

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO ENTRE DUTOS E  
FLANGES API DE AÇO ASTM A36

por

Luis Fernando Kanan

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO ENTRE DUTOS E  
FLANGES API DE AÇO ASTM A36

por

Luis Fernando Kanan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Tiago Becker

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Rafael Antonio C. Laranja

Porto Alegre, 17 de julho de 2014

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais por me proporcionarem tudo que precisei para me formar neste curso. Apoio é algo que nunca faltou e não tenho palavras para descrever o quanto isto foi importante pra mim. Agradeço a minha irmã por me dar a tranquilidade e a certeza de que sempre posso contar com ela. Agradeço a minha namorada por me motivar e me inspirar a ser uma pessoa melhor, por sempre se dispor a me ajudar, mesmo quando não preciso. Agradeço a meus amigos pelo companheirismo. Agradeço a minha família por terem me ensinado tanto.

Agradeço a meus colegas da TAP M&E e às pessoas da HZG (Alemanha) pelo desenvolvimento profissional que me proporcionaram. Agradeço ao grupo LAMEF por me ajudar em todas as etapas deste trabalho e pelas experiências que tive enquanto bolsista. Agradeço ao professor Mazzaferro pelo comprometimento na orientação deste trabalho.

KANAN, L. F. **Simulação Numérica de Processo de Solda por Fricção entre Dutos e Flanges API de Aço ASTM A36**. 2014. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## RESUMO

Este trabalho é sobre a modelagem numérica de um processo de solda por fricção entre dutos e flanges de aço ASTM A36 e a comparação de resultados numéricos e experimentais de temperatura. Para o modelo, foi utilizada uma análise termo-mecânica bidimensional com elementos axissimétricos que consideram deformações por torção, o que permitiu aplicar tensão cisalhante e utiliza-la diretamente na geração de calor. O fluxo de calor na interface de contato foi definido utilizando a lei de Coulomb limitada pela tensão cisalhante de escoamento do material variável pela temperatura. Um procedimento de refazer a malha periodicamente foi utilizado para comportar as grandes deformações envolvidas no processo. Três corpos de prova foram gerados experimentalmente no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF) com diferentes parâmetros de soldagem e suas aquisições de temperatura, obtidas em quatro pontos por amostra, foram comparadas aos dados obtidos com as rotinas de pós-processamento das simulações. O modelo proposto se mostrou capaz de simular os três casos estudados e gerar as curvas de temperatura, que apresentaram diferenças máximas entre 250°C e 100°C quando comparados valores de temperatura máxima numérico e experimental.

**PALAVRAS-CHAVE:** solda, fricção, elementos finitos

KANAN, L. F. **Numerical Simulation of Friction Welding Process of ASTM A36 Steel Pipe and API Flange**. 2014. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## ABSTRACT

A numerical model was developed to simulate a friction welding process of ASTM A36 steel pipe and API flange for comparison of simulated results and experimental data. The thermal-mechanical bi-dimensional analysis, using axisymmetric elements accounting for twist, allowed the usage of shear stress and its use on the heat flux equations. The heat flux was defined using the Coulomb law limited by the temperature dependent shear yield strength. Due to the severe strains involved in the process, a periodical remesh procedure was used. Three specimens were welded at the Physical Metallurgy Laboratory of UFRGS (LAMEF) with different weld parameters. The temperature data obtained in four points per sample was compared to the data acquired with the post-processing routines simulated results. The model was able to simulate the process and generate temperature data, which differed from the experimental results by values between 250°C and 100°C when maximum temperature was compared.

**KEYWORDS:** friction, welding, finite elements.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.1. Soldagem por Fricção Contínua .....	1
3.2. Parâmetros Gerais .....	2
3.3. Simulação.....	3
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	3
4.1. Equipamento .....	4
4.2. Procedimento .....	5
5. MODELO NUMÉRICO .....	6
5.1. Condições de Contorno .....	7
5.2. Superfície de fricção .....	7
5.3. Propriedades do material.....	8
5.4. Parâmetros de entrada .....	10
5.5. Procedimento de refazer a malha.....	10
5.6. Pós-processamento.....	11
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	11
6.1. Força, deslocamento e rotação .....	11
6.2. Temperatura.....	13
7. CONCLUSÕES .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
APÊNDICE I.....	16

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos de união de metais, a soldagem por fricção apresenta a peculiaridade de ser um processo em estado sólido, não submetendo os materiais a temperaturas de fusão para realizar a união. Tal característica é de interesse quando se fala em uniões de materiais dissimilares que, por apresentarem diferentes temperaturas de fusão, podem dificultar ou impedir a união com outros processos. A mistura do material em estado sólido geralmente produz soldas com propriedades mecânicas próximas ou superiores às do material base e apresenta menos distorção na união que processos de soldagem por fusão [Stotler, 2012].

Devido às propriedades mecânicas serem diretamente relacionadas ao histórico térmico e mecânico da peça, modelos numéricos de processos de solda por fricção tem se desenvolvido para estudar a influência dos parâmetros de soldagem. Processos de solda como Friction Stir Welding (FSW) possuem diversos modelos propostos na literatura, desde modelos puramente térmicos ou pseudo-termomecânicos [Schmidt e Hattel, 2008], onde o fluxo de calor é estimado em função de propriedade mecânica do material, a modelos termo-mecânicos completos [Nandan *et al.*, 2006], onde o fluxo de material é calculado junto com o de calor.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é criar um modelo numérico capaz de simular o processo de solda por fricção entre dois corpos cilíndricos e obter histórico térmico em pontos estratégicos para compará-lo com resultados experimentais.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Soldagem por fricção é um processo em estado sólido que produz a solda quando duas ou mais peças, por rotação ou com movimento relativo entre elas, são postas em contato sob pressão para produzir calor e deslocar plasticamente o material da interface de solda. É um processo amplamente utilizado na indústria e pode ser aplicado para soldar quase todas as combinações de metais e suas ligas, incluindo materiais dissimilares [American Welding Society, 2007].

### 3.1. Soldagem por Fricção Contínua

De acordo com a American Welding Society, 2007, a soldagem por fricção contínua consiste em acelerar uma peça movida por um motor até atingir velocidade de fricção constante (rotação), enquanto se mantém a outra peça com sua rotação restringida (Figura 3.1 e Figura 3.2 A). Em seguida, as peças entram em contato, sendo pressionadas até que o valor de força de fricção seja atingido (Figura 3.1 e Figura 3.2 B). Devido à deformação plástica que ocorre com a fricção, calor é gerado e mantido por tempo pré-determinado ou até que o deslocamento de fricção seja atingido (Figura 3.1 e Figura 3.2 C). A rotação do motor é então interrompida, dando início ao período de forjamento (Figura 3.1 e Figura 3.2 D). A força de forjamento pode se manter igual à de fricção ou aumentada, e aplicada por tempo pré-estabelecido ou até que o deslocamento final seja atingido.

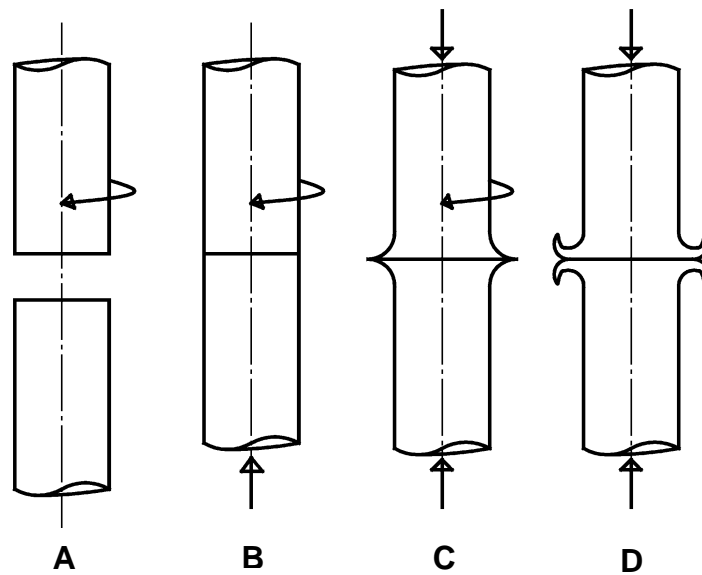


Figura 3.1 – Etapas do processo de soldagem por fricção contínua.

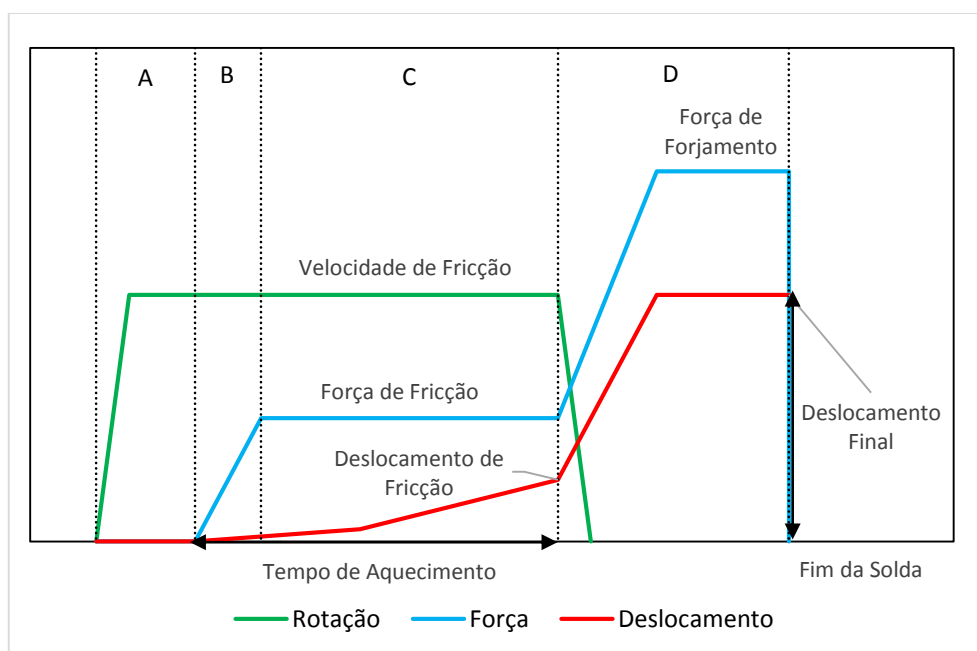


Figura 3.2 –Características gerais da soldagem por fricção contínua.

### 3.2. Parâmetros Gerais

A American Welding Society, 2007, apresenta como parâmetros mais significativos para a soldagem por fricção contínua a velocidade tangencial (ou de rotação), a pressão na interface de solda e o tempo de aquecimento.

A velocidade tangencial para aços deve estar perto de 1,3 m/s, pois velocidades abaixo deste valor produzem alto torque, podendo ocasionar problemas com a fixação da peça,

deslocamento descontrolado e arrancamento de metal. Para uma dada pressão, rotações mais baixas ocasionam maior deslocamento axial que rotações elevadas [American Welding Society, 2007].

A pressão determina a taxa de deslocamento e conseqüentemente o gradiente de temperatura na zona de solda, a potência necessária para mover o eixo e o deslocamento axial durante o estágio de forjamento. Baixas pressões durante o estágio de fricção limitam a temperatura mínima que o material precisa atingir para permitir deslocamento axial. Altas pressões de forjamento, aplicadas no fim do período de aquecimento, melhoram a qualidade da união de muitos metais [American Welding Society, 2007].

Um tempo de aquecimento excessivo limita a produção, desperdiça material e pode ter efeito negativo nas propriedades da união, enquanto que um tempo de aquecimento insuficiente pode resultar em aquecimento desigual, aprisionamento de óxidos e união irregular na interface de solda. Além disso, um tempo pré-determinado, um limite de deslocamento ou uma taxa de deslocamento podem ser utilizados como controle do tempo de aquecimento. Em adição, o tempo de aquecimento é reduzido quando há aumento da pressão de fricção, para um mesmo valor de deslocamento axial, ou redução da velocidade de rotação, para uma dada pressão [American Welding Society, 2007].

### 3.3. Simulação

A simulação de um processo de soldagem por fricção por inércia de dutos feitos de Astroloy é apresentada na documentação do software de elementos finitos ABAQUS [ABAQUS, 2012]. Um modelo termomecânico com elementos axissimétricos que permitem torção e um procedimento semi-automático de refazer a malha através de script Python (linguagem de programação) é demonstrado. A interface de solda é desenvolvida como uma propriedade de contato tangencial e definida como tendo um coeficiente de fricção variável com a rotação. A perda de inércia do volante (armazenador de energia cinética) foi considerada com auxílio de subrotina. Neste modelo são consideradas a geração de calor por fricção na interface de solda e por deformação plástica do material.

Um modelo proposto por Li e Wang, 2011, desenvolvido no mesmo software, mas para solda por fricção contínua de cilindro maciço de aço carbono, descreve o fluxo de calor de maneira independente à propriedades de contato. Os autores desenvolveram script Python para determinar a superfície de contato e nela aplicar fluxo de calor prescrito através de subrotina DFLUX [ABAQUS, 2012], além de considerar geração de calor por deformação plástica como propriedade do material. Os autores estudaram as influências da pressão axial e da velocidade de rotação na temperatura de interface e no deslocamento axial.

## 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Três corpos de prova foram soldados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, utilizando equipamento desenvolvido no próprio laboratório. A geometria dos corpos de prova utilizados é como apresentado na Figura 4.1. O tubo e a seção reta do flange apresentam uma espessura de 7,25 mm e uma leve curvatura côncava no duto e convexa no flange foi usinada nas superfícies de contato (detalhes C e D na Figura 4.1), visando diminuir a excentricidade do eixo durante o processo. Esta curvatura pode ser definida como um arco de 6mm de raio e 75° de angulação.



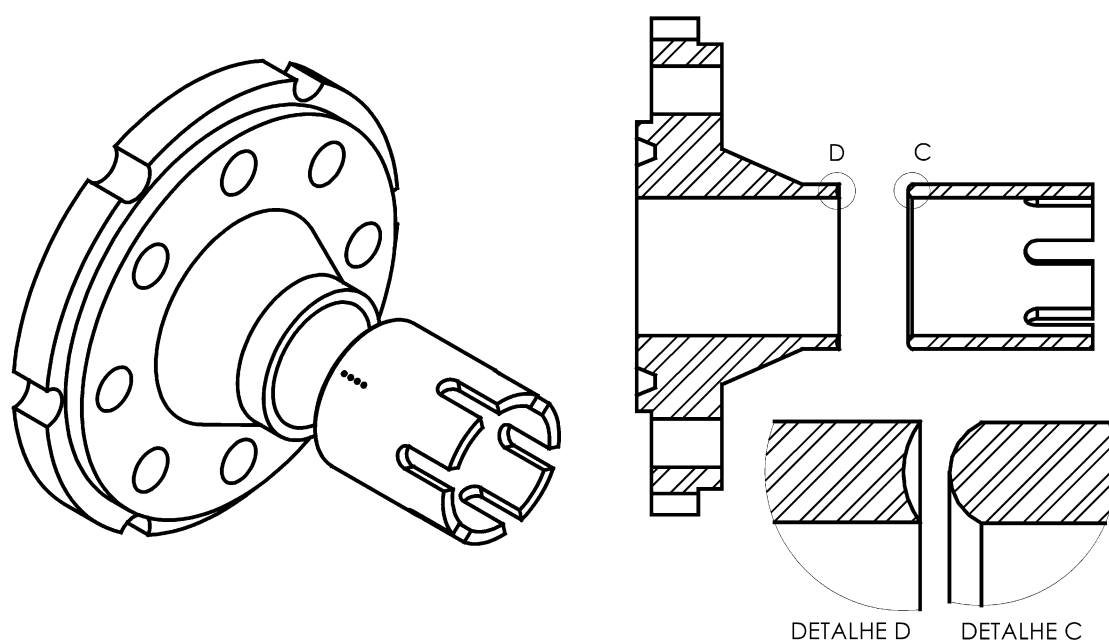


Figura 4.1 - Geometria geral dos corpos de prova.

#### 4.1. Equipamento

Durante o procedimento, foi feita a aquisição de dados de temperatura em quatro pontos do duto (Figura 4.2), distanciados a 10, 15, 20 e 25 mm da interface de solda. Para isso foram utilizados termopares flexíveis de junta aterrada tipo K, com diâmetro de 1,5 mm (fabricante Thermomax), posicionados em quatro furos de 1,6 mm de diâmetro preenchidos por nitrato de prata, material utilizado para melhorar a condutividade térmica. Depois de posicionados, uma abraçadeira foi utilizada para mantê-los fixos, como mostrado na Figura 4.2. O tempo de resposta dos termopares tipo K de diâmetro e tipo de junta mencionado é tipicamente de 0,2 s (valor consultado com fabricante).

O equipamento Lynx ADS 2000 foi utilizado para a aquisição dos valores de temperatura, sendo o mesmo aterrado e aplicando um filtro passa baixa de 20Hz durante os ensaios para diminuir o ruído. O equipamento utilizou uma junta fria para determinar a temperatura ambiente e calibrar os termopares. As incertezas provenientes do equipamento foram de 2,2°C ou 0,25% do valor da temperatura (o que for maior), com resolução de 0,0001°C.

Para o monitoramento e controle de deslocamento e força foram utilizados o transdutor de deslocamento modelo WA 300 e a célula de carga modelo U10M / 500kN da HBM. As resoluções, sensibilidades e valores de forças e deslocamentos nominais são apresentadas na Tabela 4.1. Não foi feita filtragem durante a aquisição de dados de força e deslocamento.

Valores de força perto de 10 kN são apresentados no início do processo, possivelmente causado pelo atrito do próprio equipamento unido ao erro em zero da célula de carga (apresentado na Tabela 4.1). Posteriormente foram atingidos valores de força de 45, 60 ou 75 kN próximo ao período de desaceleração, como parâmetro de controle variável entre amostras, não chegando nem à 20% do valor nominal da célula de carga. Devido ao elevado nível de ruído na aquisição de dados de força, optou-se por não utilizar esses dados como parâmetro de entrada no modelo numérico.

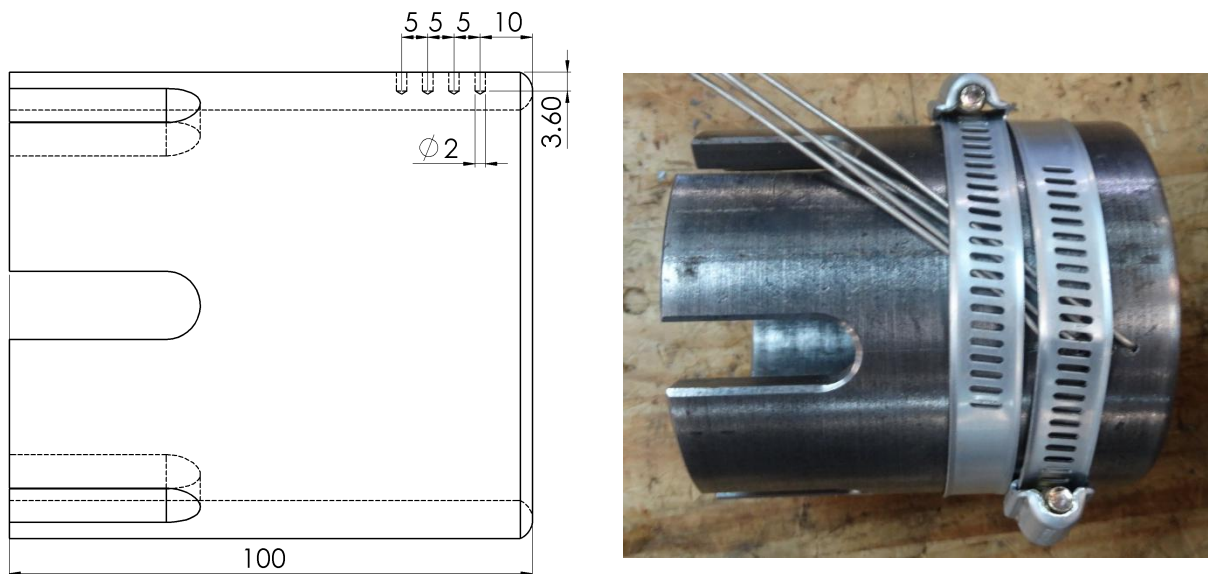


Figura 4.2 - Posição dos termopares e fixação da abraçadeira.

Tabela 4.1 – Especificações do transdutor de deslocamento e célula de carga utilizados.

	Deslocamento	Força
Nominal	0...300 mm	500 kN
Sensibilidade	80 mV/V	0,143 kN
Exatidão	±1 %	0,06
Erro em zero	±8 mV/V	1%
Erro linear	±0,2 % a ±0,1 %	±0,06 %
Resolução	1e-6 mm	1e-6 kN

#### 4.2. Procedimento

A solda é realizada pressionando o tubo contra o flange, o último girando a uma velocidade constante até o término da solda. O calor gerado devido à fricção diminui a resistência mecânica dos corpos, permitindo grandes deformações plásticas perto da superfície de contato. Como consequência do movimento, há mistura dos materiais, formando uma união soldada.

O procedimento inicia após fixados flange e duto no equipamento e configuradas posição inicial e parâmetros de solda (Figura 4.3 e Tabela 4.2). Uma rampa de aceleração é aplicada para atingir a velocidade de rotação do flange de 500 RPM em 't0', sem deslocamento axial. Um controle de deslocamento passa a ser utilizado até atingir valor pré-determinado 'd1' em 't1'. Após atingido deslocamento inicial ('d1'), uma taxa de carregamento ('dF1') é aplicada, até que força máxima 'F1' seja atingida. A rotação é interrompida quando atingido deslocamento determinado 'd2', dando início a etapa de recalque, controlada por taxa de carregamento 'dF2' e tempo de recalque 'tr'. Uma rampa de força é aplicada, reduzindo a carga aplicada de 'F1' a 'F2' em 10s e mantendo a carga por mais 5s, procedendo com o término da solda e recuo do equipamento para remoção do corpo de prova.

A desaceleração rotacional não pôde ser monitorada pelo equipamento, dado que o sistema responsável pela rotação desligava quando atingido deslocamento 'd2'. Portanto foi

considerado um tempo de desaceleração de 5s, valor estipulado por observação durante o experimento. Os valores de força antes de 't1' foram omitidos devido a imprecisão dos dados, como mencionado no subcapítulo anterior.

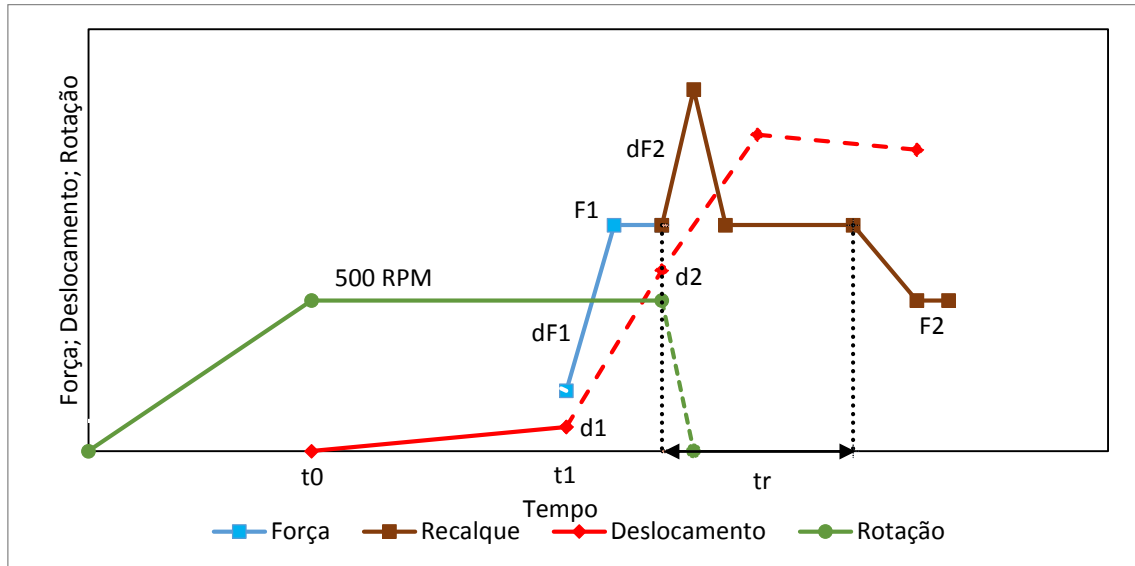


Figura 4.3 - Variação de força, deslocamento e rotação durante o processo. Linhas contínuas como parâmetros de controle e linhas pontilhadas como resultantes do processo.

Tabela 4.2 – Parâmetros das amostras.

Amostra	t0 [s]	t1 [s]	d1 [mm]	d2 [mm]	dF1 [kN/s]	F1 [kN]	dF2 [kN/s]	tr [s]	F2 [kN]
H03	35	55	1	10	4.5	75	100	30	45
H04	35	55	1	10	4.5	60	100	30	45
H05	35	55	1	10	4.5	45	100	30	30

## 5. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o software de elementos finitos ABAQUS com auxílio de seu ambiente de desenvolvimento de programação em Python (Abaqus PDE). Para utilizar a variação da superfície de contato levando em consideração as grandes deformações envolvidas, a análise do processo de soldagem se deu considerando acoplamento entre temperatura e deslocamento (termomecânica). A abordagem em duas dimensões, para redução de custo computacional, foi possível pela utilização de elementos axissimétricos que permitem deformações angulares (consideram torção em torno do eixo de simetria). Esta abordagem também permite o emprego tanto das propriedades do material quanto das resultantes das cargas mecânicas para determinar o fluxo de calor na interface de solda.

O problema é definido como não linear devido ao acoplamento entre temperatura e deslocamento, à plasticidade do material e à utilização de fricção na formulação do contato. As condições de contorno, propriedades do material, considerações e procedimentos aplicados são descritos a seguir.

### 5.1. Condições de Contorno

O modelo foi descrito em coordenadas cilíndricas e, para redução de custo computacional, representou uma seção do tubo na parte inferior e uma seção do flange na parte superior de dimensões iguais, comprimento de 30,0 mm e espessura de 7,25 mm, com faces retas (Figura 5.1). Pontos de referência no eixo de simetria (1a e 1b) foram acoplados às superfícies mais afastadas da área de contato (2a e 2b), representando a continuidade da peça. No ponto 1a, um deslocamento na direção axial (sentido negativo) e uma rotação em torno do eixo z foram aplicadas como funções de tempo, tornando este um problema de deslocamento prescrito. No ponto 1b a condição de engaste (todo movimento restringido) foi aplicada. Para a condição de contato mecânico normal e tangencial (3s) foi necessário levar em consideração as elevadas deformações do material. Por ser difícil prever e descrever a superfície de contato foi atribuído a toda superfície externa dos corpos a propriedade de contato, sendo que há iteração de contato apenas se a distância entre as superfícies for menor ou igual à zero (distância negativa acarreta sobre-fechamento).

Em todos os casos o mesmo coeficiente de transferência de calor 'h' de 0,0005 [W/(mm<sup>2</sup>\*°C)] foi aplicado às superfícies '2a' e '2b'. Este valor foi determinado partindo da condição de condução de calor por uma seção do tubo de 100mm, considerando superfície final a temperatura ambiente. Deve-se levar em consideração que não foram aplicadas condições de convecção nem de radiação neste modelo, devido à dificuldade envolvida de sua aplicação nas condições de contorno.

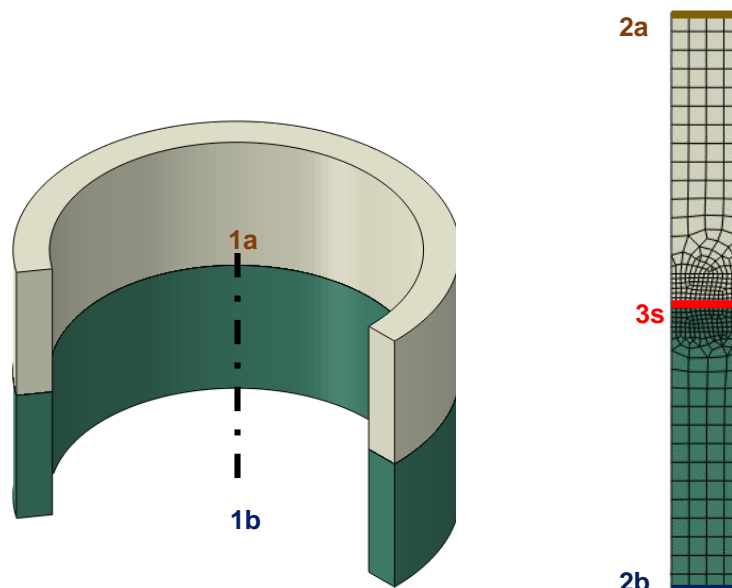


Figura 5.1 - Condições de contorno aplicadas. Acoplamento entre ponto 1 e superfície 2 para aplicação de engaste (1b), rotação (1a) e deslocamento axial (1a). Condução de calor (2a e 2b) e superfície de contato mecânico e fricção (3s).

### 5.2. Superfície de fricção

Para definir o comportamento da superfície de contato de fricção, a sub-rotina FRIC [ABAQUS, 2012] foi utilizada. A tensão cisalhante de fricção na direção normal ao plano 2D foi definida com base na lei de Coulomb (5.1), considerando que nunca ultrapasse a tensão cisalhante de escoamento do material em função da temperatura (5.2).

$$\tau_c = p \cdot \mu \quad (5.1)$$

$$\tau_{esc}(T) = \frac{\sigma_{esc}(T)}{\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

onde  $\tau_c$  é a tensão cisalhante de Coulomb em MPa,  $p$  é a tensão de contato na direção normal à superfície em MPa,  $\mu$  é o coeficiente de fricção adimensional,  $\tau_{esc}$  é a tensão cisalhante de escoamento em MPa e  $\sigma_{esc}$  é a tensão de escoamento em MPa. Esta relação pode ser definida como:

$$\tau_{fric} = \begin{cases} \tau_c, & \tau_c < \tau_{esc} \\ \tau_{esc}, & \tau_c \geq \tau_{esc} \end{cases} \quad (5.3)$$

onde  $\tau_{fric}$  é a tensão cisalhante de fricção em MPa.

O fluxo de calor empregado foi dividido igualmente entre as superfícies de contato e é definido como:

$$q'' = \tau_{fric} \cdot \omega \cdot r \quad (5.4)$$

onde  $q''$  é o fluxo de calor por unidade de área em W/mm<sup>2</sup>,  $\omega$  a rotação angular em rad/s e  $r$  a distância normal ao eixo de rotação em m.

A aplicação destas equações no modelo considerou que a fricção gera cisalhamento apenas na direção de rotação, ou seja, não há cisalhamento no contato na direção radial. Em baixas rotações a transição do cisalhamento foi definida como:

$$\tau_{fric} = \begin{cases} \tau_{fric} \cdot \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_t}, & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_t \\ \tau_{fric}, & \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_t \end{cases} \quad (5.5)$$

onde  $\dot{\gamma}_t$  é a taxa de escorregamento de transição, de valor 0,01 m/s como proposto em ABAQUS, 2012, e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de escorregamento em m/s, definida como:

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot r \quad (5.6)$$

Para auxiliar na estabilidade do modelo, a tensão de cisalhamento no contato é considerada igual a zero no primeiro incremento, definido como 1e-6 s.

### 5.3. Propriedades do material

O calor específico à pressão constante, a condutividade térmica e o módulo de elasticidade do material foram definidos como funções de temperatura e estão apresentados na Figura 5.2. A tensão de escoamento do material foi determinada como função de temperatura e de taxa de deformação, como mostra a Figura 5.3. A literatura consultada para determinar as propriedades do aço ASTM A36 consistiu da ASM, 1993 e da ASME, 2010.

Como proposto por NagarajaRao et al., 1966, as curvas de tensão de escoamento para diferentes taxas de deformação podem ser estimadas aplicando a relação:

$$\sigma_d = \sigma_s + \sigma_s \cdot 0.021 \cdot \dot{\epsilon}^{0.26} \quad (5.7)$$

onde  $\sigma_d$  é a tensão de escoamento dinâmica,  $\sigma_s$  tensão de escoamento estática e  $\dot{\epsilon}$  a taxa de deformação. A equação (5.7) foi aplicada à curva de tensão de escoamento por temperatura sob carregamento estático para obtenção dos valores dinâmicos.

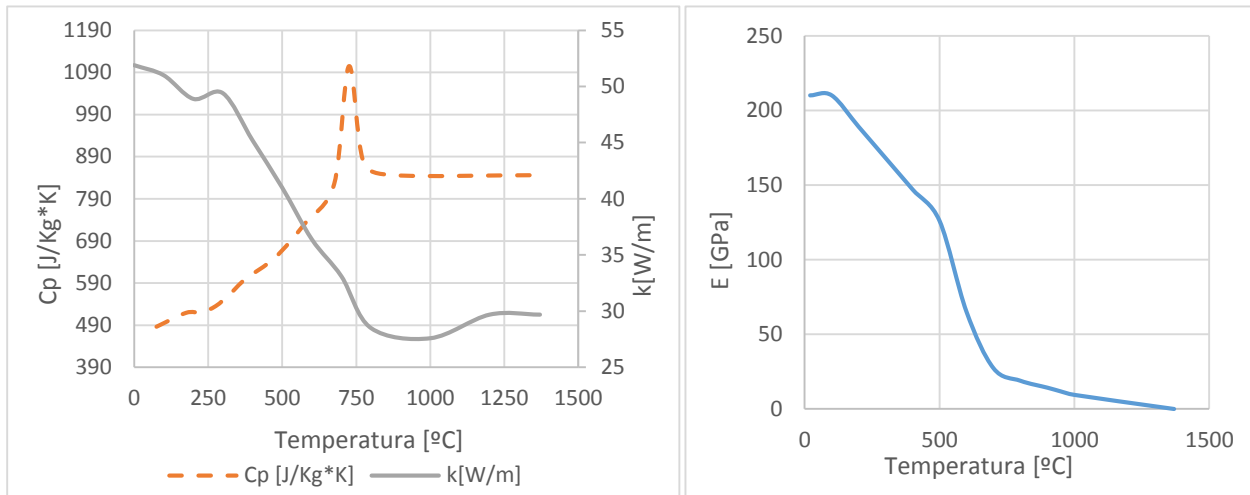


Figura 5.2 - Variação do calor específico à pressão constante,  $C_p$ , coeficiente de condução térmica,  $k$ , e do módulo de elasticidade,  $E$ , em função da temperatura para o aço ASTM A36.

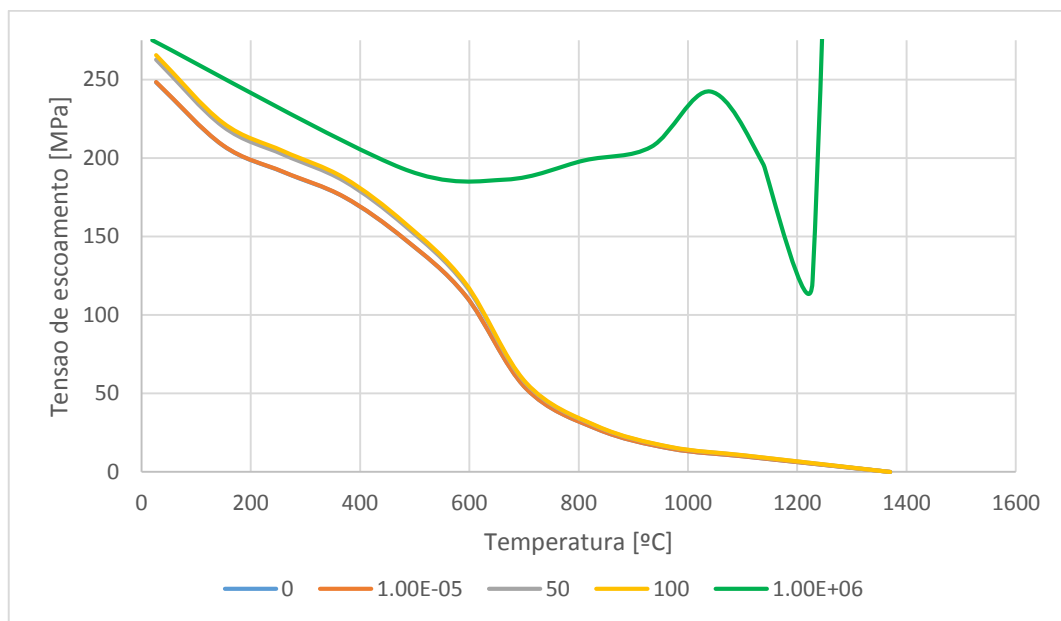


Figura 5.3 – Tensão de escoamento em função da temperatura do aço A36 para diferentes taxas de deformação.

A tensão cisalhante de escoamento em função da temperatura, utilizada como critério de tensão cisalhante máxima de fricção, foi determinada através da equação (5.2). As curvas para as taxas de deformação 0 e  $10^{-5}$  tem valores próximos assim como as curvas para as taxas 50 e 100 também apresentam valores com pouca diferença, enquanto que a curva para taxa de deformação de  $10^6$  foi utilizada para ajudar a estabilizar a solução do problema [ABAQUS, 2012].

#### 5.4. Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada utilizados para simular os três casos estudados foram a rotação, o deslocamento e a temperatura inicial. O gráfico ilustrativo (Figura 5.4) e a Tabela 5.1 apresentam os dados de entrada utilizados para simular os três casos.

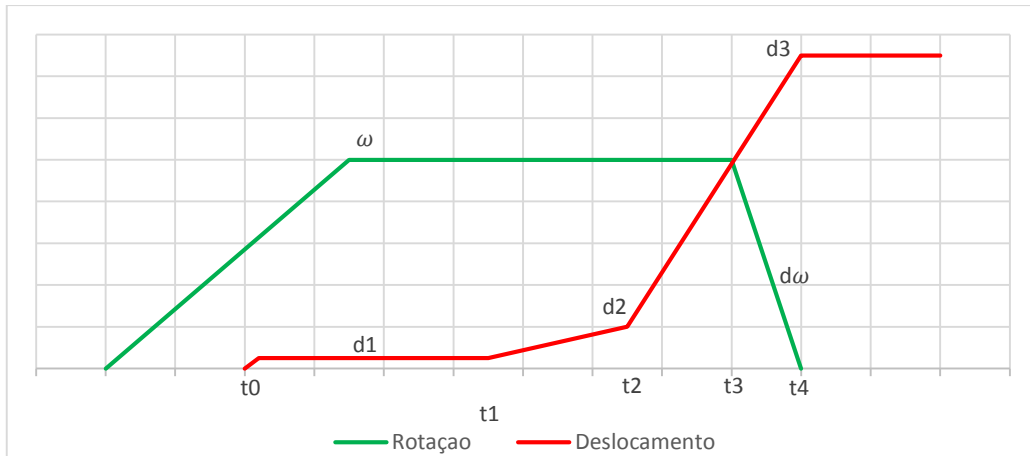


Figura 5.4 - Parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

Tabela 5.1 - Parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

CPD	Ti	d1	d2	d3	$\omega$	t0	t1	t2	t3	t4	d $\omega$
	°C	mm	mm	mm	RPM	s	s	s	s	s	RPM/s
H03	30	0.0015	1.0	16	500	5	55	75	90	95	-100
H04	30	0.006	1.0	15	500	17	55	75*	97.5	102.5	-100
H05	35	0.0015	1.0	14	500	20	55	75	92.2	97.2	-100

Durante a etapa de aceleração rotacional, uma vibração do equipamento unida à proximidade das faces curvas do duto e flange (Figura 4.1) acabou gerando contato indevido, o que acarretou num aquecimento imprevisto em todas as soldas. Este aquecimento imprevisto foi levado em consideração durante as simulações através do deslocamento 'd1', tendo a magnitude determinada por aproximações sucessivas do valor obtido experimentalmente, e o tempo inicial 't0' determinado pela inspeção dos gráficos de temperatura dos experimentos para determinar o início da geração de calor.

As temperaturas iniciais  $T_i$  foram aplicadas de maneira homogênea em todos os nós do modelo. Para aplicar as condições de rotação e deslocamento, foi necessário utilizar subrotina UAMP [ABAQUS, 2012], onde o tempo total de simulação foi fornecido através de script Python no início de cada etapa após refazer a malha.

#### 5.5. Procedimento de refazer a malha

Um procedimento automatizado de refazer a malha, baseado em ABAQUS, 2012 foi empregado na simulação. Consistiu em interromper a simulação quando um deslocamento limite de 0,29 mm fosse atingido ou quando não fosse possível obter convergência no incremento após cinco tentativas (padrão do software para solução de problemas não lineares assimétricos). O valor de 0,29 mm foi determinado por apresentar baixa distorção de malha quando atingido, melhorando a taxa de convergência e diminuindo os erros provenientes desta distorção.

Toda vez que a simulação era interrompida, o modelo base era aberto e, através de comandos em Python e rotinas preestabelecidas do software, a malha deformada do último incremento da última simulação era importada e sua geometria externa convertida em peça. Os pontos e superfícies para condições de contorno eram redefinidos por código. Uma nova malha era gerada e um mapeamento da solução anterior atribuía valores de tensão, deformação plástica, temperatura, etc., dando assim início à novo processo. Devido às dificuldades que empregar a abraçadeira no modelo ocasionariam neste procedimento de refazer a malha, ela foi desconsiderada durante as simulações.

Para diminuir o custo computacional, depois de recriar as peças deformadas, as mesmas eram particionadas a uma distância de 3 mm do contato e refinadas nesta região. A malha inicial do modelo possuía 380 elementos e 439 nós mais elementos e nós criados pelo software para contato. Estes valores poderiam dobrar durante a simulação devido à geração de rebarba, que aumentava a área perto da região de contato.

## 5.6. Pós-processamento

Cada interrupção da simulação gerava um arquivo numerado sequencial com os resultados. Para obter o histórico de força e deslocamento do ponto de aplicação da carga, foi desenvolvido script Python que lia sequencialmente os resultados e agregava os valores a uma nova tabela, convertendo em: tempo total e força ou tempo total e deslocamento acumulado. Procedimento semelhante foi desenvolvido para dados de temperatura, onde um ponto em coordenada inicial ( $z$ ,  $r$ ) era definido e um histórico de temperatura era gerado levando em consideração deslocamentos da malha. Interpolando os deslocamentos e temperaturas dos nós nas proximidades do ponto inicial, um novo ponto deslocado era definido para próximo arquivo.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Força, deslocamento e rotação

Os resultados numéricos e experimentais de força, deslocamento e rotação são apresentados na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3 para as soldas H03, H04 e H05 respectivamente. Os dados de força experimental foram tratados com média móvel, dado que a célula de carga apresentou ruído na aquisição proveniente de oscilações elétricas geradas durante o processo. Como o equipamento responsável pela rotação desligava quando atingia deslocamento limite, o gráfico apresenta uma queda instantânea de rotação, enquanto que na realidade houve uma desaceleração mais gradual, dada como 5s como explicado no capítulo 4.2 e mostrado nas curvas de rotação numérica.

Como a entrada de dados no modelo se baseia na rotação e deslocamento experimentais, é natural que os resultados estejam próximos durante quase todo o processo, enquanto que os resultados de força se distanciaram bastante.



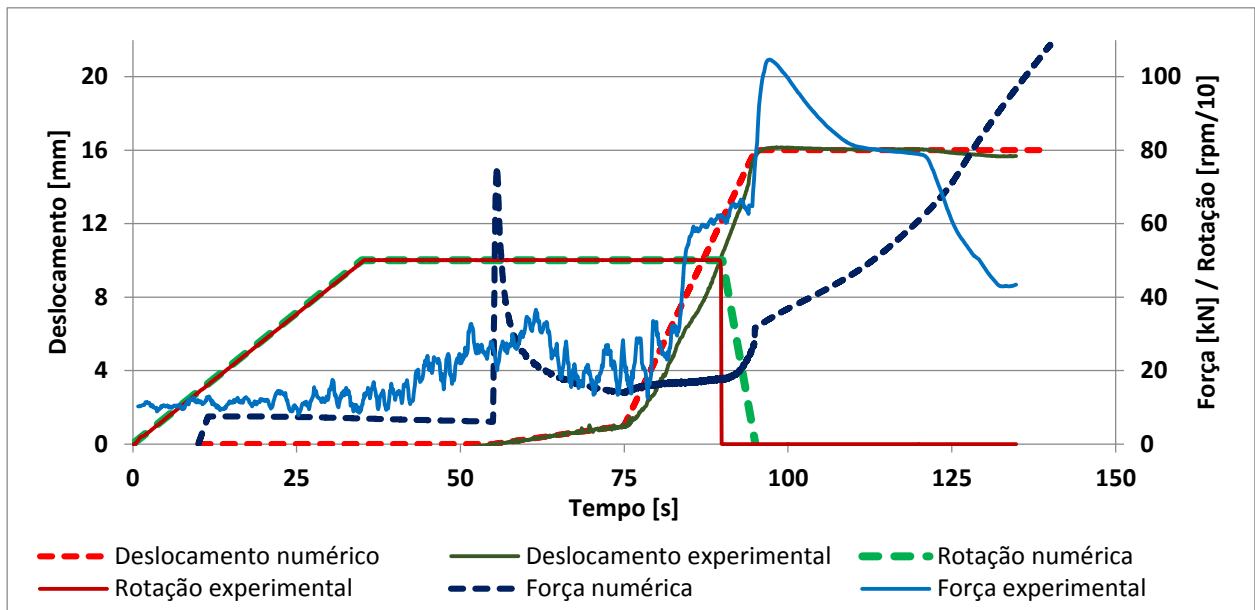


Figura 6.1 – Resultados experimentais da solda H03.

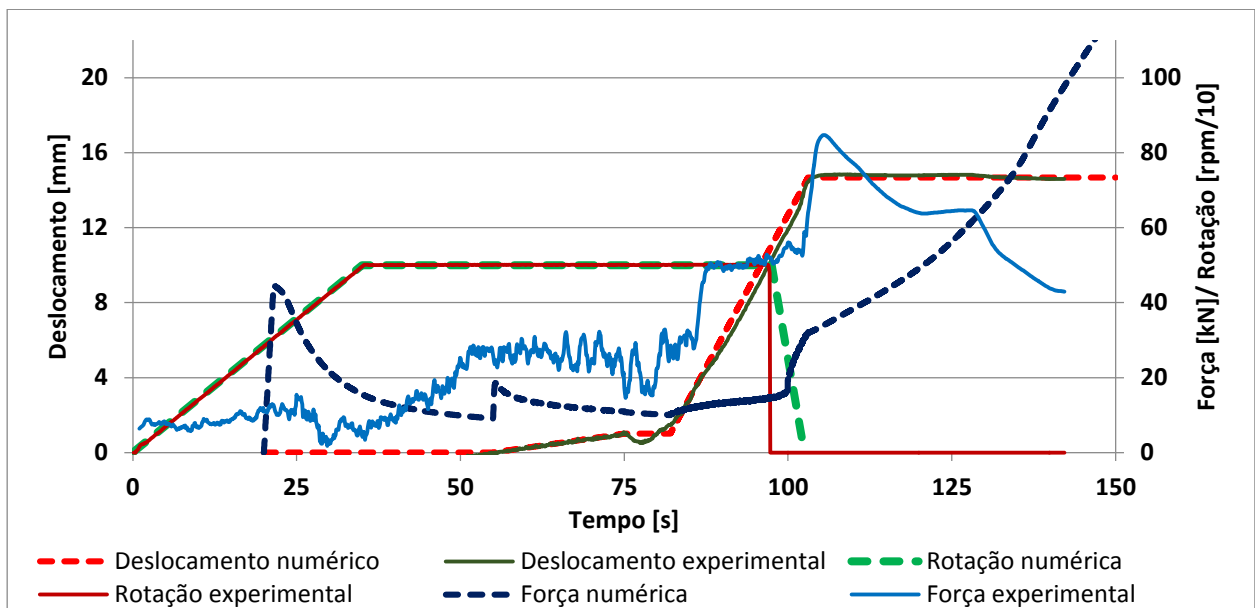


Figura 6.2 – Resultados experimentais da solda H04.

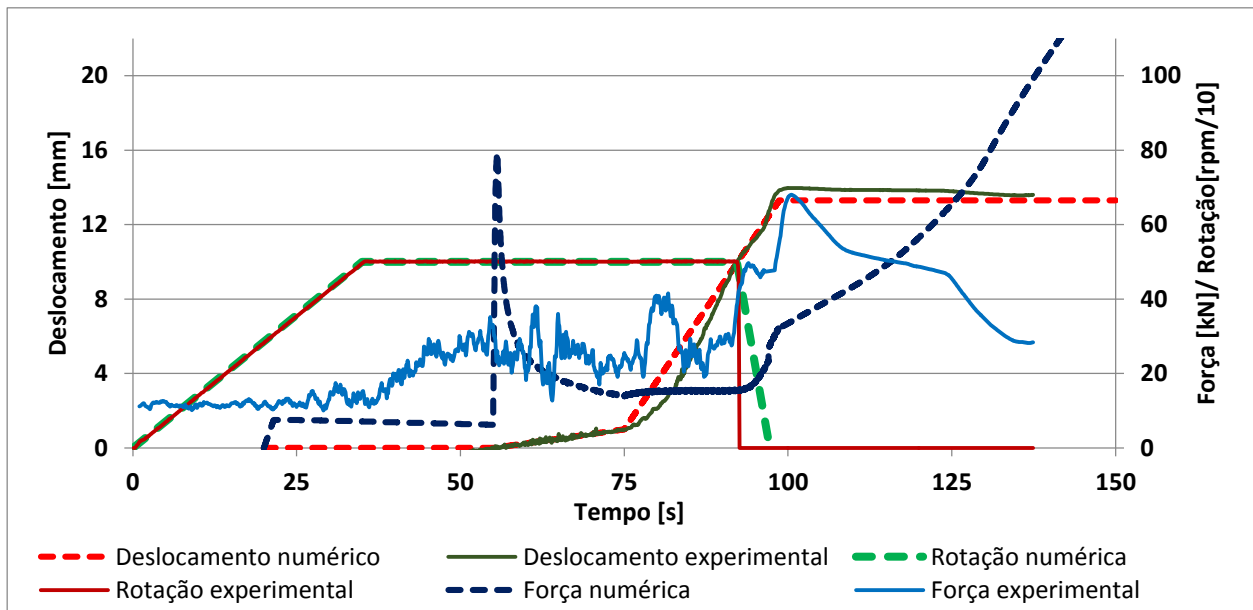


Figura 6.3 – Resultados experimentais da solda H05.

## 6.2. Temperatura

Os resultados experimentais dos 4 termopares, a 10, 15, 20 e 25 mm de distância da interface inicial de solda e seu comparativo com os resultados simulados são apresentados na Figura 6.4, Figura 6.5 e Figura 6.6 para as soldas H03, H04 e H05 respectivamente. Em todos os experimentos, o termopar mais próximo (10 mm) parou de funcionar ao atingir temperatura próxima dos 1300 °C, na solda H03 aos 94s, na solda H04 aos 102s e na solda H05 aos 97s. Esta falha pode ser ocasionada tanto pela deformação do material quanto por estar trabalhando próximo ao fundo de escala.

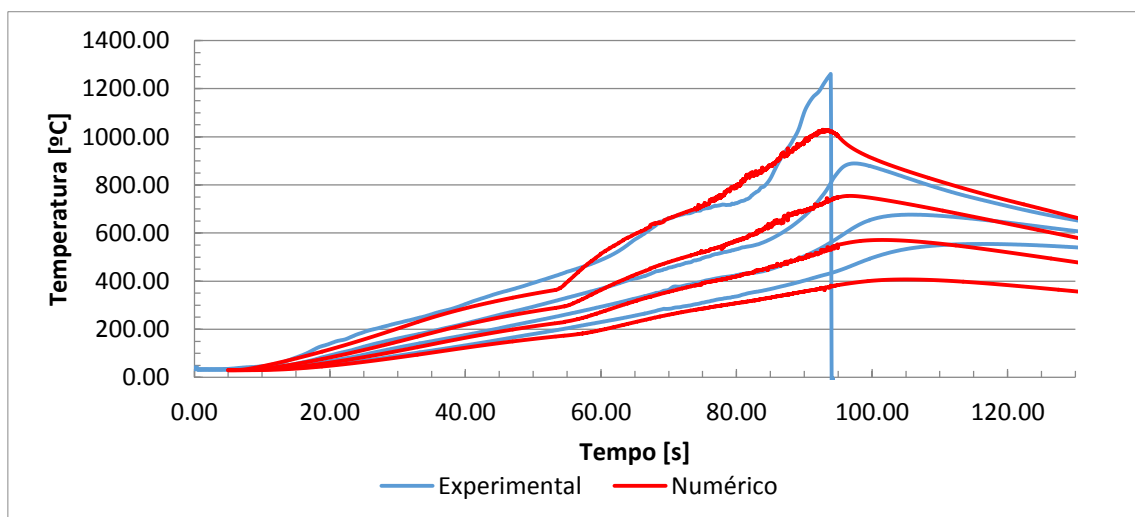


Figura 6.4 - Comparação entre temperatura experimental e numérica da solda H03.

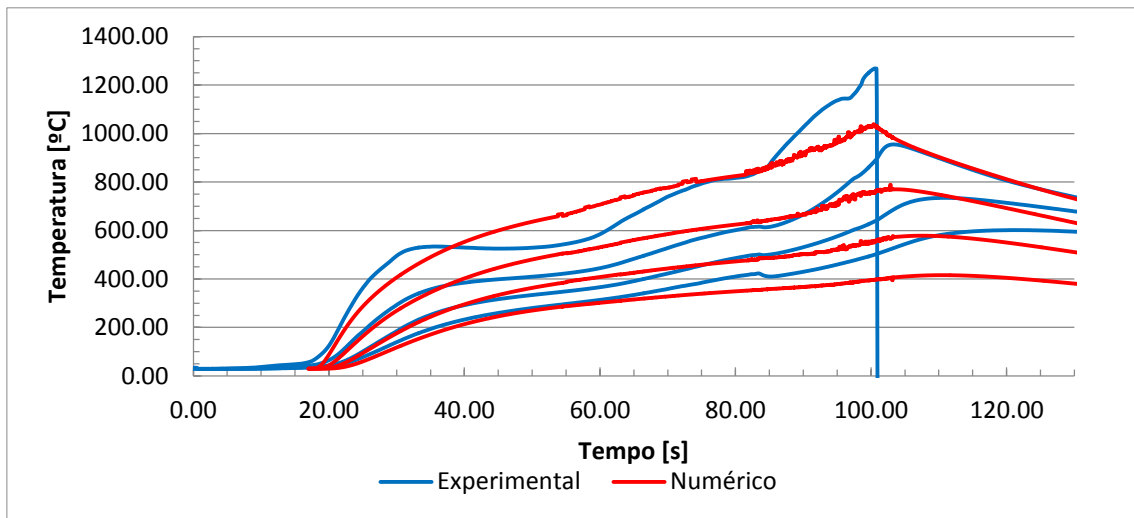


Figura 6.5 – Comparação entre temperatura experimental e numérica da solda H04.

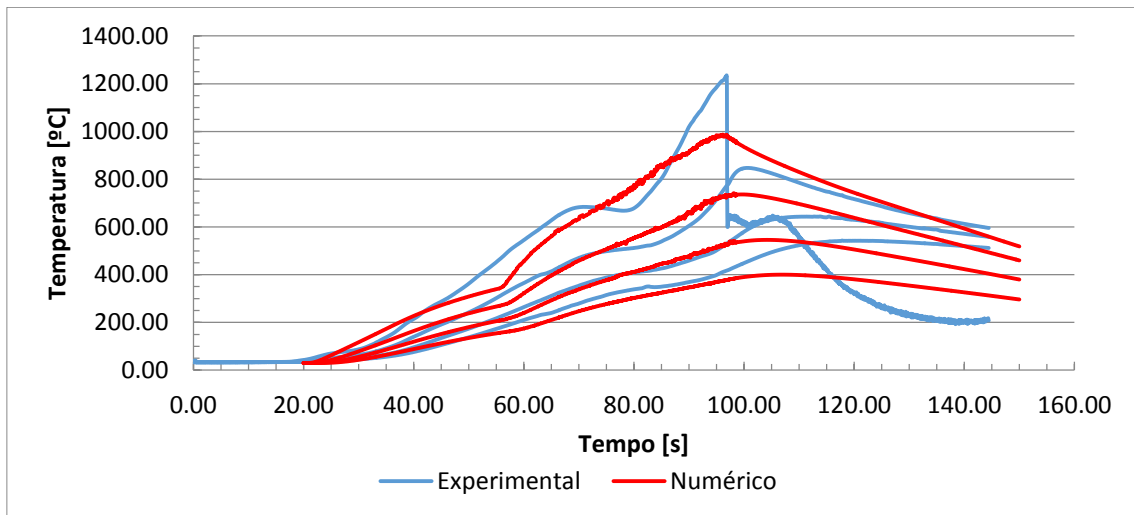


Figura 6.6 - Comparação entre temperatura experimental e numérica da solda H05.

Nesses gráficos de temperatura fica claro o aquecimento antes de iniciar o deslocamento axial (aos 35s), ocasionado pela vibração do equipamento durante procedimento experimental (capítulo 4.2). Todas as curvas obtidas numericamente apresentaram valores de temperatura abaixo dos resultados experimentais durante a etapa anterior ao recalque, sendo essa diferença entre 100 e 200 °C para os termopares distanciados à 15 mm da interface de solda no início do processo. Os termopares distanciados a 10 mm apresentaram uma diferença menor que 250 °C em todos os casos, mas apresentaram falha durante o período de desaceleração. Apesar disso, as inclinações das curvas numéricas durante o resfriamento aparentam estar de acordo com o experimental, apontando que o coeficiente de transferência de calor utilizado é apropriado.

As diferenças encontradas nos resultados de temperatura podem estar associadas a diversos fatores, sendo o mais agravante a diferença entre resultados de força numéricos dos experimentais. Durante o estágio de forjamento, o modelo atribuiu deslocamento zero, enquanto que experimentalmente foi utilizado controle de força. Além disso, o deslocamento utilizado como aproximação do aquecimento imprevisto gerado pela vibração do equipamento pode não refletir a verdadeira condição do experimento naquele estágio.

Analisando os resultados em termos qualitativos, pode-se dizer que os resultados numéricos apresentaram valores de temperatura menores que os experimentais porque a energia utilizada na simulação, proveniente da aplicação de força e velocidade, é menor que a constatada experimentalmente.

## 7. CONCLUSÕES

Em termos qualitativos, o modelo proposto se mostrou capaz de simular os três casos estudados e gerar as curvas de temperatura necessárias para comparar com os resultados experimentais. É mais adequado utilizar força prescrita para simular este tipo de processo, dado que sua influência é direta na geração de calor e, conseqüentemente, na temperatura máxima do processo.

Melhorar o controle e aquisição de dados de força durante o procedimento experimental permitiria utilizar força prescrita além de deslocamento prescrito na simulação, dando maior liberdade ao tornar o modelo independente de resultados experimentais nos dados de entrada e aproximar os resultados do modelo ao experimental. Além disso, pode-se melhorar os resultados realizando testes para determinar com maior exatidão as propriedades do material e coeficientes de transferência de calor para as condições de contorno. Utilizar corpos de prova com faces de contato retas e aumentar a rigidez do eixo do equipamento pode diminuir ou eliminar o aquecimento devido à vibração, tornando o modelo mais fiel ao experimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS; “**ABAQUS Documentation**”, version 6.12, Dassault Systèmes, 2012.

American Welding Society; “**Welding Handbook, Welding Processes, Part 2**”, AWS, 9ª Edição, Volume 3, 2007.

ASM International Handbook Committee; “**ASM Handbook Volume 1 - Properties and Selection Irons Steel and High Performance Alloys**”, ASM International, 10ª Edição, Volume 1, 1993.

ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials; “**ASME Boiler and Pressure Vessel Code II Part D, Properties (metric)**”, The American Society of Mechanical Engineers, Edição de 2010.

Li, W., Wang, F.; “**Modeling of continuous drive friction welding of mild steel**”, Materials Science and Engineering, Vol. 528, No. 5, pp. 5921–5926, 2011.

NagarajaRao, N.; Lohrmann, M.; and Tall, L.; “**Effect of strain rate on the yield stress of structural steel**”, ASTM Journal of Materials, Vol. 1, No. 1, Publication No. 293, 1966.

Nandan, R., Roy, G. G., Lienert, T. J., DebRoy, T.; “**Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel**”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 11, No. 5, pp. 526-537, 2006.

Schmidt, H., Hattel, J.; “**Thermal modelling of friction stir welding**”, Scripta Materialia, Vol. 58, No. 5, pp. 332–337, 2008.

Stotler, T.; “**What you need to know about Friction Welding Processes**”, <http://ewi.org/>. Acessado em 17/07/2014, 2012.

## APÊNDICE I

A Figura 0.1 apresenta foto de seção do corpo de prova H05 soldado. A rebarba externa de todos os corpos de prova foi modificada pela presença de abraçadeira, utilizada na fixação dos termopares.

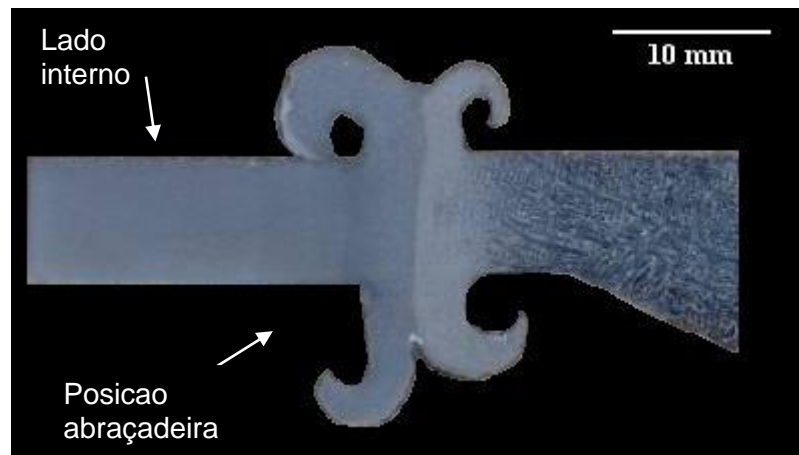


Figura 0.1 – Macrografia solda H05.

A simulação das três soldas apresentou desenvolvimento semelhante da rebarba. A Figura 0.2 apresenta a evolução da rebarba e da dispersão de temperatura durante a simulação da solda H05.

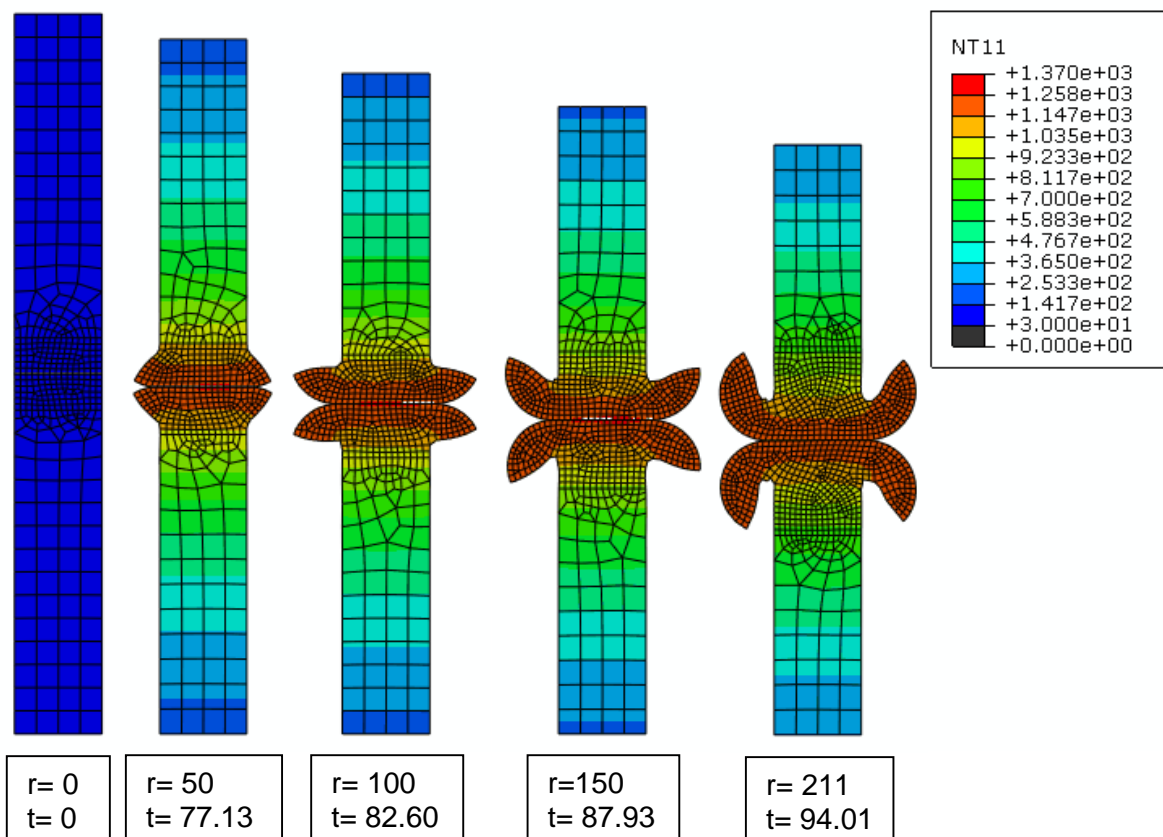


Figura 0.2 – Geração de rebarba para o caso H05. Sendo 'r' o número da malha, 't' o tempo total do processo em segundos e 'NT11' a temperatura do elemento em °C.