

WELINTON AUGUSTO DOS SANTOS

**MODELAGEM DO RESFRIAMENTO PARA A ZONA TERMICAMENTE
AFETADA PELA SOLDAGEM DE TUBOS DE AÇO CARBONO**

Guaratinguetá
2015

WELINTON AUGUSTO DOS SANTOS

**MODELAGEM DO RESFRIAMENTO PARA A ZONA TERMICAMENTE
AFETADA PELA SOLDAGEM DE TUBOS DE AÇO CARBONO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

Guaratinguetá
2015

S237m

Santos, Welinton Augusto dos

Modelagem do resfriamento para a zona termicamente afetada pela soldagem de tubos de aço carbono/ welinton augusto dos santos – Guaratinguetá : [s.n], 2014.

46 f. : il.

Bibliografia : f. 45-46

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

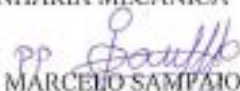
1. Soldagem elétrica I. Título

CDU 621.791.7


WELINTON AUGUSTO DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MAURÍCIO ARAÚJO ZANARDI
UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG

Fevereiro de 2015

Sobretudo a Deus pelo amor incondicional. De modo especial a minha esposa, filhos e pais pelo amor, carinho, apoio e compreensão durante este período. Muito obrigado!

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus por me conduzir durante esta caminhada, suprimindo todas as minhas necessidades,

à minha esposa Luiza, que em todos os momentos me amou, compreendeu, apoiou e cuidou de mim,

aos meus filhos Pedro e Davi, por todo o carinho e alegria transmitidos fortalecendo minhas forças,

aos meus pais Augusto e Wilma, pelo incentivo e por todo apoio incondicional,

ao meu orientador, Prof. Dr. José Alexandre Matelli pelo incentivo e por me fazer enxergar durante as disciplinas ministradas por ele à importância e responsabilidade de um engenheiro. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

aos funcionários e professores da FEG pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Como é feliz o homem que acha a sabedoria, o homem que obtém entendimento, pois a sabedoria é mais proveitosa do que a prata e rende mais do que o ouro.”

Provérbios 3:13-14

SANTOS, W. A. **Modelagem do resfriamento para a zona termicamente afetada pela soldagem de tubos de aço carbono**. 2015. 46 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Devido ao elevado consumo de tubos soldados para exploração e condução de petróleo e gás é necessário a otimização dos processos de fabricação visando obter melhores produtividade e eficiência, e redução de custos. O objetivo deste trabalho é analisar as formas de transmissão de calor durante a soldagem de tubos por arco submerso longitudinal e a partir daí propor um modelo para a distribuição de temperaturas na região soldada. Para a realização desta análise são abordados como os modos de transmissão de calor atuam no processo de soldagem especificado e quais as considerações necessárias para que o modelo matemático seja obtido. A seguir foram realizados os cálculos e as simulações necessárias para obter a distribuição de temperatura no tubo. Desta forma, a prática mostrou-se satisfatória e os resultados mostraram a faixa de temperaturas ao longo do tubo para um determinado modelo e sugestões futuras para aperfeiçoamento deste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem por arco submerso. SAWL. Distribuição da temperatura na soldagem.

SANTOS, W. A.. **Modeling of cooling thermally zone affected by welding of carbon steel pipes**. 2015. 46 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Because the high consumption of welded pipe for exploration and conduction oil and gas, optimization of manufacturing processes is necessary to obtain better productivity, efficiency and cost reduction. The objective of this study is to analyze the forms of heat transfer during the welding of pipes using longitudinal submerged arc process them to propose a model for the temperature distribution in the welded region. For this analysis are addressed as the heat transfer modes operate in the specified welding process and the necessary considerations for the mathematical model were obtained. The calculations were performed and the simulations needed to obtain the temperature distribution in the tube were carried out. Therefore, the practice was satisfactory and the results showed a range of temperatures along the pipe for a particular model and the future suggestions for improvement of this work.

KEYWORDS: Submerged arc welding. SAWL. Temperature distribution in welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tubos para aplicação OCTG.....	15
Figura 2 – Tubos para aplicação Line Pipe	16
Figura 3 – Tubos para saneamento.....	16
Figura 4 – Tubos para mineração.....	17
Figura 5 – Metas de produção - Petrobras.....	18
Figura 6 – Investimentos da Petrobras em exploração e produção de 2014 a 2018	18
Figura 7 – Evolução dos Processos de Soldagem.....	20
Figura 8 – Classificação dos Processos de Soldagem, de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção.....	21
Figura 9 – Classificação dos Processos de Soldagem a partir da natureza da união	21
Figura 10 – Esquema - Soldagem por Arco Submerso	22
Figura 11 – Representação do Processo de Fabricação de Tubos SAWL	24
Figura 12 – Equipamento de Soldagem por arco submerso interna utilizando-se três arames	24
Figura 13 – Equipamento de Soldagem por arco submerso externo utilizando-se quatro arames	24
Figura 14 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção.....	27
Figura 15 – Processos de transferência de calor convecção.....	28
Figura 16 – Isotermas na soldagem de chapas grossas (três dimensões)	31
Figura 17 – Ciclo térmico de soldagem.....	31
Figura 18 – Região submetida a soldagem.....	35
Figura 19 – Representação da amostra de macrografia da região do Metal Base / Solda/ ZTA	35
Figura 20 – Temperatura Média de Pindamonhangaba.....	35
Figura 21 – Volume de controle diferencial - Coordenadas Cilíndricas	36
Figura 22 – Parâmetros Transcal	37
Figura 23 – Simulação Transcal.....	37
Figura 24 – Aleta Plana Retangular	38
Figura 25 – Distribuição da Temperatura no Tubo - Transcal	40
Figura 26 – Temperatura do tubo - Transcal	40
Figura 27 – Temperatura do tubo – Aleta ($h=10 \text{ w/m}^2.\text{K}$)	41
Figura 28 – Temperatura do tubo – Aleta ($h=15 \text{ w/m}^2.\text{K}$).....	42

Figura 29 – Temperatura do tubo – Aleta ($h=20 \text{ w/m}^2.\text{K}$)	42
Figura 30 – Temperatura do tubo – Aleta ($h=25 \text{ w/m}^2.\text{K}$)	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção.....	29
Tabela 2 – Propriedades termodinâmicas do aço	34
Tabela 3 – Dados e propriedades - Aleta	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	American Petroleum Institute
SAWL	Submerged Arc Welding Longitudinal
OCTG	Oil Country Tubular Goods
ARBL	Aço de Elevada Resistência e Baixa Liga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa e Relevância	18
2.2	Objetivo	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Soldagem	20
2.1.1	O Processo de Soldagem por Arco Submerso	22
2.1.1.1	Processo de Fabricação de Tubos	23
2.1.1.2	Soldabilidade dos Aços	25
2.2	Transmissão de Calor.....	25
2.2.1	Condução	26
2.2.2	Convecção	26
2.2.2.1	Convecção Forçada.....	27
2.2.2.2	Convecção Natural.....	27
2.2.2.3	Convecção com mudança de fase	28
2.2.3	Radiação	29
2.2.4	Transmissão de calor na soldagem	30
2.2.4.1	Balanco de energia e equação fundamental.....	30
2.2.4.2	Ciclos térmicos e a distribuição de temperaturas.....	31
2.2.5	Aço de elevada resistência e baixa liga	32
2.2.5.1	Aços API – Classificação e aplicação.....	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Material	34
3.2	Modelagem teórica e Simulação.....	34
3.2.1	Simulação no Transcal	36
3.2.2	Modelagem aleta plana adiabática	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Resultados – Simulação Transcal	40
4.2	Resultados – Simulação Aleta	41
5	CONCLUSÕES E SUGESTAÇÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS ...	44
5.1	Conclusões.....	44
5.2	Sugestões para próximos trabalhos.....	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Os tubos fabricados em aço carbono devem apresentar alta resistência a impactos, ductilidade, tenacidade, elasticidade e grande soldabilidade. Esses tubos atendem à indústria petrolífera em aplicações em terra (onshore) e no mar (offshore). No Brasil, os tubos para condução e exploração de óleo e gás são fabricados principalmente por três processos distintos:

- SAW Longitudinal - formação U-O-E
- ERW Longitudinal - formação em linha contínua
- SAW Espiral - formação helicoidal contínua

Os tubos para exploração e produção de petróleo (OCTG), conforme figura 1, são utilizados basicamente para revestimento de poços e devem possuir alta resistência à corrosão e impactos, ideais para aplicações severas em águas ultra profundas e em ambiente ácido. Os principais produtos para exploração e produção são:

- Tubos "casing" para revestimento de poços de petróleo ou gás
- Tubos condutores com ou sem conectores
- Tubos estruturais para jaquetas e torres de perfuração offshore

Figura 1 – Tubos para aplicação OCTG



Fonte: (SITE TENARIS CONFAB, 2014).

Os tubos para condução e distribuição (LINE PIPE), conforme Figura 2, são fabricados para operar em ambientes e condições severas, devem ser resistentes a altas e baixas temperaturas, alta pressão de colapso, ação de elementos corrosivos, ambientes ácidos e meios

abrasivos. Fabricados sob rigorosos padrões, os tubos normalmente apresentam qualidade reconhecida mundialmente e certificações nacionais e internacionais.

Figura 2 – Tubos para aplicação Line Pipe



Fonte: (SITE TENARIS CONFAB, 2014).

Uma outra aplicação para os tubos de aço carbono seria na área de saneamento, conforme Figura 3, em projetos de adutoras, irrigação, estações elevatórias e de tratamento de água.

Figura 3 – Tubos para Saneamento



Fonte: (SITE TENARIS CONFAB, 2014).

Para a aplicação no segmento de mineração, os tubos de aço carbono podem ser soldados utilizando os processos ERW - LONGITUDINAL - solda por resistência elétrica - e SAW LONGITUDINAL - solda por arco submerso conforme mostrado na Figura 4. Esses tubos podem ser utilizados para condução de polpa de minério, transporte de água residual proveniente de processos de moagem e britagem, disposição em lagoas de sedimentação e tratamento, condução de água bruta e tratada, destinadas ao suprimento de núcleos urbanos e em operações de transporte inter-plantas de processamento.

Figura 4 – Tubos para Mineração



Fonte: (SITE TENARIS CONFAB, 2014).

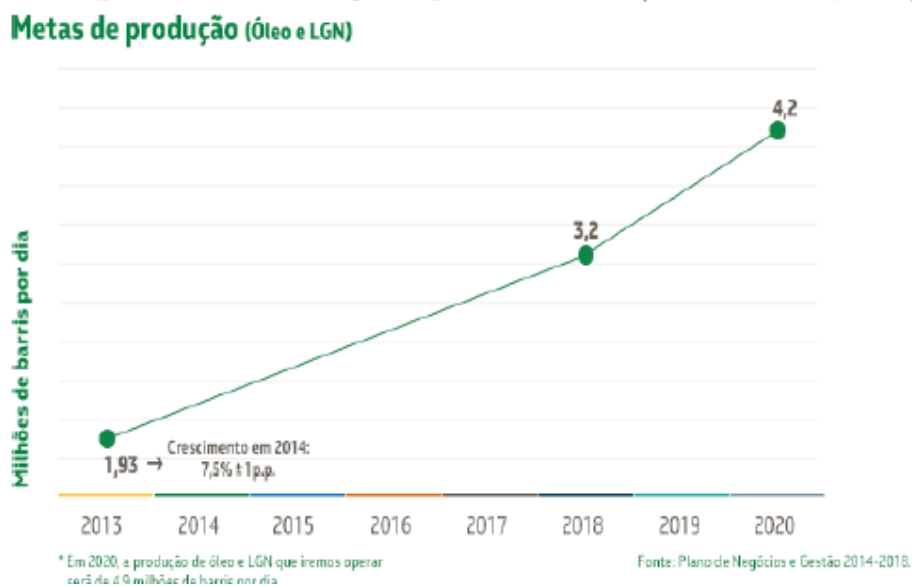
Na área industrial os tubos podem ser utilizados em:

- Estacas
- Camisas Metálicas
- Estruturas (elemento mecânico)
- Aplicação Naval
- Aplicação Ferroviária
- Máquinas e Implementos Agrícolas
- Aplicação Automotiva
- Cilindros Hidráulicos
- Papel e Celulose

Das diversas aplicações apresentadas para a utilização dos tubos de aço carbono soldados, o crescimento da produção de petróleo e gás no contexto mundial geram um elevado consumo de tubos para exploração, produção e condução de óleo e gás. No Brasil, pode-se observar uma crescente demanda energética fazendo com que os produtores de óleo e gás, principalmente a Petrobras, aumentem as reservas e desenvolvam a sua produção.

Os investimentos em exploração e produção da Petrobras de 2014 a 2018 são de US\$ 153,9 bilhões sendo destinada uma parcela desta quantia para a aquisição de tubos com alta tecnologia aplicada devido ao campos de exploração ultra profundos que hoje no Brasil já se tornaram uma realidade consolidada. Nas figuras 5 e 6 podemos observar a estimativa do crescimento da produção de petróleo até 2018 e a distribuição dos investimentos previstos, respectivamente.

Figura 5 – Metas de Produção - Petrobras



Fonte: (SITE PETROBRAS, 2014).

Figura 6 – Investimentos da Petrobras em exploração e produção de 2014 a 2018



Fonte: (SITE PETROBRAS, 2014).

1.1 Justificativa e relevância

Para a produção de tubos de alta resistência são utilizados aços de grau elevado como X70, X80 e X100. Com o aumento do grau do aço, é possível trabalhar com paredes de tubos

mais finas, atingindo os requisitos técnicos necessários conforme a aplicação desejada. O aumento da demanda para esses materiais implica em desenvolvimento de técnicas e tecnologias para aperfeiçoar a soldagem de tubos de aço carbono, além de buscar alternativas para redução de custos e aumento da produtividade.

No processo de soldagem é de extrema importância o arranjo final da microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona de soldagem. O arranjo final destas regiões está diretamente ligado à composição química do material e a forma como este é exposto a energia aplicada durante o processo. Na soldagem de aços de grau superior, o modo de resfriamento destaca-se como fator determinante para a estruturação molecular do material.

1.2 Objetivo

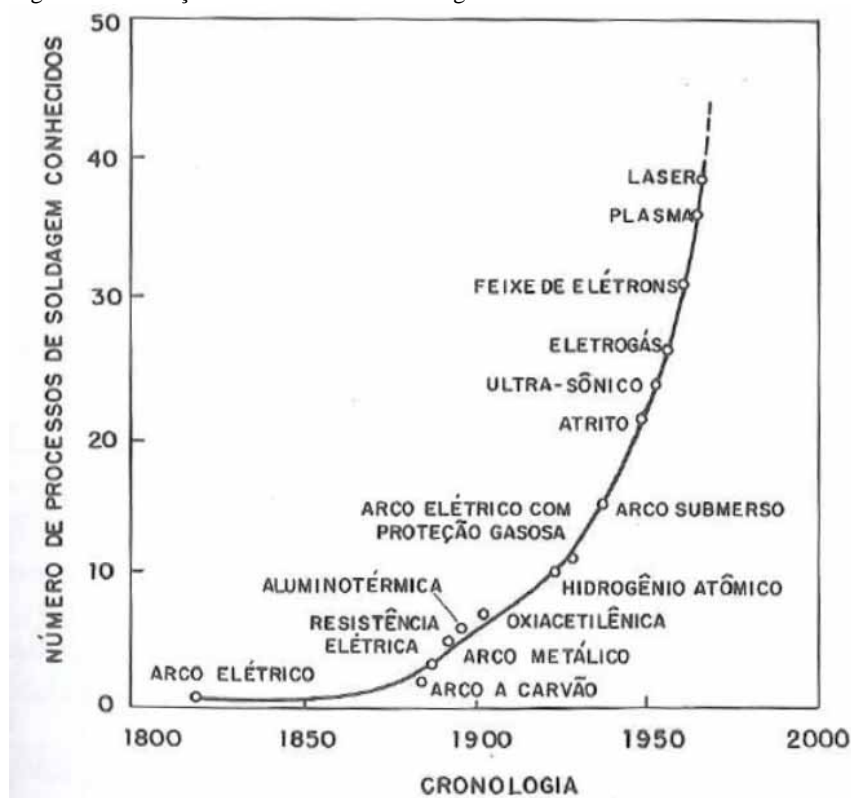
O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento térmico no processo de resfriamento da região termicamente afetada pela soldagem de tubos a partir do processo SAWL (arco submerso longitudinal), visando obter a distribuição de temperatura no tubo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem

Caracterizada pela união de duas partes metálicas usando uma fonte de calor, a solda teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial devido a fabricação de aviões e navios soldados. Na Figura 7 podemos visualizar a evolução dos processos ao longo do tempo.

Figura 7 – Evolução dos Processos de Soldagem



Fonte: (SOLDAGEM, 2011).

Os processos de soldagem atualmente são utilizados para fabricar uma infinidade de produtos, como estruturas metálicas, navios, locomotivas, oleodutos, gasodutos, componentes eletrônicos etc. Segundo Houldcroft, cada processo de soldagem deve preencher os seguintes requisitos:

- Gerar uma quantidade de energia capaz de unir os dois materiais, similares ou não;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

O desenvolvimento e o aperfeiçoamento dos processos de soldagem são alcançados com a interação de três áreas: projeto de produtos e equipamentos soldados, aperfeiçoamento dos equipamentos de soldagem e materiais (BRANDI, 2004).

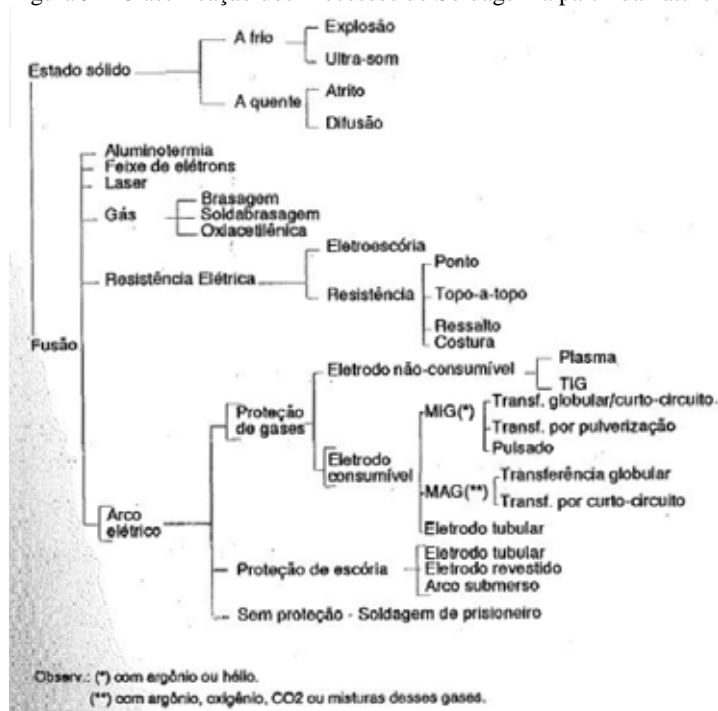
Como podemos observar nas figuras 8 e 9 os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia ou pela natureza da união. Dentre os inúmeros processos de soldagem, neste trabalho será mantido o foco exclusivamente no processo por Arco Submerso (SAW) para a soldagem de tubos de aço carbono.

Figura 8 – Classificação dos Processos de Soldagem, de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção.

Fonte de Energia		Tipo de proteção					
		Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção	
Mecânica					N	Explosão Atrito Ultra-som	
Química	Chama	N		Oxiacetilênica			
	Reação exotérmica	N		Aluminotermia			
Elétrica	Resistência elétrica	N	N	N	Eletroescória	Topo-a-topo Ponto Ressalto Costura	
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	N	MIG	MAG	Eletrodo revestido Arco submerso	Soldagem de prisioneiros
		Eletrodo não consumível	N	TIG			
Energia radiante	Eletromagnética		Laser		N	N	
	Partículas	Feixe de elétrons		N	N	N	

Fonte: (SOLDAGEM, 2011).

Figura 9 – Classificação dos Processos de Soldagem a partir da natureza da união.



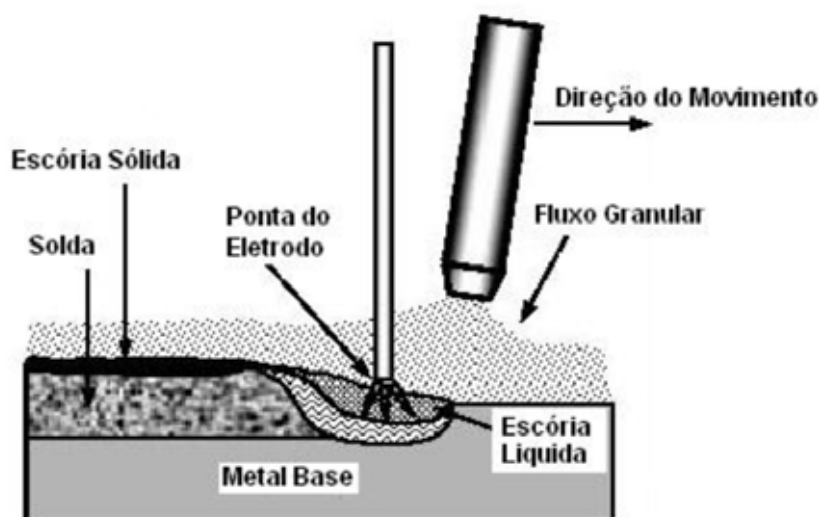
Fonte: (SOLDAGEM, 2011).

O processo por arco submerso caracteriza-se positivamente por ser um processo automático e com alta taxa de deposição no decorrer da soldagem. Em contra partida é um processo restrito aos aços e deve-se ter muito cuidado no posicionamento da junta.

2.1.1 O processo de soldagem por arco submerso

Neste tipo de processo de soldagem o arco elétrico criado entre a ponta de um eletrodo nu e a poça de fusão é recoberto por um fluxo granular, conforme esquematizado pela figura 10. O fluxo tem a função de formar uma escória mais leve que flutua sobre o metal depositado, formando uma camada de proteção contra a atmosfera. O fluxo utilizado também tem a função de fornecer elementos de liga, atuar como isolante térmico e eliminar faíscas, luminosidade e respingos.

Figura 10 – Soldagem por Arco Submerso.



Fonte: (BRANDI, 2004).

O processo por arco submerso (SAW) é muito empregado na indústria, pois possui uma elevada produtividade e por ser de fácil operação. Atualmente participa de aproximadamente 10% do volume de material soldado por arco elétrico. Este processo no Brasil é empregado na fabricação de tubos metálicos, navios, perfis estruturais, vasos de pressão, trocadores de calor, caldeiras e vários tipos de equipamento pesado.

Neste tipo de soldagem, o eletrodo em forma de bobina é alimentado através de uma unidade de alimentação de eletrodo em direção à peça de trabalho. A corrente aplicada ao processo é transferida através de um bico de contato, permitindo assim o uso de eletrodos contínuos e de altas correntes. Uma grande vantagem deste tipo de processo é a proteção do eletrodo e da poça de solda, pois é feita por um fluxo que é alimentado separadamente. O fluxo produz uma cobertura total do arco e da poça de fusão.

No decorrer do processo, o fluxo fundido cobre a solda metálica e a protege durante a solidificação e, devido ao modo de alimentação do fluxo, permite soldagens apenas na posição plana/horizontal. O fluxo tem um papel muito importante em relação a composição

química da zona soldada, pois adiciona elementos de liga no metal de solda, além de desoxidar e retirar impurezas do metal fundido através de reações químicas.

Na soldagem a arco submerso, o grau de automação é grande, sendo que a alimentação do eletrodo ocorre de forma contínua, conferindo rapidez, economia e repetibilidade de resultados (SANTOS, 2001).

No processo por arco submerso, tanto o fluxo quanto o eletrodo podem ser alterados a qualquer momento. Outra característica é a eficiência de deposição que se aproxima de 100%, pois não há perdas de metal por respingos. A perda de calor através do arco é baixa, devido ao efeito de isolamento térmico proporcionado pela camada de fluxo (BRANDI, 2004).

2.1.1.1 Processo de Fabricação de Tubos

Basicamente os tubos são obtidos através de um processo de soldagem ou através de um processo de extrusão, sendo denominados tubos com costura e tubos sem costura, respectivamente.

Para tubos com costura temos três principais processos de fabricação:

- SAW Longitudinal - formação U-O-E
- ERW Longitudinal - formação em linha contínua
- SAW Espiral - formação helicoidal contínua

O processo de fabricação U-O-E, apresentado na Figura 11, utiliza como matéria-prima chapas de aço laminadas a quente. Todo o processo de fabricação e as especificações do aço estão rigorosamente sujeitas as especificações nacionais e internacionais.

O processo tem início com uma completa inspeção visual e dimensional das chapas recebidas. Na sequência as bordas das chapas são usinadas em uma fresadora com um conjunto de pastilhas superiores e inferiores, objetivando deixá-la com a largura correta para a formação do tubo e realizar os chanfros que irão receber os cordões de solda.

Seguindo, é realizado a conformação a frio da chapa em um conjunto de prensas hidráulicas. Esta etapa é realizada com a passagem da chapa por três prensas distintas: a prensa de borda (pré-inclinação nas laterais da chapa), a prensa U e a prensa O.

Após o processo de conformação, é obtido um tubo formado podendo iniciar o processo de soldagem. A primeira etapa do processo é a selagem do tubo, que recebe um cordão de solda a gás ativo (GMAW) através de um sistema automático, mantendo a dimensão e a forma circular obtida no processo de prensagem. Na sequência, pelo processo a gás ativo (GMAW) manual, o tubo recebe as chapinhas guias de solda (chapas apêndices) em suas extremidades no mesmo alinhamento do chanfro interno, tendo a finalidade de evitar que o arco elétrico inicie e termine sobre o chanfro do tubo durante a soldagem interna e externa. Estas chapinhas guias de solda também servem de guia para o cabeçote da máquina de solda interna no final do tubo, pois, caso não se utilize a chapinha, isso prejudicará a qualidade da solda nas extremidades do tubo, ocasionando defeitos de soldagem que deverão ser eliminados por corte de anéis.

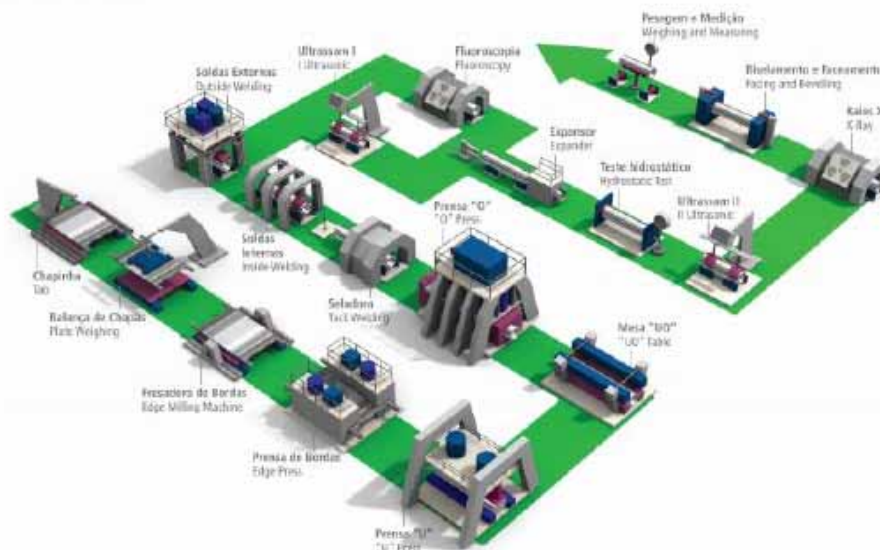
Com as chapinhas guias soldadas ao tubo, são iniciados os processos de soldagem interno e externo a partir do processo por arco submerso, utilizando três ou quatro arames na soldagem externa e três arames na solda interna.

A Figura 12 ilustra o equipamento de solda por arco submerso na etapa de soldagem interna trabalhando com três arames e a Figura 13 apresenta a máquina de soldagem externa que utiliza quatro arames.

Figura 11 – Representação do Processo de Fabricação de Tubos SAWL.

A partir de chapas de aço, esse processo inclui

- prensa "U" e "O"
- soldagem automática interna e externa por arco submerso
- expansão a frio
- testes hidrostáticos
- ensaios não destrutivos
- ensaios dimensionais
- ensaios de laboratório



Fonte: (SITE TENARIS CONFAB, 2014).

Figura 12 – Equipamento de Soldagem por arco submerso interna utilizando-se três arames.



Fonte: (GENTILEZA TENARIS CONFAB, 2014).

Figura 13 – Equipamento de Soldagem por arco submerso externo utilizando-se quatro arames.



Fonte: (GENTILEZA TENARIS CONFAB, 2014).

Chegando ao processo final de fabricação uma expansão a frio é realizada nos tubos. Esta etapa do processo garante o ajuste dimensional, corrigindo eventuais deformações ocorridas no processo de conformação e de propriedades mecânicas do tubo devido a tensões residuais.

No decorrer da linha de produção, entre as etapas dos principais processos expostos, são realizadas, em diversos postos, inspeção visual, raio-x, ultrassom e partículas magnéticas, que garantem a qualidade do tubo, e etapas secundárias, como lixamento e reparo para correções no acabamento final do tubo.

2.1.1.2 Soldabilidade dos Aços

Aços ao carbono de baixa liga são mais frequentemente soldados que quaisquer outros materiais devido a sua larga aplicação e boa soldabilidade. Essa versatilidade é decorrente principalmente das características metalúrgicas do material. As características incluem a habilidade de sofrer transformações de fase que possibilitam a oportunidade para endurecimento e fortalecimento, através de transformações martensíticas e bainíticas ou mecanismos de precipitação, tendo ainda a habilidade de ser prontamente ligado com grande variedade de outros elementos (MODENESI, 2001).

O efeito do ciclo térmico de soldagem nas propriedades da zona afetada termicamente tem papel fundamental na soldabilidade dos aços. A zona termicamente afetada determina frequentemente a faixa de transferência de calor aceitável para um aço, sendo que para baixos aportes de calor podemos obter baixa tenacidade com microestrutura indesejável, bem como problemas associados com trincamento a frio. No entanto, elevados aportes de calor podem acarretar microestruturas grosseiras com baixa tenacidade e baixa resistência.

Segundo Marques (2004) a ZTA compreende as regiões do metal base cuja estrutura ou propriedades foram alteradas pelas variações de temperatura durante a soldagem. Devido às peculiaridades destas variações e ao desenvolvimento de um complexo estado de tensões e deformações, as alterações que ocorrem na ZTA podem levar a resultados indesejáveis. A formação desta região é influenciada basicamente pelas características do metal base e pelos fatores que determinam o ciclo térmico de soldagem.

2.2 Transmissão de Calor

A diferença de temperatura entre um meio ou entre meios permite que ocorra uma transferência de energia. Uma definição conceitual para este fenômeno é que a transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço (INCROPERA, 2007).

Existem três modos distintos de transferência de calor:

- Condução
- Convecção
- Radiação

A condução caracteriza-se basicamente pela transferência de calor através do meio, a convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento e a radiação térmica é

caracterizada pela emissão de ondas eletromagnéticas por superfícies com temperatura diferente de zero.

2.2.1 Condução

Esse modo de transferência de calor é mantido em níveis atômicos e moleculares e pode ser definido como a transferência de energia das partículas mais agitadas para as menos agitadas. O grau de agitação das moléculas define o nível energético dessas interações, ou seja, quanto maior o grau de agitação ocorre um conseqüente aumento da interação no nível atômico e molecular.

A transferência de energia ocorre no sentido de diminuição de temperatura através da interação das moléculas mais energéticas com as menos energéticas. Essa intensa atividade molecular de colisões caracteriza uma melhor eficiência nesse modo de transferência de calor, implicando em transferência líquida de energia pelo movimento molecular aleatório como uma difusão de energia (INCROPERA, 2007).

Matematicamente é possível quantificar processos de transferência de calor em termos de equações de taxa apropriadas. As equações são utilizadas para calcular a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo e neste modo de transferência de calor a taxa é conhecida como Lei de Fourier. Considerando uma parede plana unidimensional, para uma distribuição de temperaturas $T(x)$, temos:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

O fluxo térmico q'' [W/m^2] é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência e é proporcional a variação de temperatura, nesta direção. O parâmetro variável k é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica ($W/m.K$) e é uma característica do material da parede. O sinal de menos é uma consequência do fato do calor ser transferido na direção da temperatura decrescente (INCROPERA, 2007).

2.2.2 Convecção

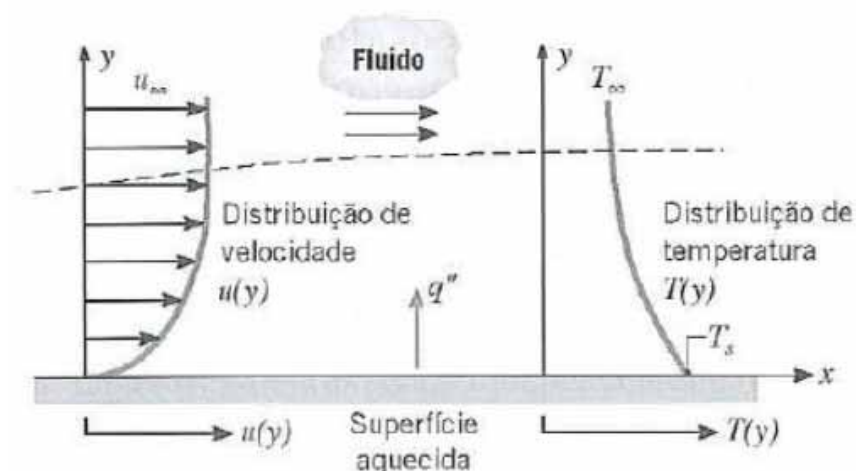
Neste modo de transferência de calor são dois mecanismos que abrangem a convecção:

- Difusão - transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório
- Movimento Global - moléculas se movendo coletivamente ou como agregado (advecção)

A convecção é caracterizada pela transferência de calor que ocorre quando um fluido em movimento entra em contato com uma superfície, existindo um gradiente de temperatura entre eles. Observa-se na Figura 14 que uma consequência da interação entre o fluido e a superfície é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a sua velocidade varia

entre zero, no contato com a superfície ($y=0$), e um $u(\infty)$, associado ao escoamento do fluido. Essa região do fluido é conhecida por camada limite hidrodinâmica ou de velocidade.

Figura 14 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção.



Fonte: (INCROPERA, 2011).

Existindo o gradiente de temperatura entre fluido e superfície, uma região denominada camada limite térmica caracterizada por esta variação de temperatura. O mecanismo de difusão predomina próximo a superfície, onde temos uma velocidade reduzida do fluido sendo que na interface temos uma velocidade nula ($y=0$) implicando em transferência de calor somente por esse mecanismo. Já pela advecção (movimento global) temos uma progressiva influência à medida que o escoamento progride na direção do eixo x conforme Figura 14.

Dependendo da natureza do escoamento do fluido os processo de convecção podem ser classificados como convecção forçada, convecção natural, convecção com mudança de fase.

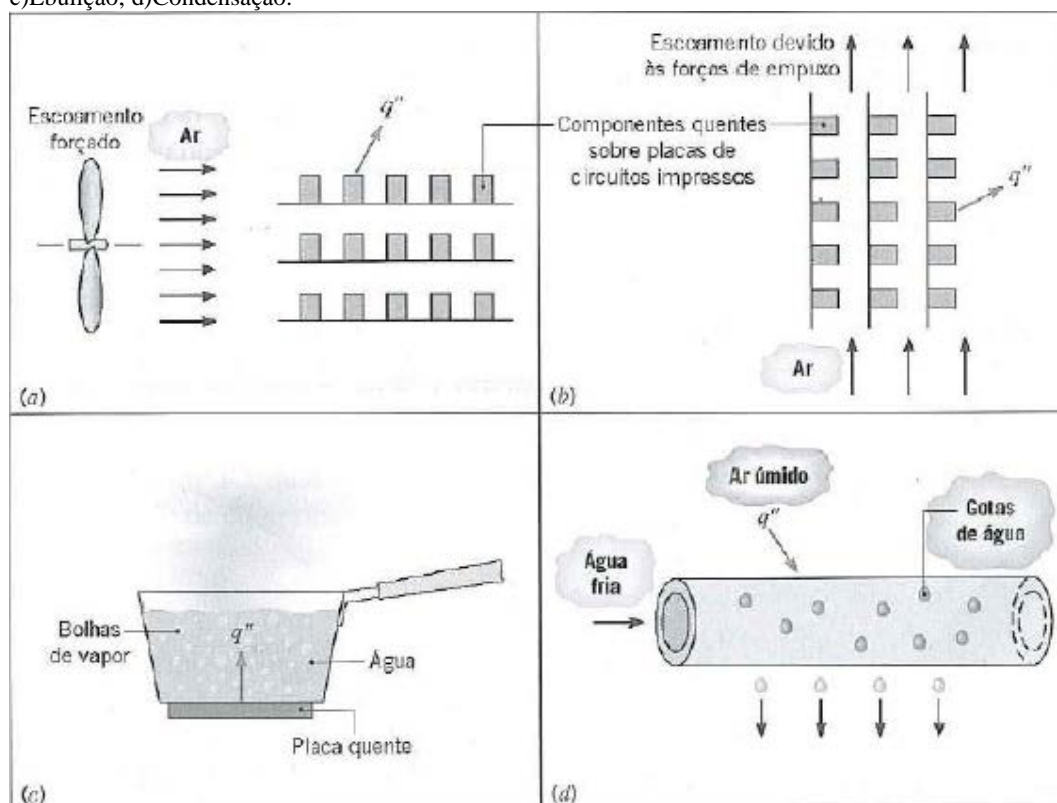
2.2.2.1 Convecção Forçada

Caracterizado quando temos um escoamento originado pela ação de meios externos como uma bomba, um ventilador ou ventos atmosféricos.

2.2.2.2 Convecção Natural

Caracterizado quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas quando ocorre uma diferença de densidades (massas específicas) devido às variações de temperaturas do fluido.

Figura 15 – Processos de transferência de calor convecção: a) Convecção Forçada; b) Convecção Natural; c) Ebulição; d) Condensação.



Fonte: (INCROPERA, 2011).

2.2.2.3 Convecção com mudança de fase

Normalmente a energia que está sendo transferida é a energia sensível, mas temos alguns processos de transferência de calor por convecção que existe também a troca de calor latente que geralmente está associada a uma mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido. Os principais processos com mudança de fase são a ebulição e a condensação.

Para todos os processos convectivos, ou seja, independente da natureza específica do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para este modo de transferência de calor é conhecida como a Lei de Newton do Resfriamento.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Pela equação 2 temos que o fluxo de calor por convecção q'' , é proporcional à diferença entre temperaturas da superfície e do fluido, T_s e T_∞ , respectivamente. O parâmetro h ($W/m^2.K$) é chamado de coeficiente de transferência de calor por convecção e depende das condições da camada limite, as quais, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido (INCROPERA, 2011).

Na tabela 1 são referenciados os valores típicos para o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Tabela 1 – Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Processo	h (W/(m ² K))
Convecção natural	
Gases	2–25
Líquidos	50–1000
Convecção forçada	
Gases	25–250
Líquidos	100–20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2500–100.000

2.2.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que está a uma temperatura absoluta não-nula (INCROPERA,2011). Esse modo de transmissão de calor pode ocorrer em meios sólidos, líquidos e gasosos e independente da forma da matéria a emissão de energia está relacionada com as configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas.

Na radiação o transporte de energia é realizado por ondas eletromagnéticas, não sendo necessário um meio material para que ocorra. Aliás, este modo de transmissão de calor possui maior eficiência no vácuo, diferentemente da condução e da convecção que necessitam de um meio para ocorrer.

A taxa de energia por unidade de área (W/m²) liberada neste modo de transmissão de calor é conhecida como poder emissivo (E) da superfície em análise. A lei de Stefan-Boltzmann define o limite superior para o poder emissivo conforme a equação 3.

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (3)$$

Sendo T_s a temperatura absoluta (K) da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$). Esse tipo de superfície é denominado radiador ideal ou corpo negro.

No entanto, para uma superfície real o fluxo térmico emitido é menor considerando a mesma temperatura sendo dado por:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (4)$$

Sendo ϵ uma propriedade radiante da superfície conhecida como emissividade. A emissividade varia de 0 a 1 fornecendo assim a eficiência com que a superfície emite radiação em relação ao corpo negro. Essa propriedade depende do material da superfície e do seu acabamento.

2.2.4 Transmissão de calor na soldagem

O calor é o elemento essencial à execução da soldagem, mas pode representar fonte potencial de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda. Esses possíveis efeitos negativos são consequência dos ciclos térmicos e das temperaturas a que a zona de solda fica sujeita no momento da soldagem.

Devido a complexidade do estudo da transferência de calor em juntas soldadas diversos fatores serão considerados no momento da análise, mas os seguintes são os mais importantes (TANIGUCHI, 1992):

- aporte de energia ou de calor à junta soldada;
- rendimento térmico do arco elétrico;
- distribuição e picos de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem;
- tempo de permanência nessas temperaturas; e
- velocidade do resfriamento da zona de solda.

2.2.4.1 Balanço de energia e equação fundamental

Analisando o processo de soldagem, verifica-se que nem toda a energia aplicada ao processo é realmente utilizada para a execução da soldagem. No decorrer do processo podemos ter dissipação de energia na forma de radiação para a atmosfera e por convecção no meio gasoso ou sólido que protege a poça de fusão.

A condução de calor através de um sólido considerando um domínio de tempo t e tendo como referência um sistema cartesiano tridimensional (x,y,z) pode ser descrito pela equação 5.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

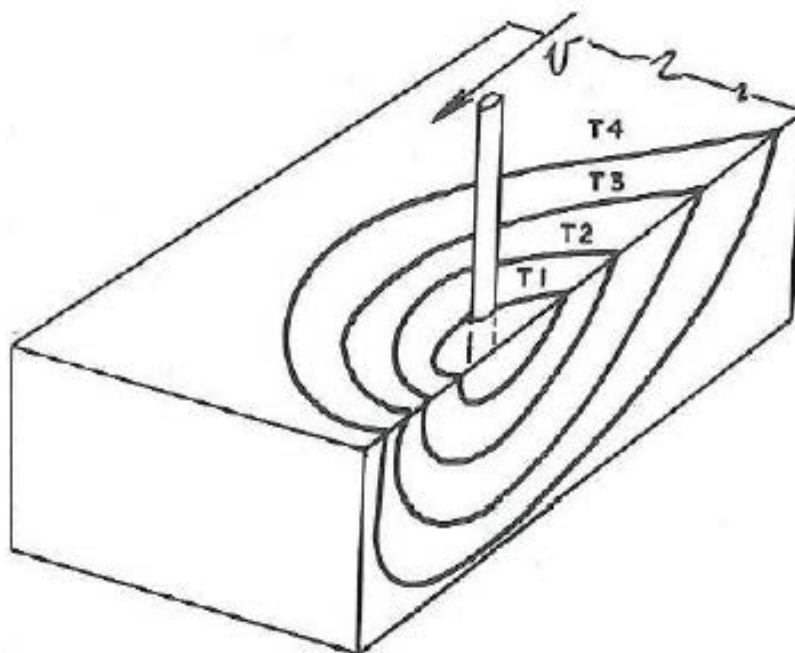
A equação 5 é a forma geral, em coordenadas cartesianas, da equação da difusão de calor. Essa equação, frequentemente chamada de equação do calor, fornece a ferramenta básica para a análise da condução de calor (INCROPERA, 2011).

Analisando especificamente a soldagem pode-se considerar, para efeitos práticos, que não temos fontes ou sorvedouros no interior do material submetido a soldagem e que a condutividade térmica do material permanece constante ainda que na realidade exista uma variação desta grandeza com a temperatura. Nesse contexto a equação 5 pode ser simplificada como:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Na figura 16 é exemplificado a distribuição de temperaturas em uma chapa grossa.

Figura 16 – Isotermas na soldagem de chapas grossas (três dimensões).



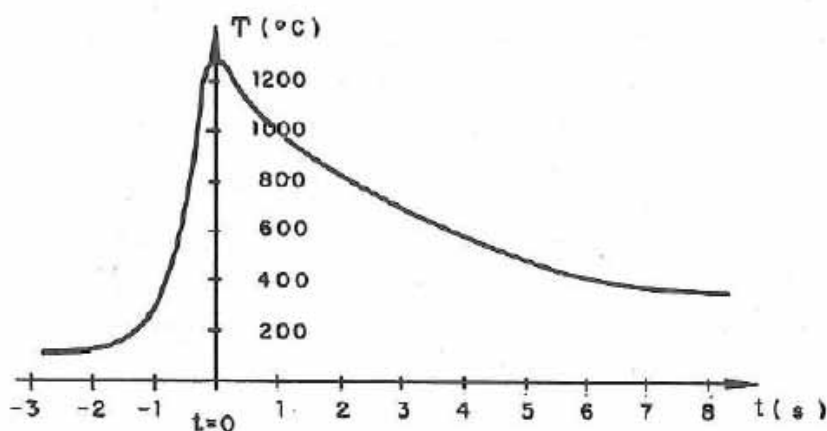
Fonte: (SOLDAGEM, 2011).

2.2.4.2 Ciclos Térmicos e a Distribuição de Temperaturas

Os ciclos térmicos a que os materiais estão sujeitos no momento da soldagem são muito importantes pois influem diretamente na estrutura cristalina do material, e portanto nas suas propriedades finais.

Na Figura 17 está exposto um esquema representativo do ciclo térmico que pode ser melhor entendido se o dividimos em três fases:

Figura 17 – Ciclo térmico de soldagem.



Fonte: (SOLDAGEM, 2011).

- Aquecimento ($t < 0$): etapa de aquecimento vigoroso do material no início do processo até que seja atingido o ponto de estudo;
- Temperatura máxima do ciclo ($t = 0$): valor máximo do ciclo térmico sendo o exato instante que a fonte de calor atinge o ponto de estudo no sólido;
- Resfriamento: diminuição gradual da temperatura até que retorne ao valor inicial.

O conhecimento dos picos de temperatura e da velocidade de resfriamento a que são submetidos os materiais em processamento são cruciais do ponto de vista metalúrgico, pois dessas variáveis dependem as propriedades finais da região soldada. Embora a velocidade de resfriamento não constitua realmente uma variável de processo, é muito importante para aliviar as tensões internas, e muitas vezes, recuperar os produtos decorrentes do resfriamento da zona de solda (TANIGUCHI, 1992).

Durante a soldagem podemos ter outros problemas, além dos metalúrgicos, causados pelos ciclos térmicos e provocando efeitos danosos a estrutura soldada. Podemos destacar, por ser inerente a praticamente todos os processos de soldagem, a ocorrência de deformações residuais e o conseqüente aparecimento de tensões residuais na junta soldada e regiões adjacentes.

O surgimento de tensões residuais dão origem a propagação de trincas, corrosão sob tensão, fadiga etc., que representam as maiores preocupações para os que atuam na área de soldagem, exigindo tratamento específico e cuidadoso que não deve deixar de ser considerado nos trabalhos de soldagem.

2.2.5 Aço de Elevada Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Os aços de alta resistência e baixa liga podem ser produzidos por meio de laminação convencional, laminação controlada ou laminação controlada somada a resfriamento acelerado. Estes aços apresentam propriedades mecânicas superiores, obtendo um conjunto de elevada resistência mecânica e tenacidade, atribuídas a fatores como composição química, controle do processo termomecânico de fabricação e microestrutura final.

A laminação controlada, seguida por resfriamento acelerado e controlado, é o processo mais utilizados na obtenção de aços de alta resistência e baixa liga com uma combinação desejável de resistência, soldabilidade e tenacidade e está associado com diferentes mecanismos de reforço, dentre eles o refino do grão.

A obtenção das propriedades mecânicas nos aços ARBL é dada em função da temperatura de laminação e da maneira como as microadições de Nb, V ou Ti formam carbeto, nitreto e carbonitretos. Diante do exposto, pode ser verificado que a microestrutura do aço desempenha um papel fundamental nas suas propriedades mecânicas, relevantes ao comportamento do duto (BELTRÃO, 2005).

2.2.5.1 Aços API - Classificação e Aplicação

A norma API especifica os aços que são utilizados para a fabricação de tubos. Atualmente vigoram duas normas para especificação de tubos, sendo a API 5L para linhas de

condução no mar e em terra (Line pipes Onshore e Offshore, respectivamente) e a API 5CT para perfuração e exploração de poços (Tubing e Casing).

A API descreve as especificações para produção de tubos mas o aço independente da sua qualidade possui uma ampla aplicação na fabricação de componentes de tubulação e de tubos:

- tubos: com costura, sem costura;
- forjados: flanges/ conexões/ partes de válvulas;
- fundidos: partes de válvulas (corpo/tampa);
- conformados: conexões para solda de topo.

O aço é o material mais utilizado para fabricação de tubos e acessórios, seja para o transporte de fluidos agressivos ou não. Os tubos são destinados principalmente ao transporte de fluídos (líquidos ou gasosos), materiais pastosos, fluídos com sólidos em suspensão, etc.

Em função das condições de construção e/ou operação em campo exigidos, os aços API possuem nomenclatura específica, como também composição química e propriedades mecânicas para cada grau. Os principais graus fabricados no Brasil são: 5L-A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 e X80. São aços de excelente conformabilidade, soldabilidade e tenacidade a baixas temperaturas. Os graus cuja nomenclatura possui números referem-se ao limite de escoamento mínimo que os tubos devem atingir (X70 = 70.000 psi).

3 METODOLOGIA

3.1 Material

Para este trabalho é considerado o aço grau X70 PSL1 desenvolvido no Brasil pela USIMINAS, produzido por laminação controlada. Tanto a composição química quanto as propriedades mecânicas estão de acordo com a norma API 5L.

Para as propriedades termofísicas são considerados os valores encontrados na literatura, tendo em vista que estes dados do fabricante não estão disponíveis para consulta. Na tabela 2 podemos ver em detalhe o detalhe destas propriedades.

Tabela 2 – Propriedades Termofísicas do Aço.

Material	Propriedades a 300 K		
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	k (W/m.K)
Aço Carbono	7854	434	60,5

3.2 Modelagem teórica e simulação

Para obter a distribuição de temperatura neste trabalho, diversas considerações foram necessárias devido a complexidade do processo de soldagem. Este processo é tridimensional em regime transiente, sujeito a transmissão de calor nos três modos e com diversos fatores de processo que influem diretamente no fluxo de calor aplicado ao material.

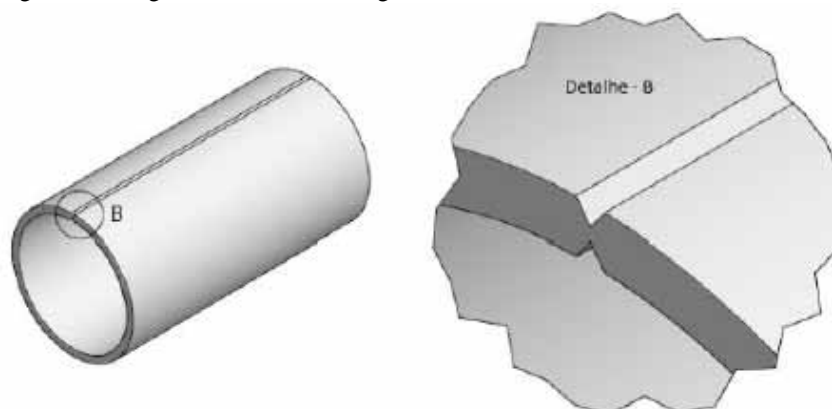
No processo de soldagem de tubos por arco submerso longitudinal, uma complexa especificação para que a soldagem ocorra perfeitamente é necessária. Nesta especificação são detalhadas as etapas do processo (selamento, soldagem interna e externa), a velocidade de soldagem, o calor aplicado ao sistema, a técnica aplicada ao cordão de solda, quantidade e posição dos eletrodos, vazão de gases e metal de adição etc.

Para todos os modelos desenvolvidos e simulados neste trabalho, considera-se a temperatura de fusão do aço a máxima temperatura a que o tubo foi submetido na região de soldagem. Na Figura 18 é exemplificado o detalhe da geometria da região soldada.

No ponto de soldagem para todos os modelos é considerado a temperatura constante por causa da fusão do aço. Esta condição de contorno em regime permanente caracteriza o ponto de soldagem modelado.

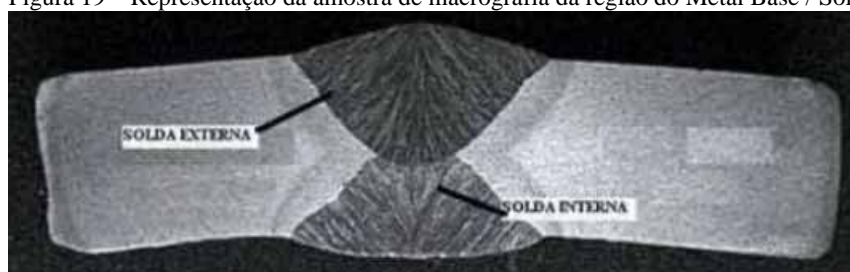
Nos modelos que apresentados adiante é considerado que a soldagem ocorre num único processo, apesar de ocorrer em etapas como descrito anteriormente. Nota-se claramente na Figura 19 as regiões da soldagem interna e externa assim como a uniformidade da composição do material em toda a região.

Figura 18 – Região submetida a soldagem.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 19 – Representação da amostra de macrografia da região do Metal Base / Solda/ ZTA.

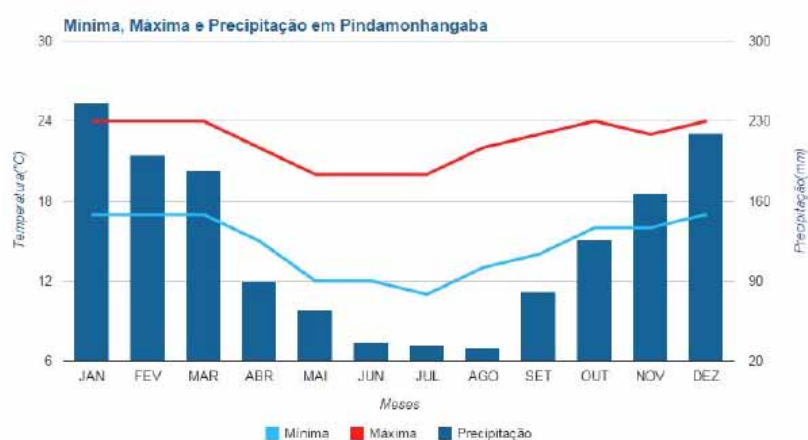


Fonte: (Gentileza Tenaris Confab, 2014).

Outro importante fator é que não foi considerado transferência de calor por radiação no processo, pois o fluxo de solda utilizado neste processo inibe de forma eficiente este modo de transferência de energia.

No processo de soldagem apresentado não é aplicado nenhum processo de resfriamento acelerado nos tubos, ou seja, o resfriamento ocorre através da convecção natural a que o tubo está submetido. Na Figura 20 observa-se a temperatura média anual dos últimos 30 anos em Pindamonhangaba/SP, onde está situado o processo de soldagem em análise.

Figura 20 – Temperatura Média de Pindamonhangaba.



Fonte: INMET/CFS/Interpolação

Fonte: (<http://www.climatempo.com.br>).

Foi considerado nos modelos a temperatura de 30° C (303,15 K) para o ar, levando em conta que no galpão da fábrica exista uma pequena elevação da temperatura do ar em relação ao ambiente externo.

Para o coeficiente convectivo foi considerado para este trabalho o valor de 10 (W/m².K), baseado nos valores típicos de convecção natural para gases conforme tabela 1.

3.2.1 Simulação no Transcal

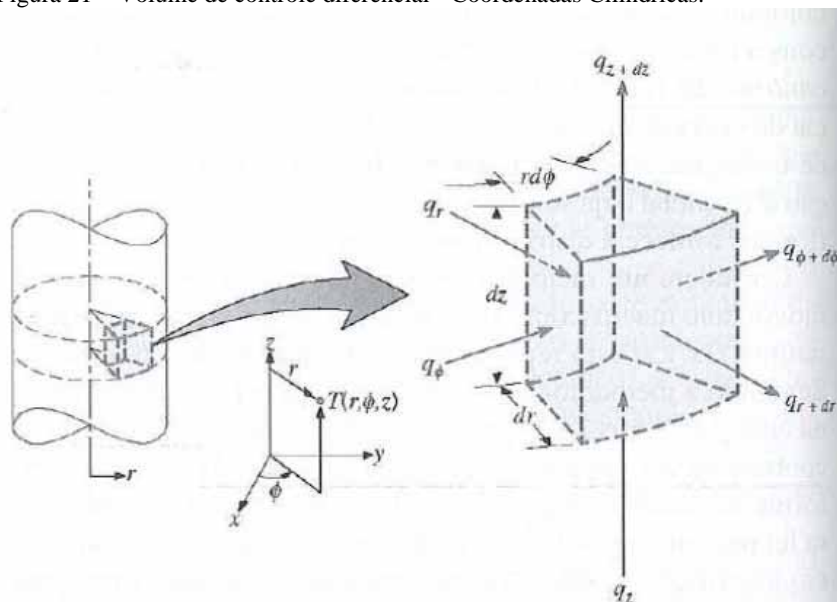
Este software foi criado e disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para fins educacionais. Desenvolvido em linguagem C++, este programa permite resolver problemas de condução de calor em malhas bidimensionais e em coordenadas generalizadas, pelo método dos volumes finitos.

O método dos volumes finitos representa e avalia equações diferenciais parciais sob a forma de equações algébricas. Neste método os valores são calculados em porções discretas numa malha que representa o domínio. O volume finito se refere ao pequeno volume delimitado pelos pontos e/ou arestas na malha.

Nesse método, integrais de volume numa equação diferencial parcial que contenham termos divergentes são convertidos para integrais de superfície (Teorema da Divergência). Esses termos são então avaliados como fluxos nas superfícies de cada volume. Como o fluxo entrando num elemento é igual ao fluxo saindo do elemento adjacente, esse método é conservativo.

Este software aplica o método dos volumes finitos para a discretização da equação 7 baseado nos parâmetros da Figura 21.

Figura 21 – Volume de controle diferencial - Coordenadas Cilíndricas.



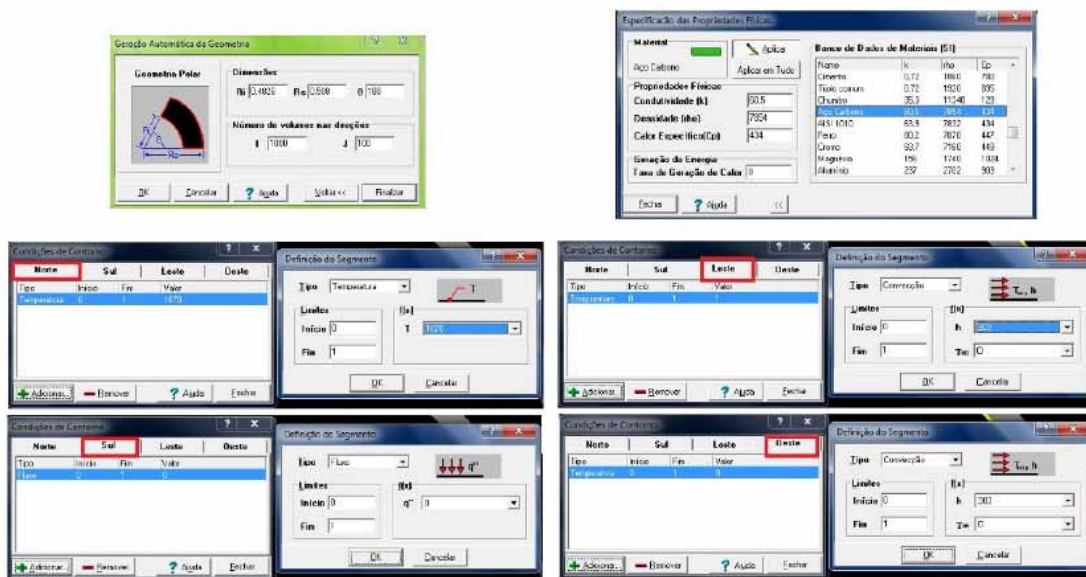
Fonte: (INCROPERA, 2011).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

É aplicável tanto a problemas em regime permanente quanto em regime transiente, com ou sem geração de energia e os domínios de solução em que os problemas são definidos podem ter uma geometria arbitrária

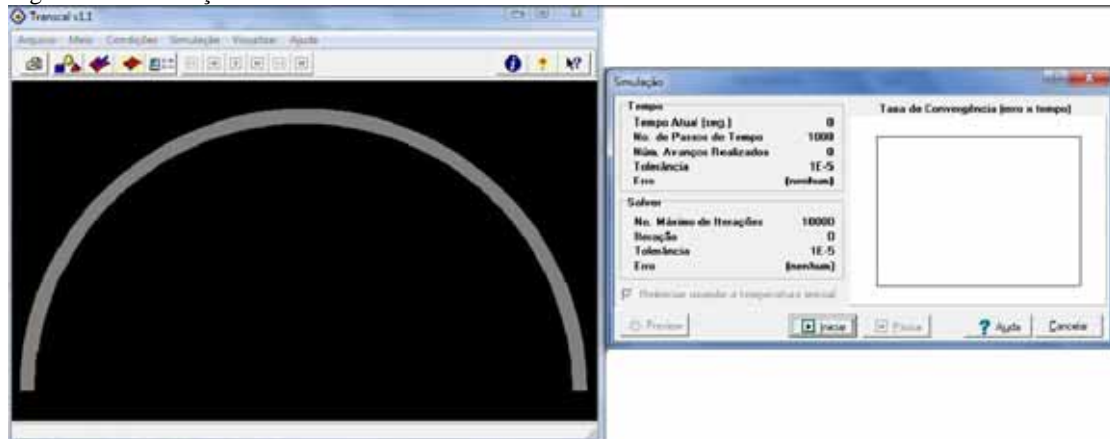
O software possui uma interface amigável para entrada de dados para definir o problema e também possui ferramentas de visualização dos resultados conforme podemos observar nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Parâmetros Transcal.



Fonte: (Aplicativo Transcal).

Figura 23 – Simulação Transcal.

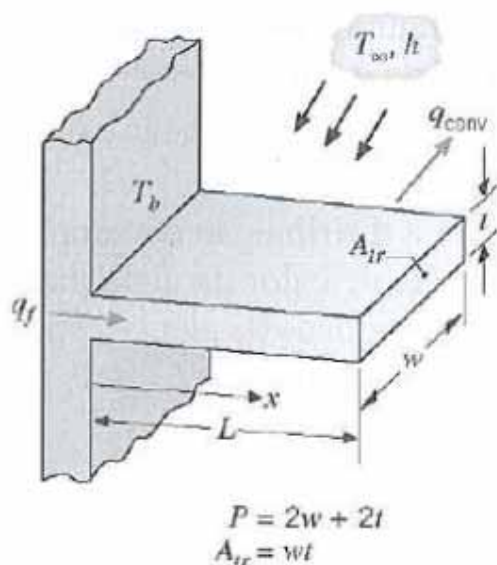


Fonte: (Aplicativo Transcal).

3.2.2 Modelagem - Aleta Plana Adiabática

Aproximando a região estudada do tubo para uma aleta plana de seção transversal uniforme retangular e adiabática conforme Figura 24. Tal aproximação se torna possível em virtude do diâmetro do tubo ser muito maior em relação a sua espessura, ou seja, na região próxima a soldagem temos uma superfície praticamente reta.

Figura 24 – Aleta Plana Retangular.



Fonte: (INCROPERA,2011).

Numa aleta a direção da transferência de calor nas fronteiras da superfície é perpendicular à direção principal da transferência de calor no interior do tubo.

É considerado neste modelo condições unidimensionais na direção longitudinal, embora na realidade a condução no interior do tubo seja bidimensional. Como a espessura do tubo é pequena em relação ao diâmetro, as variações de temperatura na direção normal no interior do tubo são pequenas quando comparadas com a direção longitudinal, ou seja, considerou-se que a temperatura é uniforme ao longo da espessura do tubo sendo assim uma função somente de x .

Supondo também regime permanente, condutividade térmica constante, radiação desprezível na superfície, sem geração de calor e com coeficiente convectivo (h) uniforme ao longo do tubo, a exigência de conservação da energia resulta na forma geral da equação da energia para uma superfície estendida (equação 8).

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_{tr}} \frac{dA_{tr}}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_{tr}} \frac{h dA_s}{k dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (8)$$

No tubo de área de seção transversal uniforme e considerando um pequeno comprimento ao longo da espessura do tubo com extremidade adiabática (fluxo de calor na simetria igual a zero) obtém-se a equação 9.

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L - x)}{\cosh mL} \quad (9)$$

Considerando a equação 9 temos as equações 10,11,12,13 e 14 para auxílio na aplicação do modelo.

$$\theta(x) \equiv T(x) - T_{\infty} \quad (10)$$

$$m^2 \equiv \frac{hP}{kA_{tr}} \quad (11)$$

$$\theta(0) = T_b - T_{\infty} \equiv \theta_b \quad (12)$$

$$P = 2w + 2t \quad (13)$$

$$A_{tr} = wt \quad (14)$$

Os seguintes parâmetros são considerados para a resolução do modelo:

$$w = 300\text{mm}$$

$$t = 25,4\text{mm}$$

$$L = 300\text{mm}$$

$$k = 60,5 \text{ W/m.K}$$

$$h = 10 \text{ w/m}^2.\text{K}$$

T_b = temperatura de fusão do aço

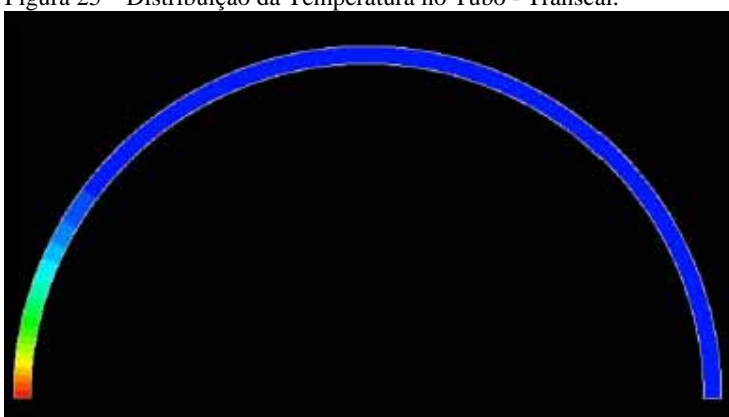
O Excel é utilizado para se obter numericamente e graficamente a distribuição de temperatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados - Simulação Transcal

O aplicativo Transcal fornece uma base de dados com as variações de temperatura ao longo da malha bem como a resolução gráfica da simulação realizada. Na Figura 25 observa-se a distribuição obtida.

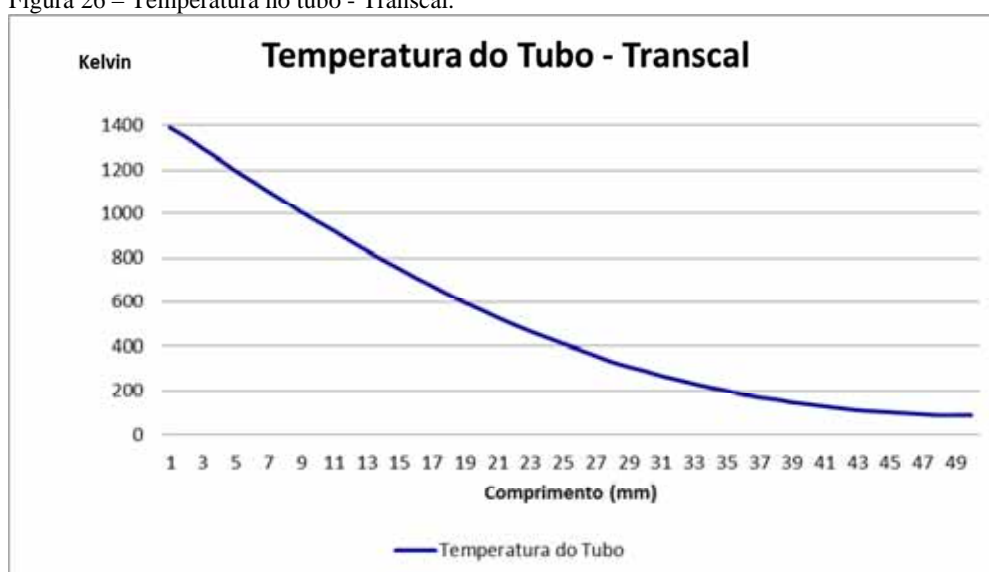
Figura 25 – Distribuição da Temperatura no Tubo - Transcal.



Fonte: (Aplicativo Transcal).

Manipulando a base de dados obtida na simulação foi obtida a Figura 26 que mostra como varia a temperatura no decorrer da espessura do tubo.

Figura 26 – Temperatura no tubo - Transcal.



Fonte: Elaboração do autor.

Apesar da aparente distribuição obtida estar dentro do esperado, a partir de determinado ponto temos valores de temperatura inferiores a temperatura do ar estabelecida na simulação. Essa temperatura resultante inferior a temperatura do ar é fisicamente impossível, tornando os resultados impróprios para qualquer aplicação.

Diversas simulações foram realizadas com este aplicativo, alterando as condições de contorno e variando-se tanto as temperaturas quanto o coeficiente convectivo. E todas elas foram obtidos valores abaixo da temperatura do ar ambiente, ainda que assumido valores com ordem de grandeza fora da realidade local.

Por ser um software fechado, não foi possível modificar ou entender a fundo o método numérico programado para chegar no resultado esperado.

4.2 Resultados - Simulação Aleta

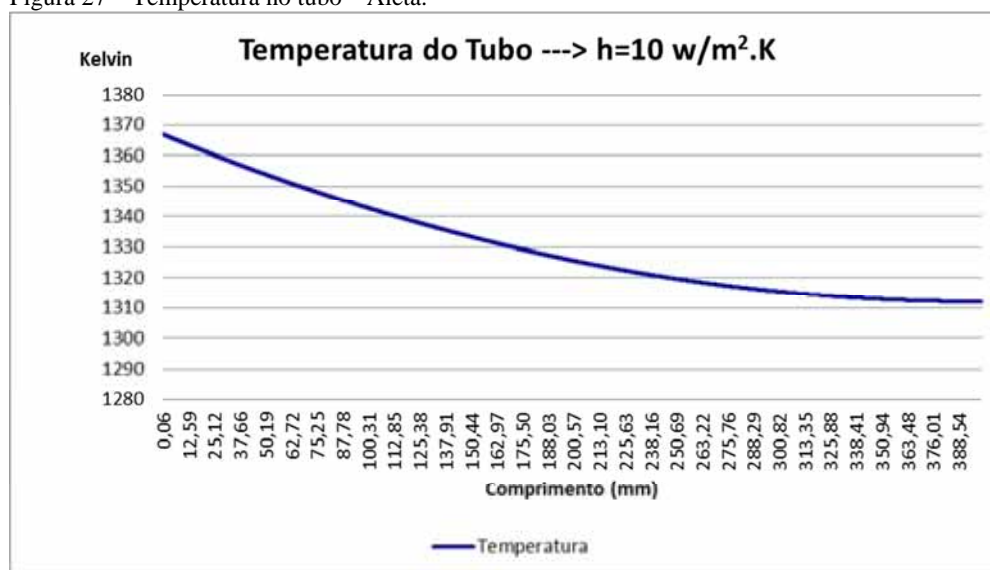
Para a modelagem a partir de uma aleta plana adiabática, obtém-se a variação de temperatura baseando a simulação nos dados da tabela 3.

Tabela 3 – Dados e Propriedades - Aleta.

k (W/m.K)	h (w/m ² .K)	T_{\bullet} (K)	$T_{\text{fusão aço}}$ (K)	$\bullet_{b(x=0)}$	Atr (m ²)	m (1/m ²)
60,5	10	303,15	1670	1366,85	0,3048	0,7213672

Para uma pequena região adotada, com aproximadamente 400 mm, para análise e simulação, os resultados mostram uma distribuição de temperatura decrescente ao longo do tubo bem como valores coerentes com a realidade física do processo. Na figura 27 podemos verificar de forma gráfica os resultados obtidos com base nos dados da tabela 3.

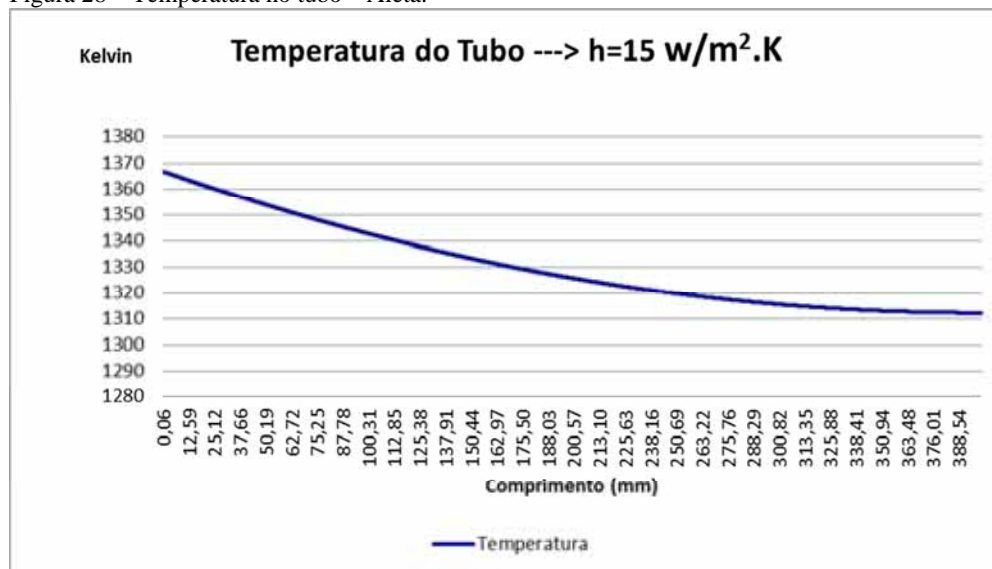
Figura 27 – Temperatura no tubo – Aleta.



Fonte: Elaboração do autor.

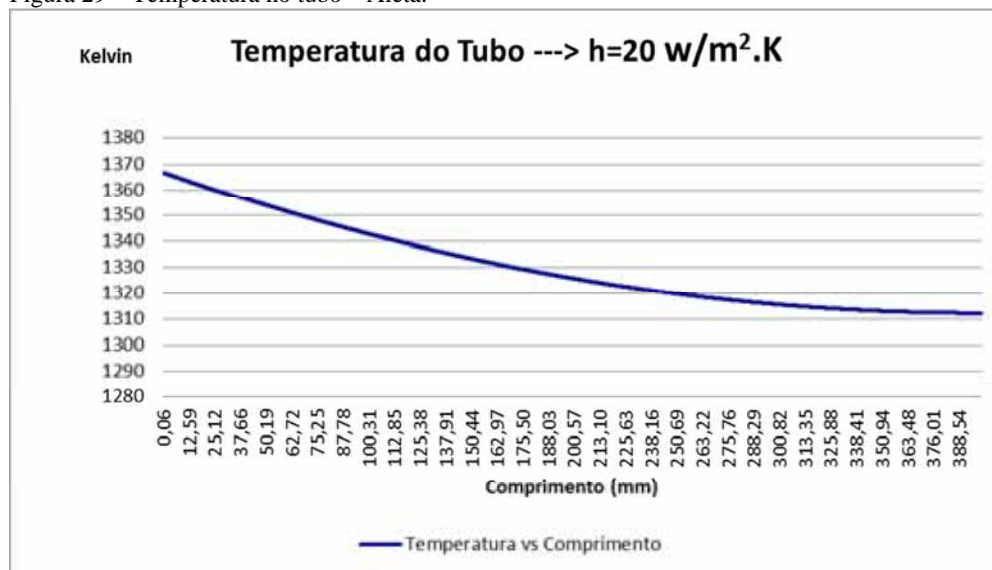
Visando entender o impacto do coeficiente convectivo no problema, simulações foram realizadas aumentando em cinco unidades o seu valor até o limite típico da convecção natural, conforme visto anteriormente. Nas Figuras 28, 29 e 30 verifica-se os resultados obtidos.

Figura 28 – Temperatura no tubo – Aleta.



Fonte: Elaboração do autor.

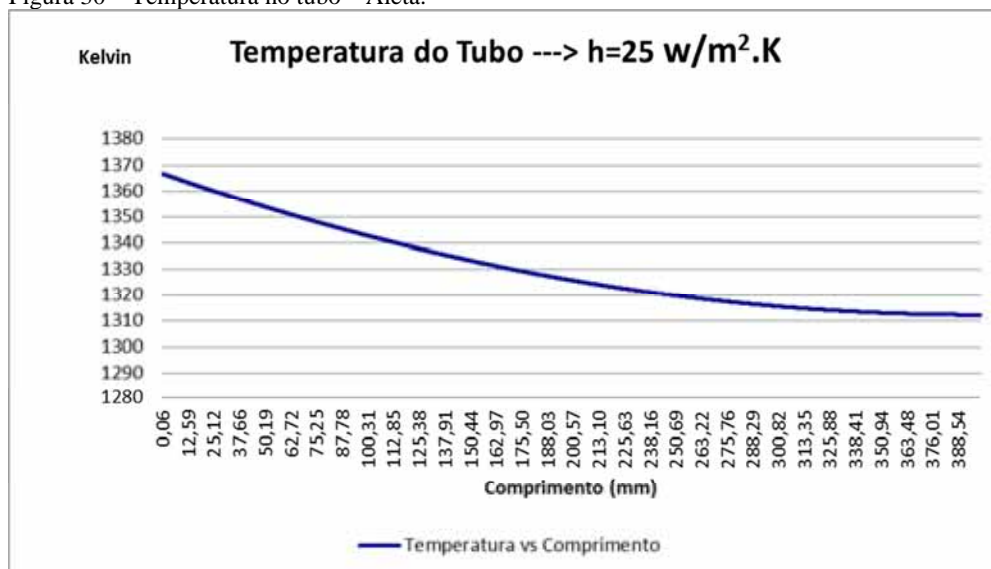
Figura 29 – Temperatura no tubo – Aleta.



Fonte: Elaboração do autor.

Podemos observar que, mesmo variando o coeficiente convectivo, a distribuição de temperatura sofreu pequenas variações, o que deixa claro que as variações de temperatura do ambiente no decorrer do ano não tem um impacto relevante no processo de soldagem.

Figura 30 – Temperatura no tubo – Aleta.



Fonte: Elaboração do autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Este trabalho buscou apresentar alguns resultados para a distribuição de temperatura durante a soldagem de tubos de aço API X70 fabricados pelo processo SAWL. No decorrer deste estudo diversas dificuldades foram encontradas devido a complexidade do problema mas em todo momento o foco foi mantido para que em cada simplificação aplicada fosse mantido e obtido dados sempre próximos a realidade do processo.

A simulação com o aplicativo Transcal retornou valores que não devem ser considerados. No entanto, mesmo com o resultado adverso, diversos conceitos e análises de métodos foram estudados, agregando valor ao conteúdo teórico do trabalho.

Para a simulação baseando-se em uma aleta plana, os resultados obtidos foram satisfatórios para a região estudada. Com a distribuição de temperatura obtida já é possível uma análise metalúrgica para verificar a microestrutura obtida após a soldagem e com possibilidade de modelar um resfriamento para que se obtenha melhores propriedades mecânicas nesta crítica região soldada.

5.2 Sugestões para Próximos Trabalhos

- Realizar uma análise bidimensional e/ou tridimensional para regime transiente;
- Considerar o fluxo de calor aplicado na região de solda bem como modelar os ciclos térmicos em cada etapa da soldagem;
- Análisar a microestrutura obtida e modelar um processo de resfriamento visando obter melhores propriedades mecânicas ao tubo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – API, Specification 5L for Lines Pipes, 45o Ed., Washington: API, 2012.

BARROS, J. F.. Aumento da velocidade de soldagem para processo arco submerso em juntas de um tubo de aço API X70 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

BRANDI, S, TANIGUSCHI, C. Soldagem: Processos e Metalurgia, LTC \– Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2004.

BELTRÃO, M. A., Propagação de Trincas de Fadiga: Juntas Soldadas Longitudinais de Aço para Dutos da Classe API 5L X-70. 2005, cap. 2.1.1, f.4 Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CALLISTER W.D.Jr., Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução. LTC Editora, Rio de Janeiro (2002).

CLAUS, C Borgnakke; VAN WYLEN, Gordon John; SONNTAG, Richard e. Fundamentos da termodinâmica. 7. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 661 p.

FOUNDATION, The James Of Lincoln Arc Welding. The procedure handbook of arc welding. 14. ed. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2000.

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., Fundamentos de transferência de calor e de massa, 4o Ed., Rio de Janeiro: LTC \– Livros Técnicos e Científicos Editora, S/A, 1998.

MACHADO, I. G., Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2000.

Site (<http://www.tenarisconfab.com.br>) - Acessado em 05 de novembro de 2014.

Site (<http://www.petrobras.com.br>) - Acessado em 12 de novembro de 2014.

Site (<http://www.climatempo.com.br>)- Acessado em 10 de janeiro de 2015.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1992. 494 p.