



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Tratamento Térmico de Juntas Soldadas



JORGE ALEXANDRE DOS SANTOS PINHEIRO DA SILVA

COM ORIENTAÇÃO
PROF. DR. HENRIQUE MANUEL SANTOS (FEUP)

PORTO, MARÇO DE 2010

CANDIDATO	Jorge Alexandre dos Santos Pinheiro da Silva	CÓDIGO	080508002
TÍTULO	Tratamento Térmico de Juntas Soldadas		
DATA	18 de Março de 2010		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 14h30		
JÚRI	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de F. Ferreira	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro	DEM/FCTUC
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Henrique Manuel Cunha M. dos Santos	DEMM/FEUP

Agradecimentos

Em primeiro lugar, e de forma muito especial, gostaria de agradecer à minha filha Mafalda pelo tempo “cedido”.

Em segundo lugar, o meu agradecimento vai para todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, em particular à Traterme, na pessoa do Eng.º António Rebelo pela disponibilidade sempre demonstrada e ao colega Eng.º Fábio Ribeiro pela colaboração na realização dos ensaios.

Agradeço também a preciosa ajuda, na análise de resultados, ao Sr. António Rita e ao Eng.º Acácio Lima.

À minha esposa Andreia que durante a última década tem sido o meu suporte emocional em todos os momentos da minha vida, e cujo amor incondicional se traduz na pessoa que sou.

À minha família e amigos o meu obrigado.

Índice Geral

Introdução	1		
A soldadura e os seus efeitos	2	<i>2º Estudo</i>	46
Tipos de tratamento térmico associados	4	<i>Procedimento 1</i>	46
<i>Pré-Aquecimento</i>	5	<i>Resultados</i>	48
<i>Pós-Aquecimento</i>	11	<i>Discussão de Resultados</i>	49
<i>Tratamento Térmico Após Soldadura (PWHT)</i>	11	<i>Procedimento 2</i>	49
Equipamento e procedimentos	16	<i>Resultados</i>	50
<i>Terminologia</i>	16	<i>Discussão de Resultados</i>	51
<i>Procedimentos</i>	17	<i>Procedimento 3</i>	53
<i>Medição de Temperatura</i>	20	<i>Resultados</i>	53
<i>Soldadura de Termopares</i>	21	<i>Discussão de Resultados</i>	55
<i>Tratamento por Resistências Eléctricas</i>	21	<i>Procedimento 4</i>	55
<i>Isolamento</i>	23	<i>Resultados</i>	56
<i>Ciclo de Tratamento Térmico</i>	24	<i>Discussão de Resultados</i>	57
Caso prático	29	Conclusões	57
<i>Introdução</i>	29	Referências Bibliográficas e da Internet	59
<i>1º Estudo</i>	30	Anexos	
<i>Procedimento</i>	31	Anexo I	63
<i>Resultados</i>	37	Anexo II	64
<i>Discussão de Resultados</i>	44		

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Nomenclatura da secção transversal de uma soldadura topo a topo por fusão</i>	2
Figura 2. <i>Parte do diagrama de equilíbrio Fe-C com representação esquemática das microestruturas.</i>	3
Figura 3. <i>Diagrama de zonas de tratamento térmico, em função da temperatura e teor em Carbono.</i>	4
Figura 4. <i>Solubilidade do hidrogénio, nos aços, em função do aumento de temperatura.</i>	10
Figura 5. <i>Esquema de fragilização por hidrogénio no processo de soldadura.</i>	10
Figura 6. <i>Gráfico de tensões residuais vs PWHT.</i>	13
Figura 7. <i>Exemplos de fissuração no reaquecimento.</i>	16
Figura 8. <i>Esquema de montagem de um pré-aquecimento de soldadura.</i>	19
Figura 9. <i>Esquema de montagem de um PWHT.</i>	20
Figura 10. <i>Diagrama esquemático da descrição das bandas de tratamento térmico para o aquecimento a 360°.</i>	20
Figura 11. <i>União entre resistências para tratamento térmico.</i>	21
Figura 12. <i>Exemplo de colocação de resistência em tubagem e a sua fixação.</i>	22
Figura 13. <i>Botão selectivo, de uma unidade de tratamento térmico, para validação de intensidade de corrente Manual/Automático.</i>	22
Figura 14. <i>Exemplo de controladores de temperatura em unidades de tratamento térmico.</i>	27
Figura 15. <i>Esquema do ciclo de tratamento térmico executado no provete.</i>	32
Figura 16. <i>Esquema do dispositivo de ensaio de dobragem.</i>	33
Figura 17. <i>Esquema de montagem para a realização do pré-aquecimento, nos provetes.</i>	33
Figura 18. <i>Preparação e montagem do pré-aquecimento com resistências eléctricas “one-line”.</i>	34
Figura 19. <i>Esquema de montagem para a realização do PWHT, nos provetes.</i>	34
Figura 20. <i>Unidade de tratamento térmico utilizada e montagem do PWHT.</i>	35
Figura 21. <i>Soldadura de provete, sem tratamento térmico.</i>	35
Figura 22. <i>Esquema de medição de durezas Vickers HV10.</i>	35
Figura 23. <i>Secção dos provetes e durómetro para medição de dureza HV10.</i>	36
Figura 24. <i>Seccionamento do provete para posterior montagem metalográfica, a quente.</i>	36
Figura 25. <i>Disposição dos provetes para o ensaio de Raios X.</i>	36
Figura 26. <i>Registo gráfico, do pré e pós aquecimento, da soldadura do 1º estudo.</i>	37
Figura 27. <i>Registo gráfico do PWHT do 1º estudo.</i>	38
Figura 28. <i>Fotografia em lupa de amostras, sem e com tratamento térmico.</i>	38

Figura 29. <i>Representação das zonas onde se promoveu a medição de dureza.</i>	39
Figura 30. <i>Gráficos dos valores médios de variação de dureza HV0,5, ao longo do eixo longitudinal da soldadura.</i>	39
Figura 31. <i>Microestruturas nas zonas do 1º passe do provete sem tratamento térmico.</i>	40
Figura 32. <i>Microestruturas nas zonas do 2º passe do provete sem tratamento térmico.</i>	40
Figura 33. <i>Microestruturas na ZTA do provete sem tratamento térmico.</i>	41
Figura 34. <i>Microestrutura no material base do provete sem tratamento térmico.</i>	41
Figura 35. <i>Microestruturas nas zonas do 1º passe do provete com tratamento térmico.</i>	42
Figura 36. <i>Microestruturas nas zonas do 2º passe do provete com tratamento térmico.</i>	42
Figura 37. <i>Microestruturas na ZTA do provete com tratamento térmico.</i>	43
Figura 38. <i>Microestruturas no material base do provete com tratamento térmico.</i>	43
Figura 39. <i>Imagem da radiografia digital das peças, sem e com tratamento térmico.</i>	44
Figura 40. <i>Montagem efectuada para a realização do tratamento térmico, de acordo com o procedimento 1.</i>	47
Figura 41. <i>Montagem efectuada para as zonas N5, N6 e N11e planificação da tubagem, de acordo com o procedimento 1.</i>	47
Figura 42. <i>Ciclo térmico aplicado a todas as montagens do 2º estudo.</i>	48
Figura 43. <i>Registo gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 1.</i>	48
Figura 44. <i>Imagem da montagem efectuada de acordo com o procedimento 2.</i>	49
Figura 45. <i>Planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura e a configuração das resistências utilizadas, de acordo com o procedimento 2.</i>	50
Figura 46. <i>Registo gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 2.</i>	50
Figura 47. <i>Resultados da análise realizada com recurso ao termómetro Ómega.</i>	51
Figura 48. <i>Planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura e a configuração das resistências utilizadas, de acordo com o procedimento 3.</i>	53
Figura 49. <i>Gráfico dos resultados obtidos na medição efectuada pelo termómetro Ómega. O termopar 1 não efectuou um registo válido.</i>	53
Figura 50. <i>Registo gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 3.</i>	54
Figura 51. <i>Imagem da montagem efectuada de acordo com o procedimento 4.</i>	55
Figura 52. <i>Planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura e a configuração das resistências utilizadas, de acordo com o procedimento 4.</i>	55
Figura 53. <i>Registo gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 4.</i>	56

Índice de Tabelas

Tabela 1. <i>Domínio de aplicabilidade entre as diversas tecnologias/processos de aquecimento.</i>	18
Tabela 2. <i>Comparativo entre as várias taxas de aquecimento e arrefecimento durante PWHT.</i>	25
Tabela 3. <i>Composição química de alguns aços Cr-Mo.</i>	30
Tabela 4. <i>Valores de dureza HV10 nos provetes, com e sem tratamento térmico.</i>	38
Tabela 5. <i>Resultados de varrimento de durezas Vickers.</i>	39
Tabela 6. <i>Valores de dureza HV0,5 antes e após T.T., para determinação de possível austenitização parcial dos provetes.</i>	43
Tabela 7. <i>Resultados obtidos dos ensaios de dobragem.</i>	44

Introdução

A soldadura é um dos processos com maior aplicação na ligação de materiais metálicos e cuja aplicabilidade se pode traduzir em pequenas estruturas para o consumidor doméstico até às exigentes e complexas aplicações industriais. Não entrando na abrangência supra, este trabalho pretende incidir na ligação soldada dos aços.

Em diversas circunstâncias, o processo de união, de *per si*, não é suficiente para garantir o resultado final expectável, sendo necessário o recurso à aplicação de tratamentos térmicos. Estes poderão ser definidos como um conjunto de parâmetros que se traduzem num ciclo temperatura/tempo e que envolve um aquecimento a uma determinada velocidade, tempo de patamar a uma dada temperatura e arrefecimento sob condições controladas.

A operação de soldadura introduz, nos materiais, modificações de carácter metalúrgico, localizadas numa zona restrita onde estão adjacentes variações de propriedades e microestrutura, díspares do material base, tendo em conta que as mesmas estão dependentes dos processos e *modus operandi*. De igual forma, pode originar tensões locais nas peças dado que a zona de soldadura, devido ao aquecimento, tende a dilatar, dilatação esta que é dificultada pelos componentes adjacentes que, estando a uma temperatura inferior, não correspondem no mesmo sentido. Desta forma, criam-se tensões residuais, distorções na geometria das peças, podendo até originar deformações plásticas.

A avaliação destes aspectos, em componentes soldados, é de grande necessidade dado que é fulcral o garante de que no final do processo fica assegurada a integridade do conjunto, em serviço.

Este trabalho pretende descrever e avaliar a influência dos tratamentos térmicos com objectivo de determinar as melhorias encontradas, após a sua aplicação, nas propriedades finais do conjunto soldado. Tendo em conta o custo das análises experimentais, a dificuldade de execução de estudos pela complexidade inerente, e a grande utilização industrial prática, serão focalizados os estudos nos tratamentos de pré e pós aquecimento e tratamento térmico após soldadura (Postweld heat treatment, vulgo PWHT). Será retratado o material P22, comumente utilizado em tubagem industrial para resistência à fluência a elevadas temperaturas. Os tratamentos térmicos serão realizados com recurso a uma unidade móvel de tratamento térmico com aplicação directa de resistências eléctricas (*heating mats*) na peça.

O estudo é apoiado pela empresa Traterme - Tratamentos Térmicos, Lda, que se inicia nesta nova actividade, cuja aplicabilidade é imensa, de cariz tecnológico elevado. É

também objectivo deste trabalho, avaliar, demonstrar e desenvolver metodologias e procedimentos que assegurem aos clientes e colaboradores a importância de uma correcta aplicação dos tratamentos térmicos localizados e as directas implicações que podem advir da sua incorrecta utilização. Estas informações associadas à prática de tratamentos térmicos localizados estão muito pouco difundidas no tecido industrial, tendo este que, permanentemente, recorrer a serviços vindos do estrangeiro. Este trabalho pretende ser uma primeira abordagem de cariz científico, pese embora com ênfase na componente prática, para todos os potenciais interessados nos tratamentos térmicos localizados.

A soldadura e os seus efeitos

São extensos e diversificados os termos com significado particular no âmbito das operações de soldadura. Como tal, urge apenas uma descrição daqueles mais comuns.

A união soldada é influenciada pela geometria da junta, espessura, o próprio processo de soldadura, a acessibilidade da junta e pelo tipo de material.

A soldadura dos aços - Aspectos Metalúrgicos

Apresenta-se resumidamente as considerações metalúrgicas e processos que devem ser tidos em consideração. Como soldabilidade entende-se a aptidão do material à operação da soldadura de forma a se obter, tanto quanto possível, propriedades *in statu quo ante*, idênticas ao material base, como resistência, resistência à corrosão, etc., na amplitude do material base. Estas propriedades estão relacionadas directamente com a selecção do material de adição, o tipo de material base, o processo de soldadura, sendo que as propriedades da zona termicamente afectada, adiante designada por ZTA, são determinadas pela composição do material base, e pela quantidade de energia fornecida aquando da operação de soldadura.

A figura 1 representa a nomenclatura da secção transversal de uma soldadura topo a topo por fusão.

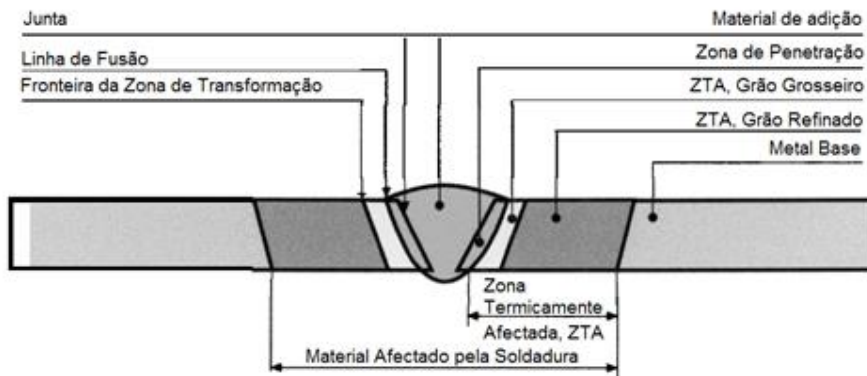


Figura 1. Nomenclatura da secção transversal de uma soldadura topo a topo por fusão [1].

O diagrama de equilíbrio, *vide* figura 2, explica a origem das diversas microestruturas presentes no processo de soldadura. Podemos constatar que os aços com baixo teor em Carbono apresentam uma estrutura predominantemente ferrítica, enquanto a perlite aparece com o aumento do teor em C, sendo que a cementite se começa a vislumbrar nas fronteiras de grão a partir de teores em C superiores a 0,8%.

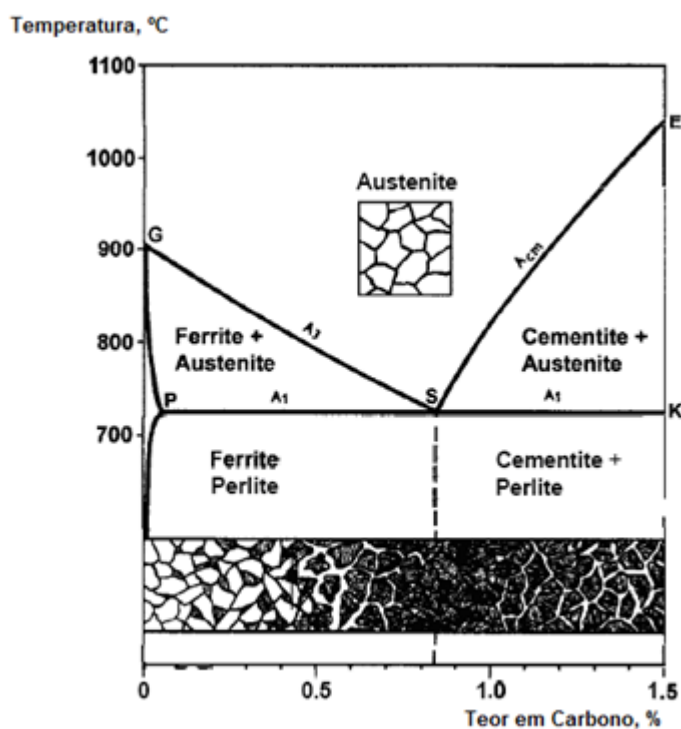


Figura 2. Parte do diagrama de equilíbrio Fe-C com representação esquemática das microestruturas [1].

Tipos de tratamento térmico associados

O Tratamento Térmico em metais é um conjunto de operações que envolve um aquecimento, tempo de permanência a determinadas temperaturas e arrefecimento sob condições controladas, com o objectivo de melhorar as propriedades ou conferir características pré - determinadas.

Nas juntas soldadas os tratamentos mais comuns são:

- Pré-aquecimento;
- Pós-aquecimento;
- PWHT.

O diagrama, apresentado na figura 3, apresenta as diversas zonas de tratamento térmico, em função do teor em Carbono e temperatura.

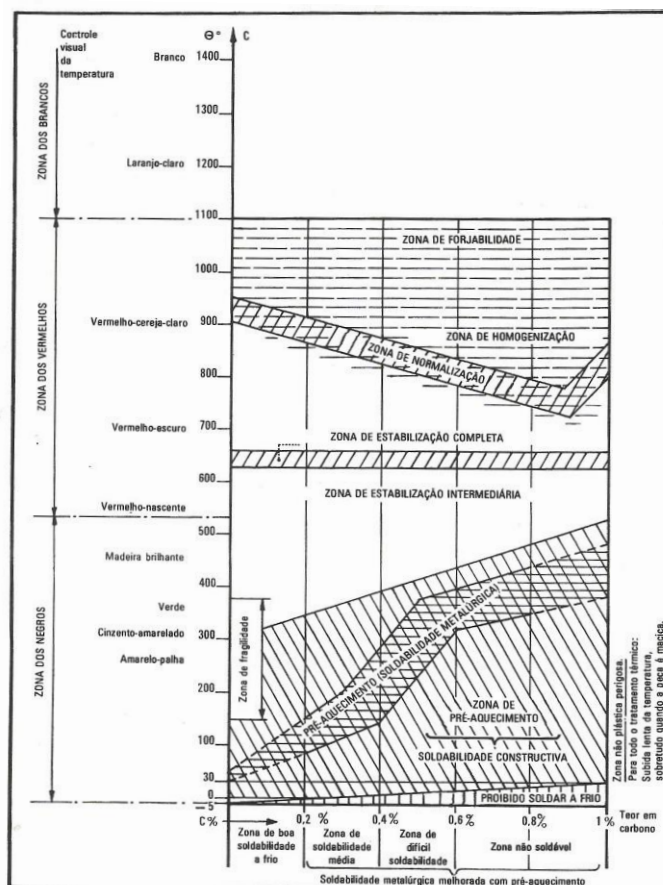


Figura 3. Diagrama de zonas de tratamento térmico, em função da temperatura e teor em Carbono [2].

Na construção, fabricação ou montagem com recurso a juntas soldadas, pode-se, se necessário, promover o aquecimento dos componentes antes da operação de soldadura, entre passes ou após a soldadura. As operações de aquecimento relatadas podem ser realizadas num forno, sendo a forma mais recomendável e económica de execução de tratamento térmico, mas, por razões diversas, essa possibilidade pode não ser exequível, sendo que, dentre os diversos motivos, a dimensão dos componentes soldados, é a maior restrição. Se, porventura, for necessário o recurso ao tratamento em forno, em situações cuja dicotomia dimensão peça/forno permita a sua execução em duas etapas, por exemplo no caso do comprimento da peça exceder o do forno, recorre-se à técnica do emparedamento, que se traduz em manter parte da peça no forno, isolando a saída com tijolos refractários e manta cerâmica. Por conseguinte, aquando do tratamento térmico da segunda metade, deverá existir uma sobreposição de 1600 mm na região anteriormente tratada [11].

Estes tratamentos térmicos são geralmente necessários no sentido de se garantir uma adequada integridade da soldadura ou prevenir ou remover características indesejáveis na soldadura efectuada. O recurso ao tratamento térmico é dispendioso, devido à necessidade de equipamentos e mão-de-obra especializada. Por conseguinte, o tratamento térmico deve ser realizado após alguma reflexão acerca das vantagens que este oferece. Em alguns casos o tratamento térmico é obrigatório, sobretudo para aços de baixa liga de elevada espessura, noutras situações, a sua aplicação é inerente à precaução contra a possível ocorrência de falhas em serviço.

Pré-aquecimento

O pré-aquecimento traduz-se numa elevação da temperatura acima da ambiente das juntas a unir, sendo definido, pela *AWS (American Welding Society) Standard Welding Terms and Definition*, como “o calor aplicado ao metal base para atingir ou manter a temperatura de pré-aquecimento”.

A temperatura de pré-aquecimento é definida, pelo mesmo documento, como “a temperatura do metal base, em volume, nas zonas vizinhas à soldadura e imediatamente antes de se iniciar a soldadura”. Na soldadura com passes múltiplos, é a “temperatura imediatamente antes do início do segundo e subsequentes passes” (temperatura interpasso).

O pré-aquecimento pode ser efectuada com recurso a queimadores, à chama oxigás, resistências eléctricas, em forno, etc., como tal, pode ser total ou localizado.

Para obtenção de bons resultados, é essencial que o aquecimento seja uniforme na zona de soldadura. Um aquecimento não uniforme deve ser evitado, pois pode evidenciar-se prejudicial caso conduza à ocorrência de altas tensões residuais ou variações metalúrgicas indesejáveis no material de base. Na condução do pré-aquecimento toda a zona de soldadura deve ser aquecida e deve garantir-se que em toda a espessura se verifica a temperatura mínima desejada. Para que se consiga obter uma temperatura uniforme em toda a espessura, é recomendado aplicar a fonte de calor numa das superfícies do material e medir a temperatura no lado oposto; sempre que o aquecimento e o registo da temperatura for conduzido na mesma superfície, deve-se assegurar que o aquecimento se verifica também no lado oposto, de forma uniforme.

A temperatura do pré-aquecimento está dependente da composição química (Carbono Equivalente: $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Cu+Ni)/15$) e da espessura da peça.

Além de estabelecer a temperatura de pré-aquecimento, a limitação da temperatura de interpasse deverá ser considerada em algumas aplicações. Esta informação deve ser descrita na especificação do procedimento de soldadura, sendo que após definida deve haver uma confirmação da temperatura antes da deposição do próximo passe. Caso se verifique que a temperatura de interpasse excede a especificada, a soldadura deve ser interrompida até que se verifique o arrefecimento dentro do limite superior definido, de forma a ser assegurada a tenacidade dos aços ferríticos, ou a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos, entre outras.

Dependendo das propriedades metalúrgicas do material, e/ou das propriedades desejadas para o conjunto, o pré-aquecimento e a temperatura interpasse devem ser avaliados por diferentes razões. Por exemplo, para um aço de baixo carbono, com relativa baixa temperabilidade, para ser aplicado, em serviço, sem requisitos especiais, pode considerar-se uma temperatura mínima, de pré-aquecimento e de interpasse baseada na espessura do material. Nos procedimentos de soldadura, utilizados em aços de baixa liga e aços ligados ao Crómio-Molibdénio com requisitos de impacto, são normalmente especificadas temperaturas mínimas e máximas, para o pré-aquecimento e temperatura de interpasse. Estes aços podem apresentar elevada temperabilidade e susceptibilidade à fragilização ao hidrogénio.

Permitir que esses materiais arrefeçam rapidamente ou que sobreaqueçam pode afectar seriamente os seus requisitos. A energia da fonte de calor dos processos de soldadura, o pré-aquecimento e a temperatura interpasse podem afectar seriamente as propriedades desses materiais. Uma energia de soldadura, com input de calor elevado, pode conduzir a um excesso de liquefação, precipitação de carbonetos e outros fenómenos perigosos ao

nível metalúrgico. Essas variações metalúrgicas podem gerar fissuras ou perda de resistência à corrosão. Em aplicações críticas, a temperatura de pré-aquecimento deve ser controlada de forma precisa. Nessas situações, deve utilizar-se sistemas de aquecimento controlado, e devem-se colocar termopares para monitorizar as zonas sujeitas ao aquecimento. Esses termopares fornecem um sinal ao controlador de temperatura que permite a regulação da potência necessária para o aquecimento. Estes equipamentos permitem o controlo da temperatura a tolerâncias extremamente apertadas. A jusante será abordado o tema com mais detalhe.

O recurso ao pré-aquecimento geralmente está expresso no código ou norma que rege o processo, sendo que se trata de um apoio ao processo de soldadura por diversas razões, a seguir enumeradas. O pré-aquecimento, sempre que necessário, deve ser aplicado de forma a garantir o cumprimento dos requisitos em cada situação, em prol do sucesso da operação de soldadura. As condições de realização estão, por conseguinte, dependentes da composição química dos materiais a soldar, do processo de soldadura a aplicar e da energia gerada no processo de união.

O Pré-aquecimento tem como vantagem o aumento da amplitude de resistência da junta às condições de serviço, salientando-se:

- Compensa elevadas perdas de calor
 - Peças com espessura elevada em aço carbono, bem como em ligas de cobre ou alumínio, dado possuírem elevada condutividade térmica, beneficiam do pré-aquecimento antes da operação de soldadura. A taxa de arrefecimento do metal depositado é diminuída permitindo que o metal de adição funda convenientemente com o material base;
- Reduz ou elimina o perigo de formação de fissuras
 - As tensões que originam fissuras formam-se durante o arrefecimento do banho. Essas fissuras podem surgir durante ou após a operação de soldadura aquando da contracção do material soldado. O pré-aquecimento reduz os diferenciais de temperatura e a taxa de arrefecimento, reduzindo a tendência para fissurar;
- Redução de porosidades
 - O arco de soldadura origina a divisão da molécula de água, nos elementos constituintes (hidrogénio e oxigénio). Sendo que ambos os gases facilmente se podem dissolver no banho de soldadura, a elevadas temperaturas e ai ficar retidos, podem originar porosidades durante a solidificação. O pré-

aquecimento liberta as humidades da junta de ligação reduzindo a probabilidade de ocorrência de porosidades;

- Melhoria da microestrutura da Zona Termicamente Afectada (ZTA)
 - Aços de baixa liga contendo elementos como o Crómio, Níquel, Molibdénio e Vanádio são susceptíveis de fissurar nas zonas afectadas termicamente. O pré-aquecimento melhora a microestrutura desta zona reduzindo a taxa de arrefecimento após soldadura;
- Diminuição do efeito de têmpera nas zonas de transformação
 - A zona de soldadura, bem como as zonas afectadas termicamente podem endurecer e até fissurar se forem rapidamente arrefecidas desde altas temperaturas. O pré-aquecimento evita o endurecimento dessas zonas pelo facto de diminuir a taxa de arrefecimento. A redução de dureza, pela não formação de martensite, traduz-se numa diminuição do risco de fissuração;
- Eliminação de humidade da zona de soldadura
 - Efectua-se o aquecimento da superfície do material a temperaturas relativamente baixas, ligeiramente acima da temperatura de ebulição da água. Este aquecimento vai eliminar a água e remover contaminações que poderão causar porosidade ou fissuração pela introdução do hidrogénio durante o processo de soldadura;
- Baixar o gradiente térmico
 - Todos os processos de arco eléctrico utilizam uma fonte que gera uma elevada temperatura, promovendo um gradiente térmico elevado entre a zona de aquecimento e o metal base frio a ser soldado. Esta diferença de temperatura provoca diferentes expansões térmicas e contracções nas zonas vizinhas à soldadura. A redução dessa diferença de temperatura, por pré-aquecimento do material base, irá minimizar os problemas associados à distorção e tensões residuais excessivas. Também o arrefecimento é mais elevado, aquando da soldadura, o que, por sua vez, poderá induzir à formação de martensite e provavelmente à fissuração. A sua propensão agrava-se quando os materiais empregues apresentam elevada temperabilidade;
- Facilita a difusão do hidrogénio introduzido durante a soldadura cuja proveniência poderá ser várias fontes:
 - Produtos de combustão na soldadura;
 - Produtos de decomposição de revestimentos celulósicos de eléctrodos, em soldadura por arco eléctrico;

- Óxidos hidratados;
- Humidade ou gorduras na superfície das peças ou dos eléctrodos;
- Humidade nos fluxos;
- Presença no material base ou nos gases de protecção [34,35,36,58,62].

O hidrogénio resultante aumenta consideravelmente a propensão ao aparecimento de fissuras, originando a fissuração a frio¹ ou “hydrogen cracking”. Esta constitui, sem dúvida, uma das maiores dificuldades, sob o ponto de vista de soldabilidade metalúrgica, surgidas na soldadura dos aços ao Carbono, Carbono-Manganês e baixa liga.

Sendo o hidrogénio muito menos solúvel no metal no estado sólido do que no estado líquido, pode originar sobresaturação de H₂ aquando do arrefecimento. Por outro lado, o hidrogénio, devido às altas temperaturas existentes, tem tendência a dissociar-se em iões. Um excesso de átomos de hidrogénio, com um raio atómico reduzido, pode facilmente difundir-se na rede cristalina do metal até alcançar a ZTA. Assim, quando no metal que fundiu se der a transformação da austenite, o hidrogénio, na forma iónica que aí estava dissolvido, vai migrar para a ZTA que ainda não está austenítica, dado que o hidrogénio se dissolve melhor na austenite do que na ferrite. Na ZTA, o hidrogénio volta a combinar-se sendo esta reacção acompanhada de um aumento de pressão localizado. Caso o gás dissociado encontre algum poro ou descontinuidade, na estrutura cristalina do metal, estes podem-se combinar e exercer elevada pressão nos átomos da rede cristalina. O resultado traduz-se numa deformação caso o material seja dúctil ou fissuração se ele for duro e frágil, como é na forma martensítica.

Assim, resume-se a ocorrência de fissuração a frio, à coexistência simultânea dos seguintes factores:

- Hidrogénio no material depositado;
- Elevado nível de tensões na junta;
- Microestruturas duras e frágeis, isto é martensite.

A fissuração a frio ocorre essencialmente de três formas, caracterizada por uma orientação longitudinal e aparecendo comumente na ZTA:

1. Fissuração a frio sob o cordão;
2. Fissuração a frio na ligação;
3. Fissuração a frio na raiz.

A solubilidade do metal de soldadura diminui com o abaixamento da temperatura, conforme figura 4.

1 o termo fissuração a frio é empregue porque este tipo de fissuras só ocorrem quando a junta está a uma temperatura próxima da ambiente. Sendo que em determinados casos esta fissuração pode surgir até dois dias após a operação de soldadura, muito excepcionalmente mais de dois dias, por esta razão recomenda-se a realização de ensaios não destrutivos após 48h da execução da soldadura.

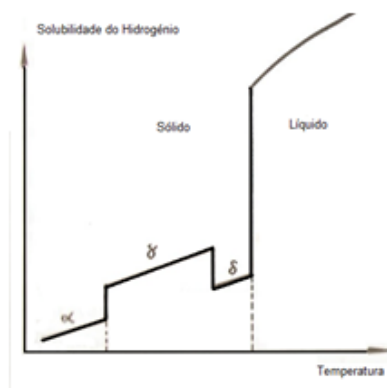


Figura 4. Solubilidade do hidrogénio, nos aços, em função do aumento de temperatura [3].

Um modelo, sugerido por Granjon, e representado na figura 5, explica que o hidrogénio é introduzido pela atmosfera do arco para o banho de fusão que, ao solidificar, se transforma em austenite, libertando algum hidrogénio para a atmosfera. No metal base também existe uma faixa que está austenitizada. A partir do momento em que ocorre a decomposição da austenite em ferrite e cementite, diminui a solubilidade do hidrogénio e este difunde-se para a região austenitizada do metal base. Aquando do arrefecimento, essa região, com maior teor de hidrogénio, pode temperar, obtendo-se uma estrutura martensítica. Desta forma, surge o hidrogénio associado a uma microestrutura frágil [4].

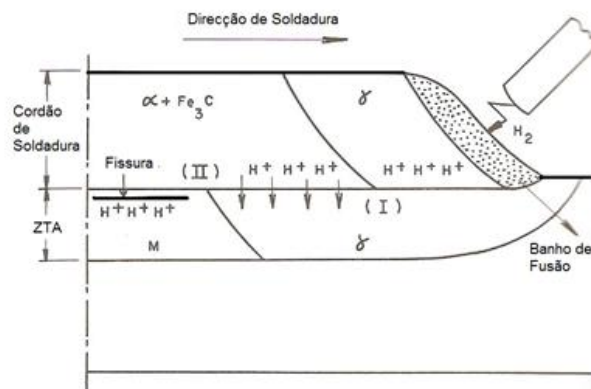


Figura 5. Esquema de fragilização por hidrogénio no processo de soldadura [3].

O pré-aquecimento diminui a taxa de arrefecimento, após soldadura, permitindo a libertação do hidrogénio, por difusão².

As temperaturas do pré-aquecimento podem atingir os 800°C, *vide* Anexo I, sendo usual que sejam mantidas no valor mínimo durante o processo de soldadura, de forma a evitar que sejam alteradas as propriedades mecânicas ou as condições de soldadura estabelecidas. Contudo, poderá ser especificada uma tolerância, geralmente 100°-150°C acima do mínimo da temperatura de pré-aquecimento, em gamas na ordem dos 350°C.

² Para melhor compreensão deste fenómeno recomenda-se a consulta da obra *Welding Steels Without Hydrogen Cracking*; Abington Publishing, 1993

Pós-aquecimentos

Este tratamento é definido como um complemento ao pré-aquecimento, sendo que o seu objectivo principal é a eliminação do hidrogénio induzido pelo processo de soldadura, geralmente aplicado em aços de baixa liga ou de alta resistência Carbono-Manganês.

O procedimento deste tratamento térmico não é comumente apresentado nas normas ou códigos de construção, sendo que as temperaturas e tempos dos ciclos são obtidas através de outras publicações técnicas, contudo poderemos definir genericamente e dependendo das diversas variáveis envolvidas em cada processo como temperaturas de patamar na ordem dos 149°-360°C [70], com permanência entre 1 a 4 horas, imediatamente após a operação de soldadura, aproveitando o seu pré-aquecimento.

Na generalidade dos casos este tratamento não provoca alívio de tensões, tendo como excepção as situações em que os materiais sofreram têmpera ou são de elevada temperabilidade. O tratamento pode reduzir a dureza, caso as temperaturas do revenido se situem dentro dos limites das do tratamento de pós-aquecimento.

Em adição, é importante referir que a fissuração pode surgir até 48 horas após a soldadura ter arrefecido à temperatura ambiente, facto que é relevante aquando da soldadura de aços ligados, de elevada resistência, quando o potencial para o aparecimento do hidrogénio, quer do processo de soldadura, quer dos consumíveis, não está devidamente controlado ou quando a temperatura de pré/interpasse, não é suficiente.

Sendo este procedimento considerado por razões respeitantes ao receio de fissuração pelo hidrogénio, a temperatura mínima de pré/interpasse deverá ser mantida até à sua realização.

Com alguma frequência, o pós-aquecimento é utilizado quando é esperado algum atraso entre o término da soldadura e o tratamento térmico após soldadura. Nestes casos, quando não é prático ou economicamente viável a manutenção da temperatura de pré/interpasse recorre-se ao pós-aquecimento.

Tratamento térmico após soldadura (PWHT)

O tratamento térmico de alívio de tensões é utilizado para eliminar tensões instaladas na estrutura como consequência do processo de produção. É sempre realizado abaixo da temperatura crítica. Contudo, é importante destrinçar o tratamento térmico de alívio de tensões do tratamento térmico após soldadura (Post Weld Heat Treatment, vulgo PWHT) sendo que o objectivo deste é fornecer, para além do alívio de tensões, melhorias na

estrutura metalúrgica/propriedades do conjunto soldado. Tendo em conta o domínio de temperaturas a que este se realiza, inferiores à temperatura de transformação, este tratamento térmico acarreta um “efeito de revenido” sem que as soldaduras contenham constituintes de têmpera, tanto na zona fundida como na ZTA [4]. Destaca-se que a maioria das soldaduras de ligas ferríticas, requerem PWHT como forma de melhorar a ductilidade à fractura da ZTA. Ligas austeníticas e ligas não ferrosas poderão necessitar de PWHT de forma a melhorar a sua resistência ao ambiente envolvente. O tratamento térmico traduz-se pelo aquecimento uniforme da estrutura, ou parte dela, até determinada temperatura, mantendo-se a esta temperatura por um determinado período de tempo, seguido de um arrefecimento uniforme. Este arrefecimento deve ser realizado com cuidado em estruturas com acentuadas variações de secção, sendo que se a taxa não for constante, poderão surgir novas tensões iguais, ou até superiores, aquelas cujo tratamento pretende reduzir [5].

Tal como referido para outras situações, o tratamento térmico após soldadura, pode ser realizado em forno, sendo a dimensão das peças o factor maioritariamente proibitivo, entre outros. Nos casos em que o aquecimento em forno não é viável, a soldadura e o material adjacente deverão ser tratados localmente. Concretamente, o aquecimento deve ser aplicado à soldadura, à ZTA e a uma parte do material adjacente.

A análise dos motivos de fissuração é deveras complexa, normalmente a concentração de tensões advém de defeitos na zona soldada, como inclusões ou fusão incompleta, que poderão originar a fissuração.

No que concerne ao estudo de resistência à fadiga, vários investigadores têm desenvolvido métodos para determinar o comportamento à fadiga das estruturas soldadas na localização de defeitos e na concordância da junta (Linha de contacto entre a face da soldadura e o metal de base) [6]. As tensões residuais que surgem nas juntas soldadas, como consequência de deformações provocados pela solidificação, alteração de fase e contracção durante a soldadura, também afectam o comportamento à fadiga das soldaduras.

O tratamento térmico de PWHT é o mais utilizado dos tratamentos térmicos apresentados, como tal ser-lhe-á dado ênfase neste trabalho.

Este tratamento utiliza a expressão de PWHT, pois conforme supra referido, o alívio de tensões é realizado a temperaturas às quais a tensão limite de elasticidade tende para valores baixos e, para além do referido este tratamento é mais abrangente, possibilitando o revenido das estruturas martensíticas, formadas na ZTA.

A fluência³, para os aços, ocorre a elevadas temperaturas e a deformação ocorre através de um mecanismo de difusão, aliviando as tensões residuais ainda mais [19].

³ Variação da extensão dum material quando solicitado por uma tensão constante [19].

Os resultados da extensão do alívio de tensões estão dependentes da temperatura e do tempo do tratamento térmico, para um determinado material, conforme se verifica pela figura 6.

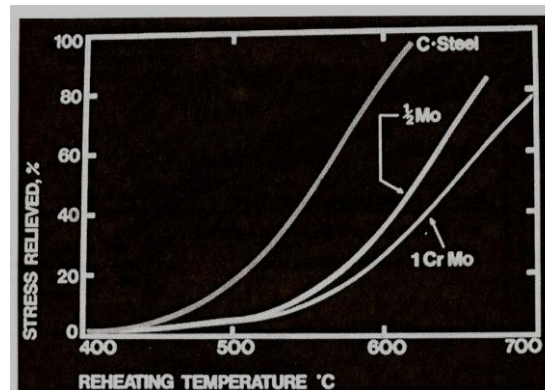


Figura 6. Gráfico de tensões residuais vs PWHT [8].

O efeito da redução de tensões é regido pelo parâmetro de Larsen-Miller (P) ou Hollomon-Jaffe (H),

$$H \text{ ou } P = T (20 + \log t) 10^3$$

Onde T é a temperatura de tratamento (em graus Kelvin) e t a duração do tratamento em horas [4, 50].

Este parâmetro é usado para dar a ideia do efeito do tratamento nas propriedades mecânicas. Para este efeito os valores encontrados correspondem às diversas combinações temperatura/tempo.

O tratamento térmico consiste num aquecimento, abaixo da temperatura crítica de transformação, um estágio ou patamar proporcional à espessura das peças em questão, seguido de um arrefecimento lento (controlado). Como referência podemos definir que o tempo de patamar efectivo de uma junta deverá corresponder a 1 hora por cada 25 mm de espessura.

A redução de tensões é um processo de restauração da subestrutura de deslocações, durante o qual estas assumem configurações de menor energia. Durante a restauração, as paredes das células de deslocações tornam-se mais definidas, as células adquirem formas poligonais, entram em crescimento e as deslocações contidas no seu interior movem-se para as paredes. Trata-se pois de um rearranjo da subestrutura de deslocações e da diminuição da respectiva densidade. Este processo, sendo termicamente activado, ocorre tanto mais rapidamente quanto mais elevada for a temperatura [50].

Com o aumento da temperatura as tensões tornam-se mais uniformes e, conforme referido, são reduzidas numa percentagem superior. Após arrefecimento, dentro das condições definidas, os resultados da melhoria da distribuição das tensões são mantidos.

Como complemento ao supra apresentado, na redução e redistribuição das tensões internas, este ciclo térmico, sendo realizado a temperaturas elevadas, permite que possam ocorrer simultaneamente tratamentos de revenido ou envelhecimento.

As alterações metalúrgicas resultantes são bastante benéficas, pelo facto de reduzirem a elevada dureza típica das estruturas pós-soldadas, melhorando a ductilidade e reduzindo o risco de ocorrência de fenómenos de fractura frágil, provocada pela falta de resistência residual da estrutura. É fulcral a correcta definição do ciclo térmico (tempos e temperaturas) sendo que, em certos aços, o envelhecimento/precipitação podem originar perdas de ductilidade e tenacidade. Uma correcta definição do tratamento térmico poderá evitar a subsequente distorção em operações de maquinagem, ou erradicar o risco de corrosão sob tensão.

Com o objectivo de controlar, de forma rigorosa e correcta, os benefícios metalúrgicos é importante a referência ao diagrama de equilíbrio dos aços, supra apresentado.

Existem vários tipos de PWHT, aplicados por diferentes razões:

- Para as mesmas ligas de aço, o tratamento térmico de revenido pode ser necessário para obter uma estrutura metalúrgica adequada. Este tratamento é geralmente conduzido após o arrefecimento da soldadura, mas, sob certas circunstâncias, poderá ser necessário a sua realização antes do arrefecimento, de forma a prevenir a fissuração (as temperaturas abaixo dos 200°C são extremamente críticas ao nível de propagação de fissuras).
- As ligas endurecíveis por precipitação, como as ligas de alumínio tratáveis termicamente, por vezes, são sujeitas a um PWHT para restaurar as propriedades originais. Em alguns casos, apenas se efectua um tratamento de envelhecimento. Contudo um tratamento de solubilização e um envelhecimento artificial pode conduzir a uma melhor recuperação das propriedades, após a soldadura.

Alguns aspectos devem ser realçados aquando do tratamento térmico de aquecimento após soldadura:

- Aumenta a ductilidade e reduz a dureza
 - O PWHT reduz a resistência à tracção e o limite de elasticidade dos aços carbono e ligados soldáveis, devido à perda de dureza. Aumenta a resistência ao impacto;
- Aumenta a resistência à corrosão

- Fissuras, corrosão sob-tensão e fragilidade por influência cáustica alcalina podem ocorrer em caldeiras, tubagens da indústria petroquímica e em outras construções soldadas expostas a determinados ambientes tais como hidróxidos, nitratos, etc. O tratamento térmico, após soldadura, reduz as tensões internas e melhora a resistência ao ataque originado por ambientes corrosivos, comparativamente com as soldaduras sem tratamento térmico;
- Melhoria da estabilidade dimensional
 - A soldadura de peças com formas complexas pode originar o aparecimento de tensões internas. O tratamento térmico vai evitar distorções após maquinagem, provocadas pelas tensões supra.

Contudo, o desempenho a nível metalúrgico deste tratamento nem sempre é benéfico, pois podem intervir efeitos desfavoráveis, tais como a fragilização por revenido que afecta as propriedades mecânicas, o fenómeno de fissuração denominado “fissuração no reaquecimento”, por oposição à fissuração a frio, ou provocar distorção e degradação da microestrutura se o conjunto for aquecido de forma não uniforme e o limite elástico do material, à volta da zona soldada, não for capaz de suportar o nível de tensões residuais inicial, sendo estas aliviadas por deformação plástica [7, 55]. Nesse sentido o recurso a Normas e códigos de construção é imperativo, previamente a cada aplicação.

Um conjunto soldado, no estado bruto, não é homogéneo no seu estado de tensões e estrutural, por conseguinte, a zona soldada e as zonas circundantes não têm a mesma estrutura que o material base e reagem, portanto, de forma diferente, ao reaquecimento necessário ao alívio de tensões. Por outro lado o estado de tensões não é uniforme, devido à heterogeneidade estrutural e, também, devido a particularidades geométricas do conjunto soldado. Por estas duas razões, pode-se crer que o alongamento plástico, necessário ao alívio de tensões, seja mal suportado junto às soldaduras, no decurso do reaquecimento, devido à estrutura inicial que aí se verifica e às modificações que o ciclo gera. Este risco é aumentado ao nível das zonas onde se manifestam pontos de tensões. Se for tal o caso, o alongamento plástico, imposto, corre o risco de não ser obtido sem a propensão de ocorrência de uma fissuração denominada “fissuração no reaquecimento” [4, 67]. A figura 7 apresenta dois exemplos de fissuração no reaquecimento, que se propagam ao longo dos limites de grão da ZTA.



Figura 7. Exemplos de fissuração no reaquecimento [68].

O fenómeno de fragilização por revenido, à qual escapam os aços C-Mn, pode afluir uma maior probabilidade em certos aços ligados contendo adições de elementos carburígenos, *id est* susceptíveis de formar carbonetos (Ex. Cr-Mo-V). Este fenómeno pode surgir durante ou depois do PWHT, sendo caracterizado por um abaixamento de resistência ao choque, à temperatura ambiente. A explicação é traduzida pela precipitação de carbonetos no interior dos grãos da austenite primária, no intervalo de temperaturas considerado, que impede a deformação ao nível dos limites de grão, enfraquecidos pelo empobrecimento em elementos carburígenos e consequente precipitação de impurezas, que aí se produzem. Assim, se estes aços foram tratados na gama 450-600°C, ou arrefecidos lentamente dentro deste intervalo, poderão surgir os fenómenos de precipitação, sendo os seus principais promotores os elementos P, Sb e Sn, entre outros. O elemento mais pernicioso é o P sempre que em teores superiores a 0,015% (*vide* Anexo II). A presença de Mo até 0,5% poderá inibir a fragilização. Este processo é completamente reversível, bastando para tal um aquecimento acima da temperatura de fragilização, promovendo a sua solubilização, seguido de um arrefecimento suficientemente rápido para evitar a sua precipitação [4, 8, 50, 54].

Os riscos associados ao PWHT, nos aços Cr-Mo, estão relacionados com a composição química dos aços (elementos de liga e impurezas) e, por outro lado, com as condições de execução do tratamento.

Equipamento e procedimentos

Terminologia

Antes da realização do estudo dos tratamentos térmicos on-site (localizados), é relevante definir os termos comumente utilizados para objectivar as diversas variáveis inerentes aos procedimentos:

Banda de tratamento (BT) - Soak Band - É o comprimento de material que deve ser aquecido à temperatura mínima definida, não podendo contudo ultrapassar o limite de temperatura superior estabelecido. A partir desse comprimento, reporta-se ao volume da peça, envolvida no aquecimento, sendo definido como extensão mínima a soldadura, a zona termicamente afectada e uma parte do material adjacente da soldadura.

Banda de aquecimento (BA) - Heated Band - É definida como a área da peça, caracterizada pela sua dimensão longitudinal, sobre a qual são aplicadas as resistências para aquecimento, de forma a permitir que a banda de tratamento satisfaça os requisitos do ciclo térmico definido, permitindo uma inibição das tensões induzidas, *i.e.*, deve consistir na banda de tratamento mais uma parte de material adjacente de forma a garantir o controlo da temperatura e inibição de tensões induzidas na banda de tratamento.

Banda de controlo de gradiente (BCG) - Gradient Control Band - Define-se como a área superficial, caracterizada pela sua dimensão longitudinal, sobre a qual será colocado o isolamento e/ou resistências suplementares. Deve englobar a banda de tratamento, a banda de aquecimento, e uma quantidade suficiente do material adjacente, de forma a que o gradiente de temperatura axial máximo não seja excedido.

Gradiente de temperatura axial - Axial Temperature Gradient - é a variação de temperatura (diminuição) desde a banda de tratamento, em direcção paralela ao eixo do tubo/peça. É frequentemente especificada como a distância mínima, L , sobre a qual a temperatura reduz numa percentagem, para o valor comumente definido como metade da temperatura de tratamento, aquando do aquecimento, patamar e arrefecimento [9].

PROCEDIMENTOS

Nesta secção pretende-se definir os procedimentos para a correcta e profissional utilização da metodologia de tratamentos térmicos on-site, com fundamento no supra apresentado. A metodologia de aquecimento será apenas concernente à aplicação de resistências eléctricas, metodologia utilizada pela Traterme, sendo que os métodos de indução, chama, exotérmico, gás infravermelho ou lâmpada de quartzo infravermelho não serão explorados. Contudo, a tabela 1 apresenta o domínio de aplicabilidade entre as diversas tecnologias/processos e a conveniência de realizar os diferentes tratamentos térmicos associados aos mesmos, bem como vantagens e desvantagens. Destaca-se o uso de resistências eléctricas.

Tabela 1. Domínio de aplicabilidade entre as diversas tecnologias/processos de aquecimento.

		Processos de Aquecimento				
Método T.T.	Indução	Resistências Eléctricas	Chama	Exotérmico	Gás Infravermelho	Quartzo Infravermelho
Pré e Interpasse aquecimento	Sim	Sim	Sim	Não	Limitado	Limitado
Pós Aquecimento	Sim	Sim	Limitado	Muito Limitado	Sim	Sim
PWHT	Sim	Sim	Não	Muito Limitado	Sim	Sim
Vantagens	A, B	C, D	E, F	E, F	A, F	A, F
Desvantagens	G, H, I	J	K	L, M, N	G, I, O	G, I, O, P

Notação:

Vantagens

A - Elevadas Taxas de Aquecimento

B - Capacidade de promover um aquecimento numa ténue banda, adjacente a uma região que apresenta restrições de temperatura

C - Capacidade de manter o aquecimento desde a operação de soldadura ao PWHT

D - Boa capacidade de variar o aquecimento à volta de uma circunferência

E - Baixo investimento Inicial

F - Portátil e de preparação expedita

Desvantagens

G - Elevado custo inicial do equipamento

H - Equipamento de grande porte

I - Capacidade limitada para a criação de zonas à volta de uma circunferência

J - Os elementos podem “queimar “ ou formar arco eléctrico durante o aquecimento

K - Reduzida precisão, repetibilidade, e baixa uniformidade de temperatura

L - Sem possibilidade de ajuste após início de reacção

M - Capacidade limitada de variação de taxas de aquecimento, tempo de patamar e taxas de arrefecimento

N - Limitação dos sistemas a uma configuração de soldadura

O - Equipamento diferente para cada diâmetro de tubagem

P - Equipamento frágil e de manuseamento cuidado

A figura 8 apresenta esquematicamente a metodologia para a correcta preparação de um pré-aquecimento de soldadura, com recurso a resistências eléctricas.

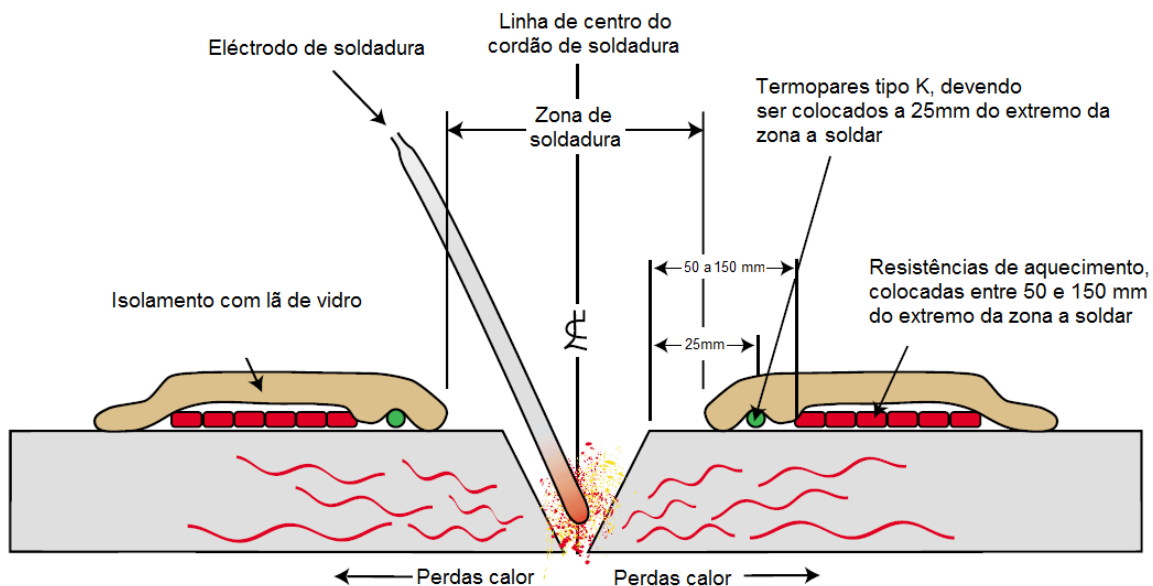


Figura 8. Esquema de montagem de um pré-aquecimento de soldadura.

Em peças de elevada espessura, a zona de pré-aquecimento poderá ser fixada, a título indicativo, de 25 a 35 cm. Quando a temperatura de pré-aquecimento baixar de 10 a 15%, deve efectuar-se, de novo, o aquecimento. A soldadura deve ser executada sem interrupções. Se for necessário a interrupção da soldadura a aplicação do pré-aquecimento deve ser mantida. Se não for possível manter o aquecimento, a junta deve ser arrefecida lentamente com a colocação de isolamento.

Para a realização do PWHT, as figuras 9 e 10, apresentam a metodologia para a correcta preparação de um PWHT, com recurso a resistências eléctricas.

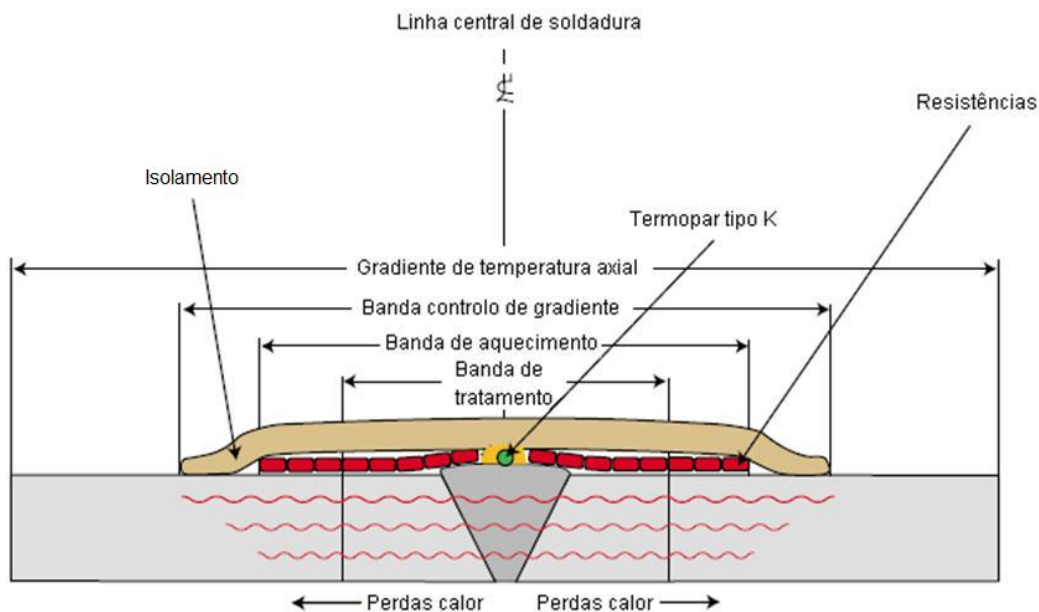
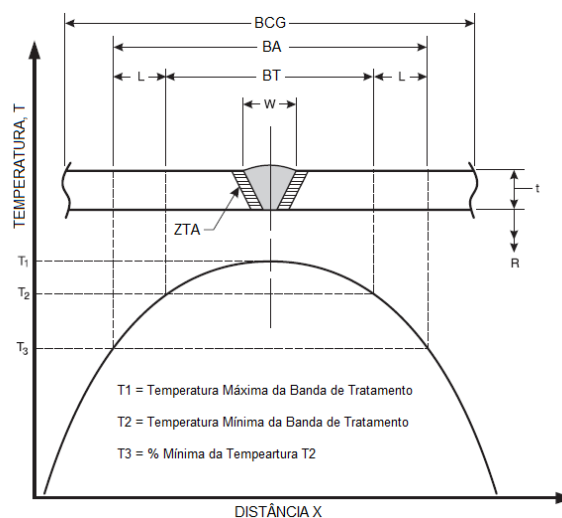


Figura 9. Esquema de montagem de um PWHT.



Legenda:

W - Maior extensão da junta soldada

ZTA - Zona termicamente afectada

BT - Banda de tratamento

L - Distância mínima à qual a temperatura pode decair a uma % no limite da banda de tratamento

BA - Banda de aquecimento

BCG - Banda de controlo de gradiente

t - Espessura nominal da tubagem, ramal ou picagem

R - Raio interno da tubagem, ramal ou picagem

Figura 10. Diagrama esquemático da descrição das bandas de tratamento térmico para o aquecimento a 360° [69].

Medição da temperatura

É fulcral, tal como referido, a medição rigorosa da temperatura durante todo o processo, sendo requerido o seu registo permanente em todo o ciclo de tratamento.

O processo de medição retratado reporta apenas aos termopares tipo K, dado que são os únicos que permitem a operação com a unidade de tratamento térmico. Os termopares tipo K possuem uma composição de NiCr (+) / NiAl(-), conhecido comercialmente como Cromel/Alumel (liga de Ni, Al, Mn e Si). A sua gama de temperaturas possibilita medições entre -200° e 1200°C [34].

Soldadura dos termopares

Os metais são unidos sem material de adição através da aplicação de corrente e pressão na zona a soldar. A passagem de corrente origina uma quantidade de calor, proporcional ao tempo, resistência eléctrica e intensidade de corrente, lei de Joule ($Q = KRI^2t$), permitindo que a região de contacto termopar/peça atinja o ponto de fusão. Com este processo, a fiabilidade é assegurada, garantindo-se que a junção quente é a própria peça, sendo que a transferência de calor não é um problema.

Tratamento por resistências eléctricas

As resistências eléctricas são constituídas por um fio condutor, protegido por ligações de pequenos componentes cerâmicos (FCP - Flexible ceramic Pad Heaters). A sua versátil configuração apresenta-se em módulos, de extensa panóplia de configurações, que são depois unidos de forma a envolver toda a zona a soldar, conforme ilustrado na figura 11.

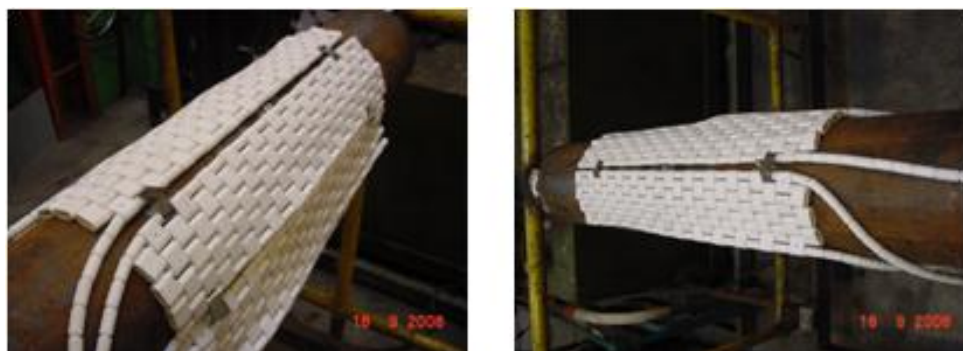


Figura 11. União entre resistências para tratamento térmico.

Após a colocação das resistências, estas têm de ser cintadas, com cinta metálica, à peça a tratar, de forma a garantir que durante o tratamento não haja, em momento algum, o afastamento das mesmas em relação ao tubo/peça, conforme figura 12.

O recurso a dispositivos magnéticos deve ser utilizado com a ressalva da temperatura expectável, dado que o ponto de Curie é aproximadamente 770°C , valor a partir do qual o ferromagnetismo será perdido.

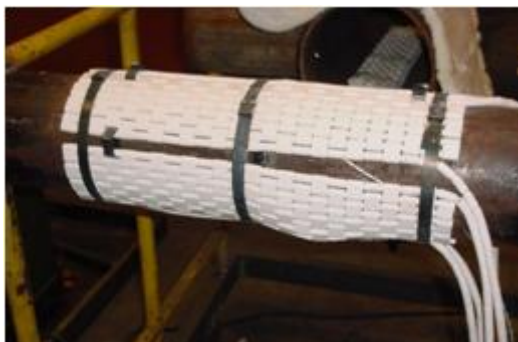


Figura 12. Exemplo de colocação de resistência em tubagem e a sua fixação.

A validação do bom funcionamento das resistências deve ser realizada previamente à operação de isolamento. Nesse sentido, algumas unidades de tratamento térmico, permitem esta avaliação, de forma expedita, bastando para tal rodar o botão de controlo Manual/Automático (*vide* figura 13) e validar o respectivo valor de intensidade de corrente no amperímetro da zona a testar. Por exemplo, se cada resistência de uma zona tiver uma intensidade de 50A e estiverem ligadas 2 resistências o valor apresentado no amperímetro deverá ser de 100A.



Figura 13. Botão selectivo, de uma unidade de tratamento térmico, para validação de intensidade de corrente Manual/Automático.

Isolamento

É importante referir as perdas de calor associadas ao tratamento térmico on-site, e a adjacente criação de gradientes térmicos, que podem ter origem em diversos factores:

- Condução através da própria estrutura a ser sujeita a tratamento térmico;
- Radiação da superfície interior;
- Convecção natural da superfície interior;
- Convecção da superfície interior, através da movimentação do ar no interior de tubagem (efeito chaminé);
- Condução, radiação e convecção, com o ambiente, da superfície exterior da peça através do isolamento.

As perdas por condução através da estrutura sujeita a tratamento térmico poderão ser obviadas com recurso a aquecimento suplementar (colocação de resistências eléctricas suplementares) ou reforço da extensão do isolamento, mediante os casos. As perdas por radiação e convecção natural poderão ser reduzidas controlando a extensão da banda de aquecimento e de controlo de gradiente e, sempre que possível, através de isolamento no interior. As perdas relacionadas com o efeito chaminé poderão ser evitadas, efectuando o “tamponamento” dos topos do tubo a tratar. O isolamento externo da peça tem como objectivo a redução de perdas de temperatura entre a sua superfície exterior e o ambiente, bem como a minimização dos gradientes de temperatura. Caso contrário, o aquecimento das resistências, seria ineficaz, mesmo em plena potência da unidade de tratamento térmico. Sempre que possível, o isolamento deverá ser colocado no interior da peça/tubagem de forma a reduzir o gradiente entre a superfície externa e interna, resultante das perdas por radiação e convecção da superfície interna.

Existem vários tipos de isolamento cujos atributos poderão variar consoante o tipo de fibra, fabrico e densidade, sendo as propriedades físicas do isolamento, como a condutividade térmica e máxima temperatura de utilização, dependentes dos factores supra. Nesse sentido, poderá ser especificado o tipo de isolamento mediante a resistência térmica (R-value) que permite identificar a performance, independentemente da espessura e condutividade, na definição de banda de controlo de gradiente, *i.e.* R-value, do isolamento seja $0,35^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ [69].

De forma convencional utiliza-se as mantas cerâmicas RCF (refractory ceramic fibres), cujo principal constituinte é o dióxido de silício (SiO_2) com diversos outros óxidos, que poderão ter várias espessuras (13, 25 e 50mm) e com uma densidade de 96 ou $128\text{kg}/\text{m}^3$, cuja

temperatura máxima de aplicação ronda os 1200°C. Em diversas situações poderá ainda ser utilizada a lã de rocha com 50 ou 100 mm de espessura e 100 kg/m³ de densidade, cuja temperatura de aplicação ronda os 750°C.

Comummente utiliza-se a lã cerâmica de 25mm disposta numa camada, para temperaturas na ordem dos 650°C, e as de 50mm, ou duas camadas de 25mm, para temperaturas superiores. O R-value para ambas as espessuras situa-se na gama 0,35°-0,7°C-m²/W, o que na aplicação prática e com o recurso à adequada banda de controlo de gradiente, estabelece gradientes de temperatura axial dentro do expectável e permissível [69].

O isolamento é colocado directamente sobre as resistências eléctricas. Contudo, só deverá ser efectuado depois de validado o bom funcionamento das mesmas, de forma a evitar complicações posteriores. Após validação deve-se envolver as resistências com lã cerâmica que é atada à peça com fio de fibra cerâmica, ou arame. Esta união deve ser firme para evitar o afastamento entre o isolamento e as resistências.

Nota: A utilização da lã cerâmica e devido à sua perigosidade deve ser manuseada com todos os cuidados e a devida utilização de EPI's (Equipamento de protecção individual) [80].

Ciclo de Tratamento Térmico

Conforme supra referido existem quatro factores fulcrais durante a execução do ciclo de tratamento térmico que devem ser monitorados:

- Uniformidade de temperatura;
- Taxa de aquecimento acima de determinada temperatura (temperatura inicial de controlo);
- Tempo e temperatura de patamar;
- Taxa de arrefecimento e temperatura final de controlo.

A uniformidade de temperatura é um conceito pouco referido nos códigos de construção (Ex. B31.3 que refere que o aquecimento deve promover uniformidade de temperatura), com excepção do ASME Section III, que fornece requisitos específicos no concernente à uniformidade de temperatura durante a execução do PWHT, sendo definido como limite para a variação de temperatura durante o aquecimento e arrefecimento os 138,9°C, no intervalo de 4,6m de extensão da soldadura. Este limite age como um gradiente circunferencial de temperatura, dado que está relacionado com o aquecimento circunferencial de soldaduras de topo. Durante o estágio, a máxima diferença de temperatura aceitável é de 55°C ou o limite definido do intervalo, sendo menor. De igual forma, para diferença de temperatura máxima aceitável à volta de qualquer plano

circunferencial na banda de aquecimento, contudo fora da banda de tratamento, é de 55°C [69].

Para os restantes tratamentos a baixa temperatura como pré-aquecimentos, não se verificam referências concretas.

A tabela 2 resume a comparação de taxas de aquecimento e arrefecimento durante a realização de PWHT, entre vários códigos. O ASME B31.1 refere controlo de taxas de aquecimento e arrefecimento acima de 316°C, o ASME B31.3 não refere explicitamente taxas, o ASME Section III refere necessidade de controlo de temperatura acima dos 427°C e a BS2633 refere como temperatura inicial de controlo os 400°C.

Tabela 2. Comparativo entre as várias taxas de aquecimento e arrefecimento durante PWHT.

Comparação de taxas de aquecimento e arrefecimento durante PWHT		
	Processos de Aquecimento	
Código de Construção	Taxa máxima de aquecimento	Taxa máxima de arrefecimento
B31.1	333°C/h dividido por ½ da espessura máxima (em polegadas) na soldadura, acima de 316°C; 333°C/h máximo	333°C/h dividido por ½ da espessura máxima (em polegadas) na soldadura, acima de 316°C; 333°C/h máximo; Restrições adicionais dependem do material sujeito a PWHT
B31.3	Não especifica	Não especifica
ASME Secção III, Subsecção NB	222°C/h dividido pela espessura (em polegadas) acima dos 427°C ; 55°C/h mínimo; 222°C/h máximo	222°C/h dividido pela espessura (em polegadas) acima dos 427°C ; 55°C/h mínimo; 222°C/h máximo; Restrições adicionais dependem do material sujeito a PWHT
BS263	Dependente do material, diâmetro e espessura ; as taxas podem variar entre 6250°C/h dividido pela espessura (em mm) até 220°C/h acima dos 400°C	Dependente do material, diâmetro e espessura ; as taxas podem variar entre 50°C/h até 275°C/h acima dos 400°C

As taxas referidas para os diversos códigos visam limitar a promoção de novas tensões devidas a fenómenos de expansão e contracção não uniformes, uma vez que, com a aplicação de uma fonte externa de calor (resistências eléctricas), cria-se um gradiente de temperatura através da espessura da peça, entre a superfície externa e interna, sendo uma fonte de tensões, dado que a superfície exterior tende a expandir, mas fica limitada pelo material interior que se encontra a uma temperatura inferior. À medida que a espessura aumenta, o gradiente de temperatura também aumenta, para um determinado input de calor, *i.e.*, à medida que as taxas aumentam as variações de temperatura também aumentam. Desta forma as especificações relativas às taxas de aquecimento e arrefecimento são estabelecidas em relação à espessura das peças em questão. Os efeitos

e benefícios associados aos tratamentos de pós-aquecimento e PWHT estão ligados ao tempo-temperatura, sendo a temperatura a variável mais relevante. Por conseguinte deve dar-se preferência, caso o código não o refira, à realização de tratamentos térmicos que produzam os resultados num período de tempo inferior, em contrapartida ao recurso de temperaturas baixas e ciclos longos.

No que concerne à temperatura e tempo de patamar, estes são definidos em função do material e da espessura. A primeira consideração é a de que toda a espessura da peça deve atingir a temperatura definida. Para determinados materiais o prolongamento do tempo de patamar poderá reduzir a resistência à tracção e o limite convencional de elasticidade, e aumentar a temperatura de transição dúctil/frágil.

Os referenciais normativos B31.1 e ASME III permitem tempos maiores a temperaturas inferiores, para determinados materiais, enquanto a B31.3 e BS2633 não.

Relativamente à taxa de arrefecimento é importante referir que as tensões promovidas durante o aquecimento tendem a ser reduzidas pelo patamar, mas no arrefecimento as mesmas ficarão retidas, sendo pois importante o seu controlo cuidado. As tensões surgem pela diferença de temperatura na peça. Dependendo dos códigos poderá ser definido o intervalo de temperatura entre os 316°-427°C como temperatura final de controlo sem que haja a promoção de tensões. A velocidade de arrefecimento poderá afectar também as propriedades mecânicas. Por conseguinte, é importante salientar que para determinados materiais como os aços inox ferríticos, taxas de arrefecimento baixas poderão "expor" o material demasiado tempo na gama de temperatura que promove fragilização, reduzindo a sua tenacidade. Da mesma forma, aços ligados (ao Mn-Mo, ao Mn-Ni-Mo ou Cr-Mo) podem ser sensíveis à fragilização por revenido que se produz no intervalo 450°-550°C ou durante o arrefecimento, se a taxa for demasiado lenta aquando da transição na gama de temperaturas [4].

As unidades de tratamento térmico dispõem, tal como referido, de controladores de temperatura que tendem a, de forma automática, respeitar o programa introduzido (ciclo de tratamento térmico). A figura 14 apresenta alguns controladores de temperatura aplicados em unidades de tratamento térmico.



Figura 14. Exemplo de controladores de temperatura em unidades de tratamento térmico.

Contudo, na aplicação prática, podem sempre surgir algumas complicações, tais como:

- Avaria nos termopares;
- Falha no aquecimento;
- Interrupção do tratamento durante o aquecimento, patamar ou arrefecimento;
- Aquecimento excessivo/tempo de patamar fora do especificado.

Para a resolução de exposição a tais factores devem ser desenvolvidas algumas medidas de precaução. No que concerne à avaria de termopares, a forma mais expedita de obviar esta questão é o recurso à colocação de um termopar suplente, que permite facilmente proceder à substituição em caso de avaria, sem obrigar a paragem do tratamento térmico e remoção do isolamento e resistências. Para tal é fulcral a correcta identificação das zonas de colocação dos mesmos, devendo ser efectuada a sua disposição *ad hoc*. A falha no aquecimento deriva essencialmente do equipamento, podendo ser localizada, e.g. avaria de um contactor. A única forma de prevenir é o recurso a uma boa manutenção e avaliação antes do início de cada ciclo de tratamento térmico. Poderão também existir causas externas ao tratamento, como interrupção no fornecimento de energia eléctrica. Durante o aquecimento poderemos ter dois desvios, acima ou abaixo da taxa definida, sendo que se for superior, por exemplo, devido ao facto de um contactor “colar”, a primeira medida é a correcção do motivo que provocou o desvio. Seguidamente, recomeçar o aquecimento à taxa definida (não havendo, de modo geral, a necessidade de arrefecer à temperatura ambiente e recomeçar o ciclo). O grande risco associado poderá ser a distorção provocada pelas diferenças de temperatura na peça. Tal deverá ser avaliado após conclusão do tratamento térmico de PWHT.

A questão de excesso da taxa máxima de aquecimento prende-se essencialmente nos tratamentos de PWHT, dado que nos pré e pós aquecimentos as velocidades de aquecimento não são definidas. Se a taxa for inferior é necessário proceder à sua correcta avaliação pois pode haver demasiadas perdas, o equipamento não ter potência suficiente para o aquecimento, etc. Deve-se rever os procedimentos da definição das bandas de tratamento, aquecimento e de controlo de gradiente e depois avaliar a necessidade de, por exemplo, adaptação de resistências de apoio, reforço de isolamento etc. Sendo corrigido poderá ser recomeçado o ciclo. Os desvios de temperatura durante o patamar do ciclo de tratamento térmico poderão ser superiores ou inferiores ao intervalo de tolerância definido. Em ambos os casos, a primeira medida é a detecção do motivo da falha e, sempre que possível, a sua correcção. Após correcção e sendo a temperatura inferior ao limite, o aquecimento deverá ser retomado à taxa definida até atingir novamente a temperatura de patamar, onde o somatório de tempo à temperatura de patamar ou acima

deve ser igual ou superior ao mínimo definido. No que concerne ao excesso relativamente à temperatura definida, vários factores devem ser tidos em consideração tal como informação técnica do material, que deve ser considerada para análise. Contudo, devem ser seguidos alguns procedimentos em caso de constatação de que o limite de temperatura crítica foi atingido *i.e.* austenitização do material: Redução da temperatura para o intervalo definido, à velocidade de arrefecimento pré-estabelecida e deve ser mantida, a temperatura de patamar, pelo tempo inicialmente definido, independentemente do tempo que já possa ter estado sujeita a essa mesma temperatura. Este procedimento é executado para garantir que foi realizado o revenido de material que, com o elevar de temperatura, possa ter sofrido algum endurecimento devido a uma eventual transformação. Após a realização do tratamento deverá ser feita uma avaliação cuidadosa, com recurso a medição de dureza e/ou réplicas que permitam determinar se as propriedades mecânicas foram afectadas.

Se a temperatura não excedeu o limite crítico, deve proceder-se à redução da temperatura para o intervalo definido, à velocidade de arrefecimento pré-estabelecida e devendo ser mantida a temperatura de patamar pelo restante tempo definido. Consequentemente, no final, deverá ser executada uma avaliação para aceitação final.

Se existir interrupção do ciclo aquando do arrefecimento, tal como no aquecimento, poderemos assistir a uma taxa de arrefecimento superior ou inferior ao especificado. Se a taxa for superior, poderão ter sido induzidas novas tensões e até distorção. No caso das tensões induzidas, e não existindo preocupações com tempos de patamar excessivos, deverá ser repetido o tempo de patamar, aquecendo como uma taxa dentro do definido, repetindo-se o patamar (sendo que a relaxação de tensões ocorre devido à redução do limite convencional de elasticidade). Eventualmente pode-se efectuar o patamar por um curto período de tempo podendo ser suficiente uma hora e arrefecer dentro dos limites definidos.

Relativamente ao tempo de patamar, este deve ser controlado pelo operador da unidade, de forma a não permitir o seu prolongamento, dado que as propriedades mecânicas de determinados materiais poderão ser afectadas. No entanto, se o procedimento de tratamento térmico for inadequado, na definição da banda de tratamento, de aquecimento e de controlo de gradiente poderemos ter um número de resistências insuficientes, a não utilização de resistências suplementares em peças de elevadas espessuras, isolamento ou potência insuficiente do equipamento, o que pode obrigar, por exemplo, num tratamento com recurso a diversos termopares, à colocação em espera (suspensão do ciclo térmico) de determinadas zonas, até que a mais desfavorável atinja a temperatura de patamar.

Contudo, apenas alguns códigos obrigam à realização de réplicas aquando da prolongação de mais 80% do tempo de patamar definido, sendo aceite o tratamento térmico cujos máximos de aquecimento e mínimo tempo de patamar foram cumpridos.

No concernente à repetição de tratamento térmico, mais do que uma vez, poderá requerer análise detalhada de diversos factores que permitam a sua persecução:

- Ciclo térmico;
- Composição do material: Base e de adição;
- Condições de tratamento térmico do metal base;
- Propriedades expectáveis.

Esta avaliação pode exigir, em última instância, a realização de réplicas para uma correcta avaliação.

É importante avaliar as condições ambientais antes da realização dos tratamentos térmicos, sendo que os códigos B31.1 e ASME Section III não tecem consideração a este aspecto.

Caso Prático

Introdução

O estudo prático encontra-se dividido em duas partes: uma primeira parte que retrata as modificações ao nível da microestrutura de uma junta soldada, em material P22, com e sem tratamento térmico, validação das vantagens da execução do tratamento térmico e consequente verificação, no concernente ao receio de uma possível fissuração por reaquecimento surgir derivada do tratamento térmico. Uma segunda que pretende atestar a importância de uma rigorosa execução e controlo da variação de temperatura, em peças de configuração complexa, aquando da realização do tratamento térmico. Essas variações, na prática, são influenciadas pela escolha apropriada dos locais críticos cuja temperatura se pretende monitorar, bem como pela disposição/tipo de resistências eléctricas a utilizar. O estudo reporta a uma estrutura cilíndrica com vários componentes soldados (“ramais”), aquando da aplicação de um tratamento térmico após soldadura, PWHT (Post Weld Heat Treatment), em toda a envoltória da peça (360°).

1º Estudo

O material seleccionado para o estudo pertence ao grupo dos aços Cr-Mo, um aço de baixa liga e elevada resistência, vulgarmente designado por P22.

Os aços Cr-Mo são materiais ferríticos específicos para a utilização em temperaturas elevadas. A adição de Crómio permite resistir à oxidação, inclusive a temperaturas elevadas, e à corrosão, em geral, sobretudo em meios oxidantes. Esta resistência aumenta com o aumento da quantidade de Crómio. Até à quantidade de 2,5 % de Cr, verifica-se um aumento de resistência à fluência, sendo que para percentagens maiores essa resistência diminui de forma acentuada (excepto nos aços inox austeníticos, contendo Ni). Por tal facto, aços com 2,5% de Cr são específicos para aplicações a alta temperatura, com grandes esforços mecânicos e baixa corrosão, para os quais a principal preocupação é a resistência à fluência [14, 66].

O Molibdénio promove o refinamento de grão, boa resistência à ruptura por fluência a altas temperaturas. Minimiza o efeito de fragilidade ao revenido, sendo a propensão de atenuação do efeito fragilidade mais acentuada na presença conjunta com o Cr [14, 54, 66].

A composição química deste material está expressa na tabela 3, representativa de alguns aços Cr-Mo.

Tabela 3. Composição química de alguns aços Cr-Mo.

Composição Química de Alguns aços Cr-Mo												
Especificação	C %	Mn %	P % Max	S % Min	Si %	Cr %	V % Max	Mo % Max	N % Max	NI %	Al %	Cb %
ASTM A335/P1	0.10 - 0.20	0.30 - 0.80	0.025	0.025	0.10 - 0.50	-	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P2	0.10 - 0.20	0.30 - 0.61	0.025	0.025	0.10 - 0.30	0.50 - 0.81	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P5	0.15MAX	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50MAX	4.00 - 6.00	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P9	0.15MAX	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.25 - 1.00	8.00 - 10.00	-	0.90 - 1.10	-	-	-	-
ASTM A335/P11	0.05 - 0.15	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50 - 1.00	1.00 - 1.50	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P12	0.05 - 0.15	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50MAX	0.80 - 1.25	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P22	0.05 - 0.15	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50MAX	1.90 - 2.60	-	0.87 - 1.13	-	-	-	-
ASTM A335/P91	0.08 - 0.12	0.30 - 0.60	0.020	0.010	0.20 - 0.50	8.00 - 9.50	0.18 - 0.25	0.85 - 1.05	0.03 - 0.07	0.40MAX	0.40MAX	0.06 - 0.10

Para este material pretende-se validar a vantagem associada aos requisitos de tratamento térmico, quer de pré, pós-aquecimento e de PWHT, avaliando-se as propriedades mecânicas de um provete com tratamento térmico e sem tratamento térmico. Sendo que o objectivo fulcral do tratamento térmico é o alívio de tensões, que deve ser realizado antes que efeitos da precipitação promovam fragilização ou fissuração. Para tal o ciclo térmico a aplicar deve prever um compromisso entre uma taxa de arrefecimento o mais elevada possível, para não promover fenómenos de precipitação, e uma taxa de arrefecimento lenta, para não originar uma reintrodução de tensões.

Procedimento

Executou-se, pelo processo de soldadura TIG, a soldadura em três provetes (tubos) em material P22, com e sem tratamento, de dimensões 3,4mm de espessura e 33,4mm de diâmetro e 1000mm de comprimento. As soldaduras foram executadas por soldador certificado.

O processo de aquecimento utilizado para a prossecução do tratamento térmico foi por resistências eléctricas, conforme supra descrito na secção tratamento por resistências eléctricas.

Realizou-se o tratamento térmico por meio de resistências eléctricas, de configuração “one liner”. Estas resistências foram dispostas em bandas circunferenciais a envolver a junta soldada. Depois de colocadas foram fixadas com arame.

A disposição das resistências foi realizada de forma a permitir uma variação de temperatura, dentro do intervalo de tolerância estabelecido, em toda a superfície a tratar termicamente.

Recorreu-se ao uso de termopares tipo “K” (Ni-Cr / Ni-Al) sendo fornecido o certificado de conformidade do fabricante.

A disposição e colocação dos termopares foi definida em função do diâmetro dos provetes, tendo sido aplicado dois termopares aquando do pré e pós-aquecimento e apenas um na realização do PWHT [69]. Os termopares foram soldados (soldadura por resistência) no local específico para medir a temperatura do ciclo térmico definido.

Após colocação das resistências, os provetes foram devidamente isolados com lã cerâmica de 25 mm de espessura e 128kg/m³ de densidade.

O ciclo térmico foi programado individualmente em cada controlador de temperatura, cujos valores reais foram impressos num registo gráfico, com uma velocidade de 60mm/h e escala de 10°C. Estas definições permitem, facilmente, visualizar a sequência do tratamento térmico, bem como qualquer desvio que possa surgir aquando da realização do tratamento térmico. Todos os controladores de temperatura e o registador da unidade de tratamentos térmicos utilizada estavam devidamente calibrados.

O ciclo de tratamento térmico aplicado resume-se na figura 15, sendo constituído por um pré-aquecimento, pós aquecimento e tratamento térmico, definidos pelo código ASME B31.1. (cf. Pág.37 e 38).

Um possível receio de que a temperatura de 720°C promovesse uma austenitização parcial foi analisado com recurso a um tratamento térmico de “têmpera em água”, sendo medida

a dureza do provete antes e após tratamento térmico. O ciclo definido foi de 45 minutos à temperatura de estágio e conseqüente arrefecimento em água (cf. Pág.43).

A metodologia de cálculo das bandas de tratamento (BT), aquecimento (BA) e de controlo de gradiente (BCG), foram:

De acordo com o ASME B31.1

$$BT = 3 \times e$$

$$BT = 3 \times 3,4$$

$$BT = 10,20 \text{ mm}$$

$$BA = BT + 4\sqrt{r \times e}$$

$$BA = 10,2 + 4\sqrt{15 \times 3,4}$$

$$BA = 38,77 \text{ mm}$$

$$BCG = 10\sqrt{r \times e}$$

$$BCG = 71,41 \text{ mm}$$

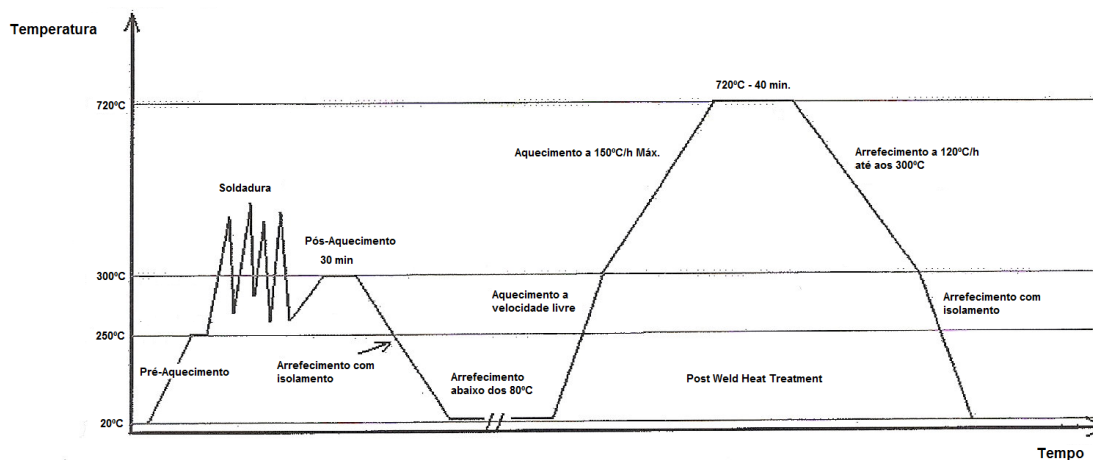
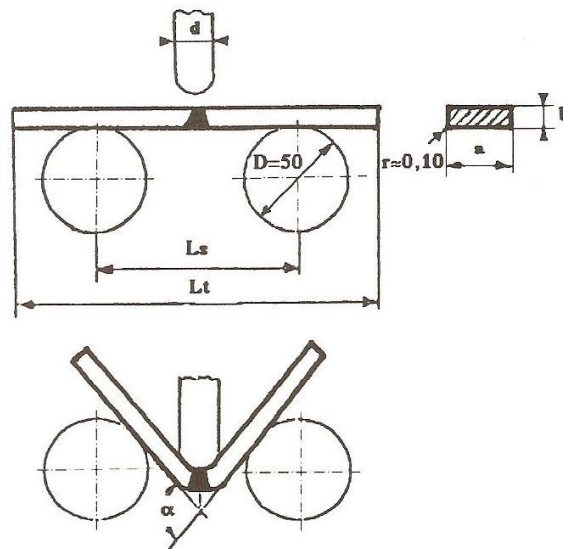


Figura 15. Esquema do ciclo de tratamento térmico executado no provete.

Para análise das propriedades mecânicas e avaliação das diferenças entre amostras, com e sem tratamento térmico e detecção de fissuras, realizaram-se ensaios dureza HV10 e HV0,5, análise metalográfica, exame radiográfico de raios X (pelo processo digital e película) e ensaio de dobragem na junta soldada, de acordo com a NP EN 910:1999 sendo os provetes recolhidos de forma a que o eixo longitudinal seja perpendicular ao cordão de soldadura, tendo sido executado em posição de face e raiz, *i.e.*, em ambas as faces da junta soldada. A distância entre rolos foi de 24 mm e o diâmetro do punção 16mm. (*vide* figura 16). (cf. Pág.39 a 44).



Legenda:

- a - Espessura - 3,4mm
- b - Largura do provete - aprox. 8,0mm
- L_s - Distância entre apoios - 24 mm
- L_t - Comprimento total do provete - 204 mm
- α - Ângulo de dobragem - 180 °C
- d - Diâmetro punção
- D - Diâmetro dos roletes de apoio

Figura 16. Esquema do dispositivo de ensaio de dobragem [10].

Era intenção deste estudo a realização de um ensaio de tracção a quente, contudo, o mesmo não foi realizado dado que os provetes não permitiam a extracção do corpo de prova nas medidas definidas pela Norma para a realização deste ensaio.

O pré-aquecimento foi definido a 250°C, e as condições de montagem para o pré-aquecimento, conforme esquema da figura 17. Salienta-se a distância do termopar à junta a soldar de 25mm.

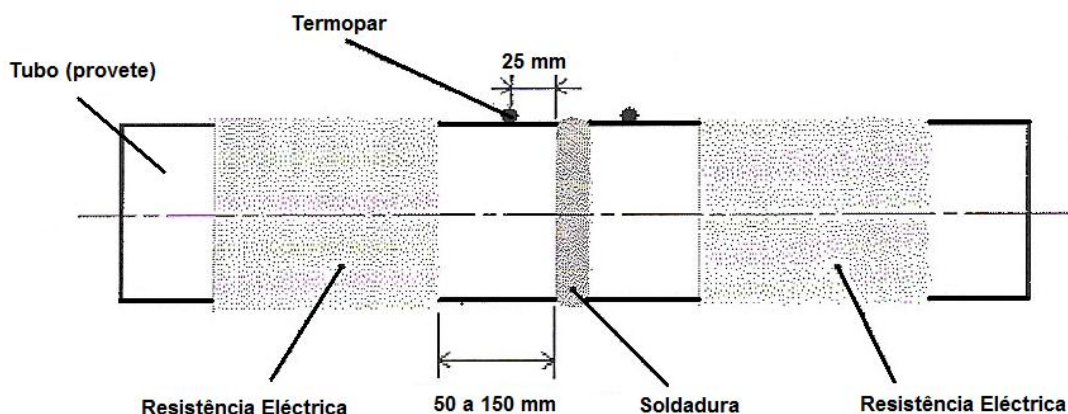


Figura 17. Esquema de montagem para a realização do pré-aquecimento, nos provetes.

O pós-aquecimento foi definido a 300°C, com duração de 30 minutos, seguido de arrefecimento lento, com isolamento de lã cerâmica.

A figura 18 apresenta a montagem real, nos provetes em estudo, do pré-aquecimento de soldadura. Reportando-se à sequência: A - junta (pingada); B - colocação de resistências eléctricas e termopares e C - isolamento.



Figura 18. Preparação e montagem do pré-aquecimento com resistências eléctricas “one-line”.

Destaca-se o facto de o termopar ser colocado externamente à resistência eléctrica, de forma a garantir a correcta temperatura na junta a soldar.

O processo de soldadura foi realizado com recurso ao pré-aquecimento e conseqüente pós-aquecimento, nas condições definidas. Concluído o pré e pós aquecimento, procedeu-se à remoção das resistências e termopares e iniciou-se a montagem do PWHT, conforme figura 19, com o termopar colocado na posição das 12 horas, conforme recomendação da AWS D10.10.

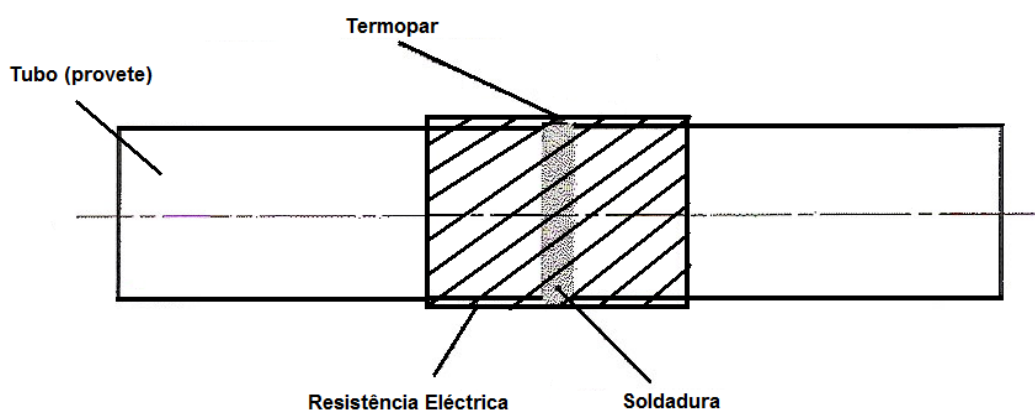


Figura 19. Esquema de montagem para a realização do PWHT, nos provetes.

Conforme supra referido, este tratamento foi realizado com apenas um termopar na junta soldada e uma resistência “one-line”, sendo depois isolado o conjunto com lã cerâmica, conforme figura 20.



Figura 20. Unidade de tratamento térmico utilizada e montagem do PWHT.

Em contraponto ao supra apresentado, a figura 21 apresenta a realização da soldadura do provete sem recurso ao pré-aquecimento.



Figura 21. Soldadura de provete, sem tratamento térmico.

Após o tratamento térmico, foram seccionados os provetes, e realizadas medições de dureza HV10, em ambos os lados da soldadura, *vide* figura 22.

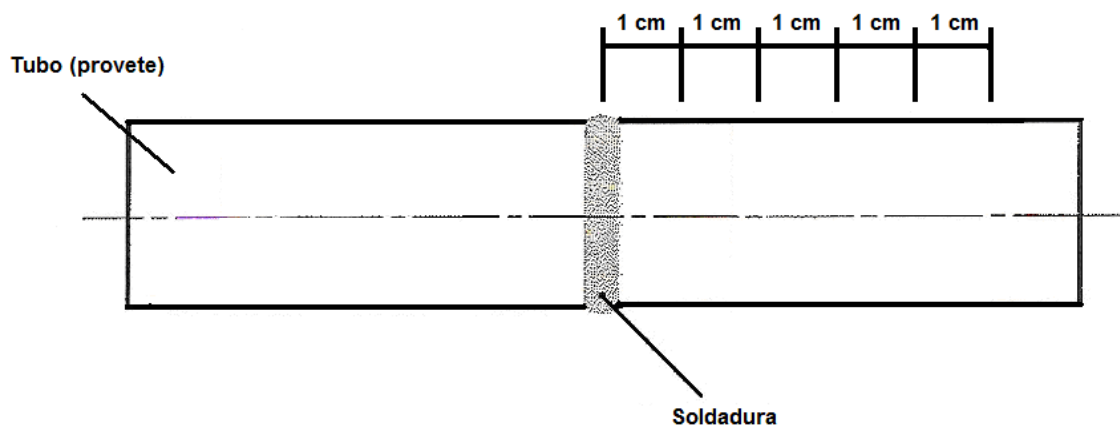


Figura 22. Esquema de medição de durezas Vickers HV10.

A figura 23 apresenta a secção dos provetes para a realização da medição de durezas, com comprimento de aproximadamente 150mm.



Figura 23. Secção dos provetes para medição de dureza HV10.

Concluída a medição de dureza, foi realizado o corte nos provetes, para a montagem a quente das amostras, *vide* figura 24, e conseqüente ensaio de “varrimento” de medição de dureza HV0,5.



Figura 24. Seccionamento do provete para posterior montagem metalográfica, a quente.

Paralelamente foi realizado o ensaio de raios X, pelo processo digital e película.

Para a realização do procedimento radiográfico, definiu-se uma exposição tipo Elipse, parede dupla [78]. A distância fonte filme/placa de 700mm, tensão de 150 Kv e Corrente de 5mA. Índice de qualidade de imagem (IQI) W13; filme D4. O tempo de exposição foi de 4 minutos e 10 segundos (de acordo com ábaco de exposição Balteau Baltospot GFD 165).

A figura 25 ilustra o posicionamento dos provetes e da placa, para o processo digital, sendo visível a fonte utilizada para o processo analógico, *i.e.*, de película.



Figura 25. Disposição dos provetes para o ensaio de Raios X.

Resultados

A figura 26 representa o registo gráfico, do pré e pós-aquecimento, a que os provetes estiveram sujeitos.

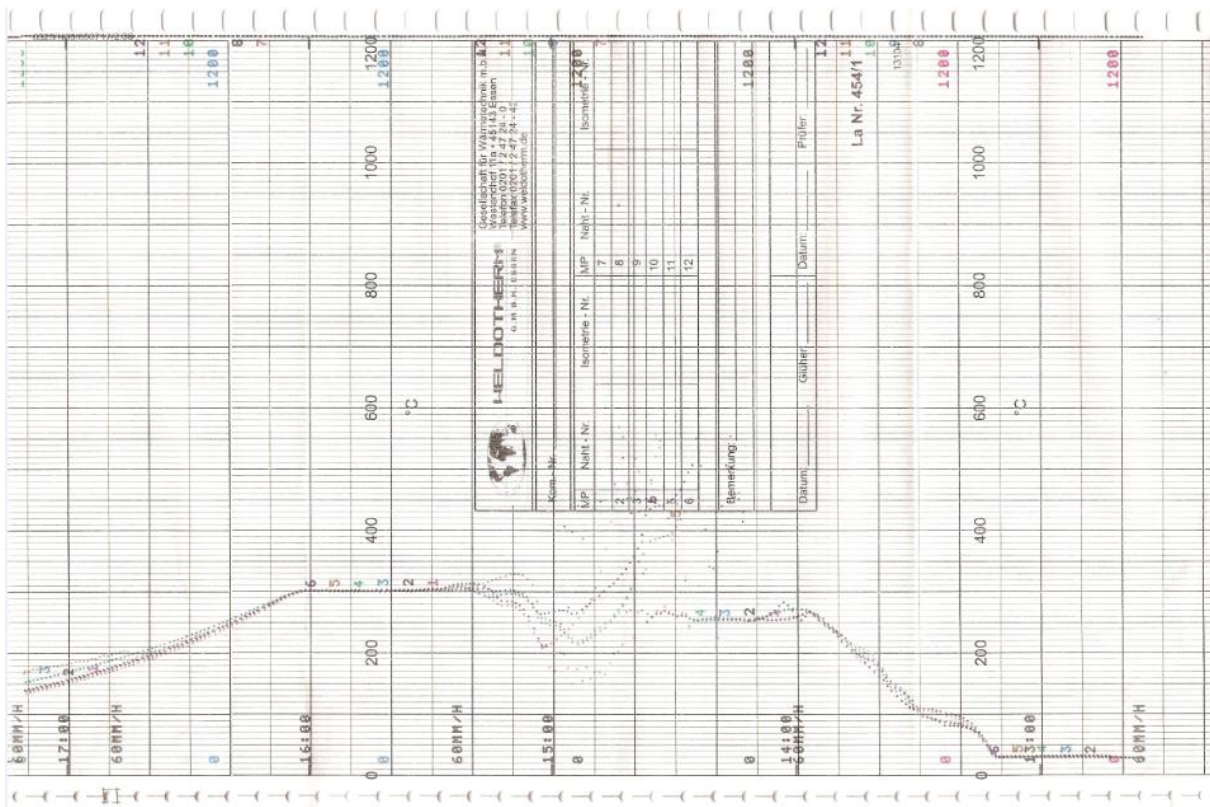


Figura 26. Registo gráfico, do pré e pós aquecimento, da soldadura do 1º Estudo.

A figura 27 apresenta o registo gráfico do PWHT a que os provetes estiveram submetidos.



Figura 27. Registo gráfico do PWHT do 1º Estudo.

Com recurso a uma “lupa” registaram-se as imagens dos provetes com e sem tratamento térmico, sendo passível de identificação visual as zonas de soldadura, ZTA e material base, conforme figura 28.

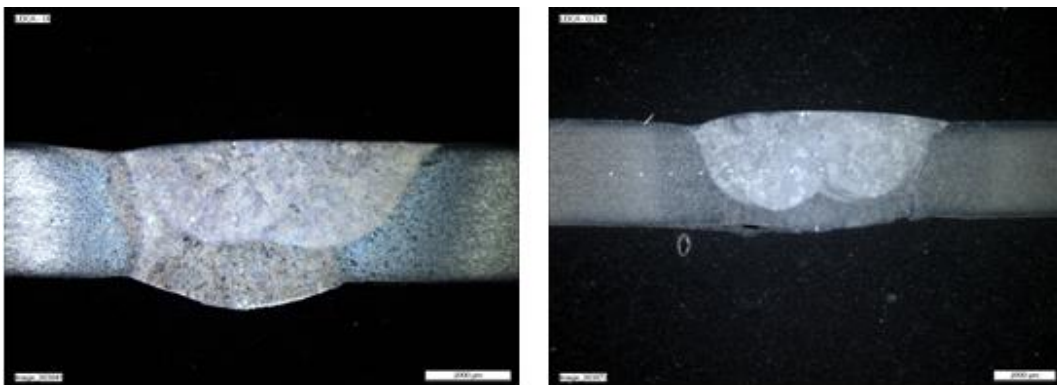


Figura 28. Fotografia em lupa de amostras, sem e com tratamento térmico, respectivamente.

Os valores de dureza HV10 apresentam-se na tabela 4.

Tabela 4. Valores de dureza HV10 nos provetes, com e sem tratamento térmico.

Valores de dureza HV10				
Provete com tratamento térmico			Provete sem tratamento térmico	
Soldadura - 170			Soldadura - 254	
N.º1	136,9	131,9	143,1	147,1
N.º2	144,7	126,4	136,9	143,1
N.º3	129,8	121,9	135,9	151,4
N.º4	133,3	131,9	156,0	162,0
N.º5	135,5	143,1	160,0	151,4

Para os ensaios de “varrimento” de dureza HV0,5, realizaram-se as medições, nos pontos de intercepção das linhas amarelas, apresentado na figura 29. Os locais de medição correspondem ao ponto de intercepção das linhas amarelas verticais e horizontais.

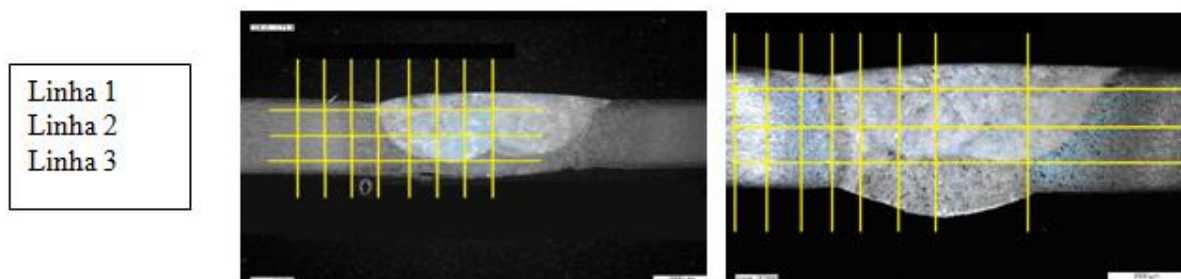


Figura 29. Representação das zonas onde se promoveu a medição de dureza.
 (Amostra com e sem tratamento térmico, respectivamente)

A tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de “varrimento” de durezas nos provetes com e sem tratamento térmico, respectivamente.

Tabela 5. Resultados de varrimento de durezas Vickers.

Valores de dureza HV0,5																
	Provete com tratamento térmico								Provete sem tratamento térmico							
Linha 1	164,8	159,7	170,0	196,7	190,0	204,1	198,9	199,9	151,5	209,3	266,0	269,0	266,0	286,0	286,0	266,0
Linha 2	174,0	208,0	232,0	220,0	209,0	214,0	217,0	216,0	199,0	293,0	306,0	267,0	294,0	294,0	292,0	277,0
Linha 3	131,9	130,8	194,2	191,3	193,6	199,9	198,6	193,5	134,0	258,0	272,0	283,0	269,0	313,0	330,0	249,0

Transportando os valores médios para o registo gráfico, a figura 30 ilustra as variações de dureza encontradas nos provetes, com e sem tratamento térmico, respectivamente.

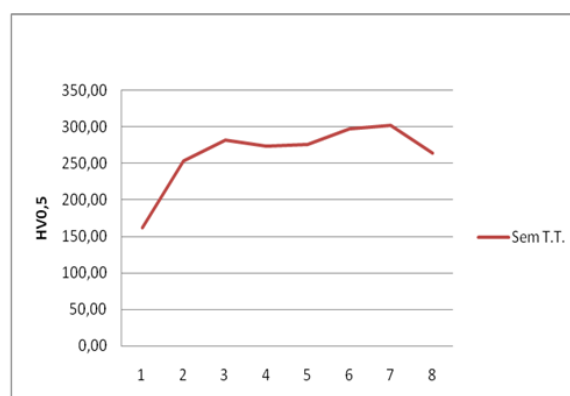
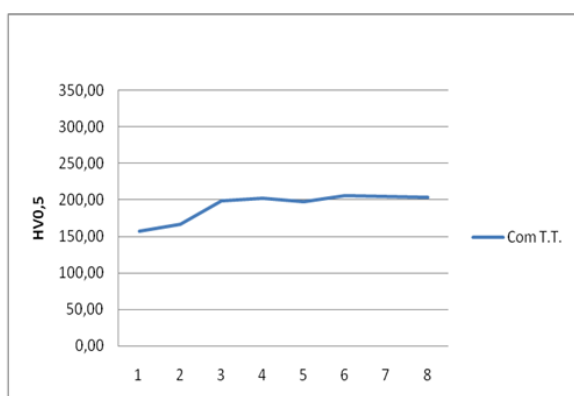


Figura 30. Gráficos dos valores médios de variação de dureza HV0,5, ao longo do eixo longitudinal da soldadura.

Observação da microestrutura

Após preparação e montagem das amostras, estas sofreram um ataque com Nital 3% - durante 20s.

As microestruturas representadas pelas figuras 31 a 34 referem-se à amostra não sujeita a pré-aquecimento e tratamento térmico.

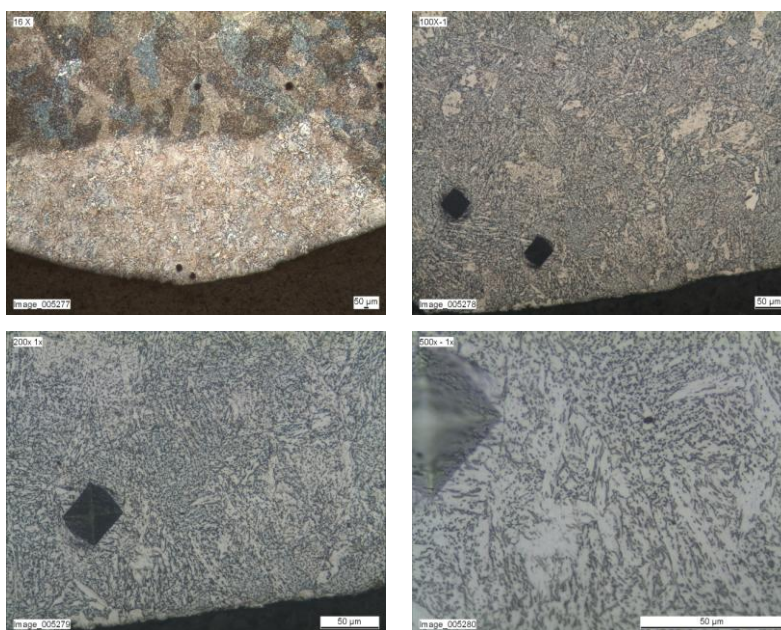


Figura 31. Microestruturas nas zonas do 1º passe do provete sem tratamento térmico.

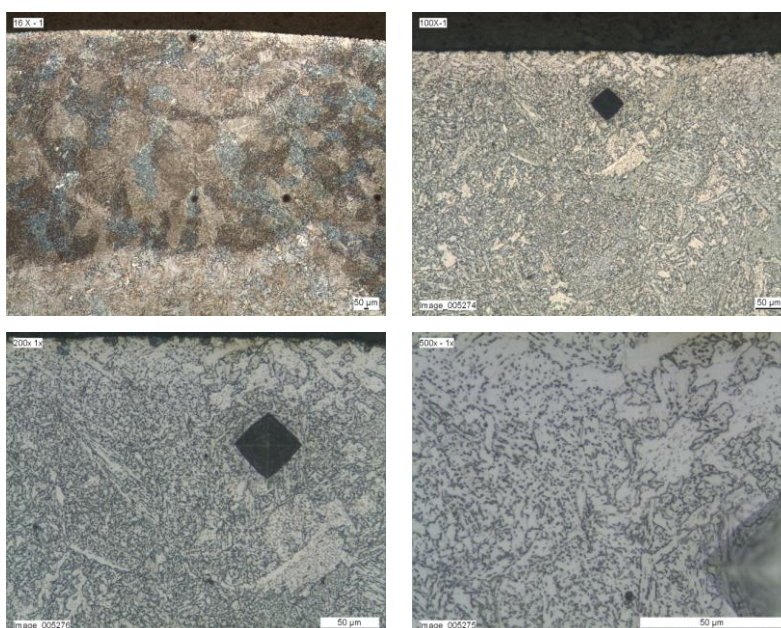


Figura 32. Microestruturas nas zonas do 2º passe do provete sem tratamento térmico.

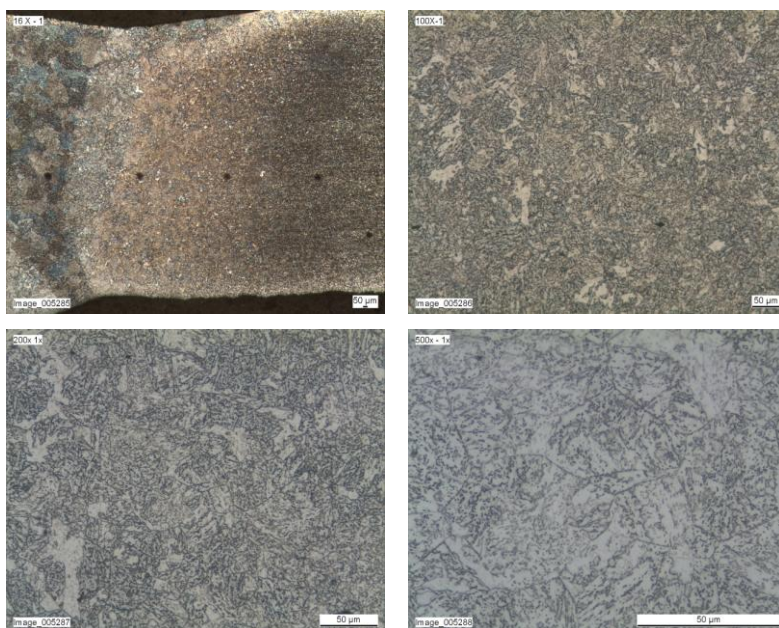


Figura 33. Microestruturas na ZTA do provete sem tratamento térmico.

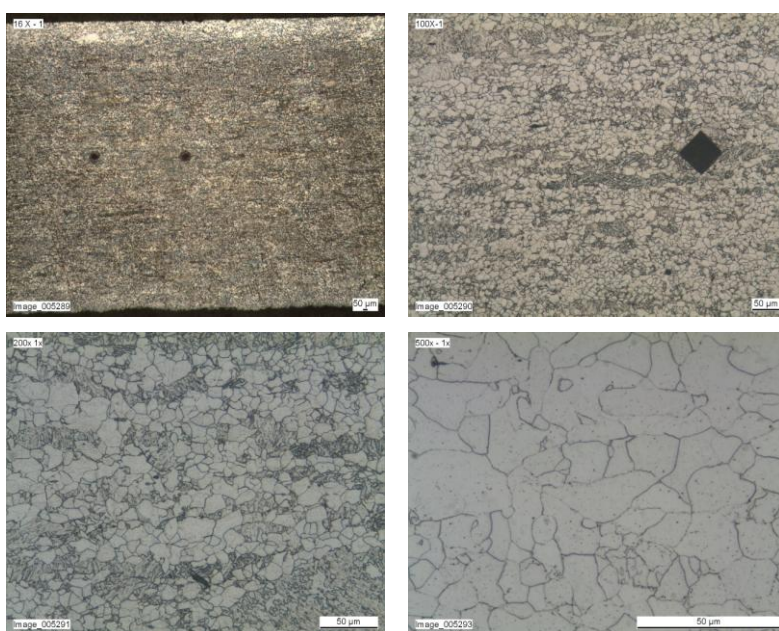


Figura 34. Microestrutura no material base do provete sem tratamento térmico.

As microestruturas representadas pelas figuras 35 a 38 referem-se à amostra sujeita a pré e pós aquecimento e consequente tratamento térmico.

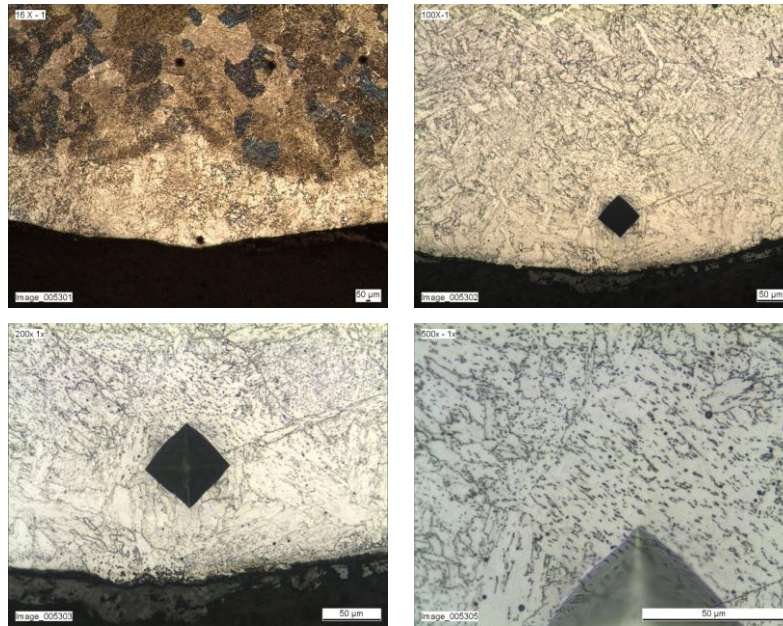


Figura 35. Microestruturas na zona do 1º passe do provete com tratamento térmico.

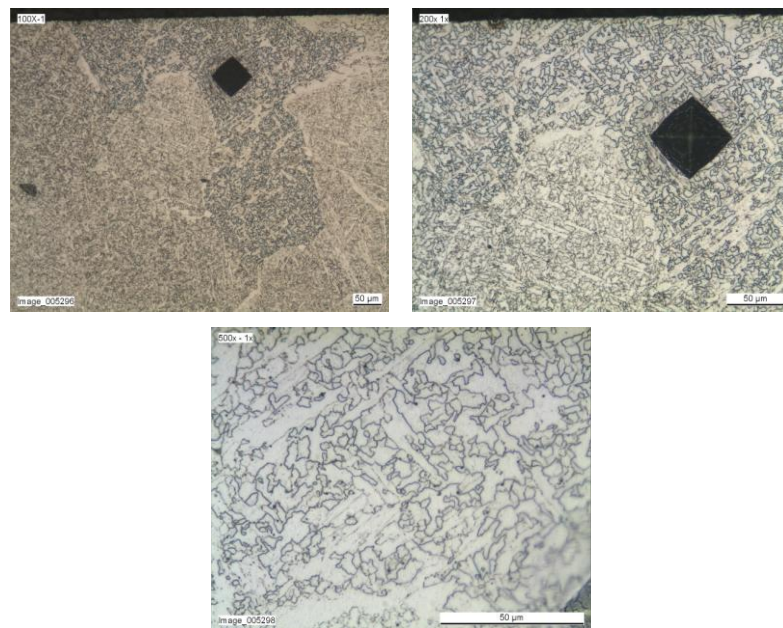
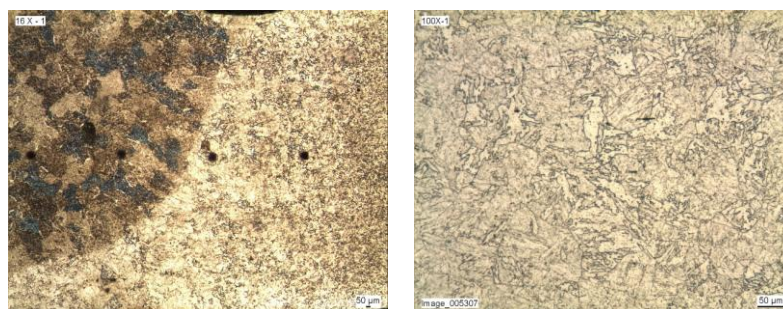


Figura 36. Microestruturas na zona do 2º passe do provete com tratamento térmico.



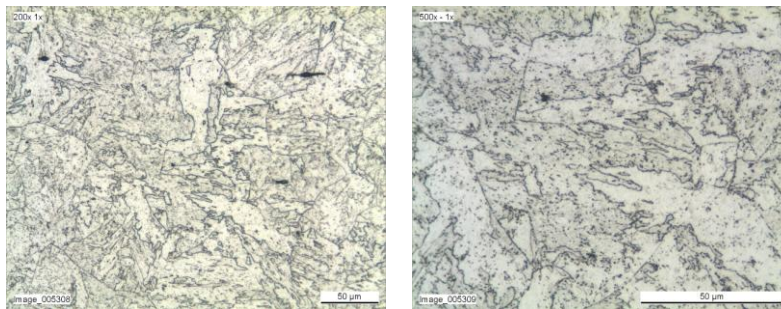


Figura 37. Microestruturas na ZTA do provete com tratamento térmico.

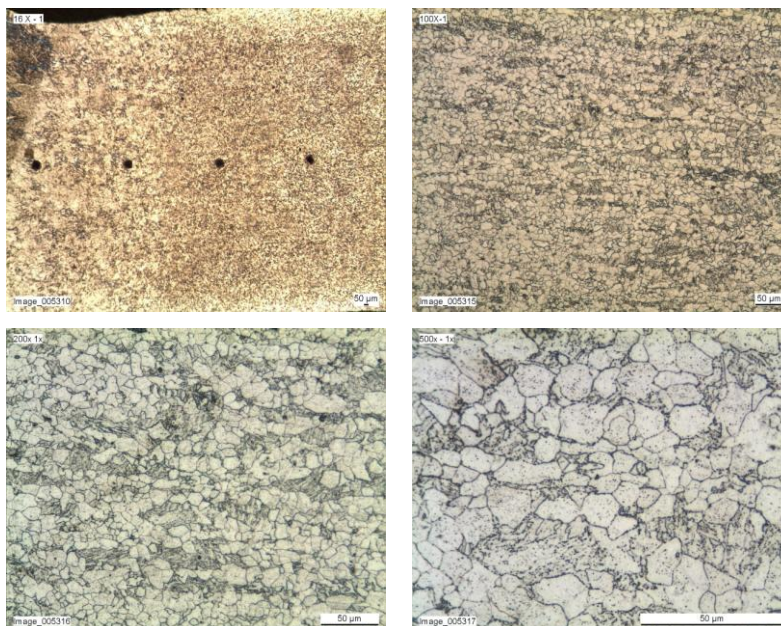


Figura 38. Microestruturas no material base do provete com tratamento térmico.

O tratamento térmico para determinação de uma possível austenitização parcial foi realizado a 720°C, durante 45 minutos e conseqüente arrefecimento em água a 30°C. A variação de durezas HV0,5, antes e após tratamento térmico é apresentada na tabela 6.

Tabela 6. Valores de dureza HV0,5 antes e após T.T., para determinação de possível austenitização parcial dos provetes.

	Antes de tratamento térmico	Após tratamento térmico
N.º1	136,7	145,1
N.º2	138,9	140,9
N.º3	135,8	143,9

Ensaio de Radiografia

A figura 39 apresenta as radiografias, obtidas pelo processo digital, para os provetes, sem e com tratamento térmico, respectivamente.

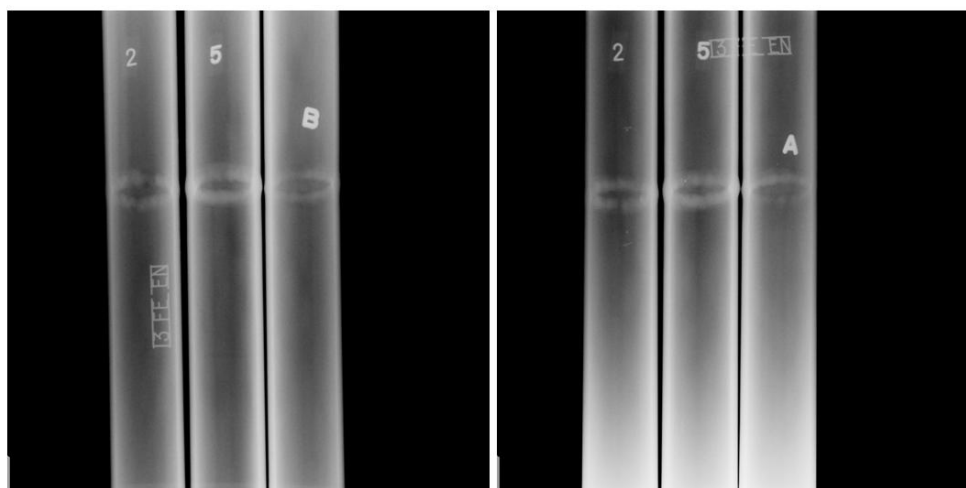


Figura 39. Imagem da radiografia digital das peças, sem e com tratamento térmico.

A película radiográfica apresentou uma densidade de 1,60 na soldadura e 1,80 no material base. O fio visível foi o W15 num filme de categoria A.

Da análise das películas radiográficas, não se evidenciou a presença de fissuras nos provetes, com e sem tratamento térmico.

Ensaio de dobragem

Os resultados do ensaio de dobragem, em provete de flexão transversal, estão expressos na tabela 7.

Tabela 7. Resultados obtidos dos ensaios de dobragem.

Ref. Dos Provetes	Posição	Comp. (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro Punção (mm)	Distância entre Rolos (mm)	Ângulo de Dobragem (°)	Resultado da observação macroscópica
DFA	Face	204	8,0	3,4	16	24	180	Sem fissuras
DFB	Face	204	7,8	3,4	16	24	180	Sem fissuras
DRA	Raiz	204	8,1	3,4	16	24	180	Sem fissuras
DRB	Raiz	204	8,3	3,4	16	24	180	Sem fissuras

Sendo a amostra A sem tratamento e amostra B com tratamento térmico.

Discussão de Resultados

Na análise de durezas das amostras, com e sem tratamento térmico, destaca-se a uniformidade de durezas na amostra com tratamento e um valor médio, na ordem dos 200

HV0,5. Por sua vez, a amostra não sujeita a tratamento térmico, apresenta valores elevados de dureza para componentes sujeitos a trabalho a elevadas temperaturas e cuja resistência à fluência, a essas temperaturas, poderá ficar comprometida. O valor de 247HV é definido como dureza máxima admissível, no cordão de soldadura, para o aço P22 [67]. Com a redução de dureza e consequente aumento da ductilidade verifica-se, empiricamente, uma redução da resistência à tracção e da tensão limite de elasticidade [4].

Salienta-se que, para além da redução da dureza (por efeito “revenido”), traduzido numa melhoria da ductilidade e reduzindo o risco de ocorrência de fenómenos de fractura frágil, o tratamento térmico promove a redução e redistribuição das tensões internas promovidas pela operação de soldadura.

Pelo facto dos provetes serem de aço Cr-Mo, poderiam estar presentes fenómenos de fragilização por revenido [4, 8, 54, 55]. O fenómeno de fragilização por revenido seria resultado de uma reduzida ductilidade à fractura do material, à temperatura ambiente, devido a fragilização intergranular originada por possíveis efeitos de segregação, conforme referido no capítulo Ciclo de Tratamento Térmico. Tal facto não foi comprovado experimentalmente dado que exigiria o recurso a dispendiosas técnicas de microscopia. Contudo, como as taxas de arrefecimento foram controladas, no limite máximo admissível, pressupõe-se a homogeneidade térmica dos provetes. É também relevante referir que os aços Cr-Mo, sem Vanádio, não são tão frequentemente susceptíveis de fissuração, promovida pelo tratamento térmico. Contudo, tal facto, não constitui razão *si ne qua non* para que, em determinados casos, tal não suceda [4, 55].

A análise de microestrutura confirma os valores encontrados nas durezas, havendo uma matriz ferrítico-perlítica no provete sujeito a tratamento térmico. No provete sem qualquer tratamento térmico e associado aos resultados de dureza, pressupõe-se a presença de alguma bainite, constituinte típico deste material (P22) após arrefecimentos rápidos [54]. As alterações metalúrgicas, decorrentes do efeito de tratamento térmico, demonstram-se pois bastante benéficas pelo facto de reduzirem a elevada dureza, típica das estruturas pós-soldadas. Salienta-se que a microestrutura se revela mais uniforme neste provete sujeito a tratamento térmico. O ensaio radiográfico não revelou a presença de fissuras em ambos os provetes, com e sem tratamento térmico. No concernente ao ensaio para determinação de uma possível austenitização parcial a 720°C e da análise de durezas antes e após tratamento, conclui-se que efectivamente estamos no domínio sub-crítico do material aquando do recurso à temperatura de patamar a 720°C. A realização do ensaio de dobragem não revelou, igualmente, a presença de fissuras nos provetes, com e

sem tratamento térmico. Ambos os ensaios demonstram pois a ausência do fenómeno de fissuração por reaquecimento nos provetes sujeitos a tratamento térmico.

2º Estudo

A realização deste estudo foi efectuada para a análise das variações de temperatura aquando da realização do tratamento térmico em toda a envólvecia de um conjunto soldado (360º). Pretende-se simular uma tubagem de uma conduta de exaustão, em tubo de aço ao Carbono, com 1020mm de diâmetro e 10mm de espessura, com diversas configurações de soldaduras simulando possíveis ramais de ligação, que criam dificuldades acrescidas à disposição de resistências eléctricas e, por conseguinte, ao aquecimento uniforme de toda a área. Para o estudo definiram-se algumas soldaduras como críticas e cuja variação da temperatura, relativamente ao intervalo definido e em função de determinado ciclo e configuração de resistências eléctricas, pretendemos conhecer. Foram colocados diversos termopares de controlo (que comandam os controladores de temperatura) e de monitorização (que apenas permitem visualizar a temperatura sem qualquer hipótese de controlo). O intuito é a verificação de eventuais diferenças de temperatura, evidenciando que, apesar do resultado final obtido para as zonas definidas como de tratamento térmico, se não for realizada uma disposição correcta de resistências e a colocação de termopares for executada apenas em locais “seleccionados” com o intuito de obtenção de valores de temperatura dentro do expectável apenas para constar no registo gráfico, os resultados serão falseados. Por conseguinte, os pontos críticos, apesar de não constarem no registo gráfico, seguramente, não estarão dentro do intervalo de temperatura definido.

Procedimento 1

Para o estudo definiram-se as soldaduras críticas, N20B e N20D. Na montagem aplicada as resistências foram fixadas com recurso a fita de aço e, no perímetro inferior, como forma de apoio, em fita de aço envolvida em cinta cerâmica. As resistências “one-line” foram fixadas em pequenos suportes metálicos em forma de L, visíveis na imagem 40, da direita.

Cálculo das bandas utilizadas

$BT = 2 \times e$ e em cada lado da soldadura + a maior espessura da soldadura da picagem

$BT = 105 \text{ mm}$

$$BA = BT + 4\sqrt{(r \times e)}$$

$$BA = 105 + 4\sqrt{(32,5 \times 10)}$$

$$BA = 177,1 \text{ mm}$$

$$BCG = 10\sqrt{(r \times e)}$$

$$BCG = 180,3 \text{ mm}$$

A montagem efectuada para a realização do tratamento térmico apresenta-se nas figuras 40 e 41, com a aplicação de resistências de 500 x 100mm e “one-line”. A figura 40 apresenta, à esquerda, a imagem da montagem efectuada para as zonas das flanges N20D e N20B, evidenciando-se a fita isolante presa com fita de aço. À direita, pode verificar-se uma resistência “one liner” aplicada a uma flange, salientando-se os fixadores das mesmas. A referência N19 retrata um obstáculo a colocação das resistências.

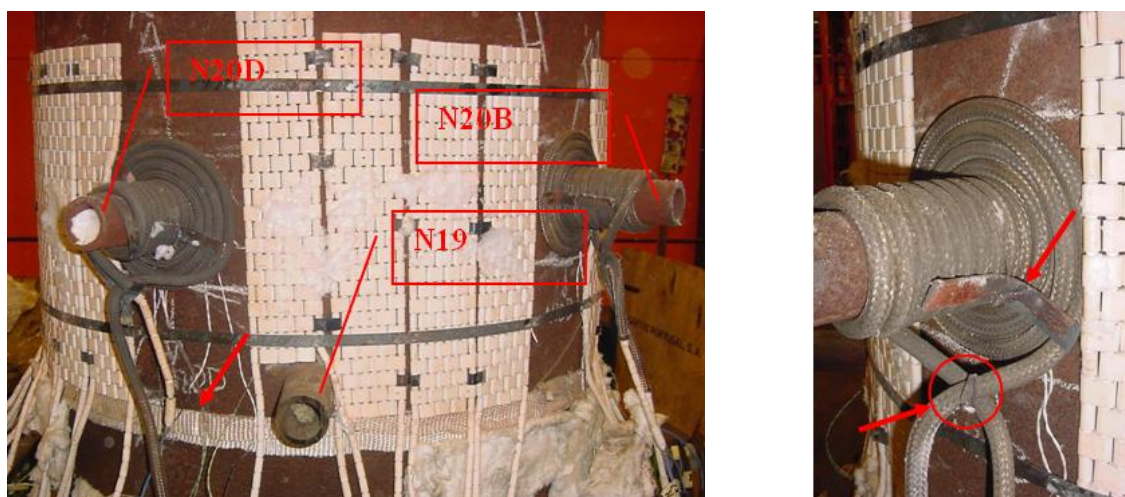


Figura 40. Montagem efectuada para a realização do tratamento térmico, de acordo com o procedimento 1.

A figura 41 apresenta à esquerda, a imagem da montagem efectuada para as zonas N5, N6 e N11. À direita, pode verificar-se a planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura e a configuração das resistências utilizadas no tratamento térmico. Os rectângulos representam resistências de FCP, as circunferências, resistências “one liner”.

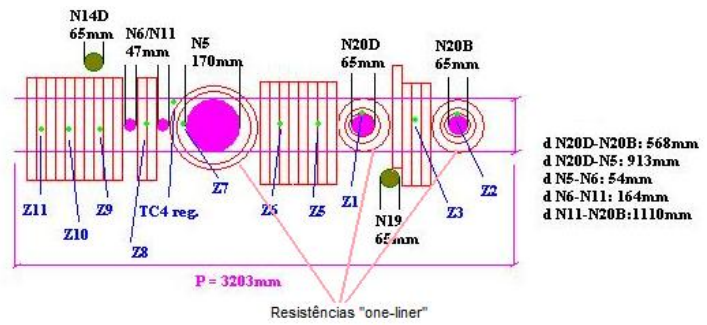
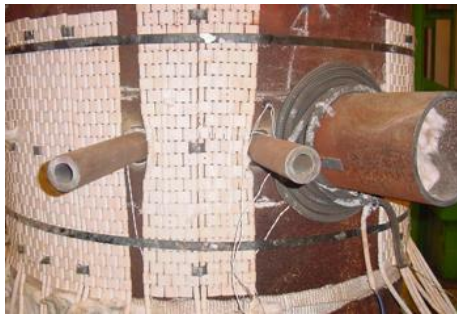


Figura 41. Montagem efectuada para as zonas N5, N6 e N11 e planificação da tubagem, de acordo com o procedimento 1.

O ciclo térmico aplicado, a todas as montagens em estudo, está representado na figura 42.

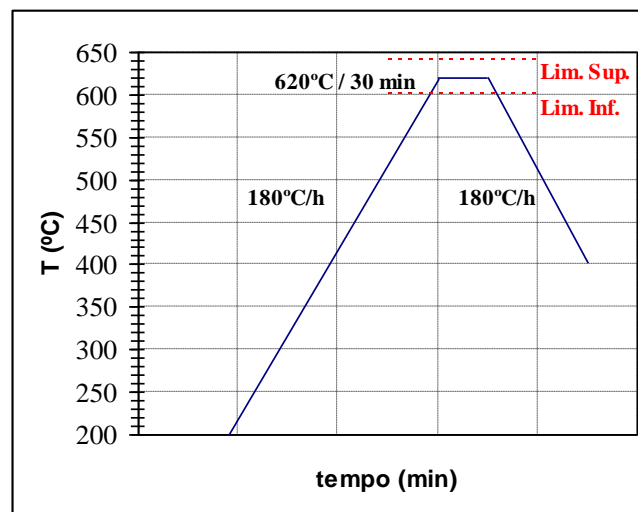


Figura 42. Ciclo térmico aplicado a todas as montagens do 2º estudo.

Resultados

A figura 43 apresenta o registo gráfico de tratamento térmico obtido.

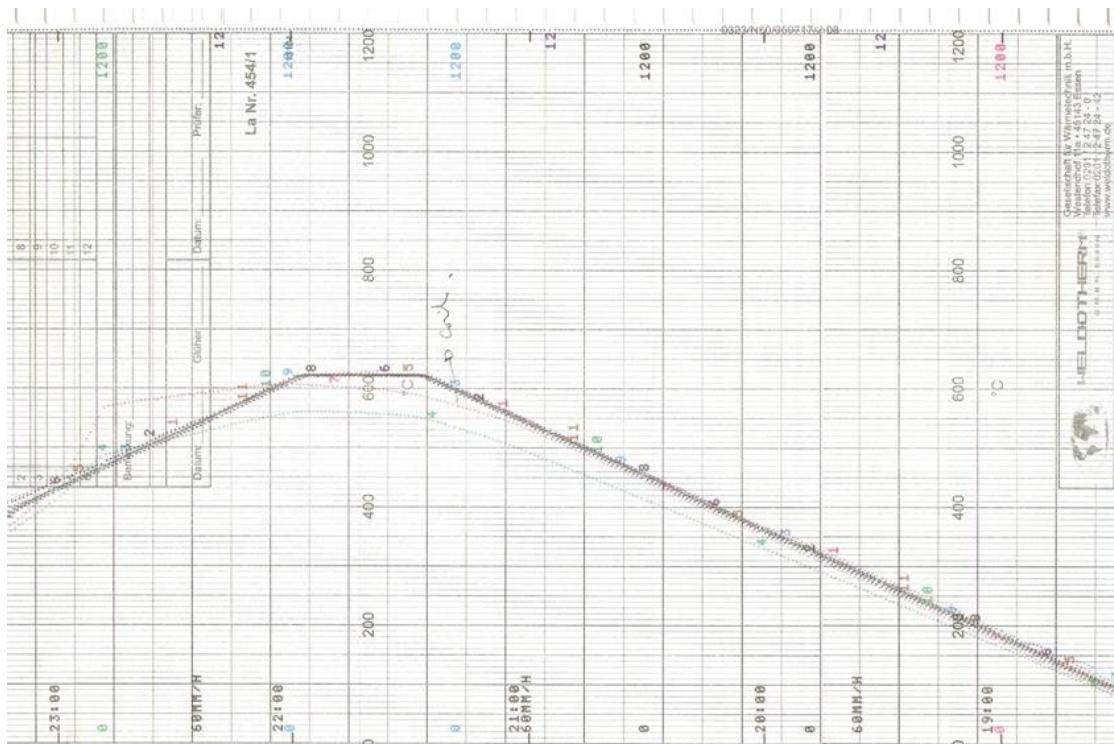


Figura 43. Registo gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 1.

Discussão de Resultados

As zonas constituintes do tratamento térmico cumprem a especificação (*vide* figura 42); apesar disso, a zona 4 apresenta um desvio de cerca de 50°C, relativamente ao limite inferior da especificação (600°C), supostamente devido ao afastamento entre as resistências vizinhas (60mm). Este facto permite demonstrar que a configuração das resistências, para garantir o cumprimento da especificação, deveria ser alterada.

No arrefecimento, com excepção da zona 7, todas as restantes zonas cumpriram o programado. Essa zona é composta por uma resistência “one liner”; no aquecimento, à temperatura de cerca de 500°C, a zona 7 apresenta um desvio relativamente às outras zonas, realizando patamar aos 600°C e não processando o arrefecimento. Esta ocorrência conduziu ao erro EoLi, tendo sido desligada a zona em questão. Tal ocorrência deveu-se ao facto da temperatura real não atingir a temperatura programada e, por conseguinte, não possibilitar ao controlador de temperatura a admissão da execução de temperatura de patamar *i.e.* não permite início do segmento de arrefecimento.

Procedimento 2

Para o estudo definiram-se as soldaduras críticas, N5 e N6. Foram colocados termopares (T20m, T30m e T40m) ligados a um termómetro digital, conforme figura 45.

Montagem e Tratamento Térmico

A montagem efectuada para a realização do tratamento térmico está ilustrada nas figuras 44 e 45. A figura 44 apresenta à esquerda, imagem da montagem efectuada para as zonas das flanges N5 e N6. À direita, pode verificar-se uma resistência “one liner” aplicada a uma flange, salientando-se os fixadores das mesmas.

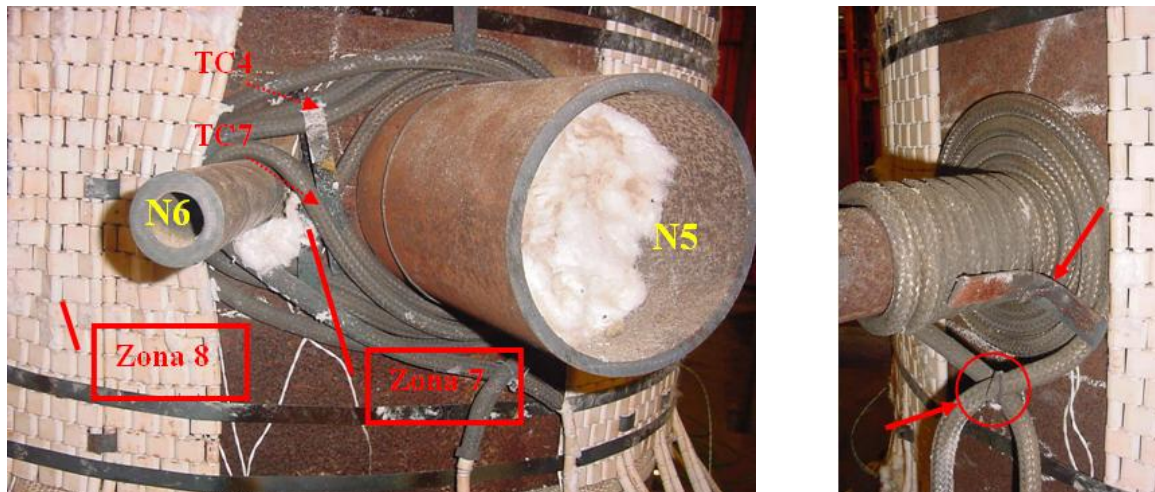


Figura 44. Imagem da montagem efectuada de acordo com o procedimento 2.

A figura 45 apresenta a planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura, a configuração das resistências utilizadas para a realização do tratamento térmico, bem como a localização dos termopares de monitorização do termómetro Omega (T20m; T30m; T40m).

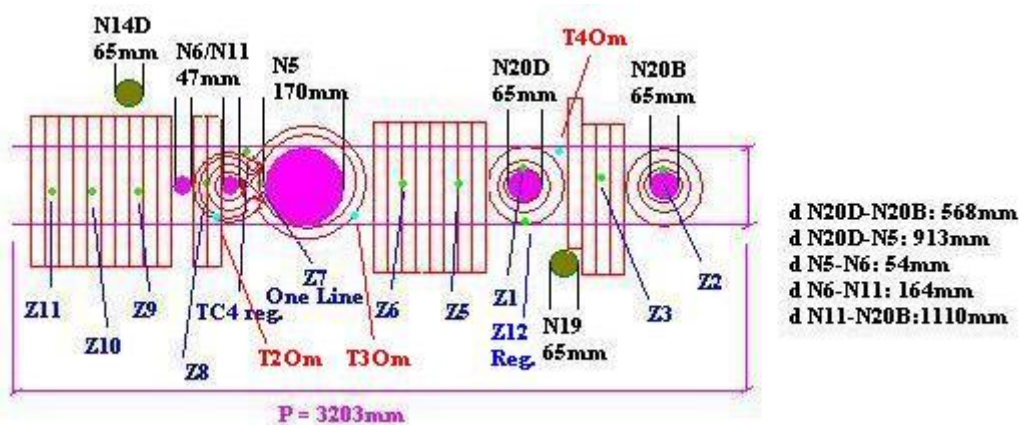


Figura 45. Planificação da tubagem e configuração das resistências utilizadas, de acordo com o procedimento 2.

O ciclo térmico aplicado permanece o mesmo do ensaio anterior. (vide figura 40).

Resultados

A figura 46 apresenta o gráfico do tratamento térmico realizado.

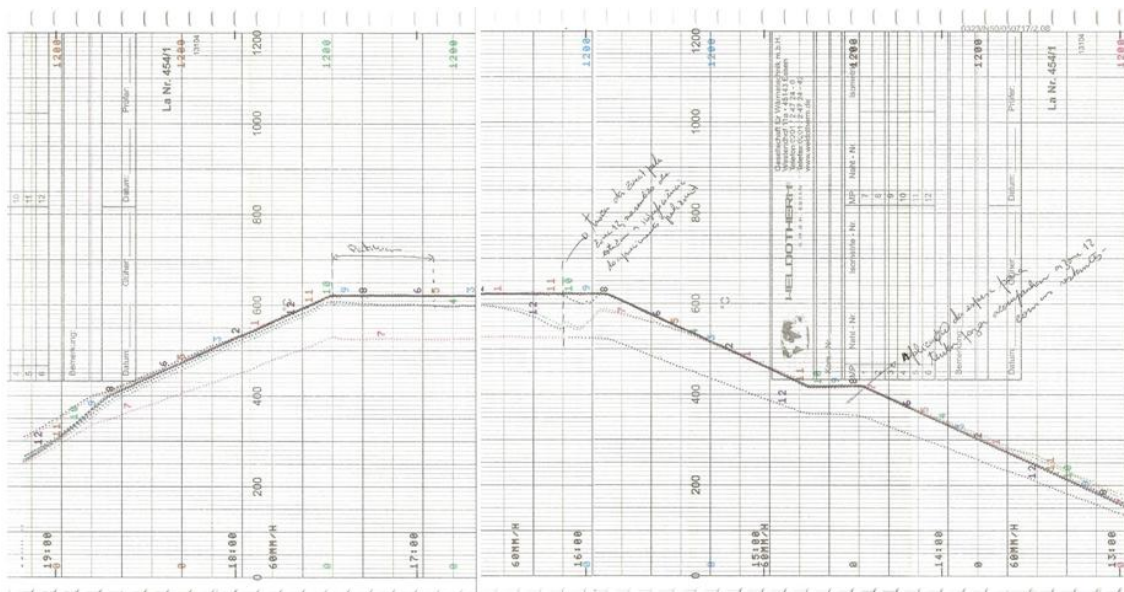


Figura 46. Registro gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 2.

A figura 47 apresenta as curvas temperatura/tempo obtidas com o termómetro ómega, referente aos termopares de monitorização.

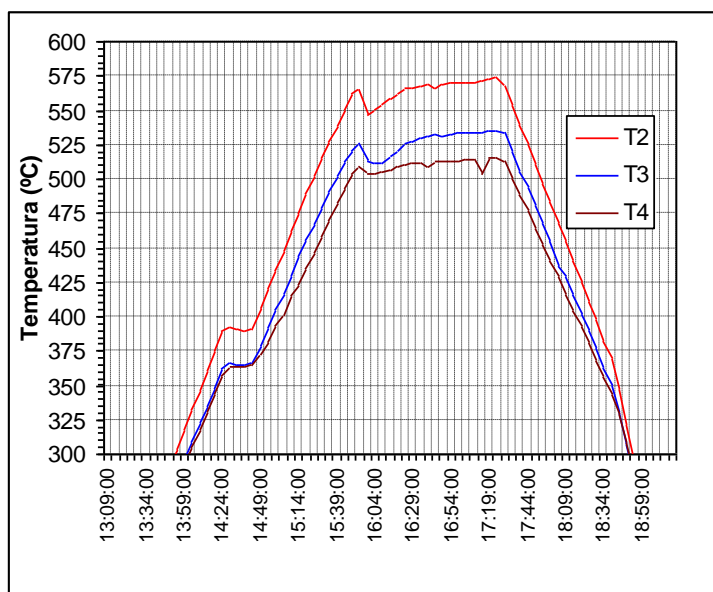


Figura 47. Resultados da análise realizada com recurso ao termómetro Ómega.

Discussão de Resultados

Na montagem deste ensaio, mantiveram-se as condições da efectuada no ensaio anterior, com excepção na configuração da zona 7, em virtude da não conformidade verificada no tratamento térmico do referido ensaio.

No aquecimento, realizado a uma taxa de $180^{\circ}\text{C}/\text{h}$, aplicou-se uma suspensão no programador do ciclo de tratamento (denominada de espera) em todas as zonas, com excepção da zona 12, devido a esta apresentar uma taxa de aquecimento inferior à programada. Esta espera tinha como objectivo verificar se essa zona recuperava a temperatura das outras zonas, isto é, se a insuficiência térmica dessa zona se devia à menor taxa de difusão térmica (balanço entre condução/perdas) ou por limitação das condições (elevado diâmetro do tubo juntamente com a não cobertura pelas resistências, dessa zona). Foi possível constatar que apenas se verificou a recuperação de sensivelmente 5°C em 20 minutos, permitindo concluir que a insuficiência térmica da zona se deve a uma limitação imposta pelas condições.

Tal como no tratamento térmico anterior, verificou-se que a partir de cerca dos 550°C , a zona 7 começa a apresentar um incumprimento da especificação de temperatura. No sentido de testar a responsabilidade do controlador da zona 7 neste incumprimento, permutou-se a zona 7 com a zona 12. Pode verificar-se no registo gráfico, que esta alteração não surtiu qualquer efeito. Por tal facto, conclui-se que o problema não reporta ao controlador de temperatura. Face a essa verificação e tendo em conta que a temperatura da zona estava muito próxima dos 600°C , limite inferior do patamar, reprogramou-se a zona 12 para realização do patamar a 660°C . Esta alteração visava potenciar uma maior libertação de calor nessa zona, compensando as limitações da montagem. Aqui constatou-se a subida da temperatura até aos 601°C , fazendo 30 minutos de patamar a essa temperatura. Apesar disso, e tal como no caso anterior, ao fim de 30 minutos não se inicia o arrefecimento, isto devido à temperatura nunca atingir a temperatura programada, não permitindo ao controlador admitir a execução de patamar, dado que não atingiu o valor programado. Contudo, e em função das especificações, este foi realizado. Por conseguinte, procedeu-se à reprogramação da zona, para o final do patamar e o consequente início do arrefecimento. Após esta verificação, constatou-se o que ocorreu no ensaio anterior, isto é, o tratamento térmico fazia patamar na zona, apesar de todas as zonas estarem em arrefecimento. De referir que as restantes zonas não apresentaram qualquer alteração.

Face ao procedimento realizado, todas as zonas cumpriram a especificação do arrefecimento, com excepção da zona 7 (anterior zona 12); esta zona encontra-se no limite da banda de aquecimento e sobreposta pela resistência “one liner”, no limite exterior (tal facto permite verificar a menor eficácia da resistência “one liner” no aquecimento).

Nas zonas de monitorização, controladas pelo termómetro ómega, verifica-se que nenhuma cumpre a especificação. Este facto resulta da localização dos termopares na extremidade

da resistência. O afastamento do limite inferior especificado é tanto maior quanto mais exposta estiver, a zona controlada, a perdas térmicas.

Procedimento 3

Este ensaio tem como objectivo o estudo e validação da configuração das resistências da zona entre as flanges N5 e N6, já que a anterior não conduziu a um tratamento conforme. Assim, foi colocada uma resistência (500x100mm), dobrada, entre as flanges no sentido de aumentar a quantidade de calor. Conforme figura 44, três termopares de monitorização foram analisados com o recurso ao termómetro digital.

Montagem e Tratamento Térmico

A planificação da tubagem e o esquema de colocação das resistências estão disponíveis na figura 48 (por motivos de avaria do suporte digital não foi possível o registo fotográfico).

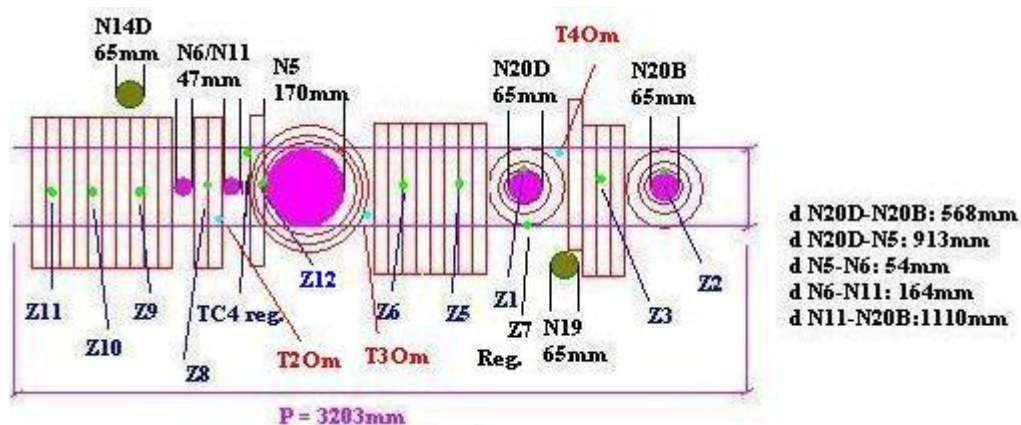


Figura 48. Planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura e a configuração das resistências utilizada no tratamento térmico.

Foram colocados 3 termopares auxiliares de monitorização, conectados ao termómetro digital Ómega (T20m; T30m; T40m).

Resultados

A figura 49 apresenta os resultados obtidos no termómetro digital do tratamento térmico realizado.

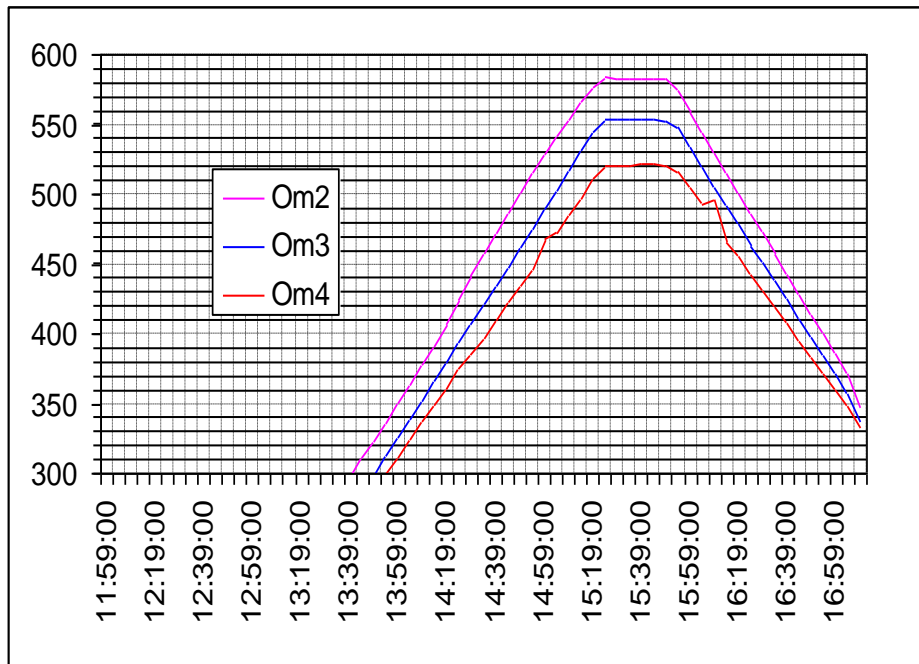


Figura 49. Gráfico dos resultados obtidos na medição efectuada pelo termómetro Ómega. O termopar 1 não efectuou um registo válido.

A figura 50 apresenta o registo gráfico do tratamento térmico realizado.

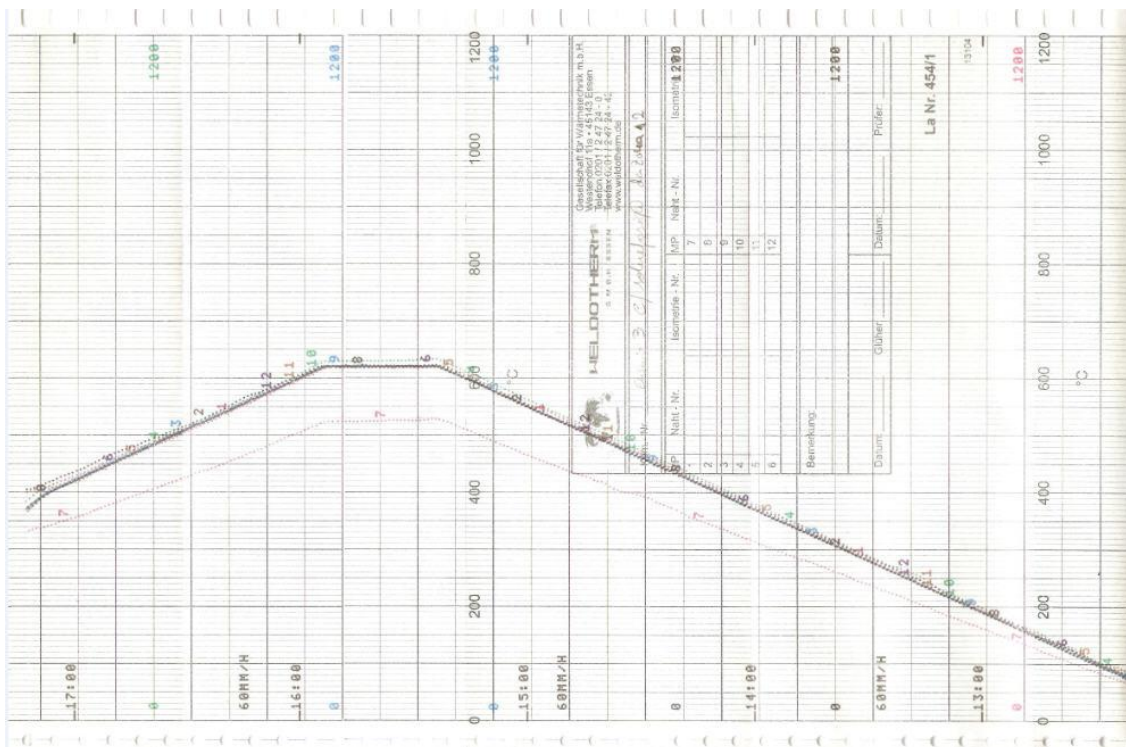


Figura 50. Registo gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 3.

Discussão de Resultados

No aquecimento, com excepção da zona 7, houve o cumprimento da taxa de aquecimento aplicada. A razão para o incumprimento da especificação pela zona 7 deve-se, presumivelmente, a esta se encontrar desguarnecida de resistência e ao elevado diâmetro da tubagem, que implicam elevadas perdas térmicas nessa zona.

Pode constatar-se no aquecimento, que a zona 12, que no tratamento anterior apresentava uma insuficiência no aquecimento, aqui, apresenta o cumprimento da especificação de temperatura.

No patamar todas as zonas se situam na gama especificada de $600\pm 20^{\circ}\text{C}$, com excepção da zona 7. A zona 4 apresenta um desvio superior de 10°C relativamente às restantes zonas, contudo dentro da especificação.

No arrefecimento, todas as zonas, com excepção da zona 7, cumprem a especificação, apesar de algumas zonas arrefecerem a uma taxa inferior à programada (tecnicamente correcto).

As zonas controladas pelo termómetro Ómega evidenciaram as fragilidades da montagem nos locais analisados, já que Om2 e Om3 não cumprem a especificação e, para além de se encontrarem próximos à zona de alteração, estão dentro da banda de aquecimento. No caso de Om4, era previsível que este não cumprisse, dada a ausência de cobertura por resistência e as elevadas perdas térmicas que se verificam. É importante referir que estas zonas expostas não foram alteradas, unicamente para se aproveitar a montagem anterior, permitindo maximizar o compromisso do objectivo/tempo.

Procedimento 4

Face aos resultados obtidos optou-se, neste estudo, pela total envolvência do tubo com resistências de dimensão de $175\times 320\text{mm}$. Ficando as mesmas em contacto directo até à picagem, sendo esta depois envolvida pelas resistências “one liner”. A figura 51 apresenta a imagem da disposição adoptada para a colocação das resistências em todas as picagens. A figura 52 apresenta o esquema de montagem do tratamento térmico. De igual forma e para validar toda a aceitação do procedimento, foram dispostos dois termopares na face interior do tubo principal.

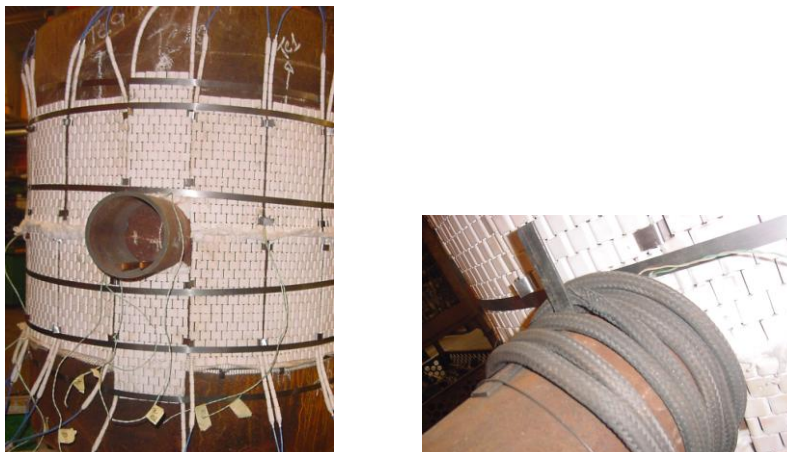


Figura 51. Imagem da montagem efectuada de acordo com o procedimento 4.

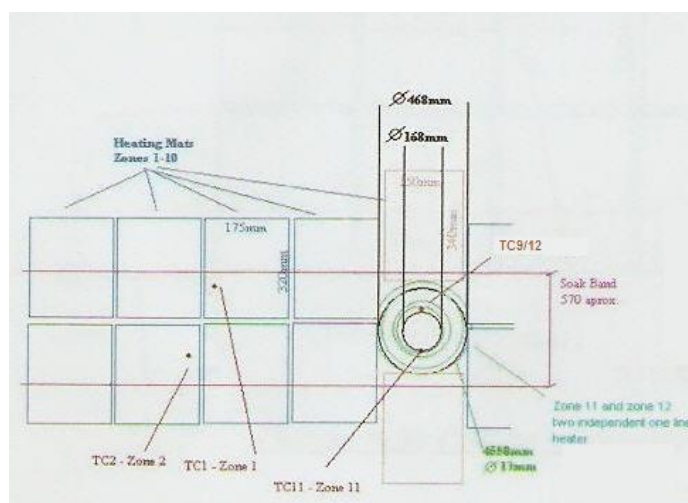


Figura 52. Planificação da tubagem com as respectivas zonas de soldadura e a configuração das resistências utilizadas, de acordo com o procedimento 4.

Resultados

A figura 53 apresenta o registo gráfico do tratamento térmico realizado.

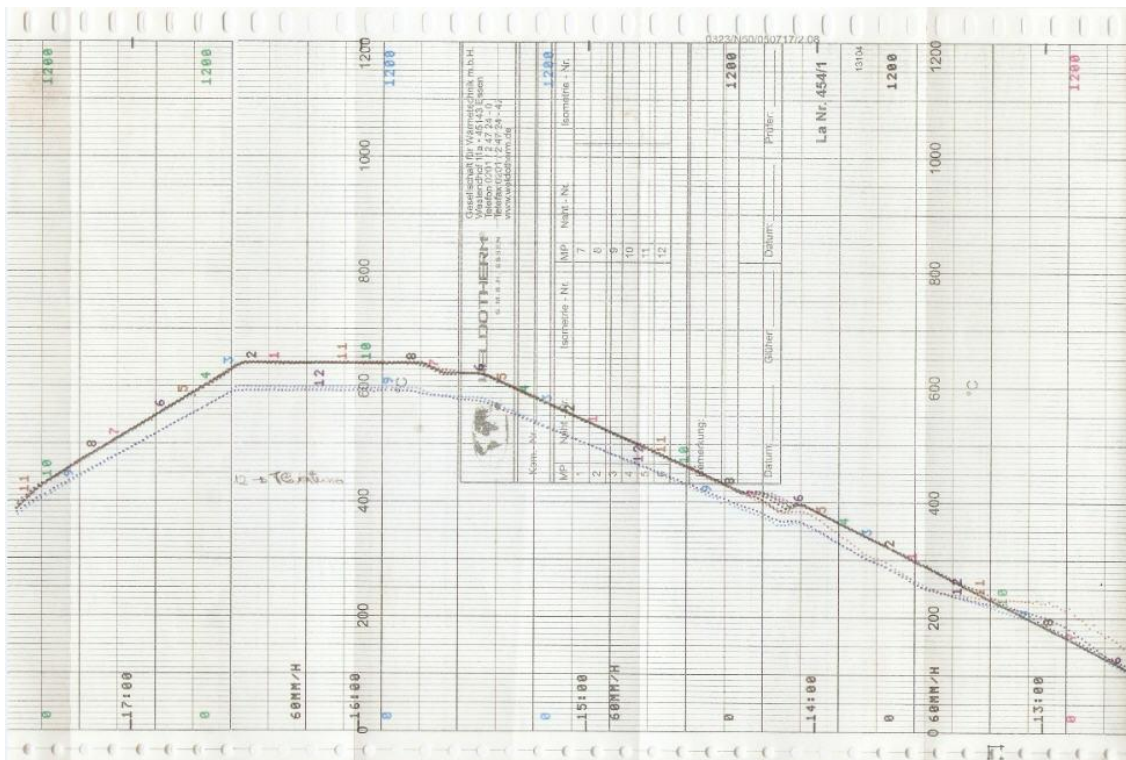


Figura 53. Registro gráfico do tratamento térmico realizado, de acordo com o procedimento 4.

Discussão de Resultados

No aquecimento, houve o cumprimento da taxa de aquecimento aplicada. A razão para a zona 9 e 12 se situarem no limite inferior do intervalo de temperaturas, relaciona-se com o facto de estas estarem colocadas na face interior do tubo. O que, associado ao seu elevado diâmetro, e a esta se encontrar desguarnecida de resistências e isenta de isolamento, promove a existência de elevadas perdas térmicas. A reduzida espessura do tubo, contudo, permitiu que o calor, por condução, elevasse a temperatura aos limites do intervalo.

No patamar todas as zonas se situam na gama especificada de $600 \pm 20^\circ\text{C}$.

No arrefecimento, todas as zonas cumprem a especificação da taxa definida.

Conclusões

Da realização do estudo do tratamento térmico de um aço P22, conclui-se que o tratamento térmico beneficiou as características pretendidas para a sua aplicação em serviço, com valores de dureza abaixo do limite máximo admissível.

A fissuração por reaquecimento era um problema que poderia surgir, durante e após a realização do tratamento térmico. Tal facto não se comprovou, dada a ausência de fissuras constatada no exame radiográfico e no ensaio de dobragem, com resultados idênticos à

amostra sem tratamento térmico. O abaixamento de dureza, no provete sujeito a tratamento térmico, promoveu uma diminuição do risco de fissuração. Assim, conclui-se que nestas situações deve-se dar preferência à realização do tratamento térmico, antes e após soldadura, com os devidos cuidados na definição do ciclo térmico.

O objectivo do segundo estudo foi cumprido, sendo que demonstra que o registo gráfico de um tratamento térmico (apenas zonas de controlo) não é a certeza de uma solução profissional de tratamento térmico, com garantia do cumprimento das especificações de temperatura em toda a envolvência do conjunto (360°). Na prática verificam-se situações em que após a falência da(s) peça(s), em serviço, o recurso a uma incorrecta aplicação dos tratamentos térmicos pode ser a causa, mesmo constando, no registo gráfico de tratamento térmico, um ciclo que cumpre a especificação definida pelo referencial normativo ou especificação. É pois um facto que em situações de tratamento térmico, em peças de forma complexa, tal como a estudada, são necessários ensaios que permitam validar as reais condições da aplicação do tratamento térmico. *In terminis*, entende-se que este trabalho deve ser realizado por técnicos especializados, o que em algumas situações no cenário industrial não se verifica, ficando muitas vezes o tratamento térmico a cargo de operacionais que apenas se preocupam com o registo gráfico, havendo zonas críticas que propositadamente ou não ficam fora do registo gráfico. Ficou também validado que as resistências “one-line”, vulgo mangueiras, não apresentam o rigor das demais resistências eléctricas, sendo que o seu uso só deve ser aplicado em situações que não seja viável outra solução, como na apresentada no primeiro caso prático deste trabalho.

Referências Bibliográficas e da Internet

- [1] Weman, Klas, *Welding processes Handbook*, Woodhead Publishing, 2003
- [2] Guia do Utilizador de Soldadura Manual - Noções de Tecnologia e Metalurgia de Materiais e Produtos, 1ª Edição, 1981, Air Liquide
- [3] Wainer, Emídio; Brandi, Sérgio Duarte; Mello, Fábio décourt Homem de; *Soldagem, Processos e Metalurgia*, 5ª Edição, 2005, Editora Edgard Blucher, Ltda.
- [4] Granjon, H.; *Bases Metalúrgicas da Soldadura*, publicações da Soldadura Autogénea
- [5] *Metals Handbook, Volume 4, Heat Treating, 1991; ASM*
- [6] Chiarelli M. Lanciotti A. and Sacchi M., *Int. Journal of Fatigue*, 1999
- [7] Paradowska A.; Price, J.W.H.; Dayawansa, P.; Kerezsi, B.; Zhao, L; Ibrahim, R.; *Measurement of Residual Stress Distribution in Tubular Joints Considering PWHT*
- [8] Burdekin, F.M.; *Heat Treatment of Welded Steel Structures*, 2nd Edition, 1969
- [9] McEnerney, Joseph W.; *Recommended practices for PWHT, USA*
- [10] Davim, J. P.; Magalhães, A.G.; *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*, 1992, Estante Editora
- [11] Gimenes, Luiz; *Tratamento Térmico em Juntas Soldadas*, 1997
- [12] Lajtin, Yu M.; *Metalografía Y Tratamiento Térmico de los Metales*; 1973; Editorial MIR
- [13] Hagen, Ingo von; Bendick, Walter ; *Creep Resistant Ferritic Steels for Power Plants*, Germany
- [14] Souza, Sérgio Augusto de; *Composição Química dos Aços*, 1989, Edgar Blucher
- [15] Honeycomb, R. W. K., *Aços Microestrutura e Propriedades*, 1980, Fundação Calouste Gulbenkian
- [16] *Glossaire du Traitement Thermique*, 1976, PYC Edition
- [17] Figueiredo, Kléber Mendes de; *Tecnologia da Soldagem*, Departamento de mecânica dos materiais, 2005, São Luís
- [18] Santos, Henrique; *Manual da disciplina de Ligas Ferrosas*, F.E.U.P.
- [19] Branco, Carlos Augusto de Moura; *Mecânica dos Materiais*, 3ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian
- [20] Smith, William F.; *Structure and Properties of Engineering alloys*, 2 nd Edition, 1993, McGraw-Hill
- [21] Kraus, George; *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*, 1990, ASM
- [22] Cottrell, Alan H.; *Introdução à Metalurgia*; 3ª Edição; Fundação Calouste Gulbenkian

- [23] Cáster, Giles F.; Paul, Donald E.; Materials Science & Engineering; 8th Edition, 2009, AWS
- [24] Chiaverini, Vicente; Aços e Ferros Fundidos, 7ª Edição, 2005; Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
- [25] Maeder, Gérard; Barralis, Jean; Prontuário de Metalurgia; Fundação Calouste Gulbenkian
- [26] Chiaverini, Vicente; Tratamentos térmicos das Ligas Metálicas, 2003; Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
- [27] Bain, E.C.; Grossmans, M. A.; Principios de Tratamiento Térmico, Editorial Blume
- [28] Puigdomenech; José Pascual; Tratamento Térmico dos Aços; 1962, Editora LEP
- [29] Seabra, Antera Valeriana de; Metalurgia Geral, Volume I, II e III, 2ª Edição, 1995, LNEC
- [30] Totten, George E.; Steel Heat Treatment Handbook, 2nd Edition, 2006, Taylor & Francis
- [31] Cain, Tubal; Hardening, Tempering and Heat Treatment Handbook; 1990; Argus Books
- [32] Dieter, George E.; Mechanical Metallurgy; 1988; McGraw-Hill
- [33] Cahn, Robert W.; Haasen, Peter; Physical Metallurgy; 4th Edition, 1996, North Holland
- [34] Nayyar, Mohinder L.; Piping Handbook; 2000; 7th Edition; McGraw-Hill
- [35] Welding Inspection Handbook, 3rd Edition, 2000, AWS
- [36] Pipelines Welding Handbook, ESAB
- [37] Terminologia da Soldagem; Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem
- [38] Carvalho, Messias José de; Orientações Práticas de Soldagem em Aço Inox; 1999; Acesita
- [39] McAllister, E.W.; Pipeline Rules of Thumb Handbook; 5th Edition; 2002; Butterworth-Heinemann
- [40] Wainer, Emílio; Soldagem: Processos e Metalurgia; 2000; Edgard Blüchen
- [41] Grong, Oytein; Metallurgical Modeling of Welding; 8th Edition; 1994; The Institute of Metals;
- [42] Folkhard, Erick; Welding Metallurgy of Stainless Steels; 1988; Springer-Verlag;
- [43] Welding Handbook- Welding Metallurgy; American Welding Society - AWS; 4th; 1994
- [44] ANSI/AWS B2.1:1998; Specification for Welding Procedure and Performance Qualification; AWS
- [45] Bringas, John E.; Handbook of Comparative World Steel Standards; 3rd Edition; ASTM
- [46] Laugang, Sérgio G.; Tratamiento Térmico de Soldadura; Termo Soldex
- [47] Welder's Handbook; 3rd Edition; 1990; Air Products PLC
- [48] Lippold; John C.; Kotecki, Damian J.; Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel; 2005; John Wiley & Sons, Inc.

- [49] Otárola; T.; Bonnefois; B.; Anglada, M.; Coudreuse, L.; Mateo, A.; Fractura de Uniones Soldadas en un Acero Superduplex Sometido a Diferentes Tratamientos Térmicos Postsoldadura; Dpto Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universitat Politècnica de Catalunya
- [50] Santos, Henrique; Manual da disciplina de Tratamentos Térmicos, F.E.U.P.
- [51] Kazuhiro Kimura, Takashi Watanabe, Hiromichi Hongo, Masayoshi Yamazaki, Jun-ichi Kinugawa and Hirosada Irie; Effect of Full Annealing PWHT on a Long-term Creep Strength of 2.25Cr-1Mo Steel Welded Joint; National Institute for Materials Science Japan.
- [52] ASM Speciality Handbook; Stainless Steels; 1996; ASM
- [53] Hume-Rothery, W.; Estrutura das Ligas de Ferro; 1968; Editora Edgard Blucher, Ltda
- [54] Gandy, D.; Grade 22 Low Alloy Steel Handbook; 2005; EPRI
- [55] Dunn, R. G.; Whiteley, G. F.; Fairhurst, W.; Molybdenum's Place in the Pressure-Vessel Field, Climax Molybdenum Company
- [56] Siebert, Clarence A.; Doane, Douglas V.; Breen, Dale H.; The Hardenability of Steel, 1977, ASM
- [57] Santella, M. L. ; Swindeman R. W. ; Reed R. W. ; and Tanzosh J. M. ; Martensite transformation, microsegregation, and creep strength of 9 Cr-1 Mo-V steel weld metal
- [58] Metals Handbook, Metallography and Microstructures, Volume 9, 2004; ASM
- [59] Rules for Pressure Vessels, Heat Treatment of Unalloyed and Low-alloy Steel; Nature, Extent And Procedure; W0701
- [60] Soares, Pinto; Aços para Ferramentas - Características, Tratamentos e Aplicações, 2009; engebook
- [61] Santos, José F. Oliveira; Quintino, Luísa; Processos de Soldadura, 2ª Edição, Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade
- [62] Barreiro, José Apraiz; Tratamientos Térmicos de Los Aceros, Editorial Dossat, 8ª ed. 1985
- [63] Introduction to Heat Treatment of Welded Steel Structures, Cooperheat Manual
- [64] Smith, William F.; Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, 3ª Edição, 1998, Mcgraw-Hill
- [65] Kou, Sindo, Welding Metallurgy, 2nd edition; 2003; John Wiley & Sons, Inc.
- [66] Control Valve Handbook; 4th edition, Fisher Controls International LLC, 2005
- [67] Telles, Pedro C. Silva; Tubulações Industriais, 10ª Edição, Editora LTC, 2001
- [68] Raj, Baldev; Welding Processes and Technology; Materials, Chemical & Reprocessing Groups; Indira Gandhi Centre for Atomic Research.

NORMAS CONSULTADAS

- [69] AWS D10.10 - Recommended Practices for Local Heating of Welds in Piping and Tubing
- [70] ASME VIII Divisão 1 e 3 - Boiler & Pressure Vessel Code
- [71] ASME B31.1 - Power Piping
- [72] ASME B31.3 - Process Piping Guide
- [73] EN 13445 - Unfired Pressure Vessels
- [74] EN 13480 - Metallic Industrial Piping
- [75] PD 5500 - Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels
- [76] NACE Standard RP0472 - Methods and Controls to Prevent In-Service Environmental Cracking of Carbon Steel Weldments in Corrosive Petroleum Refining Environments
- [77] NACE Standard MR0103 - Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments
- [78] NP EN 1435:2000 - Ensaio Radiográfico de Juntas Soldadas
- [79] NP EN 4379:1999 - Sistema de Designação dos Aços
- [80] NP 1797:2007 - Segurança e Saúde do Trabalho; Valores limite de exposição profissional a agentes químicos
- [81] BS 2633:1987 - Specification for Class I arc welding of ferritic steel pipework for carrying fluids

Referências da Internet

<http://www.esabna.com>

<http://www.metallograf.de>

<http://www.geocities.com>

ANEXO I

Alguns valores de temperaturas de pré-aquecimento em função da composição química do aço [2].

Famílias dos aços	Designações AFNOR	Composições de base (em %)	Temperaturas de pré-aquecimento recomendadas	Observações muito gerais
1 Aços ao Carbono	XC 18 XC 32 XC 38 XC 42 XC 48 XC 80	C : 0,15 - 0,20 C : 0,30 - 0,35 C : 0,35 - 0,40 C : 0,40 - 0,45 C : 0,45 - 0,50 C : 0,75 - 0,85	não necessita 80-250°C 100-300°C 100-350°C 150-350°C 300-400°C	Ver quadro anexo n.º 4 para detalhe da escolha em função da espessura.
2 Aços ao Silício	45 S 8	C : 0,4 ; Si = 1,6	a evitar	Soldabilidade metalúrgica medíocre.
3 Aços ao Crómio	100 C 6 Z 12 C 13	C : 1,00 ; Cr = 1,4 C < 0,15 ; Cr = 12-14	600-800°C 500-600°C	Soldabilidade metalúrgica difícil. Necessita de arrefecimento muito lento. Página 282.
4 Aços ao Crómio-Molibdénio	18 CD 4 25 CD 4 42 CD 4	C = 0,15-0,20 ; Cr = 0,8 ; Mo = 0,20 C = 0,25 ; Cr = 0,8 ; Mo = 0,20 C = 0,42 ; Cr = 0,8 ; Mo = 0,20	200-300°C 250-375°C 300-450°C	Necessita de tratamentos térmicos ulteriores. Página 277.
5 Aços ao Níquel-Crómio	10 NC 6 10 NC 12 35 NC 6 30 NC 11 35 NC 15	C = 0,12 ; Ni = 1,4 ; Cr = 0,90 C = 0,10 ; Ni = 4 ; Cr = 0,90 C = 0,35 ; Ni = 1,5 ; Cr = 0,9 C = 0,30 ; Ni = 2,7 ; Cr = 0,8 C = 0,35 ; Ni = 4,5 ; Cr = 1,7	200-375°C 250-400°C 350-450°C 480-600°C 500-650°C	Soldabilidade metalúrgica muito difícil. Necessidade de arrefecimento muito lento por vezes de tratamento térmico. Página 276.
6 Aços ao Níquel-Crómio Molibdénio	30 NCD 8 30 NCD 12 35 NCD 16	C = 0,30 ; Ni = 2,2 ; Cr = 0,55 C = 0,30 ; Ni = 3,0 ; Cr = 0,90 C = 0,35 ; Ni = 4,0 ; Cr = 1,8	350-500°C 400-550°C 500-650°C	- dº -
7 Aços ao Manganês	Z 18 M 2	C = 0,20 ; Mn = 2,0	150-260°C	
	Z 120 M 12	C = 1,25 ; Mn = 12,0	formalmente desaconselhado	O aquecimento da peça deverá ser inferior a 250°C. Página 278.
8 Aços inoxidáveis e refractários	Z6 CN 18-10 Z6 CND 18-12 Z6 CN 25-20	C ≤ 0,05 ; Cr = 18 ; Ni = 10 C ≤ 0,08 ; Cr = 18 ; Ni = 12 C ≤ 0,07 ; Cr = 25 ; Ni = 20	sem pré-aquecimento Página 284.	As nuances com % de carbono elevadas podem necessitar dum pré-aquecimento.

ANEXO II

Influência dos elementos de liga Mo, Mn, Si e P na fragilização do aço P22 [54].

