

MIGUEL DE OMENA LUCAS VIEIRA

MODELO MEF PARA SOLDAGEM POR ATRITO

Miguel de Omena Lucas Vieira

Título: MODELO MEF PARA SOLDAGEM POR ATRITO

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

Orientador: Peterson Luiz Ferrandini

Guaratinguetá - SP

2016

V658m	Vieira, Miguel de Omena Lucas Modelo MEF para soldagem por atrito / Miguel de Omena Lucas Vieira – Guaratinguetá, 2016. 54 f : il. Bibliografia: f. 39 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini 1. Soldagem 2. Fricção 3. Método dos elementos finitos I. Título CDU 621.791
-------	---

MIGUEL DE OMENA LUCAS VIEIRA

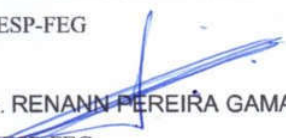
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

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

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. SERGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP-FEG


Me. RENANN PEREIRA GAMA
UNESP-FEG

Dezembro 2016

DADOS CURRICULARES

MIGUEL DE OMENA LUCAS VIEIRA

NASCIMENTO 11.08.1992 Santo André - SP

FILIAÇÃO Samuel Lucas Vieira
Eunice Ferreira de Omena Vieira

2008/2010 Curso técnico em eletrônica em nível médio.
Colégio Técnico Industrial De Guaratinguetá UNESP

Dedico este trabalho

A todos que me auxiliaram nesta
caminhada

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e amor.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini* que se propôs a desenvolver o tema deste trabalho, sem seu auxílio e orientação este trabalho não seria possível.

Aos meus pais *Samuel e Eunice* que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

À minha namorada *Larissa*, por seu incentivo, apoio e carinho.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e amizade.

“Mesmo que já tenha feito uma longa caminhada, sempre haverá mais um caminho a percorrer.”

Santo Agostinho.

RESUMO

Dentro dos métodos no estado sólido está a soldagem por fricção, muito empregada quando se necessita de boas propriedades mecânicas na junta. Isso é devido ao menor aporte térmico e, conseqüentemente, menor zona termicamente afetada. O calor gerado pelo atrito das superfícies a alta rotação faz com que o material perca resistência mecânica e escoe no sentido radial, causando assim, junção por forjamento. Porém a união ocorre em temperatura abaixo do ponto de fusão, portanto, a zona termicamente afetada tem tamanho reduzido e menos problemas causados por fases que comprometam a resistência da junta soldada. A maior parte dos parâmetros utilizados neste processo são obtidos de forma empírica, pois a determinação de parâmetros por meio analítico se torna muito complexa devido à natureza diferencial dos comportamentos das grandezas físicas envolvidas. Utilizando o método de elementos finitos (MEF) é possível obter uma solução aproximada do comportamento da soldagem por atrito. Fazendo uso do MEF em ambiente computacional os modelos puderam ser simulados em algumas condições, apresentando parâmetros que, posteriormente, foram utilizados nos ensaios e comportamento muito próximo ao visto em teoria. E o emprego dos parâmetros obtidos pelo MEF nos ensaios possibilitou um aumento da acurácia destes.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem. Fricção. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Solid-state methods include friction welding, which is widely used when good mechanical properties are required at the joint. This is due to the lower thermal input and, consequently, lower thermally affected zone. The heat generated by the friction of the surfaces at high rotation causes the material to lose mechanical resistance and to drain in the radial direction, thus causing forging. However, the bond occurs at a temperature below the melting point, therefore, the thermally affected zone has reduced size and less problems caused by phases that compromise the resistance of the welded joint. Most of the parameters used in this process are obtained empirically, since the determination of parameters by analytical means becomes very complex due to the differential nature of the behaviors of the physical quantities involved. Using the finite element method (MEF) it is possible to obtain an approximate solution of the behavior of the friction welding. Using MEF in a computational environment, in some conditions the models could be simulated, presenting parameters that were later used in the tests and behavior very close to the one seen in theory. Moreover, the use of the parameters obtained by the MEF in the tests made it possible to increase their accuracy.

KEYWORDS: Welding. Friction. Finite elements method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camadas de óxido, gás adsorvido.....	18
Figura 2 - Esquematisação de processo de soldagem por pressão.	18
Figura 3 - Esquematisação do processo de soldagem por atrito.	19
Figura 4 - Esquema de equipamento por transmissão direta.....	20
Figura 5 - Fases de processo por transmissão direta.....	20
Figura 6 - Relação entre as variáveis de processo	21
Figura 7 - Linhas de fluxo de material.	21
Figura 8 - Equipamento para soldagem inercial.....	22
Figura 9 - Relação entre as variáveis de processo por inércia.....	23
Figura 10 - Linhas de escoamento plástico na soldagem inercial.	23
Figura 11 - Representação de nó, elemento e malha 2D.....	25
Figura 12 - Representação de densidade de malha	25
Figura 13 - Malha 2D adequada e inadequada.	26
Figura 14 - Tipos de Elementos 3D.	26
Figura 15 - Malha utilizada.	28
Figura 16 - Malha e cargas.	29
Figura 17 - Equipamento utilizado.	30
Figura 18 - Medição de temperatura.....	30
Figura 19 - Corpos de prova sem e com furação.....	31
Figura 20 - Corpo de prova sentido longitudinal.....	31
Figura 21 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 1 (peças sem furação) vista esquerda.	32
Figura 22 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 1 (peças sem furação) vista frontal.	33
Figura 23 - Modelo 1 (peças sem furação) soldagem.	33
Figura 24 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 2 (peça sem furação e outra com furação) vista esquerda.....	34
Figura 25 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 2 (peça com furação) vista frontal.	35
Figura 26 - Modelo 2 (peça furada e sem furação) soldagem.	35
Figura 27 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 3 (peças com furação) vista esquerda.....	36

Figura 28 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 2 (peça sem furação e outra com furação) vista frontal.	36
Figura 29 - Modelo 3 (peças furadas) soldagem.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de rugosidade segundo ABNT 8404.....	17
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
AWS	American Welding Society
CVT	Continuously Variable Transmission
NBR	Norma Brasileira Registrada
PVC	Problema de Valor de Contorno
SAE	Society of Automotive Engineers
SPF	Soldagem Por Fricção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVO ESPECIFICO.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	SOLDAGEM.....	16
3.1.1	Soldagem por transmissão direta	20
3.1.2	Soldagem inercial.....	22
3.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1	MODELAGEM MEF.....	28
4.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
6	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Soldagem por fricção (SPF) é um dos mais importantes processos de soldagem no estado sólido. Neste processo não há necessidade de material de preenchimento e não existem problemas como inclusões ou porosidades. A junta soldada possui uma maior resistência, devido a soldagem ocorrer em toda área de contato entre as peças (MOARREFZADEH, 2012). Sendo um processo muito rápido a zona termicamente afetada é muito menor em relação a dos demais processos (B.SESHAGIRIRAO, V.SIVARAMAKRISHNA, 2015), logo a junta possui resistência muito próxima à do metal base. Este tipo de soldagem também é utilizado para a união de novos materiais ou novas combinações de materiais (SAHIN et al., 1998).

As grandezas envolvidas no processo são descritas por equações diferenciais que, em alguns casos, podem ser resolvidas por método analítico obtendo-se uma solução exata do problema. Entretanto na SPF as equações que regem seu comportamento são muito complexas para serem resolvidas analiticamente.

Para a solução de problemas altamente complexos, tal como o processo de soldagem por atrito, e que não pertencem ao conjunto restrito de equações que podem ser resolvidos de forma analítica foram criadas as técnicas de cálculo numérico, na qual destaca-se o método de elementos finitos (MEF). O MEF é um método matemático onde o meio é discretizado, subdividido em pequenas partes, mantendo as propriedades originais do sistema estudado (LOTTI et al., 2006).

O uso do MEF pode ser utilizado para prever o comportamento do processo de soldagem por atrito. Com o uso de um modelo MEF pode se testar quais os melhores parâmetros, como o formato das peças, as cargas, a temperatura no processamento de juntas soldadas por atrito, assim reduzindo o tempo e custos na execução de projetos que envolvam a união de diferentes peças.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Na economia atual a necessidade por novos materiais que atendam às exigências de maior produtividade e qualidade, bem como as condições mais severas com que os equipamentos são submetidos. Devido a estas demandas os métodos de soldagem vem evoluindo juntamente com a criação de novos métodos.

A soldagem por atrito vem ganhando destaque por gerar juntas de alta qualidade, com elevada taxa de produção e possibilitando a soldagem de diversos materiais. Além disto, por meio da soldagem por atrito é possível realizar a união de matérias dissimilares e metais refratários.

Este trabalho é elaborado com o intuito entender melhor os fenômenos envolvidos no processo e, também, estimar melhor os parâmetros de soldagem.

2.2 OBJETIVO ESPECIFICO

A pesquisa tem por objetivo a criação de modelo MEF para predição do comportamento do escoamento de material na soldagem por atrito, e assim realizar ensaios para validar os resultados obtidos por meio do MEF.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOLDAGEM

A soldagem é o processo mais utilizado na transformação de matéria-prima na indústria, utilizada, juntamente com a brasagem, desde indústria eletrônica até nas indústrias pesadas como naval, construção civil e estruturas de milhares de toneladas. Está presente no dia a dia de todos, nas estruturas mais simples como portões, grades, as mais avançadas como reatores nucleares.

A soldagem é um processo para obtenção de coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (R. W. WARKE et al in AWS Handbook., 2011). Esta união de materiais pode acontecer por fusão de dois corpos em contato ou por fusão de ambos com adição de um terceiro material e simplesmente pelo contato das superfícies das peças formando junta em estado sólido ou semissólido devido a pressão com ou sem fonte externa de calor.

A soldagem aparenta certa modernidade, entretanto a união de metais remete aos tempos da antiguidade onde artefatos eram unidos por brasagem e soldagem por forjamento. Ao final da era do cobre o ferro começou a ser utilizado como matéria-prima na confecção de vários utensílios (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), entretanto devido as limitações tecnológicas da época o ferro era produzido em pequenas quantidades em fornos rudimentares e conformado, por martelamento, em blocos de poucos quilos. Sendo assim para produção de peças maiores era necessário realizar a soldagem desses blocos, esta acontecia por forjamento, onde, ambas as peças eram aquecidas ao rubro e então marteladas até que ambas estivessem unidas.

Até a idade média o método de obtenção do ferro era por redução direta, onde o óxido de ferro era reduzido pelo carbono ainda no estado sólido, sendo assim tinha um teor de carbono muito baixo (inferior a 0,1%) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), portanto não se podia temperar objetos feitos com este material. Para se obter peças temperáveis era feito a soldagem de tiras, que haviam sido cementadas, à material base e assim temperadas.

Com a introdução de novas tecnologias para obtenção de ferro em grandes quantidades, a partir do século XII, a necessidade de soldagem foi diminuindo e sendo substituída por

rebitagem ou parafusagem das juntas. Até o século XIX a união de peças por soldagem era tida como processo secundário, só a partir das descobertas do arco elétrico e do acetileno que os processos por fusão começaram a aparecer. Com a eclosão da primeira guerra mundial os processos de soldagem começaram a ser utilizados como processo produtivo.

Como processo de fabricação a tecnologia de soldagem se desenvolveu rapidamente, com o desenvolvimento de novos métodos e aperfeiçoamento dos existentes, como os processos de soldagem por resistência e o desenvolvimento da soldagem com eletrodo revestido.

Nos dias de hoje novas tecnologias de soldagem vem sendo introduzidas, como a instrumentação e robótica, além da evolução dos consumíveis para o uso nos novos materiais aumentando a produtividade e qualidade de produtos soldados. Até os dias atuais existem cerca de cinquenta processos de soldagem em uso nas mais diversas indústrias.

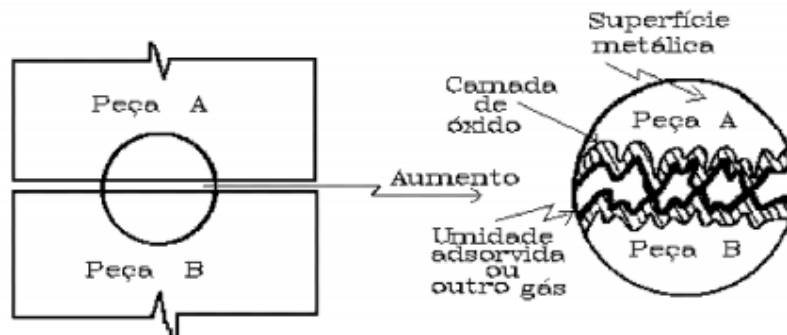
A união de dois corpos, em nível atômico, aconteceria espontaneamente pela atração dos átomos que os formam dependendo da distância entre as superfícies em contato (MACHADO, 1996). Entretanto é praticamente impossível que ocorra soldadura de forma espontânea, pois a distância necessária para haver atração e ligação entre os átomos de ambas as superfícies é a na ordem de centena de nanômetros e conforme tabela 1 a seguir pode-se constatar que a menor rugosidade possível é da ordem de micrometros, além da menor rugosidade possível ser maior que a distância necessária para a ligação dos átomos de cada peça, também existe formação de camadas de óxido de gás adsorvido nas superfícies, poeiras e outros materiais que acabam por impedir a ligação dos átomos das peças como exemplificado na Figura 1.

Tabela 1 - Classes de rugosidade segundo ABNT 8404.

Classe de rugosidade	Desvio médio aritmético (R_a) μm
N 12	50
N 11	25
N 10	12,5
N 9	6,3
N 8	3,2
N 7	1,6
N 6	0,8
N 5	0,4
N 4	0,2
N 3	0,1
N 2	0,05
N 1	0,025

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984)

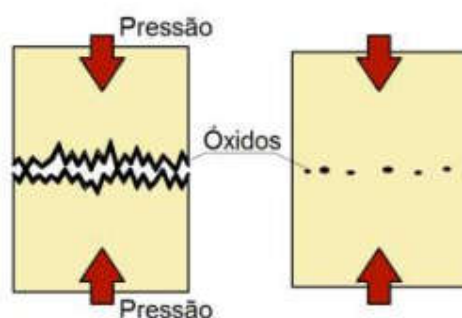
Figura 1 - Camadas de óxido, gás adsorvido.



Fonte: (MACHADO, 1996)

Desta forma existe a necessidade de processos para remoção de filmes de óxido e gás adsorvido de modo que ocorra união das peças. Estes são divididos em dois grupos os por pressão, onde altas pressões são aplicadas e as superfícies se deformam plasticamente possibilitando a aproximação necessária para a formação da ligação entre os átomos superficiais, e os por fusão, que consistem na aplicação localizada de calor para a fusão do material de adição (quando for necessário) produzindo ligação pela solidificação do metal fundido (MACHADO, 1996).

Figura 2 - Esquematização de processo de soldagem por pressão.



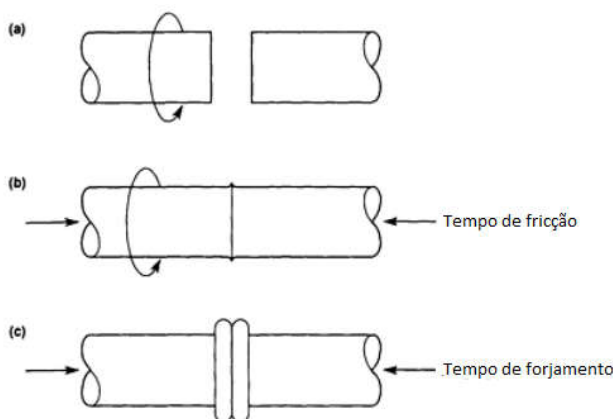
Fonte: (MODENESI, 2006)

A soldagem por pressão acontece em estado sólido por produzir a coalescência das superfícies em contato com temperaturas abaixo da ponto de fusão dos corpos a serem soldados, isso sem a necessidade de metais de adição como nos processos de soldagem por fusão e brasagem (COOPER; ALLWOOD, 2014). A união é obtida pela deformação de

material na superfície da junta. Sendo assim, em vários processos, a interface é aquecida fazendo com que a resistência a deformação seja reduzida facilitando, assim, que ocorra a deformação plástica necessária.

Neste grupo de processos destaca-se a soldagem por atrito ou fricção, neste método uma peça rotativa é colocada em contato com uma peça fixa até que a temperatura necessária para que as peças apresentem comportamento plástico seja atingida, por meio de fricção, nesta fase a força aplicada as peças é somente a necessária para garantir o contato entre elas e garantir que a junta se aqueça o suficiente para a fase de forjamento (DIXON in ASM Handbook, 1993). No forjamento aplica-se carga para escoamento de material de forma radial removendo a camada de óxido das superfícies, criando uma ligação metálica nas interfaces. Um esquema para o processo é representado na figura 3.

Figura 3 - Esquemática do processo de soldagem por atrito.



Fonte: Adaptado de ASM Handbook, Volume 6, Welding Brazing, and Soldering (1993)

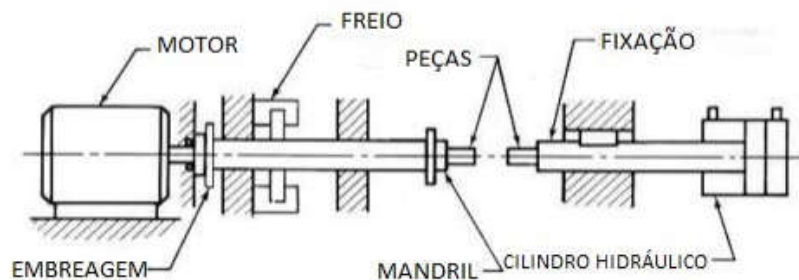
A aplicação da carga, a velocidade relativa, o tempo de aquecimento e forjamento são os parâmetros a serem controlados na SPF (DIXON in ASM Handbook, 1993), pois essas variáveis determinam a qualidade da junta soldada. O controle desses parâmetros é diferente para dois tipos de SPF: a Soldagem por transmissão direta e na soldagem inercial.

A soldagem por fricção pode ser dividida em duas variações de processo, diferindo no modo a energia é fornecida para a realização da solda dividindo-se em soldagem por transmissão direta e soldagem por inércia.

3.1.1 Soldagem por transmissão direta

No processo por transmissão direta o equipamento utilizado se assemelha a um torno como esquematizado na Figura 4, porém incluídos um freio e uma embreagem com o objetivo de aplicar e controlar a carga axial, o tempo de fricção, e o deslocamento de material.

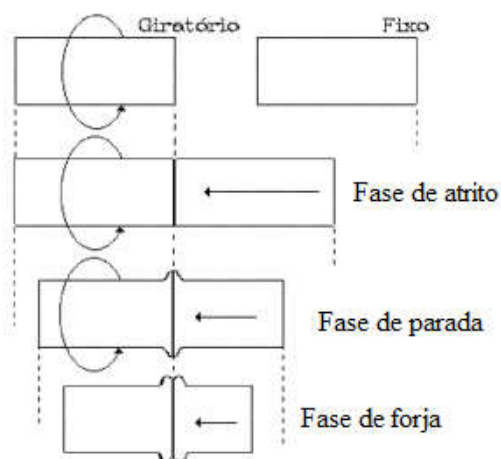
Figura 4 - Esquema de equipamento por transmissão direta.



Fonte: Adaptado de ASM Handbook, Volume 6, Welding Brazing, and Soldering (1993)

O processo de soldagem em transmissão direta consiste em três fases. A fase de fricção, onde o calor necessário será gerado, fase de parada de rotação e fase de forjamento como visto na Figura 5.

Figura 5 - Fases de processo por transmissão direta

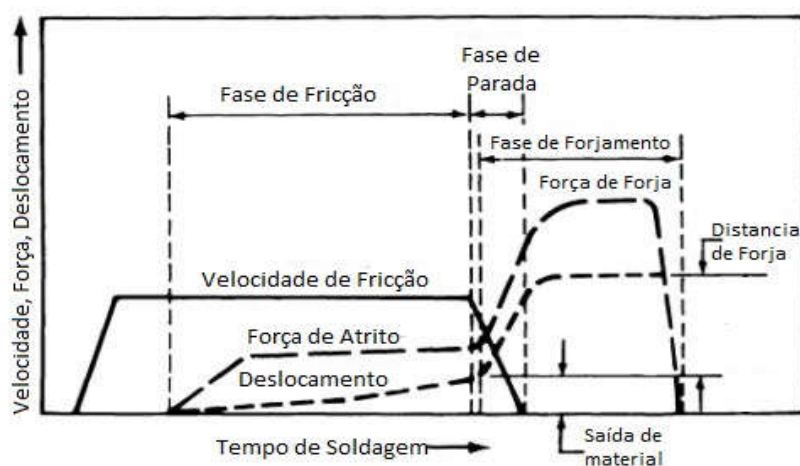


Fonte:(MACHADO, 1996)

Primeiramente a peça fixa ao sistema rotativo é posta em uma determinada velocidade. Ao atingir-se a velocidade estabelecida, em função dos materiais a serem soldados

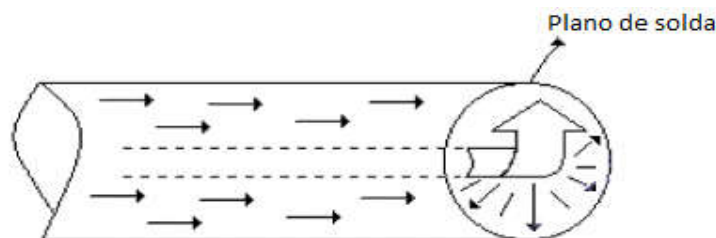
(MACHADO, 1996). Após a rotação chegar ao valor determinado inicia-se a fase de fricção, onde a velocidade é mantida constante e as peças são postas em contato a uma força suficiente para manter o contato e, devido ao atrito, o aquecimento de ambas juntamente com a destruição das camadas de óxido e expulsão destas, ao atingir a temperatura necessária fase de parada, onde o freio e a embreagem são acionados, inicia-se. Ainda na fase de parada a força, anteriormente para manter as peças unidas e em atrito, é aumentada para promover o forjamento, e remoção de material indesejável, como óxidos. Nesta fase o deslocamento de material é bem acentuada devido a maior força aplicada e a maior temperatura, as relações entre as variáveis em função do tempo de processo podem ser observadas na Figura 6 e na Figura 7 é mostrado o comportamento do deslocamento de material na fase de forjamento.

Figura 6 - Relação entre as variáveis de processo



Fonte: Adaptado de ASM Handbook, Volume 6, Welding Brazing, and Soldering (1993)

Figura 7 - Linhas de fluxo de material.

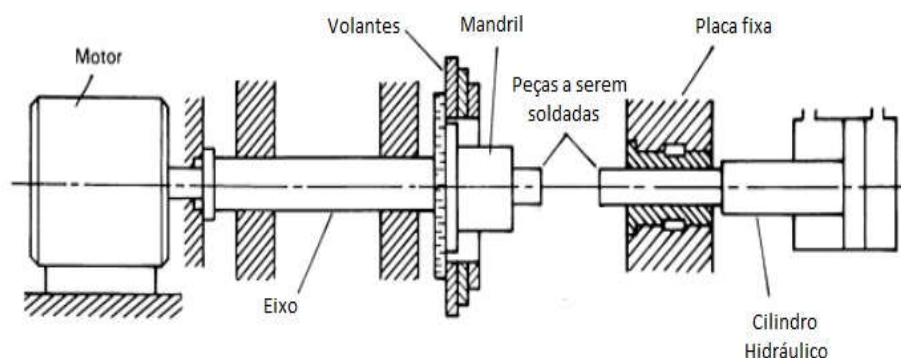


Fonte: (MACHADO, 1996)

3.1.2 Soldagem inercial

Na soldagem inercial o equipamento, visto na Figura 8, se difere do processo por transmissão direta por possuir volantes de inércia onde a peça rotativa é fixada que é posto rapidamente a uma determinada rotação e após atingi-la é desacoplado do motor para, então, ser aplicada a pressão de forja. No processo inercial o tempo de fricção não é necessariamente obrigatório (MACHADO, 1996), pois a força de aplicada pode ser constante em todo o tempo de processo ou ser aplicada em duas etapas sendo uma carga de menor magnitude para promover o aquecimento e uma força maior na fase de forjamento.

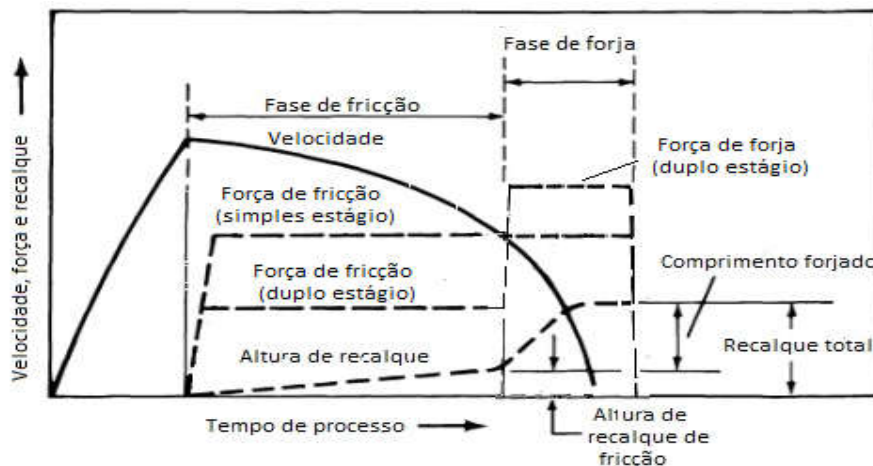
Figura 8 - Equipamento para soldagem inercial.



Fonte: Adaptado de ASM Handbook, Volume 6, Welding Brazing, and Soldering (1993)

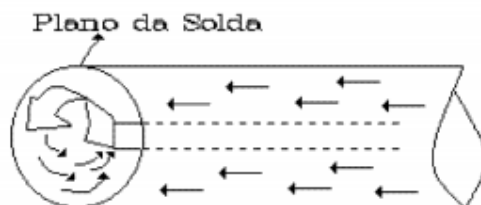
Inicialmente acelera-se o volante de inércia juntamente com a peça rotativa até a velocidade estabelecida, após o conjunto atingir o valor determinado, este é desconectado do motor. Dando sequência ao processo aplica-se a carga, que poderá ser realizada em duas etapas ou em uma quando não se realiza fase de fricção aplicando uma pressão constante até que a energia cinética seja transferida ao processo, em todos os casos não há fase de parada e a fase de forja é definida pelo aumento do recalque como visto na Figura 9. Ainda por não haver fase de parada o escoamento de material, Figura 10, não se dá de forma unicamente em sentido radial, como no processo por transmissão direta, e sim de forma helicoidal.

Figura 9 - Relação entre as variáveis de processo por inércia.



Fonte: Adaptado de ASM Handbook, Volume 6, Welding Brazing, and Soldering (1993)

Figura 10 - Linhas de escoamento plástico na soldagem inercial.



Fonte: (MACHADO, 1996)

A soldagem por fricção apresenta muitas vantagens em relação aos processos por fusão. Pode-se dizer que as suas vantagens (MACHADO, 1996; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009) são:

- Por remover os filmes superficiais não é preciso muita atenção com a limpeza e acabamento das superfícies;
- Não existem defeitos associados aos fenômenos de solidificação como porosidades e segregações, devido a soldagem ocorrer em estado sólido;
- Possibilidade de unir metais dissimilares, que por processos de fusão são de difíceis ou até impossíveis de serem unidos;
- Curto período de soldagem;
- Zona termicamente afetada muito estreita devido ao menor aporte térmico, garantindo propriedades mecânicas muito próximas ao metal base.

Todavia existem desvantagens na utilização deste tipo de processamento, e estas fazem com que a soldagem por atrito seja restrita a algumas aplicações. Como:

- A área de pelo menos uma das peças deve ser simétrica, possibilitando que esta venha a girar, sendo assim restringe-se a geometria da peça rotativa e das junções, para barras cilíndricas e tubos;
- O equipamento deve ter rigidez alta a fim de evitar que as peças venham a sofrer desalinhamento em função das altas cargas aplicadas;
- Elevados custos na aquisição dos equipamentos.

3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

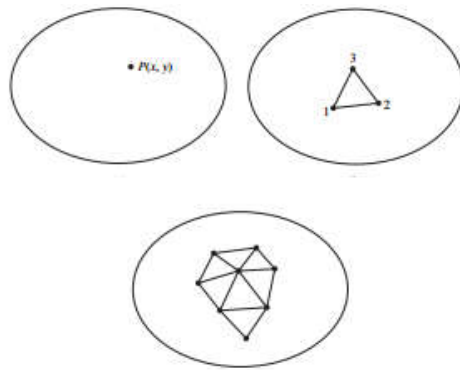
O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica matemática usada para obter uma solução aproximada de problemas condição de contorno nas áreas de engenharia e física. Um problema de valor de contorno (PVC), ou problema de campo, é um sistema de equações diferenciais restritas por um conjunto de condições de contorno, ou de fronteira (GOMES, 2013). O PVC muito frequentemente representa a maior parte dos problemas físicos como deslocamento, distribuição de temperatura, fluxo de calor, velocidade de fluido, etc., sendo assim a maior parte dos problemas de engenharia envolvem PVC, entretanto soluções analíticas muitas vezes são impraticáveis, pois implicariam em um grande tempo para a solução ou até mesmo de solução analítica impossível.

Um protótipo para MEF foi desenvolvido por Walter Ritz (1878-1909) em 1909 e consistia em um método direto para a solução aproximada de PVC na área de mecânica dos sólidos dando, posteriormente origem ao MEF. O método de Ritz foi melhorado por Richard Courant, em 1943, ampliando a aplicabilidade do método ao introduzir funções lineares especiais. Com as modificações de Courant no método de Ritz, este se tornara similar ao MEF proposto por Ray William Clough Jr que em 1960 apresentou o termo elemento finito no artigo *The finite element method in plane stress analysis* pela primeira vez (GOMES, 2013). Embora o método tenha sido desenvolvido primordialmente para a solução de problemas envolvendo o campo de tensões em corpos sólidos, hoje seu uso como método computacional para solução de problemas complexos em diferentes campos da engenharia vem sendo muito aplicado nas áreas de engenharia civil, mecânica, nuclear, biomédica, hidrodinâmica, condução de calor, geomecânica, entre outras (LOTTI et al., 2006).

O MEF consiste na subdivisão do meio contínuo, o domínio, em sub-regiões com geometria simplificada. Estas sub-regiões são delimitadas por pontos chamados de nós ou

pontos nodais, um exemplo é mostrado na Figura 11, o conjunto de nós recebe o nome de malha (HUTTON, 2004). A região limitada pelos nós é chamada de elemento e contém as propriedades do meio contínuo original.

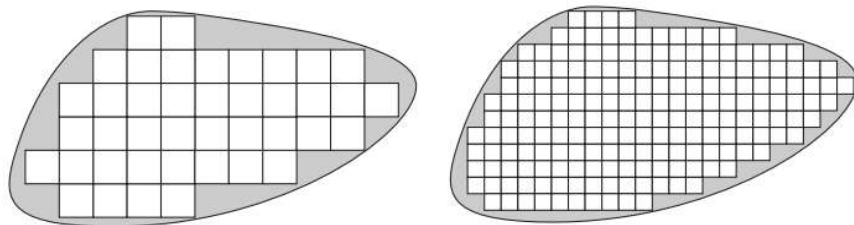
Figura 11 - Representação de nó, elemento e malha 2D.



Fonte: (HUTTON, 2004)

A maior influência em uma simulação MEF está na densidade da malha e na convergência dos parâmetros estudados (HUTTON, 2004). Uma malha com alta densidade e muitos elementos fornece um resultado mais refinado por se aproximar mais do problema real, podendo ser visto na Figura 12, mas com o custo de maior processamento de dados e uma maior tendência na não convergência do resultado.

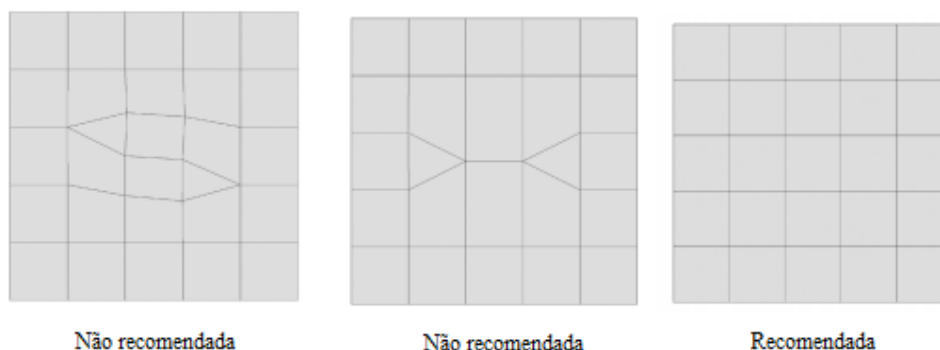
Figura 12 - Representação de densidade de malha



Fonte: (HUTTON, 2004)

O um dos problemas na análise por MEF está na dificuldade de geração de malha, visto que o formato e a quantidade de elementos estão diretamente relacionados ao resultado da análise. Com o avanço da capacidade dos computadores foi possível a criação de vários métodos para geração de malha automática nos *softwares* atuais (ALTAIR UNIVERSITY, 2015), como exemplo o *Nastran-in-cad* utilizado neste trabalho. Contudo malhas automáticas não resultam em elementos inadequados para análise sendo necessário um controle local da malha em algumas regiões e, visto na Figura 13 em malha 2D, também, acabam criando mais nós do que o necessário. A vantagem de se utilizar malhas automáticas está na rapidez com que esta é criada e sua aplicação se limita a geometrias mais simples.

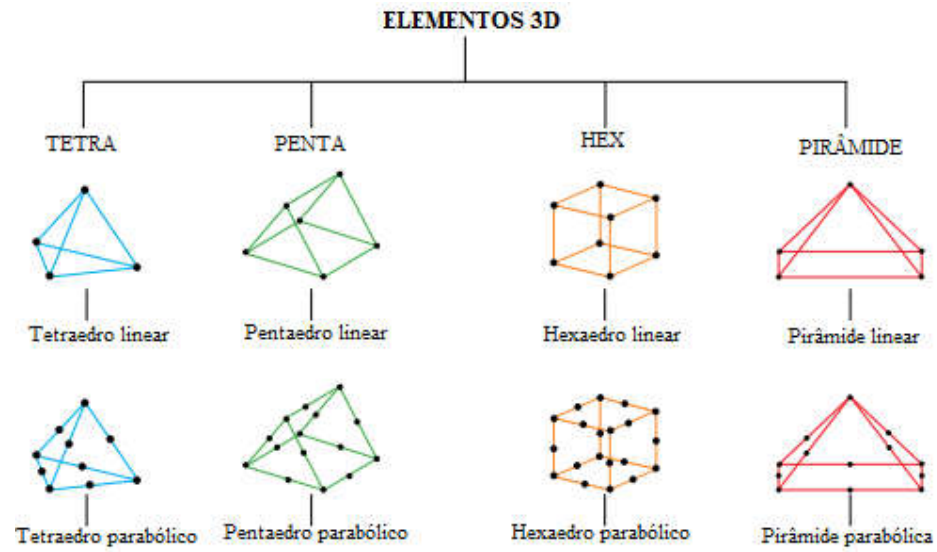
Figura 13 - Malha 2D adequada e inadequada.



Fonte:(ALTAIR UNIVERSITY, 2015)

A escolha do tipo de malha e, conseqüentemente, o elemento irá influenciar nos resultados da análise (ALTAIR UNIVERSITY, 2015). Uma vez que isto determina a aproximação do modelo MEF ao objeto de estudo. Os elementos podem ser tetraédricos, pentaedros, hexaédricos ou blocos e piramidais, como mostra a Figura 14. O elemento tetraédrico normalmente é o mais utilizado devido a menor quantidade de pontos e iterações necessária para a solução do modelo (ALTAIR UNIVERSITY, 2015).

Figura 14 - Tipos de Elementos 3D.



Fonte: Adaptado de ALTAIR UNIVERSITY, (2015)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

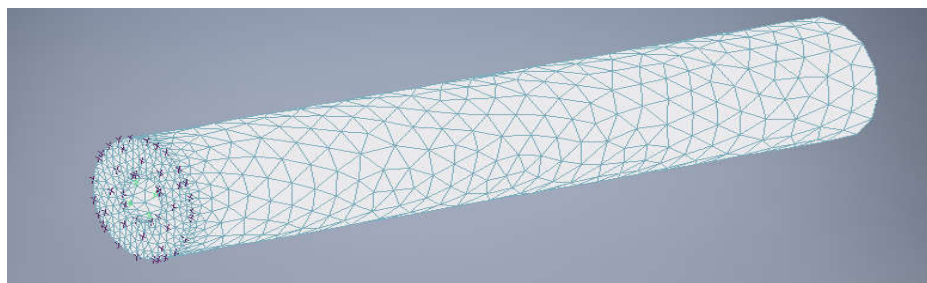
4.1 MODELAGEM MEF

Para a realização dos modelos MEF, primeiramente foram criados modelos em três dimensões das peças que viriam a ser soldadas, no caso foram testadas algumas hipóteses em relação ao formato adequado para execução da soldagem. Todos os modelos 3D foram criados no software *Inventor*TM da *Autodesk* em sua versão educacional.

Após criados os modelos 3D das peças, foi criado um modelo de montagem das peças para então ser simulada por elementos finitos no *Nastran-in-cad* também da *Autodesk* em versão educacional, este é um software incorporado ao próprio *Inventor* para análise em elementos finitos.

As malhas usadas para a simulação foram tetraédricas parabólicas com controle de angulação entre os nós, elementos de 5,3 mm no corpo e refino de malha na interface com elementos de 1,0 mm, conforme pode ser observado na Figura 16.

Figura 15 - Malha utilizada.

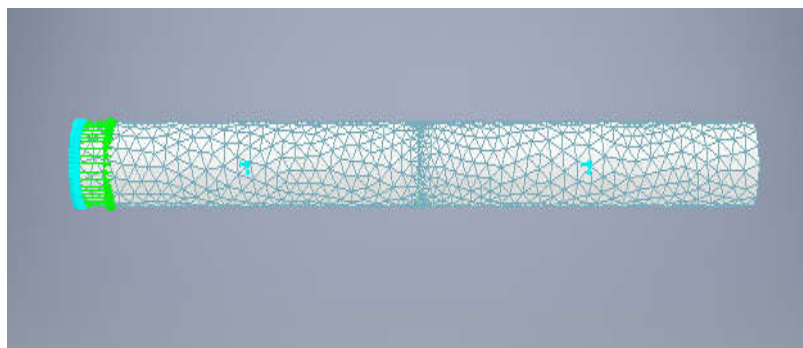


Fonte: Autor

O modelo foi criado para o tempo de forjamento do processo de soldagem ficcional por transmissão direta, onde não há mais rotação e a temperatura nas faces é suposta constante estimada após uma pré-simulação térmica considerando um fluxo térmico de 50W/mm^2 (MACHADO, 1996) e os resultados obtidos com esta serviram como variáveis do modelo da soldagem. Com força de forja no valor de 9000 N, pois o valor da pressão deve ser no intervalo de 80 a 155 MPa (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), foi escolhido um valor de pressão de 80 MPa.

Tais dados foram obtidos após algumas análises, utilizando o intervalo de pressões encontrados na literatura. O valor no qual os modelos convergiam foi com pressão de 80 MPa, gerando uma força de 9000 N, como descrito anteriormente e mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Malha e cargas.



Fonte: Autor

As restrições aplicadas aos modelos são tais que não permitam que, ao aplicar-se a carga, as peças rotacionem em nenhum dos eixos e que só exista deslocamento radial na interface entre as duas peças. Há também restrição de contato entre as peças estipulado para ser um contato deslizante, porém que não permita a separação das superfícies.

Foram considerados três arranjos de soldagem, uma com duas peças de diâmetro 12 mm e 100 mm de comprimento, a segunda configuração consistia de uma peça idêntica à anterior e outra com as mesmas dimensões, porém com um furo passante de diâmetro 6 mm, a terceira condição de duas peças de furo passante. O material aplicado aos modelos foi o AISI 1020 107 HR, um aço com baixo teor de carbono laminado a quente. Em todos os arranjos é utilizada análise do tipo estática não linear, é considerado que a interface entre as faces é deslizante sem separação.

4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para a realização das soldas por atrito foi utilizado o torno mecânico do departamento de matérias e tecnologia, este torno possui características especiais que possibilitam a execução do processo de soldagem por atrito, que são a sua transmissão por CVT e a opção de

desacoplamento do eixo árvore. Entretanto devido restrições de certos insumos para aplicação constante da carga, utilizou-se o mandril da broca para fixação da peça não rotativa e o sistema de avanço deste como meio de aplicação de carga, visto na Figura 17, também foi utilizado pirômetro a laser e um sensor de infravermelho para a medição da temperatura na interface, Figura 18, porém ambos não puderam medir a temperatura corretamente.

Figura 17 - Equipamento utilizado.



Fonte: Autor

Figura 18 - Medição de temperatura.



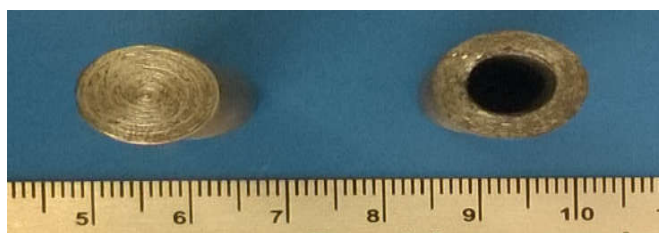
Fonte: Autor

Para a realização da soldagem, tanto o método por transmissão direta e o inercial não seriam adequados ao equipamento e aos recursos disponíveis, logo a opção mais adequada foi a execução de um processo híbrido. Este utilizava a sequência inicial com fase de aquecimento do processo por transmissão direta e utilizando a castanha do torno como volante

de inércia de um processo inercial. Então acionava-se a rotação do eixo árvore e mantinha-se esta rotação e, assim, inicia-se a fase de aquecimento, após a fase de aquecimento o volante de inércia (a castanha do torno) era desacoplada para então dar-se início a fase de forjamento até que toda energia cinética do volante fosse utilizada no processo fazendo-a parar.

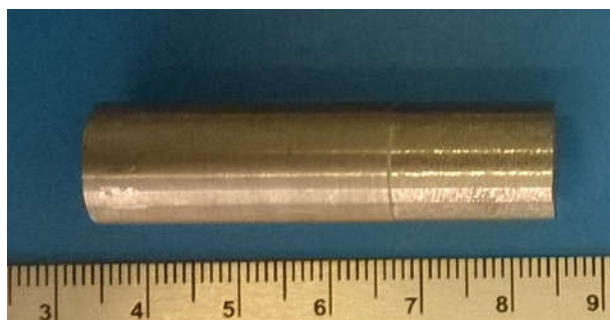
Foram realizadas três soldagens com CDP's de Ø12mm e 50 mm de comprimento, similares aos modelos MEF, nos mesmos três arranjos uma soldagem com peças sem furo, uma com peça com furo passante e sem furo e outra com as duas peças com furo passante.

Figura 19 - Corpos de prova sem e com furação.



Fonte: Autor

Figura 20 - Corpo de prova sentido longitudinal.



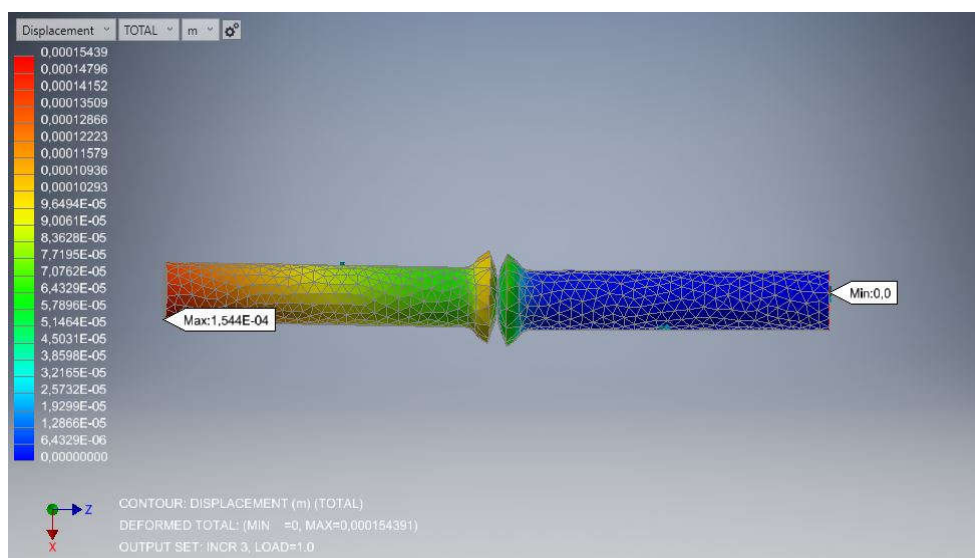
Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados qualitativos foram promissores, pois em cima do estudo e pesquisa teóricos foi criado o modelo MEF para cada um dos arranjos propostos e com os resultados destes foram realizados os experimentos no laboratório. A seguir os resultados obtidos são apresentados comparando-se o modelo MEF com o experimento de laboratório.

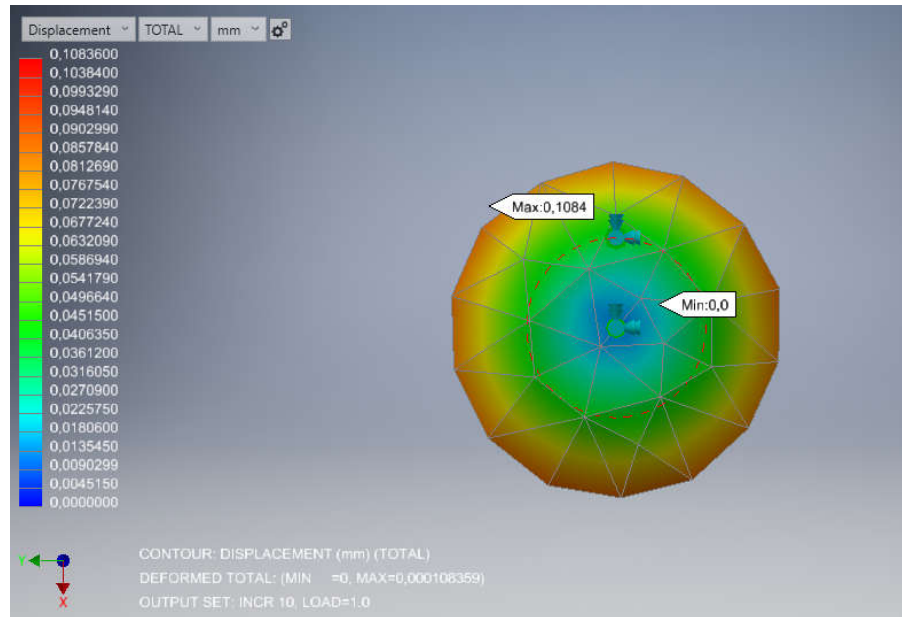
No primeiro arranjo, consistido de duas peças sem furo passante, o modelo MEF não respeitou algumas das restrições aplicadas apresentando certa flambagem, visto na Figura 21. Entretanto o comportamento do escoamento radial, mostrado na Figura 22, se mostrou muito próximo do descrito na teoria com a exceção da magnitude do deslocamento visto no recalque que apresentou valores menores do que os esperados na ordem de milímetros.

Figura 21 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 1 (peças sem furação) vista esquerda.



Fonte: Autor

Figura 22 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 1 (peças sem furação) vista frontal.



Fonte: Autor

Com os dados obtidos no MEF foi realizado experimento para a união de duas peças sem furação, que apresentou comportamento semelhante ao previsto no modelo, visto na Figura 23.

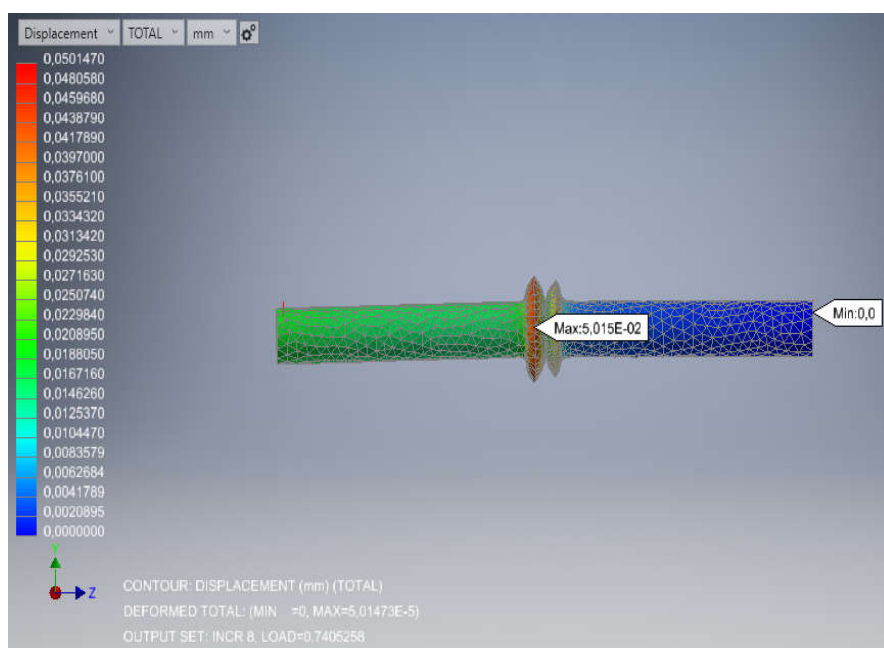
Figura 23 - Modelo 1 (peças sem furação) soldagem.



Fonte: Autor

No segundo arranjo, consistido de uma peça sem furo e outra com furo passante, o modelo MEF respeitou das restrições aplicadas. E mostrou comportamento próximo ao visto em teoria, tendo o corpo de maior massa e a esquerda (sem furação) escoado mais material em apenas uma direção como pode ser notado na Figura 24. Porém os valores de deslocamento como no modelo 1, de peças cheias, foram muito abaixo do visto em ensaio.

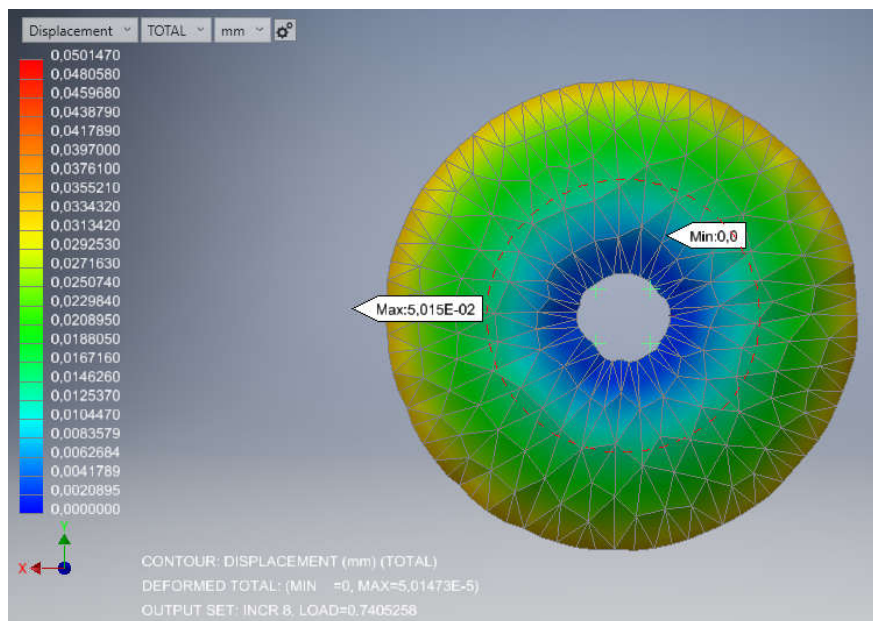
Figura 24 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 2 (peça sem furação e outra com furação) vista esquerda.



Fonte: Autor

Nota-se ainda que na peça com furação o escoamento ocorre no sentido radial de forma homogênea, porém nos dois sentidos, visto na Figura 25, por não haver material na parte interna do corpo.

Figura 25 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 2 (peça com furação) vista frontal.



Fonte: Autor

Foi realizada a soldagem em laboratório com comportamento muito próximo ao previsto no modelo MEF, apresentando as mesmas características de escoamento de material visto na Figura 26.

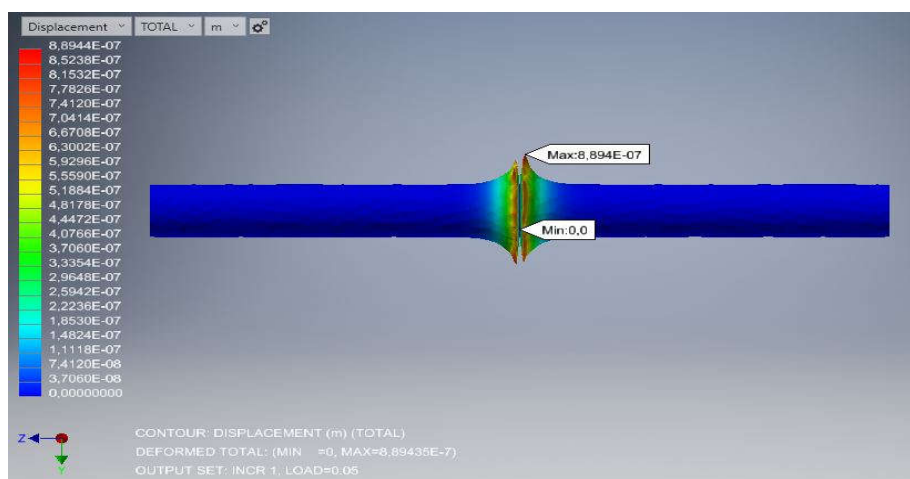
Figura 26 - Modelo 2 (peça furada e sem furação) soldagem.



Fonte: Autor

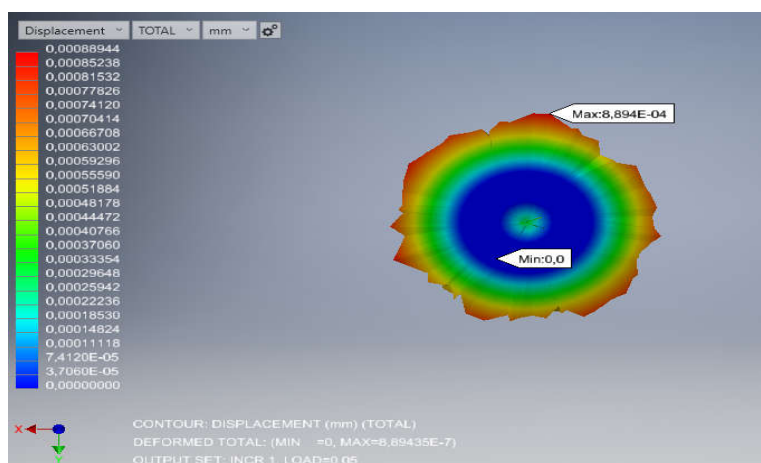
No terceiro arranjo, consistido de duas peças de furo passante, o modelo MEF apresentou um comportamento diferente dos anteriores, demorando muito mais tempo para convergir, sendo necessário maior número de iterações devido a problemas com a rigidez do sistema. O escoamento não apresentou comportamento radial homogêneo, podendo ser observado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 3 (peças com furação) vista esquerda.



Fonte: Autor

Figura 28 - Representação gráfica do deslocamento do modelo 2 (peça sem furação e outra com furação) vista frontal.



Fonte: Autor

No experimento de soldagem do terceiro arranjo o resultado obtido não foi o esperado, o escoamento não se deu de forma radial, mas com concentração de massa em um sentido devido a problemas na execução da soldagem como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Modelo 3 (peças furadas) soldagem.



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

O uso de modelagem em elementos finitos é uma ferramenta muito utilizada, diversas em áreas de projeto, poupando tempo e custos com experimentos. Consequentemente seu uso em predição tornou-se uma poderosa ferramenta no desenvolvimento de nossas técnicas de soldagem, como a apresentada neste trabalho.

Com os modelos criados foi possível uma maior assertividade nos experimentos, pois com estes e a bibliografia consultada foi possível estipular as melhores geometrias e parâmetros de processo.

Os resultados da análise MEF, em relação ao deslocamento de material, foram conforme o visto em ensaios e literatura exceto o modelo para peças furadas em que o deslocamento de matéria não foi homogêneo devido a problemas de rigidez encontrados pelo software. Entretanto os valores de deslocamento resultantes das análises foram da ordem de décimos de milímetros, para todos os modelos, sendo o esperado valores em torno de alguns milímetros. Isto se deve considerações do modelo como, regime térmico estacionário, corpos considerados como sólidos em toda a sua extensão, além de limitações do próprio software.

REFERÊNCIAS

- ALTAIR UNIVERSITY. **Practical aspects of finite element simulation: a study guide**. 3. ed. Altair University, 2015, p 503. disponível em: <<http://www.altairuniversity.com/free-ebooks-2>> acessado em 20 de setembro de 2016
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Welding, brazing and soldering**. ASM - metals handbook. 9. ed. ASM - International, 1993. v. 6, p. 2873.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8404 - **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**, 1984, p 10.
- AWS WELDING HANDBOOK COMMITTEE. **Welding handbook**. 9. ed. Miami: American Welding Society, 2011. v. 4, p 695.
- B.SESHAGIRIRAO, V.SIVARAMAKRISHNA, G. S. Experimental Investigation of Rotary Friction Welding Parameters of Aluminum (H-30) and Mild Steel (Aisi-1040). **International journal of innovative research in science, engineering and technology**, v. 4, n. 5, p. 2920–2925, 2015.
- COOPER, D. R.; ALLWOOD, J. M. Influence of diffusion mechanisms in aluminium solid-state welding processes. **Procedia Engineering**, v. 81, p. 2147–2152, 2014.
- GOMES, H. C. **Método dos elementos finitos com fronteiras imersas aplicado a problemas de dinâmica dos fluidos e interação fluido-estrutura**. f. 98 Dissertação (Doutorado em Engenharia civil) Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2013.
- HUTTON, D. V. **Fundamentals of finite element analysis**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2004. p 494.
- LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Press Ortodon Ortop facial**, v. 11, n. 2, p. 35–43, 2006.
- MACHADO, I.G., **Soldagem e técnicas conexas: processos**, editado pelo autor, Porto Alegre, 1996. p 477.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. p 362.
- MOARREFZADEH, A. Study of Heat Affected Zone (HAZ) in Friction Welding Process. **Journal of mechanical engineering**, v. 1, n. 1, p. 11–17, 2012.
- MODENESI, P. **Introdução à metalurgia da soldagem**, Belo Horizonte: UFMG, 2012, p 208. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>> Acesso em: 30 de agosto de 2016.
- SAHIN, A. Z. et al. Analysis of the friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars. **Journal of materials processing technology**, v. 82, n. 1–3, p. 127–136, 1998.