

5 – Discussão

5.1. Desempenho da soldagem

Na etapa experimental foram realizados testes para treinamento dos soldadores antes de executar a junta soldada com a finalidade de se adequar melhor ao material de base que estava sendo empregado. No entanto, alguns problemas como falta de fusão entre passes, porosidade e mordeduras foram encontrados, devido principalmente à falta de prática na execução da soldagem com arames tubulares autoprotetidos.

Na figura 27 vemos macrografias que mostram alguns defeitos macroscópicos. Na amostra **M1**, pertencente ao quadrante superior direito pode-se observar a presença de uma falta de fusão entre os passes de enchimento e outra na raiz. Na amostra **M2**, se observa também a presença de inclusão de escória e poros na região dos passes de enchimento.

Estes defeitos podem ser prejudiciais para o duto em operação. No entanto, eles não advêm de propriedades intrínsecas ao material, são defeitos que poderiam ter sido removidos durante o processo de soldagem, caso fossem observados. Isto é válido principalmente para as inclusões de escória, sendo que após cada passe de solda, a superfície do cordão é esmerilhada, para retirada da escória formada, porém, esta retirada não foi completa.

5.2. Efeito da posição de soldagem

O gráfico da figura 49 mostra a relação que tem as distintas posições de soldagem com a quantidade de defeitos revelados após os ensaios radiográficos.

Nota-se que mais de 91% dos defeitos estão posicionados nas regiões onde se soldou fora de posição (3G e 4G), mostrando a dificuldade dos soldadores nestas duas posições, sendo que o deslocamento da tocha é na direção vertical descendente e o metal de solda tende a cair conforme está sendo executada a soldagem. É recomendável neste caso um bom treinamento prévio para que os

operários conheçam melhor a fluidez do metal de solda e possam executar juntas com melhor qualidade

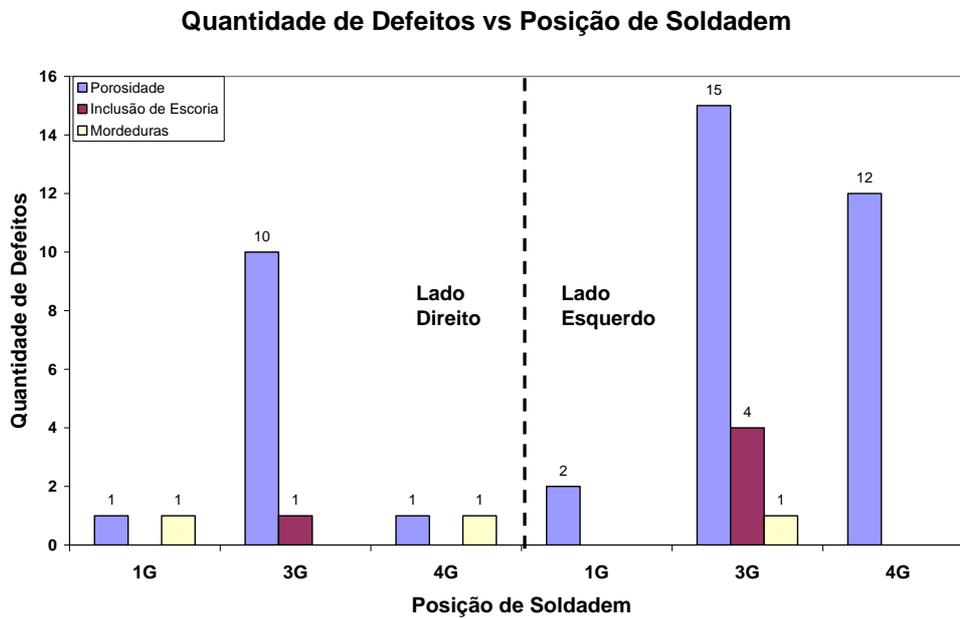


Figura 49 – Quantidade de defeitos na junta soldada.

5.3. Avaliação dos parâmetros de soldagem na ocorrência de defeitos

Da figura 29 nota-se também que nas duas posições inferiores do tubo (ID e IE) apresentaram em média valores mais baixos de corrente que nos quadrantes superiores; isso é devido ao fato que por estarem soldando fora de posição os soldadores empregam velocidades de alimentação de arame menores que na posição plana, além de trabalhar com uma extensão do eletrodo maior na posição 4G para obter maior penetração e manuseabilidade.

Como se observa no gráfico da figura 30 os valores de Aporte de Calor e de tempos de resfriamento entre 800° C e 500° C referentes aos 4 quadrantes da junta são proporcionais. O setor correspondente ao terceiro quadrante ou IE apresenta os valores de mais baixos de aporte de calor e, também os valores de resfriamento entre 800 e 500 °C mais baixos. Isto é consequência direta dos altos valores de voltagem e baixos valores de intensidade de corrente empregados no processo FCAW-S, coincidentemente esse setor foi o que apresentou maior quantidade de defeitos.

Os tempos de resfriamento foram obtidos dos resultados impostos pelo aporte de calor na soldagem da junta. Durante o processo de soldagem, os valores de temperatura de interpasse variaram na faixa dos 110°C – 120°C nos passes de enchimento e acabamento.

5.4. Composição Química

Segundo os resultados mostrados na tabela 11 o metal de solda analisado na região do passe de raiz e na região dos passes de acabamento cumprem com os limites permitidos para o parâmetro Pcm, sendo que o valor máximo aceito pela norma API 5L ^[59], no caso de chapa é de 0,25.

Pode-se também observar que o conteúdo de Mn no metal de solda referente aos passes de enchimento e acabamento executados com o arame tubular apresenta um valor de 2,4 % em peso, o que poderia ser um indicativo para a formação de algumas estruturas frágeis como a martensita principalmente.

5.5. Resistência mecânica

Os resultados dos ensaios de tração revelam que o material ensaiado apresenta resistência mecânica na junta soldada acima dos valores mínimos exigidos pela norma API 1104 como mostrado no gráfico da figura 50.

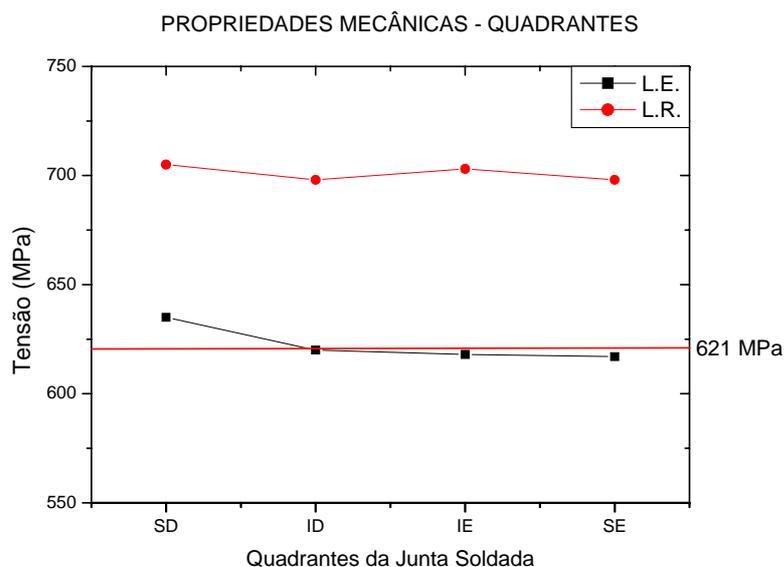


Figura 50 – Valores de L.E. e L.R. da junta soldada.

Todos os corpos-de-prova apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, a ruptura ocorreu sempre no metal de base, conseqüentemente a resistência à tração da junta soldada foi superior ao do metal de base, atendendo aos requisitos de qualidade da norma API 1104. Pode-se dizer portanto, que a junta soldada atende a resistência requerida para o aço X80.

5.6. Ensaio de dobramento

Nos resultados dos ensaios de dobramento observa-se que os dois corpos de prova: IE1 e SE2 apresentaram fissuras maiores a 1/8”, provocadas principalmente pela falta de fusão entre passes e falta de fusão na raiz, o que impossibilita a qualificação do procedimento de soldagem conforme a norma API 1104.

Essas discontinuidades foram provocadas no processo de soldagem pela má execução dos passes de soldagem efetuados pelos soldadores. Embora o procedimento não tenha sido aceito como aprovado, o material do metal de solda apresentou boa utilidade, pois conseguiu fazer o dobramento exigido pela norma sem ocorrer fratura da junta soldada.

5.7. Ensaio nick-break

As análises das superfícies de fratura realizadas nos corpos-de-prova que foram fraturados após os ensaios de “nick-break” revelaram superfícies de fratura com alguns defeitos provocados no processo de soldagem, como poros, inclusões de escória, e falta de penetração na raiz. Embora se tenha este tipo de imperfeições a superfície de fratura encontrada é do tipo dúctil, pela presença de “dimples”, comprovando que a ruptura no metal de solda se dá por rasgamento dúctil.

Na figura 34 observa-se que a amostra retirada do quadrante **SD**, correspondente ao primeiro quadrante tem se o defeito olho de peixe ou “fisheye” que é uma forma de fragilização por hidrogênio, como o apontado por Still ^[60], onde o hidrogênio fica retido junto com um outro defeito, neste caso um poro. Na amostra do quadrante **ID** têm se a presença de poros maiores que 1 mm sendo este caso um fator limitante na tentativa de qualificação do procedimento.

5.8. Análise do perfil de dureza

Os gráficos da figura 36 mostram o perfil de dureza dos quatro cp's (M1, M2, M3 e M4) empregados para realizar este ensaio. Podemos ver que ocorrem variações significativas entre a dureza do metal de base e o metal de solda; sendo o passe de raiz a região da junta soldada com menor dureza, razão pela qual o passe de raiz consegue absorver esforços e tensões residuais inerentes a este procedimento de soldagem. Também podemos ver que a região dos passes de acabamento do metal de solda apresenta a maior dureza da junta soldada, isso devido à formação de microestruturas mais frágeis que as encontradas em outras regiões como será mostrado nas análises microestruturais.

5.9. Tenacidade e caracterização microestrutural

Segundo os requisitos da norma API 5L^[59] para a fabricação do aço X80 a energia absorvida a 0° C no metal de base, deve ser maior ou igual a 80 J. Tomando como referencia a norma DNV OS-F101^[61] a energia media absorvida a 0° C para o aço X80 deve ser maior ou igual a 56 J, com a restrição que nenhum dos corpos-de-prova devem ter um valor de medida inferior a 45 J. Neste trabalho estamos avaliando o comportamento da junta soldada, conforme os valores menores de energia Charpy-V das regiões do metal de solda (amostras R02 com 48 J e T02 com 54 J) mostrados na figura 39, a solda feita com este procedimento cumpre com os requisitos da norma DNV para metais de base.

Comparando-se os resultados obtidos nos gráficos da figura 38, observa-se que a tenacidade do metal de solda na região da raiz, enchimento e acabamento é menor do que o metal de base.

De acordo também com estes resultados, é nítido que as regiões da ZTA comparativamente ao metal de base possuem maior tenacidade. Isto pode ser explicado em função das transformações microestruturais impostas pelo ciclo térmico de soldagem. Na região do metal de solda tem se uma presença maior de AM alongado formado devido a tempos de resfriamento mais rápidos que em outras regiões da junta soldada, sendo este tipo o mais prejudicial para a tenacidade. Cabe observar também que o tamanho médio dos constituintes AM e

o espaçamento entre eles no metal de solda foi menor que na ZTA, mesmo com o aumento da fração volumétrica de AM no metal de solda.

Um outro fator que pode ter contribuído para o aumento da tenacidade na ZTA foi a ausência de interconexão entre os AM, como também foi comprovado por Seabra ^[62]. Todos estes fatores, morfologia, tamanho e distribuição de partícula, podem ter contribuído para o aumento dos valores de energia absorvida da ZTA em relação às outras regiões. Estes resultados coincidem com o mostrado por Batista et al ^[63] em aços X80 fabricados com composição química diferenciada, eles comprovaram que a dispersão da fase AM mostrou-se de fundamental importância para o elevado nível de resistência mecânica, sem prejudicar significativamente a tenacidade do material, desde que esteja presente ao redor de 3 vol %.

Estes resultados indicam que o fator controlador da tenacidade nas amostras estudadas tem uma relação com a microestrutura presente, mas também pode estar associado à distribuição das regiões colunar e recristalizadas a frente do entalhe Charpy. Da tabela 16 e do gráfico da figura 43 podemos observar comparativamente que as amostras que apresentaram a maior percentagem de região colunar são aquelas com energia mais alta, por tanto maior tenacidade.

Observando as figuras 39 a 42, das superfícies de fratura dos ensaios charpy, pode-se perceber que o metal de solda apresentou algumas regiões frágeis, embora se tenha a presença também de regiões dúcteis. Observa-se também a presença de algumas delaminações nos corpos de prova correspondentes às regiões do metal de base, essas delaminações são conseqüências do processamento termomecânico o que aumenta a tenacidade a fratura em relação com as regiões do metal de solda, esses resultados são coincidentes com o mostrado por Hippert ^[64], sendo que as delaminações podem aumentar a resistência do material à propagação da trinca porque altera o estado de tensões e faz com que a energia necessária para a propagação da trinca seja maior.

O aço em estudo revela uma microestrutura bandeada no sentido longitudinal, composta principalmente por uma matriz ferrítica e com perlita e bainita conforme mostrado nas imagens da figura 46, referentes ao sentido longitudinal de laminação.

Na figura 47 são também mostradas imagens dos passes de enchimento e acabamento do metal de solda. A microestrutura do passe de enchimento é

basicamente composta por ferrita com segunda fase não alinhada (FSN) e ferrita acicular (AF), como já foi mencionado o percentual de cada microconstituente depende da composição química do metal de solda e das taxas de resfriamento empregadas em cada processo de soldagem, assim maiores taxas de resfriamento e maiores percentuais de elementos de liga tais como Mn, Ni, Mo, Si, Ti, favorecem maiores percentuais de ferrita acicular em detrimento da ferrita poligonal. A região do passe de acabamento esta composta por ferrita com segunda fase alinhada (FSA) ferrita acicular (AF) e alguma ocorrência de martensita (M). Estas microestruturas podem ter sido geradas por um alto conteúdo de Mn no metal de solda e maiores taxas de resfriamento impostas durante o ciclo térmico da soldagem.

Na figura 48 observamos as distintas regiões da ZTA (região de grãos grosseiros, região de grãos finos e região subcrítica), pode se apreciar que basicamente está composta por uma matriz ferrítica ao longo das três regiões com uma variação no tamanho de grão.