

JUAN CARLOS GIMENEZ SOLÉ

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SOLDA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DO TUBO COMPOSTO APLICADO EM UM
SUPERAQUECEDOR DE CALDEIRA DE INCINERAÇÃO DE LIXO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Centro Universitário da FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro de Materiais, orientado pelo professor Rodrigo Magnabosco.

São Bernardo do Campo
2011

A Deus, aos meus pais e aos meus grandes amigos que estiveram ao meu lado em todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer a Deus, por ter me ajudado em todas as dificuldades que apareceram ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer também ao professor Rodrigo Magnabosco e a André De Albuquerque Vicente por terem me feito concluir este trabalho da melhor maneira possível.

Aos meus pais e amigos que estiveram comigo em todas as horas, principalmente nos momentos de cansaço.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho: as pessoas da Sandvik (principalmente em São Paulo - a Angelo Martines, Fausto Camargo, André Valente, Rodrigo Signorelli, Pedro Tedeschi, Antonio Tomaselli, Alan Sousa, Paula Motooka e fora de São Paulo – Tommy Sand. Ao pessoal da Sandvik Kanthal - Oswaldo, Dario, José, Gilson e Eduardo Bartkevicius) que compreenderam a minha situação e fizeram mais do que necessário para me ajudar! A Böhler Welding (principalmente: Omar Samra) que sem seu material e suporte este trabalho não seria possível! Ao pessoal do laboratório e do CLM que sempre me ajudaram (principalmente: Gustavo Estrela da Silva, Fabricio Piedade, Antomio Miron, Marcela Paschualleto de Lima Gomes, Adelaide Bispo de Sá).

*“Que os vossos esforços desafiem
as impossibilidades, lembrai-vos de que
as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.”*

Charles Chaplin

RESUMO

As caldeiras são equipamentos que envolvem altas pressões e temperaturas e por consequência um alto risco de acidentes com um grande número de pessoas. Em uma das regiões mais críticas da caldeira encontram-se os superaquecedores, que visam o maior aquecimento do vapor para obtenção de maior rendimento do equipamento por meio da conversão de energia mecânica em elétrica através de uma turbina. Nos superaquecedores são utilizados tubos compostos, que são tubos que possuem em seu interior aço carbono cuja função é promover elevada resistência mecânica ao produto e em seu exterior liga com elevada resistência à corrosão, suportando desta forma os esforços mecânicos exigidos pela pressão aplicada pelo fluido interno e a atmosfera corrosiva proveniente da queima de um determinado combustível. Muitas vezes estes tubos são submetidos a manutenção de uma forma errônea e sem fundamentos, podendo conduzir a graves acidentes. Para evitar tais acidentes este trabalho tem por objetivo o estudo da influência da solda na resistência mecânica do tubo composto de aço de baixa liga HT8 com a liga Sandvik Sanicro 28[®] aplicado em um superaquecedor de uma caldeira de incineração de lixo, com pressão interna de 4,5 MPa e temperatura de trabalho do material de 430°C. Para tal foram realizados ensaios de tração de corpos de prova no respectivo material, microdureza, análise metalográfica e estudo qualitativos das microestruturas presentes após a soldagem.

Palavras-chave: Caldeira de incineração de lixo, superaquecedores, tubos compostos, manutenção, ensaio de tração, microdureza, análise metalográfica.

ABSTRACT

The boilers are devices that involve high pressures and temperatures and by consequence a high risk of accidents with large number of people. One of the most critical regions of the boiler is the superheater, in which the aim is achieving a higher heating of steam for better equipment efficiency during conversion of mechanical energy into electrical through a turbine. In the superheater composite tubes are used, consisted by a inside layer of carbon steel whose function is to promote high mechanical strength for the product and in its exterior a layer of an alloy with high resistance to corrosion. Many times these tubes are subjected to maintenance in an erroneous way and without foundation, leading to serious accidents. To avoid such accidents this work aims the study of the influence of welding on the mechanical strength of the composite tube of low alloy steel HT8 with alloy Sandvik Sanicro 28[®] applied in a superheater of a biomass incineration boiler, with internal pressure of 4.5 MPa and working temperature of the material of 430°C. The study was conducted by tensile tests, microhardness, metallographic analysis and qualitative analysis of the phases microstructure after welding.

Key words: Biomass incineration boiler, superheaters, composite tubes, maintenance, tensile test, microhardness, metallographic analysis

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composição química da liga Sandvik Sanicro 28 [®]	23
TABELA 2 - Valores de limites de resistência mecânica, escoamento e alongamento da liga Sandvik Sanicro 28 [®]	23
TABELA 3 - Composição química do aço carbono de baixa liga HT8	23
TABELA 4 - Valores de limites de escoamento, de resistência mecânica e alongamento do aço carbono HT8.....	24
TABELA 5 - Comparação das composições químicas do material de base, aço HT8, com o material de adição, liga 90S-B3.....	28
TABELA 6 - Comparação de Resistência mecânica do material de base, aço HT8, com o material de adição, liga 90S-B3.....	29
TABELA 7 - Comparação das composições químicas do material de base, liga Sandvik Sanicro 28 [®] (S28), com o material de adição, liga Sandvik Sanicro 60 [®] (S60).....	29
TABELA 8 - Comparação das Resistências mecânicas e alongamento do material de base, liga Sandvik Sanicro 28 [®] (S28), com o material de adição, liga , liga Sandvik Sanicro 60 [®] (S60).....	29
TABELA 9 - Comparação entre composição química da liga Sandvik Sanicro 28 [®] (S28) com a Hastelloy S (H.S).....	35
TABELA 10 - Fases e temperaturas de solidificação, por meio de uma reação eutética, de uma liga com elevado teor de cromo.....	38
TABELA 11 - Passes de solda e suas respectivas correntes.....	42
TABELA 12 - Sequência de ensaios de tração realizados, ou numeração dos corpos de prova, e suas respectivas variáveis.....	47
TABELA 13 - São apresentados valores de dureza Rockwell C e os mesmos valores convertidos para escala Vickers.....	51
TABELA 14 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 1 e 2.....	55
TABELA 15 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 5 e 6.....	56

TABELA 16 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 9 e 10.....	57
TABELA 17 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 13 e 14	59
TABELA 18 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 3 e 4.....	61
TABELA 19 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 7 e 8.....	62
TABELA 20 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 11 e 12.....	63
TABELA 21 - São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 15 e 16.....	64
TABELA 22 - São apresentadas as respectivas médias de valores de limite de escoamento, de resistência mecânica e alongamento para as respectivas condições de ensaio.....	65

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Diagrama pressão por temperatura da água, indicando o ponto crítico aos 374° C a 218 atm.....	18
FIGURA 2 - Capacidade térmica da água sobre R (constante dos gases = 8,314J/ mol*K) em função da temperatura em Kelvin.....	19
FIGURA 3 - Microestrutura da região de interface de um tubo composto pela liga Sandvik Sanicro 28® (parte superior) com aço carbono de baixa liga HT7.....	20
FIGURA 4 - Ilustra o processo de extrusão de um tubo composto.....	21
FIGURA 5 - Diagrama que representa a variação da condutividade térmica, das ligas Sandvik Sanicro 28®, HT8 e tubos composto Sandvik Sanicro® 28/HT8, com o aumento de temperatura..	21
FIGURA 6 - Coeficiente de expansão térmica por °C (*10 ⁻⁶) por temperatura em °C das ligas Sanicro® 28, HT8 e tubos composto Sanicro® 28/HT8.....	22
FIGURA 7 - Tubo esquemático ilustrando as variáveis presentes nas equações correlacionadas à tensão de von Mises.....	25
FIGURA 8 - É apresentado um desenho esquemático das tensões atuantes em um tubo aplicado em um super aquecedor e a relação com o sentido de propagação de uma trinca. Sendo ilustrado em vermelho as tensões radiais ($\sigma_{radiais}$), em laranja a trinca (estando na vista frontal em pontilhado pois poderia ocorrer de ambos os sentidos), as setas azuis é a tensão proveniente do vapor e a seta em cor preta refdere-se ao sentido dos fibramentos..	27
FIGURA 9 - Apresenta um desenho esquemático das tensões atuantes em um tubo quando tracionado em ensaio e a relação com o sentido de propagação da trinca. Sendo a tensão trativa ($\sigma_{trativa}$) representada pelas setas azuis e o círculo com ponto preto presente na vista frontal, a seta preta indica o sentido dos fibramentos e a seta laranja ilustra a propagação da trinca.....	27
FIGURA 10 - Apresenta as regiões afetadas pela temperatura. Sendo A – Zona de fusão; B – Zona de ligação; C – Zona termicamente afetada; D – Estrutura original do material.....	30
FIGURA 11 - Apresenta faixas de possíveis alterações microestruturais ao longo do material após soldagem.....	32
FIGURA 12 - Figura esquemática apresentando as possíveis transformações de fase em um aço carbono com uma respectiva curva de resfriamento contínuo.....	33

- FIGURA 13 - Diagrama de curvas TTT para um aço com adição dos elementos cromo, níquel e molibdênio. Sendo apresentado campos de transformação de fase martentica (M_S – Relação de temperatura e inicial para formação de martensita na microestrutura. M_F – Relação de temperatura e tempo final para formação de martensita, indicando o termino da transformação), ferrítica (F_S – Relação de tempo e temperatura para início de formação de estrutura ferrítica, F_F – Relação de tempo e temperatura para fim da transformação ferrítica,) e baítica (B_S - Relação de tempo e temperatura para início de formação de estrutura baínitica, B_F - Relação de tempo e temperatura para fim de formação de estrutura baínitica)..... 33
- FIGURA 14 - Figura esquemática da microestrutura observada nas series Hastelloy.....35
- FIGURA 15 - São apresentadas curvas de precipitação de carbonetos de cromo para diferentes materiais, incluindo a liga Sandvik Sanicro 28® 36
- FIGURA 16 - Microestrutura da fase Lave em região interdendrítica, obtida por MEV.. 38
- FIGURA 17 - Representa a variação da concentração de Mo e Nb em relação à distância (em μm) de um determinado ponto do aço carbono a um ponto da liga de níquel, englobando as regiões do substrato (aço carbono HT8), interface e da liga de níquel como overlay..... 39
- FIGURA 18 - Representa a variação de concentração de Fe, Ni e Cr em relação à distância (em μm) de um determinado ponto do aço carbono a um ponto da liga de níquel, englobando as regiões do substrato (aço carbono HT8), interface e da liga de níquel como overlay..... 39
- FIGURA 19 - Dois tubos antes de serem soldados por processo TIG..... 41
- FIGURA 20 - É apresentado o chanfro de 45° realizado para a solda em TIG nas duas extremidades do tubo composto. 42
- FIGURA 21 - Tubos soldados – detalhe dos cordões de solda..... 43
- FIGURA 22 - Os tubos soldados são comparados com o tamanho de uma caneta..... 43
- FIGURA 23 - Na direita pode ser observada a representação esquemática de como foi realizado o corte na longitudinal nos quatro tubos enquanto que na esquerda podem ser observadas as 8 partes obtidas e mais 50 mm do restante que sobrou de um dos tubos. Tendo 4 com solda na transversal..... 44
- FIGURA 24 - Representação esquemática das 4 partes obtidas por meio da serra de fita de um dos 4 tubos..... 44
- FIGURA 25 - São apresentadas as 16 tiras de Sanicro 28 com aço carbono HT8 obtida pela prensa de 40 toneladas presente na FEI..... 44
- FIGURA 26 - Na figura é apresentado a superfície de um dos materiais sem solda..... 45

- FIGURA 27 - Na figura é apresentado a superfície de um dos materiais com solda. O defeito circulado, à esquerda, é a trinca deixada pela falta de preenchimento da raiz da solda. Este defeito pode ser melhor observado à direita..... 45
- FIGURA 28 - Ilustração do corpo de prova em gravata, traçado de maneira proporcional conforme descrito nas normas ASTM E8/E8M e ABNT NBR 6152..... 46
- FIGURA 29 - É ilustrado o forno Jung em que no qual as 8 peças (4 com solda e 4 sem) estão contidas e sob tratamento térmico de 430°C..... 47
- FIGURA 30 - É apresentado o equipamento de tração MTS e a fixação do corpo-de-prova feita pelas garras do equipamento, no ensaio conduzido à temperatura ambiente. Pelo ensaio ser à temperatura ambiente pode-se observar a presença do extensômetro..... 49
- FIGURA 31 - É apresentado na figura o forno que abraça a parte central do corpo de prova, aquecendo-a à temperatura de 430°C..... 49
- FIGURA 32 - A figura esquemática ilustra como foi feita a distribuição dos pontos de medição de dureza no material. No entanto, as distâncias não estão representadas em escala e conseqüentemente o número de pontos em cada zona não é exatamente o apresentando na figura..... 50
- FIGURA 33 - Ilustração esquemática do local e da maneira que foi realizada a sequencia de análise metalográfica dos corpos de prova de número impar..... 53
- FIGURA 34 - São apresentados 1 corpo de prova fraturado de cada condição de ensaio de tração..... 55
- FIGURA 35 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à tempertura ambiente para os corpos de prova de estrutura original (1 e 2). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivos aos corpos de prova ensaiados..... 56
- FIGURA 36 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à tempertura ambiente para os corpos de prova de estrutura após tratamento térmico a 430°C por 72 horas (5 e 6). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados 57
- FIGURA 37 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à tempertura de 430°C para os corpos de prova de estrutura original (9 e 10). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite

de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados..... 59

FIGURA 38- Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à temperatura de 430°C para os corpos de prova de estrutura após tratamento térmico a 430°C por 72 horas (13 e 14). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados..... 60

FIGURA 39 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à temperatura ambiente para os corpos de prova com solda e sem sofrer tratamento térmico (3 e 4). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados..... 61

FIGURA 40 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à temperatura ambiente para os corpos de prova com solda e após sofrer tratamento térmico a 430°C por 72 horas (7 e 8). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados..... 62

FIGURA 41 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à temperatura de 430°C para os corpos de prova com solda e sem sofrer tratamento térmico (11 e 12). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados 63

FIGURA 42 - Curva de tensão-deformação de ensaio realizado à temperatura ambiente para os corpos de prova com solda e após sofrer tratamento térmico a 430°C por 72 horas (15 e 16). Abaixo do gráfico é apresentado a tabela com os valores de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência mecânica (L. Resist. Mec) e Alongamento e de suas médias, respectivo aos corpos de prova ensaiados..... 64

FIGURA 43 - São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 3, que foi apenas soldada e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga. Sendo o ponto 0 a região de fusão do material, logo depois a ZTA e após os 5,5 mm a região do material de base..... 66

FIGURA 44 - São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 3, que foi apenas soldada e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 67

FIGURA 45 - São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 7, que foi tratada térmicamente a 430°C por 72 horas após a soldagem e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por

- meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 68
- FIGURA 46 - São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 7, que foi tratada térmicamente a 430°C por 72 horas após a soldagem e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 69
- FIGURA 47 - São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 11, soldada e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 69
- FIGURA 48 - São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 11, que foi soldada e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 70
- FIGURA 49 - São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 15, soldada, tratada térmicamente a 430°C por 72 horas e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 71
- FIGURA 50 - São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 15, que foi soldada, tratada térmicamente à temperatura de 430°C por 72 horas e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga..... 72
- FIGURA 51 - A microestrutura da esquerda, com aumento de 100X, é referente ao aço carbono de baixa liga HT8 sem influência térmica, ou seja, dos corpos de prova 1 e 2, cuja estrutura se mostra orientada no sentido da diagonal. Com um retângulo, é representada a região da metalografia à direita que possui um aumento de 200X. Nesta também se vê uma estrutura homogênea orientada no mesmo sentido..... 73
- FIGURA 52 - A microestrutura da esquerda é referente à liga Sandvik Sanicro 28[®], com aumento de 100X, sem influência térmica, ou seja, aos corpos de prova 1 e 2. Nesta estrutura, um retângulo em vermelho indica a região de análise da metalografia à esquerda com aumento de 100X. Tal como pode ser observado em ambas, os grãos desta liga são mais grosseiros que os da estrutura de aço carbono HT8. Apesar da estrutura de aço HT8 apresentar uma direcionalidade, esta não apresenta. Na metalografia à direita, com 200X, pode se evidenciar alguns precipitados já presentes entre os grãos..... 74
- FIGURA 53 - É apresentada a microestrutura do aço de baixa liga HT8, dos corpos de prova 5 e 6, após tratamento térmico a 430°C por 72 horas, com 200X de aumento. Esta microestrutura se mostra semelhante à original do material, apesar dos grão se mostrarem um pouco maiores..... 74

- FIGURA 54 - A metalografia, com 200X de aumento, representa a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] dos corpos de prova 5 e 6, que sofreram tratamento térmico a 430°C por 72 horas e ensaiados à temperatura ambiente. Novamente observa-se que seus grãos são mais grosseiros que a estrutura de aço HT8 submetida às mesmas condições de ensaio. Ao ser comparada com a microestrutura do mesmo material sob a condição de não influência térmica, observa-se um pequeno aumento dos grãos e que não houve a precipitação de novas fases..... 75
- FIGURA 55 - É apresentada a microestrutura do aço de baixa liga HT8 tracionado à temperatura de 430°C, pertencente aos corpos de prova 9 e 10, com 200X de aumento. Ao ser comparada com a estrutura original do material, presente na figura 51, observa-se um pequeno aumento dos grãos. Em relação à tratada térmicamente, são estruturas semelhantes..... 76
- FIGURA 56 - É apresentada a metalografia da microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] das amostras 9 e 10, com 200X de aumento, submetida a ensaio de tração sob a temperatura de 430°C. Conforme pode ser observado, houve uma precipitação intragranular e aumento do grão, quando comparado às metalografias presentes nas figuras 54 e 52..... 76
- FIGURA 57 - É apresentada microestrutura do aço de baixa liga HT8 dos corpos de prova 13 e 14, submetidos ao ensaio de tração à temperatura de 430°C e tratamento térmico a 430°C por 72 horas, com aumento de 200X. Em relação à micrografia dos corpos de prova 9 e 10, o material apresentou um pequeno aumento dos grãos. Quando comparado ao tratado térmicamente e tracionado à temperatura ambiente, a estrutura não sofreu grandes alterações com exceção do crescimento de grão..... 77
- FIGURA 58 - É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®], com aumento de 200X, pertencente aos corpos de prova 13 e 14, que foram submetidos a ensaio à temperatura de 430°C e tratamento térmico a 430°C por 72 horas. Em relação à microestrutura dos corpos de prova 9 e 10, esta embora apresente grãos de tamanho semelhante e também a mesma precipitação intragranular, pode-se observar nesta microestrutura a presença de maclas. 77
- FIGURA 59 - Apresente a microestrutura da zona de fusão com aumento de 100X, sendo que esta metalografia foi retirada na região próxima ao meio material fundido, ou seja, próximo à suposta região onde houve o encontro entre passes de diferentes materiais de adição. A região mais escura remete à zona mais próxima à raiz da solda, estando portanto mais próxima da ZTA. Na microestrutura pode-se observar os indícios que o material não possui uma estrutura trabalhada, mas sim de bruta de fusão..... 78
- FIGURA 60 - É apresentada a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) dos corpos de prova 3 e 4, soldados e ensaiados à temperatura ambiente. Na figura à esquerda, é apresentada a ZTA com 100X de aumento. Por meio de um retângulo vermelho é delimitada a região que foi submetida a um aumento de 200X, cuja imagem é apresentada à direita..... 79

- FIGURA 61 - É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] na região da interface, no entanto sendo homogênea ao longo de toda a sua estrutura. À esquerda tem-se a microestrutura com 100X de aumento e, nesta imagem, delimitada por um retângulo vermelho, a metalografia da direita com 200X de aumento. Na microestrutura não observa-se a precipitação de fases..... 80
- FIGURA 62 - É apresentada a microestrutura da (ZTA) do aço carbono de baixa liga referente aos corpos de prova soldados, 7 e 8, que foram tratados térmicamente a 430°C por 72 horas, com 200X de aumento. Ao ser comparada às microestruturas dos corpos de prova sem solda que foram tracionados à temperatura de 430°C ou que sofreram tratamento térmico, esta se mostra semelhante.....80
- FIGURA 63 - É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] dos corpos de prova 7 e 8, que foram soldados e tratados térmicamente à temperatura de 430°C. Em relação às microestruturas dos corpos de prova não soldados e tratados térmicamente, há semelhança entre o tamanho dos grãos e a não precipitação de segundas fases..... 81
- FIGURA 64 - É apresentada a microestrutura de aço de baixa liga HT8, na região da zona termicamente afetada (ZTA), pertencente aos corpos de prova 11 e 12, que foram soldados e ensaiados à temperatura de 430°C, com aumento de 200X. Ao comparar esta microestrutura com a referente aos corpos de prova 9 e 10, também ensaiados na temperatura de 430°C, observa-se que são semelhantes..... 82
- FIGURA 65 - Microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] presente nos corpos de prova 11 e 12, que foram soldados e ensaiados à temperatura de 430°C, com aumento de 200X. Ao se comparar esta microestrutura com a presente nos corpos de prova 9 e 10, que não foram soldados e foram ensaiados em alta temperatura, observa-se, nesta imagem, grãos relativamente menores e sem a mesma precipitação que pode ser observada na figura, embora haja a rara ocorrência de presença de segunda fase em meio aos grãos..... 84
- FIGURA 66 - É apresentada a microestrutura do aço carbono de baixa liga HT8, na zona termicamente afetada (ZTA) dos corpos de prova 15 e 16, que foram soldados, tratados térmicamente à temperatura de 430°C por 72 horas e ensaiados na temperatura de 430°C, com aumento de 200X. Ao se comparar esta microestrutura com a presente nos corpo de prova 13 e 14, que não foram soldados mas ensaiados nas mesmas condições, nota-se estruturas semelhantes..... 83
- FIGURA 67 - É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] referente aos corpos de prova 15 e 16, que foram soldados, tratatados térmicamente e ensaiados à temperatura de 430°C, com aumento de 200X. Ao se comparar esta microestrutura com a dos CPs 13 e 14, que não foram soldados mas ensaiados nas mesmas condições, nota-se que esta possui grãos maiores e que não houve precipitação de nenhuma fase..... 84

SUMÁRIO

1	OBJETIVO.....	17
2	INTRODUÇÃO.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Tubo Composto.....	22
3.2	Liga de níquel Sandvik Sanicro 28 [®]	22
3.3	Aço carbono de baixa liga HT8.....	23
3.4	Relação da tensão de von Mises com o limite de escoamento do material.....	24
3.5	Trincas na transversal e na longitudinal.....	26
3.6	Soldagem.....	28
3.6.1	zona de fusão.....	30
3.6.2	Zona de ligação ou de transição sólido-líquido.....	31
3.6.3	Zona termicamente afetada (ZTA).....	31
3.7	Transformações de fase no aço carbono HT8.....	32
3.8	Super ligas de Níquel.....	34
3.8.1	Carbonetos.....	36
3.8.2	Fase intermetálica.....	36
3.8.3	Fases TCP (Topogically Close Packed).....	37
4	METODOLOGIA.....	40
4.1	Materiais.....	40
4.2	Equipamentos.....	40
4.3	Procedimentos.....	41
4.3.1	Obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração.....	41
4.3.2	Tratamento térmico sobre 8 dos 16 corpos de prova.....	46
4.3.3	Ensaio de tração.....	57
4.3.4	Ensaio de dureza.....	50
4.3.5	Parâmetros para simulação de resfriamento pós soldagem.....	51
4.3.6	Análise metalográfica.....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	Curvas de tensão de tensão-deformação dos corpos de prova sem solda.....	54
5.2	Curvas de tensão de tensão-deformação dos corpos de prova com solda.....	60
5.3	Determinação da causa de ruptura do material fora da região da solda.....	66
5.4	Simulação de resfriamento após soldagem.....	72
5.5	Análise metalográfica.....	73
5.5.1	Comportamento da estrutura sem a influência da solda.....	73
5.5.2	Comportamento da estrutura com a influência da solda.....	78
5.6	Relação da resistência mecânica do material obtida em prática com a tensão de von Mises.....	84
6	CONCLUSÃO.....	86
	ANEXO.....	87
	REFERÊNCIAS.....	88

1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo determinar se o tubo composto de materiais Sandvik Sanicro 28[®] e aço HT8, após manutenção por soldagem de uma trinca, pode continuar a ser aplicado em condições de pressão e temperatura similares às presentes em um superaquecedor de caldeira de incineração de lixo. Uma análise da influência da solda sobre o comportamento mecânico deste material em tais condições também será realizado. Este estudo foi feito por meio de ensaio de tração do material reparado, comparando estes resultados com os níveis de tensão equivalentes aos presentes no superaquecedor quando este opera sob uma temperatura de 430°C e pressão interna do vapor de 4,5 MPa. Os resultados dos ensaios de tração do material reparado, conduzidos a temperatura ambiente e a 430°C, serão comparados aos ensaios de tração nestas mesmas condições do material original, avaliando-se a influência do reparo no comportamento mecânico dos tubos compostos.

2 INTRODUÇÃO

O mecanismo básico de uma caldeira se baseia apenas no conceito de transferência de energia térmica. Esta troca de energia é obtida através da queima de um combustível sólido, líquido ou gasoso, aquecimento elétrico ou por sistemas não convencionais tal como fissão nuclear ou energia solar, que aquece um líquido (geralmente a água) sob pressão e o transforma em estado gasoso (ALTAFINI, 2002).

Este vapor, sob elevada pressão, passa por uma turbina que converte energia mecânica para elétrica. Portanto, maiores pressões e temperaturas são sempre requisitadas para obtenção de maior rendimento da caldeira.

Com o intuito de otimizar a troca térmica, nas paredes deste equipamento é interessante que o fluido se mantenha em seu estado líquido por um determinado trecho e, em regiões superiores, se transforme em vapor. Alterando a sua temperatura, uma vez que a pressão é constante, conforme ilustrado pela figura 1, apresentada de forma esquemática.

Em caldeiras de incineração de lixo esta pressão está em torno dos 4,5 MPa e temperatura a 430°C, com base na figura 1, com estes parâmetros estaria na região “vapor de água” se o gráfico fosse extrapolado para maiores valores no eixo das abcissas.(LAI, 2007).

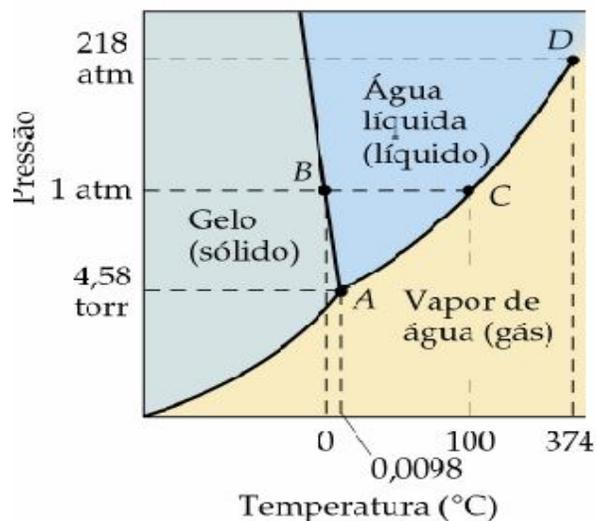


Figura 1: Diagrama pressão por temperatura da água, indicando o ponto crítico aos 374° C a 218 atm.
Fonte: Química, 2010

Nas paredes a água se mantém em seu estado líquido pois, conforme apresentado na figura 2, a capacidade térmica da água neste estado é maior que em seu estado gasoso.

Portanto, permanecendo em seu estado líquido nestes trechos leva a um maior rendimento da caldeira (LAI, 2007).

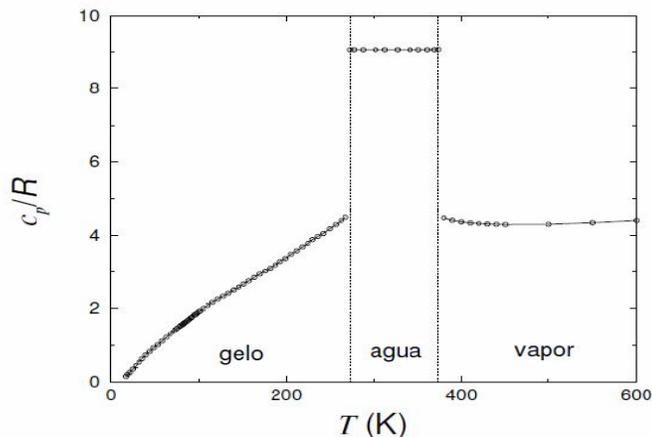


Figura 2: Capacidade térmica da água sobre R (constante dos gases = 8,314J/ mol*K) em função da temperatura em Kelvin.

Fonte: Química, 2010.

Na região central-superior deste equipamento é instalado um sistema de tubos curvados de geometria relacionada à pressão interna, chamado superaquecedor, que visa o maior aquecimento do vapor em seu interior (TILLEY, 2003).

Nesta aplicação, o material é submetido a uma atmosfera muito corrosiva devido à exposição aos gases quentes provenientes da queima do combustível utilizado que podem possuir, no caso do lixo, elementos corrosivos como sulfetos e cloretos. Portanto, os materiais que compõe os tubos utilizados no superaquecedor necessitam de uma elevada resistência à corrosão e mecânica, devido aos esforços mecânicos provenientes da pressão do fluido interno que se encontra na forma de vapor, uma vez que a temperatura do equipamento, quando aplicado em uma caldeira de incineração de lixo, se encontra a 430°C. Para atender a estas exigências, produziu-se o chamado tubo composto. Sua parte interna é de aço de baixa liga, com a função de possuir a resistência mecânica do todo e sua parte externa é de uma liga especial, para a resistência à corrosão do tubo (LAI, 2007; SANDVIK, 1999).

Devido a condições tão hostis aos materiais, podem surgir trincas nestes tubos que são reparadas por solda. No entanto, a manutenção influencia a estrutura dos materiais de muitas formas, tal como transformação ou precipitação de fases. Com o objetivo de reduzir riscos de acidentes deve estar claro a que esforços mecânicos o aço está submetido na aplicação e quais foram as influências da solda sobre esta mesma estrutura, o que justifica os objetivos deste estudo (DUPONT, 1996; LAI, s.n,2004).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tubo Composto

De acordo com os catálogos da Sandvik (2007, 1999), os tubos compostos consistem em uma camada externa de aço inoxidável altamente ligado ou por ligas à base de níquel, metalurgicamente ligada com uma camada interna de aço carbono.

A interface destas duas classes de materiais, ilustrada pela figura 3, possui continuidade ao longo de sua estrutura e elevada resistência mecânica, características que podem ser obtidas pelo processo de fabricação dos tubos compostos utilizado pela Sandvik, ilustrado na figura 4. Este processo consiste na extrusão simultânea dos lingotes dos respectivos materiais a serem utilizados no produto final, com a presença de um mandril no interior do lingote de menor diâmetro.

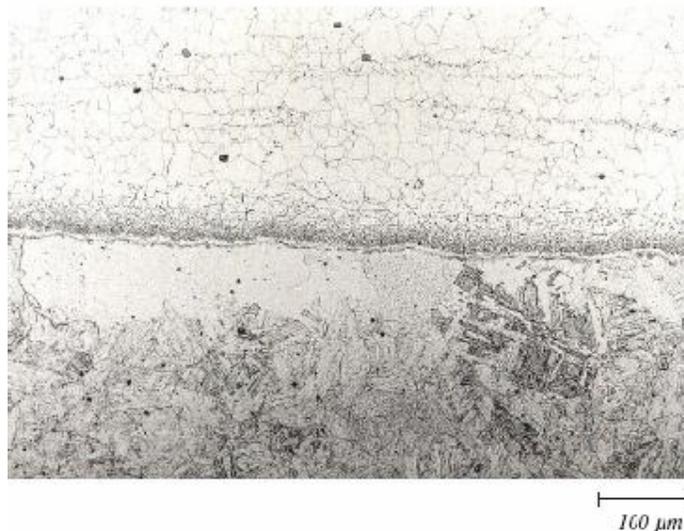


Figura 3: Microestrutura da região de interface de um tubo composto pela liga Sandvik Sanicro 28[®] (parte superior) com aço carbono de baixa liga HT7

Fonte: Sandvik, 1999, 4 p.

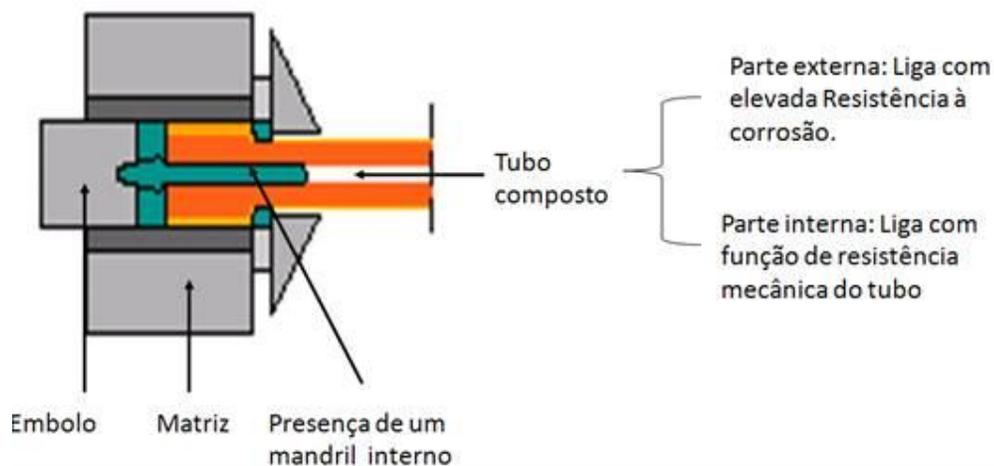


Figura 4: Ilustra o processo de extrusão de um tubo composto

Fonte: Autor, adaptado de Sandvik, 1999.

Em relação à condutividade térmica, o tubo composto possui um valor intermediário ao ser comparado isoladamente com tanto com o aço carbono como a liga de níquel, tal como apresentado pelo diagrama presente na figura 5. Com base nestes dados, nota-se que o aço carbono está de acordo com sua aplicação, já que conduz grande parte da energia térmica para o vapor de água, diminuindo a temperatura do tubo e consequentemente a influência da temperatura sobre sua estrutura.

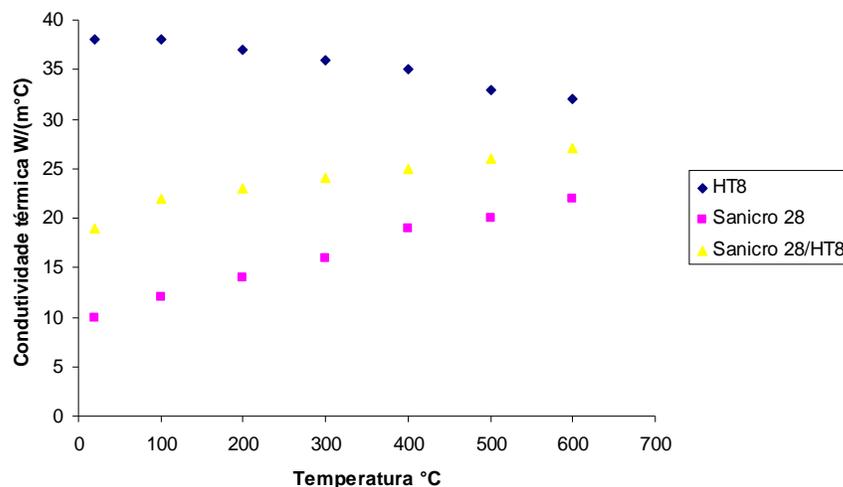


Figura 5: Variação da condutividade térmica das ligas Sandvik Sanicro[®] 28, HT8 e tubos composto Sandvik Sanicro[®] 28/HT8, com o aumento de temperatura.

Fonte: Autor, adaptado de Sandvik, 1999, p 2.

Em relação ao coeficiente de expansão térmica, o tubo composto mantém novamente um comportamento intermediário quando comparado aos dois outros materiais de forma isolada, tal como é apresentado pela figura 6. Pode-se observar, com base no diagrama, que o coeficiente de expansão térmica da estrutura de aço carbono é relativamente alto, embora a liga de níquel seja ainda maior.

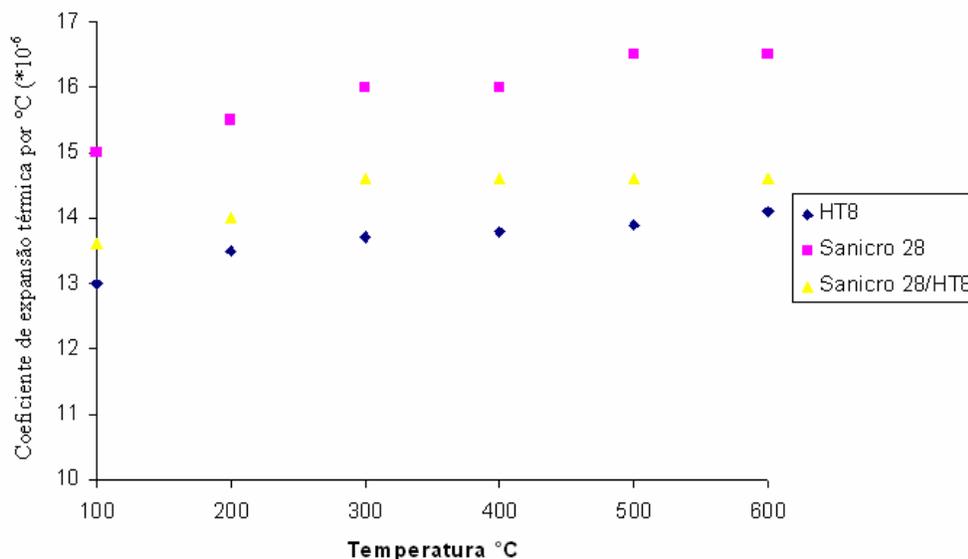


Figura 6: Coeficiente de expansão térmica por °C ($\cdot 10^{-6}$) por temperatura em °C das ligas Sanicro[®] 28, HT8 e tubos composto Sanicro[®] 28/HT8.

Fonte: Autor, adaptado de Sandvik, 1999 2 p.

Os tubos utilizados em caldeiras são projetados para permitir uma ótima relação de vazão de vapor com a resistência mecânica do tubo, que é proveniente da resistência mecânica do aço carbono de baixa liga, neste trabalho sendo utilizado o HT8. A liga externa não possui a função de contribuir para a resistência mecânica do produto embora sua influência não seja desprezível, no entanto é essencial para a aplicação do tubo composto devido à sua elevada resistência à corrosão.

3.2 Liga de níquel Sandvik Sanicro 28[®]

A liga Sandvik Sanicro 28[®] também é designada pela nomenclatura UNS (Unified Numbering System) N08028. Esta liga possui aplicação em ambientes que envolvam elevada corrosão, desde perfuração e extração de petróleo até caldeiras, em geral nos super

aquecedores. Seu vasto campo de uso é decorrente de sua e de sua elevada resistência à corrosão (SANDVIK, 2007). A composição química desta liga é apresentada pela tabela 1.

Tabela 1: Composição química da liga Sandvik Sanicro 28[®]

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
34,86	0,02	0,6	2,0	0,025	0,015	27	31	3,5	1,0

Fonte: Autor, adaptado de Sandvik, 2007, 1 p.

Sua condutividade térmica é ilustrada pela figura 5 por meio da comparação com o tubo composto Sandvik Sanicro 28/HT8 e do aço carbono de baixa liga HT8. Seu coeficiente de expansão térmica encontra-se no mesmo tópico 3.1, na figura 6.

A resistência mecânica desta liga é apresentada na tabela 2, embora sua função não seja contribuir para a resistência mecânica do tubo composto (SANDVIK, 1999).

Tabela 2: Valores de limites de resistência mecânica, escoamento e alongamento da liga SandvikSanicro 28[®]

Liga	Lim. Escoamento (MPa)	Lim. Resist. Mec. (MPa)	Alongamento (%)
Sanicro [®] 28	200	550 - 750	40

Fonte: Autor, adaptado de Sandvik, 2007, 2 p.

3.3 Aço carbono de baixa liga HT8

Segundo a empresa Matco Inc. (s.n), o nome “HT”, no caso de aços, significa “High Tensile Steel” e o número “8” seria apenas para a designação do material. Este mesmo aço é também conhecido como SA 213-T22, designado pela nomenclatura UNS como K21590.

Sua faixa de aplicação é até os 550°C. As tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, a composição química e resistência mecânica deste material.

Tabela 3: Composição química do aço carbono de baixa liga HT8.

Aço	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Gr T22	0,05/0,15	0,30/0,60	0,025	0,025	0,50	0,40	1,90/2,60	0,87/1,13

Fonte: Autor, adaptado de V&M do Brasil, [S.I.: s.n]

Tabela 4: Valores de limites de escoamento, de resistência mecânica e alongamento do aço carbono HT8.

Aço	Lim. Escoamento (MPa)	Lim. Resist. Mec. (MPa)	Alongamento (%)
HT8 (SA 213- Gr T22)	205	415	35

Fonte: Autor, adaptado de V&M do Brasil, 11 p.

Para aplicar este aço em um superaquecedor, é realizado um estudo de seu comportamento mecânico sob as tensões presentes neste equipamento. Esta análise é realizada em base na tensão de von Mises, cujo objetivo é quantificar o esforço mecânico que um produto está sendo submetido em determinada aplicação.

3.4 Relação da tensão de von Mises com o limite de escoamento do material

Segundo Dowling (1999), a tensão exercida pelo vapor no interior do tubo pode ser interpretada pela chamada tensão de von Mises (σ_{VM}). A σ_{VM} , quando comparada com o limite de escoamento do material em dada temperatura, é utilizada para determinar se o tubo pode ou não ser aplicado com determinada pressão interna e qual o grau de segurança deste feito. Quando σ_{VM} é superior à tensão do limite de escoamento do material (ou a tensão com um determinado coeficiente de segurança), o material tenderia a se deformar plasticamente devido à elevada pressão do vapor, o que se torna inadmissível no super aquecedor devido ao elevado risco de acidente. Se a tensão referente ao esforço mecânico exercido é inferior à tensão que limita o comportamento elástico do material (ou a admitida pelo coeficiente de segurança), é aceita a pressão com a qual o vapor flui no interior do tubo composto.

Por meio das equações 1, 2, 3 e 4 pode-se observar que a tensão de von Mises num tubo é somente dependente das variáveis pressão interna e geometria do tubo; a geometria e as tensões sofridas pelo tubo estão ilustradas na figura 7, e nas equações tem-se tensão longitudinal (σ_l), tensão de membrana ou circunferencial (σ_m), tensão radial (σ_r), tensão de limite de escoamento (σ_{LE}), coeficiente de segurança (C.S.), raio externo ($r_{ext.}$), raio interno ($r_{int.}$), raio de estudo (R), espessura (t). Assumindo que: $R = r_{int.}$, $\sigma_l = 0$ (pois o tubo é aberto), $\sigma_m = \sigma_1$, $\sigma_r = \sigma_3$ e $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ e $(t/r_{int} > 0,1)$

$$\sigma_m = \frac{p^* r_{int}^2}{r_{ext}^2 - r_{int}^2} * \left(\frac{r_{ext}^2}{r_{int}^2} + 1 \right) = \sigma_1 \quad .(1)$$

$$\sigma_r = -\frac{p^* r_{int}^2}{r_{ext}^2 - r_{int}^2} * \left(\frac{r_{ext}^2}{r_{int}^2} - 1 \right) = \sigma_3 \quad .(2)$$

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad .(3)$$

$$\frac{\sigma_{LE}}{C.S.} \geq \sigma_{VM} \quad .(4)$$

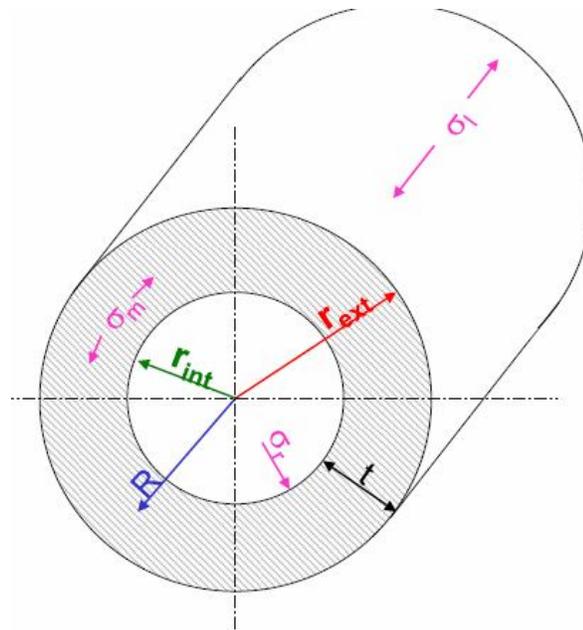


Figura 7: Tubo esquemático ilustrando as variáveis presentes nas equações correlacionadas à tensão de Von Mises.

Fonte: Autor, adaptado de Downing 1999.

No entanto, apesar destes cálculos e utilização de coeficientes de segurança, o material ainda pode vir a apresentar trincas. Estas possuem uma maior tendência em se propagar em determinadas direções, devido ao sentido do esforço mecânico ao qual o tubo

composto é submetido e também ao próprio direcionamento de seus fibramentos (DOWLING, 1999).

3.5 Trincas na transversal e na longitudinal

De acordo com Dowling (1999) e Lai (2007), para analisar a direção preferencial de uma trinca dois fatores relacionados à resistência mecânica do tubo devem ser levados em conta:

- a. Direção de maior esforço mecânico imposto pela aplicação sobre a estrutura em questão;
- b. Direção dos fibramentos da estrutura do material.

Em relação ao primeiro item, quando aplicado no superaquecedor o material é fixo por braçadeiras em suas extremidades e em pontos estratégicos de sua estrutura. Por consequência, a força peso contribui para o esforço mecânico sobre o material (TILLEY, 2003).

Devido à elevada pressão, exercida pelo vapor, somada a alta temperatura do tubo, há uma grande dilatação do tubo na transversal. Esta expansão volumétrica é responsável por uma grande parcela do esforço mecânico total sofrido pelo tubo (LAI, 2007; DOWLING, 1999).

Ao analisar o segundo item, no sentido em que os fibramentos se direcionam a resistência mecânica do tubo é maior. Esta direção é na longitudinal devido ao seu processo de fabricação, descrito no tópico 3.1.

Quando estudada a expansão volumétrica do tubo na transversal, a superfície do mesmo é tracionada e por consequência uma tensão, perpendicular aos fibramentos, é aplicada sobre a estrutura, conforme ilustrado na figura 8.

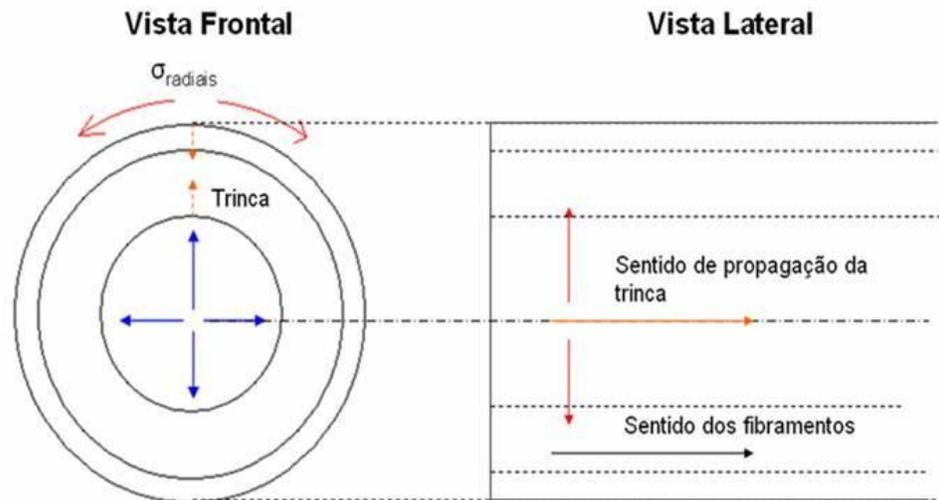


Figura 8: É apresentado um desenho esquemático das tensões atuantes em um tubo aplicado em um superaquecedor e a relação com o sentido de propagação de uma trinca. Sendo ilustrado em vermelho as tensões radiais (σ_{radiais}), em laranja a trinca (estando na vista frontal em pontilhado pois poderia ocorrer de ambos os sentidos), as setas azuis é a tensão proveniente do vapor e a seta em cor preta refere-se ao sentido dos fibramentos.

Fonte: Autor.

No entanto, ao longo de um ensaio de tração a propagação da trinca ocorre na transversal, conforme ilustrado na figura 9. Isso ocorre devido ao esforço mecânico, exercido pela máquina de tração, ser aplicado na longitudinal.

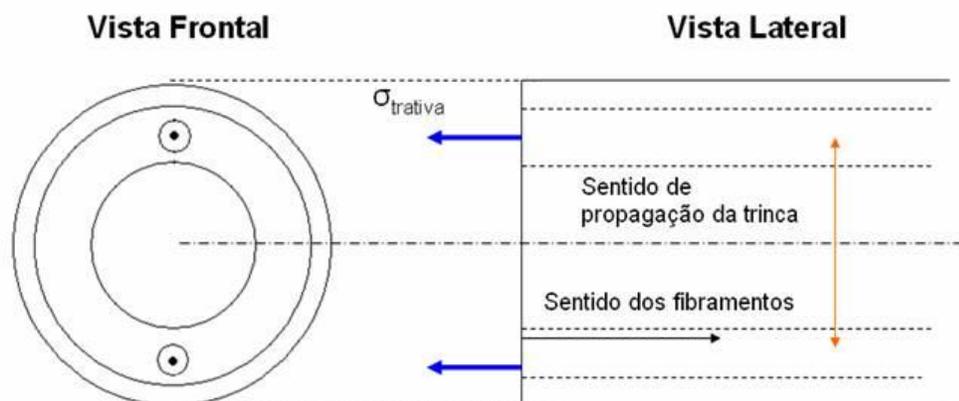


Figura 9: Apresenta um desenho esquemático das tensões atuantes em um tubo quando tracionado em ensaio e a relação com o sentido de propagação da trinca. Sendo a tensão trativa (σ_{trativa}) representada pelas setas azuis e o círculo com ponto preto presente na vista frontal, a seta preta indica o sentido dos fibramentos e a seta laranja ilustra a propagação da trinca.

Fonte: Autor.

Embora tenha sido aprovada a aplicação do material em determinadas circunstâncias por meio da comparação do limite de escoamento com a tensão de von Mises, conforme apresentado no item 3.4, após a realização de manutenção por soldagem o comportamento do tubo (antes previsto em projeto) pode vir a se alterar, podendo ocorrer a nucleação de trincas devido a transformações e precipitações de fase, presença de descontinuidades, transformação de estrutura e outros fatores que podem levar o material à falha e consequentemente a um possível acidente (LAI, 2007; WAINER ET AL, 1992).

3.6 Soldagem

Segundo Weiner et al. (1992), soldagem é o processo de união de dois materiais por meio de uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Como resultado deste processo tem-se a solda.

Devido a grande quantidade de calor aplicada sobre o produto ao longo da soldagem, há a possibilidade de ocorrência de transformação e precipitação de fases que resultam na modificação do comportamento mecânico do material. Sendo que no caso do uso de material de adição para o aço carbono HT8 utiliza-se, em solda de tubos compostos, o material de adição 90S-B3 enquanto que para liga de níquel utiliza-se a liga Sandvik Sanicro 60[®] conforme especificado na EPS para solda em tudo composto. Suas composições químicas são apresentadas nas tabelas 5 e 7 respectivamente (sendo comparadas com as respectivas ligas de material de base) e resistência mecânica nas tabelas 6 e 8 respectivamente (sendo comparadas com as respectivas ligas de material de base), sendo S28 a liga Sandvik Sanicro 28[®] e S60 a liga Sandvik Sanicro 60[®] (SANDVIK, 2008; BÖHLER WELDING, 2011)

Tabela 5: Comparação das composições químicas do material de base, aço HT8, com o material de adição, liga 90S-B3.

Ligas	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
HT8	0,05/0,15	0,3/0,6	0,025	0,025	0,5	0,4	1,9/2,6	0,87/1,13	-
90S-B3	0,09	0,46	0,009	0,013	0,49	0,09	2,4	0,97	0,21

Fonte: Autor, adaptado de Böhler Welding, 2011.

Tabela 6: Comparação de Resistência mecânica do material de base, aço HT8, com o material de adição, liga 90S-B3.

Ligas	Lim. Escoamento (MPa)	Lim. Resist. (MPa)	Alongamento (%)
HT8	205	415	35
90S-B3	540	620	17

Fonte: Autor, adaptado de Böhler Welding, 2011.

Tabela 7: Comparação das composições químicas do material de base, liga Sandvik Sanicro 28[®] (S28), com o material de adição, liga Sandvik Sanicro 60[®] (S60)

Ligas	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Fe	%Nb	Cu
S28	0,3	0,6	2,0	0,025	0,015	27	31	3,5	34,82	-	1,0
S60	0,03	0,2	0,2	0,015	0,010	22	60 min	9	1	3,5	-

Fonte: Autor, adaptado de SANDVIK, 2007.

Tabela 8: Comparação das Resistências mecânicas e alongamento do material de base, liga Sandvik Sanicro 28[®] (S28), com o material de adição, liga Sandvik Sanicro 60[®] (S60)

Ligas	Lim. Escoamento (MPa)	Lim. Resist. (MPa)	Alongamento (%)
S28	200	550-750	40
S60	430	670	42

Fonte: Autor, adaptado de SANDVIK, 2007.

Em juntas soldadas com o uso de processos que visam a fundição do material de base e, quando utilizado também o material de adição, podem ser distinguidas três grandes regiões, apresentadas conforme a figura 10.

- a. Zona de fusão;
- b. Zona de ligação ou de transição sólido-líquido;
- c. Zona termicamente afetada.

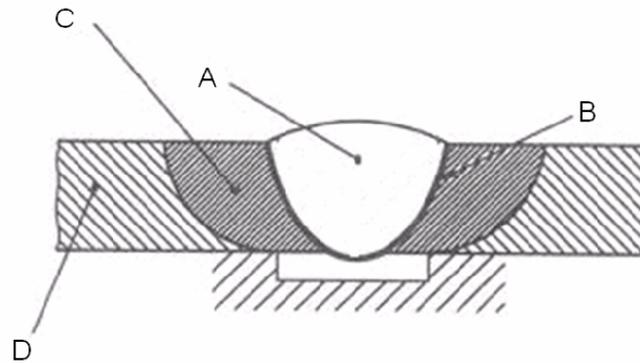


Figura 10: Apresenta as regiões afetadas pela temperatura. Sendo A – Zona de fusão; B – Zona de ligação; C – Zona termicamente afetada; D – Estrutura original do material.

Fonte: Autor.

3.6.1 Zona de fusão

A zona de fusão é a região em que o calor proveniente do equipamento de soldagem está mais concentrado, fazendo com que o material se funda efetivamente. Uma vez fundido o material perde completamente as características da estrutura original.

As estruturas presentes na zona de fusão podem ser planares ou dendríticas, sendo que para a ocorrência da primeira é necessário que o material seja composto apenas de um elemento ou que um resfriamento muito lento seja aplicado sobre a solda, enquanto que a estrutura dendrítica é favorecida por uma maior concentração de elementos de liga e velocidade de resfriamento.

Em regiões interdendríticas pode-se observar uma elevada concentração de elementos devido à baixa difusão destes elementos para a estrutura solidificada, ocorrendo a microsegregação ou até a macrosegregação que pode resultar na precipitação de fases indesejáveis na estrutura e possivelmente na nucleação de trincas, havendo o comprometimento da resistência mecânica do material.

Em estruturas planares a segregação de elementos à frente do material sólido é mínima, resultando em uma baixa microsegregação e consequentemente obtenção de maior resistência mecânica quando comparado com a estrutura dendrítica. (MESSLER, 2004).

Utiliza-se quando necessário um material de adição ligas de composição diferente da do material de base que possuem uma resistência mecânica superior, criando-se uma

situação de overmatch, caracterizada quando o limite de escoamento do material de adição é superior que o do material de base (MOREIRA, 2008)

3.6.2 Zona de ligação ou de transição sólido-líquido

A zona de ligação é a região entre a zona de fusão e a zona termicamente afetada (ZTA). Nesta região ocorre apenas a fusão de alguns contornos de grão, devido a elevada concentração de elementos que reduzem a sua temperatura de fusão. A mudança de estado sólido para líquido destes contornos pode acarretar na geração de tensões residuais e na possível nucleação e propagação de trincas.

Devido ao grande aquecimento que esta região sofre, quando se trata de aços-carbono sua estrutura pode sofrer tratamento térmico de normalização, podendo assim ocorrer transformações de fase ou outras alterações microestruturais que afetariam a resistência mecânica da solda (WEINER et al, 1992).

3.6.3 Zona termicamente afetada (ZTA)

A zona termicamente afetada está mais afastada da zona de fusão que a zona de ligação, a energia térmica que chega a esta região não é suficiente para que ocorra a liquefação dos contornos de grão, fator que a diferencia da zona de ligação.

Uma vez termicamente afetada, esta zona sofre sob a ação de tensões trativas e compressivas que tendem a tornar essa região propícia à nucleação ou propagação de trincas, possibilitando a falha do material.

Ao se analisar a estrutura dessa região, devido ao gradiente de temperatura presente na mesma, pode-se observar variações na microestrutura do material, conforme apresentado na figura 11. (ASM HANDBOOK vol. 6, 1993).

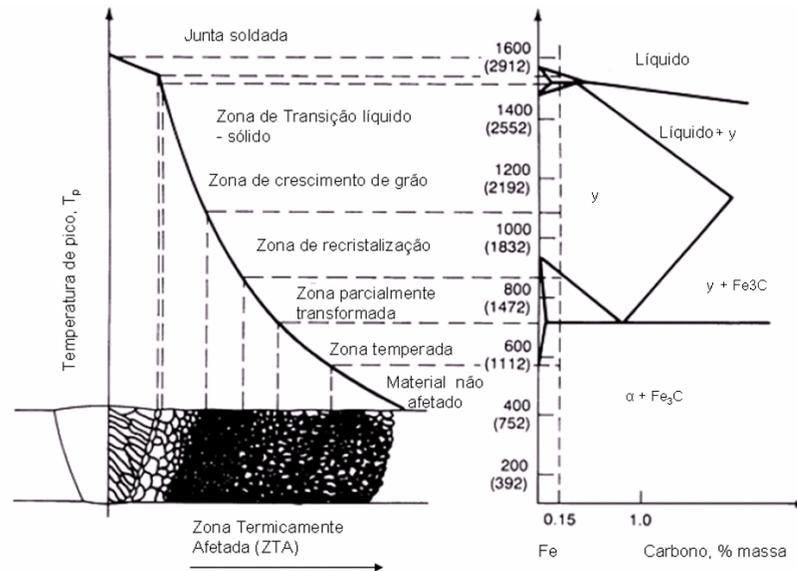


Figura 11: Apresenta faixas de possíveis alterações microestruturais ao longo do material após soldagem.

Fonte: Autor, adaptado de ASM Handbook Vol. 6, 1993.

No caso do tubo composto, ao haver o contato íntimo entre duas ligas dissimilares há a possibilidade de ocorrência influência térmica, por conta de propriedades térmicas diferentes, ou de difusão de elementos de uma para a outra, quando sob influência de elevada temperatura tal como ao longo da realização de uma solda, podendo surgir heterogeneidades na microestrutura próxima à região da interface. Para entender o comportamento mecânico do material após a influência da solda, é necessário compreender a microestrutura do mesmo.

3.7 Transformações de fase no aço carbono HT8

Sob uma determinada taxa de resfriamento, o material pode apresentar uma certa microestrutura, tal como ferrita ou perlita, conforme ilustrado pela figura 12. Nesta, é apresentado um desenho esquemático das possíveis fases presentes na microestrutura de um aço baixo-carbono. Este gráfico, por envolver tempo, temperatura e transformação de fase sob uma dada taxa de resfriamento é denominado TRC (ou em inglês CCT, Continuous Cooling Transformation).

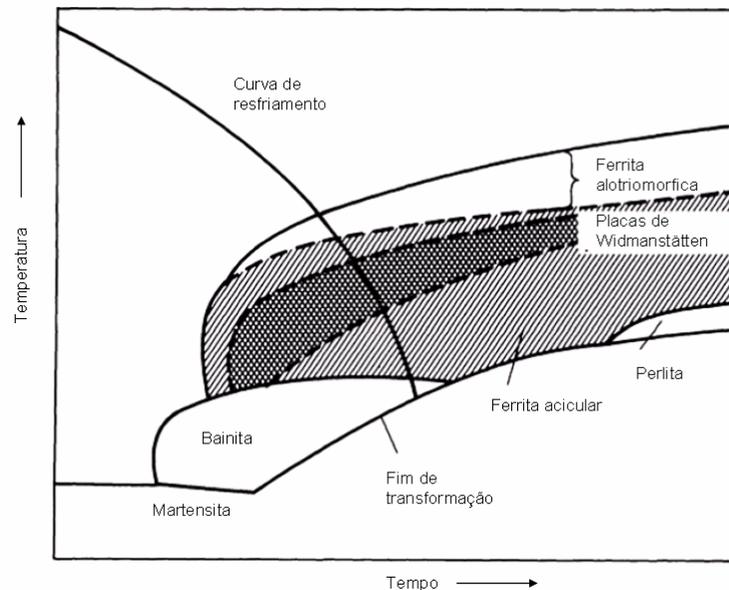


Figura 12: Figura esquemática apresentando as possíveis transformações de fase em um aço carbonado com uma respectiva curva de resfriamento contínuo.

Fonte: Autor, modificado de ASM Handbook Vol. 6 (1993) p. 196.

Conforme a adição de elementos na composição química do aço, há o deslocamento das curvas referentes às transformações de fase, ilustradas na figura 12, para a direita.

A figura 13 apresenta, para um aço com adição de cromo, níquel e molibdênio, curvas TRC, ou seja, por meio de pontos de intersecção entre curvas com diferentes taxas de resfriamento e campos de transformação de fase, as microestruturas obtidas em cada um dos resfriamentos. Sendo, A_{F1} – Temperatura do patamar eutetóide, A_{F3} – Temperatura de austenitização, M_S – temperatura inicial para formação de martensita na microestrutura, M_F – temperatura final para formação de martensita, F_S – Relação de tempo e temperatura para início de formação de estrutura ferrítica, F_F – Relação de tempo e temperatura para fim da transformação ferrítica, B_S - Relação de tempo e temperatura para início de formação de estrutura baínítica, B_F - Relação de tempo e temperatura para fim de formação de estrutura baínítica.

Conforme é ilustrado na figura 13, por meio da intersecção da curva de resfriamento mais à direita presente no gráfico com o campo de estrutura ferrítica, apenas ao ser realizado um resfriamento com $3^\circ\text{C}/\text{min}$. tem-se a obtenção de estrutura ferrítica. Para este aço, em específico, curvas de resfriamento mais intenso resultam na obtenção de estrutura baínítica e/ou martensítica.

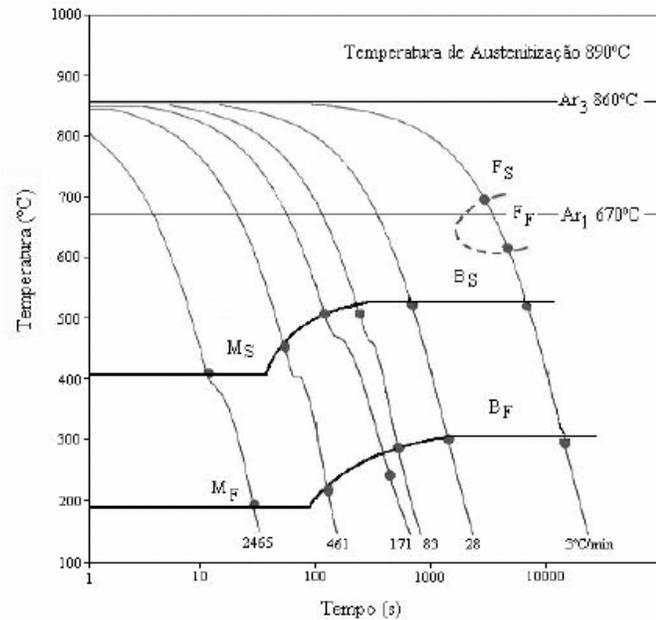


Figura 13: Diagrama de curvas TTT para um aço com adição dos elementos cromo, níquel e molibdênio. Sendo apresentado campos de transformação de fase martentica (A_{F1} – Temperatura do patamar eutetóide, A_{F3} – Temperatura de austenitização, M_S – temperatura inicial para formação de martensita na microestrutura, M_F – temperatura final para formação de martensita, F_S – Relação de tempo e temperatura para início de formação de estrutura ferrítica, F_F – Relação de tempo e temperatura para fim da transformação ferrítica, B_S – Relação de tempo e temperatura para início de formação de estrutura baínitica, B_F – Relação de tempo e temperatura para fim de formação de estrutura baínitica.

Fonte: Silva, 2004, p. 34..

Da mesma forma que diferentes microestruturas podem ser obtidas no aço carbono de baixa liga, na liga de níquel também podem ser evidenciadas heterogeneidades. Sendo importante o seu entendimento pois, embora esta liga não possua a função de promover a resistência mecânica sobre a resistência mecânica do tubo composto, esta pode influenciar em suas propriedades mecânicas.

3.8 Superligas de Níquel

Segundo Petronic e Milosavljevic (2007) e Pigrova (2005), as superligas de níquel são caracterizadas por possuírem elevada concentração de níquel, que promove a estabilização da austenita (γ) como matriz. Estas ligas possuem, na composição química, uma grande concentração de outros elementos dissolvidos em sua estrutura.

Ao fornecer energia a estas ligas, há a formação de um complexo leque de precipitados em suas estruturas, que influenciam diretamente em suas propriedades, além de

estabelecerem determinados limites de aplicação em certas condições tal como elevadas temperaturas.

As principais fases a precipitarem com o aumento gradativo de temperatura são as descritas abaixo, também representadas na figura 14 que ilustra uma estrutura esquemática com as fases mais presentes em uma superliga de níquel (série Hastelloy). Para termos de comparação é apresentada uma tabela comparativa entre a composição química da liga Sandvik Sanicro 28 e da Hastelloy S. Como se vê, os teores de Fe, C, Mo, Cr e Ni das duas ligas é diferente, e portanto algumas das fases presentes numa liga Hastelloy S podem não ocorrer na liga Sanicro 28. Assim, devido o reduzido número de trabalhos específicos sobre a liga Sanicro 28, serão discutidas quando necessário as fases presentes nas ligas do tipo Hastelloy, para complementação desta revisão de literatura.

Tabela 9: Comparação entre composição química da liga Sandvik Sanicro 28[®] (S28) com a Hastelloy S (H.S)

Ligas	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	B	outros
S28	34,82	0,02	0,6	2,0	0,025	0,015	27	21	3,5	1,0	-	-	-
H.S	1,34	0,3	0,5	0,5	-	-	15,3	67	14,4	-	0,3	0,01	0,05

Fonte: Autor, adaptado de Petronic (2007).

Abaixo tem-se as principais fases presentes nas séries Hastelloy:

- Carbonetos, nitretos, boretos, carbonitretos e óxidos (MC, $M_{23}C_6$ e outros);
- Fase intermetálica (γ') : $Ni_3(Al$ ou $Ti)$;
- TCP (Topologically Close-Packed): Representada pela fase “Sigma”.

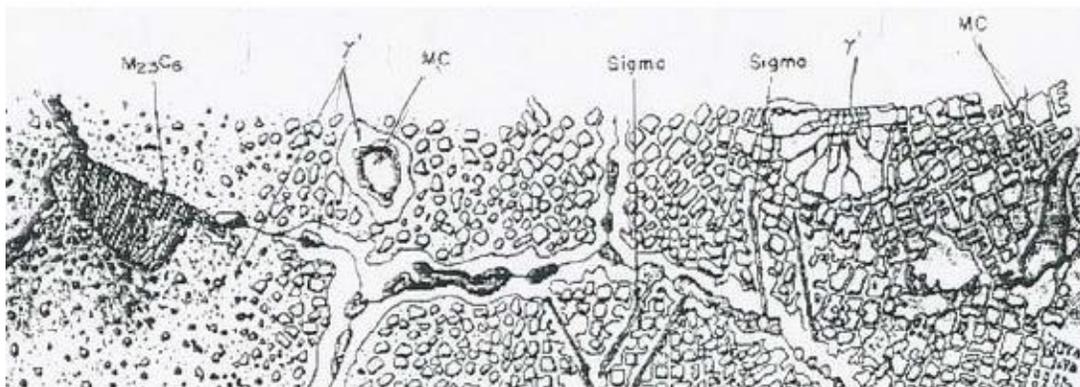


Figura 14: Figura esquemática da microestrutura observada nas séries Hastelloy.

Fonte: Petronic (2007), 2 p

3.8.1 Carbonetos

Existe uma série de tipos de carbonetos que podem precipitar no momento em que há concentrações mínimas de carbono em determinada temperatura. Na figura 15 são apresentadas curvas de precipitação de carbonetos de cromo em diferentes materiais, incluindo a liga Sandvik Sanicro 28[®].

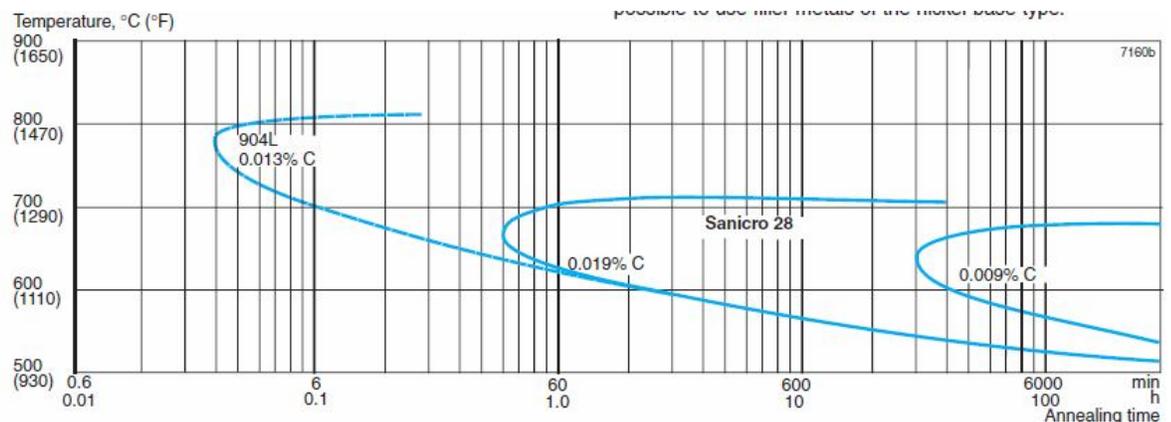


Figura 15: São apresentadas curvas de precipitação de carbonetos de cromo para diferentes materiais, incluindo a liga Sandvik Sanicro 28[®].

Fonte: Sandvik, 2007, 11 p

Em algumas ligas de níquel, o carboneto de estrutura MC é o primeiro a precipitar, em seguida, os de proporção M/C maior tais como $M_{23}C_6$ e M_6C .

Os carbonetos, quando presentes na estrutura, atuam como barreiras ao deslocamento de discordâncias, o que implica em um aumento da resistência mecânica do material. Estes carbonetos podem precipitar no interior ou nos contornos de grão.

No entanto, quando estes carbonetos precipitam nos contornos de grão, o material pode tornar-se frágil devido à elevada dureza desta fase, o que torna preferível a dispersão destes carbonetos em meio aos grãos ao se desejar um material com elevada resistência mecânica (PETRONIC, 2007).

3.8.2 Fase intermetálica

A fase intermetálica $Ni_3(Al,Ti)$ é conhecida como γ prime, representada também pelo símbolo γ' , e recebe estas nomenclaturas para se diferenciar da matriz austenítica (γ). Esta fase em alguns casos pode ser desejável no momento em que sua precipitação de maneira

controlada promove um aumento benéfico da resistência mecânica do material, embora na grande maioria das vezes seja evitada.

Para a sua precipitação na estrutura do material, é necessária a presença do elemento químico alumínio e/ou titânio na composição química da liga, sendo sua presença proporcional à concentração deste (s) elemento(s) em questão (PETRONIC, 2007).

Embora as ligas Sanicro 28 e o aço carbono HT8 ou T22 não possuam nenhum destes dois elementos essenciais para sua precipitação em suas composições químicas, esta fase é de grande importância pois em caso de precipitar influencia na nucleação de outras fases e na resistência mecânica da estrutura. Pois caso haja algum erro na composição química do material ou troca do mesmo, fatores que permitam a presença de alumínio ou titânio, há a possibilidade de precipitação desta fase.

3.8.3 Fases TCP (Topogically Close Packed)

Estas fases TCP dizem respeito a todo um grupo de precipitados que promovem a redução, em longo prazo, da ductilidade e resistência mecânica de um material que possua elevada concentração de cromo em sua composição química.

A precipitação destas fases está atrelada a prévia precipitação de outras estruturas. No caso de aços com elevadas concentrações de cromo, a precipitação das fases TCP ocorre somente após a precipitação de carbonetos. Em ligas de níquel com elevados teores de cromo, a precipitação das fases TCP ocorre somente após a precipitação de carbonetos e fase γ' .

Em ambos os casos, a nucleação das fases TCP pode ser explicada pela baixa solubilidade de cromo que as fases anteriormente presentes possuíam. Por consequência as fases “Topogically Close Packed” são ricas neste elemento (PIGROVA, 2005).

Segundo Pigrova (2005), as estruturas mais frequentes deste grupo são as fases sigma (σ) (de estrutura β -U). Dentro do grupo de fases sigma, tem-se nas ligas de níquel fases de estrutura hexagonal e também as conhecidas como fases Laves.

As fases Laves são indesejáveis à liga de níquel pois contribuem para a queda da soldabilidade, resistência mecânica e à fluência do material. Possuindo um ponto de fusão inferior ao da matriz, impõe ao material uma grande variação de temperatura de solidificação ao longo do resfriamento da liga de níquel, possibilitando assim a ocorrência

de trincas ao longo da solidificação da liga com elevado teor de cromo. Esta variação de temperatura pode ser observada na tabela 10, na qual são apresentadas as fases e suas respectivas temperaturas de solidificação, estando a solidificação completa da liga ao redor de 1216°C (DUPONT, 1996)

Tabela 10: Fases e temperaturas de solidificação, por meio de uma reação eutética, de uma liga com elevado teor de cromo.

Reação eutética	Temperatura (°C)
$L \rightarrow \gamma$ (matriz austenítica)	1357
$L \rightarrow \gamma + \text{carbonetos}$	1250
$L \rightarrow \gamma + \text{fases Laves}$	1216

Fonte: Autor, adaptado de Dupont (1996), 1 p.

De acordo com Dupont (1996), as fases Laves encontram-se em regiões intergranulares ou interdendríticas, tal como pode ser observada na figura 9, obtida por MEV (microscópio eletrônico de varredura), em uma região interdendrítica na camada de níquel depositada por soldagem sobre um tubo de aço carbono.



Figura 16: Microestrutura da fase Lave em região interdendrítica, obtida por MEV

Fonte: DuPont (1996), 3 p.

As fases Laves são estabilizadas pelos elementos químicos ferro e silício, sendo o nióbio de grande importância para o processo de precipitação desta fase embora não seja um elemento estabilizante. A concentração deste tipo de fase TCP é proporcional à quantidade destes elementos, ferro e silício, na composição química.

Inicialmente, muitos materiais não possuem as quantidades necessárias destes elementos para a nucleação das fases Laves. No entanto, após processos de soldagem em produtos que possuem em sua estrutura a interface de dois materiais, tal como no tubo composto, há ocorrência de difusão de determinados elementos de uma liga a outra, no caso do aço para a liga de níquel, conforme são apresentados nas figuras 17 e 18, gráficos de difusão dos respectivos elementos que influenciam na precipitação destas fases. Nestas figuras, o substrato é o aço carbono e a camada sobreposta é a liga de níquel.

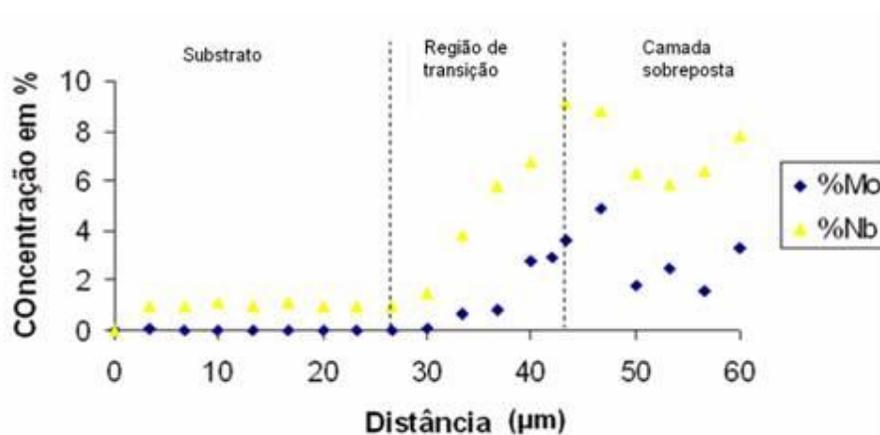


Figura 17: Representa a variação da concentração de Mo e Nb em relação à distância (em μm) de um determinado ponto do aço carbono a um ponto da liga de níquel, englobando as regiões do substrato (aço carbono HT8), interface e da liga de níquel como overlay.

Fonte: Autor, adaptado de Dupont (1996), 4 p.

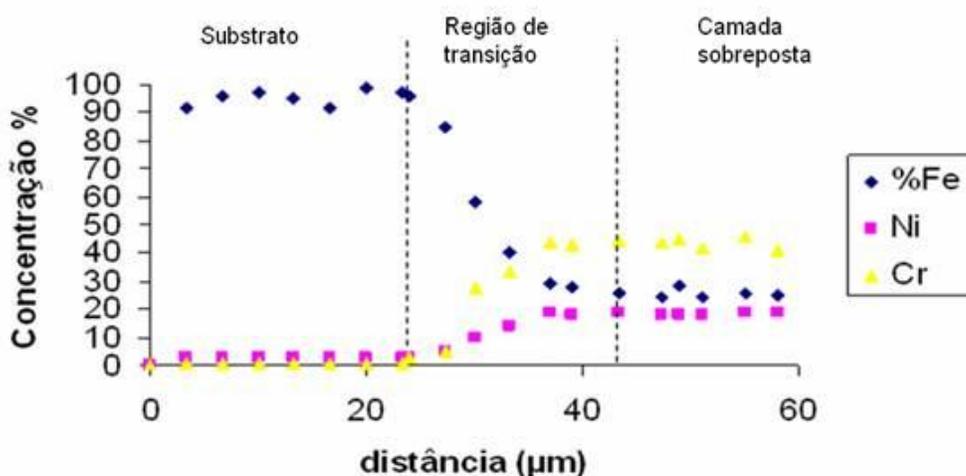


Figura 18: Representa a variação de concentração de Fe, Ni e Cr em relação à distância (em μm) de um determinado ponto do aço carbono a um ponto da liga de níquel, englobando as regiões do substrato (aço carbono HT8), interface e da liga de níquel como overlay.

Fonte: Autor, adaptado de Dupont (1996), 4 p.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização deste trabalho foram: 2 tubos compostos da liga Sandvik Sanicro 28[®] com aço carbono de baixa liga HT8 de 500 mm e 488 mm de comprimento e ambos de 63,5 mm de diâmetro externo e espessura de 6,53 mm (sendo a camada de aço carbono de 4,88mm), eletrodo consumível TIG da liga Sandvik Sanicro 60[®], cuja composição química e propriedades mecânicas são comparadas ao material de base Sandvik Sanicro 28[®] no tópico 3.6 nas tabelas 5 e 6 respectivamente. Tendo sido ambos os produtos cedidos pela empresa Sandvik com o objetivo de participar nesta pesquisa.

Foram também utilizadas varetas para soldagem em TIG da liga 90S-B3 conforme especificado pela EPS para solda no tubo composto, cuja composição química e propriedades mecânicas são comparadas às do material de base o aço de baixa liga HT8 no tópico 3.6, nas tabelas 3 e 4 respectivamente, foram cedidas pela empresa Böhler Welding do Brasil com o objetivo de participar nesta pesquisa.

Foi também utilizado gás argônio como fluxo para solda em TIG.

4.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados foram: conjunto de equipamentos para solda em TIG, serra de fita de aço especial para corte vertical, serra de fita de aço especial para corte na horizontal, forno Jung, máquina de tração MTS, micrômetro e o programa, disponibilizado pela FEI, AC3.

4.3 Procedimentos

4.3.1 Obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração os corpos de prova necessariamente precisam ter as mesmas dimensões. Portanto, a diferença de comprimento de 12 mm entre os tubos foi retirada. Cada tubo foi cortado transversalmente a fim de obter dois produtos tubulares de 219 milímetros de comprimento e mais uma parte de 50 milímetros, somando os 488 milímetros que se tinha originalmente.

Para o estudo da solda, dois tubos de 219 mm cada foram cortados pela metade, obtendo 4 tubos de 109,5 mm. O processo de união de tubos de 109,5 mm, apresentados na figura 19, foi por TIG, descrito a seguir.



Figura 19: Dois tubos antes de serem soldados por processo TIG.
Fonte: Autor.

Conforme Sandvik (2008), foi realizado um chanfro em ambos os tubos. No entanto, devido à falta de precisão do torno, o primeiro chanfro realizado foi feito com um ângulo superior a 45° (valor determinado pela EPS). Este tubo então foi faceado e refeito o chanfro com um ângulo de 45° , tal como ilustrado pela figura 20. O segundo tubo teve seu chanfro realizado corretamente na primeira vez; isto gerou uma diferença de 4,5 mm entre os dois tubos.

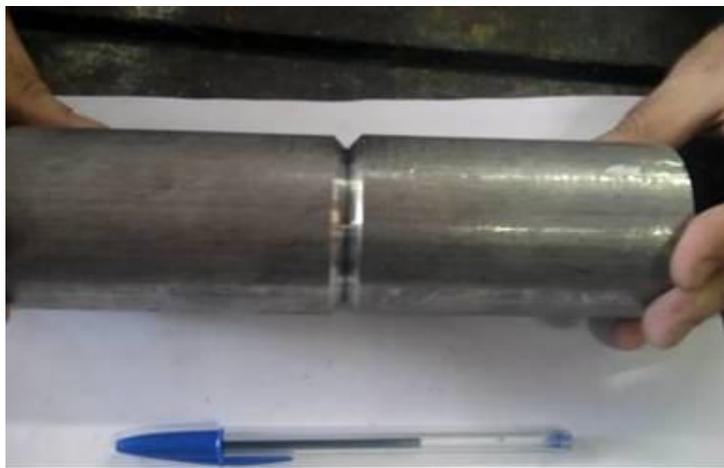


Figura 20: É apresentado o chanfro de 45° realizado para a solda em TIG nas duas extremidades do tubo composto.

Fonte: Autor.

Para a realização da solda foram utilizados os seguintes parâmetros: vazão de 10 l/min. com pressão de 10kg/cm².

A soldagem envolveu 3 passes de solda, o de raiz, o de material de adição para a camada de aço de baixa liga HT8 (ou seja, o aço 90S-B3), o material de adição para a camada da liga Sandvik Sanicro 28[®] (ou seja, a liga Sandvik Sanicro 60[®]). Ao seguir o EPS para solda em tubo composto, foi feito, intercalado aos respectivos passes, o caldeamento do material adicionado nos respectivos passes, conforme apresentado na tabela 11, com exceção da raiz da solda em que não houve material adicionado.

Tabela 11: Passes de solda e suas respectivas correntes.

Passes	Corrente
1° - raiz da solda (1° e 2° solda)	120A
2° - Adição do aço de baixa liga 90S-B3 (1° e 2° solda)	120A
Caldeamento do material (1° e 2° solda)	120A
3° - Adição do Sanicro 60 (1° solda)	80A
3° Adição do Sanicro 60 (2° solda)	90A
Caldeamento (1° e 2° solda)	80A

Fonte: Autor.

As figuras 21 e 22 ilustram os tubos soldados por processo TIG.



Figura 21: tubos soldados – detalhe dos cordões de solda.
Fonte: Autor.



Figura 22: Os tubos soldados são comparados com o tamanho de uma caneta.
Fonte: Autor.

Embora o diâmetro do tubo de aço carbono seja 4 vezes menor que o comprimento do tubo o que possibilita o ensaio de tração em tubos, a FEI não possui sistema de garras compatíveis ao diâmetro dos tubos em questão, fazendo com que os tubos tivessem que ser cortados longitudinalmente na serra de fita, obtendo primeiramente 2 partes iguais, conforme apresentado na figura 23 tanto pela representação esquemática como pela visualização real das 8 metades.

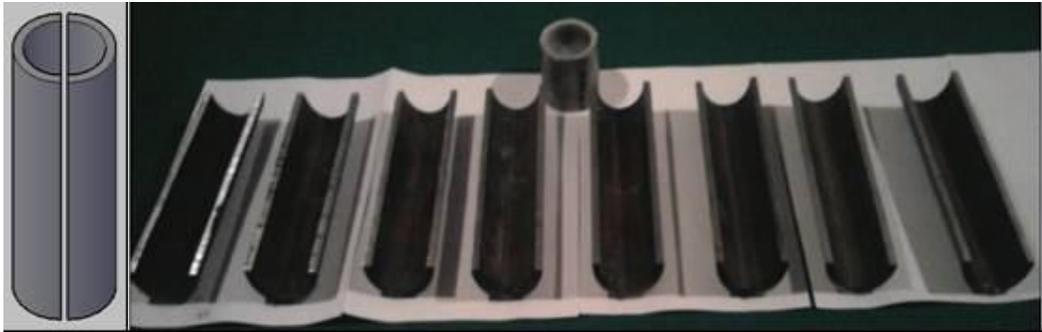


Figura 23: Na direita pode ser observada a representação esquemática de como foi realizado o corte na longitudinal nos quatro tubos enquanto que na esquerda podem ser observadas as 8 partes obtidas e mais 50 mm do restante que sobrou de um dos tubos. Tendo 4 com solda na transversal.

Fonte: Autor.

Após a obtenção das 8 partes, ilustradas na figura 23, cada uma destas foi cortada ao meio. Obtendo-se um total de 16 partes iguais, ou seja, conforme apresentado na figura 24, para a obtenção destas 16 partes cada tubo sofreu 3 cortes longitudinais.



Figura 24: Representação esquemática das 4 partes obtidas por meio da serra de fita de um dos 4 tubos.

Fonte: Autor.

Feito o corte, cada uma destas quatro partes foi prensada na prensa presente na FEI com capacidade para 40 toneladas, resultando em 16 tiras de Sandvik Sanicro 28[®] com aço HT8, conforme apresentado na figura 25.

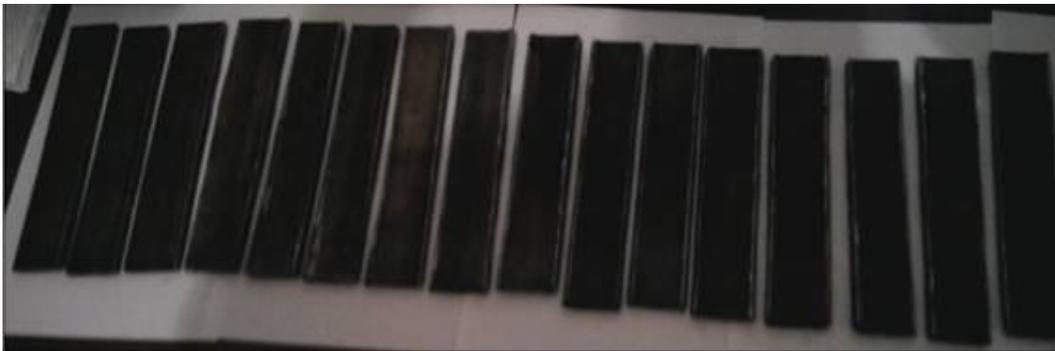


Figura 25: São apresentadas as 16 tiras de Sanicro 28 com aço carbono HT8 obtida pela prensa de 40 toneladas presente na FEI.

Fonte: Autor.

Após os tubos serem usinados até a obtenção da geometria de tira, conforme apresentado na figura 25, observou-se que a solda não havia preenchido completamente a raiz da solda, apesar de todos os cuidados ao longo do procedimento de soldagem. Ocorreu deste modo uma falha na região da junção daqueles tubos que haviam sido soldados, conforme apresentado nas figuras 26 e 27 que apresentam a comparação da continuidade do material entre os que foram e os que não foram soldados.

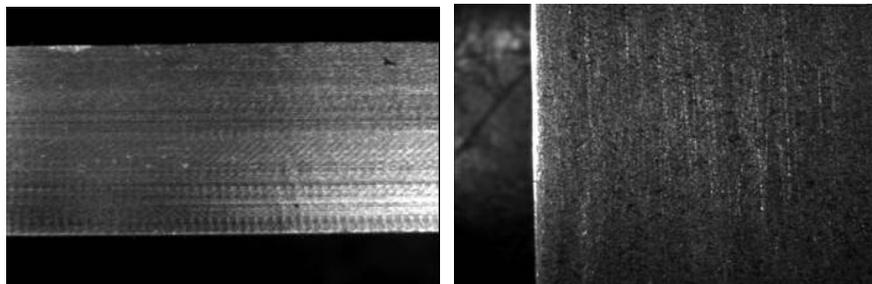


Figura 26: Na figura é apresentado a superfície de um dos materiais sem solda.
Fonte: Autor

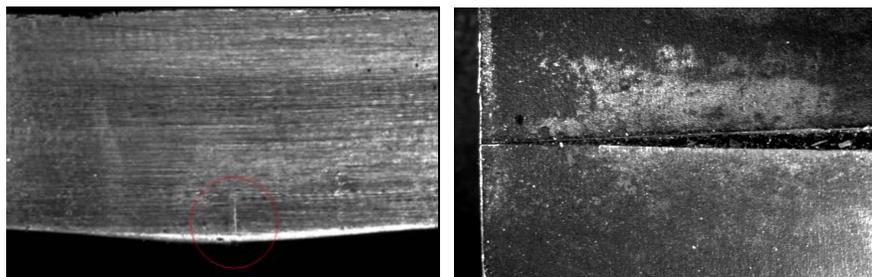


Figura 27: Na figura é apresentado a superfície de um dos materiais com solda. O defeito circulado, à esquerda, é a trinca deixada pela falta de preenchimento da raiz da solda. Este defeito pode ser melhor observado à direita.
Fonte: Autor.

Para a realização do ensaio de tração, estas tiras foram usinadas de acordo com o modelo de corpo de prova em gravata, cujas dimensões foram determinadas de acordo com as normas ASTM E8/E8M e ABNT NBR 6152. O comprimento total do corpo de prova (L) é igual a 200mm, raio (R) igual a 25 mm, largura do corpo de prova (W) igual a 28 mm, largura da área de contato com a garra (C) igual a 35 mm, comprimento da área em contato com a garra (B) igual a 50mm, espessura (T) igual à original de cada corpo de prova, conforme apresentado na figura 28.

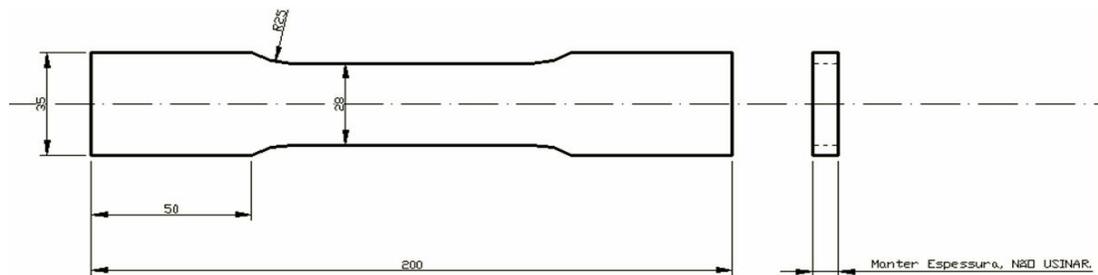


Figura 28: Ilustração do corpo de prova em gravata, traçado de maneira proporcional conforme descrito nas normas ASTM E8/E8M e ABNT NBR 6152

Fonte: Autor.

Para que os resultados obtidos no ensaio de tração representassem valores similares aos dos tubos presentes em uma caldeira de incineração de lixo, as variáveis carga e velocidade foram adotadas conforme a norma ASTM E8/E8M e a temperatura conforme a solicitada em sua aplicação.

No entanto, o tubo em questão sofre tratamento térmico em alguns momentos de sua vida útil tal como no aquecimento da caldeira ou em sua retirada para realização de manutenção. Torna-se assim interessante a realização de um tratamento térmico nos corpos de prova, simulando a condição que ocorreria em uma caldeira, afim de se obter resultados mais próximos à realidade.

4.3.2 Tratamento térmico sobre 8 dos 16 corpos de prova

O tratamento térmico realizado em 4 corpos de prova com solda e 4 sem solda foi de recozimento subcrítico a 430°C ao longo de 72 horas, em um forno Jung, ilustrado pela figura 29, seguido de resfriamento ao ar calmo.



Figura 29: É ilustrado o forno Jung em que no qual as 8 peças (4 com solda e 4 sem) estão contidas e sob tratamento térmico de 430°C

Fonte: Autor.

Para a análise ser realizada da melhor forma possível ao longo dos ensaios de tração dos 16 corpos de prova, as variáveis: presença ou não de solda, temperatura de ensaio e estrutura do corpo de prova antes do início do ensaio de tração foram levadas em conta.

4.3.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados conforme apresentado na tabela 12.

Tabela 12: Sequência de ensaios de tração realizados, ou numeração dos corpos de prova, e suas respectivas variáveis.

Temperatura ambiente	Condição da estrutura	Sem solda		Com solda	
	Sem Tratamento térmico de 72 horas a 430°C	1	2	3	4
Com tratamento térmico de 72 horas a 430°C		5	6	7	8
Temperatura de 430°C	Sem tratamento térmico de 72 horas a 430°C	9	10	11	12
	Com tratamento térmico de 72 horas a 430°C	13	14	15	16

Fonte: Autor.

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio tanto em temperatura ambiente como a 430°C estão apresentados nas figuras 30 e 31.

Quando o ensaio é realizado na temperatura ambiente, é utilizado o extensômetro, permitindo assim uma maior precisão na obtenção dos valores de deformação obtidos.

Ao ser realizado o ensaio de tração na temperatura de 430°C, não é possível utilizar a tinta de marcação, pois esta queima se usada em alta temperatura; além disso, a utilização de extensômetro nestes ensaios não é viável, medindo-se a deformação com os valores de deslocamento da máquina de ensaios.

Para manter a temperatura do corpo de prova em 430°C, necessária aos ensaios a quente, é preciso o uso de um forno, conforme apresentado na figura 31. Pelo corpo de prova possuir uma largura superior à aceita pelo forno, teve-se que utilizar uma manta para impedir que se perdesse temperatura ao longo do ensaio

Após o ensaio de tração ter sido realizado, os corpos de prova rompidos de número ímpar foram usinados para ser feito o embutimento de amostras para análise metalográfica.

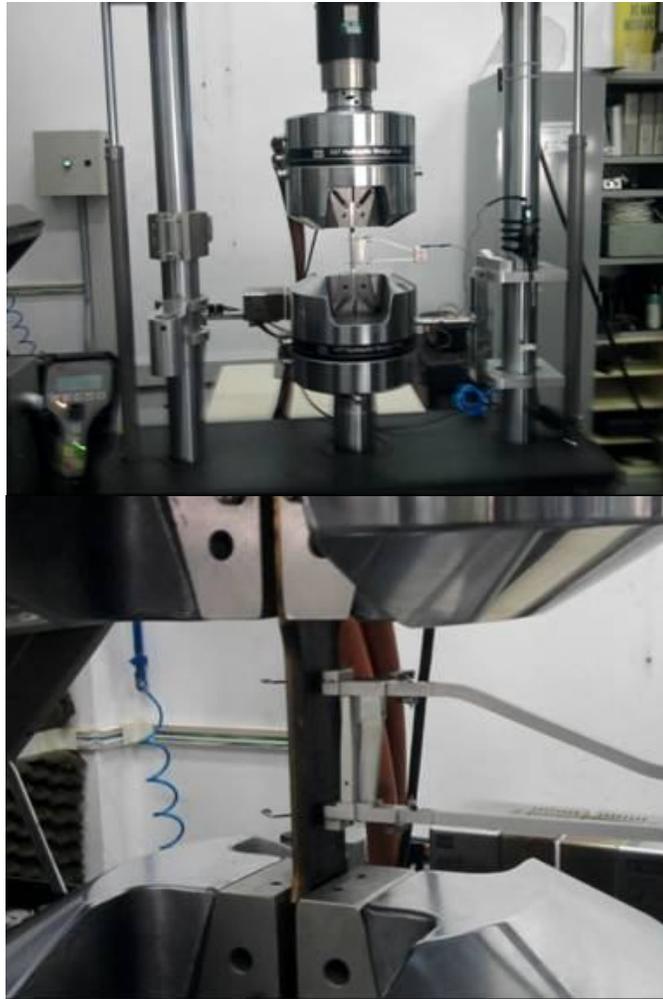


Figura 30: É apresentado o equipamento de tração MTS e a fixação do corpo-de-prova feita pelas garras do equipamento, no ensaio conduzido à temperatura ambiente. Pelo ensaio ser à temperatura ambiente pode-se observar a presença do extensômetro.
Fonte: Autor.



Figura 31: É apresentado na figura o forno que abraça a parte central do corpo de prova, aquecendo-a à temperatura de 430°C. A flecha em vermelho indica o local a ser colocada a manta refratária para evitar a perda de temperatura.
Fonte: Autor.

4.3.4 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado em 4 corpos de prova soldados (3,7,11,15) cada um pertencente a uma condição analisada, sendo que em todos os CPs foram feitos 20 pontos de dureza. A distribuição e passo destes pontos foram determinadas de acordo com as zonas da solda, conforme apresentadas no item 3.6 juntamente com o material de base.

Para uma maior precisão dos valores levantados através do micrômetro, foi estipulado que os 20 pontos previamente determinados seriam distribuídos nas 3 zonas da solda e mais no material de base, sendo que a sequência de pontos terminaria 5 mm após a zona termicamente afetada, por consequência o passo admitido foi de 0,5mm para todas as amostras.

No entanto, como na liga Sandvik Sanicro 28[®] não foi possível evidenciar uma ZTA, determinou-se que a mesma distância e o mesmo passo adotados para o aço de baixa liga HT8 foi também aplicado à liga Sandvik Sanicro 28[®] conforme ilustrado na figura 32.

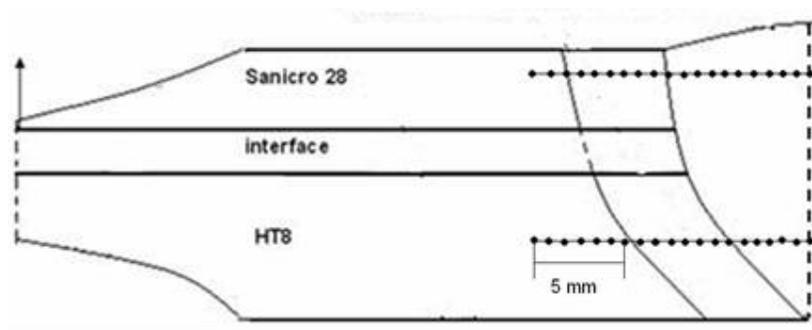


Figura 32: A figura esquemática ilustra como foi feita a distribuição dos pontos de medição de dureza no material. No entanto, as distâncias não estão representadas em escala e conseqüentemente o número de pontos em cada zona não é exatamente o apresentando na figura.

Fonte: Autor.

Para a medição ser realizada foi utilizado o microdurômetro Shimadzu, com carga equivalente a 1 kg.

Para conversão de durezas, é apresentada a tabela 13, que apresenta valores de dureza tanto para Rockwell C como para Vickers.

Tabela 13: São apresentados valores de dureza Rockwell C e os mesmos valores convertidos para escala Vickers.

Rockwell C	Vickers
------------	---------

40	393
39	379
37	365
36	353
35	341
34	331
33	321
31	311
30	302
29	294
28	285

Fonte: Autor, Adaptado de ASM Handbook vol.8, 1993

4.3.5 Parâmetros para simulação de resfriamento pós soldagem

Para visualizar as transformações de fase que ocorreram no aço de baixa liga HT8 após a soldagem, foi utilizado o programa AC3. No programa os seguintes parâmetros foram adotados:

a. Composição química: utilizou-se os valores limites da composição química do aço HT8, apresentado na tabela 1. Porém, a concentração de 2% de cromo, ao invés de 2,6%, foi utilizada por ser o valor máximo admitido pelo programa.

b. Temperatura de início de resfriamento: Adotaram-se 3 diferentes temperaturas para realizar o estudo com maior precisão, 950°C, 850°C e 750°C (valor mínimo estipulado pelo programa). Com isto, simulou-se o ocorrido em diferentes regiões da ZTA que sofreram austenitização (total ou parcial).

c. Tempo que se manteve o material sob aquecimento: Este tempo é referente ao tempo que o material ficou sob as temperaturas de (950°C, 850°C ou 750°C). Foi adotado, para todas as 3 visualizações, 20 minutos. Intervalo de tempo semelhante ao que foi necessário para a realização da solda no tubo composto.

d. Resfriamento: No resfriamento foi adotado como meio de resfriamento o ar sob nenhuma agitação (ou seja, ar calmo); Temperatura de início de resfriamento: 232°C (valor

máximo admitido pelo programa); Temperatura final de resfriamento: 25°C, Temperatura ambiente: 25°C.

e. Geometria material resfriado: Foi adotado como entrada uma chapa de 6,6 mm de espessura.

4.3.6 Análise metalográfica

Os corpos de prova foram cortados respectivamente da seguinte maneira:

- Corpos de prova sem solda: focando a análise metalográfica tanto da região da fratura como de sua estrutura original de ensaio de tração, foi usinado uma parte com a proximidade de 1 centímetro ou menos da região da fratura.

- Corpos de prova com solda: Focando a análise metalográfica das regiões presentes na solda e também a região do metal de base, foi usinado uma parte em que se encontrava todas estas regiões.

Devido à espessura do corpo de prova, cada uma das partes obtidas foram usinadas longitudinalmente, permitindo o embutimento sem o uso de um baquelite com uma espessura exagerada.

Os ataques utilizados para evidenciar a estrutura do aço de baixa liga HT8 e a liga de níquel Sandvik Sanicro 28[®] foram respectivamente Nital 4% e V2A (7,6% HCl, 47,6% H₂O e 4,8% HNO₃) eletrolítico (com 4V por 1 segundo) à temperatura ambiente.

Conforme apresentado na figura 33, de cada corpo de prova soldado se tirou 4 metalografias da zona afetada pelo calor e 1 foto da zona de fusão de um dos CPs foi selecionada para ser a representante desta região e para os que não sofreram solda, foram retiradas 8 micrografias, sendo 4 do material de base não encruado e 4 do encruado devido à deformação plástica decorrente da fratura que o material sofreu no ensaio de tração.

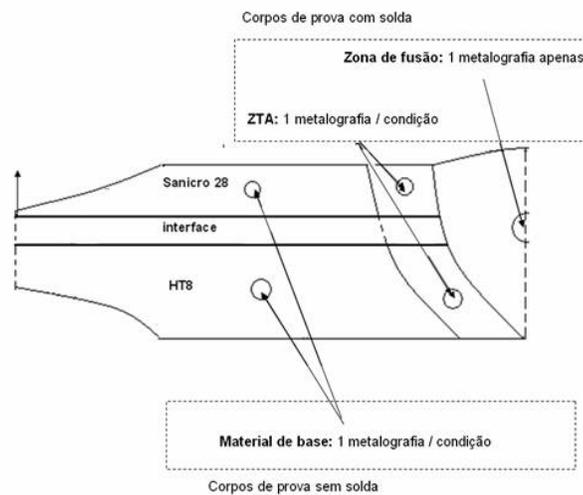


Figura 33: Ilustração esquemática do local e da maneira que foi realizada a seqüência de análise metalográfica dos corpos de prova de número ímpar.

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização dos ensaios: de tração em todos os corpos de prova, de microdureza nos corpos de prova com solda e pela previsão feita pelo programa AC3 das possíveis fases presentes na ZTA, é possível construir um quadro que permite o estudo da influência da solda no comportamento mecânico do tubo composto quando aplicado em um superaquecedor em uma caldeira de incineração de lixo, sendo possível observar as conclusões feitas, pela comparação entre as metalografias do material que não sofreu com a energia térmica proveniente da solda com o que sofreu.

Para iniciar esta discussão, é necessário, primeiramente, a análise do comportamento mecânico dos corpos de prova que não sofreram com a energia térmica proveniente da solda.

5.1 Curvas de tensão de tensão-deformação dos corpos de prova sem solda

Para identificar as propriedades mecânicas do corpo de prova antes de realizar o tratamento térmico ou tração na temperatura de 430°C, são tracionados os corpos de prova 1 e 2. Suas respectivas curvas de tensão-deformação são apresentadas na figura 34 e os valores de limite de escoamento (LE), de resistência mecânica (Resist. Mec), alongamento e suas médias dos respectivos CPs são ilustrados na tabela 14.

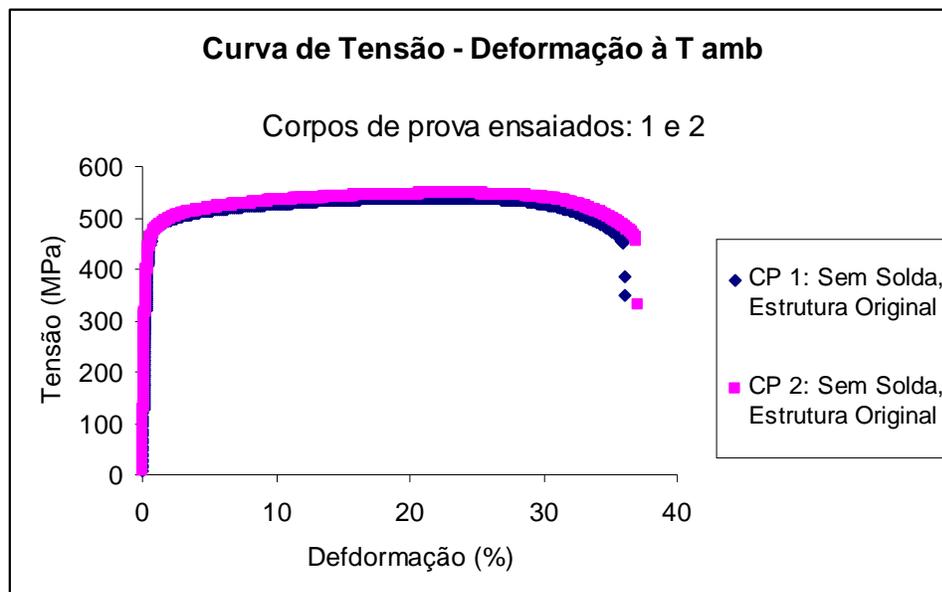


Figura 34: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura ambiente para os corpos de prova de estrutura original e se solda (1 e 2).

Fonte: Autor.

Tabela 14: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 1 e 2.

	LE	L. Resist. Mec.	Alongamento
CP	(MPa)	(MPa)	(%)
1	460	539	36,09
2	455	548	37,04
Média	457,5	543,5	36,57

Fonte: Autor.

Nota-se que o limite de escoamento extraído de ambas as curvas apresentadas na figura 34 é mais que o dobro do valor em teoria, apresentado no tópico 3.3. Embora atuando em conjunto com o aço de baixa liga HT8 tenha-se a liga Sandvik Sanicro 28[®], o valor obtido ainda é elevado demais. Sugere-se: tal variação é, em parte, decorrente do encruamento proveniente da prensagem das tiras cortadas a partir dos tubos, conforme descrito no tópico 4.3 ou que houve uma variação no processo de co-extrusão ou trabalho a frio ao longo da fabricação do tubo ou mesmo pela simples variação de composição química do material.

Em relação à ductilidade do material, está de acordo com o previsto na teoria uma vez que o alongamento obtido é fiel à literatura, cujo valor é de 35%.

Com o conhecimento do comportamento mecânico dos CPs sem influência térmica, pode-se analisar a influência do tratamento térmico a 430°C por 72 horas sobre as

propriedades do material por meio da figura 35, que apresenta as curvas de tensão-deformação dos corpos de prova 5 e 6. Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 15.

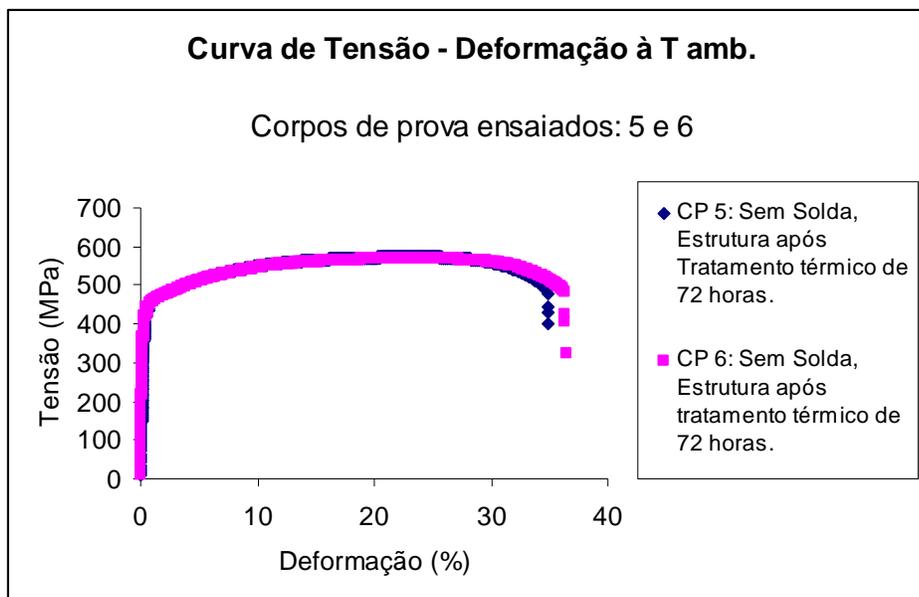


Figura 35: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura ambiente para os corpos de prova que sofreram tratamento térmico a 430°C por 72 horas (5 e 6).

Fonte: Autor.

Tabela 15: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 5 e 6.

	LE	L. Resist. Mec.	Alongamento
CP	(MPa)	(MPa)	(%)
5	435	574	34,94
6	420	570	36,43
Média	427,5	572	35,69

Fonte: Autor

Ao se comparar as médias de LE e Resist. Mec. da tabela 14 com a 15, nota-se uma pequena variação de 6,56% no limite elástico e de 4,99% no de resistência mecânica, por parte dos corpos de prova 5 e 6. Pode-se dizer que esta variação foi devido ao tratamento térmico uma vez ambos os corpos de prova 5 e 6 comportaram-se da mesma maneira, conforme ilustra a figura 35. Como resposta a esta variação no comportamento mecânico do material sugere-se que o tratamento térmico de envelhecimento, ou seja, antes de iniciar o tratamento térmico a 430°C por 72 horas os elementos no material encontravam-se em solução sólida. No entanto, manter o material aquecido por 72 horas e em seguida resfriá-lo ao ar calmo, permitiu a precipitação dispersa dos elementos de liga, promovendo uma dificuldade no deslocamento das discordâncias e consequentemente resultando no respectivo

aumento do limite de resistência mecânica, quando comparado ao material tracionado à temperatura ambiente com estrutura original.

Apesar de tais alterações o alongamento se manteve similar em ambas as condições de ensaio e conseqüentemente não houve influência do tratamento térmico sobre a ductilidade do material.

Para evidenciar a influência da temperatura de 430°C sobre o comportamento mecânico do material, é necessário a análise das curvas de tensão-deformação, apresentadas na figura 36, dos corpos de prova 9 e 10 e a comparação com as apresentadas na figura 34.

Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 16.

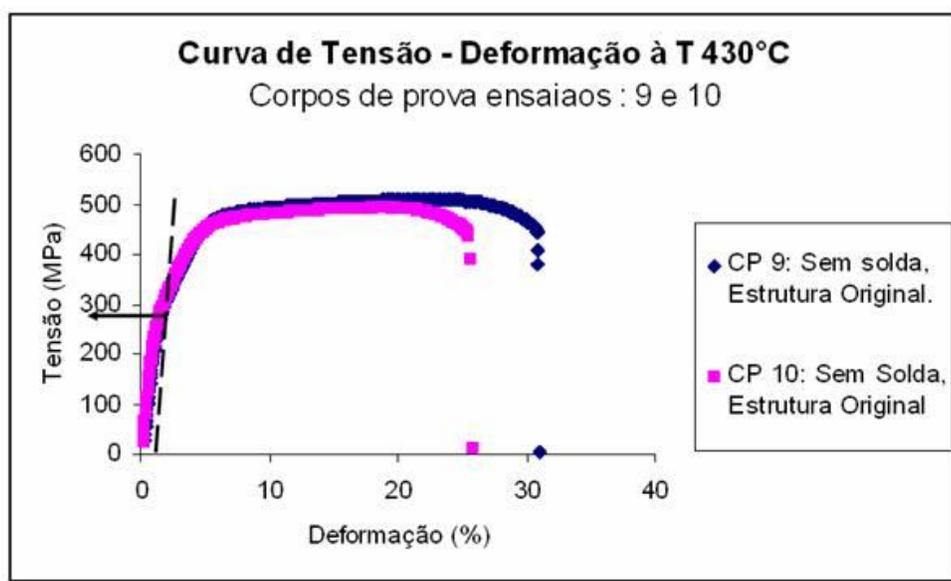


Figura 36: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura de 430°C para os corpos de prova de estrutura original (9 e 10).

Fonte: Autor

Tabela 16: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 9 e 10.

	LE	L. Resist. Mec.	Alongamento
CP	(MPa)	(MPa)	(%)
9	≈ 280	510	31,06
10	≈ 280	493	25,8
Média	≈ 280	501,5	28,43

Fonte: Autor.

Pelo não uso do extensômetro, conforme apresentado no tópico 4.3.3, os valores obtidos para a determinação do limite de escoamento do material ficaram imprecisos, impossibilitando a sua marcação automática. Para a determinação do LE, foi traçada uma

reta paralela ao regime elástico do material em uma suposta deformação de 0,2%. O ponto em que a reta se cruza com a respectiva curva de tensão-deformação é referente à tensão necessária para atingir o limite de escoamento do material. Essa prática envolve um grande erro, no entanto permite ter-se uma idéia do comportamento do material sob a temperatura de 430°C.

Por meio da comparação dos valores da tabela 14, cujos corpos de prova são de estrutura original e tracionados à temperatura ambiente, com os da tabela 16, nota-se uma grande variação do limite de escoamento, em torno de 38,8%, e de 7,73% no limite de resistência mecânica por parte dos CPs tracionados à temperatura de 430°C. Isto indica que quando o material sem solda é aplicado na respectiva temperatura, os esforços mecânicos aos quais o tubo será submetido deverão ser inferiores quando comparado às condições de ensaio de CP com estrutura original ou após tratamento térmico em temperatura ambiente.

No entanto, em relação à tensão necessária para ruptura do material não haveria alteração tão elevada como a evidenciada no LE.

Em relação à ductilidade do material, embora os corpos de prova 9 e 10 tenham atuado de forma diferente entre si, pode-se notar que em ambas as curvas tensão-deformação houve uma queda do alongamento.

Com o conhecimento da influência da temperatura e do tempo de exposição à mesma sobre as propriedades mecânicas originais (após encruamento) do material, é possível analisar seu comportamento, por meio da figura 37, em uma caldeira, cujo tubo presente no superaquecedor foi aquecido durante 3 dias antes do equipamento entrar em funcionamento.

Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 17.

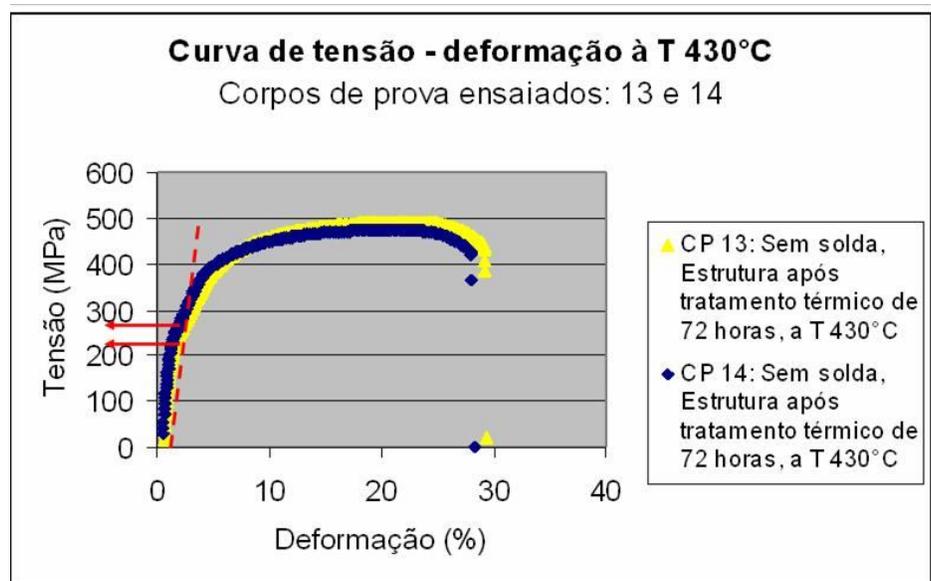


Figura 37: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura de 430°C para os corpos de prova de estrutura após tratamento térmico a 430°C por 72 horas (13 e 14).

Fonte: Autor.

Tabela 17: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 13 e 14.

CP	LE (MPa)	L. Resist. Mec. (MPa)	Alongamento (%)
13	≈ 220	493	29,37
14	≈ 270	476	28,27
Média	≈ 245	484,5	28,82

Fonte: Autor

Os valores apresentados na tabela 17 indicam uma queda das propriedades mecânicas do material quando comparado à tabela 14. Pelo limite de escoamento e de resistência mecânica serem similares aos obtido nos corpos de prova tracionados à temperatura de 430°C, cujos valores estão presentes na tabela 16, o material foi mais afetado pela temperatura de 430°C que pelo tratamento térmico realizado anteriormente. Sendo conseqüentemente seu alongamento similar aos corpos de prova de estrutura original tracionados na temperatura de uso da caldeira de incineração de lixo.

Observado a influência de tais condições sobre as propriedades mecânicas do tubo composto, é possível analisar as alterações que a solda promove sobre a estrutura do respectivo material quando aplicado nas mesmas condições.

5.2 Curvas de tensão de tensão-deformação dos corpos de prova com solda

Para melhor visualização das condições a serem comparadas para definir, por meio do ensaio de tração, a influência da solda no comportamento mecânico do tubo composto é apresentada a figura 38, que ilustra para cada condição um corpo de prova sem solda e outro com solda.



Figura 38: São apresentados 1 corpo de prova fraturado de cada condição de ensaio de tração.
Fonte: Autor.

Embora na figura 38 possa ser observado apenas 1 corpo de prova soldado em cada condição, todos os CPs com solda romperam fora da região da solda. Levantando-se a hipótese de tal fato ter ocorrido devido à questão de overmatch, relação apresentada no item 3.6.1. Para comprovar tal suposição, é necessário um ensaio de dureza para ser comprovada esta teoria, que será apresentado nos itens posteriores.

Para a análise da soldagem sobre as propriedades mecânicas originais do tubo composto, é apresentada a figura 39, que ilustra as curvas de tensão-deformação dos corpos de prova 3 e 4 que foram somente soldados. Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 18.

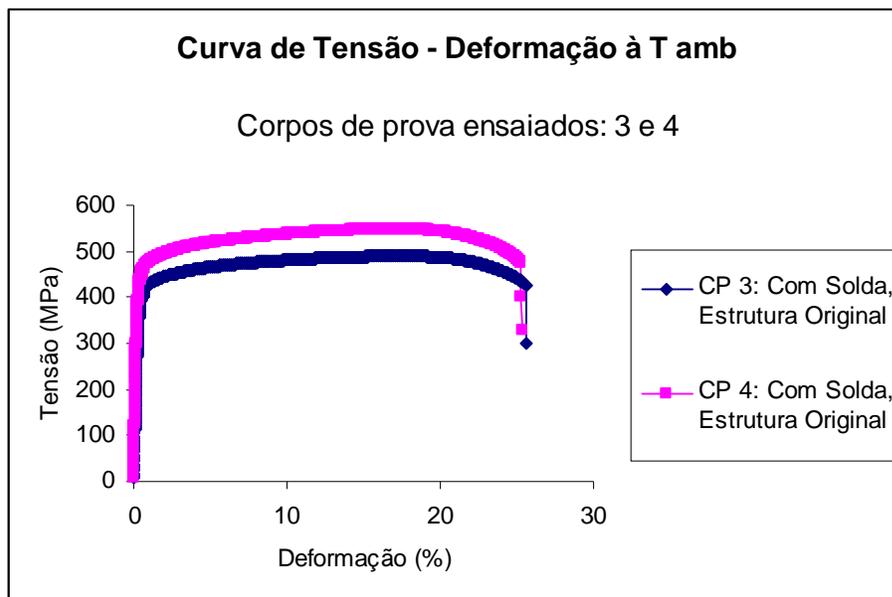


Figura 39: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura ambiente para os corpos de prova (3 e 4) de estrutura original após soldagem .

Fonte: Autor.

Tabela 18: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 3 e 4.

CP	LE (MPa)	L. Resist. Mec. (MPa)	Alongamento (%)
3	390	489	25,66
4	450	548	25,32
Média	420	518,5	25,49

Fonte: Autor.

Ao analisar os valores presentes na tabela 18, nota-se que o corpo de prova 3 atuou de forma diferente que o 4. No CP 3 pode-se observar uma redução tanto do limite de escoamento como de seu limite de resistência mecânica, ao ser comparado com o 4, podendo ser tanto influência da solda como um defeito decorrente das etapas de obtenção do próprio corpo de prova ou do tubo em sí.

Tanto no CP 3 como 4 houve uma redução do alongamento ao ser comparado com os corpos de prova de estrutura original, sem solda e que foram tracionados à temperatura

ambiente, havendo a possibilidade da redução da ductilidade do tubo ser fruto de tensões residuais geradas após a soldagem.

Conforme apresentado tanto na sequência das condições do item 5.1., como na figura 38, é apresentada a figura 40, que contém as curvas de tensão-deformação dos corpos de prova 7 e 8, para analisar a influência da solda sobre o comportamento mecânico da estrutura após tratamento térmico a 430°C por 72 horas. Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 19.

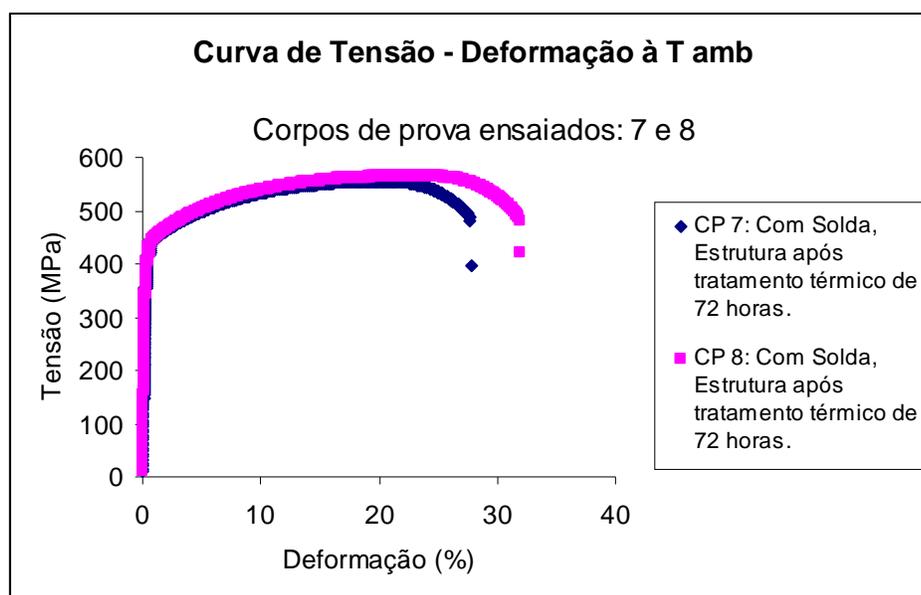


Figura 40: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura ambiente para os corpos de prova (7 e 8) de após tratamento térmico de 430°C por 72 horas e soldagem

Fonte: Autor.

Tabela 19: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 7 e 8.

	LE	L. Resist. Mec.	Alongamento
CP	(MPa)	(MPa)	(%)
7	415	556	27,79
8	420	566	31,91
Média	417,5	561	29,85

Fonte: Autor.

Conforme apresentado na tabela 19, cujos valores foram extraídos das curvas de tensão-deformação presente na figura 40, apesar do limite de escoamento e resistência mecânica terem sido similares, o alongamento dos corpos de prova 7 e 8 foram diferentes entre si.

Com a ocorrência da redução do alongamento, tal como apresentado na tabela 18, pode-se relacionar novamente com as tensões residuais provenientes da soldagem do tubo composto. No entanto, pode-se observar que a redução do alongamento não foi tão elevada como nos corpos de prova soldados que não sofreram tratamento térmico, conseqüentemente submeter o material à temperatura de 430°C por 72 horas contribuiu para a redução das tensões residuais e então uma maior ductilidade do material após a soldagem.

Para analisar a influência da exposição do material com solda à temperatura de 430°C enquanto é tracionado, é apresentada a figura 41. Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 20.

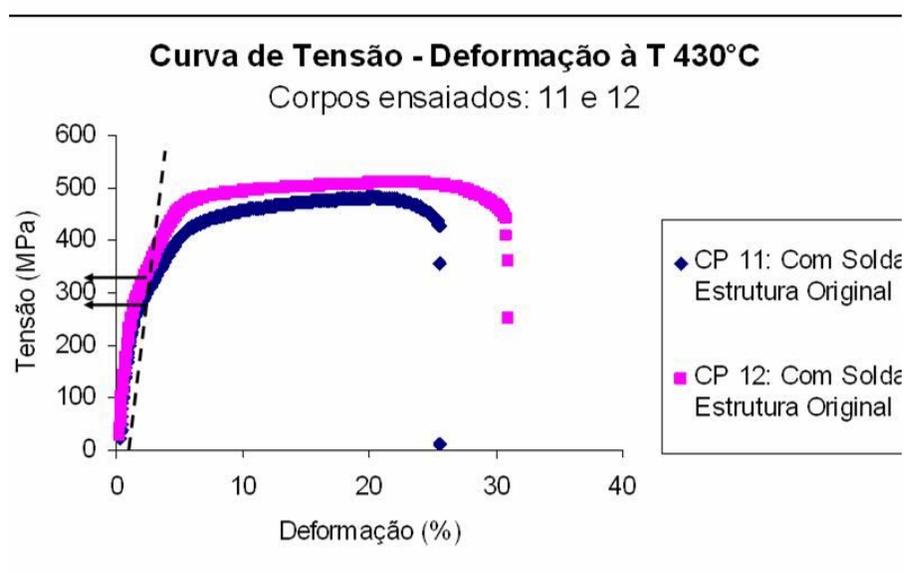


Figura 41: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura de 430°C para os corpos de prova (11 e 12) de estrutura original e após soldagem.

Fonte: Autor.

Tabela 20: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 11 e 12.

	LE	L. Resist. Mec.	Alongamento
CP	(MPa)	(MPa)	(%)
11	≈ 280	482	25,65
12	≈ 330	510	30,8
Média	≈ 305	496	28,22

Fonte: Autor.

Tal como pode-se observar na figura 41, o corpo de prova 12 apresentou maior LE, Lim. Resist. Mec e alongamento quando comparado ao CP 11.

Ao se comparar os corpos de prova 11 e 12 com os 9 e 10, observa-se quase nenhuma diferença entre suas propriedades mecânicas, ilustrando uma mínima influência da solda sobre o comportamento geral do material.

Para analisar o comportamento mecânico do tubo composto após sofrer manutenção por soldagem aplicado no superaquecedor a 430°C, presente uma caldeira, foi aquecida durante 3 dias antes de entrar em funcionamento, é apresentada a figura 42, cujas curvas de tensão-deformação dos corpos de prova 15 e 16 estão ilustradas. Os valores de limite de escoamento, resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias estão presentes na tabela 21.

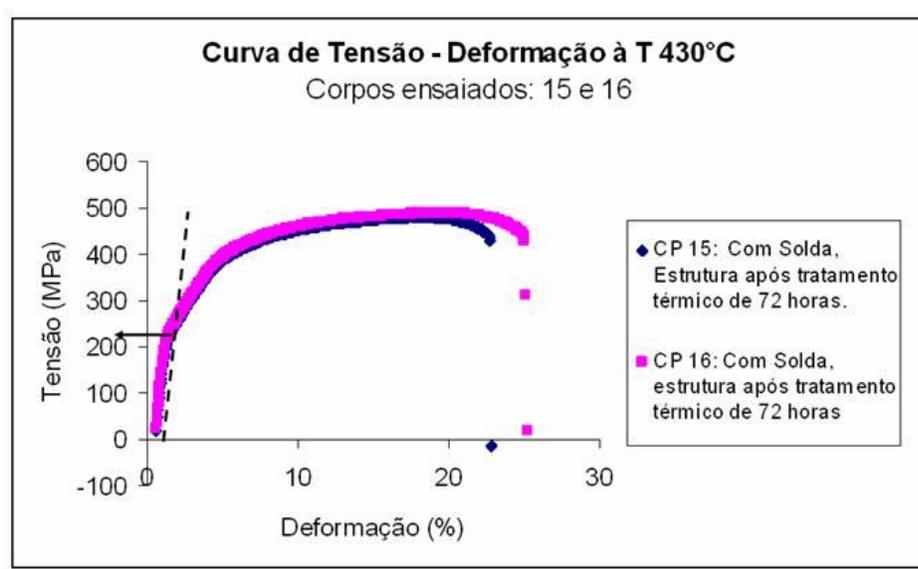


Figura 42: Curvas de tensão-deformação de ensaios realizados à temperatura de 430°C para os corpos de prova (15 e 16) de estrutura após tratamento térmico a 430°C por 72 horas e após soldagem.

Fonte: Autor.

Tabela 21: São apresentados o limite de escoamento, de resistência mecânica, alongamento e suas respectivas médias para os corpos de prova 15 e 16.

	LE	L. Resist. Mec.	Alongamento
CP	(MPa)	(MPa)	(%)
15	≈ 230	480	22,8
16	≈ 230	490	25,22
Média	≈ 230	485	24,01

Fonte: Autor.

Conforme apresentado na tabela 21, os corpos de prova 15 e 16 comportaram-se de forma similar, com exceção do alongamento.

Ao se comparar os valores obtidos por meio da figura 42 com os da figura 37, pode-se observar que o comportamento mecânico do tubo composto foi praticamente o mesmo, indicando uma pequena influência da solda sobre suas propriedades mecânicas.

Para melhor clareza dos valores obtidos nas respectivas condições de ensaio é ilustrada a tabela 22, que apresenta as médias de cada item utilizado na comparação de comportamento mecânico entre os materiais e as suas respectivas variações do limite de resistência mecânica com o de limite de escoamento do material.

Tabela 22: São apresentadas as respectivas médias de valores de limite de escoamento, de resistência mecânica e alongamento para as respectivas condições de ensaio.

Temperatura	Estrutura	Sem solda	Com solda
Temperatura ambiente	Sem tratamento térmico a 430°C por 72 horas	Média do LE = 457,5 MPa	Média do LE = 420 MPa
		Média do L. Resist. Mec = 549,5 MPa	Média do L. de Resist. Mec = 518,5 MPa
		Média de A(%) = 36,57%	Média do A (%) = 29,85%
	Com tratamento térmico a 430°C por 72 horas	Média do LE = 427,5 MPa	Média do LE = 417,5 MPa
		Média do L. Resist. Mec = 571 MPa	Média do L. Resist. Mec = 561 MPa
		Média do A (%) = 35,69 %	Média do A(%) = 29,85 %
Temperatura de 430°C	Sem tratamento térmico a 430°C por 72 horas	Média do LE \approx 280 MPa	Média do LE \approx 305 MPa
		Média do L. Resist. Mec = 501,5 MPa	Média do L. Resist. = 496 MPa
		Média do A (%) = 28,43 %	Média do A (%) = 28,22 %
	Com tratamento térmico a 430°C por 72 horas	Média do LE \approx 245 MPa	Média do LE \approx 230 MPa
		Média do L. de Resist. = 484,5 MPa	Média do L. Resist. Mec= 485 MPa
		Média do A (%) = 28,82 %	Média do A (%) = 24,01 %

Fonte: Autor

Para comprovar a hipótese de overmatch como a causa da ruptura do material fora da região da solda e análise das diferentes zonas no material soldado, foi realizado, conforme apresentado no item 4.3.4, ensaio de microdureza em um corpo de prova soldado de cada condição.

5.3 Valores de microdureza para CPs soldados nas diferentes condições

Tal como pode ser observado nas figuras 43, 45, 47 e 49, três regiões podem ser distinguidas ao longo dos 20 pontos realizados no aço de baixa liga nas condições respectivas às amostras. Enquanto que na liga Sandvik Sanicro 28[®] das respectivas amostras, apresentadas pelas figuras 44, 46, 48 e 50, apenas um comportamento homogêneo foi observado.

Por meio da análise dos pontos da figura 43, em que são ilustrados os pontos de microdureza feitos no aço de baixa liga de um corpo de prova de estrutura original que foi soldado, é possível analisar de forma indireta a microestrutura do CP.

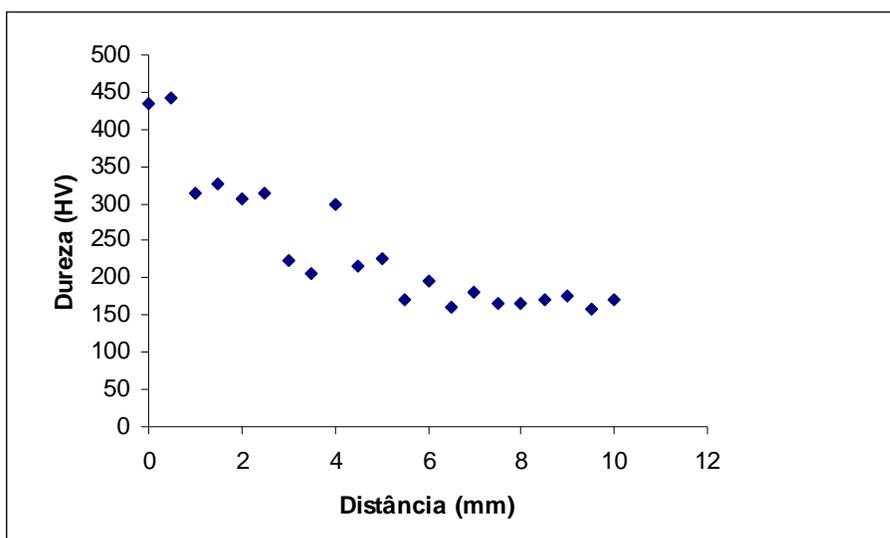


Figura 43: São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 3, que foi apenas soldada e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

Como a medição dos 20 pontos iniciou-se no centro da zona de fusão, pode-se associar uma maior dureza à mesma, ou seja, uma maior resistência mecânica ao material de adição (liga 90S- B3, conforme apresentada na tabela 6, no tópico 3.6), quando comparado ao material de base, apresentado na tabela 4 do tópico 3.3, ilustrado pelos pontos de menor dureza. Esta relação leva à condição de Overmatch, conforme apresentado no tópico 3.6.1.

Na região intermediária à zona de fusão e ao material de base tem-se, de acordo com a figura 10 presente no tópico 3.6, a zona termicamente afetada.

Por possuir uma dureza superior ao apresentado pelo material de base, sugere-se que a estrutura desta região é composta por uma ou mais fases de maior dureza, o que explica, em parte, a fratura do corpo de prova na zona de menor resistência mecânica, ou seja, no material de base. Todavia, não houve alterações na estrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®], conforme ilustrado pela figura 44. Ao apresentar uma homogeneidade em sua estrutura indica que apesar da realização da solda, a liga não apresentou alterações em sua microestrutura e conseqüentemente não variando em termos de resistência mecânica, levando-se à condição de evenmatch

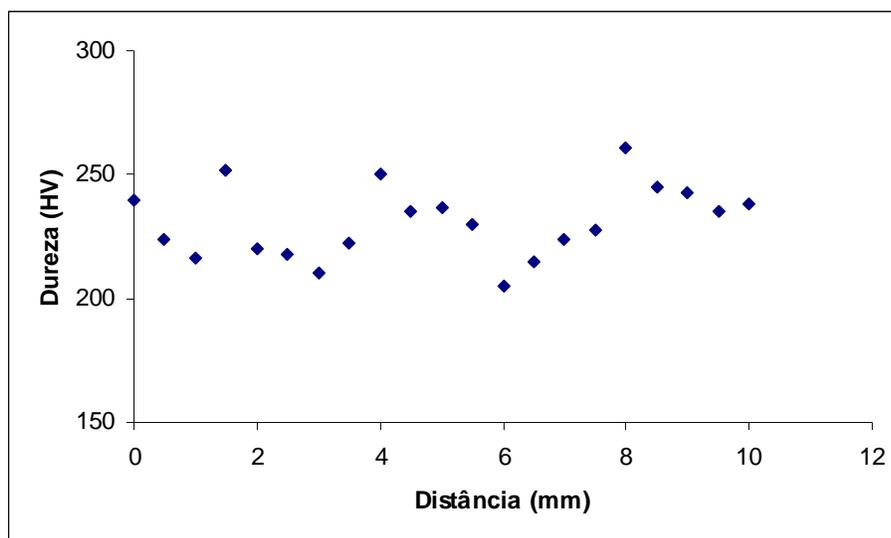


Figura 44: São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 3, que foi apenas soldada e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

A fim de analisar os pontos de microdureza para o corpo de prova que sofreu tratamento térmico a 430°C por 72 horas após soldagem e foi tracionado à temperatura ambiente, é apresentada a figura 45.

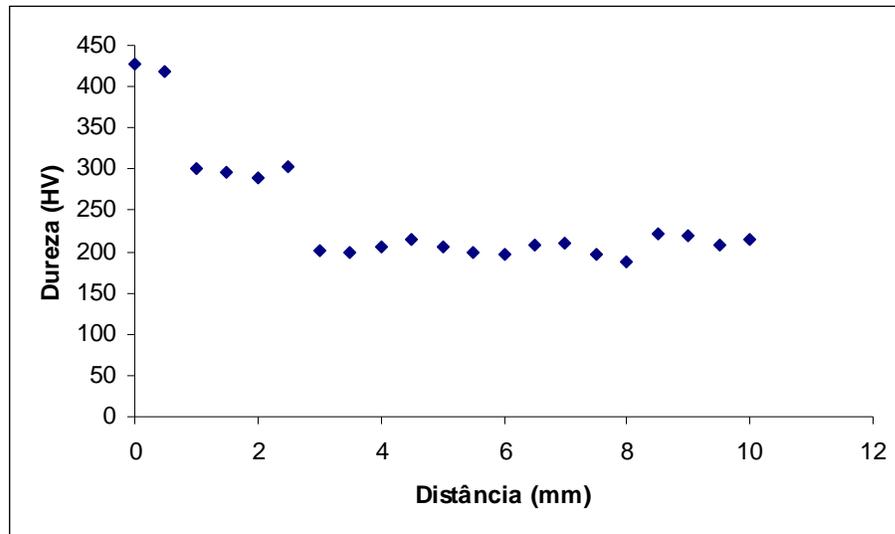


Figura 45: São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 7, que foi tratada termicamente a 430°C por 72 horas após a soldagem e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

Conforme observado, houve novamente a condição de overmatch e que a dureza da ZTA permanece praticamente a mesma quando comparada à presente na figura 43, indicando uma estrutura similar em ambas as condições.

Pode-se notar também que a faixa, do material de base, em que os pontos de microdureza se encontram é pouco superior à evidenciada na figura 43, justificando os valores apresentados de resistência mecânica dos respectivos corpos de prova ilustrados nas tabelas 14 e 16.

Para comparação entre o comportamento mecânico das ligas Sandvik Sanicro 28[®] do respectivo corpo de prova com a do de estrutura original e tracionado à temperatura ambiente, é apresentada a figura 46.

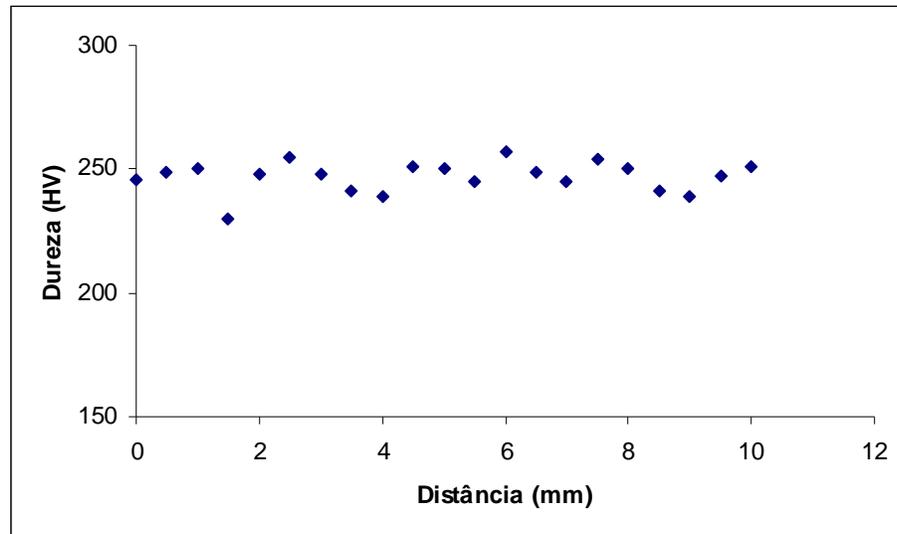


Figura 46: São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 7, que foi tratada termicamente a 430°C por 72 horas após a soldagem e ensaiada à temperatura ambiente, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

Ao comparar com a figura 44, nota-se que os valores apresentados sofreram uma menor variação que em condição sem tratameto térmico. A fim de comparar com a figura 43, para evidenciar a influência da temperatura sobre as zonas presentes na solda é apresentada a figura 47.

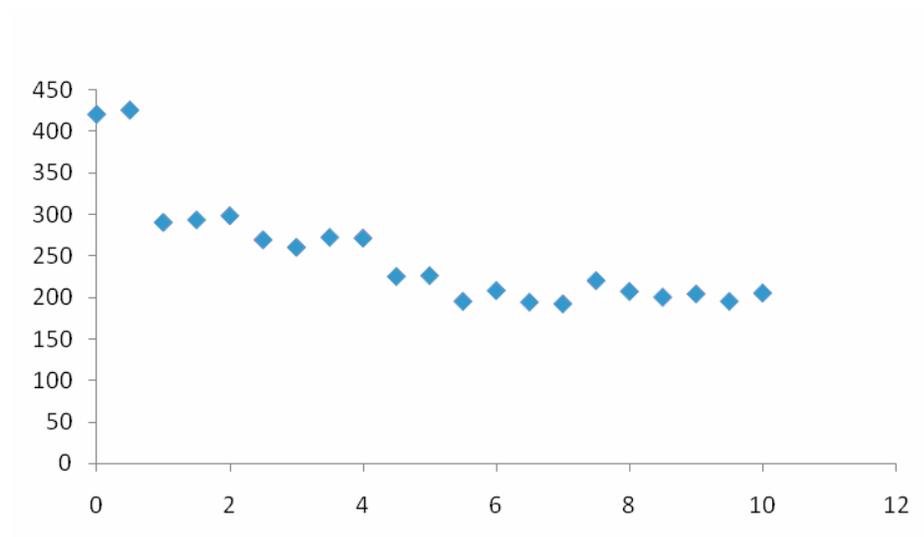


Figura 47: São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 11, soldada e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

Nota-se que apesar da aplicação da temperatura de 430°C, tal como após tratamento térmico, a dureza do cordão de solda não variou, indicando constância em sua resistência mecânica e conseqüentemente na condição de overmatch.

Os pontos pertencentes a zona termicamente afetada mantêm-se na mesma faixa que nas figuras 43 e 45, indicando que possuem uma estrutura semelhante umas às outras.

Apesar da queda da resistência mecânica do material, quando tracionado à temperatura de 430°C, a dureza do material de base neste CP manteve-se a mesma, contrariando os resultados obtidos no ensaio de tração para esta condição em específico.

Para evidenciar as possíveis alterações na resistência mecânica na liga Sandvik Sanicro 28[®] após soldagem e sob temperatura de 430°C é apresentada a figura 48.

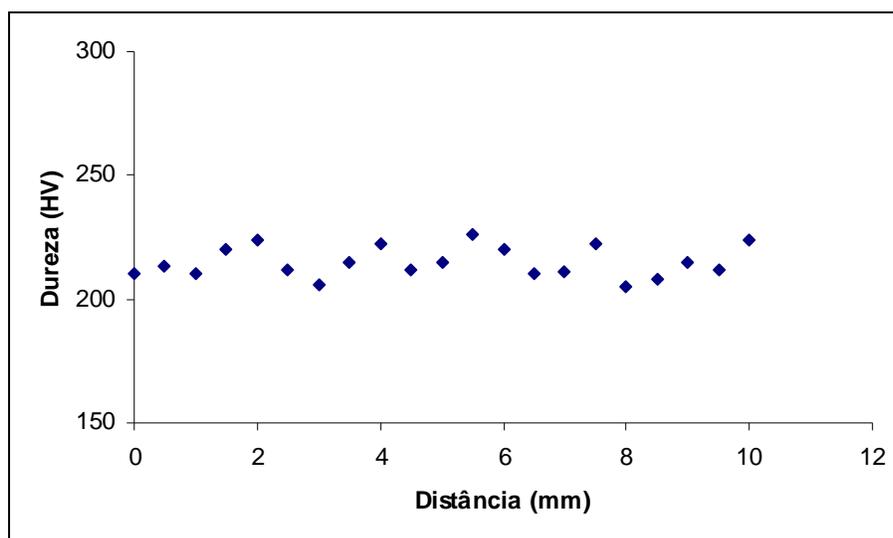


Figura 48: São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 11, que foi soldada e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

Ao contrário do material de base para o aço de baixa liga HT8, a liga Sandvik Sanicro 28[®], sob temperatura de 430°C, apresentou uma degradação de sua resistência mecânica quando comparada com as condições de estrutura original após soldagem e após soldagem e tratamento térmico a 430°C por 72 horas. Fenômeno evidenciado anteriormente nos tópicos 5.1 e 5.2.

Para avaliar o comportamento da solda quando o tubo se encontra aplicado em um superaquecedor a 430°C em uma caldeira que esteve sob aquecimento prévio também a 430°C por 72 horas é apresentada a figura 49.

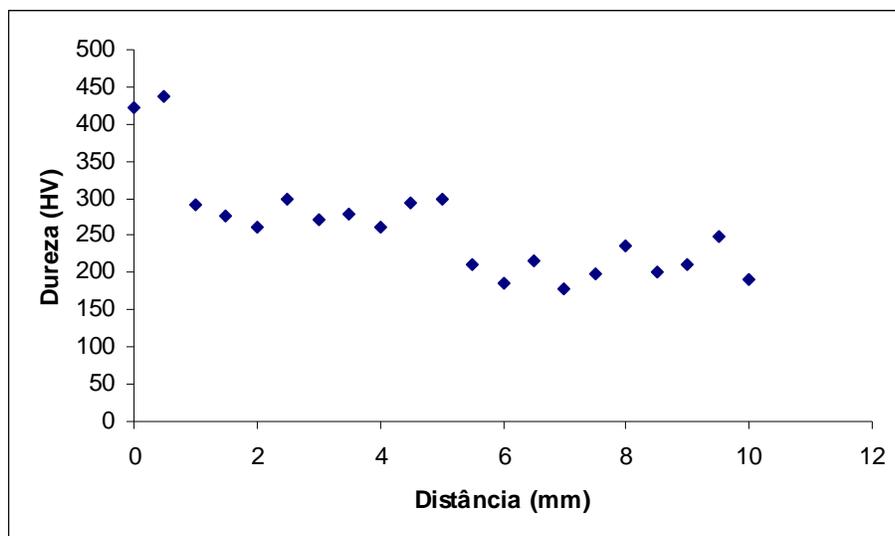


Figura 49: São apresentados os pontos de dureza (HV) do aço de baixa liga HT8 obtidos na amostra 15, soldada, tratada termicamente a 430°C por 72 horas e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

A dureza da zona de fusão manteve-se a mesma, concluindo que o tubo composto pode ser aplicado, após a manutenção por soldagem, em um superaquecedor nas respectivas condições e manter a condição de overmatch, definindo como a região de ruptura do tubo o material de base. Nota-se que a dureza da ZTA manteve-se similar às presentes nas demais condições, presentes nas figuras 43,45 e 47, indicando uma constância da estrutura nesta região.

Em relação ao material de base, os valores de dureza obtidos indicam uma estrutura similar às apresentadas nas figuras 45 e 47. A fim de avaliar o comportamento mecânico da liga Sandvik Sanicro 28[®] sob a respectiva condição, é apresentada a figura 50.

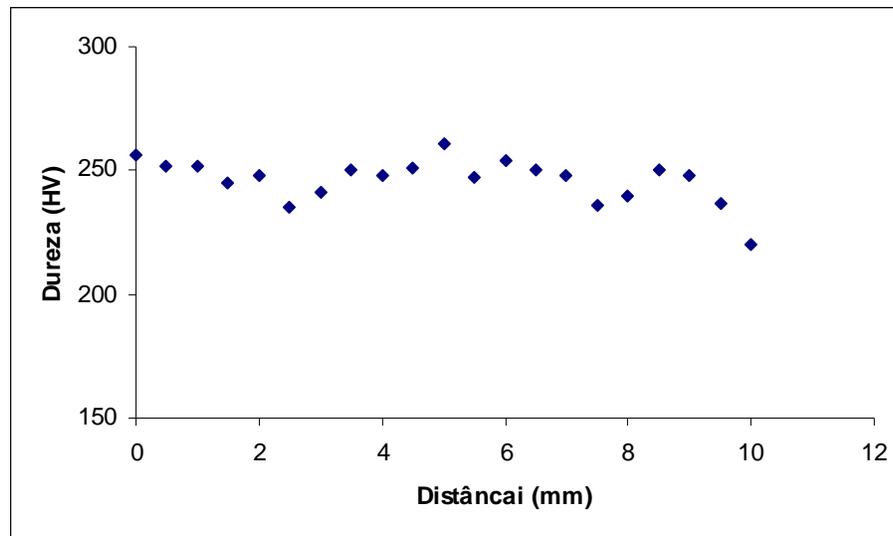


Figura 50: São apresentados os pontos de dureza (HV) da liga Sandvik Sanicro 28[®] obtidos na amostra 15, que foi soldada, tratada térmicamente à temperatura de 430°C por 72 horas e tracionada à temperatura de 430°C, com passo de 0,5 mm por meio de um micrômetro com 1 kg de carga.

Fonte: Autor.

Ao se comparar a figura 50 com a 46 e 48, nota-se um comportamento intermediário, apresentando tal como as demais, uma não influência da solda sobre a resistência mecânica da liga, conseqüentemente mantendo suas propriedades mecânicas semelhantes à do tubo composto anteriormente submetido à manutenção por soldagem.

Para se ter uma idéia das possíveis fases presentes na zona termicamente afetada, presente no aço de baixa liga HT8, é realizada uma simulação pelo programa AC3, disponibilizado pela FEI.

5.4 Simulação de resfriamento após soldagem no aço de baixa liga HT8

Para a identificação da(s) fase (s) de presente na ZTA e portanto, a razão de maior dureza na região, foi realizada a simulação com base nos parâmetros previamente definidos no tópico 4.3.5, para 3 temperaturas diferentes pelas quais o material foi aquecido e em seguida resfriado ao ar calmo : 950°C, 850°C e 750°C, obtendo-se as respectivas porcentagens de fase(s) e curvas TTT:

- a. 950°C, foi obtida uma microestrutura de 100% martensita

b. 850°C, foi obtida uma microestrutura de 40% martensita, 50% bainita e 10% ferrita.

c. 750°C, foi obtida uma microestrutura de de 30% bainita e 70% ferrita.

As durezas, medidas em RC, foram respectivamente 41, 39 e 33.

Para a visualização de toda a discussão realizada nos tópicos 5.1, 5.2 e 5.3, é feita a análise metalográfica dos corpos de prova submetidos às condições estudadas.

5.5 Análise metalográfica

5.5.1 Comportamento da estrutura sem a influência da solda

Sob nenhuma influência térmica, a estrutura do aço HT8 pode ser representada pela metalografia da figura 51, à esquerda. Esta possui um retângulo vermelho indicando a região que foi ampliada em 100X e apresentada à direita.

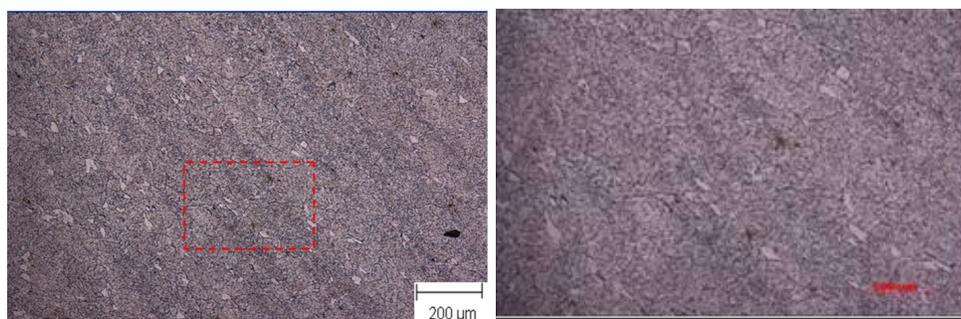


Figura 51: A microestrutura da esquerda, com aumento de 100X, é referente ao aço carbono de baixa liga HT8 sem influência térmica, ou seja, dos corpos de prova 1 e 2, cuja estrutura se mostra orientada no sentido da diagonal. Com um retângulo, é representada a região da metalografia à direita que possui um aumento de 200X. Nesta também se vê uma estrutura homogênea orientada no mesmo sentido.

Fonte: Autor.

A microestrutura da figura 51, ou seja da condição original do material, é composta por bainita. Sugere-se que uma outra razão, além das descritas no tópico 5.1, do valor de limite de escoamento obtido em prática, é a presença da microestrutura bainítica no material.

A liga Sandvik Sanicro 28[®], que permanece na parte externa do tubo composto, ao não sofrer com a adição de energia térmica, é representada pela figura 52.

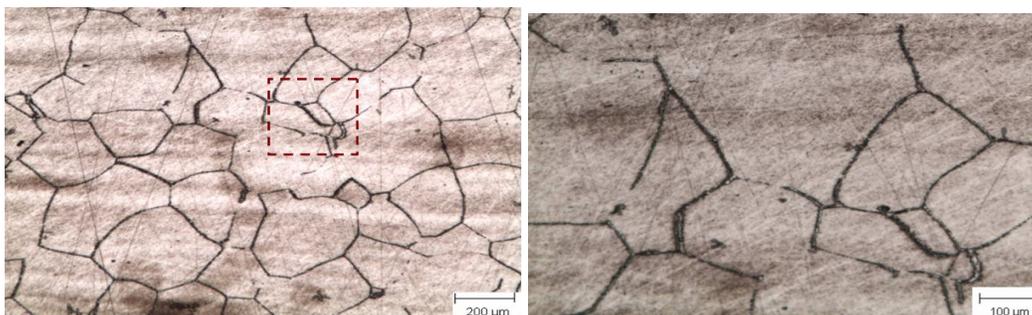


Figura 52: A microestrutura da esquerda é referente à liga Sandvik Sanicro 28[®] com aumento de 100X, sem influência térmica, ou seja, aos corpos de prova 1 e 2. Nesta estrutura, um retângulo em vermelho indica a região de análise da metalografia à direita com aumento de 200X.

Fonte: Autor

Conforme pode ser observado na figura 52, os grãos da liga são mais grosseiros que os da estrutura de aço de baixa liga HT8. Com base nos valores retirados da literatura, apresentados no tópico 3.2 e 3.3, para estas respectivas microestruturas seus valores de limite de escoamento são semelhantes.

Para analisar se houve alteração na estrutura do aço HT8 da condição de estrutura original para a que sofreu tratamento térmico a 430°C por 72 horas, é apresentada a figura 53, que ilustra a microestrutura com 200X de aumento, não necessitando de outras devido ao comportamento semelhante em toda a camada do aço.

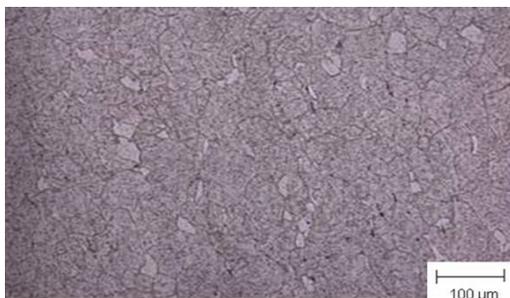


Figura 53: É apresentada a microestrutura do aço de baixa liga HT8, dos corpos de prova 5 e 6, após tratamento térmico a 430°C por 72 horas, com 200X de aumento.

Fonte: Autor.

Ao se comparar com a figura 51, continua a apresentar a fase bainita. É observado também um pequeno aumento dos grãos, o que explica a redução do limite de escoamento conforme apresentado na tabela 22. A sugestão de envelhecimento não pode ser comprovada com o aumento de 200X utilizado, necessitando de uma análise microestrutural mais profunda.

Para analisar a influência do tratamento térmico sobre a liga Sandvik Sanicro 28[®], presente no corpo de prova 5 e 6, é apresentada a sua microestrutura, ilustrada pela figura 54 com 200X de aumento.

Uma vez que esta liga apresentou um comportamento homogêneo, sua estrutura pode ser representada somente pela metalografia 54, com 200X de aumento.



Figura 54: A metalografia, com 200X de aumento, representa a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] dos corpos de prova 5 e 6, que sofreram tratamento térmico a 430°C por 72 horas e ensaiados à temperatura ambiente.

Fonte: Autor.

Ao ser comparada com a estrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] em sua condição original, nota-se que os grãos mantem-se semelhantes. Indicando que a variação no comportamento mecânico do tubo composto tem maior influência no aço de baixa liga HT8.

Com o objetivo de observar as alterações microestruturais decorrentes da influência da temperatura de ensaio de 430°C sobre a estrutura do aço de baixa liga HT8 em sua condição original, é apresentada a figura 55 com 200X de aumento. Não necessitando de um número maior de figuras devido ao comportamento homogêneo da microestrutura sob estas condições.

Ao se observar a microestrutura da figura 55 (sob condição de ensaio a 430°C), nota-se uma microestrutura composta por ferrita e perlita, tal como as presentes nas figuras 51 e 53.

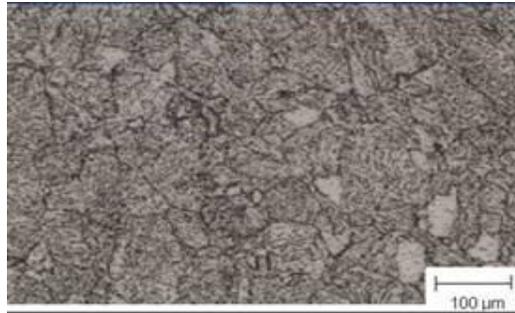


Figura 55: É apresentada a microestrutura do aço de baixa liga HT8 tracionado à temperatura de 430°C, pertencente aos corpos de prova 9 e 10, com 200X de aumento.
Fonte: Autor.

Em relação à estrutura da figura 51 (que ilustra a microestrutura original do aço de baixa liga HT8), houve um aumento evidente dos grãos quando comparado com a estrutura original, explicando o fato de ter ocorrido tamanha variação do limite elástico de ambos os corpos de prova, ilustrada na tabela 22 por meio de médias.

Tal como feito para a estrutura de aço de baixa liga HT8, é apresentada e analisada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] sob a condição de ensaio a 430°C, por meio da figura 56, com 200X de aumento.



Figura 56: É apresentada a metalografia da microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] das amostras 9 e 10, com 200X de aumento, submetida a ensaio de tração sob a temperatura de 430°C.
Fonte: Autor.

Pode ser observado na figura 56 que houve também um aumento de grão na liga presente na parte externa do tubo composto, indicando um comportamento em conjunto ao aço de baixa liga HT8, havendo portanto uma degradação da resistência mecânica do tubo também devido à influência térmica sobre esta liga.

Na respectiva estrutura uma segunda fase pode ser observada devido ao surgimento de precipitados intragranulares (pontos pretos no interior do grão) por conta da temperatura de ensaio, anteriormente não presente na mesma liga sob sua condição original (figura 51) e após tratamento térmico a 430°C por 72 horas (figura 54).

Para analisar a microestrutura presente no aço de baixa liga presente no tubo composto quando aplicado a 430°C em um superaquecedor instalado em uma caldeira de incineração de lixo que permaneceu 3 dias sob aquecimento à mesma temperatura, é apresentada a figura 57 com 200X de aumento.

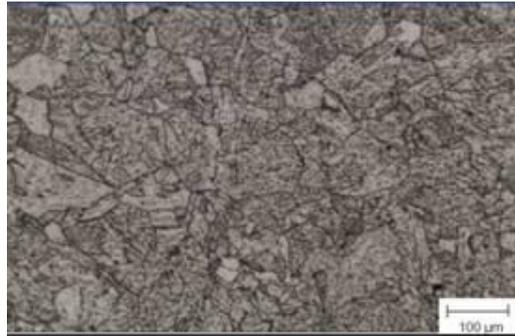


Figura 57: É apresentada microestrutura do aço de baixa liga HT8 dos corpos de prova 13 e 14, submetidos ao ensaio de tração à temperatura de 430°C e tratamento térmico a 430°C por 72 horas, com aumento de 200X. Fonte: Autor.

Pode-se notar que a estrutura apresentada na figura 57 é composta por bainita, conforme as estruturas apresentadas nas figuras 51, 53 e 55.

Ao se comparar com as estruturas dos corpos de prova sem solda submetidos à condição de pós tratamento térmico a 430°C por 72 horas e a de ensaiado à temperatura de 430°C, nota-se uma estrutura de tamanho de grão semelhante, se não pouco superior, ao da figura 55, alinhada portanto com a análise feita no tópico 5.1

Para analisar o comportamento mecânico da liga Sandvik Sanicro 28[®] é apresentada a figura 58, que ilustra a microestrutura da respectiva liga com aumento de 200X. Sendo apresentada somente esta figura devido à estrutura homogênea que esta apresentou.

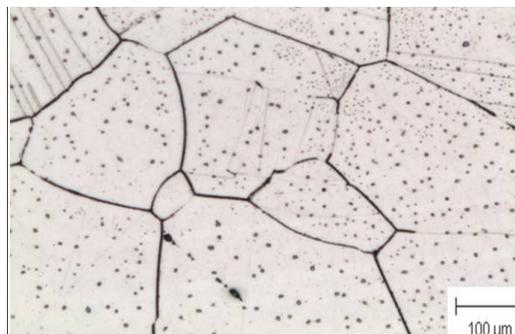


Figura 58: É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®], com aumento de 200X, pertencente aos corpos de prova 13 e 14, que foram submetidos a ensaio à temperatura de 430°C e tratamento térmico a 430°C por 72 horas.

Fonte: Autor.

Na figura 58, é possível observar a presença de precipitados intragranulares, já observados na figura 56. No entanto houve a formação de maclas, fase não evidenciada nas outras condições dos corpos de prova sem solda e conseqüentemente fruto da ação conjunta da condição de tratamento térmico e da temperatura de ensaio.

Em relação ao tamanho dos grãos da respectiva microestrutura, não houve variação quando comparada à figura 56, indicando um comportamento mecânico semelhante. Porém, não levando em conta a influência das segundas fases observadas sobre a resistência mecânica do tubo composto.

Uma vez registradas as variações na microestrutura por conta de cada uma das condições de ensaio de tração para os corpos de prova sem solda, é necessário o estudo da influência da solda sobre a estrutura tanto do aço de baixa liga HT8 como para a liga Sandvik Sanicro 28[®].

5.5.2 Comportamento da estrutura sob influência da solda

Com o objetivo de analisar a zona de fusão, é apresentada a figura 59, que ilustra a estrutura com 100X de aumento na região central do cordão de solda, ou seja, entre os dois passes de material de adição que foram realizados para a solda do tubo composto.

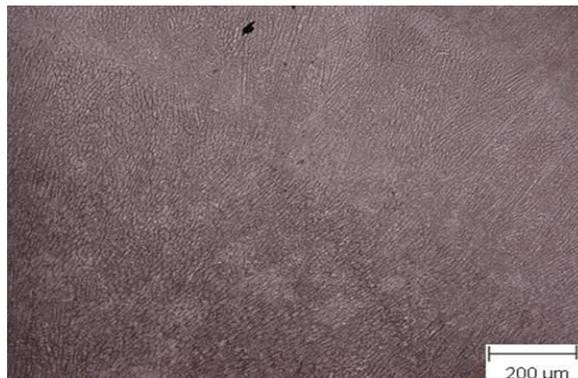


Figura 59: Apresenta a microestrutura da zona de fusão com aumento de 100X, sendo que esta metalografia foi retirada na região central do cordão de solda, ou seja, entre os dois passes de material de adição que foram realizados para solda do tubo composto. A região mais escura remete à zona mais próxima à raiz da solda, estando portanto mais próxima da ZTA. Na microestrutura pode-se observar os indícios que o material não possui uma estrutura trabalhada, mas sim de bruta de fusão.

Fonte: Autor.

Na figura 59, nota-se uma estrutura típica de zona de fusão. Com base nos ensaios de dureza presentes no tópico 5.3, esta região possui uma dureza mais elevada que as demais. Resultando na questão de overmatch, quando comparada ao material de base, provavelmente devido à sua estrutura martensítica/bainítica.

Outras figuras que se referem à zona de fusão, tal como a 59, não são apresentadas no trabalho devido à sua homogeneidade por entre os corpos de prova. Tal como apresentado pelos valores de dureza presentes nos ensaios contidos no tópico 5.3.

Para analisar a zona termicamente afetada é apresentada a figura 60, que ilustra a respectiva estrutura presente no aço de baixa liga HT8 com 100X de aumento. Com um retângulo vermelho é contornada a região presente na figura à direita com 200X de aumento.

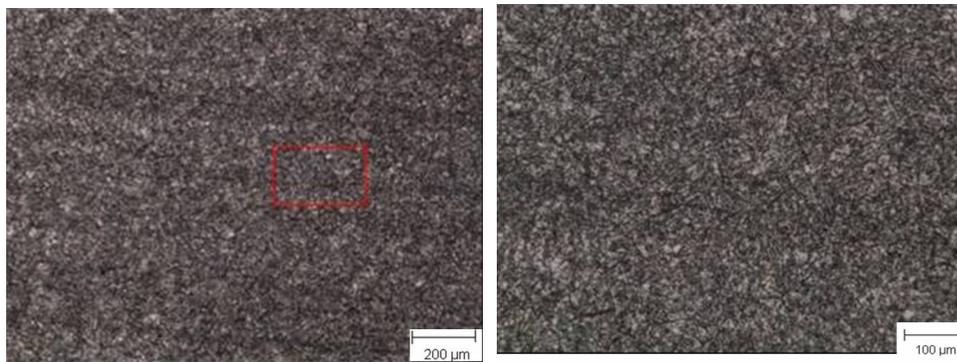


Figura 60: É apresentada a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) dos corpos de prova 3 e 4, soldados e ensaiados à temperatura ambiente. Na figura à esquerda, é apresentada a ZTA com 100X de aumento. Por meio de um retângulo vermelho é delimitada a região que foi submetida a um aumento de 200X, cuja imagem é apresentada à direita.

Fonte: Autor

Na figura 60 é possível observar estruturas martensítica (manchas escuras), bainítica e/ou ferrítica (manchas claras), combinação prevista pelo programa AC3 ao se utilizar a temperatura de início de resfriamento de 850°C. No entanto, para o corpo de prova submetido apenas à soldagem, na figura 43 nota-se que a dureza da ZTA está por volta de 330 HV, ou seja, 34 RC, valor que indica uma concentração menor de martensita e maior de bainita ou outra fase com uma dureza semelhante ou inferior, porém maior que a presente no material de base. Isto promove uma maior resistência mecânica à zona termicamente afetada, quando compara ao material de base que possui em sua estrutura perlita e ferrita.

Para analisar o comportamento da liga Sandvik Sanicro 28[®] sob as mesmas condições, e na região paralela à ZTA evidenciada no aço de baixa liga HT8, é apresentada a figura 61, a qual possui um retângulo vermelho, na metalografia à esquerda com 100X de aumento, que contorna a região apresentada à direita com 200X de aumento.

Apenas estas metalografias são apresentadas para a respectiva liga submetida a estas condições devido a homogeneidade que a estrutura apresentou nas diferentes condições ensaiadas.

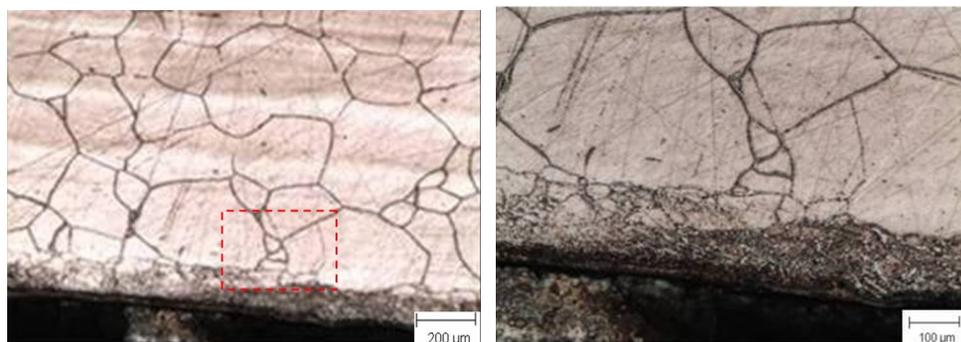


Figura 61: É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] na região da interface, no entanto sendo homogênea ao longo de toda a sua estrutura. À esquerda tem-se a microestrutura com 100X de aumento e, nesta imagem, delimitada por um retângulo vermelho, a metalografia da direita com 200X de aumento. Na microestrutura não observa-se a precipitação de fases.

Fonte: Autor.

Ao notar que a liga Sandvik Sanicro 28[®] comportou-se de uma mesma maneira para todo o corpo de prova, apesar da realização da solda, o resultado obtido no ensaio de dureza presente na figura 44 é confirmado.

Com o objetivo de analisar o comportamento do material, após tratamento térmico a 430°C por 72 horas e também após a realização de solda, na zona termicamente afetada, é apresentada a figura 62, cuja microestrutura encontra-se com 200X de aumento.



Figura 62: É apresentada a microestrutura da (ZTA) do aço carbono de baixa liga referente aos corpos de prova soldados, 7 e 8, que foram tratados térmicamente a 430°C por 72 horas, com 200X de aumento.

Fonte: Autor.

Ao se observar a figura 62, nota-se que possui grãos maiores quando comparado com a figura 51, tal como pôde ser observado na figura 53, que representa o material de base do

corpo de prova analisado na figura 62, além disso, nesta mesma figura nota-se uma concentração maior de bainita. Esta observação não pôde ser confirmada pelo ensaio de dureza apresentado na figura 45, devido à sua semelhança com os valores apresentados na figura 43.

Para analisar o comportamento mecânico da liga que se encontra na parte externa do tubo composto, é apresentada a figura 63, com 200X de aumento, não sendo necessária a ilustração de outras metalografias desta região devido à homogeneidade das estruturas.



Figura 63: É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] dos corpos de prova 7 e 8, que foram soldados e tratados termicamente à temperatura de 430°C.
Fonte: Autor.

Conforme apresentado no ensaio de dureza presente na figura 46, o comportamento da liga Sandvik Sanicro 28[®] se manteve semelhante ao longo do corpo de prova, e ao se comparar a figura 46 com a 44, nota-se que a resistência mecânica foi semelhante, fato confirmado ao se observar que o tamanho de grão de ambas também é semelhante. É possível observar também que a liga após tratamento térmico e soldagem apresentou precipitados que não puderam ser evidenciados na figura 61.

Com o objetivo de analisar a estrutura presente na zona termicamente afetada do aço de baixa liga HT8, é apresentada a figura 64, que ilustra a respectiva estrutura com 200X de aumento.



Figura 64: É apresentada a microestrutura de aço de baixa liga HT8, na região da zona termicamente afetada (ZTA), pertencente aos corpos de prova 11 e 12, que foram soldados e ensaiados à temperatura de 430°C, com aumento de 200X.

Fonte: Autor.

Pode-se observar que na estrutura presente na figura 64 tem-se bainita e martensita em concentrações semelhantes à figura 60, assim como o tamanho de grão. Por meio do ensaio de dureza presente na figura 47, esta semelhança é confirmada. Para analisar a influência da temperatura de 430°C imposta sobre o corpo de prova soldado é apresentada a figura 65, que ilustra a respectiva microestrutura com 200X de aumento. Outras metalografias desta região não foram necessárias apresentar devido sua semelhança entre si.



Figura 65: Microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] presente nos corpos de prova 11 e 12, que foram soldados e ensaiados à temperatura de 430°C, com aumento de 200X.

Fonte: Autor.

Tal como apresentado no ensaio de dureza presente na figura 48, a estrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] mostrou-se homogênea ao longo da distância da zona de fusão. Com base no mesmo ensaio, uma menor dureza foi evidenciada quando comparada com a figura 61, representada pelo ensaio de dureza presente na figura 44, indicando que a liga presente no exterior do tubo composto sofreu, neste caso, maior influência do calor que o aço de baixa liga HT8, apesar da microestrutura apresentada na figura 65 ser semelhante à presente na figura 62.

Apesar da microestrutura dos corpos de prova sem solda e que foram ensaiados sobre a mesma condição apresentarem precipitados intragranulares, a estrutura apresentada pela figura 65 não os apresentou.

Para analisar o comportamento mecânico obtido nos CPs 15 e 16, que foram soldados e tratados térmicamente à temperatura de 430°C por 72 horas, é apresentada, por meio da figura 66, a microestrutura do aço de baixa liga HT8, com 200X de aumento.

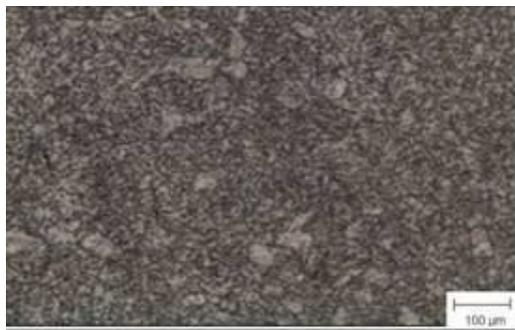


Figura 66: É apresentada a microestrutura do aço carbono de baixa liga HT8, na zona termicamente afetada (ZTA) dos corpos de prova 15 e 16, que foram soldados, tratados térmicamente à temperatura de 430°C por 72 horas e ensaiados na temperatura de 430°C, com aumento de 200X.

Fonte: Autor.

Ao se observar a figura 66, nota-se mais uma vez uma estrutura composta por bainita e martensita, tal como as figura 61 e 63, indicando que a proposta oferecida pelo programa AC3 de temperatura de início de resfriamento igual a 850°C é a mais indicada para simular o efeito sobre a estrutura do aço de baixa liga HT8 quando o tubo composto é aplicado em um superaquecedor de uma caldeira de lixo, aquecida anteriormente a 430°C por 72 dias, após manutenção por soldagem.

Com base no ensaio de dureza, apresentado pela figura 49, pode se evidenciar que não houve variação da dureza quando comparados os valores com os demais obtidos em corpos de prova soldados.

Para analisar o comportamento da estrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] sob as mesmas condições, é apresentada a figura 67 que ilustra uma estrutura com 200X de aumento.



Figura 67: É apresentada a microestrutura da liga Sandvik Sanicro 28[®] referente aos corpos de prova 15 e 16, que foram soldados, tratados térmicamente e ensaiados à temperatura de 430°C, com aumento de 200X. Fonte: Autor.

Ao se observar a figura 67, nota-se que não houve a ocorrência de precipitados intragranulares ou surgimento de maclas, tal como observado na figura 58, sugerindo-se a energia térmica proveniente da soldagem como fator inibidor das mesmas.

Esta estrutura pode ser observada em toda a continuidade do respectivo CP, para esta liga, indicando homogeneidade tal como a evidenciada pelo ensaio de dureza presente na figura 50.

No entanto, apesar do ensaio de dureza indicar estrutura semelhante à pertencente ao CP que sofreu tratamento térmico, a metalografia da mesma indica a presença de grãos superiores em relação aos outros.

5.6 Relação da resistência mecânica do material obtida em prática com a tensão de von Mises

Conforme apresentado anteriormente, no item 3.4, o vapor sob pressão de 4,5 MPa que flui no interior tubo composto, presente no superaquecedor, exerce tensões tanto radiais como de membrana sobre a estrutura do produto. Após serem realizados os cálculos, de acordo com as equações 1,2 e 3, foi determinado que a σ_{VM} é igual a 23,8 MPa.

Com base nas curvas de tensão-deformação presentes no item 5.1, pode-se observar que a menor resistência mecânica obtida foi referente ao corpo de prova 13, cuja curva de tensão-deformação está presente na figura 37, com um limite de escoamento igual a 220 MPa, tendo assim um coeficiente de segurança de 9,2 ímplicito na mecânica do tubo composto, quando aplicado em um super aquecedor de um incinerador de lixo, com pressão interna de 4,5 MPa e temperatura de 430°C. Assim, o tubo reparado pelo EPS aqui utilizado

pode ser aplicado no equipamento em questão nas condições: em fase de aquecimento, após tratamento térmico da estrutura da liga imposto pela temperatura da caldeira quando ainda em fase de aquecimento, sem a passagem do fluido interno, após a manutenção por soldagem e inclusive em uma suposta manutenção realizada de maneira inadequada, deixando a raiz da solda sem um total preenchimento.

6 CONCLUSÃO

Os corpos de prova obtidos a partir dos 2 tubos compostos apresentaram praticamente o dobro da resistência mecânica ao determinado pela literatura, sugerindo-se, como causa deste fato, em parte pela prensagem das tiras para obtenção dos respectivos corpos de prova ou variação no processo de co-extrusão ou trabalho a frio ao longo da fabricação do tubo composto ou pela presença de estrutura bainítica no material de base.

Concluiu-se também que o tubo composto sofre degradação de sua resistência mecânica e alongamento respectivamente de 46,5% e 21,2% ao ser aplicado em um superaquecedor a 430°C instalado em uma caldeira de incineração de lixo previamente aquecida a 430°C por 72 horas, sendo o principal agravante a temperatura aplicada no momento em que o tubo composto é submetido a esforços mecânicos, enquanto que o tratamento térmico, sob esta condição, pouco interfere.

Após análise do tubo soldado sob as mesmas condições, concluiu-se que a solda pouco influenciou na resistência mecânica do tubo composto e que as afirmações feitas anteriormente são mantidas. Todos os corpos de prova se romperam fora da solda, tal como concluído pela resistência mecânica superior da zona de fusão em relação ao material de base, sendo a razão de tal fato a condição de overmatch, uma vez que a resistência mecânica da zona de fusão é superior ao material de base. Esta manteve-se constante, em termos de dureza, em todas as condições aos quais os corpos de prova foram submetidos. Notou-se também que enquanto a ZTA presente no aço de baixa liga HT8 é composta por bainita e martensita, o material de base é composto apenas de bainita, explicando a variação de dureza entre ambas as regiões. Já na liga Sandvik Sanicro 28[®] não se observou heterogeneidades por conta da solda.

Ao analisar a tensão de von Mises atuante em um tubo composto aplicado em um superaquecedor com pressão interna de 4,5 MPa, obteve-se uma tensão igual a 23,8 MPa, e ao se comparar esta tensão com a menor resistência mecânica obtida em ensaio de 220 MPa, tem-se um coeficiente de segurança de 9,2.

Logo, pode-se afirmar que o tubo composto após manutenção por soldagem, sendo esta realizada ou de forma correta ou com o não preenchimento da raiz da solda, pode ser aplicado em um superaquecedor a 430°C e pressão interna de 4,5 MPa, utilizado em uma caldeira de incineração de lixo, tendo esta sido aquecida previamente ou não.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, C. R., **Curso de engenharia mecânica, disciplina de máquinas térmicas, apostila sobre caldeiras**, Universidade de Caxias do Sul Centro de Ciências exatas e tecnologia Departamento de engenharia mecânica, [Rio Grande do Sul] 2002, 36 p.

ASM HANDBOOK, Welding Brazing and Soldering, **ASM Handbook vol. 6**, ASM International, Estados Unidos da America, 1993.

ASM HANBOOK, Mechanical Testing and Evaluation, **ASM Handbook vol. 8**, ASM International, Estados Unidos da America, 1993.

DOWNLING, Norman, E., Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. **Mechanical Behavior of Matherials**, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.

DUPONT, J. N., Solidification of an alloy 625 weld overlay. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Bethlehem, [Palestina], volume 27A Novembro de 1996. 9 p.

LAI, George Y. **High temperature corrosion and materials applications**, ASM internationals, [S.I.] USA: c2007, 450 p.

LAI, George Y., Unifuse[®] overlay cladding for surface protection against corrosion and erosion/corrosion in Power boilers heat recovery systems. **Overlay Cladding in power boilers**, OMMI, [S.I.] dezembro 2004, 19p.

MESSLER, Robert W., **Principles of Welding**, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KgaA, Federal Republic og Germany, 2004.

MOREIRA, Hamilto 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**, 84 f. Dissertação (mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia - Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PETRONIC, Sanja., MILOSAVLJEVIC, Anđelka., Heat treatment effect on multicomponent nickel alloys structure. **FME Transactions**, Universidade de Belgrade, Serbia e Montenegro, 2007. 6p.

PIGROVA, G. D., TCP – Phases in nickel – Base alloys with elevated chromium content. Traduzido do “**Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov**”, No. 12, pp. 15 – 23, Dezembro, 2005. 8p.

QUIMICA sem segredos., **Propriedades da água**. Disponível em: <<http://quimicasemsegredos.com/Propriedades-Coligativas.php>>. Acesso em: 5 nov. 2010.

SANDVIK., Sandvik Sanicro 28 – Composite Tube For Steam boiler applications. **Catalogo Sandvik S-811 81**, Sandvik Steel, Extruded Tube Division, Composite Tubes, Sandviken, Sweden, 1999, 4 p.

SANDVIK., Seamless tube and pipe Sandvik Sanicro 28. **Generated datasheet of Seamless tube and pipe – Sanicro 28**, Sandvik Materials Technology, [S.I.], 2007, 14 p.

SANDVIK, **Especificação de procedimento de soldagem de tubo composto**, [S.I.], 2008.

SILVA, **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L-X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade a fratura**, Escola politécnica de São Paulo, São Paulo, 2004, p. 117.

TILLEY, R., 5 Design Considerations for Superheaters and hereaters. **Inheretly reliable boiler component design**, EPRI, California, USA, Março 2003. 258 p.

V&M DO BRASIL., **Tubos de aço sem costura para Caldeiras e Trocadores de Calor**. Vallourec & Mannesmann tubes, [S.I.:s.n], 20 p.

WAINER ET AL., Emilio, **Soldagem – processos e metalurgia**, Edgard Blücher LTDA, 1992, São Paulo, Brasil.