

Figura 1. ZF da amostra sem reparo soldada por Arame Tubular, aumento de 4000x.

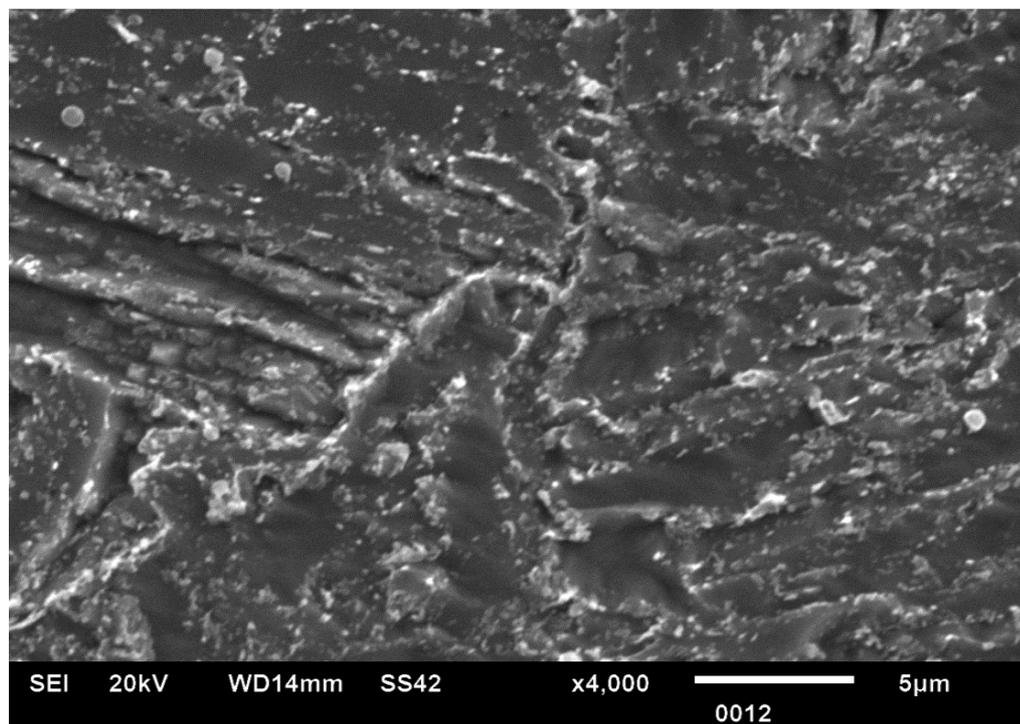


Figura 2. ZF do 2º reparo soldada por Arame Tubular, amostra com reparo, aumento de 4000x.

Portanto, não foi possível perceber grandes diferenças nas regiões ZF dos diferentes processos, nas amostras com e sem reparo.

Em todas as regiões analisadas das amostras com e sem duplo reparo foi possível perceber a presença de carbonetos. No entanto, na ZTA central da junta reparada e nas ZF's, a densidade de carbonetos foi menor do que em zonas mais distantes como ZTA / MB. Além disso, não foi possível perceber comparando-se as duas amostras, nenhuma tendência ao aumento do tamanho dos carbonetos causado pelo duplo reparo ou repetição do TTPS, somado a isto, não foi observada a presença de ferrita δ nas imagens obtidas por MEV. Os grãos de ferrita δ podem ser distinguidos da martensita revenida por serem "lisos" (sem placas ou subgrãos e nenhuma precipitação de carbonetos) [Ayala et al., 1999, Thomas et al.,2007].

3.3 - Ensaio Mecânicos

3.3.1 - Ensaio de Microdureza

As Figuras de 70 até 75 apresentam os gráficos com os valores obtidos para microdureza Vickers ao longo da das linhas 1, 2 e 3 (conforme Figura 39) das amostras com e sem reparo.

As Figuras 70 e 71 mostram os resultados obtidos para linha 1 (raiz) nas duas condições. A amostra sem reparo obteve um valor médio de 221,96 HV (desvio padrão 16,69), mínimo de 192,50 HV e máximo de 249,05 HV; a amostra com reparo obteve um valor médio de 231,26HV (desvio padrão 18,65), mínimo de 192,23HV e máximo de 260,86 HV. Os valores mínimos aconteceram nas ZTA' s próximas ao metal de base. Este resultado já era esperado, pois esta região atinge temperaturas gradualmente menores, fazendo com que a dissolução dos precipitados seja menor [Bailey,1994, Thomas et al., 2007].

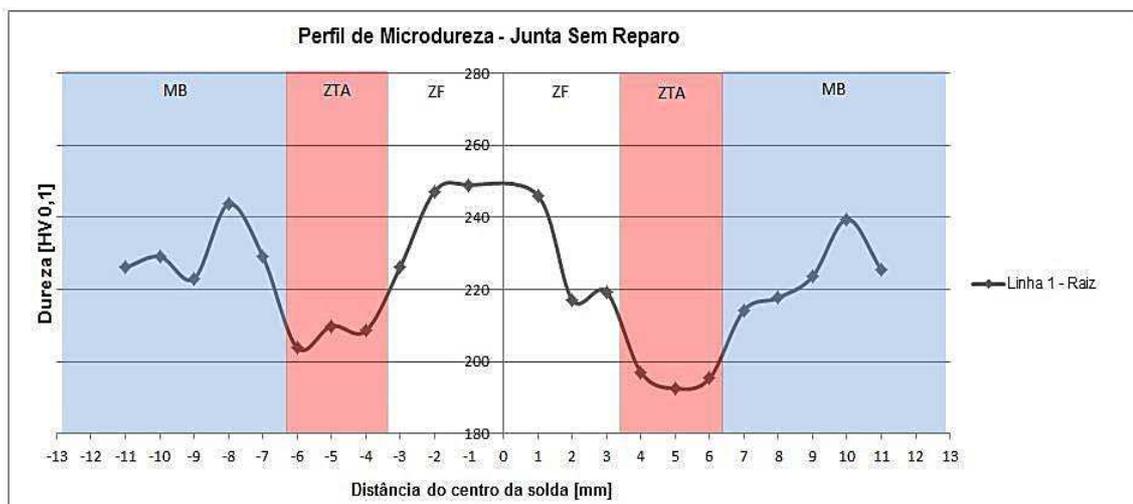


Figura 3. Perfil de microdureza HV da amostra sem reparo na linha 1 (raiz).

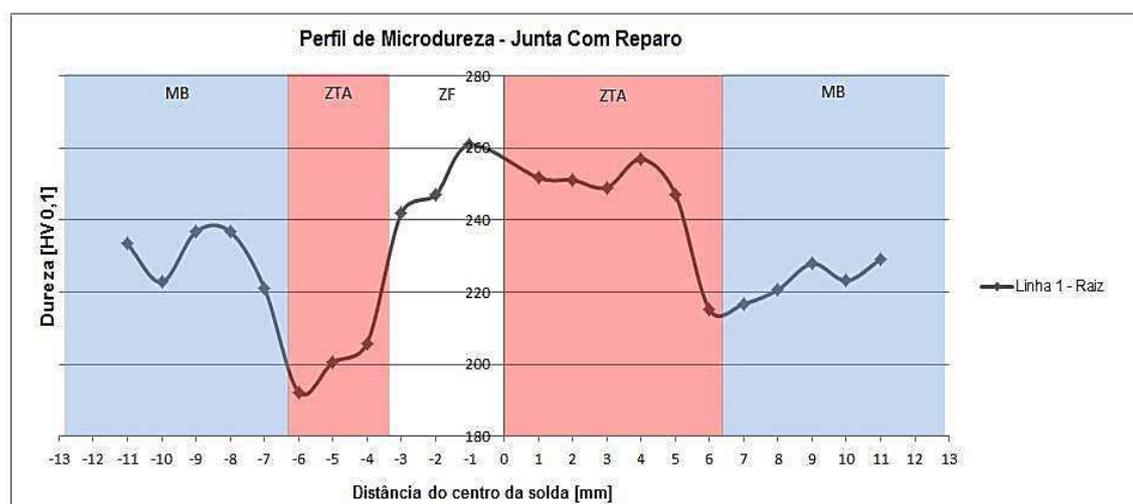


Figura 4. Perfil de microdureza HV da amostra com reparo na linha 1 (raiz).

As Figuras 72 e 73 mostram os resultados obtidos para linha 2 (enchimento) nas duas condições. A amostra sem reparo obteve um valor médio de 239,17 HV (desvio padrão 24,56), mínimo de 189,87 HV e máximo de 281,58 HV; a amostra com reparo obteve um valor médio de 224,28 HV (desvio padrão 20,31), mínimo de 184,67 HV, e máximo de 274,85. O perfil da amostra com reparo se mostrou mais irregular, com oscilações ao longo da junta. Os valores mínimos nas duas amostras ocorreram na ZTA à esquerda. O valor máximo na amostra com reparo ocorreu na ZTA central da junta reparada que apresentou maior valor em relação à ZF do lado sem reparo. Os valores mais altos de dureza estão relacionados a um possível endurecimento por solução sólida, provocado pela dissolução parcial dos

precipitados durante o aquecimento a elevadas temperaturas durante os dois reparos [Bailey,1994, Thomas et al., 2007].

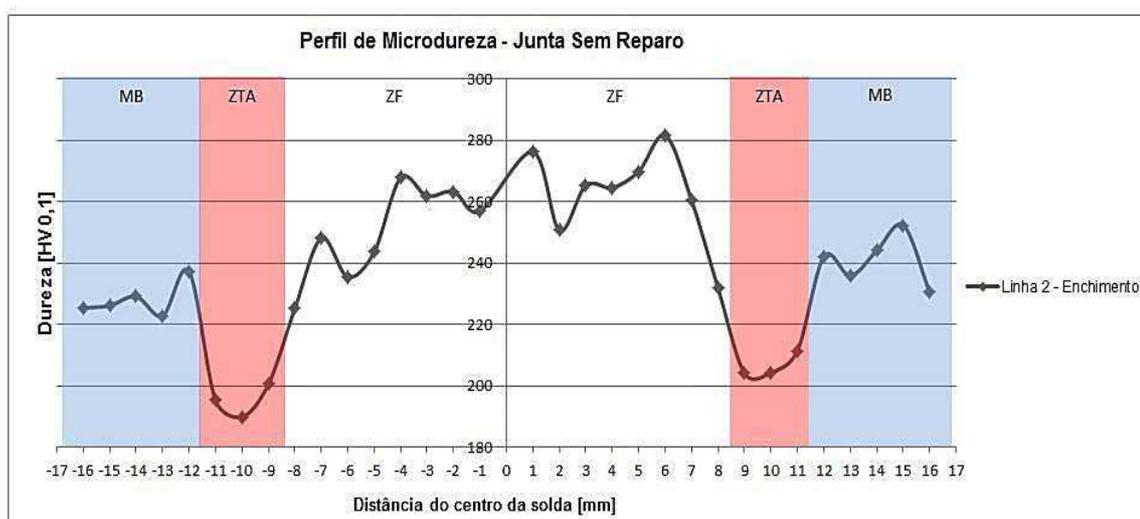


Figura 5. Perfil de microdureza HV da amostra sem reparo na linha 2 (enchimento).

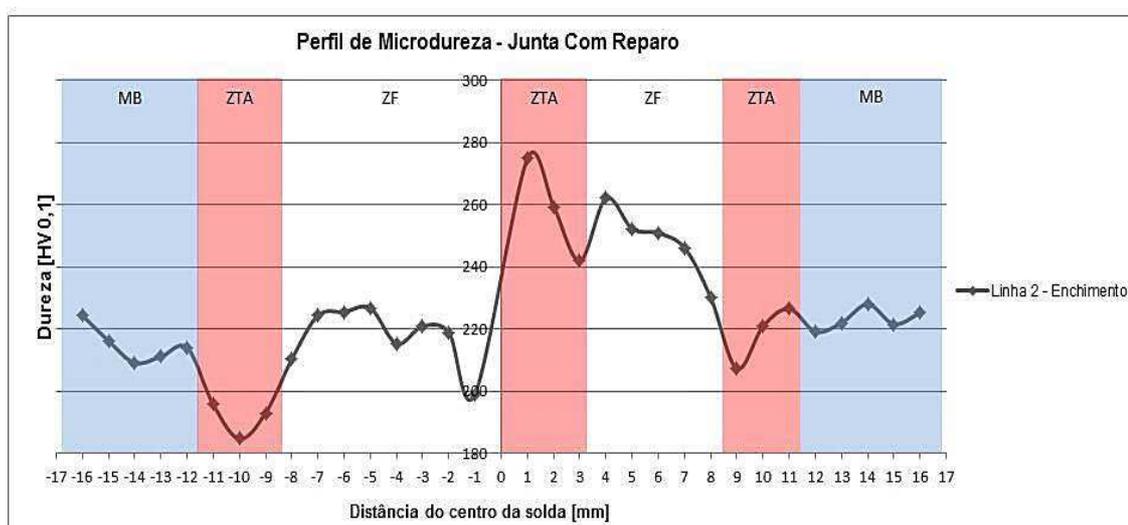


Figura 6. Perfil de microdureza HV da amostra com reparo na linha 2 (enchimento).

As Figuras 74 e 75 mostram os resultados obtidos para linha 3 (reforço) nas duas condições. A amostra sem reparo obteve um valor médio de 238,90 HV (desvio padrão 18,22), mínimo de 200,98 HV e máximo de 278,72 HV; a amostra com reparo obteve um valor médio de 233,28 HV (desvio padrão 20,31), mínimo de 187,04 HV, e máximo de 256,42. Os dois perfis se mostram relativamente uniformes, sem muitas oscilações ao longo da junta. Assim como na linha 2, os valores

mínimos nas duas amostras também ocorreram na ZTA à esquerda da junta. Os valores máximos nas duas amostras ocorreram entre 2 e 4 mm, indicando que o reparo não provocou grandes alterações na dureza nesta região.

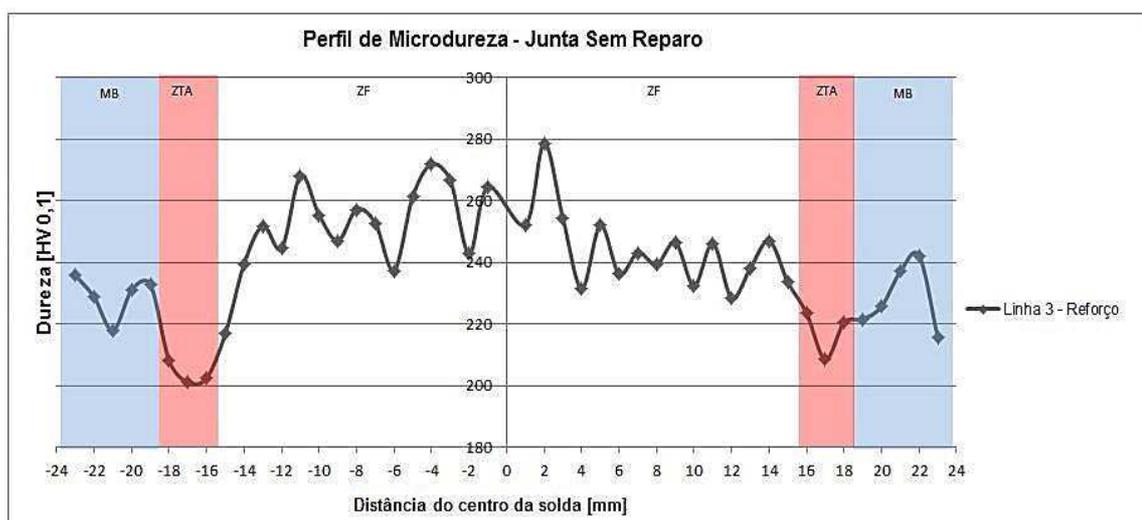


Figura 7. Perfil de microdureza HV da amostra sem reparo na linha 3 (reforço).

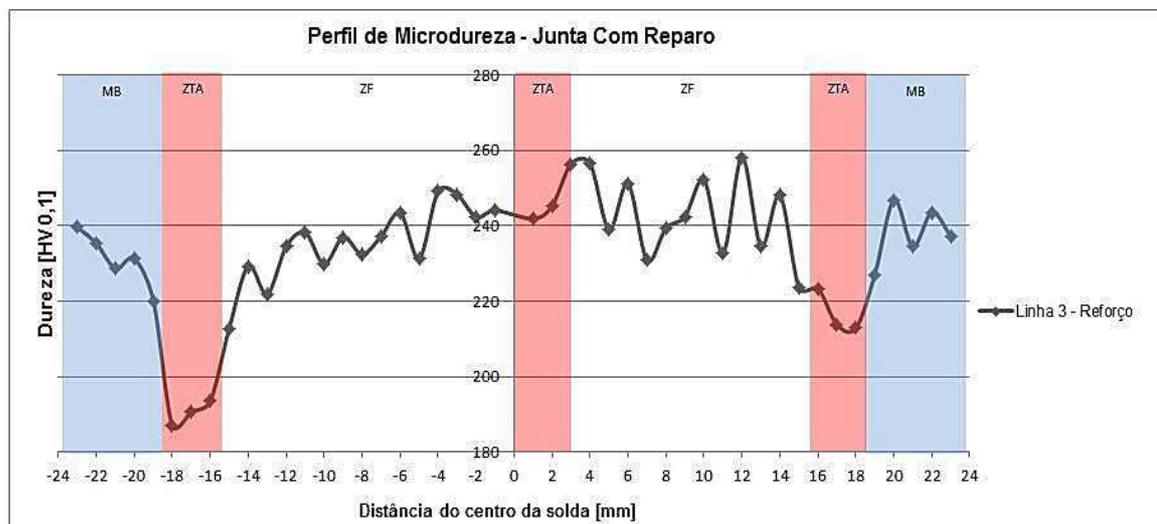


Figura 8. Perfil de microdureza HV da amostra com reparo na linha 3 (reforço).

A média ao longo de cada linha não é o parâmetro mais adequado para avaliar se houve ou não alguma tendência ao aumento da dureza nas amostras com e sem reparo. Para avaliar melhor comparação entre amostras foram calculados os valores médios de dureza em cada zona, estes valores estão expostos nas Tabelas 7 e 8.

Rocha (2012) observou que a sobreposição de cinco tratamentos térmicos pós-soldagem a 760°C com duração de uma hora em juntas do aço P91 tende a causar leve diminuição nos valores médios de dureza, porém, esta redução não é muito significativa. A Tabela 8 mostra os resultados de dureza Vickers (HV5) obtidos por Rocha (2012) após a sobreposição dos cinco tratamentos térmicos pós-soldagem. Os resultados foram obtidos da ZF e da ZTA de uma junta soldada do aço P91 por Eletrodo Revestido [Rocha, 2012].

Tabela 1. Resultados de dureza Vickers (HV5) após a sobreposição de cinco tratamentos térmicos pós-soldagem [Rocha, 2012].

	ZF			ZTA		
	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
1º TTPS	274	268	272	259	209	222
2º TTPS	270	239	257	247	206	222
3º TTPS	271	241	250	248	207	221
4º TTPS	265	233	249	247	207	220
5º TTPS	274	233	249	241	203	218

Analisando as Tabelas 9 e 10 pode-se observar que, de modo geral, as zonas que não sofreram influência das operações de reparo (somente a reaplicação do TTPS) tenderam a uma pequena redução nos valores de dureza, em contrapartida, algumas zonas que sofreram influência do reparo (ZTA central da junta reparada e ZTA entre a ZF do 2º reparo e o MB) apresentaram um leve aumento pelo fato de terem sido reexpostas a altas temperaturas durante as operações de reparo.

Tabela 2. Valores médios nas zonas da junta sem reparo.

	MB	ZTA	ZF
Linha 1	227,12	201,16	234,18
Linha 2	234,54	200,91	256,41
Linha 3	228,82	210,66	247,91

Tabela 3. Valores médios nas zonas da junta com reparo.

	MB	ZTA que não sofreu influência do reparo	ZF do lado sem reparo	ZTA central da junta reparada	ZF do 2º reparo	ZTA entre a ZF do 2º reparo e o MB
Linha 1	226,83	199,53	249,91	245,20	-	245,20
Linha 2	219,05	191,1	217,61	258,71	248,28	218,21
Linha 3	234,44	190,39	235,45	247,87	242,40	216,69

A especificação do microdurômetro diz que é preciso considerar um erro percentual de 10% nas medidas, logo os valores dureza estiveram relativamente dentro do previsto pela bibliografia (200 a 295HV) [Newell, 2001]. Além disso, alguns autores propõem valores mínimos aceitáveis iguais ou superiores a 190 HV [Natesan, 2006; Rocha, 2012]

3.3.2 - Ensaio de Impacto

Como já mencionado no Capítulo 2 (Materiais e Métodos), os ensaios de impacto foram solicitados pela empresa UTC Engenharia S.A. e realizados nos laboratórios da empresa DMCJ Inspeções Ltda., os resultados foram cedidos para este trabalho e estão expostos nas Tabelas 11 e 12.

A norma de qualificação de ensaios em tubos soldados para uso em alta temperatura e pressão ASME B31.1, especifica que o valor para considerar o metal suficientemente tenaz após extração de corpos de prova na orientação transversal em tubos do aço P91 é 27J de média, a cada três ensaios, ou mínimo de 20J por ensaio. A ASTM A335 especifica um valor mínimo de 35 J para o metal de base [ASTM A335, 2006; ASME B31.1, 2008].

Tabela 4. Resultado dos ensaios de impacto na junta sem reparo (Anexo C).

Regiões	Valores de energia absorvida (J)			
	1º corpo de prova	2º corpo de prova	3º corpo de prova	Média
MB	191,85	171,14	174,15	179,04
ZF	24,86	19,27	21,36	21,83
ZTA	179,84	210,32	177,68	198,28

Tabela 5. Resultado dos ensaios de impacto na junta com reparo (Anexo C).

Regiões	Valores de energia absorvida (J)			
	1º corpo de prova	2º corpo de prova	3º corpo de prova	Média
2 - ZF do lado sem reparo	21,36	28,07	45,34	31,59
3 - ZTA central da junta reparada	42,62	47,63	21,55	37,27
4 - ZF do 2º reparo	15,06	26,86	18,91	20,28
5 - ZTA entre a ZF do 2º reparo e o MB	180,65	179,29	187,08	182,34

Os valores registrados na zona de fusão da amostra sem reparo e os valores na ZF do 2º reparo estiveram abaixo dos valores mínimos exigidos pela norma ASME B31.1. Contudo, de acordo com Newell (2001), o processo Arame Tubular produz valores de energia absorvida menores na ZF do que os processos Eletrodo Revestido e Arco Submerso, além disso, várias empresas estabelecem especificações internas que consideram valores médios entre 20 e 50J como satisfatórios [Newell, 2001; Zhang et al., 2001]. Outro fator que pode ter influenciado nos valores da energia absorvida foi a proporção do gás de proteção CO₂ utilizada na soldagem, também segundo Newell (2001) proporções maiores deste gás irão normalmente aumentar a quantidade de oxigênio no metal de solda e, conseqüentemente, reduzir a resistência ao impacto na junta [ASME B31.1, 2008; Newell, 2001].

Os valores obtidos na ZTA central da junta reparada foram maiores do que na ZF do 2º reparo e na ZF do lado sem reparo o que corrobora a análise microestrutural feita, já que, em geral, grãos menores tendem a ter maior resistência ao impacto [Newell, 2001; Zhang, 2001].

A Figura 76 mostra aspecto dos corpos de prova retirados da junta com reparo após os ensaios. Os corpos de prova das zonas que obtiveram menores valores de energia absorvida romperam completamente.



Figura 9. Aspecto dos corpos de prova retirados da junta com reparo após os ensaios de impacto.

Embora o aço P91 seja utilizado para fabricação de componentes que operam a temperaturas entre 500 e 600°C, existem situações em que a junta soldada precisa apresentar valores mínimos de resistência ao impacto à temperatura ambiente, ocasiões onde os componentes são solicitados ou pressurizados durante a construção, teste hidrostático ou inicialização dos equipamentos.

Os baixos valores de energia absorvida na ZF do 2º reparo mostram que a soldagem do aço P91 por Arame Tubular precisa ser mais bem avaliada, sobretudo em operações de reparo. O resultado obtido no primeiro ensaio na ZF do 2º reparo apresentou um valor considerado baixo, o que torna muito difícil prever se a junta falhará ou não em operação. Com exceção desta zona, todas as outras zonas avaliadas das juntas com e sem reparo apresentaram valores de energia absorvida dentro das especificações das normas ASME B1.1 e ASTM A335 [ASTM A335,

2006; ASME B31.1, 2008]. Aumentos sensíveis no tempo de exposição ao TTPS (de 15 a 30 minutos) podem contribuir de forma significativa para a elevação da resistência ao impacto na zona reparada. Contudo, este procedimento precisa ser bem estudado para que não haja redução excessiva da dureza ao longo da junta [Newell, 2001].

As diferenças significativas entre os valores de tenacidade à fratura mostram que existem diferenças microestruturais também significativas para esta propriedade e, embora os valores atendam a normas específicas, tais diferenças devem ser minimizadas para melhor resposta em uso do material soldado.

3.3.3 - Ensaio de Tração

Com o objetivo de verificar o limite de resistência da junta com e sem reparo o duplo reparo, foram realizados ensaios de tração a temperatura ambiente. Os ensaios foram solicitados pela empresa UTC Engenharia S.A. e realizados nos laboratórios da empresa DMCJ Inspeções Ltda., os resultados foram cedidos para este trabalho. As Figuras 77 e 78 mostram os gráficos de tração obtidos nos ensaios para as juntas com e sem o duplo reparo.

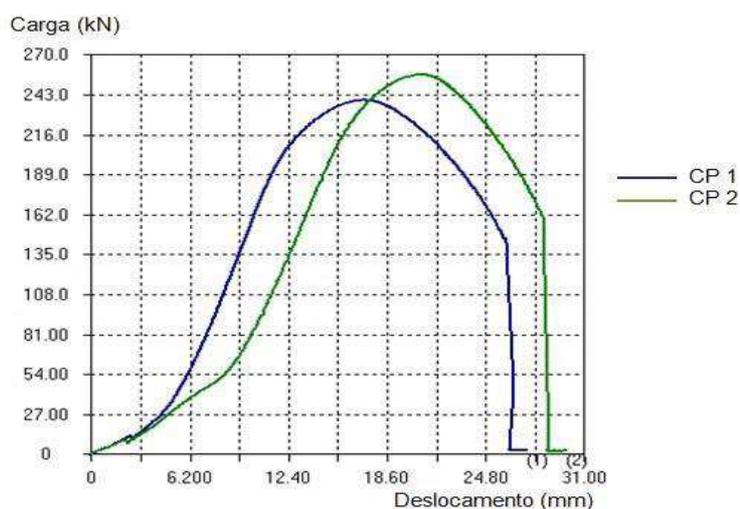


Figura 10. Gráfico do ensaio de tração da junta sem reparo.

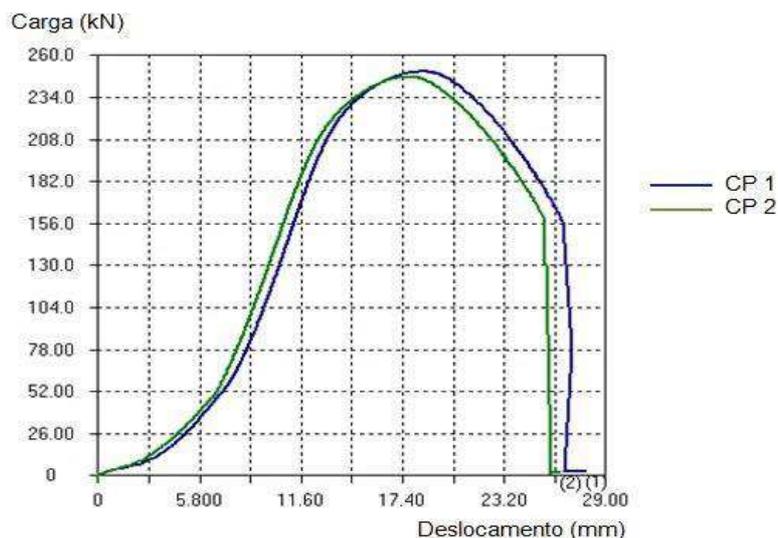


Figura 11. Gráfico do ensaio de tração da junta com reparo.

Os resultados dos ensaios estão expostos na Tabela 13. Todos estão de acordo com a ASTM A335 que determina valores de resistência à tração entre 585 a 760 MPa [ASTM A335, 2006].

Segundo Newell (2001), para que haja ductilidade satisfatória para juntas soldadas deste material, os valores percentuais de redução de área precisam estar entre 50 e 70%. Todos os corpos de prova estiveram dentro do intervalo [Newell, 2001].

Tabela 6. Resultados dos ensaios de tração (Anexo C).

Corpos de prova	Carga Máxima (kN)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Redução de Área (%)
CP1 - Sem reparo	239,927	670	60,4
CP2 - Sem reparo	256,147	735	53,7
CP1 - Com reparo	249,753	735	52,6
CP2 - Com reparo	247,247	715	59,7

A Figura 79 mostra os corpos de prova fraturados, em todos os ensaios houve ruptura no metal de base.



Figura 12. Corpos de prova de tração fraturados.

Assim, pode-se dizer que a junta reparada resistiu bem a esforços de tração à temperatura ambiente. Não houve tendência perceptível de aumento ou diminuição dos valores de resistência de tração antes e após o reparo.

4 - CONCLUSÃO

Após a análise das amostras através das técnicas de microscopia e dos ensaios mecânicos pôde-se chegar as seguintes conclusões:

A análise macroestrutural confirmou a formação de uma nova ZTA no centro da junta após operação dos reparos, dando a ela um aspecto heterogêneo.

Os aspectos microestruturais observados por MO mostraram que a ZTA central da junta reparada apresentou uma pequena tendência à formação de grãos menores do que na ZF do 2º reparo, além disso, a região apresentou grãos colunares que não são característicos de uma ZTA comum.

Os aspectos microestruturais observados por MEV não relataram diferenças nas regiões das ZF's dos processos TIG e Arame Tubular, nas amostras com e sem reparo. Em todas as regiões analisadas foi possível perceber a presença de carbonetos. No entanto, na ZTA central da junta reparada e nas ZF's, a densidade de carbonetos foi menor do que em zonas mais distantes do centro da junta como ZTA / MB. Também não foi possível perceber, comparando-se as duas amostras, nenhuma tendência ao aumento do tamanho dos carbonetos causado pelo duplo reparo ou repetição do TTPS. Somado a isto, não foi observada a presença de ferrita δ nas imagens obtidas por MO e MEV.

A análise química semiquantitativa por EDS não identificou variação significativa nos elementos presentes na junta com duplo reparo, no entanto, não foi detectada a presença do Manganês e do Nitrogênio nas análises. A ausência do Nitrogênio contribui para que o aço forme menos carbonetos e carbonitretos do tipo MX e, conseqüentemente, possua menor resistência à fluência sob temperaturas de serviço. Já a ausência do Manganês aumenta susceptibilidade à formação de ferrita δ , que reduz a resistência à fluência do material.

Os perfis de microdureza traçados tanto na junta sem reparo quanto na junta reparada apresentaram algumas oscilações entre as zonas constituintes, apesar disso, não houve redução ou aumento excessivo nos valores de dureza e eles estiveram dentro do previsto pelas normas e bibliografia.

Os ensaios de impacto revelaram baixos valores de energia absorvida na ZF do 2º reparo o que sugere melhor avaliação do TTPS quando a soldagem por Arame Tubular quando for utilizada para operações de reparo. Contudo, com exceção da

ZF do 2º reparo, todas as outras zonas avaliadas das juntas com e sem reparo apresentaram valores de energia absorvida dentro das especificações das normas ASME B1.1 (2008) e ASTM A335 (2006).

De forma geral, percebeu-se que a operação de reparo tendeu a diminuir a dureza e aumentar os valores de energia absorvida em zonas que não sofreram reparo, ao mesmo tempo, apresentou valores mais baixos de energia absorvida e mais altos de dureza na zona reparada.

Os ensaios de tração não evidenciaram tendência de aumento ou diminuição dos valores de resistência de tração e redução de área antes e após o reparo.

Tendo como preocupação o desenvolvimento do tema abordado neste trabalho, algumas propostas para trabalhos futuros são sugeridas:

Avaliar, através de análise microestrutural, ensaios de impacto e dureza, a possibilidade de redução da quantidade do gás CO₂ nas operações de reparo;

Avaliar as consequências do aumento do tempo de exposição do TTPS nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta na operação de reparo;

Fazer um estudo da microestrutura da junta reparada após longos períodos de utilização, bem como ensaios de fluência e de tração a quente;

Avaliar as tensões residuais logo após o processo de reparo e após longos períodos de utilização;

Avaliar e comparar a resistência à corrosão entre a junta sem reparo e com duplo reparo.