ponto, dificultando a medição precisa de material removido. Sendo assim, não foi possível definir a profundidade exata na qual as medições através da difratometria de Raios-X foram realizadas, fato que impossibilitou a comparação com os valores de tensão medidos através do furo cego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- WINTERTON, John. **ASTM A516 Grade 70 for Carbon Steel Plate For Pressure Vessels**. Disponível em: <<http://ezinearticles.com/?ASTM-A516-Grade-70-For-Carbon-Steel-Plate-For-Pressure-Vessels&id=2645011>>. Acesso em 30 Mar. 2010
- MODENESI, Paulo J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. 2008. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008. Disponível em: <http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf>. Acesso em 15 Mar. 2010.
- WIKIPEDIA. **Soldagem**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Soldagem>>. Acesso em 15 Mar. 2010.
- FORTES, Cleber. **Eletrodos Revestidos**. 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0_ApostilaEletrodosRevestidos.pdf>. Acesso em 22 jun. 2010
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys**. USA: ASM International, c1993. (ASM handbook, v. 1)
- MOREIRA, Hamilton Soares. **Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular**. 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DONATO, Gustavo H. B. **Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos**. 2008. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM International, 2003.
- WITHERS, P.J; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress Part 1- Measurement techniques. **Materials Science and Technology**, v. 17, n. 4, p. 355-365, abr. 2001. Disponível em:

<<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/mst/2001/00000017/00000004/art00001.jsessionid=6gi1fbiubcj8d.alice>>. Acesso em: 18 jun. 2010.

- PUC RIO. **Técnicas de Medição de Tensões Residual**. Disponível em:
<http://www.lambda.maxwell.ele.puc-rio.br/4411/4411_3.PDFXXvmi=v7ldJgTgGG5PD7eb5Z3eMdoPw7MrrsrXBObl66CNNIerPSDVRGbETAurliTaMm9oblKhsM5g6JIVDIsv24bWEGpmZjxMHlB4VbwjgNp1vmESfaVjmSZ3im3DUQkD2eIZpfiH4JIA6nslzoGVIG0C34gXUCCWQkVhBfZFIg56JrF99CsPC5SGmRBZuzPQu8rL78KQoQW9jDisgMjSSdAf6beBK5rgdU2l3NcsEaCZOU6IMZB0AQ6M6IxbOp6R>. Acesso em 22 jun. 2010
- AGGEN, G.; AKSTENS, Frank W.; ALLEN, C. Michael; AVERY, H. S.; BABU, P.; BAYER, Alan M.; BELLO, Felix; BHAT, Shrikan P; AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **ASM Handbook**: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. USA: ASM International. 1998.
- ZEEMANN, Annelise. **Tensões Residuais de Soldagem**. 2003 Disponível em:
<<http://www.infosolda.com.br/download/50dpe.pdf>>. Acesso em 27 Mar. 2010.
- ESTEFEN, Segan; GUROVA, Tatiana; CASTELLO, Xavier; LEONTIEV, Anatoli. **Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção**. Disponível em:
<<http://www.gurteq.com/RAYSTRESS%20DOWNLOAD/EXPOSOL%202008.pdf>>. Acesso em 06 Jul 2010, 23:00.
- American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. E 837-08**. USA. Jul 2009
- CALLISTER, William D, Jr. **Materials Science and Engineering**: An introduction. 7 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2007.
- PAGEL-NITSCHKE, Thomas. Application of Diffraction Methods for the Residual Stress Determination in Welded joints. In: PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE. 2009. Praga
- SHIMADZU. **Instruction Manual: Stress Measurement Attachment for SHIMADZU X-RAY DIFFRACTOMETER XRD-600**. Kyoto.
- CULLITY, B. D. **Elements of X-rays diffraction**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1956.

- PREVÉY, Paul S. **Current Applications of X-ray Diffraction: Residual Stress Measurement**
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Metallography and Microstructures**. USA: ASM International, 2004. (ASM handbook, v. 9)
- WILLIAMS, DB; CARTER, CB **Transmission Electron Microscopy**. New York: Plenum Press, 1996.