UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MODELO COMPUTACIONAL PARA JUNTAS SOLDADAS POR FSW PARA O AÇO API 5L X80

Mario Farfan Cantoya Neto

Orientador: Tiago Felipe de Abreu Santos

Agosto/2105

Mario Farfan Cantoya Neto

MODELO COMPUTACIONAL PARA JUNTAS SOLDADAS POR FSW PARA O AÇO API 5L X80

Monografia apresentada à graduação de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a conclusão do curso de graduação

Orientador: Tiago Felipe de Abreu Santos

Agosto/2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Aos meus pais, por sempre terem me dado todo o suporte necessário.

Aos professores Maxime Montoya e Tiago Santos, por sempre estarem disponíveis durante toda a realização deste trabalho, fazendo tudo o que estava ao alcance para esclarecer todas as minhas dúvidas. Tenho certeza que o destino da UFPE está bem guardado nas mãos deles.

A todos os professores que me acompanharam ao longo do curso na minha formação, em especial aos professores Magda Santos e Edval Araújo, que se dedicaram com carinho e empenho à minha educação.

Aos meus amigos de curso, que foram uma segunda família durante a minha trajetória como estudante de engenharia de materiais.

RESUMO

CANTOYA NETO, M. F**. Modelo Computacional para juntas soldadas por FSW para o Aço API 5L X80.** 2015. 51 p. Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

Neste trabalho foi proposto um modelo térmico para a análise de juntas soldadas do Aço API 5L X80 pelo processo de Soldagem por Atrito com Pino não Consumível. O objetivo foi levantar os dados necessários através de uma revisão bibliográfica para a construção do modelo que foi elaborado a partir de um software comercial de métodos de elementos finitos, além de validar o modelo com dados experimentais previamente obtidos a partir de medições de temperaturas realizadas no Laboratório Nacional de Nano Tecnologia Brasileiro (LNNano).

Os dados necessários para a geração do modelo foram obtidos a partir de relatórios gerados pelo próprio equipamento de soldagem, juntamente com termopares que foram posicionados ao longo da chapa para que fosse possível computar os ciclos térmicos, ao longo de pontos distintos da chapa. Após a validação o Modelo foi extrapolado para prever os ciclos térmicos em pontos da região soldada onde se tem uma limitação física que não permite a realização de medições a partir de procedimentos experimentais, devido à presença do pino e do ombro.

ABSTRACT

This work proposes a thermal model that is suitable for thermal analysis of welded joints manufactured by Friction Stir Welding using the X80 Pipeline Steel. The main objectives are the catalogation of the necessary data through a research in the sate of art in order to achieve the model construction, which was elaborated in a comercial finite element model software, and certified with previous experimental data obtained by temperature measurements made in the Brazilian Nanotechnology National Laboratory (LNNano). The Data necessary for input in the model was acquired by a log generated in the welding equipment, and thermal couples that were positioned along the workpiece for the acquisition of thermal cycles in different points of the joint. After the validation, the thermal model was used to predict the thermal history for points of the welded region where is physically impossible to make experimental temperature measurements due to the presence of the probe and the tool's shoulder.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gaseodutos que passam pela região nordeste do Brasil 17
Figura 2: Desenvolvimento dos aços 5L a Partir da década de 50 17
Figura 3: Evolução na produção de Aços API's 18
Figura 4: Mercado De Aços API X80.....19
Figura 5: Gráfico de Tensão versus Deformação para os aços X80, X70 e X100 19
Figura 6: Ciclo térmico de Soldagem 21
Figura 7: Ciclos Térmicos para distâncias de 4 e 8 mm de uma junta soldada por FSW 23
Figura 8: Modelo de Método de Elementos Finitos com Malha Gerada.....24
Figura 9: Equipamento devidamente configurado para executar a soldagem.....26
Figura 10: Parâmetros de Soldagem Para os Ciclos Quente e Frio.....27
Figura 11: Disposição dos Termopares na Chapa 28
Figura 12: Diferença das curvas modeladas para o ciclo quente entre o lado de avanço e lado de recuo 30
Figura 13: Curvas de Tensão equivalente versus deformação equivalente para ensaios de torção a quente a uma taxa de deformação de $02s^{-1}$.....32
Figura 14: Imagem do Cordão de Solda Para a Junta Fria 32
Figura 15: Ferramenta utilizada na Soldagem.....33
Figura 16: Macrografia da Soldagem 33
Figura 17: Ombro e Pino modelados no Software de MEF 34
Figura 18: Imagem Ampliada da Malha na Região do Ombro 34
Figura 19: Distribuição de Temperaturas no Processo 35
Figura 20: Exemplo das Linhas de Dados Utilizadas Para Coletar os Ciclos Térmicos no Software 36
Figura 21: Sobreposição das Curvas da Junta Quente Para 6 mm 37
Figura 22: Sobreposição das Curvas da Junta Quente Para 8 mm 37
Figura 23: Sobreposição das Curvas da Junta Quente Para 12 mm 38
Figura 24: Distribuição das Temperaturas No Corte Transversal à Ferramenta Para o Ciclo Quente.....39
Figura 25: Distribuição de Temperaturas ao Longo da Linha de Soldagem no Ciclo Quente 39
Figura 26: Sobreposição das Curvas da Junta Fria Para 6 mm 40

Figura 27: Sobreposição das Curvas da Junta Fria Para 8 mm 41
Figura 28: Sobreposição das Curvas da Junta Fria Para 12 mm 41
Figura 29: das Temperaturas No Corte Transversal à Ferramenta Para o Ciclo Frio42
Figura 30: de Temperaturas ao Longo da Linha de Soldagem no Ciclo Frio 42
Figura 31: Ciclo Térmico Extrapolado para a superfície no eixo de simetria na Junta Quente 43
Figura 32: Ciclo Térmico Extrapolado para a superfície no eixo de simetria na Junta Fria 44
Figura 33: Ciclo Térmico Extrapolado Para 2 mm Abaixo da Superfície no eixo de simetria da Junta Quente 44
Figura 34: Ciclo Térmico Extrapolado Para 2 mm Abaixo da Superfície no eixo de simetria da Junta Fria 45
Figura 35: Ciclo Térmico Extrapolado Para a parte inferior do Pino no eixo de simetria da Junta Quente 45
Figura 36: Térmico Extrapolado Para a parte inferior do Pino no eixo de simetria da Junta Fria 46
Figura 37: Ciclo Térmico Extrapolado Para a Região Inferior da Chapa no eixo de simetria da Junta Quente 46
Figura 38: Ciclo Térmico Extrapolado Para a Região Inferior da Chapa no eixo de simetria da Junta Fria 47
Figura 39: Comparação da Macrografia com a Distribuição de Temperaturas Simuladas na Junta 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros Usados como Entrada no Modelo.....27
Tabela 2: Tabela de variáveis para o ciclo quente 31
Tabela 3: Tabela de variáveis para o ciclo frio 31
Tabela 4: Dados da Ferramenta.....33
Tabela 5: Propriedades do Aço de baixo Carbono.....35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Gregas

ω – Velocidade Angular da Ferramenta

ρ – Densidade do Material

ε – Emissividade da Superfície

σ – Constante de Stefan-Boltzmann

$\tau_{cisalhamento}$ – Tensão de Cisalhamento

Siglas

API – American Petroleum Institute

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

FSW – Friction Stir Welding

INTM – Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais

LNNano – Laboratório Nacional de Nano Tecnologia

MEF – Método de Elementos Finitos

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

TCMP – Processamento Termomecânico Controlado

TWI – The Welding Institute

Abreviações

$\mathbf{U_{soldagem}}$ – Velocidade de Soldagem

$\mathbf{T_{amb}}$ – Temperatura Ambiente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
1.1 Justificativa 11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
2.1 Introdução à Soldagem Por Fricção 14
2.2 O Surgimento Do FSW 15
2.3 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga 15
2.4 Os Aços API 5L 16
2.5 O Aço Api 5L X80 16
2.6 Importância da Soldagem do Processo FSW Para o Aço X80 19
2.7 Ciclos Térmicos Na Soldagem 21
2.8 Ciclos Térmicos no Processo FSW 22
2.9 Métodos Dos Elementos Finitos 23
3. MATERIAIS E MÉTODOS 25
4. RESULTADOS 28
4.1 Resultados de Ciclos Térmicos Modelados 35
4.1.1 Resultados de Ciclos Térmicos Para as Juntas Quentes 36
4.1.2 Resultados de Ciclos Térmicos Para as Juntas Frias 40
4.2 Discussão dos Resultados 43
5. CONCLUSÃO 48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... **Erro! Indicador não definido.**

1. INTRODUÇÃO

O processo de Friction Stir Welding (FSW) ou soldagem por atrito e mistura mecânica com pino não consumível foi inventado em 1991 no Reino Unido, mais precisamente no The Welding Institute (TWI) e consiste em uma técnica de junção no estado sólido, que foi inicialmente aplicada nas ligas de alumínio.

Para esse processo, se utiliza uma ferramenta que se encontra em rotação. A mesma contém um pino e um ombro especialmente desenhados para desempenhar determinadas funções durante a soldagem, sendo inserida entre as chapas que serão unidas e subseqüentemente a ferramenta é movimentada ao longo da linha de união.

A ferramenta utilizada possui três funções básicas que são o aquecimento das peças, a movimentação de material que irá produzir a junta, além de conter o calor necessário para o processo abaixo do ombro. O aquecimento criado no interior das peças é promovido por fricção entre o pino da ferramenta que está rotacionando e pela deformação plástica severa da peça.

1.1 Justificativa

Processos de soldagem a arco convencionais criam uma junta estrutural por fusão localizada e solidificação subseqüente. Isso normalmente requer o uso de consumíveis caros, gases de proteção, além de metal de adição. A fusão dos materiais requer o uso intensivo de energia e o processo de solidificação dos metais freqüentemente ocasiona alguns defeitos que podem levar a presença de trincas, porosidades e contaminações. Mudanças metalúrgicas indesejáveis podem ocorrer na poça de fusão devido a ligas formadas com os metais de adição, segregação, além da exposição térmica nas zonas termicamente afetadas pelo calor. Estes podem ocasionar, em juntas degradadas, custos extensivos para reparar soldas, além de falhas estruturais imprevistas em condições de serviço. A união no estado sólido pode mitigar estas características indesejáveis dos processos de soldagem a arco.

O processo FSW tem permitido produzir juntas estruturais com propriedades superiores às dos processos a arco em ligas de alumínio, aço, níquel, cobre, magnésio e titânio. As juntas possuem resistência à tração, maior vida útil quando submetidas à fadiga, menores distorções, menor quantidade de tensões residuais, são menos sensíveis à corrosão e são essencialmente livres de defeitos quando comparadas àquelas produzidas por processos convencionais a arco. Isso é possível devido a alguns fatores, como a ausência de processo de fusão, e ao fato de que gases de proteção não são usados geralmente, embora o argônio seja usado em algumas situações para proteger os pinos de ferramentas cerâmicas e refratárias da oxidação.

Os pesquisadores e produtores que utilizam o processo FSW estimam que se 10% dos processos de união de materiais metálicos utilizados nos Estados Unidos forem substituídos pela soldagem com pino não consumível, 1.28×10^{13} Btu's/ano podem ser poupados em energia e pode-se reduzir em 500 milhões de libras/ano a emissão de gases causadores do efeito estufa. O processamento simplificado, a maior resistência estrutural, a confiabilidade aumentada e as emissões reduzidas com a utilização desse processo, podem gerar um benefício econômico anual para a economia dos Estados Unidos de aproximadamente 4,8 bilhões de dólares por ano (MISHRA; MAHONEY, 2007).

Diante do presente cenário, se faz necessário um estudo aprofundado desse processo de união, que tem tomado a atenção de diversos pesquisadores dos principais laboratórios de países desenvolvidos. Em janeiro de 2005, as licenças concedidas pelo TWI para esse tipo de processo, se dividiam quase igualmente entre America do Norte, Europa e Ásia, sem relatos de licenciados na América do Sul. Na América do Norte, 36% dos licenciados eram industriais, e os 64% restantes eram laboratórios pertencentes ao governo, fabricantes de equipamentos, e institutos acadêmicos e de pesquisa.

Na universidade Federal de Pernambuco ainda não existem pesquisas que abordem esse processo, pois a maioria das pesquisas se destina aos processos convencionais. A consolidação do Instituto de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), que englobará laboratórios de soldagem, caracterização de materiais, propriedades mecânicas, mecânica fina, análise térmica, pintura e

revestimento, tornará viável a oportunidade de pesquisar outros processos de união que são alvo de interesse para o mercado e que acompanham as tendências de linhas de pesquisa atuais.

O estado da arte para modelos computacionais térmicos que tivessem foco em juntas soldadas para aços para dutos também foi analisado e não haviam modelos validados com dados experimentais para o API 5L X80, pois a grande maioria disponível levantava dados para ligas de Alumínio, que são as mais usadas na soldagem por FSW. O ganho na compreensão da história térmica de chapas do API 5L X80 unidas por FSW a partir de um modelo computacional foi o que motivou a elaboração desse projeto.

1.2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

- Desenvolvimento de um modelo computacional térmico para prever a distribuição de temperaturas no processo FSW.

-Validação do modelo computacional a partir da análise comparativa com dados experimentais previamente obtidos a partir da soldagem efetuada com dois aportes térmicos distintos, além de extrapolar os ciclos térmicos para regiões onde não se pode realizar a medição de temperaturas com a utilização de termopares.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Tratamento e interpretação dos dados experimentais do levantamento do ciclo térmico

- Proposição de um modelo que descreva o ciclo térmico por FSW em juntas soldadas.

- Comparação do modelo com dados experimentais.

- Calibração do modelo com base em dados experimentais

- Interpretação e análise dos dados fornecidos pelo modelo

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução à Soldagem Por Fricção

Os processos de soldagem por atrito mais conhecidos são processos de união em que o calor necessário para a soldagem a ser efetuada é produzido pelo movimento relativo entre as superfícies a serem unidas, caracterizados por serem processos no estado sólido. Segundo Elmer e Kautz (2007), esse método se baseia no princípio da conversão direta de energia mecânica em térmica para formação da união, onde se pode desconsiderar a aplicação de calor de quaisquer fontes externas e quando o processo é executado sob condições normais, não ocorre fusão na interface. Os métodos mais comuns que utilizam o método de fricção linear são a soldagem por acionamento direto e a soldagem com acionamento inercial, sendo a primeira também chamada de soldagem por fricção convencional. Esta se baseia na utilização de um motor rotacionando a uma velocidade constante, que irá fornecer energia para o processo. Já no caso da segunda, a energia é armazenada em um volante que por sua vez irá fornecer a energia necessária para a soldagem.

Os processos acima citados fazem uso de duas partes que devem estar alinhadas axialmente. Com essa condição, uma das partes é mantida no estado estacionário enquanto a outra é rotacionada, sendo uma pressionada contra a outra de maneira que ocorra um contato sob pressão. Além disso, o processo de soldagem por fricção com acionamento inercial tem sido utilizado comercialmente desde os anos 40 (MATERIALS, 1993).

Os processos de soldagem por fricção descritos anteriormente foram muito importantes do ponto de vista tecnológico, mas seu uso industrial sempre foi limitado devido as geometrias de soldagem que podem ser produzidas a partir da utilização dos mesmos, assim, cientistas continuaram pesquisando processos de soldagem no estado sólido que permitissem a união de geometrias mais complexas.

2.2 O Surgimento Do FSW

Segundo Lohwasser e Chen (2010), o processo de soldagem por fricção com pino não consumível teve suas bases lançadas pelo princípio termomecânico para uniões no estado sólido. O The Welding Institute manteve suas atenções voltadas para diversas atividades industriais e de P&D em soldagem por fricção e no estudo de superfícies. Wayne Thomas e seus colegas trabalharam no desenvolvimento e conseguiram obter variantes do processo de soldagem por fricção. Vários processos desenvolvidos por eles, como extrusão por fricção e processos de união por fricção com a utilização de um terceiro componente, contribuíram para o acúmulo de conhecimento e a observação de fenômenos importantes que foram estudados pelo grupo no TWI. Uma técnica de soldagem com um mecanismo de transporte efetivo para o material no estado plástico que pudesse ser utilizada para uma variedade ampla de geometrias estava começando então a ser desenvolvida. Quando Wayne Thomas percebeu que o uso de um pino penetrante de um material mais duro que o das peças poderia causar a deformação plástica destas e um mecanismo de transporte efetivo poderia ser utilizado para unir o material deformado plasticamente, foi dado o pontapé inicial para a consolidação do processo FSW.

2.3 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga

Os Aços de alta resistência e baixa liga, também conhecidos como micro-ligados possuem em relação aos aços convencionais ao carbono, melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão atmosférica superior.

Os aços ARBL possuem tensões de escoamento superiores a 275 MPa, ou 40 ksi. O conteúdo de carbono é baixo, podendo variar 0,5 a 0,25%C de modo que conformabilidade e forjabilidade sejam adequadas, os valores de conteúdo de manganês podem atingir até 2%. Pode haver ainda pequenas quantidades de cromo, molibdênio, cobre, nitrogênio, vanádio, nióbio, titânio e zircônio que podem ser usados em diferentes combinações.

A condição mais comum de fornecimento desse material é como laminado, podendo também ser na condição de laminado por processo controlado,

normalizado, ou endurecido por precipitação de modo a atender requisitos específicos de propriedades(METALS HANDBOOK, 1997).

2.4 Os Aços API 5L

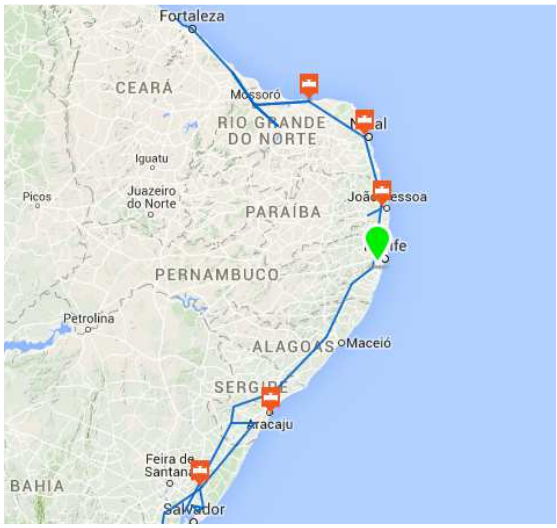
A norma API5L regulamenta os aços para tubos que são utilizados no transporte de óleo e gás, para a qual estabelece as classes de acordo com a resistência mecânica, designando o número após a letra X para o valor do limite de escoamento em ksi(LÚCIA; BRITO; NUNES, 2000).

Os aços da classe API 5L tem grande utilidade no transporte de petróleo e produtos derivados deste, a malha oleodutos e gaseodutos foi expandida nos últimos anos devido ao crescimento na demanda energética. Segundo dados divulgados pela Petrobrás, a malha de dutos no Brasil em 2010 era de 25.966 km (PETROBRÁS, 2011).

2.5 O Aço API 5L X80

A exigência nas especificações de tubos para gaseodutos e oleodutos tem aumentado juntamente com expansão das malhas nos últimos anos devido ao aumento na severidade nas condições de trabalho. As tendências têm apontado para uma necessidade de tubos com diâmetros maiores e menores espessuras de parede, além de maiores níveis de resistência, sem que o teor de carbono presente nesses dutos comprometa a soldabilidade, onde os aços ARBL da classe 5L X70 e X80 tem se demonstrado adequados para esse tipo de aplicação (USIMINAS, 2009).

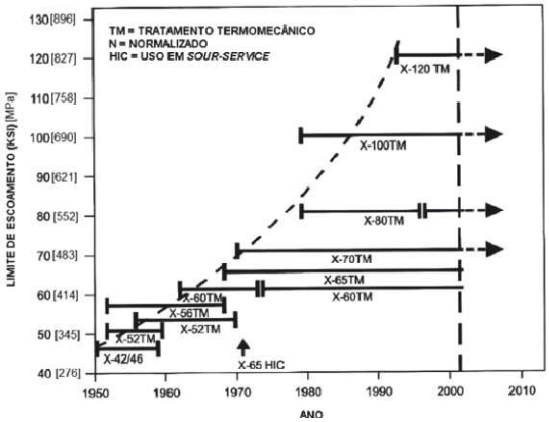
Figura 1: Gaseodutos que passam pela região nordeste do Brasil



Fonte: PETROBRÁS, 2011

A Usiminas iniciou estudos com aços API no final da década de 80 e em 2000 foi iniciado no Brasil um projeto que envolvia várias entidades com o intuito de avaliar o desenvolvimento e aplicações de aços API 5L X80. O processo adotado para fabricação desses aços foi o TMCP (Sigla em inglês para processamento termomecânico controlado) que adota um resfriamento acelerado de 800 até 500 ºC, e após isso um resfriamento ao ar, para obtenção de microestruturas bainíticas.

Figura 2: Desenvolvimento dos aços 5L a Partir da década de 50



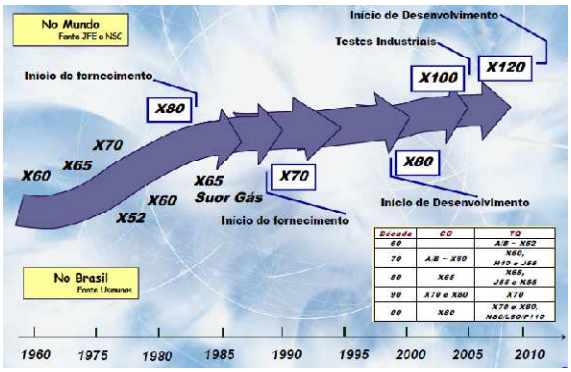
Fonte: JUNIOR; ROCHA; BRANDI, 2013

Para que as propriedades almejadas sejam obtidas por intermédio do

processamento termomecânico controlado, é necessário um elevado controle no processo de laminação a quente com ênfase na temperatura e deformação durante as últimas etapas, além das condições de resfriamento após a laminação final. A partir dessas condições, é possível se obter um refinamento de tamanho de grão aumentando o limite de escoamento e a tenacidade (COOPER, 2004).

Registros datam que a primeira aplicação do aço X80 se deu no ano de 1985 na Alemanha, quando trechos de tubos de X80 foram instalados somando um total de 3,2Km. Já em 2005 foi construído nos EUA o maior duto de X80 do mundo, com uma extensão de 650 Km e 36'' de diâmetro. Em 1886 a Cosipa iniciou estudos do X80 no Brasil pelo processo de laminação controlada. Atualmente a Usiminas é a fabricante do aço X80 para tubo no Brasil.(JUNIOR; ROCHA; BRANDI, 2013)

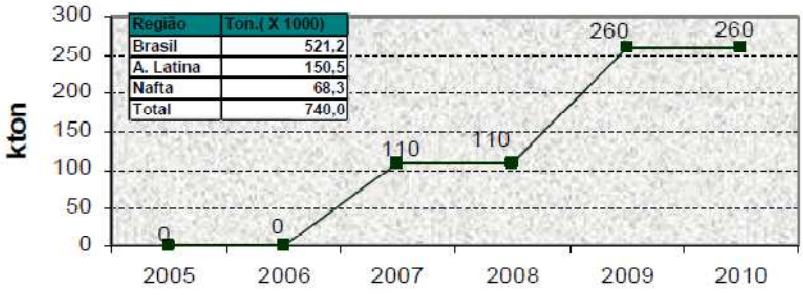
Figura 3: Evolução na produção de Aços API's



Fonte: TAISS, 2007

O Aço X80 produzido no Brasil possui um teor de Carbono entre 0,04 e 0,08%, com teores de Manganês podendo variar de 1,59 a 1,86%, sendo microligado a elementos como o Vanádio, Nióbio e Titânio, contando também com adições de Molibdênio e Cromo, apresentando cerca de 65% de sua microestrutura de bainita, além de ferrita primária e uma pequena parcela de Martensita-Austenita(ROCHA, 2010).

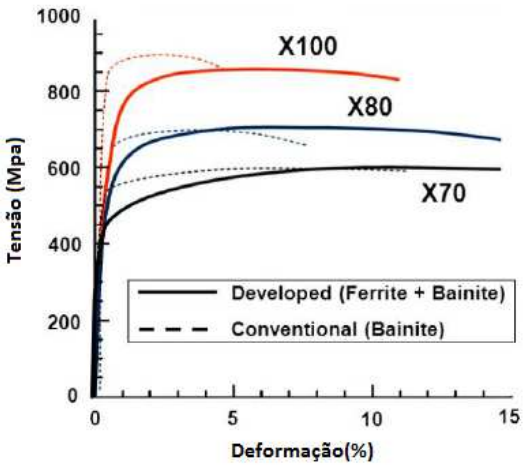
Figura 4: Mercado De Aços API X80



Fonte: TAISS, 2007

O API 5L X80 possui um limite de escoamento de 80ksi(555MPa) ou superior, seu limite de resistência está na faixa entre 620 e 827 MPa, como pode ser verificado na figura 5.

Figura 5: Gráfico de Tensão versus Deformação para os aços X80, X70 e X100



Fonte: ROSADO; WAELE; VANDERSCHUEREN, 2013

2.6 Importância da Soldagem do Processo FSW Para o Aço X80

O processo de soldagem é essencial na construção de dutos em larga escala e para que seja possível o transporte de gás natural e petróleo por longas distâncias sob pressões elevadas. Durante os processos convencionais de soldagem a arco,

freqüentemente podem ocorrer problemas com os aços para dutos, tais como perdas significativas na dureza e resistência na zona termicamente afetada. Além disso, outros problemas podem ocorrer nessa zona, tais como trincas induzidas por hidrogênio (AYDIN; NELSON, 2013).

A corrosão localizada pode ser considerada uma maneira comum de falha nos aços de alta resistência para tubos que estão enterrados no subsolo. Foi descoberto por Zhang e Cheng que a ZTA do aço X70 do aço para dutos possui a maior suscetibilidade à corrosão sob tensão por dissolução anodica em meio hidrogenado em uma solução de pH próximo ao neutro(WANG et al., 2014).

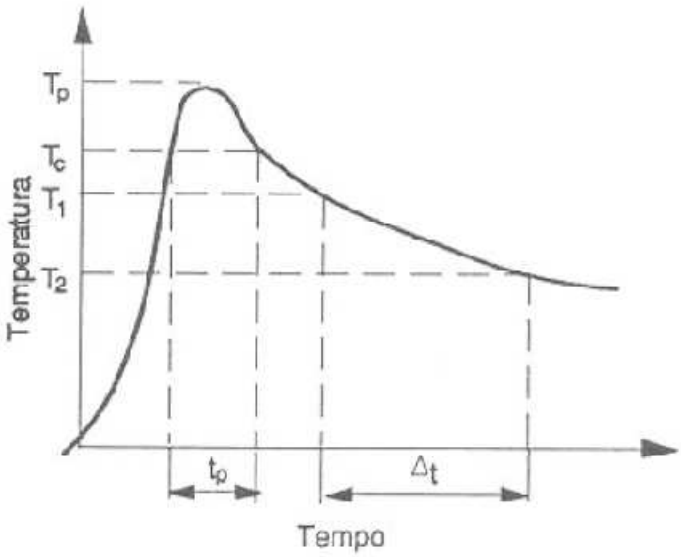
É bem conhecido que aços ARBL tais como o API 5L X80 são mais sensíveis às trincas induzidas por hidrogênio em comparação a outros aços como os de baixa resistência. Eventos catastróficos podem ocorrer devido a problemas em juntas soldadas tais como trincas microscópicas em juntas soldadas e essa probabilidade pode ser aumentada quando os metais de solda se tornam mais duros que o metal de base, por concentrar maiores quantidades de elementos de liga. A trinca induzida por hidrogênio se caracteriza como uma trinca a frio por tender a ocorrer em temperaturas relativamente baixas. Hidrogênio difusível no metal de solda, assim como uma microestrutura susceptível, além de tensões residuais na junta soldada podem ser considerados pré-requisitos para a trinca induzida por hidrogênio(YAN; LIU; YAN, 2014).

A soldagem por atrito com pino não consumível oferece vantagens sobre processos convencionais de soldagem sobre os processos convencionais por fusão. Algumas dessas vantagens incluem baixas tensões residuais e distorções, melhores propriedades mecânicas e a incidência de defeitos reduzida. Além das vantagens citadas previamente, as trincas induzidas por hidrogênio, que são um dos maiores problemas provenientes dos processos convencionais pode ser reduzida ou eliminada, tornando o FSW um processo bastante adequado para a junção dos aços para dutos. Aliado a isso, as propriedades mecânicas de aços ao carbono unidos por esse processo são parcialmente melhoradas, pois se consegue um refinamento de grão na zona misturada, similar ao que ocorre com as ligas de alumínio(AYDIN; NELSON, 2013).

2.7 Ciclos Térmicos Na Soldagem

O ciclo térmico no processo de soldagem aplicado em um ponto do material durante o processo se caracteriza pelo aquecimento até uma temperatura máxima, seguido do resfriamento com uma taxa decrescente em relação ao tempo. Na soldagem convencional o ciclo térmico possui influência direta nas características resultantes da zona termicamente afetada, mais precisamente na microestrutura, sendo a determinação do ciclo térmico feita pela temperatura de pico atingida e pela taxa de resfriamento(MAXMILIAN, 2013).

Figura 6: Ciclo térmico de Soldagem



Fonte: ESAB, 2004

Nos processos de soldagem convencionais, podem haver alterações metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico, destacando-se o surgimento das tensões residuais. Essas tensões podem exercer uma considerável influência nas propriedades mecânicas dessas juntas, e um controle adequado das mesmas pode evitar falhas nas estruturas soldadas(ARAÚJO et al., 2013).

O ciclo térmico de soldagem e da repartição térmica dependem de alguns parâmetros, dentre os quais podemos citar o tipo metal de base e sua condutividade térmica, a geometria da junta soldada e espessura da mesma. A velocidade de resfriamento irá diminuir com o aumento do aporte térmico e da temperatura inicial da peça(ESAB, 2004).

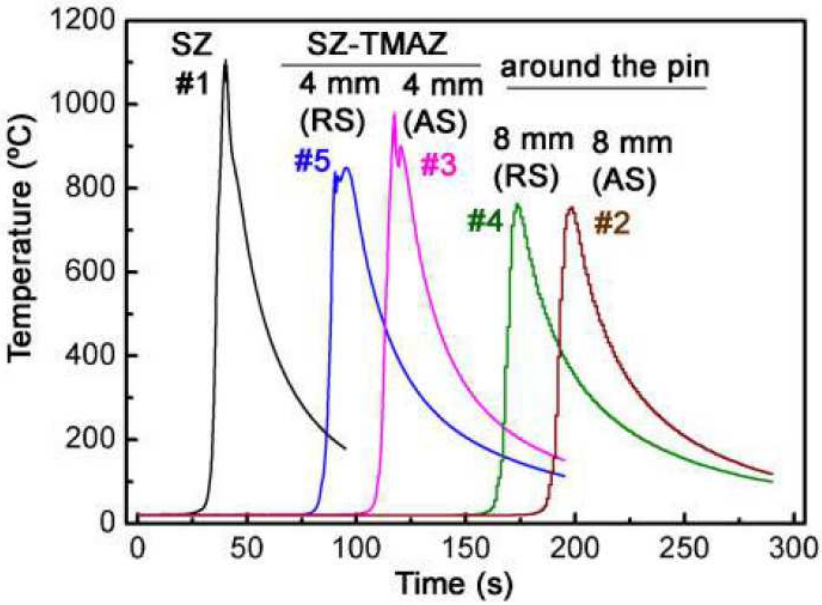
2.8 Ciclos Térmicos no Processo FSW

O entendimento do ciclo térmico e das distribuições de temperatura na peça soldada compõe um conjunto de informações de interesse, tanto pelo fato de determinar se o processo FSW será implementado de maneira bem sucedida ou não, quanto pela influência do ciclo nas tensões residuais, nos tamanhos de grão e conseqüentemente na resistência das juntas soldadas (HWANG et al., 2008).

Recentemente, pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de desenvolver simulações numéricas do processo FSW, especificamente nos modelos térmicos que levam em conta o calor gerado pelo trabalho das forças de fricção e a deformação do material com o intuito de predizer as distribuições de temperatura próximas ao pino durante a soldagem (FRATINI; BUFFA, 2005).

O fato das tensões residuais afetarem negativamente as propriedades de fadiga e a performance anti-corrosiva das peças soldadas ser bem conhecido pelos pesquisadores levou à condução de métodos experimentais para investigar medidas de tensões residuais em juntas soldadas por FSW. Medidas realizadas em juntas de Al 7108 registraram valores de -60 a 140 MPa de variação nas tensões residuais, além disso foi estabelecida uma correlação entre características detalhadas de tensões residuais e o fluxo térmico na soldagem. Para que se tenha um ganho na compreensão física do processo FSW e na evolução das tensões residuais, é necessário o desenvolvimento de técnicas de simulação e modelos apropriados (CHEN; KOVACEVIC, 2003).

Figura 7: Ciclos Térmicos para distâncias de 4 e 8 mm de uma junta soldada por FSW



Fonte: SANTOS; IDAGAWA; RAMIREZ, 2013

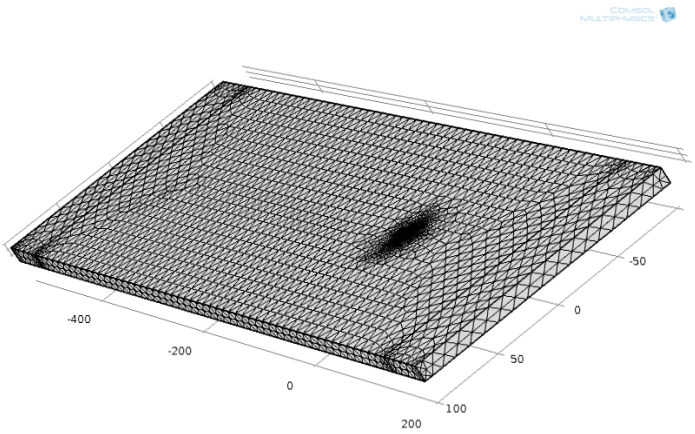
Os ciclos térmicos aliados às altas taxas de deformação durante a soldagem do X80 por FSW podem levar a uma zona localizada dura e frágil na solda e foi comprovado que essa zona pode influenciar significativamente na tenacidade à fratura da junta soldada, no entanto, a microestrutura e as propriedades mecânicas dessa zona ainda precisam ser caracterizadas com maiores detalhes (AYDIN; NELSON, 2013).

2.9 Métodos Dos Elementos Finitos

O método de elementos finitos são uma das maiores conquistas no âmbito do campo dos métodos computacionais no último século. A raiz desses métodos se iniciou na análise de estruturas aeroespaciais com onde o peso era um fator crítico. Essas estruturas eram tratadas como uma montagem de membros de uma dimensão, para as quais as soluções exatas eram bem conhecidas para as equações diferenciais para cada parte da estrutura. As soluções eram expressas na forma de uma relação entre forças e deslocamentos nas pontas de cada membro da estrutura.

As estruturas contínuas só foram possíveis de se analisar posteriormente, pois as mesmas possuíam formas geométricas complexas, e tinham de ser subdividas em componentes ou “elementos” interconectados por nós e se passou então a se utilizar o termo “método dos elementos finitos”.

Figura 8: Modelo de Método de Elementos Finitos com Malha Gerada



No entanto, não haviam soluções para as equações diferenciais que governassem o comportamento de estruturas contínuas, desse modo alguns princípios de energia, tais como o princípio da energia potencial mínima ou o teorema do trabalho virtual, que eram bem conhecidos, que foram combinados com uma interpolação polinomial por partes do deslocamento desconhecido, eram utilizados para estabelecer uma relação matricial entre forças e deslocamentos interpolados entre os nós numericamente.

No fim dos anos 60 esse método foi reconhecido como sendo equivalente a um processo de minimização, sendo reformulado na forma de resíduos ponderados e cálculo variacional e assim, foi expandido para a simulação de problemas não estruturais em fluidos, termomecânicos e eletromagnéticos. Mais recentemente o método foi expandido para cobrir aplicações multi-físicas (KHENNANE, 2013).

Nesse contexto, o método de elementos finitos pode também servir ao propósito, que é a análise dos ciclos térmicos. O modelo mais adequado para a essa

abordagem é conhecido como o modelo térmico pseudo-mecânico, que é baseado em uma fonte de calor onde o limite de escoamento ao cisalhamento dependente da temperatura, sendo este o maior responsável pela geração de calor localizada. Esse modelo assume que a tensão de fricção no cisalhamento encontra-se em equilíbrio com a tensão de deformação no cisalhamento na camada mais próxima à interface ferramenta/peça(SCHMIDT; HATTEL, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve como objetivo a validação de um modelo computacional do qual foram extraídos dados térmicos, para isso se realizou uma análise comparativa com ciclos térmicos medidos no LNNano, onde ser realizou o procedimento de soldagem com medidas simultâneas efetuadas com o auxílio de termopares posicionados ao longo das chapas soldadas em distâncias de 6, 8, 10 e 12mm do eixo central em ambos os lados da chapa.

Uma máquina do modelo RM-2, do fabricante "*Transformation Technologies Incorporated"* foi utilizada na execução das juntas soldadas, essa máquina detém 24 canais para conexão de termopares que foram empregados na aquisição dos dados de temperatura para o estudo do ciclo térmico de soldagem.

Dois modos de controle distinto estão disponíveis na configuração do equipamento, sendo estes o controle de posição e de força. No primeiro, o deslocamento no eixo Z é o principal parâmetro de controle, que determina a força axial. No segundo modo, a máquina é ajustada para operar de modo que se tenha uma força axial constante, assim se tem uma garantia de que a soldagem será conduzida de maneira estável.

Outras variáveis importantes do processo de soldagem que podem ser reguladas são velocidade de soldagem, velocidade rotacional, força axial e penetração da ferramenta, sendo estas as responsáveis por governar as condições de soldagem. A montagem experimental executada no LNNano está na figura 9.

Figura 9: Equipamento devidamente configurado para executar a soldagem

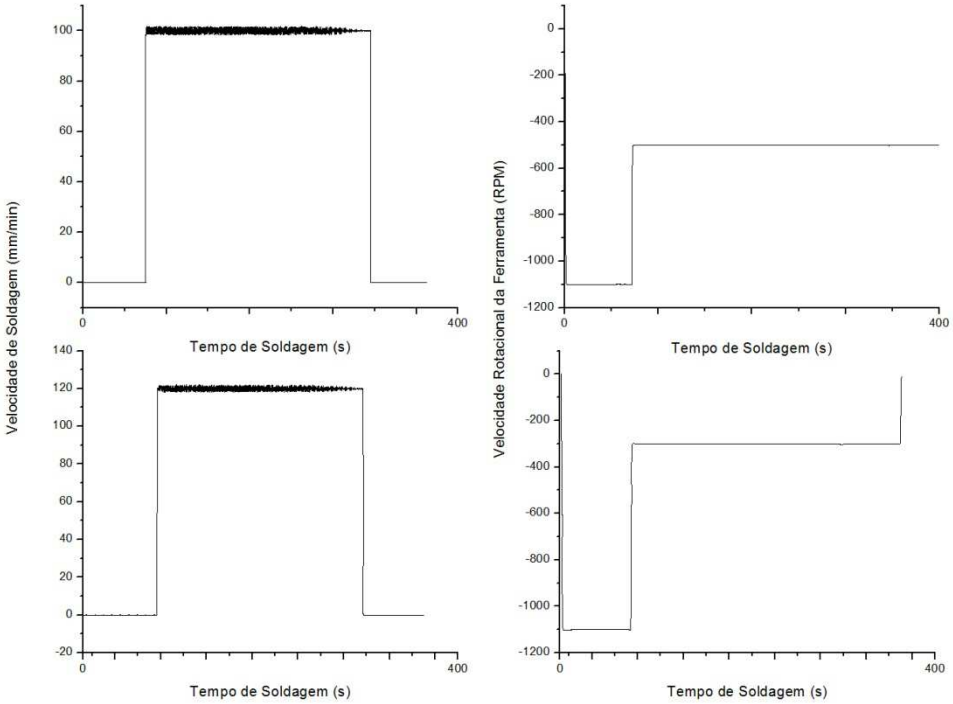
Fonte: LNNano

As juntas soldadas que foram realizadas sem que fossem detectados defeitos internos e externos foram caracterizadas de duas maneiras, sendo a primeira identificada como uma junta fria, com menor aporte térmico e outra junta com maior aporte térmico, sendo especificada como uma junta quente, o foco da equipe foi o estudo detalhado das características micro estruturais e mecânicas.

Os parâmetros utilizados na produção de ambas as juntas foram utilizados como entrada no modelo experimental para a geração dos ciclos térmicos, a partir da análise do relatório fornecido pela máquina foi possível se adquirir as informações da condição estável de soldagem. As velocidades rotacionais e de

soldagem adquiridas se encontram nos gráficos abaixo, onde as velocidades selecionadas foram as da condição mais próxima da estacionária na soldagem.

Figura 10: Parâmetros de Soldagem Para os Ciclos Quente e Frio



Desse modo, os dados de entrada do programa foram organizados de acordo com a tabela abaixo.

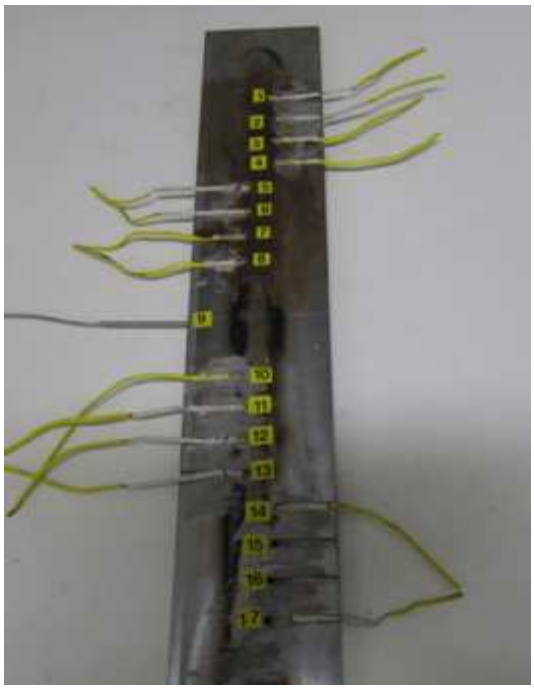
Tabela 1: Parâmetros Usados como Entrada no Modelo e Parâmetro de Classificação da Solda

Junta Soldada	Velocidade de Rotação(RPM)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Aporte Térmico (kJ/mm)
Quente	500	1,66 mm/s	1,69
Fria	300	2 mm/s	1,91

Os termopares utilizados na aquisição de dados de temperatura foram do tipo K, feitos a partir de uma liga comercialmente conhecida como Cromel/Alumel e que

permitem medir temperaturas que variam na faixa de -200 °C a 1200 °C. Os mesmos foram inseridos em furos com 4 mm de diâmetro e 10 mm de profundidade, desse modo quando a chapa foi colocada na máquina, a equipe reposicionou a mesma para que os termopares ficassem 2mm abaixo da superfície. Essa posição abaixo da superfície de soldagem também foi levada em conta no momento em que a análise do modelo computacional foi realizada.

Figura 11: Disposição dos Termopares na Chapa



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de método de elementos finitos utilizado foi um modelo estacionário baseado em uma formulação Euleriana. A fonte de calor foi tratada de maneira estacionária em relação à malha de elementos finitos, sendo este modelo mais complexo do que os que utilizam uma fonte de calor tradicionalmente prescrita analiticamente. Para que as curvas entre modelo e experimento tivessem uma maior afinidade, alguns parâmetros do modelo como a transferência de calor para o backing cerâmico e para o ambiente foram devidamente ajustados.

O modelo foi desenvolvido utilizando o módulo de transferência de calor do Comsol®, e as equações governantes adotadas foram as com termos convectivos.

$$\nabla(k\nabla T) = Q - \rho \mathrm{cp} \mu \nabla \mathrm{T}$$

O fluxo de calor utilizado nas condições de contorno para o processo de soldagem por fricção se deu com a seguinte equação:

$$q = \omega r \tau_{cisalhamento}(T)$$

Que foi modificada de acordo com o modelo de Schmidt e Hattel com a condição de contato entre ferramenta e peça de tensão de contato em equilíbrio com a tensão de escoamento ao cisalhamento.

$$\tau_{contato} = \tau_{fricção} = \tau_{cisalhamento}(T)$$

Na tentativa de considerar a condição não simétrica de geração de calor em volta da ferramenta, foi determinada uma condição para a geração de calor de acordo com a posição angular da ferramenta.

cond1: if(x>0,if(y>0,sin(arctan(x/y)),0),0)

cond2: if(x==0,if(y>0,1,0),0)

cond3: if(x<0,if(y>0,sen(180-arctan(x/y)),0),0)

cond4: if(x<0,if(y<0,sen(180+arctan(x/y)),0),0)

cond5: if(x>0,if(y<0,sen(360-arctan(x/y)),0),0)

cond6: if(x==0,if(y<0,-1,0),0)

sen(θ) : cond1+cond2+cond3+cond4+cond5+cond6

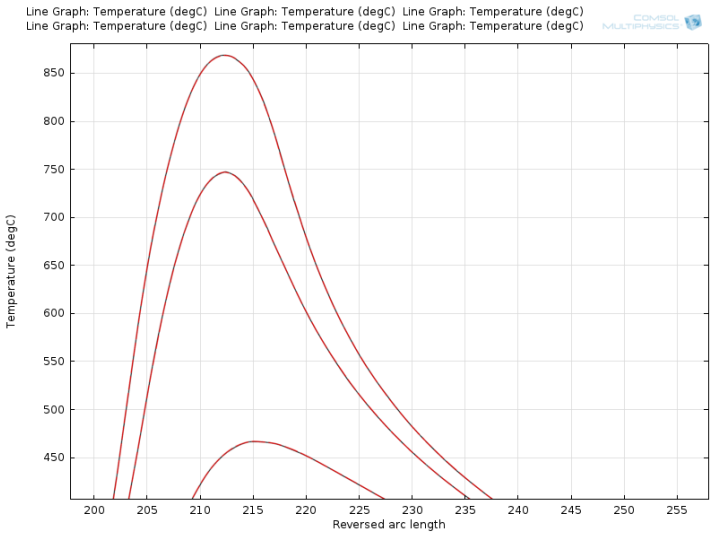
Desse modo, a equação da geração de calor foi descrita de acordo com a seguinte equação:

$$Q = 0{,}35(R\omega - U_{soldagem} sen(\theta))\tau_{cisalhamento}(T)$$

Onde o raio foi dado por $R = x^2 \times y^2$, ω foi calculado em função da velocidade rotacional da ferramenta adquirida pelos dados experimentais, assim como a velocidade de soldagem. O coeficiente de 0,35 foi usado para ajustar a temperatura de pico entre os valores experimentais e modelados tendo em vista que parte da energia é consumida na forma de aquecimento e na deformação da chapa, somado do fato que o modelo é puramente térmico; as temperaturas geradas sem que houvesse o ajuste foram muito elevadas e tiveram que ser reguladas.

Mesmo considerando a geração de calor sendo assimétrica ao redor da ferramenta, as temperaturas de lado de avanço e lado de recuo não tiveram diferenças significativas no modelo. Desse modo as temperaturas escolhidas para comparação foram as registradas pelos termopares que estavam no lado de avanço da junta soldada e conectados a um sistema externo de medição de temperatura, tendo em vista que nesse lado a velocidade tangencial da ferramenta tem a mesma direção e sentido do seu deslocamento linear. Além disso, os ciclos térmicos registraram temperaturas de pico incompatíveis para os termopares localizados a 6 e 10 mm do centro da junta no lado de retrocesso e se concluiu que eles podem ter sido deslocados durante o manuseio da chapa ou na soldagem(HERMENEGILDO, 2012).

Figura 12: Diferença das curvas modeladas para o ciclo quente entre o lado de avanço e lado de recuo



A troca de calor entre as superfícies superior e inferior foi considerada de acordo com as equações de fluxo de calor, onde as expressões utilizadas foram:

$$q_{superior} = h_{superior}(T_0 - T) + \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4)$$

$$q_{inferior} = h_{inferior}(T_0 - T) + \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4)$$

Os coeficientes de transferência de calor considerados foram 10 W/(m^2.K), onde foi considerada a troca da parte superior da chapa com o ambiente e de 750W/(m^2.K) para a troca de calor entre a chapa e o backing cerâmico. A emissividade da superfície adotada foi de 0,3.

Tabela 2: Tabela de variáveis para o ciclo quente

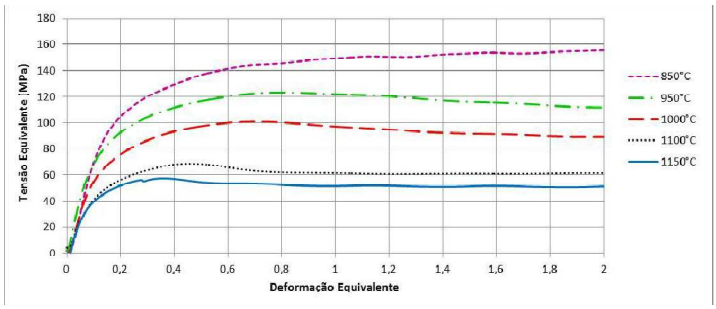
Nome	Expressão	Descrição
T0	300.00 K	Temperatura ambiente
h_superior	10 W/(m2.K)	Coeficiente de troca de Calor Entre Chapa e Ambiente
h_inferior	750 W/(m2.K)	Coeficiente de troca de Calor Entre Chapa e Backing
epsilon	0.3	Emissividade da Superfície
n	500 RPM	Velocidade Rotacional da Ferramenta
ω	52,360 rad/s	Velocidade Angular da Ferramenta
U_soldagem	1,66mm/s	Velocidade de Soldagem

Tabela 3: Tabela de variáveis para o ciclo frio

Nome	Expressão	Descrição
T0	300.00 K	Temperatura ambiente
h_superior	10 W/(m2.K)	Coeficiente de troca de Calor Entre Chapa e Ambiente
h_inferior	750 W/(m2.K)	Coeficiente de troca de Calor Entre Chapa e Backing
epsilon	0.3	Emissividade da Superfície
n	300 RPM	Velocidade Rotacional da Ferramenta
ω	31,416 rad/s	Velocidade Angular da Ferramenta
U_soldagem	2 mm/s	Velocidade de Soldagem

A tensão de escoamento ao cisalhamento em função da temperatura foi outro dado experimental que teve de ser colocado como entrada no programa, assim foi feita uma pesquisa extensiva na literatura e se verificou a possibilidade de extrair esses dados de ensaios de torção a quente, desse modo as informações foram obtidas a partir de ensaios realizados no API 5L X80, onde foi feito um levantamento de curvas para diferentes temperaturas e mesma taxa de deformação.

Figura 13: Curvas de Tensão equivalente versus deformação equivalente para ensaios de torção a quente a uma taxa de deformação de 02s^{-1}



Fonte: MARTINS; MACHADO, 2015

A ferramenta utilizada foi fabricada a partir do PCBN (Niterto Cúbico de Boro Policristalino) e os dados considerados para a ferramenta no modelo foram os do CBN (Nitreto Cúbico de Boro), que já se encontravam na biblioteca de dados para materiais do programa. O ombro e o pino da ferramenta foram modelados de maneira que fosse considerada a parcela que estava em contato com a chapa no momento da soldagem.

Figura 14: Imagem do Cordão de Solda Para a Junta Fria

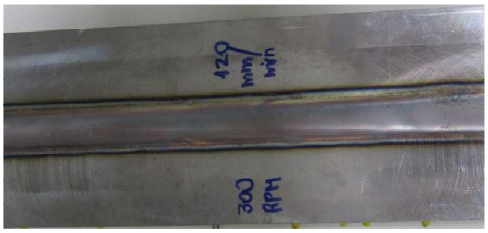


Figura 15: Ferramenta utilizada na Soldagem

Fonte: LNNano

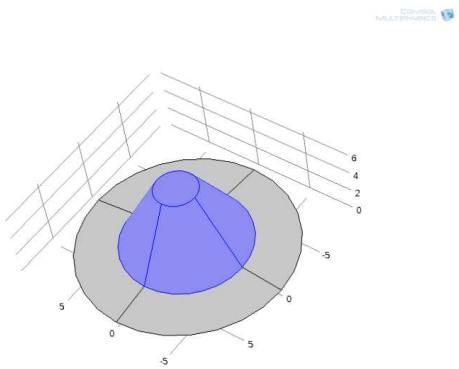
Com a macrografia da soldagem foi possível estimar a penetração do ombro, assim foi estabelecido de que apesar do ombro possuir um diâmetro de 25 mm, apenas 18 mm se encontravam em contato direto com a peça e a partir desses dados foi calculado que houve 0,46 mm de penetração do ombro na peça no eixo z.

Figura 16: Macrografia da Soldagem

Tabela 4: Dados da Ferramenta

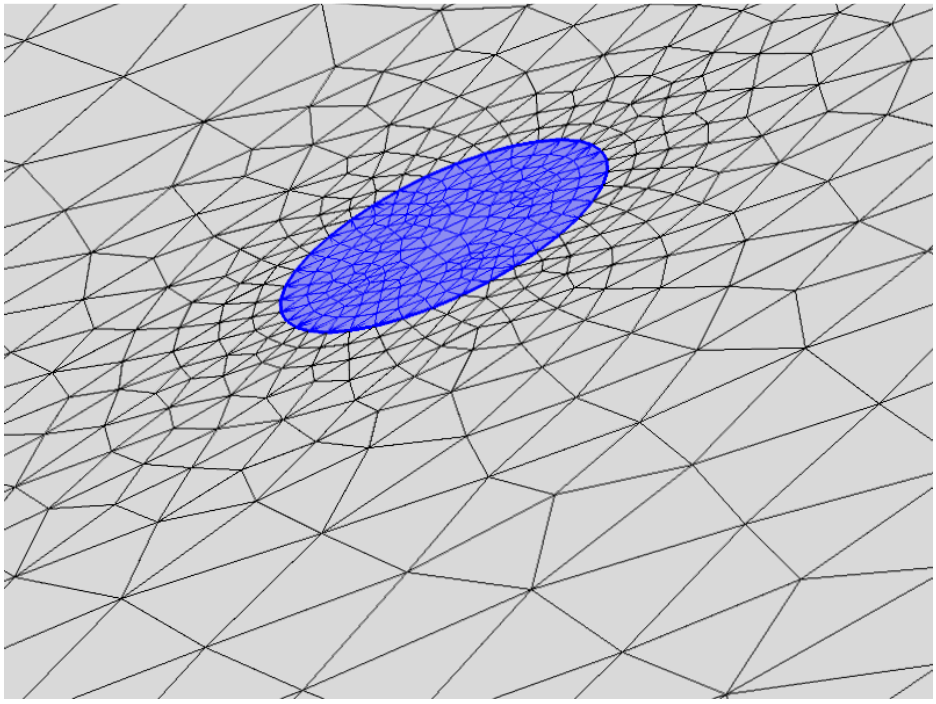
Raio da Parte Penetrada do Ombro	9mm
Raio da Base do Cone do Pino	5.4mm
Raio do Topo do Cone do Pino	1.8mm
Altura do Tronco de Cone do Pino	6mm

Figura 17: Ombro e Pino modelados no Software de MEF



A malha utilizada para o modelo foi do tipo tetraédrica, os elementos da parcela da malha referente à chapa foram definidos com tamanho de elemento máximo de 50 mm, já os elementos referentes ao ombro e pino foram definidos com tamanho máximo de elemento de 35 mm e tamanho mínimo de elemento de 4 mm.

Figura 18: Imagem Ampliada da Malha na Região do Ombro



Os dados necessários para a chapa soldada também foram os dados do aço de baixo carbono, que também estavam disponíveis na biblioteca do software e a

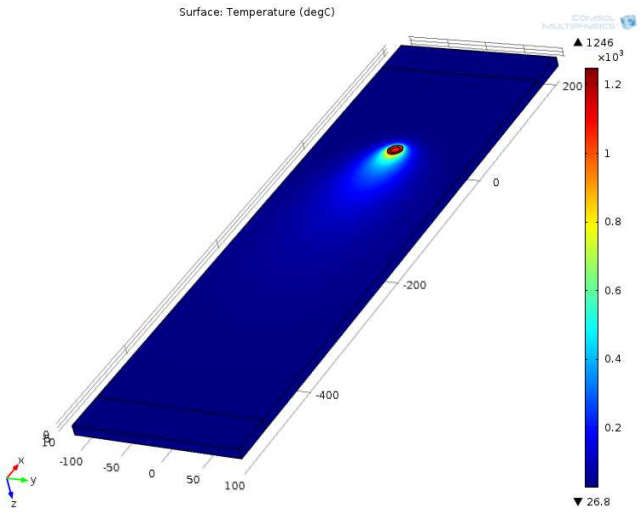
espessura da chapa foi no modelo foi de 12 mm, assim como a da chapa que foi usada no procedimento experimental, desse modo a simulação foi efetuada e a convergência foi bem sucedida, possibilitando a obtenção dos ciclos térmicos nos pontos desejados.

Tabela 5: Propriedades do Aço de baixo Carbono

Aço			
Propriedade	Nome	Valor	Unidade
Condutividade Térmica	k	52,9	W/(m.K)
Densidade	ρ	7860	Kf/m^3
Capacidade Calorífica a Pressão Constante	Cp	486	J/(Kg.m^3)

Os primeiros dados gerados foram as distribuições de calor, onde valores máximos obtidos foram de 1246 ºC para o ciclo quente, essa temperatura foi registrada no ponto situado logo atrás da ferramenta (Fig.24) e está de acordo com a literatura tendo em vista as temperaturas alcançadas podem ser na ordem de 1250ºC.

Figura 19: Distribuição de Temperaturas no Processo

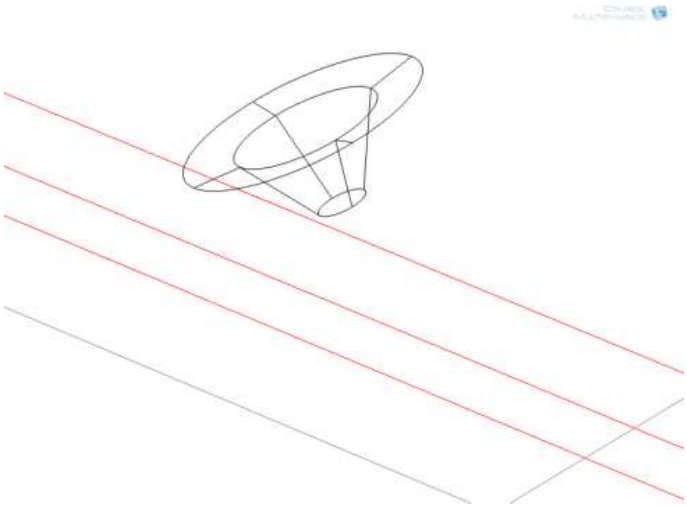


4.1 Resultados de Ciclos Térmicos Modelados

Os ciclos térmicos obtidos com o modelo de métodos de elementos finitos realizado com o Comsol® foi comparado com os ciclos térmicos experimentais, de

modo que as curvas de ciclos obtidas para uma distância de 2 mm abaixo da superfície para as distâncias de 6, 8 e 12 mm do eixo central de soldagem foram comparadas com a aquisição de dados gerados a partir dos termopares.

Figura 20: Exemplo das Linhas de Dados Utilizadas Para Coletar os Ciclos Térmicos no Software



Resultados de Ciclos Térmicos Para as Juntas Quentes

Os ciclos térmicos obtidos para as curvas de 6 mm na soldagem da Junta Quente foram bastante satisfatórios e podem ser observados na sobreposição dos gráficos.

O resultado mostrou boa concordância entre resultados experimentais e simulados, onde as temperaturas de pico e a taxa de resfriamento tiveram comportamento semelhante, tendo o mesmo ocorrido para as distâncias de 8 mm e 12 mm do eixo central para a Junta Quente. Com esse resultado é possível extrapolar o ciclo térmico para pontos da chapa em que a limitação física impede a medição das temperaturas experimentalmente devido à presença do pino e do ombro, promovendo um ganho no entendimento de aspectos importantes no processo de soldagem por fricção para o API 5L X80.

Figura 21: Sobreposição das Curvas da Junta Quente Para 6 mm

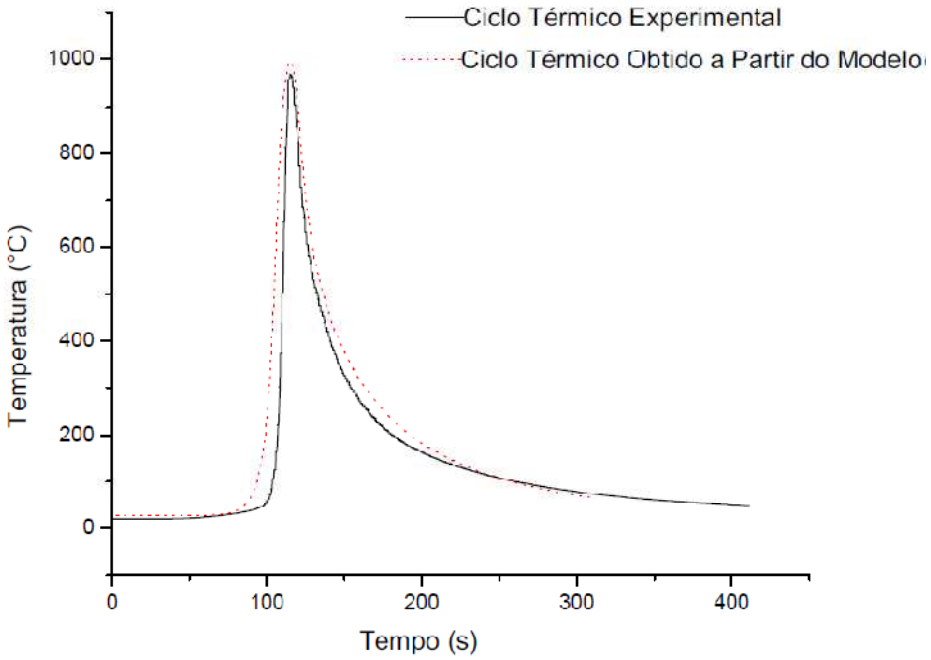
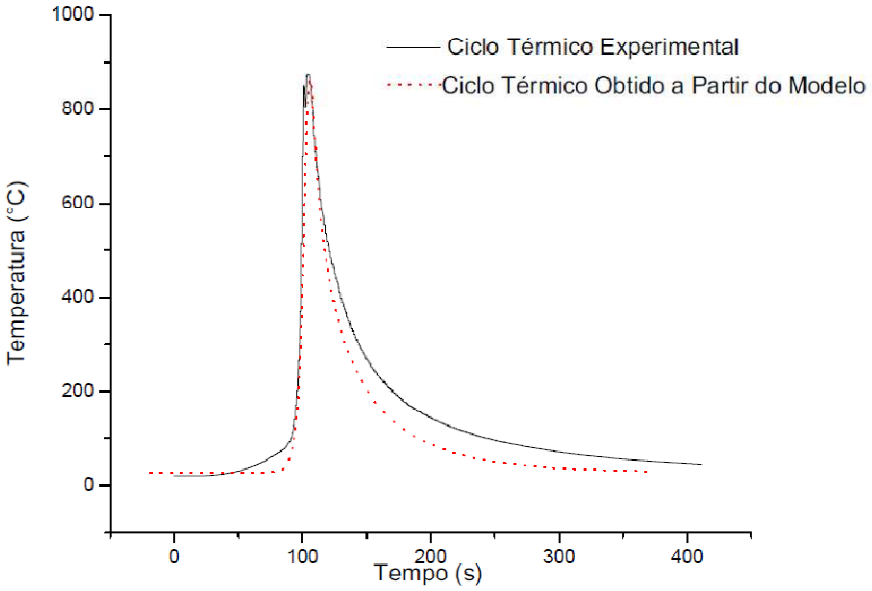


Figura 22: Sobreposição das Curvas da Junta Quente Para 8 mm



O ciclo térmico simulado das Juntas soldadas para as distâncias 8m e 12 mm tiveram uma taxa de resfriamento um pouco mais acentuada em relação ao ciclo medido experimentalmente. Mesmo com essa divergência, pode ser inferido que até

a faixa de temperatura de 250 °C onde se tem boa concordância entre as duas curvas para todos os ciclos comparados, a maioria das transformações microestruturais já ocorreram, assim a taxa de resfriamento abaixo dessa faixa não terá um impacto considerado no que diz respeito às transformações de fase.

Figura 23: Sobreposição das Curvas da Junta Quente Para 12 mm

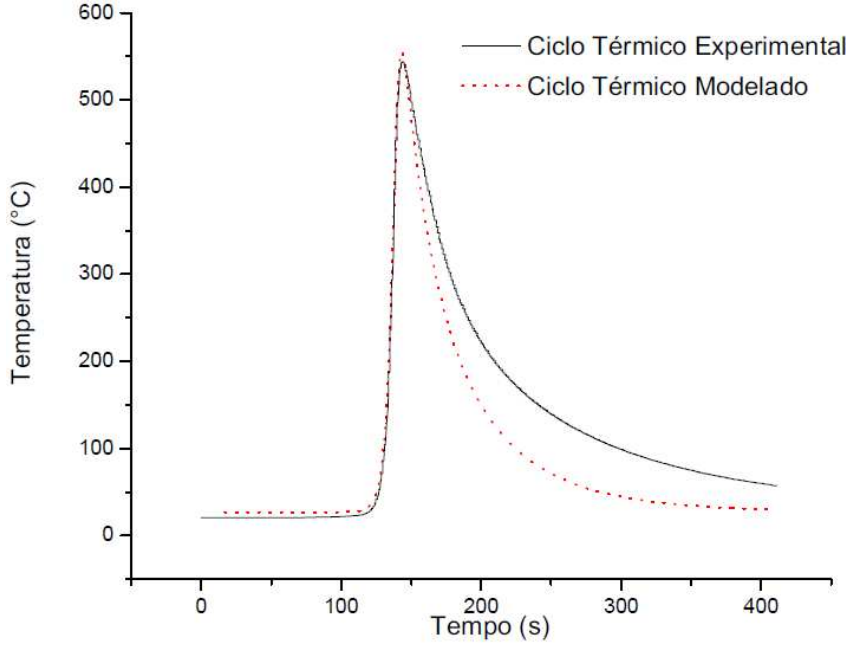


Figura 24: Distribuição das Temperaturas No Corte Transversal à Ferramenta Para o Ciclo Quente

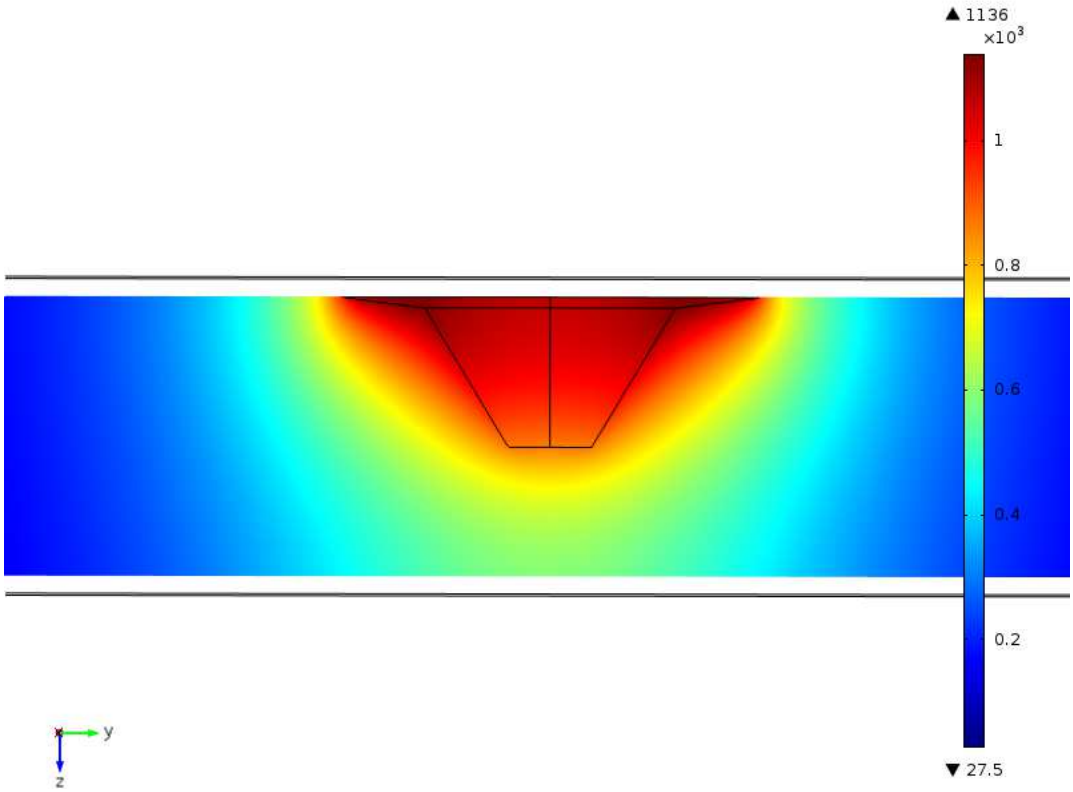
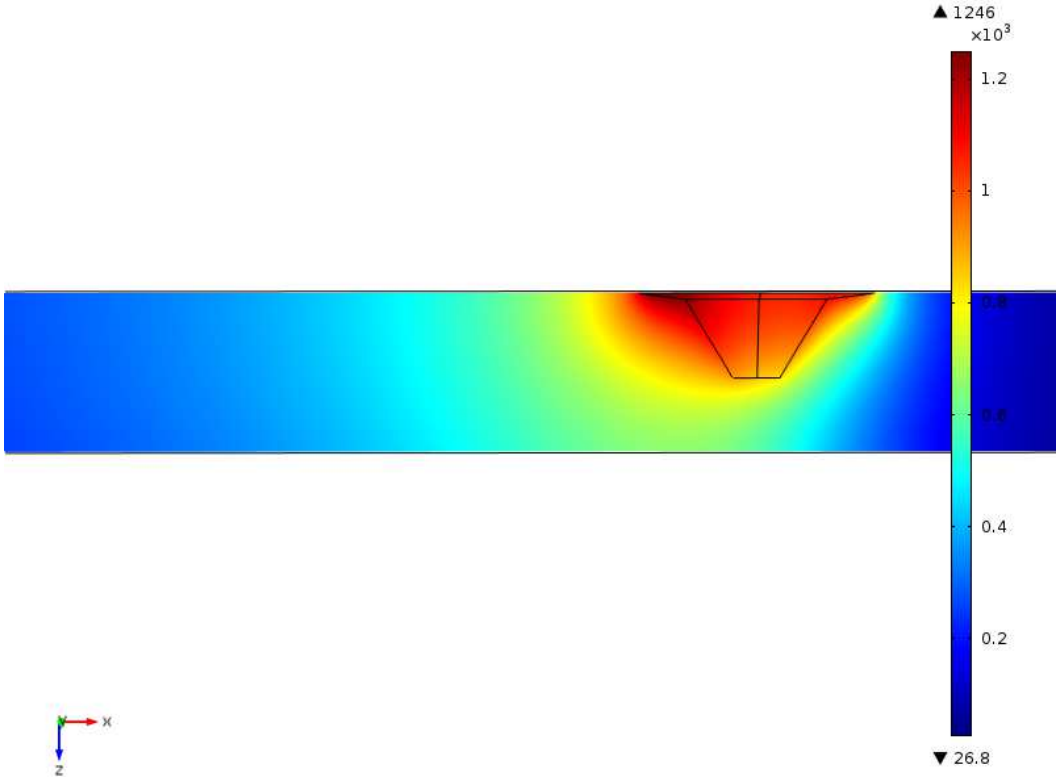


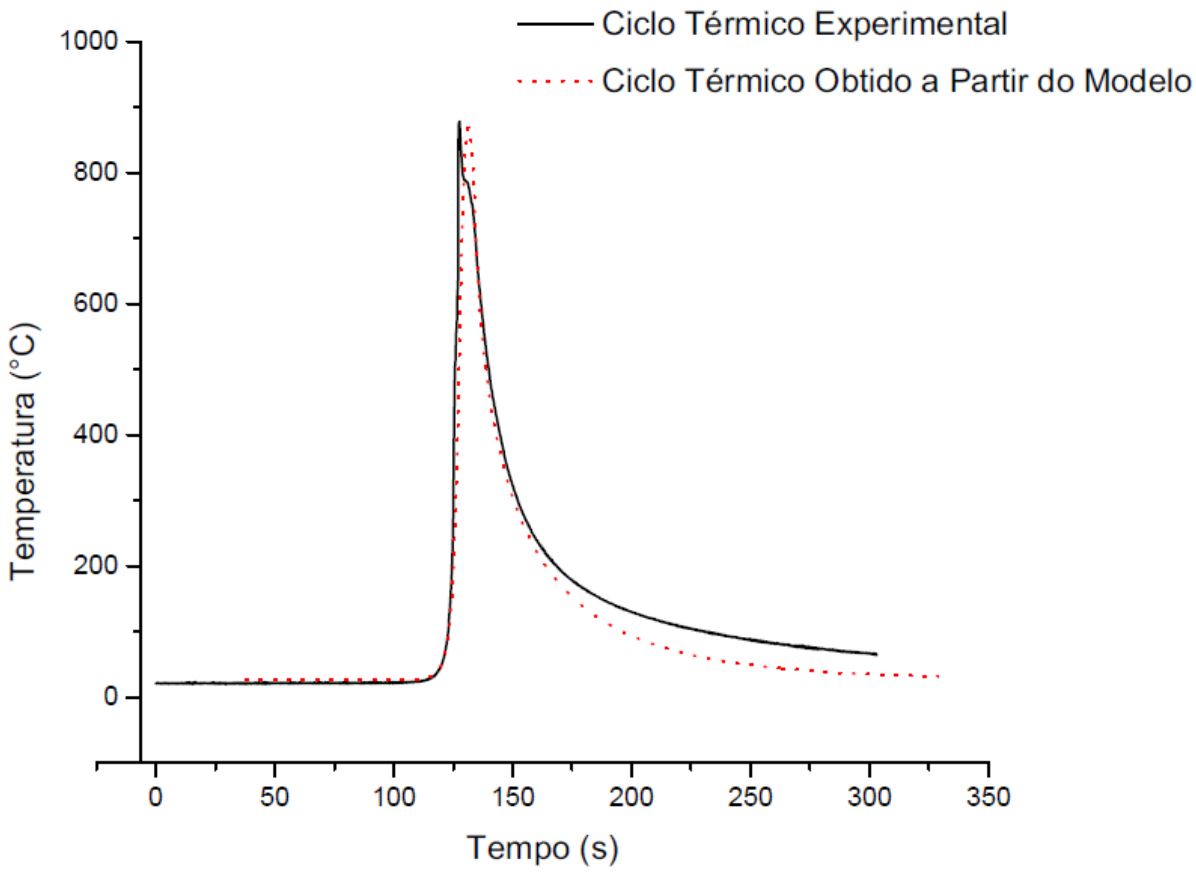
Figura 25: Distribuição de Temperaturas ao Longo da Linha de Soldagem no Ciclo Quente



Resultados de Ciclos Térmicos Para as Juntas Frias

Os resultados para a junta fria também mostraram uma concordância entre modelo e experimento, o que comprova o fato de que a simulação foi capaz de predizer a temperatura para diferentes velocidades de soldagem e de rotação da ferramenta. Esse fato certifica a hipótese de que o modelo é eficaz para descrever distribuições de temperatura para diferentes aportes térmicos.

Figura 26: Sobreposição das Curvas da Junta Fria Para 6 mm



As Temperaturas máximas tiveram uma ótima concordância, estas são dependentes de alguns parâmetros de soldagem, como as propriedades físicas do material de base e da ferramenta utilizada, além da geometria dos mesmos e também pode variar de acordo com os parâmetros de soldagem.

Figura 27: Sobreposição das Curvas da Junta Fria Para 8 mm

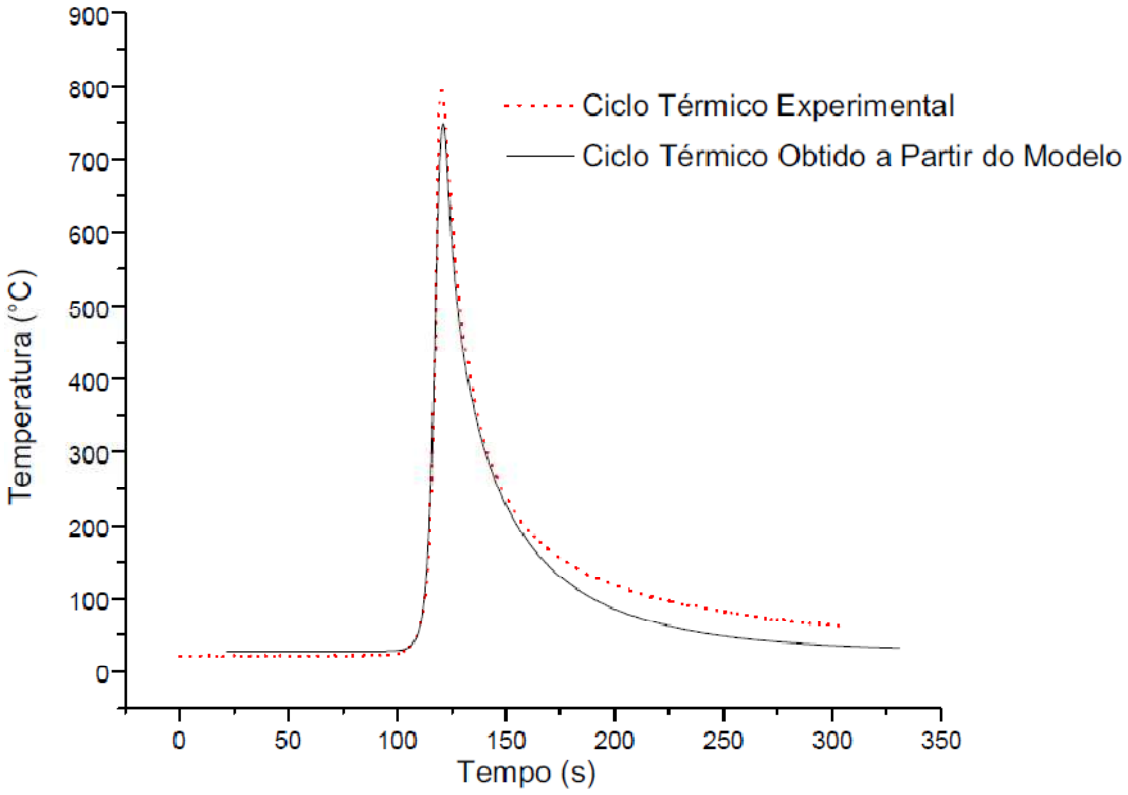


Figura 28: Sobreposição das Curvas da Junta Fria Para 12 mm

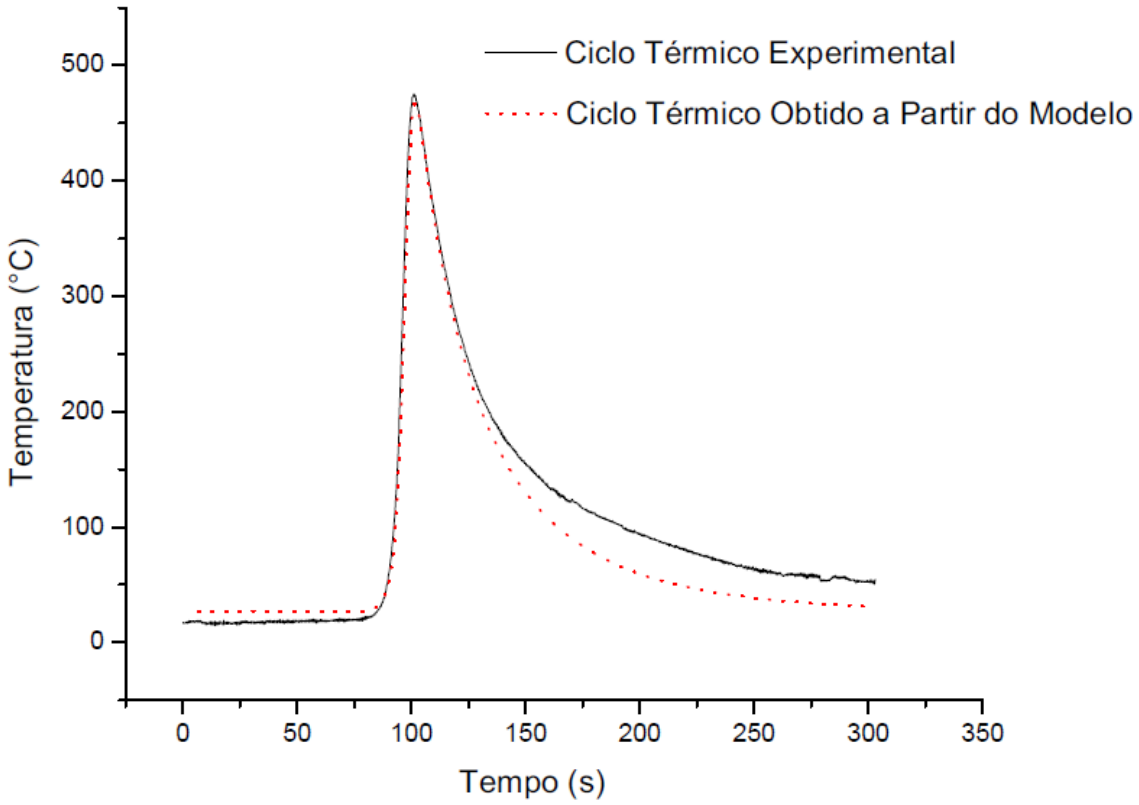


Figura 29: das Temperaturas No Corte Transversal à Ferramenta Para o Ciclo Frio

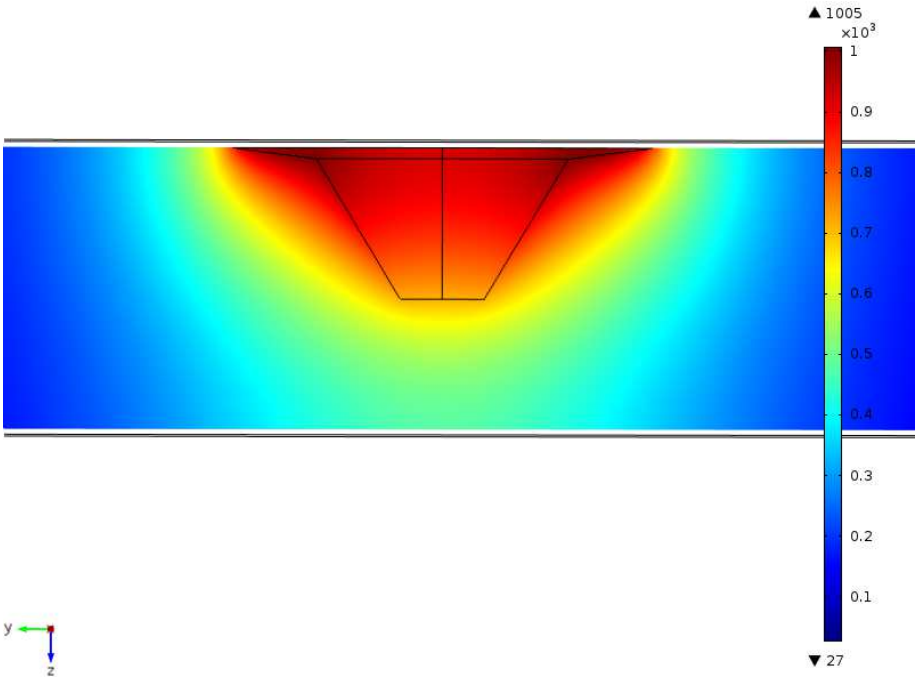
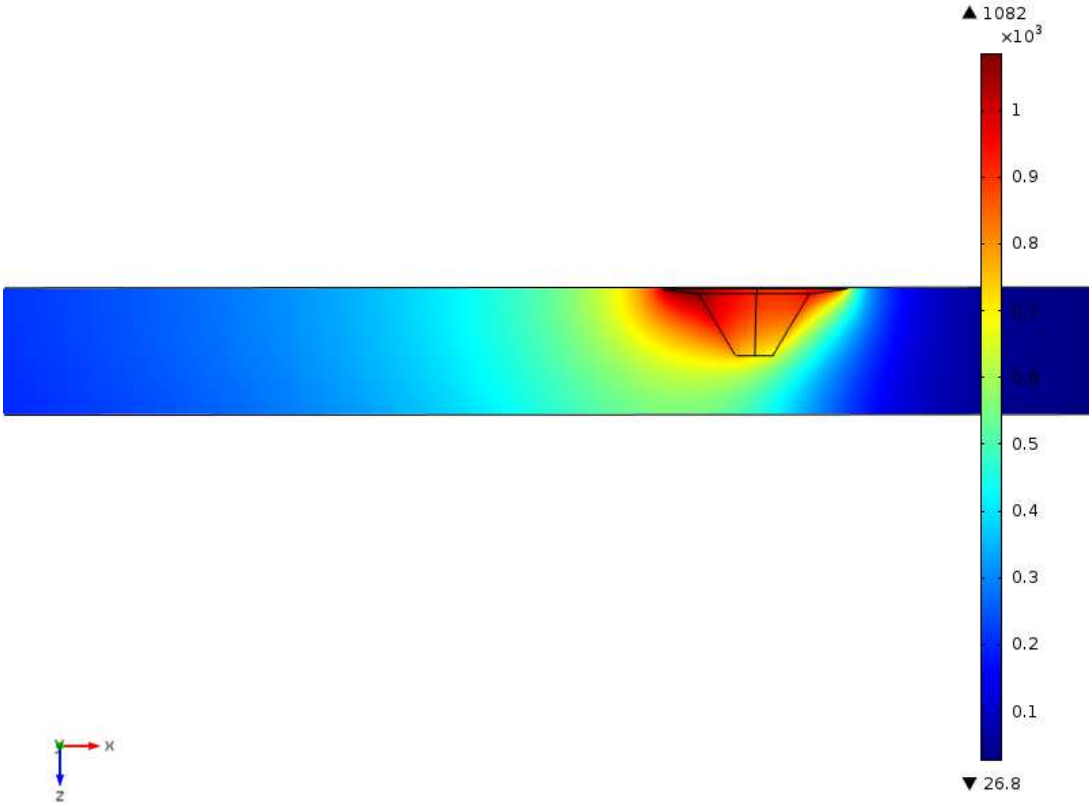


Figura 30: de Temperaturas ao Longo da Linha de Soldagem no Ciclo Frio



4.2 Discussão dos Resultados

Tendo em vista a gama de informações que puderam ser obtidas a partir do modelo, fica evidente a importância da necessidade do aprimoramento de modelos computacionais para o processo de soldagem por fricção. Informações adicionais podem ser inferidas a partir dos dados provenientes do modelo, como o tamanho de grão, o crescimento e a dissolução de precipitados, além das propriedades mecânicas. Em casos onde se tem uma soldagem com dois passes, as informações obtidas por meio de simulação também são de grande importância, pois a região soldada será submetida a dois ciclos térmicos consecutivos. Outros ciclos térmicos pelo foram gerados a partir do modelo para prever ciclos onde não é possível com o emprego dos termopares para realizar medições. Os pontos escolhidos estão todos no eixo de simetria da ferramenta (passam pela direção de soldagem) e os ciclos para as juntas quente e fria são mostrados a seguir.

Figura 31: Ciclo Térmico Extrapolado para a superfície no eixo de simetria na Junta Quente

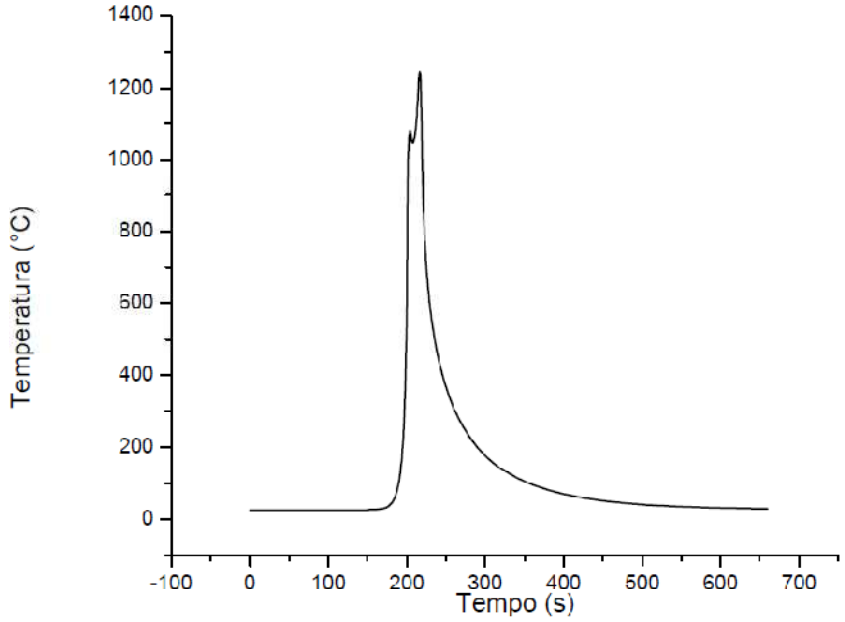


Figura 32: Ciclo Térmico Extrapolado para a superfície no eixo de simetria na Junta Fria

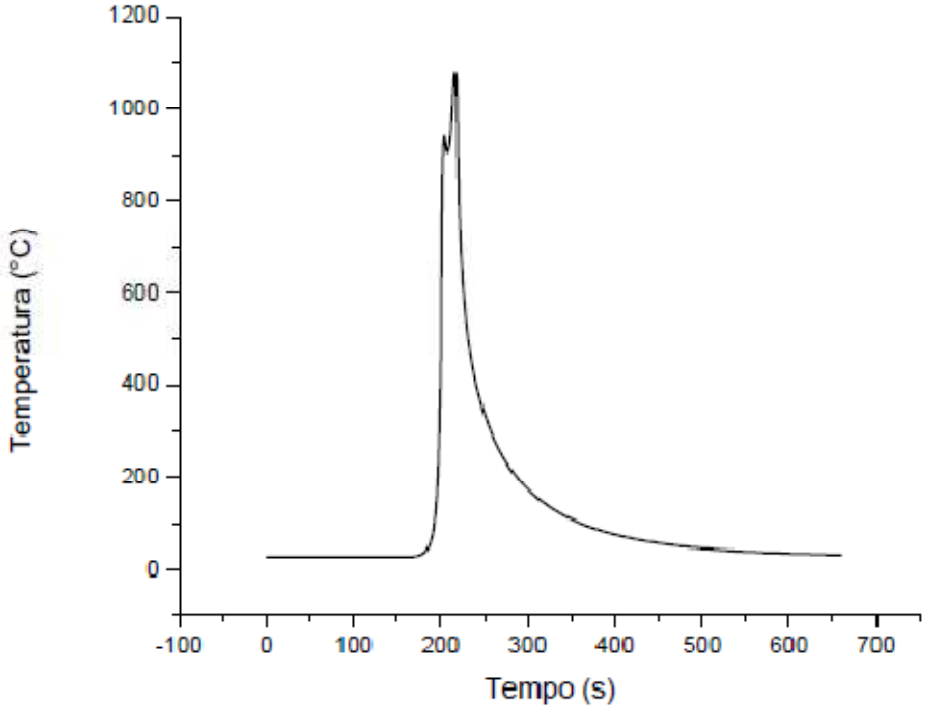


Figura 33: Ciclo Térmico Extrapolado Para 2 mm Abaixo da Superfície no eixo de simetria da Junta Quente

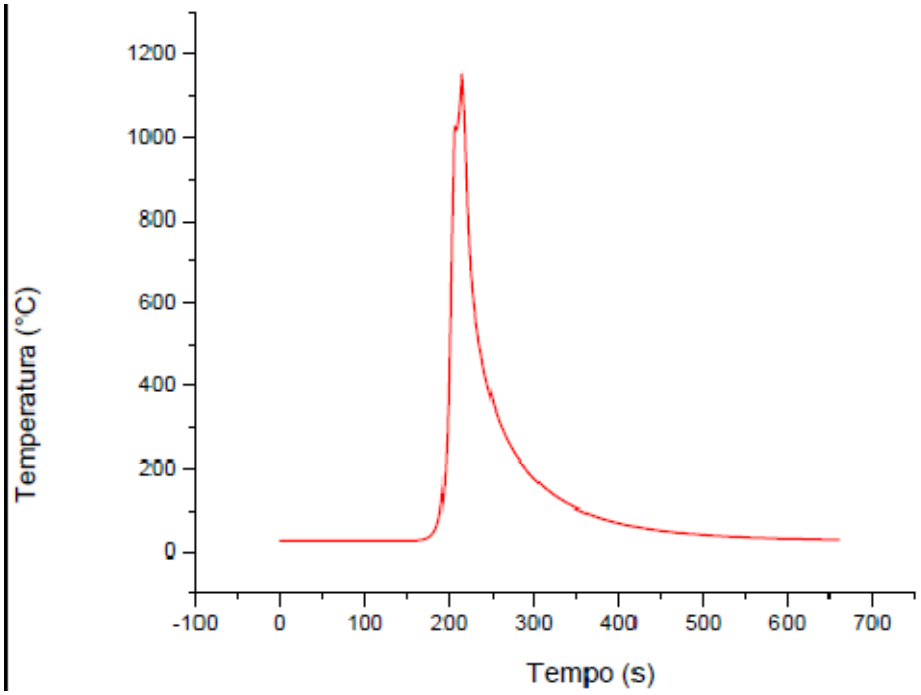


Figura 34: Ciclo Térmico Extrapolado Para 2 mm Abaixo da Superfície no eixo de simetria da Junta Fria

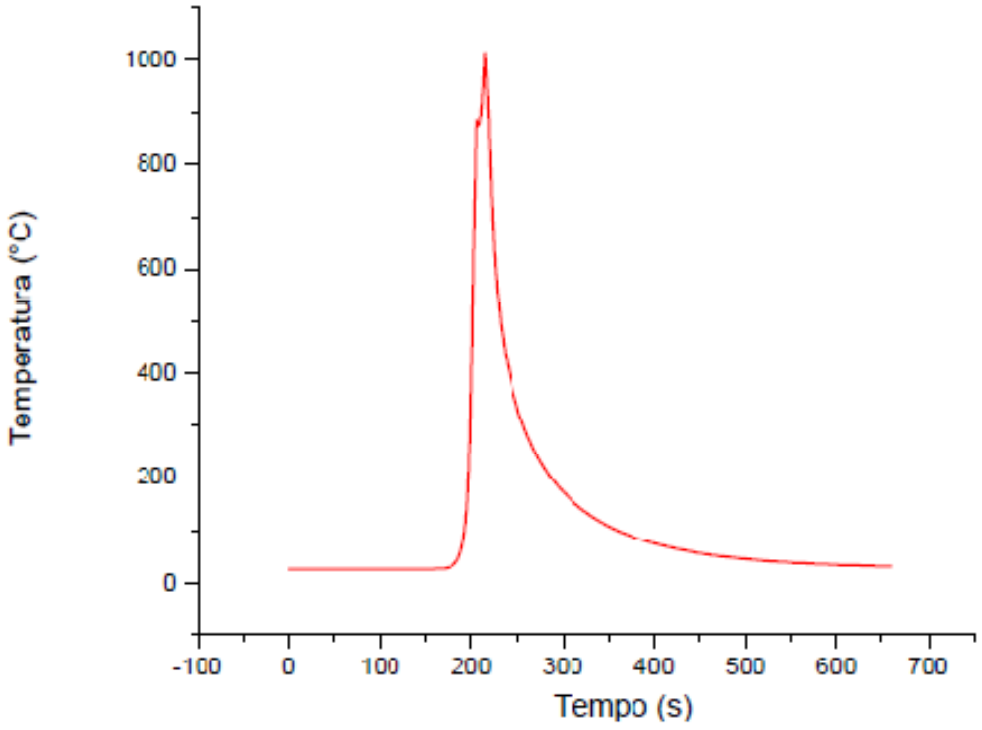


Figura 35: Ciclo Térmico Extrapolado Para a parte inferior do Pino no eixo de simetria da Junta Quente

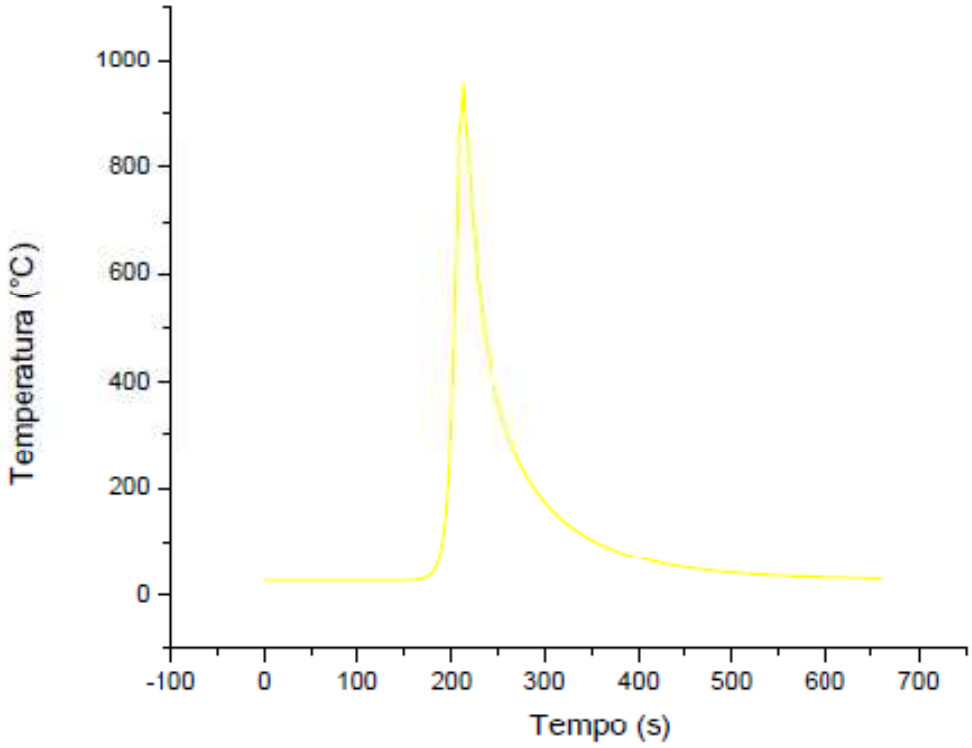


Figura 36: Térmico Extrapolado Para a parte inferior do Pino no eixo de simetria da Junta Fria

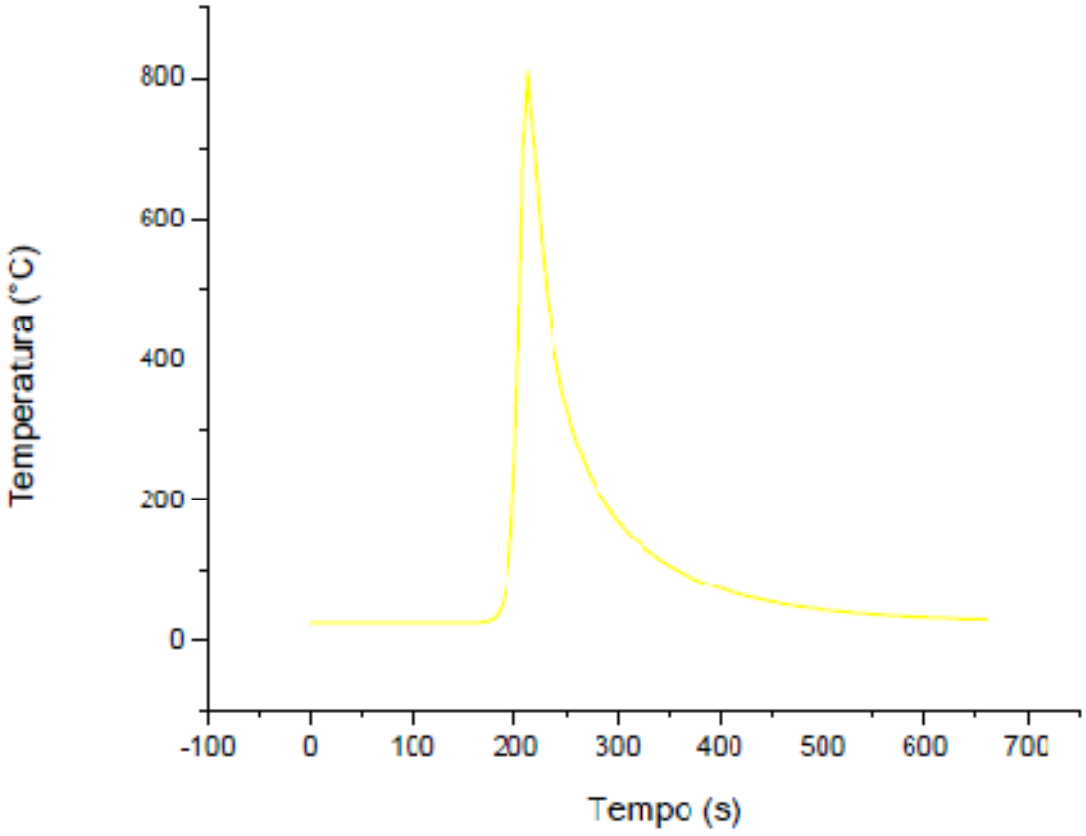


Figura 37: Ciclo Térmico Extrapolado Para a Região Inferior da Chapa no eixo de simetria da Junta Quente

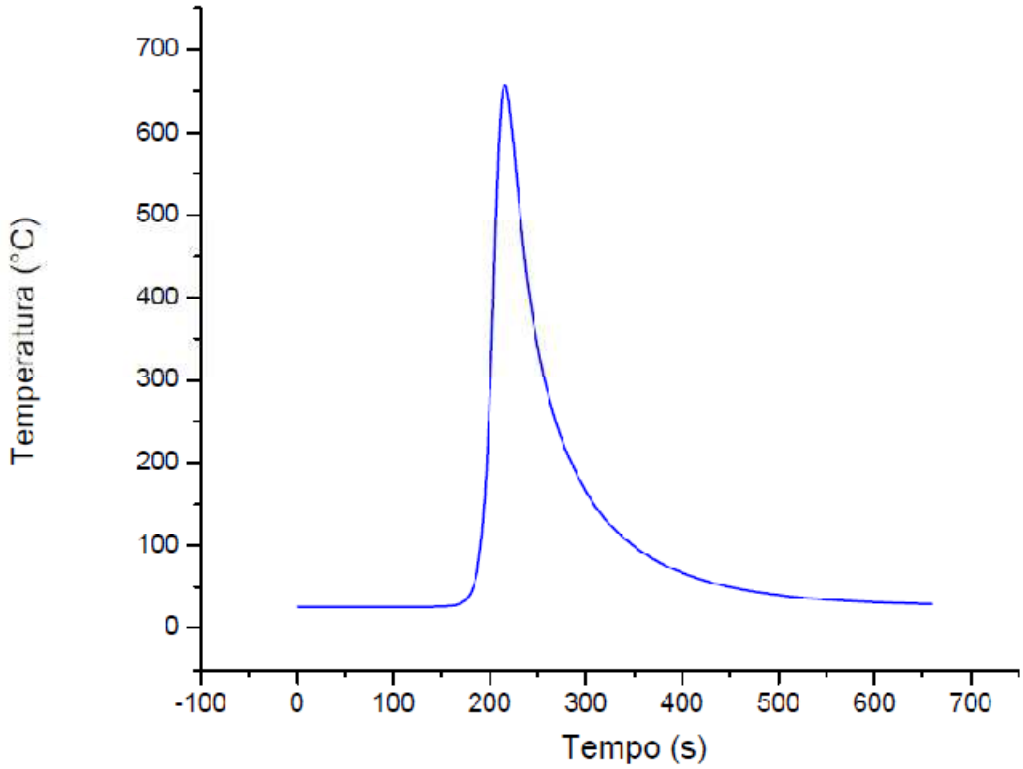


Figura 38: Ciclo Térmico Extrapolado Para a Região Inferior da Chapa no eixo de simetria da Junta Fria

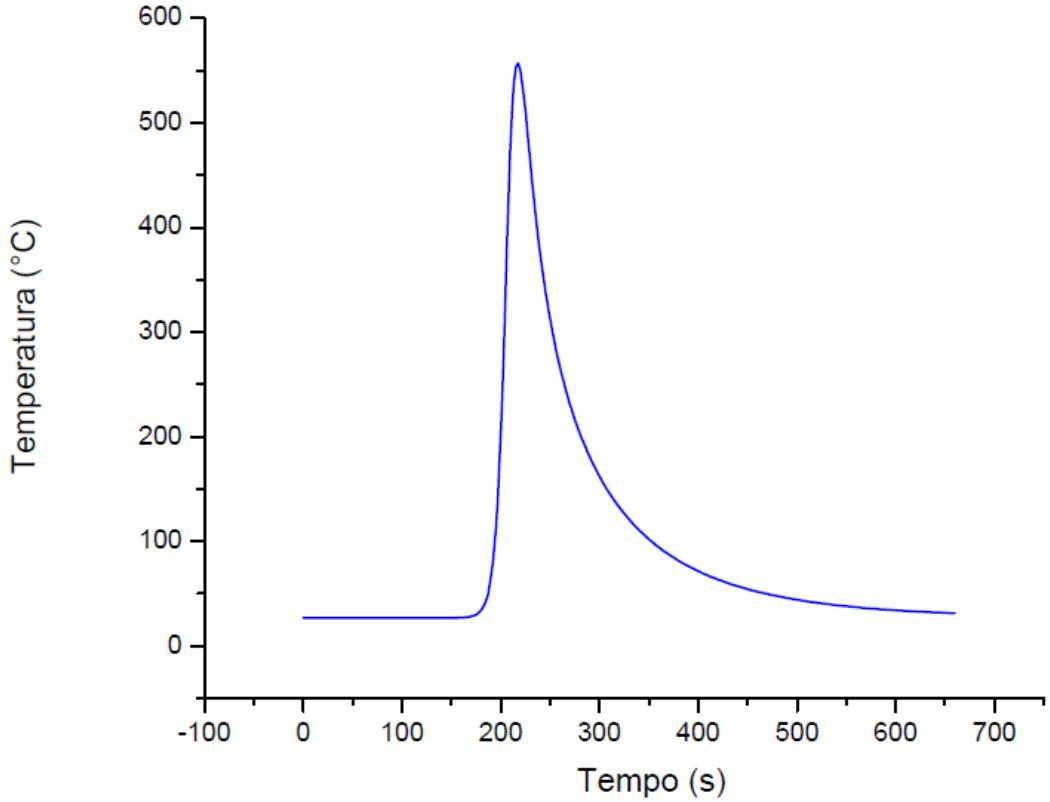
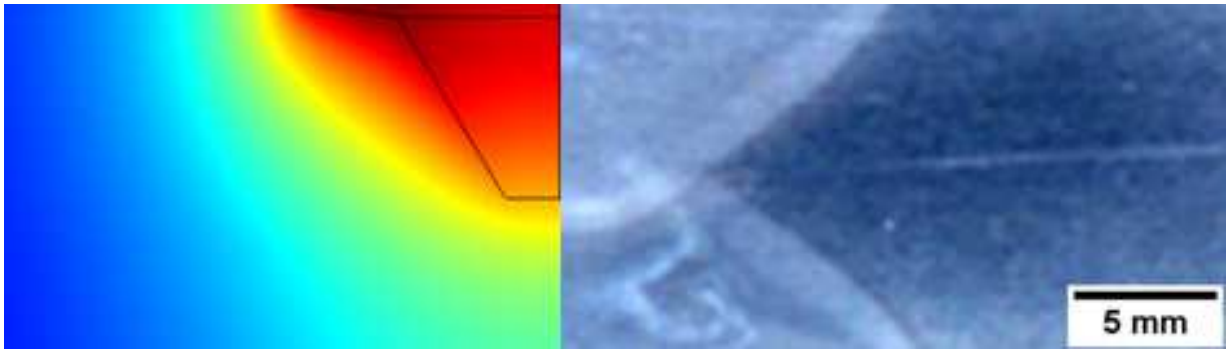


Figura 39: Comparação da Macrografia com a Distribuição de Temperaturas Simuladas na Junta



5. CONCLUSÃO

O estudo dos ciclos térmicos no processo FSW tem sua devida importância e o aprofundamento com o uso de modelos computacionais se mostra valioso. Alguns dados experimentais de entrada podem ser obtidos durante a realização da própria soldagem nos casos específicos em que os equipamentos possuem capacidade de registrar os dados, como foi o caso do equipamento usado para a soldagem do X80 no presente trabalho. Os dados mais difíceis de obter no caso do modelo apresentado foram as tensões escoamento ao cisalhamento para uma faixa de temperaturas, que não estão disponíveis na literatura para uma ampla gama de materiais, desse modo os ensaios de torção a quente ou ensaios de tração para diferentes temperaturas devem ter sido previamente realizados nos materiais que se deseja soldar para que a aplicação do modelo térmico pesudo-mecânico seja possível de ser aplicado.

O modelo térmico é o passo inicial para a realização de um modelo acoplado que trata simultaneamente as deformações e o aquecimento, possibilitando uma abordagem computacional mais confiável e completa do processo FSW.

De posse das informações que expostas nessa monografia, pode se dizer que um primeiro passo para um futuro estudo mais aprofundado foi dado com sucesso e que o modelo apresenta um horizonte que pode ser expandido se uma investigação mais detalhada for realizada, desse modo, as informações poderão apresentar detalhes ainda mais completos e fidedignos entre a abordagem experimental e computacional.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para futuros projetos que envolvam a modelagem computacional de juntas soldadas para o Aço API 5L X80, se recomenda como complemento a realização dos seguintes estudos:

- Estudo comparativo da história térmica obtida com o modelo para diferentes regiões da junta soldada com as microestruturas desenvolvidas após a soldagem.

- Aquisição de dados experimentais a partir de ensaios de torção para uma maior faixa de temperaturas, possibilitando aumento da confiabilidade das informações obtidas com o modelo térmico.

- Aprimoramento do modelo térmico a partir do acoplamento do mesmo a um modelo que considere as deformações, possibilitando a elaboração de um modelo termo-mecânico multi-físico mais completo, que traga informações mais completas sobre os fenômenos ocorridos durante a soldagem no processo FSW.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, B. A. et al. Estudo das tensões residuais de juntas soldadas de aço API 5L X80. **Soldagem e Inspecao**, v. 18, n. 3, p. 217–226, 2013.

AYDIN, H.; NELSON, T. W. Microstructure and mechanical properties of hard zone in friction stir welded X80 pipeline steel relative to different heat input. **Materials Science and Engineering A**, v. 586, p. 313–322, 2013.

CHEN, C. M.; KOVACEVIC, R. Finite element modeling of friction stir welding - Thermal and thermomechanical analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 13, p. 1319–1326, 2003.

COOPER, R. E. Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares. p. 130, 2004.

ESAB. Metalurgia da soldagem. **Esab**, v. 47, n. 2, p. 94, 2004.

FRATINI, L.; BUFFA, G. CDRX modelling in friction stir welding of aluminium alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 10, p. 1188–1194, 2005.

HERMENEGILDO, T. F. Soldagem por atrito com pino não consumível do aço de alta resistência ISO 3183 X80M. p. 183, 2012.

HWANG, Y.-M. et al. Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 7-8, p. 778–787, 2008.

JUNIOR, J.; ROCHA, D.; BRANDI, S. Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. **SciELO Brasil**, v. 18, p. 176–195, 2013.

KHENNANE, A. **Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus**. [s.l: s.n.].

LÚCIA, V.; BRITO, O. DE; NUNES, A. Evolução dos aços para tubos api utilizados no transporte de óleo e gás. p. 45801–45813, [s.d.].

MARTINS, F. H.; MACHADO, M. L. P. Study of the thermomechanical behavior of API 5L X80 steel micro-alloyed with Nb-Ti through hot torsion tests. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 68, n. 2, p. 195–200, jun. 2015.

MATERIALS, T. ASM - Welding brazing and soldering. **Engineering**, v. 6, p. 2873, 1993.

MAXMILIAN, M. **Estudo do efeito do pré-aquecimento na soldagem do aço API5L-X65 sobre a dureza e energia de impacto na junta soldada**. [s.l.] Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2013.

METALS HANDBOOK. **ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys**. [s.l: s.n.].

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. Friction Stir Welding and Processing. p. 368, 2007.

ROCHA, D. B. Estudo Da Soldabilidade Do Tubo Api 5L X80 Utilizando Os Processos De Soldagem : Mag Com Transferência Controlada E Eletrodo Tubular Estudo Da Soldabilidade Do Tubo Api 5L X80 Utilizando Os Processos De Soldagem : Mag Com Transferência. p. 218, 2010.

ROSADO, D. B.; WAELE, W. DE; VANDERSCHUEREN, D. Latest developments in mechanical properties and metallurgycal of high strenght line pipes. **Sustainable Construction and Design**, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2013.

SANTOS, T. F. A; IDAGAWA, H. S.; RAMIREZ, A J. Thermal history in UNS S32205 duplex stainless steel friction stir welds. **Science and Technology of Welding & Joining**, v. 19, n. 2, p. 150–156, 2013.

SCHMIDT, H. B.; HATTEL, J. H. Thermal modelling of friction stir welding. **Scripta Materialia**, v. 58, n. 5, p. 332–337, 2008.

TAISS. O de Aços de Elevado Valor Agregado, Tendências Tecnológicas e a Estratégia da Usiminas no Atendimento às Demandas. 2007.

WANG, L. W. et al. In situ corrosion characterization of simulated weld heat affected zone on api x80 pipeline steel. **Corrosion Science**, v. 85, p. 401–410, 2014.

YAN, C.; LIU, C.; YAN, B. 3D modeling of the hydrogen distribution in X80 pipeline steel welded joints. **Computational Materials Science**, v. 83, p. 158–163, 2014.