

10 Discussão dos resultados

10.1 Teste Tekken

Para um determinado material, os resultados dos Testes Tekken são influenciados pelo aporte de calor, preaquecimento, pós-aquecimento, espessura da chapa, tipo de eletrodo, quantidade de hidrogênio e restrição.

Os resultados do P_{cm} e CE_q (tabela 18) mostraram que o metal de base X80 é menos temperável que os dois metais de solda utilizados.

Segundo Price ⁽⁷⁾ ensaios para eletrodos de baixo hidrogênio utilizando Teste Tekken, mostraram que o valor de P_{cm} deve ser menor que 0,2 para que não seja necessário o preaquecimento. Entretanto, para valores de P_{cm} maiores que 0,17 para eletrodos celulósicos, é necessário preaquecimento de 100-125°C. ⁽⁷⁾

O valor do P_{cm} do aço X80 utilizado é igual a 0,1809 e seguindo a recomendação de Price, não seria necessário um preaquecimento no caso do consumível E101T1-GM-H8. Por outro lado, no caso do eletrodo E8010-G seria necessário o preaquecimento de 100-125°C.

No entanto, na execução dos testes de soldabilidade deste trabalho, buscou-se repetir as mesmas condições utilizadas durante as soldagens circunferenciais, utilizando nos dois tipos de soldagem o preaquecimento de 100°C, optando-se assim, por um ensaio mais conservativo. O tamanho das trincas encontradas para o eletrodo E8010-G foram de 14,58 μm o que está de acordo com os resultados de Price ⁽⁷⁾. A maior trinca encontrada para o teste Tekken foi de 186,44 μm de comprimento no MS (junta soldada T2-3), no entanto trincas desta magnitude não são prejudiciais ao material.

Hudson ⁽¹⁵⁾ também encontrou resultados semelhantes, utilizando o Teste Tekken para metal de base X100 e preaquecimento de 100°C não encontrando trincas visíveis a olho nú. ⁽¹⁵⁾

Um fato importante é que o aço X80 utilizado apresenta vanádio na sua composição. Este elemento tem um efeito importante na diminuição do endurecimento dos aços, o que leva a uma redução no risco de formação de trincas. O vanádio permite a redução do tamanho das colônias de bainita e ferrita com alinhamento de segunda fase, diminuindo o tamanho efetivo da trinca por clivagem e melhorando a temperatura de transição dúctil-frágil. De acordo com Hart ⁽³⁴⁾ este efeito do vanádio pode ocorrer no desenvolvimento microestrutural tanto da ZTA quanto do MS. Isto talvez possa justificar porque as trincas encontradas apresentavam sempre comprimento pequeno e pareciam não se propagar, parando de crescer.

As medidas da quantidade de hidrogênio difusível mostraram que o nível de hidrogênio para o eletrodo E8010-G foi oito vezes maior do que o do consumível E101T1-GM-H8. Isso justifica a maior quantidade de trincas encontradas tanto no MS quanto na ZTA quando o eletrodo E8010-G foi utilizado, conforme figuras 60 (a) e (b).

Em termos de número de trincas para ambos os eletrodos utilizados a ZTA apresentou três vezes mais trincas que o MS, muito embora a ZTA fosse menos temperável que o MS.

As trincas encontradas na ZTA e no MS, estavam localizadas principalmente em regiões de maior concentração de tensões, originadas no entalhe, próximas dele, ou na linha de fusão. Isso ocorre, pois a soldagem induz altas tensões residuais próximas a solda. A tensão residual é gerada pela restrição da contração da zona deformada plasticamente da solda durante o resfriamento. Além disso, o entalhe com formato em Y no local da soldagem induz ainda mais concentrações de tensões locais. Assim, as trincas induzidas por hidrogênio são geralmente iniciadas no entalhe soldado.

Em muitos casos, as trincas também se originaram a partir de inclusões ou descontinuidades. Atualmente, o modelo mais aceito sobre as trincas induzidas por hidrogênio envolve a presença de defeitos pré-existentes no material, tais como pequenas trincas ou descontinuidades causadas por partículas de segunda fase ou inclusões. Com a presença de tensões, estes defeitos podem desenvolver áreas de altas tensões trativas biaxiais e triaxiais. Assim, o hidrogênio difunde

preferencialmente para estes locais de rede cristalina dilatada. Conforme a concentração local de hidrogênio aumenta, as tensões na rede diminuem gerando fratura. ⁽³⁵⁾

As trincas intergranulares induzidas por hidrogênio são freqüentemente encontradas na literatura, entretanto neste trabalho não foram observadas, sem exceções as trincas eram todas transgranulares, cortando os grãos do material, podendo ser uma indicação de que se tratavam de trincas induzidas por hidrogênio. Isto está em acordo com Lee ⁽³⁶⁾, que observou em um estudo de trincas induzidas por hidrogênio em um aço ferrítico que o caminho preferencial ocorria de forma transgranular.

Fals e Trevisan ⁽³⁸⁾ utilizaram o aço X-80 de fabricação nacional e o processo de soldagem FCAW-G com aporte de calor constante de 0,659 KJ/mm e encontraram trincas localizadas sempre em regiões de alta concentração de tensões do MS, aproximadamente na linha de fusão, o que está de acordo com os resultados aqui encontrados. Por outro lado, as trincas se propagavam de maneira transgranular quasi-clivagem e intergranular. ⁽³⁸⁾

Rowe, Nelson e Lippold ⁽³⁹⁾ também observaram trincas que se propagavam de maneira intergranular e transgranular no metal de solda, em testes envolvendo trincas induzidas por hidrogênio ao longo da linha de fusão de metais de solda diferentes. O processo de soldagem utilizado neste estudo para a soldagem do metal de base A36 foi o GTAW. ⁽³⁹⁾

Após o ataque com Nital 2%, foi possível verificar que existiam trincas na região de grãos grosseiros, na região de transição entre o MS e a ZTA, na região de grãos finos e até na subcrítica da ZTA. A existência dessas trincas está associada as transformações na ZTA e conseqüentemente são função da taxa de resfriamento.

Observa-se pela análise das soldagens de forma individual que pode-se verificar que a chapa T3 apresentou a menor quantidade de trincas tanto na ZTA quanto no MS. Neste caso dois fatores podem ter contribuído: o consumível utilizado, que apresentava menor quantidade de hidrogênio difusível, e a velocidade de soldagem, que foi a menor de todas, conseqüentemente o tempo de soldagem foi o maior de todos. O tempo de soldagem maior diminui a taxa de

resfriamento e por isso evita a formação de trincas induzidas por hidrogênio, já que o hidrogênio tem mais tempo de escapar para fora da solda.

Da mesma forma, a chapa T2 foi a que apresentou mais trincas no MS e aquela que teve a maior velocidade de soldagem, facilitando a formação de trincas. Entretanto, a amostra com um total de trincas maior na ZTA foi a T1, que também foi aquela que teve menor aporte de calor, o que aumenta a taxa de resfriamento.

Quanto à microdureza Vickers, segundo Lancaster ⁽¹⁴⁾, uma junta soldada de aço ARBL não é suscetível ao trincamento se a dureza da ZTA for no máximo 350 HV. Como o valor máximo de dureza encontrado na ZTA das amostras do Teste Tekken foi de 321 HV para a T3-4, então nenhuma amostra seria suscetível ao trincamento. Além disso, nenhuma outra região das amostras consideradas apresentou valor superior a 320 HV.

10.2 Teste de Implante

Assim como no Teste Tekken, no Teste de Implante as trincas encontradas também tinham tamanho da ordem de microns, sendo que a maior trinca apresentava 79,48 μm de comprimento e estava na amostra I2-4A. Este resultado é consistente com o de Hillenbrand et al ^(2, 4), que afirmam que testes de Implante em MS depositados com eletrodos celulósicos mostraram que um preaquecimento de 100°C é necessário para a soldagem de aços X80 sem que ocorra trincamento induzido por hidrogênio na ZTA. ^(2, 4)

Neste teste as trincas também estavam quase sempre localizadas em regiões de maior concentração de tensões ou foram originadas a partir de descontinuidades. Além disso, todas eram transgranulares.

Somente um implante fraturou, pois foi o único que não teve pré-aquecimento, além de ter sido aplicada uma carga muito maior do que aquela aplicada nos outros implantes (foi usado σ_y para o cálculo ao invés de $\frac{3}{4} \sigma_y$, como nos outros), e mesmo assim apresentou fratura dúctil. Kitagawa et al ⁽³⁷⁾ mostrou em seu estudo utilizando o Teste de Implante, que a fratura dúctil foi dominante

com pequenas áreas de fratura transgranular quasi-clivagem (sem fratura intergranular).⁽³⁷⁾

Já Nakatani, Higashi e Yamada⁽⁴⁰⁾, assim como a maioria dos estudos, mostraram que as fraturas por hidrogênio se iniciam como quase-clivagem e se propagam como trincas intergranulares.⁽⁴⁰⁾

Brown⁽⁴¹⁾ mostrou que em aços ARBL existiam regiões de microsegregação ricas em elementos de liga, o que aumentava a dureza dessas regiões. Assim, as trincas seguiam essas regiões.⁽⁴¹⁾ Este pode ser o motivo das trincas encontradas neste trabalho serem sempre transgranulares, parecendo não serem influenciadas por uma microestrutura específica.

O Teste de Implante, assim como o Teste Tekken, é influenciado pelo aporte de calor, preaquecimento, pós-aquecimento, espessura da chapa, tipo de eletrodo, quantidade de hidrogênio, restrição e, além disso, pelo tempo até a aplicação da carga.

Neste teste, a amostra que apresentou maior quantidade de trincas foi a IT-2B, que foi soldada pelo processo FCAW-G. Apesar do consumível utilizado neste processo ser o que contém menor quantidade de hidrogênio, esta amostra, pertencente à chapa IT de teste, que teve alguns parâmetros de soldagem bastante críticos para a formação de trincas induzidas por hidrogênio. A temperatura de preaquecimento foi a menor de todas (90,7°C) e a aplicação da carga foi imediatamente após a soldagem.

Por outro lado a amostra que apresentou mais trincas depois da IT-2B foi a I2-3A, o que pode ser justificado por esta amostra apresentar o menor aporte de calor e o maior Δt_{8-5} , além de ter sido soldada com o consumível que depositava maior quantidade de hidrogênio difusível. Segundo Piza⁽²²⁾, o valor de Δt_{8-5} é responsável pela temperatura de início de transformação da austenita, e quanto maior for o tempo de resfriamento neste intervalo de temperatura, menor será a temperatura de início da transformação e maior será a suscetibilidade à formação de trincas a frio.⁽²²⁾

O inverso ocorreu para a amostra I2-2B, que apresentou o maior aporte de calor e o menor Δt_{8-5} de todos, apesar de também ter sido soldada pelo processo SMAW, tendo, assim, a menor quantidade de trincas de todas as amostras.

Por fim, neste teste, analisando o gráfico de quantidade de trincas versus tipo de consumível (gráfico 76), um resultado não esperado ocorreu. O maior número de trincas deveria ter sido encontrado quando o consumível E8010-G foi utilizado, conforme ocorreu no Teste Tekken. Entretanto o maior número de trincas foi encontrado quando o consumível E101T1-GM-H8 foi utilizado. Isso pode ter sido influenciado pelos demais parâmetros de soldagem, provando que a quantidade de hidrogênio não é o único fator determinante para a formação de trincas induzidas por hidrogênio em um aço.

Da mesma forma que no Teste Tekken, no Teste de Implante o valor máximo de dureza encontrado na ZTA das amostras foi de 254 HV para a I2-3. Neste caso também nenhuma amostra seria suscetível ao trincamento. Além disso, nenhuma outra região das amostras consideradas apresentou valor superior a 270 HV.