

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Samara Christina Rodrigues Soares

**ESTUDO DE JUNÇÕES POR DEFORMAÇÃO A FRIO EM TUBOS COM  
COSTURA**

Belo Horizonte

2020

Samara Christina Rodrigues Soares

**ESTUDO DE JUNÇÕES POR DEFORMAÇÃO A FRIO EM TUBOS COM  
COSTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Belo Horizonte

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S676e Soares, Samara Christina Rodrigues  
Estudo de junções por deformação a frio em tubos com costura / Samara  
Christina Rodrigues Soares. Belo Horizonte, 2020.  
100 f. : il.

Orientador: Gilmar Cordeiro da Silva  
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Tubos de aço. 2. Juntas (Engenharia). 3. Conformação de metais. 4.  
Método dos elementos finitos. 5. Metais - Métodos de simulação. 6. Metais -  
Deformação. I. Silva, Gilmar Cordeiro da. II. Pontifícia Universidade Católica de  
Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB. PUC. MINAS

CDU: 620.172.24

Samara Christina Rodrigues Soares

**ESTUDO DE JUNÇÕES POR DEFORMAÇÃO A FRIO EM TUBOS COM  
COSTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva– PUC Minas (Orientador)

---

Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara– UFMG (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Junior– PUC Minas (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Jânes Landre Júnior– PUC Minas (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 04 de junho de 2020.

*À minha mãe e aos meus irmãos por sempre acreditarem nos meus sonhos e me ajudarem a torná-los realidade. Ao meu esposo por ser minha fortaleza em todos os momentos. Aos meus professores que cumprem a missão de compartilhar o saber.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, fonte eterna de sabedoria e pacificação do meu coração, colocando-me apta a realizar este trabalho.

Ao Prof. Dr. Gilmar Cordeiro Silva, pela orientação no desenvolvimento desta pesquisa, por toda dedicação e conhecimento transmitido, contribuindo para meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

À minha família pelo apoio e confiança depositados em mim, me dando força e suporte sempre que necessário, percorrendo comigo essa caminhada.

Ao Prof. Alysson Lucas Vieira por toda ajuda e orientação na realização das simulações deste trabalho e por toda acessibilidade oferecida quando necessário.

Aos meus colegas do Programa de Pós-graduação, em especial ao Norberto Martins, pelas contribuições e ajuda no trabalho.

Aos funcionários do laboratório de ensaios mecânicos pela colaboração nos testes experimentais.

À PUC MINAS pela oportunidade de participar do programa de bolsas assistenciais realizado pela Secretaria de Cultura e Assuntos Comunitários (SECAC), que possibilitou e viabilizou a minha participação no programa de Pós-graduação, me permitindo concretizar esta importante etapa da minha vida.

À Fiat Chrysler Automobiles (FCA), unidade de Betim, pela realização dos ensaios de torque na peça final construída.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.



## RESUMO

Tubos metálicos de paredes finas utilizados em diversos produtos em aplicações comerciais e industriais utilizam junções por soldagem ou juntas mecânicas. O processo é dispendioso e trabalhoso, devido à dissimilaridade dos materiais, aumento do peso e dos custos dos componentes das junções. Uma metodologia inovadora na junção de tubos de aço com costura e parede fina em placas metálicas por conformação mecânica a frio é apresentada. O método reduz o custo de fabricação e energia, pois não necessita de juntas mecânicas nem materiais de adição e pode ser realizada a temperatura ambiente. A lubrificação utilizada foi um óleo ambientalmente correto à base de éster. O estudo numérico do processo de fabricação foi realizado no software Abaqus a partir do Método dos Elementos Finitos. O tubo nas dimensões iniciais de ( $\varnothing$  42,6 x  $\varnothing$  36,2) mm foi caracterizado como AISI 1006 e utilizado na condição de como recebido. Ensaios de tração foram realizados para modelar o comportamento do tubo na simulação numérica. O coeficiente de atrito do par tribológico matriz/tubo foi determinado a partir do ensaio do Anel. Os resultados numéricos e experimentais convergiram para a geometria final do tubo unido às chapas metálicas, gerando como resultado uma força de conformação requerida de 140 kN no primeiro estágio e 125 kN no segundo estágio. Os ensaios práticos mostraram microdureza na região deformada de 178,3 HV com aumento de dureza de 18% devido ao encruamento do material. Devido às aplicabilidades industriais da junção em escadas, aparelhos de ginástica, andaimes, entre outras, foi realizado o ensaio de torção para verificar a resistência da junção projetada ao esforço de rotação. O torque máximo aplicado na junção foi de 375 Nm e não houve movimento relativo entre a chapa e o tubo.

Palavras-chave: Conformação. Junção de tubos. Simulação numérica. Deformação. Método de Elementos finitos.

## ABSTRACT

Thin-walled metal tubes has ben used in various products in commercial and industrial applications united by welding or mechanical joints. The process is expensive and laborious, due to the dissimilarity of the materials, increased weight and costs of the components of the joints. An innovative methodology for joining steel tubes with seam and thin wall in metal plates by cold mechanical forming is presented. The method reduces the cost of manufacture and energy, as it does not use mechanical joints or addition materials and can be performed at room temperature. The lubrication used was an oil environmentally friendly based on ester was used. The numerical study of the manufacturing process was performed in the Abaqus software by Finite Element Method. The tube in the initial dimensions ( $\varnothing 42.6 \times \varnothing 36.2$ ) mm was characterized as the AISI 1006 and used in the receiving condition. Tensile tests were performed for to model the behaviour of numerically simulated pipe. The friction coefficient of the tribological pair of tube /die was determined from the ring test. The numerical and experimental results are converged to a final geometry of the tube joined to the metal sheet, generating as a result a required forming force of 140 kN in the first stage and 125 kN in the second stage. Experimental clinical trials show microhardness in the deformed region of 178.3 HV, varying of 18%, due to the strain hardening in material. Due to industrial applications of joining in ladders, gym equipment, scaffolding, among others, it was performed tested for test the resistance of the projected joint to the rotation effort. The maximum torque applied was 375 Nm and there was no relative movement between plate and tube.

Keywords: Conformation. Joining tubes. Numerical simulation. Deformation. Finite element method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Variadas seções transversais de tubos metálicos de paredes finas..	35
Figura 2 – Deformações em andaimes submetidos a esforços no topo (a) lateral livre (b) lateral fixa no topo.....	42
Figura 3- Diagrama esquemático para condições de flambagem: (a) Limite fixo de compressão, (b) limite livre de compressão e (c) dobragem .....	43
Figura 4- Curva carga versus deformação para (a) extremidades fixas e (b) extremidades livres .....	44
Figura 5- Distribuição de tensão e pressão para um corpo de prova comprimido entre placas .....	47
Figura 6- Curva teórica de calibração do ensaio do anel.....	49
Figura 7- Fluxograma da metodologia .....	51
Figura 8- Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração.....	53
Figura 9- Desenho esquemático da variação das dimensões do anel durante o ensaio de compressão .....	53
Figura 10- Representação do corpo de prova para o ensaio do anel .....	54
Figura 11- Desenho mecânico da matriz .....	56
Figura 12- Desenho mecânico do encaixe .....	56
Figura 13- Desenho mecânico da guia .....	57
Figura 14- Montagem do conjunto projetado .....	57
Figura 15- Matriz de conformação simulada .....	59
Figura 16- Modelo do tubo simulado: a) primeiro estágio. b) segundo estágio. ....	59
Figura 17- Tipo de elementos finitos biblioteca ABAQUS .....	60
Figura 18- Discretização do tubo .....	60
Figura 19- Representação esquemática da metodologia de união de tubo a chapa metálica a partir de conformação mecânica. (a) primeiro estágio. (b) segundo estágio .....	62
Figura 20- Montagem do teste prático: primeiro estágio .....	63
Figura 21- Mecanismo para travamento rotacional da chapa unida ao tubo .....	64
Figura 22- Variações de chapas unidas ao tubo por conformação mecânica ...	65
Figura 23- Conjunto montado com as colunas para testes experimentais .....	66
Figura 24- Dispositivo para encaixe no torquímetro .....	67

<b>Figura 25- Ensaio de torção- (a) Dispositivo para ensaio de torção. (b) Montagem do conjunto.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 26- Regiões da junção ensaiadas .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 27- Curvas de tensão versus deformação AISI 1006.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 28- Curva Tensão versus deformação do aço AISI1006 .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 29- Anéis após ensaio de compressão .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 30- Resultado da curva de calibração do teste do anel.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 31- Resultado da simulação numérica do modelo .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 32- Resultado parcial da deformação do tubo no primeiro estágio.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 33- Tubo conformado: Primeira etapa: a) Resultado experimental b) Resultado simulado.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 34- Resultado simulado do segundo estágio: a) Vista de corte do conjunto. b) Geometria final do tubo. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 34- Resultado inicial da junção de tubo em chapa metálica por conformação mecânica .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 35- Resultado experimental de junção de tubo em chapas metálicas....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 36- Resultados simulados e experimentais do processo de junção de tubos a chapa por conformação mecânica.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura37- Geometria final do tubo.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 38- Resultados finais para junções de tubos em diversos tipos de chapas.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 39- Vista da região interna da junção do tubo em chapa de aço inox....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 40- Variação do formato do grão nas seções do tubo.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 41- Curva força versus deformação simulada numericamente: a) primeiro estágio b) segundo estágio. ....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 42- Teste operacional com ensaio de torção.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 43- Junção de tubos em chapas de diferentes materiais e geometrias.</b>	<b>86</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço 1006 segundo norma AISI .....	38
Tabela 3- Resultado da análise química por espectrometria óptica .....	69
Tabela 4- Resultado da análise química por espectrometria óptica AISI 1006 ..	70
Tabela 5- Rugosidade média dos componentes ensaiados .....	71
(continua) .....	71
Tabela 5- Rugosidade média dos componentes ensaiados .....	72
Tabela 6- Dimensões dos corpos de prova.....	72
Tabela 7- Variações percentuais na altura e no diâmetro interno dos corpos de prova.....	73
Tabela 8- Comparação das dimensões finais do tubo após a compressão no primeiro estágio.....	76
Tabela 9- Dimensões finais do tubo.....	80
Tabela 10- Microdureza média das regiões do tubo.....	82

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EA	Energia absorvida
SAW	Submerged Arc Welding
SEA	Energia absorvida específica
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MEF	Método dos Elementos Finitos
RP	Pontos de referência

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\gamma$	Razão de espessura do tubo
$\sigma_0$	Tensão média de escoamento (MPa)
$\rho$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta$	Eficiência estrutural
$\Psi$	Fator de eficiência de absorção de energia
$\sigma_t$	Tensão de ruptura do material (MPa)
$\mu$	Coeficiente de atrito
$\tau$	Tensão de cisalhamento (MPa)
$\sigma_n$	Tensão normal (MPa)
$\Delta l$	Variação percentual da altura
$\Delta \emptyset$	Variação do diâmetro (mm)
$\emptyset$	Diâmetro interno final (mm)
$\emptyset_0$	Diâmetro interno inicial (mm)
$\sigma$	Tensão efetiva (MPa)
$\varepsilon_V$	Taxa de deformação volumétrica (m <sup>3</sup> /s)
$\delta u_i$	Variação arbitrária de integração
$\delta$	Variação
$\delta$	Deformação

## LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

$h$	Altura (mm)
$R_i$	Raio interno (mm)
$D$	Diâmetro (mm)
$T$	Espessura (mm)
$F_{av}$	Força média de esmagamento (N)
$F$	Max Pico de força (N)
$S_{el}$	Área da seção transversal ( $mm^2$ )
$A$	Área da seção transversal do tubo submetida à força axial ( $mm^2$ )
$h$	Altura final (mm)
$h_0$	Altura inicial (mm)
$P$	Pressão obtida no manômetro no final do processo ( $kg/cm^2$ )
$F$	Força de deformação (N)
$A$	Área da camisa do cilindro superior ( $mm^2$ )
$H_0$	Altura antes do ensaio (mm)
$D_0$	Diâmetro externo antes do ensaio (mm)
$d_0$	Diâmetro interno antes do ensaio (mm)
$H$	Altura após o ensaio (mm)
$D$	Diâmetro externo após do ensaio (mm)
$d$	Diâmetro interno após do ensaio (mm)
$V$	Volume ( $m^3$ )
$K$	Constante positiva
$S_F$	Superfície de integração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>31</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>32</b>
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	32
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	32
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>33</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>35</b>
<b>2.1 Tubos: Definição e aplicações</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2 Processos de fabricação de tubos</b> .....	<b>36</b>
2.2.1 <i>Soldagem</i> .....	36
2.2.2 <i>Laminação</i> .....	36
2.2.3 <i>Extrusão</i> .....	37
2.2.4 <i>Fundição</i> .....	37
<b>2.3 Materiais de tubos</b> .....	<b>37</b>
2.3.1 <i>Materiais para fabricação de tubos</i> .....	37
2.3.2 <i>Aplicações</i> .....	38
2.3.3 <i>Junções em tubos</i> .....	39
2.3.4 <i>Junções por solda</i> .....	40
2.3.5 <i>Guias mecânicas</i> .....	40
2.3.6 <i>Junções por conformação</i> .....	40
<b>2.4 Solicitações em componentes estruturais fabricados com tubos</b> .....	<b>41</b>
2.4.1 <i>Esforços atuantes em estruturas tubulares</i> .....	41
2.4.2 <i>Flambagem</i> .....	42
2.4.3 <i>Absorção de energia</i> .....	44
<b>2.5 Métodos dos elementos finitos aplicado às simulações numéricas</b> .....	<b>45</b>
2.5.1 <i>Método dos Elementos Finitos</i> .....	46
2.5.2 <i>Atrito na conformação mecânica</i> .....	47
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>51</b>
<b>3.1 Caracterização do material</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2 Ensaio de tração</b> .....	<b>52</b>
<b>3.3 Ensaio do anel</b> .....	<b>53</b>
<b>3.4 Pré-projeto da junção</b> .....	<b>55</b>
<b>3.5 Simulação numérica</b> .....	<b>58</b>
3.5.1 <i>Pré- processamento</i> .....	58
3.5.2 <i>Condições de contorno</i> .....	61
<b>3.6 Testes experimentais</b> .....	<b>62</b>
3.6.1 <i>Testes experimentais iniciais</i> .....	63
3.6.2 <i>Testes experimentais finais</i> .....	65

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 Caracterizações do material.....</b>	<b>69</b>
<b>4.2 Curva tensão versus deformação.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3 Ensaio do anel.....</b>	<b>71</b>
<b>4.4 Deformação no tubo de parede fina com costura: Primeiro estágio.....</b>	<b>74</b>
4.4.1 <i>Resultado simulado: Primeiro estágio.....</i>	<i>74</i>
4.4.2 <i>Resultado experimental: Primeiro estágio.....</i>	<i>75</i>
<b>4.5 Deformação no tubo de parede fina com costura: Segundo estágio.....</b>	<b>77</b>
4.5.1 <i>Resultado simulado: Segundo estágio.....</i>	<i>77</i>
4.5.2 <i>Resultado experimental: Segundo estágio.....</i>	<i>78</i>
<b>4.6 Análises de microdureza da junção.....</b>	<b>82</b>
<b>4.7 Forças de conformação.....</b>	<b>83</b>
<b>4.8 Testes em aplicação.....</b>	<b>85</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>87</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO A - Certificado de calibração nº 175116 emitido pelo SENAI/MG.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO B- Certificado De Ensaio De Caracterização Do Aço AISI 1006.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tubos metálicos de paredes finas possuem vastas aplicações nas áreas das engenharias das indústrias naval, construção civil e automobilística. Em muitas dessas aplicações, são necessárias as junções dos tubos que podem ser obtidas a partir de processos de soldagem ou por guias, dependendo da finalidade desejada e da resistência mecânica requerida, segundo Liu *et al.* (2017).

Entretanto, as junções comumente utilizadas apresentam obstáculos que tornam este processo, muitas vezes, caro e trabalhoso. Quando realizadas por soldagem, os impasses estão relacionados com a possível alteração das propriedades dos materiais devido ao aquecimento e a dificuldade de junção de materiais dissimilares que atendam às especificações necessárias. Por outro lado, a utilização de guias aumenta os custos do processo e peso dos componentes, além de ser necessária a escolha de materiais que apresentem a resistência mecânica exigida no projeto e de ferramentas para sua instalação.

Devido aplicação e importância comercial, muito tem se pesquisado a respeito dos processos de deformação dos tubos com paredes finas, tendo como parâmetros de avaliações a energia absorvida durante o processo, a tensão exercida durante a deformação e a variação das propriedades mecânicas nas regiões onde há alteração dimensional e geométrica na estrutura conformada. Segundo Grupta *et al.* (2014), os estudos são voltados para a otimização de estruturas, geometrias e quantidade de material necessária para a fabricação de tubos, e na redução de falhas ocorridas durante o processo, tais como dobras, trincas, análise de impacto e resistência dos materiais utilizados.

Dentre os processos de conformação a frio de tubos de paredes finas estão a redução e expansão da seção transversal, as inversões interna e externa, e o dobramento, cada um com os seus parâmetros e métodos. De acordo com Rosa *et al.* (2004), os principais parâmetros da inversão de tubos são identificados como a influência do lubrificante durante a conformação e o comportamento dos esforços atuantes na peça. Já no processo de dobramento e expansão, segundo Abolfathi e Nia (2018), as pesquisas atuais estão relacionadas com a força média atuante, a absorção de energia e o coeficiente de atrito durante a deformação. Por fim, a conformação de tubos por inversão, por Gupta (2014), também é um processo muito utilizado para a produção de peças de absorção de energia e, além dos parâmetros

aqui já citados, o raio de curvatura e o efeito de endurecimento por tensão do material do tubo conformado também são importantes aspectos para o estudo e modelos de simulação.

Neste contexto, conforme Kozlovsky *et al.* (2014), a evolução dos estudos numéricos de simulação vem como uma ferramenta de grande importância, pois permite o estudo dos processos de deformação variando os parâmetros e as características dimensionais e mecânicas dos tubos ensaiados, além de possibilitar estudos dos materiais durante e após a conformação.

A partir dessas informações este trabalho apresenta um estudo de junção de tubos de aço com costura de baixo carbono por conformação a frio. Para tal, foram realizadas simulações numéricas do processo no software Abaqus/CAE, a partir do Método de Elementos Finitos, para determinação da carga necessária para a conformação e análise dos esforços atuantes, e posteriormente, a execução experimental com o objetivo de validar o método proposto.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo Geral*

Estudar, por meio de testes numéricos e práticos um processo de deformação para se obter junção de tubos de aço com costura em baixo teor de carbono. O processo de deformação foi realizado por conformação mecânica a frio.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- a) Projetar uma estrutura de junção de chapas com a utilização de tubos deformados plasticamente;
- b) Simular o processo de conformação a frio utilizando o método dos Elementos Finitos utilizando o software Abaqus;
- c) Avaliar a microdureza nas região do tubo sem deformação e onde houve deformação;
- d) Avaliar o comportamento da junção ao aplicar esforços de torque;
- e) Verificar a variação do formato do grão na região deformada;
- f) Construir a estrutura estudada a fim de validar o modelo simulado.

## 1.2 Justificativa

Na maioria das aplicações de tubos são necessárias junções destes elementos para compor a estrutura final. Nestes casos, a união pode ser feita por juntas mecânicas ou por soldagem e sua natureza depende da aplicação das estruturas e dos materiais utilizados. A soldagem é a forma mais antiga e tradicional de união de tubos, com aplicação predominante em tubulações industriais de grandes e pequenas escalas e em estruturas metálica. Já a junção por elementos mecânicos, por exemplo, guias, abraçadeiras, cotovelos, entre outros, tem uso predominante em tubulações de irrigação e transmissão de água potável. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS, 2013)

Porém, estes processos apresentam desafios que devem ser solucionados para que sejam garantidas as qualidades de fabricação e operacionais necessárias em cada aplicação. No caso da soldagem, quando são utilizados materiais dissimilares, a dificuldade está relacionada com a irregular expansão térmica devido à diferença dos coeficientes de expansão térmica de cada um dos materiais, com os distintos pontos de fusão e com as tensões residuais resultantes do processo, de acordo com Huang *et al.* (2014). Já para a escolha das junções mecânicas, segundo Alves, Silva e Martins (2017), há restrições de natureza tecnológicas e econômicas que devem atendidas. As tecnológicas são três: espaciais relacionadas ao peso, tamanho e geometria das peças envolvidas, funcionais relacionadas às condições de trabalho e as técnicas, associadas ao tipo de material, condições ambientais e de trabalho. Já as restrições econômicas são relativas à disponibilidade, facilidade e custo de implementação e produção.

Considerando todos esses itens condicionantes, este trabalho realizou uma metodologia inovadora para maximizar o processo de fabricação de junções de tubos de aço carbono com costura utilizando conformação a frio e minimizar o custo do produto final. Inicialmente, um modelo foi simulado numericamente pelo método dos elementos finitos no software Abaqus utilizando como dados de entrada as informações de tensão e deformação verdadeiras provenientes do ensaio de tração e tribológicas do material e, posteriormente, a junção foi construída experimentalmente para a validação dos resultados.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordadas as bases teóricas que se relacionam com o objeto de estudo dessa pesquisa experimental. Inicialmente, se discorre sobre conceitos gerais da definição de tubos e suas aplicações e aprofunda-se nos processos de fabricação de tubos, tais como trefilação, laminação, extrusão e fundição. Em seguida, são apresentados os tipos junções utilizadas em tubos, as solicitações atuantes nestas estruturas e os processos de conformação de tubos no desenvolvimento de produtos. Por fim, é apresentado o método de elementos finitos na simulação numérica utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

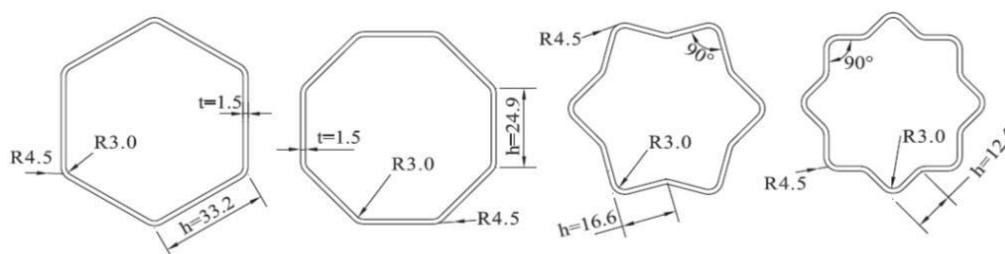
### 2.1 Tubos: Definição e aplicações

A definição de tubo e suas especificações podem ser encontradas em normas fornecidas por vários institutos, sendo as principais normas da ABNT, ASTM e DIN. Estas são separadas pelo processo de fabricação, pela aplicação e pelos requisitos da qualidade final do produto.

Telles (1999) define tubo como um componente oco comprido utilizado, na maioria das aplicações, para transporte de fluidos, em estruturas na construção civil, indústria petrolífera e automobilística. São fabricados a partir de materiais metálicos, polímeros e cerâmicos.

Para os tubos metálicos de parede fina, existem diversas formas geométricas para as seções transversais. Apesar de serem mais comumente utilizados perfis circulares, quadrados ou retangulares, Fan, Lu e Liu (2013) analisaram a absorção de energia na compressão axial em tubos de diversas seções transversais, como apresenta a Figura 1:

**Figura 1-Variadas seções transversais de tubos metálicos de paredes finas**



Fonte: Fan, Lu e Liu, (2013).

Segundo os autores, devido ao alto grau de versatilidade da geometria da seção transversal e à eficiência das aplicações de tubos de paredes finas, houve um aumento nas pesquisas sobre a absorção de energia e explosão destas estruturas.

## **2.2 Processos de fabricação de tubos**

A variedade dos processos de fabricação de tubos está relacionada com as diferentes especificações dos materiais, com os variáveis materiais e suas capacidades de deformação. E as aplicações e usos de cada tipo de tubo são predeterminados de acordo com a especialização dos processos de fabricação, segundo Kirilenko *et al.* (2014).

Neste tópico, são abordados os principais processos de fabricação em linha seqüencial utilizados na indústria, são eles: soldagem, laminação, extrusão e fundição.

### *2.2.1 Soldagem*

Os tubos de aço com costura podem ser produzidos por meio de soldagem de chapas previamente deformadas em arcos circulares. De acordo com Lothhammer *et al.* (2016), dois processos de soldagem são utilizados para a fabricação de tubos para linhas de transmissão de gás e óleo, o SAW, soldagem por arco submerso, e solda por resistência elétrica. A primeira é indicada para a produção de tubos de maiores diâmetros, enquanto a segunda, menores diâmetros e paredes finas. Em seu estudo, Cimellaro e Domaneschi (2017) tratam de outra aplicação de tubos de aços soldados, em tubulações de aço de andaimes.

### *2.2.2 Laminação*

A laminação destina-se à produção de tubos de aço carbono e aços de baixa liga sem costura, com diâmetros na faixa de 16 mm a 168 mm e com espessuras entre 2,3 mm e 16 mm, conforme Kirilenko *et al.* (2014).

Ainda segundo Kirilenko *et al.* (2014), devido à constância e o padrão do processo, a organização do processo de laminação de tubos permite maior controle de produção, redução dos níveis de estoque de ferramentas, ocasionando em maior produtividade unitária de fabricação. A tecnologia aplicada à laminação possibilita a fabricação de grandes lotes, com variados diâmetros e faixas dimensionais.

### 2.2.3 Extrusão

Conforme Tang *et al.* (2018), durante a extrusão, as paredes internas do tubo sofrem deformações plásticas que acarretam em modificações em sua microestrutura, como, por exemplo, na morfologia e tamanho de grão. Como consequência, algumas propriedades mecânicas sofrem alterações e estas devem ser estudadas para que sejam garantidas as características do material exigidas em projeto.

Segundo os autores, tubos de extrusão são utilizados em estruturas de transporte de fluidos como líquidos, gases e lamas. Eles devem, além de conduzir estes fluidos, suportar a pressão interna exercida em suas paredes.

### 2.2.4 Fundição

Os tubos sem costura podem ser fabricados pelo processo de fundição por deslizamento ou por fundição centrífuga. Um desafio apresentado por este processo de fabricação é a falta de homogeneidade microestrutural do material devido à variação do assentamento das partículas de diferentes tamanhos durante o vazamento do metal fundido. Além disso, a rugosidade do produto ao final do processo também pode apresentar limitações quanto ao uso de tubos produzidos a partir da fundição, de acordo com Kim *et al.*(2002).

## 2.3 Materiais de tubos

Atualmente, inúmeros materiais são utilizados para a fabricação de tubos e seus componentes e as diversas aplicações destes estão diretamente relacionadas com os materiais que os compõem e suas propriedades mecânicas. Neste tópico são apresentados alguns desses materiais e suas aplicações.

### 2.3.1 Materiais para fabricação de tubos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) há uma grande diversidade de materiais para a fabricação de tubos e cada um deles é normatizado de acordo com o processo de fabricação, as propriedades fornecidas e a aplicação

destas estruturas. Dentre esses materiais estão os metálicos e os não metálicos, porém, neste trabalho, objetivou-se o estudo de tubos de aço com costura de parede fina.

A norma NBR 8261 determina especificações de perfis tubulares de aço carbono com ou sem costura, formados a frio para usos estruturais. Nesta norma estão os requisitos de porcentagem de composição química dos principais elementos como carbono, fósforo, enxofre, manganês e cobre-, as tolerâncias dimensionais e os ensaios necessários para determinação das propriedades mecânicas dos materiais.

A norma internacional AISI normatiza os materiais de aços para estruturas provindos de diversos processos de fabricação. Para aço de baixo teor de carbono produzidos por meio de laminação a quente, a norma caracteriza o aço AISI 1006 com a composição química conforme Tabela 1:

**Tabela 1- Composição química do aço 1006 segundo norma AISI**

Componente Químico	Percentual
Carbono, C	<= 0,080%
Ferro, Fe	99,43 - 99,75%
Manganês, Mn	0,25 - 0,40%
Fósforo, P	<= 0,040%
Enxofre, S	<= 0,050%

**Fonte: ASM Metals Reference Book (1993).**

Muitas pesquisas estão sendo realizadas no campo de materiais metálicos para fabricação de tubos para que as estruturas sejam otimizadas progressivamente e que as propriedades mecânicas sejam cada vez mais aperfeiçoadas, tornando, assim, os projetos produtivos e eficientes. Como no trabalho de Angelina Jay *et al.* (2016), que foi pesquisado um novo processo de fabricação de tubos de aço cônicos soldados em espiral, com análises da resistência à flexão dos tubos nas regiões soldadas em variadas configurações de dimensões das estruturas.

### 2.3.2 Aplicações

Os tubos estruturais estão disponíveis no formato de seções circulares, quadradas e retangulares e são utilizados, principalmente, em pontes, torres, coberturas, estruturas metálicas, industriais e automobilísticas.

Entre as aplicações de tubos, podem-se citar os de ligas de alumínio, usados

na produção e operações de tubos para perfuração na indústria petrolífera. Kondrat"ev *et. al.* (2014) estudou a variação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio D16T e 1953T1 durante o aquecimento recorrente de sua operação de perfuração. Segundo os autores, é necessário o controle da temperatura e do tempo nos processos de produção e dos parâmetros operacionais para que as propriedades mecânicas dos tubos de alumínio sejam garantidas.

De acordo Cimellaro e Domaneschi (2017), um importante emprego de tubos metálicos de aço em componentes estruturais na indústria de construção civil é em andaimes, pois estes permitem a flexibilidade de montagem e podem ser utilizados em obras de fachadas complexas devido à versatilidade de seus módulos. Uma das variações dos andaimes é o multidirecional, indicados para trabalhos mais complexos e que exigem maiores resistência a esforços, outra são os pré-fabricados, estruturas mais comumente usadas na construção civil. Os autores analisaram estruturas de andaimes feitas de aço submetidas a esforços verticais, a ocorrência de flambagem e a carga necessária para a ocorrência deste fenômeno. Porém, a utilização de andaimes pode apresentar alguns riscos se medidas de segurança e todas as condições de projeto não forem atendidas.

Segundo Blazik-Borowa e Szer (2015), a ocorrência de acidentes envolvendo a utilização de andaimes está relacionada, também, com o uso de elementos inadequados para a sua construção, como peças de junções de qualidade inferior ou sem a resistência necessária para suportar a carga de operação, o que diminui a capacidade e a segurança dos andaimes, aumentando os riscos para os trabalhadores que o utilizam.

### 2.3.3 *Junções em tubos*

Este tópico refere-se aos métodos de junções de tubos na fabricação de estruturas metálicas e componentes mecânicas. São abordadas sucintamente a solda e as guias mecânicas e com mais detalhes, a conformação de tubos em junções, que é o tema deste trabalho.

#### 2.3.4 Junções por solda

Em muitas aplicações de tubos nas indústrias petrolífera, automobilística e outras áreas industriais, a aplicação de tubos necessita de junções em suas estruturas, e um dos métodos mais utilizados é união por solda conforme Skopinskii; Berkov e Rusanov (2007).

O principal problema apresentado na junção de tubos por soldas, segundo Bortsov *et al.* (2013), é o surgimento da zona termicamente afetada (ZTA), pois altera as propriedades mecânicas dos materiais, tornando a região mais susceptível à fratura.

#### 2.3.5 Guias mecânicas

As junções mecânicas são importantes componentes para união de tubos em estruturas metálicas na atualidade. Entre elas estão os parafusos, rebites e guias. Estes elementos possuem a função de exercer forças de acoplamento e momentos entre as partes unidas e de dissipar e absorver energias localizadas quando são aplicadas cargas de operação, de acordo com Eritem, Lee e Polycarpou (2012).

Segundo Alves e Martins (2013), os fixadores mecânicos podem apresentar limitações quanto aos problemas corrosivos nas junções, irregularidades na montagem e à queda de resistência a esforços máximos suportados.

#### 2.3.6 Junções por conformação

Entre os métodos de junção de tubos, a deformação plástica é uma das opções que apresenta maior potencial de fabricação, além de possuir alta produtividade, baixo custo e permitir maior versatilidade de material. Principalmente se comparada à soldagem, a união por deformação plástica consome menos energia, não necessita de metal de adição e não produz a ZTA, gerando alterações nas propriedades do material na região da união, conforme Silva *et al.* (2015).

Segundo Alves e Martins (2013), nas junções onde são utilizados tubos deformados por conformação mecânica utilizando matrizes, três mecanismos são responsáveis pela deformação plástica do material, são eles: deformação plástica, atrito e flambagem. A deformação plástica gera a dobra na extremidade do tubo de parede fina, esta dobra é limitada pela extremidade das cavidades da matriz,

enquanto o atrito controla o fluxo do material durante a deformação. Por fim, a pressão exercida durante a conformação axial da estrutura não deve exercer a carga crítica de flambagem durante o processo, para que não ocorra a fratura na região deformada do tubo

Portanto, pode-se afirmar que unir tubos por meio da deformação plástica é um método promissor e justifica as pesquisas e investigações quanto aos parâmetros e às condições de contorno deste processo, o que se objetiva neste trabalho.

## **2.4 Solicitações em componentes estruturais fabricados com tubos**

Quando uma unidade estrutural é projetada, são necessários estudos das suas propriedades mecânicas e a garantia que elas atendam aos requisitos exigidos em projeto. Também é preciso analisar o seu comportamento durante a atuação de esforços durante a deformação para que seja possível prever os resultados finais com mais segurança, tornando o projeto mais eficiente e assertivo.

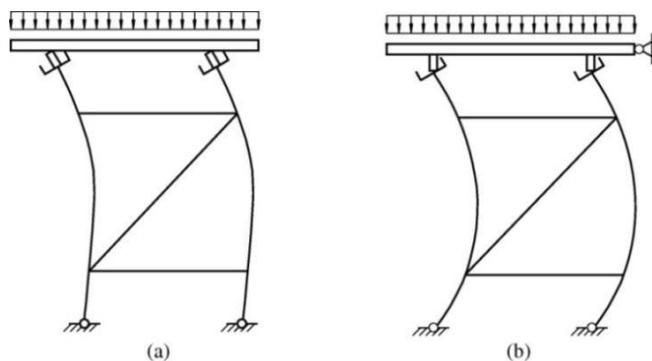
A junção proposta neste trabalho sofrerá esforço de compressão axial durante o seu processo de fabricação, cabendo aqui uma exposição dos efeitos e comportamentos ocorridos durante este processo.

### *2.4.1 Esforços atuantes em estruturas tubulares*

Dentre as estruturas produzidas a partir de junções de tubos de aço, objetiva-se estudar neste trabalho as estruturas mecânicas, com destaque para a aplicação em andaimes. Dito isto, é necessário analisar os esforços atuantes nestes sistemas, pois a rigidez das juntas de seus componentes e as propriedades mecânicas de seu material são responsáveis pelas principais fontes de incertezas nos projetos dos andaimes, conforme Ilcik, Arora e Dolejs (2016).

Em 2017, Reynolds, Zhang e Rasmussen, investigaram a rigidez rotacional em sistemas de andaimes considerando situações onde apenas o topo do andaime era fixado ou mesmo sem fixação, o que resultou em um momento aplicado na extremidade superior que proporcionou à estrutura uma rotação entre as duas superfícies, como apresenta a Figura 2.

**Figura 2 – Deformações em andaimes submetidos a esforços no topo (a) lateral livre (b) lateral fixa no topo**



Fonte: Reynolds *et. al.* (2017).

No estudo sobre o mecanismo das forças atuantes em andaimes em operação, Chen, Ding e He (2017) concluíram que os andaimes não estão sujeitos a cargas uniformes, mas sim a cargas locais que são distribuídas e transferidas para seus componentes. Entre os esforços atuantes nas hastes da estrutura, estão a força axial e o momento de flexão. Os autores concluem o trabalho afirmando que as hastes horizontais além de fornecerem suporte para as verticais, também são responsáveis por fortalecer toda a estrutura afetando diretamente na rigidez lateral da armação. A fim de evitar uma falha de colapso no andaime, que é propagado pelas camadas da construção, deve-se reforçar com camadas de hastes no fundo da moldura e em torno da região de aplicação de cargas locais.

#### 2.4.2 Flambagem

Para trabalhos em tubos longos com o comprimento maior que o raio, utiliza-se o modelo físico baseado na equação (1), apresentada por Kozlovsky *et al.* (2014):

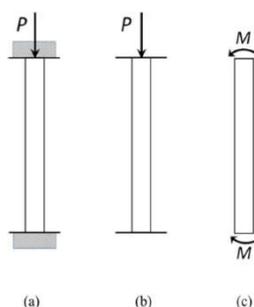
$$\gamma = \frac{h}{R_i} \quad (1)$$

Sendo  $h$  e  $R_i$  a altura e o raio interno do tubo, respectivamente. Para que não ocorram problemas de convergência, Kozlovsky *et al.* (2014) indicaram a razão entre a altura e o raio de  $\gamma \geq 0,333$ , pois a espessura do tubo influencia diretamente na rigidez do material quando submetidos às tensões axiais. Em maiores espessuras a resistência à flexão é maior, caso a resistência à flexão não seja suficiente, ocorrerá a flambagem.

Segundo Wang e Qiu (2017), o mecanismo de flambagem pode ser classificado como flambagem progressiva e flambagem global e é de grande importância estudá-lo em tubos longos de baixa relação diâmetro/espessura sujeitos à compressão axial. A flambagem global ocorre como uma transição da progressiva, aplicável em casos onde  $\frac{D}{t} > 40$ , onde  $D$  é o diâmetro e  $t$  é a espessura do tubo. Os autores salientaram que existe uma grande semelhança do mecanismo de flambagem global e com a dobra, que podem ocorrer em tubos circulares sob carga axial.

Existem três condições para que ocorra a flambagem, como apresentado na Figura 3

**Figura 3- Diagrama esquemático para condições de flambagem: (a) Limite fixo de compressão, (b) limite livre de compressão e (c) dobragem**



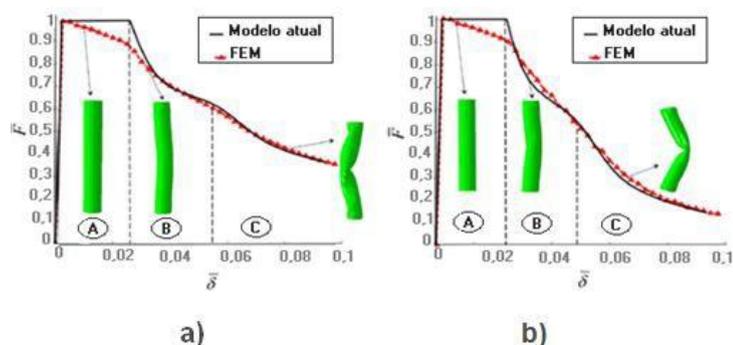
Fonte: Wang e Qiu (2017).

Na configuração de extremidades fixas limitando a compressão ou de compressão livre nas extremidades, ocorrem três diferentes estágios de flambagem, como resposta ao carregamento axial, por Wang e Qiu (2017).

- a) Fase de Compressão Uniforme;
- b) Fase de deformação localizada;
- c) Fase de flexão.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos por Wang e Qiu (2017) após simulação, utilizando o método de Elementos Finitos, da compressão axial, sendo possível diferenciar as três fases de deformação ao longo da aplicação da força  $F$  nas condições de extremidades fixas e livres para cada deformação gerada  $\delta$ . As regiões A, B e C na curva representam, respectivamente, as fases de compressão uniforme, de deformação localizada e de flexão

**Figura 4- Curva carga versus deformação para (a) extremidades fixas e (b) extremidades livres**



Fonte: Adaptado de Wang e Qiu (2018).

Na fase de compressão uniforme, a carga axial aplicada gera uma reação homogênea na estrutura, devido à uniformidade da seção transversal do tubo, já na segunda fase, surgem deformações localizadas devido ao aumento do deslocamento, mas sem dobras visíveis. Somente na terceira fase ocorrem dobras nas estruturas do tubo, e nos casos em que a extremidade é livre, ocorre ainda, a separação da extremidade da superfície, atuando, posteriormente, somente a flexão pura.

### 2.4.3 Absorção de energia

Muitas aplicações de tubos de paredes finas na engenharia são em estruturas que necessitam de absorver energia durante impactos ou como membros da parte estrutural.

Portanto, segundo Yamashita, Kenmotsu e Hattori (2012), um importante aspecto a ser analisado quando ocorre deformação devida ação de esforços axiais é a absorção de energia da estrutura durante o processo. Este parâmetro influencia diretamente no modo como a deformação acontecerá e na previsibilidade de ocorrência de falhas e flambagem do tubo, tornando possível evitá-las.

Em seu trabalho, Fran, Lu e Liu (2013) afirmam que a energia absorvida durante a deformação de uma estrutura tem suas características baseadas nos seguintes fatores: Força média de esmagamento  $F_{av}$ , pico de força ( $F_{max}$ ), energia absorvida  $EA$  e energia absorvida específica ( $SEA$ ). Para analisar estes parâmetros, eles variaram no estudo a forma dos tubos submetidos à força compressiva na

direção axial, alterando o número de arestas dos mesmos e comparando-os com o tubo circular.

O cálculo da força média, para o tubo circular é dada pela equação (2):

$$F_{av} = 72,3 * \frac{D}{t}^{0,32} * \frac{\sigma_0 t^2}{4} \quad (2)$$

Sendo, neste caso,  $\sigma_0$  é a tensão média de escoamento do material. Já a SEA, energia absorvida por unidade de massa da estrutura deformada é dada pela equação (3) e tem por unidade J/g.

$$SEA = \frac{Fdl}{\rho * t * S * l} \quad (3)$$

Onde  $\rho, t, S$  e  $l$  são, respectivamente, a densidade, a espessura, a área da seção transversal e comprimento do tubo.

Ainda segundo Fran, Lu e Liu (2013), há dois fatores que também estão úteis para o cálculo da energia dissipada, a eficiência estrutural,  $\eta$ , conforme equação (4):

$$\eta = \frac{F_{av}}{(A\sigma_0)} \quad (4)$$

Sendo  $A$  a área da seção transversal do tubo submetida à força axial.

E o fator de eficiência de absorção de energia,  $\psi$ , segundo a equação (5).

$$\psi = \frac{3 * F_{av}}{4A\sigma_0\sigma_t} \quad (5)$$

Com  $\sigma_t$  sendo a tensão de ruptura do material.

## 2.5 Métodos dos elementos finitos aplicado às simulações numéricas

Neste tópico é estudado o Método dos Elementos Finitos a ser utilizado na simulação numérica, onde são abordadas definição, aplicações e os parâmetros importantes, como o coeficiente de atrito.

### 2.5.1 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos surgiu nos anos 1960 e, desde então, tem sido amplamente empregado na indústria. É reconhecido como um método viável e aceitável de simulação, com a finalidade de minimizar os custos dos processos a partir da substituição do método de tentativa e erro. Existem vários programas que o utilizam e a escolha do programa ideal está diretamente relacionada com o processo estudado e suas necessidades específicas. Segundo Corrêa e Schaeffer (2013), é necessário conhecer as condições de trabalho durante o processo de conformação para que os resultados da simulação numérica fornecidos sejam o mais real e fidedigno possíveis.

O emprego das simulações numéricas nos processos de conformação possibilita análises de deformações, defeitos, falhas, além de alterações em parâmetros inerentes aos processos. É possível prever a geometria final e variações das propriedades mecânicas ao longo do processo, bem como alterar os parâmetros a fim de tornar o processo mais produtivo, com redução custos e erros de fabricação.

De acordo com Park, Vantyne e Moon (2007), durante a simulação numérica dos processos de conformação, uma das etapas é a discretização do elemento de estudo a partir da geração de malhas pelo usuário do programa. Pode-se, também, realizar um processo de remalha, ou seja, a formação de novas malhas em regiões onde ocorrem deformações expressivas. O remalhamento torna o processo mais eficiente, pois mantém a malha grosseira onde não ocorrem grandes deformações e refina nas superfícies que necessitam de maior detalhamento.

Na solução das variáveis nos pontos nodais, aplicando o MEF, a velocidade primária é considerada constante e atuante diretamente na taxa de deformação volumétrica. A equação básica para a formulação do método dos elementos finitos está apresentada na equação (6), conforme Kobayashi [11].

$$\delta \Pi = \int_V \sigma \delta \varepsilon dV + K \int_V \varepsilon_V \delta \varepsilon_V dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (6)$$

Sendo  $V$  é o volume delimitado pela superfície  $S_{F,\sigma}$  é a tensão efetiva e  $F_i$  representa a força aplicada. A taxa de deformação volumétrica,  $\varepsilon_V$ , é regulada pela

constante positiva  $K$ , determinando a incompressibilidade do processo. Já  $\delta u_i$  é considerada como variação arbitrária, enquanto  $\delta \varepsilon$  e  $\delta \varepsilon_V$  são variações de taxa de deformação derivadas de  $\delta u_i$ .

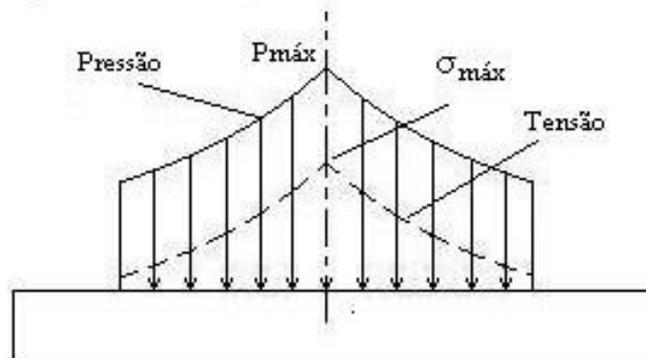
Devido à sua importância como parâmetro nos processos de conformação mecânica, o tópico a seguir aborda o coeficiente de atrito aplicado na simulação durante o processo de conformação mecânica.

### 2.5.2 Atrito na conformação mecânica

As primeiras pesquisas para determinar o coeficiente de atrito presente na deformação mecânica dos materiais foram datadas na década de 60. Em 1964, Male e Cockcroft determinaram experimentalmente o coeficiente de atrito por meio de calibração quantitativa do teste do anel, assumindo o coeficiente de atrito constante, que consiste em um ensaio de compressão com o corpo de prova em forma de um disco. Os autores propuseram a construção de corpos de prova em formato anelar com a relação diâmetro externo x diâmetro interno x altura em 6:3:2, em condições ensaiadas semelhantes às aplicadas nos estudos experimentais.

A distribuição de tensões nos corpos de prova durante o ensaio ocorre segundo a Figura 5, apresentada no trabalho de Garcia *et. al.*, *apud* Bueno *et. al.*, (2010).

**Figura 5- Distribuição de tensão e pressão para um corpo de prova comprimido entre placas**



Fonte: Garcia *et. al.*, *apud* Bueno *et. al.*, (2010).

No ano de 1972, Pierre, Gurney e Male modelaram matematicamente a curva de calibração do teste do anel baseando nos trabalhos experimentais já desenvolvidos. Os autores compararam as curvas de calibração obtidas experimentalmente e teoricamente para ligas de alumínio alterando as proporções das dimensões dos corpos de prova em formato anelar, obtendo resultados convergentes. Um aspecto importante deste ensaio é que os resultados obtidos dependem apenas da deformação dos corpos de prova que geram variações na altura e no diâmetro interno dos anéis e são independentes das propriedades mecânicas do material.

Nos processos de conformação mecânica, devido aos movimentos relativos entre as peças, é importante o estudo do atrito e sua influência. No trabalho de Alves, Dias e Martins (2011) foi aplicado o princípio de que o atrito depende da rugosidade apresentada nas superfícies e pode gerar efeitos desfavoráveis como desgaste da região de contato entre ferramenta/peça, porém, em outros casos, é necessário para facilitar o contato durante o processo de conformação, como ocorre na laminação, por exemplo.

Portanto, a determinação do coeficiente de atrito atuante durante o processo é uma etapa fundamental para que sejam determinadas as tensões exercidas no par tribológico ferramenta/peça.

Bueno *et. al.* (2010), determinaram o coeficiente de atrito experimentalmente de uma liga de alumínio AA6351 a partir do Teste do Anel, variando as condições de lubrificação à base de grafite, sintéticas e à base de óleo, sendo o lubrificante sintético o que apresentou melhor desempenho.

O atrito pode ser expresso em forma de um coeficiente e seu valor teórico pode ser calculado a partir da equação (7), conforme apresentado no trabalho de Bueno *et. al.* (2010).

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (7)$$

Em que  $\mu$ ,  $\tau$ , e  $\sigma_n$  são, respectivamente, o coeficiente de atrito, a tensão de cisalhamento e a tensão normal

No ensaio do anel, as três dimensões dos anéis devem ser medidas antes e após a deformação. A variação da altura (h) é calculada através da equação (7) a seguir:

$$\Delta l = -100 * \left( \frac{h-h_0}{h_0} \right) \quad (7)$$

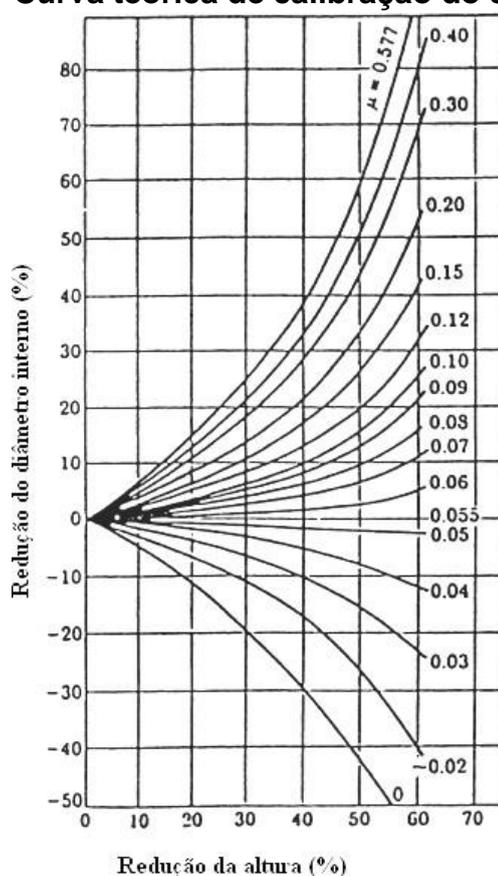
Sendo  $\Delta l$  a variação percentual da altura,  $h$  a altura final e  $h_0$  a altura inicial. Já a variação do diâmetro interno é obtida segundo a equação (8):

$$\Delta \phi = -100 * \left( \frac{\phi-\phi_0}{\phi_0} \right) \quad (8)$$

Com  $\Delta \phi$ ,  $\phi$  e  $\phi_0$ , respectivamente, a variação do diâmetro, o diâmetro interno final e o diâmetro interno inicial.

Os resultados foram utilizados para determinar o coeficiente de atrito para cada taxa de deformação requerida, plotando-os na curva de calibração teórica, conforme Figura 6, proposta por Male e Cockcroft em 1964 e utilizada por Bueno *et al.* (2010).

**Figura 6- Curva teórica de calibração do ensaio do anel**



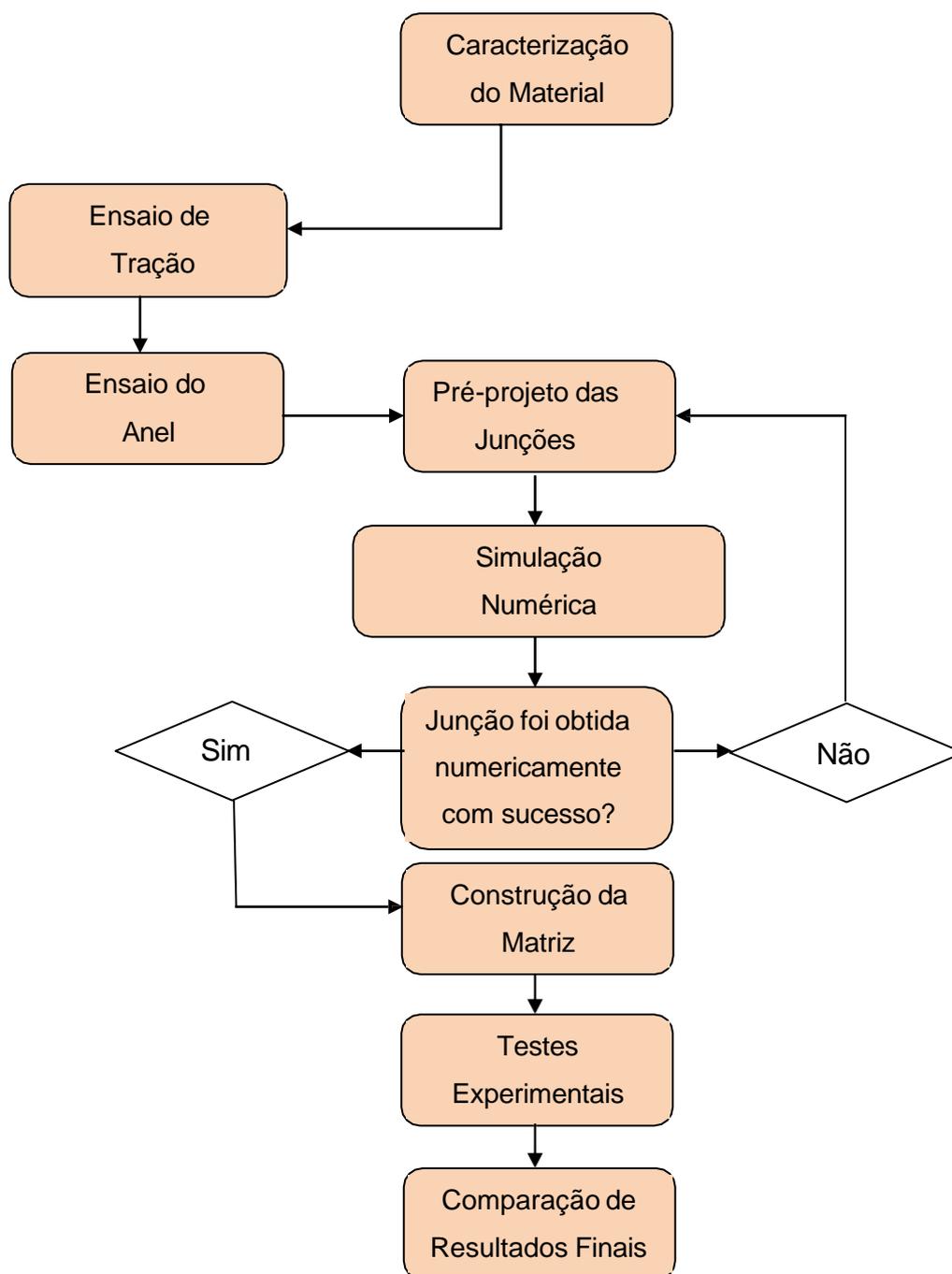
Fonte: Bueno *et al.* (2010).

A utilização do ensaio do anel aliada a estudos realizados com simulação numérica, segundo Bueno *et al.* (2010), tem sido essencial para avaliar a eficiência dos lubrificantes aplicados, com objetivo de reduzir o coeficiente de atrito. A vantagem deste teste é que a construção da curva de calibração não depende das propriedades mecânicas do material, como a tensão de escoamento, e não necessita da determinação da força de conformação do corpo de prova, apenas as variações dimensionais são utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito do par tribológico.

### 3 METODOLOGIA

Para se obter a junção de tubos de aço com costura em baixo carbono, as etapas do trabalho foram estabelecidas de modo a otimizar recursos e tempo disponíveis. Essas atividades e suas interações são descritas nos tópicos a seguir e podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na Figura 7.

**Figura 7- Fluxograma da metodologia**



Fonte: Elaborado pela autora.

### **3.1 Caracterização do material**

Nesta etapa, o material selecionado para estudo foi caracterizado a partir da análise química via espectrometria ótica de uma amostra metálica do material em estudo, conforme certificado em anexo, no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalográficos, da instituição SENAI, unidade Horto.

Os ensaios foram realizados segundo as prescrições da norma NBR 5891/2014, cuja composição química do material foi obtida por média de três leituras efetuadas no equipamento sendo posteriormente emitido um certificado.

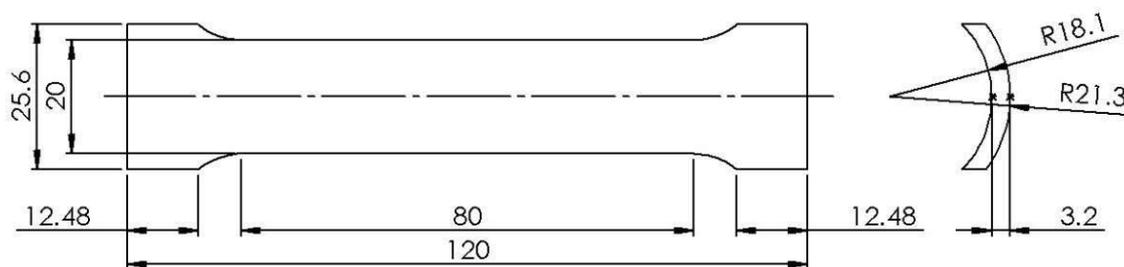
### **3.2 Ensaio de tração**

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de materiais de construção mecânica da PUC Minas, Campus Contagem. Utilizou-se uma máquina de ensaio de tração modelo EMIC calibrada com célula de carga de 10 toneladas, com o uso do software Panantec para aquisição de dados. Certificados de calibração da máquina seguem no anexo A.

Os corpos de prova foram confeccionados segundo a norma NBR NM 6892/2002. Do tubo mecânico ( $\varnothing$  42,6 x  $\varnothing$  36,2) mm, retirou-se 4 corpos de prova no comprimento de 120 mm (Figura 8) e, posteriormente usinados em centro de usinagem com comando numérico, ROMI Discover 560. Suas dimensões foram verificadas com paquímetro digital da marca Mitotoyo, com faixa de leitura de 0 a 150 mm e resolução de 0,01mm.

Foram realizados quatro ensaios de tração na temperatura ambiente e obtidas quatro curvas de fluxo relacionadas aos materiais ensaiados. Posteriormente, os valores de tensão e deformação da curva média serviram como parâmetros de ajuste na simulação numérica.

**Figura 8- Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração**



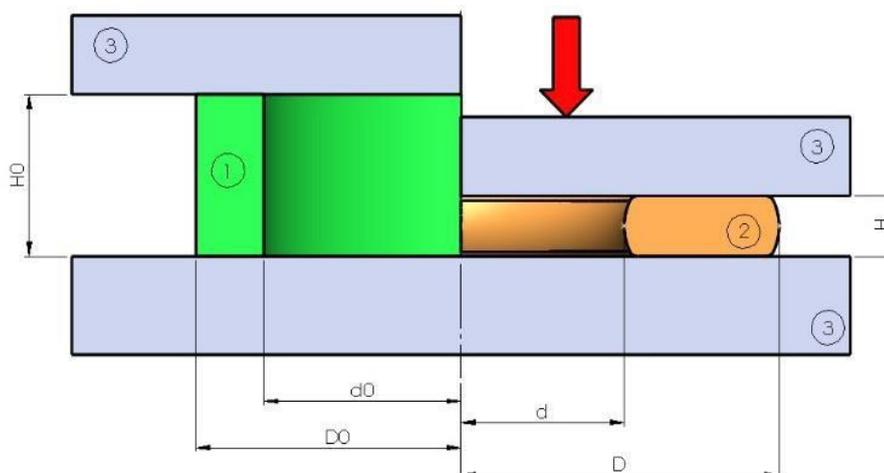
Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3 Ensaio do anel

Neste ensaio, foram utilizados sete CP's com variadas dimensões iniciais do anel, de modo que fossem realizadas deformações da altura na faixa de porcentagens entre 20% e 52%, maiores percentuais não foram utilizados devido à magnitude da deformação que foi aplicada durante a conformação do tubo.

O ensaio de compressão do anel, para baixos valores de coeficientes de atrito, segundo Zareh-Desari e Davoodi (2016), os diâmetros externos e internos aumentam suas dimensões, enquanto a altura do anel é reduzida. A Figura 9 representa esquematicamente o processo, antes e após a deformação gerada pela compressão.

**Figura 9- Desenho esquemático da variação das dimensões do anel durante o ensaio de compressão**

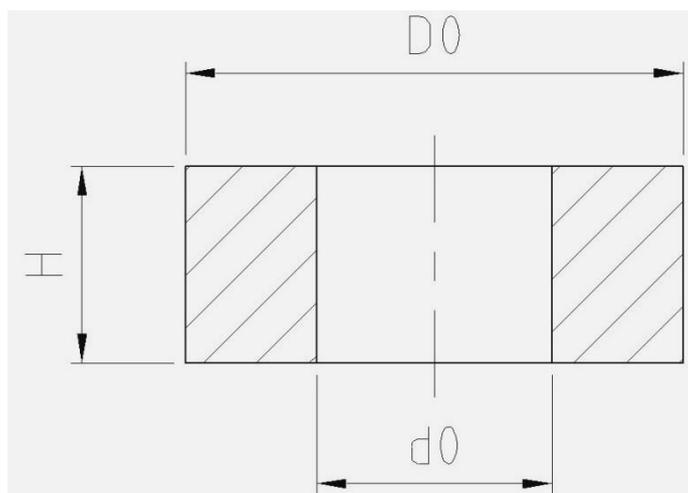


Fonte: Adaptado de Zareh-Desari e Davoodi (2016).

Sendo as numerações 1, 2 e 3, representações para o anel antes do ensaio, o anel após ensaio e os discos de compressão, respectivamente. E  $H_0$ ,  $D_0$ ,  $d_0$  e  $H$ ,  $D$ ,  $d$ , as dimensões iniciais e finais da altura e dos diâmetros do anel.

Para a realização do ensaio do anel, corpos de prova em formato anelar (Fig. 10) foram confeccionados seguindo a relação entre altura e os diâmetros externos e internos conforme o trabalho de Bueno *et al.* (2010), ou seja, nas proporções 6:3:2. O ensaio ocorreu na temperatura ambiente e o lubrificante utilizado entre as placas e o corpo de prova anelar foi um óleo ambientalmente correto à base de éster, segundo Silva *et al.* (2020). O material das placas foi o aço AISI 4340, enquanto os anéis foram construídos com aço AISI 1006 para garantir as mesmas condições em ambas as configurações de deformações do material do tubo. Foram realizados três ensaios para cada dimensão do corpo de prova dimensionado.

**Figura 10- Representação do corpo de prova para o ensaio do anel**



**Fonte: Elaborado pela autora.**

As dimensões iniciais e finais dos corpos utilizados no ensaio do anel estão apresentadas na Tabela 2:

**Tabela 2- Dimensões iniciais e finais dos corpos de prova para o ensaio do anel.**

<b>Corpo de Prova</b>	<b>∅ interno inicial (mm)</b>	<b>∅ externo inicial (mm)</b>	<b>Altura inicial (mm)</b>	<b>∅ interno final (mm)</b>	<b>∅ externo final (mm)</b>	<b>Altura final (mm)</b>
1	10,41	20,99	6,95	9,9	23,3	5,42
2	10,55	20,97	6,95	10,18	22,62	5,66
3	10,58	21,03	7,02	9,61	24,48	4,68
4	10,68	21,05	6,99	9,82	25,04	5,04
5	11,87	23,92	7,81	10,36	29,24	4,6
6	11,82	23,93	7,7	9,7	32,53	3,96
7	15,25	30,01	9,9	12,2	40,85	4,75

**Fonte: Dados de pesquisa.**

A deformação dos corpos de prova foi realizada nas dependências da empresa TAJAX, localizada na cidade de Juatuba, empregando uma prensa hidráulica de capacidade de 100 toneladas. A rugosidade superficial das placas superior e inferior utilizadas para a compressão dos corpos de prova foi a mesma da ferramenta utilizada na deformação do tubo nos testes experimentais, coletadas pelo rugosímetro TR210 TIME Roughness Tester.

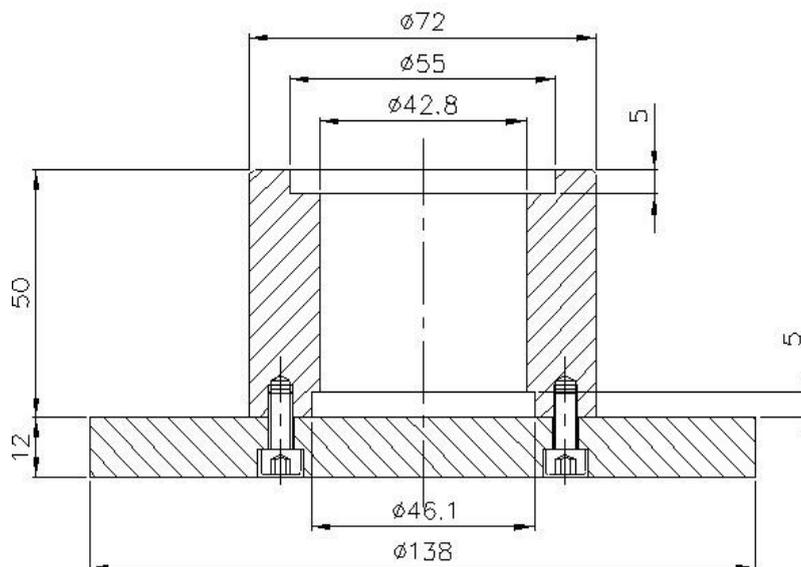
Durante o ensaio, limitadores de altura controlaram a deformação final para valores entre 20% e 60% de deformação na altura do corpo de prova. Os dados obtidos pelo ensaio foram utilizados para determinar o coeficiente de atrito experimental a partir da curva de calibração proposta por Bueno *et al.* (2010), apresentada na revisão bibliográfica deste trabalho.

### **3.4 Pré-projeto da junção**

Para a fabricação da junção, as matrizes foram pré-projetadas e dimensionadas com cavidades que foram preenchidas pelo tubo ao ser deformado (Fig. 11). Dois componentes internos aos tubos foram necessários para impedir a sua flambagem durante a aplicação dos esforços, estes componentes são intercambiáveis e foram encaixados nas bases das matrizes e puderam ser removidos no final de cada etapa de deformação. Uma guia externa às matrizes fez-se necessária para evitar o movimento horizontal das partes.

O material selecionado para a construção da matriz foi o aço AISI 4340. Segundo Sun *et al.*, (2015), a tenacidade e a alta resistência deste aço permitem sua ampla aplicabilidade em componentes industriais que são submetidos a altas solicitações mecânicas.

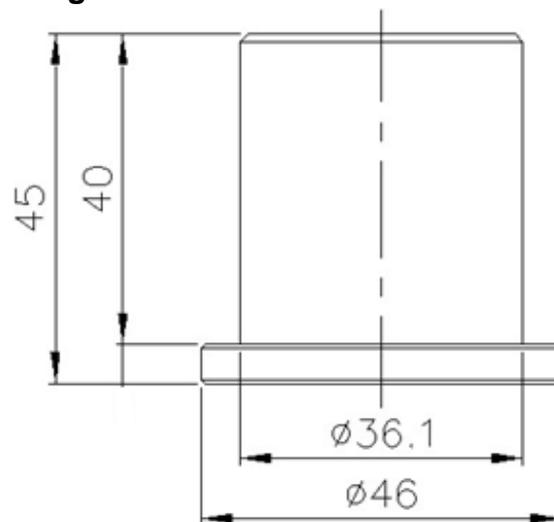
**Figura 11- Desenho mecânico da matriz**



Fonte: Elaborado pela autora.

Na base da matriz utilizou-se acoplado um encaixe tipo macho para evitar a flambagem das paredes do tubo durante as solicitações exercidas no processo de conformação. Suas dimensões são apresentadas na Figura 12:

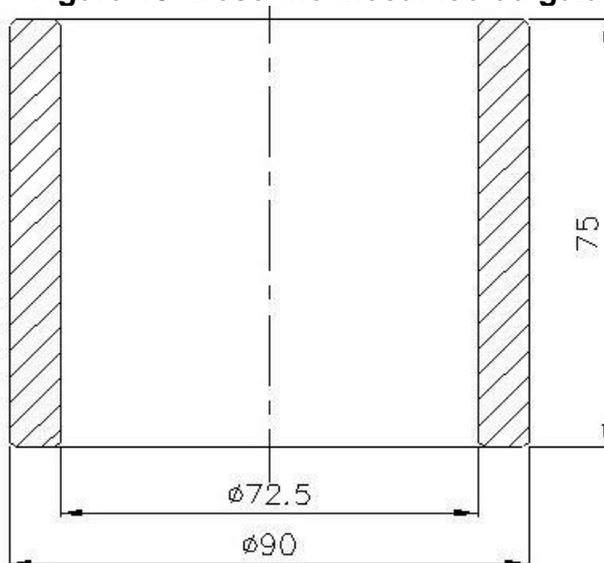
**Figura 12- Desenho mecânico do encaixe**



Fonte: Elaborado pela autora.

Para evitar o deslocamento horizontal das matrizes superior e inferior durante a compressão do tubo, foi utilizada no conjunto uma guia tubular com as dimensões apresentadas na Figura 13.

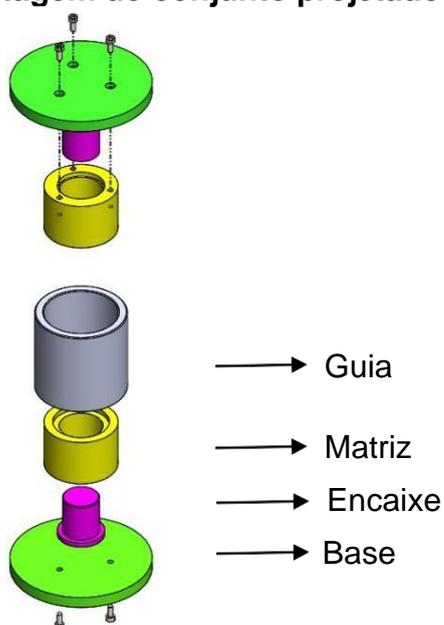
**Figura 13- Desenho mecânico da guia**



Fonte: Elaborado pela autora.

A guia necessitou de ajuste dimensional para que movimentasse livremente no encaixe das matrizes, sem que ocorressem interferências. A Figura 14 apresenta a montagem do conjunto projetado.

**Figura 14- Montagem do conjunto projetado**



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.5 Simulação numérica

A simulação numérica foi realizada no software Abaqus/CAE 6.10 em plataforma Windows 7, a análise do modelo numérico baseou-se no Método de Elementos Finitos (MEF).

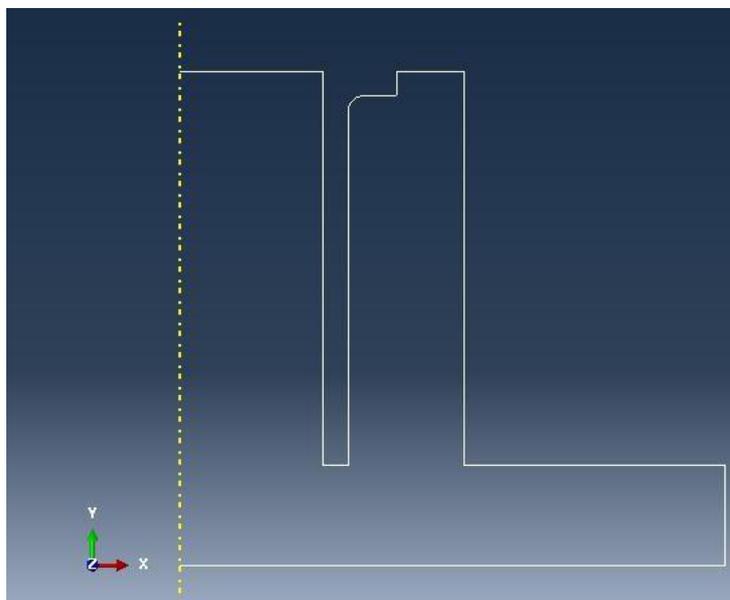
A metodologia adotada para o trabalho numérico consistiu nas seguintes etapas:

#### 3.5.1 Pré- processamento

Para a realização da simulação numérica inicialmente realizou-se o pré-projeto e o desenho das partes que compõem o conjunto simulado. Foram elas: as matrizes de conformação, peça de encaixe e o tubo a ser deformado. Após os desenhos dos croquis, as peças foram desenhadas no ambiente CAE do Abaqus para a modelagem matemática.

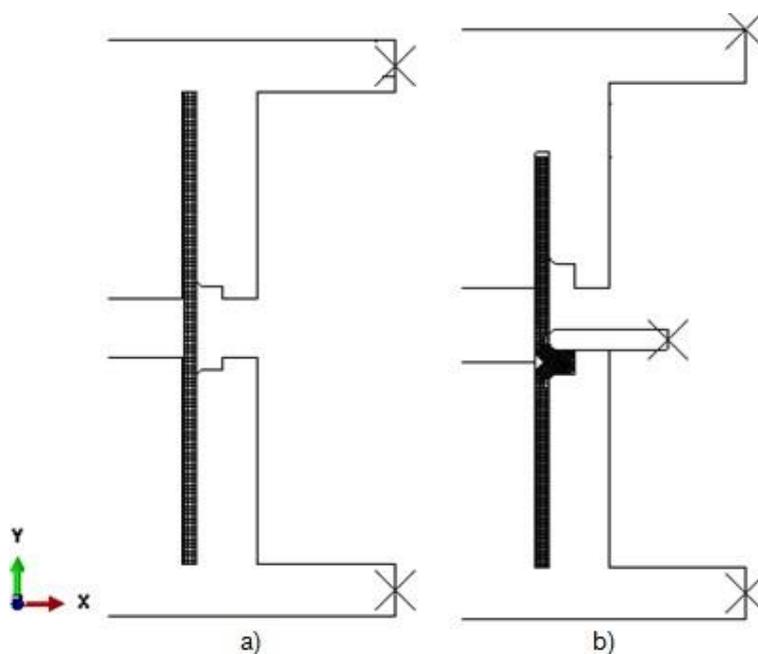
A geometria do modelo foi pré-projetada tridimensionalmente com o objetivo de representar com precisão o problema físico simulado. Considerou-se as partes do conjunto projetado com forma axissimétrica, já que a geometria apresenta simetria em toda sua extensão. Com isso, reduziu do tempo de simulação e a análise foi simplificada, otimizando o processo.

A Figura 15 apresenta o desenho da matriz de conformação, integrada com a estrutura de encaixe para evitar a flambagem do tubo. As matrizes são intercambiáveis e foi necessário dobrar a altura da cavidade da matriz superior no segundo estágio para a altura total do bojo, pois com a adição da chapa, o tubo deformou no estágio final preenchendo a cavidade apenas da matriz superior.

**Figura 15- Matriz de conformação simulada**

Fonte: Imagem gerada pelo software Abaqus.

O tubo foi definido como a estrutura deformável e desenhado na posição de encaixe na matriz, na linha central de referência para garantir o alinhamento das partes ao criar a montagem do conjunto, conforme Figura 16a) conjunto montado primeiro estágio e Figura 16b), segundo estágio.

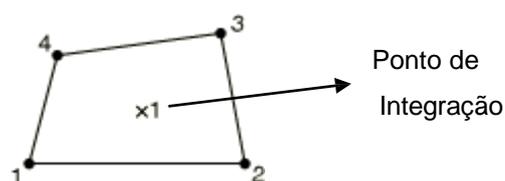
**Figura 16- Modelo do tubo simulado: a) primeiro estágio. b) segundo estágio.**

Fonte: Imagem gerada pelo software Abaqus.

Para a geração de malha, ou seja, a etapa de discretização, a malha foi criada apenas no tubo, sendo a estrutura deformável, já as matrizes foram definidas como analíticas rígidas.

O elemento definido foi o CAX4R, quadrilátero axissimétrico contendo 4 nós, conforme Figura 17, indicado para integrações reduzidas. Esta formulação foi escolhida visando minimizar os problemas de distorções severas na malha, definida na seção *standard* do Abaqus, conforme Hibbitt *et al.* (2004).

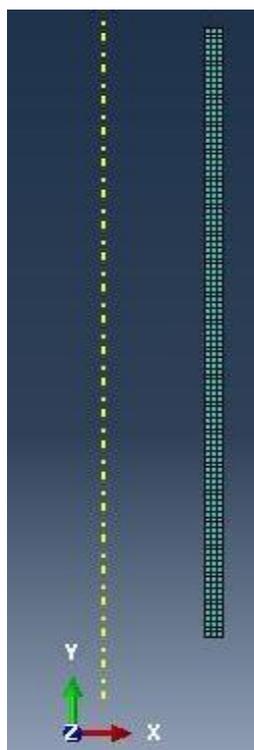
**Figura 17- Tipo de elementos finitos biblioteca ABAQUS**



Fonte: Hibbitt *et al.* (2004).

O processo de criação da malha gerou 333 elementos, em sua maioria retangulares, com média de tamanho de 1 mm e 448 nós. A Figura 18 mostra a região discretizada.

**Figura 18- Discretização do tubo**



Fonte: Imagem gerada pelo software Abaqus.

A escolha do tamanho dos elementos da malha baseou-se em um estudo da sensibilidade da malha que não apresentou variações significativas tanto no resultado apresentado quanto no tempo de processamento, quando utilizados elementos de menores dimensões.

Para que o resultado seja o mais fidedigno possível, o software foi alimentado com as propriedades mecânicas do material do tubo e do par tribológico matriz/tubo.

Durante a deformação, o comportamento mecânico do tubo foi acompanhado pelos parâmetros dos dados da curva de tensão e deformação verdadeira do regime plástico proveniente do ensaio de tração do material. No regime elástico, os valores adotados das propriedades mecânicas Módulo de Young e Coeficiente de Poisson foram, respectivamente, de 210 GPa e 0,3 para o aço.

O coeficiente de atrito encontrado experimentalmente foi atribuído aos pares tribológicos com método de penalidade na simulação numérica, sendo acionado como propriedade pré-estabelecida quando os contatos criados entre as matrizes e o tubo foram ativados durante o processo simulado.

Uma importante etapa do pré-processamento do estudo numérico é a criação das interações entre as superfícies de contato entre as matrizes-superfícies rígidas-, e o tubo-deformável-, para cada estágio do processo de conformação do tubo. Estes contatos obedecem às propriedades tribológicas definidas para os pares de tubo/matriz em movimento relativo.

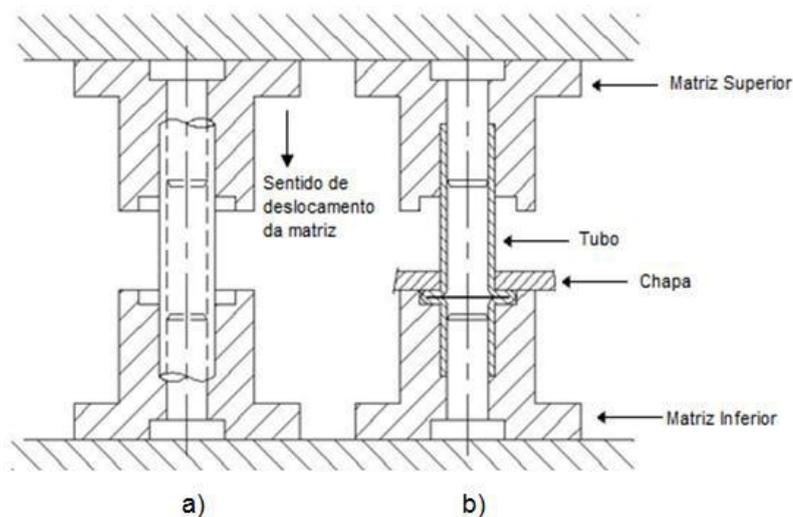
O processo foi simulado numericamente sendo adotada a configuração quase estática, dado que a conformação do tubo ocorre com baixa velocidade e a força compressiva é aplicada lentamente.

### *3.5.2 Condições de contorno*

Para a simulação numérica, as condições de contorno iniciais foram os deslocamentos realizados pelas matrizes superiores durante o processo simulado, e a condição estática da matriz inferior e da chapa a ser unida ao tubo.

O deslocamento das matrizes em cada estágio foi calculado baseado na abertura existente entre as matrizes no início do processo simulado. Nos dois passes a matriz superior deslocou-se verticalmente para baixo 10 mm, enquanto a matriz inferior permaneceu fixa, gerando a primeira etapa de deformação no tubo, conforme Figura 19.

**Figura 19- Representação esquemática da metodologia de união de tubo a chapa metálica a partir de conformação mecânica. (a) primeiro estágio. (b) segundo estágio.**



**Fonte: Elaborado pela autora.**

Nas matrizes foram definidos os RP"S (Pontos de Referência) para referenciar os deslocamentos em cada estágio do processo simulado numericamente.

O ponto de parada na simulação numérica foi determinado pela distância igual a zero entre as matrizes superior e inferior.

### **3.6 Testes experimentais**

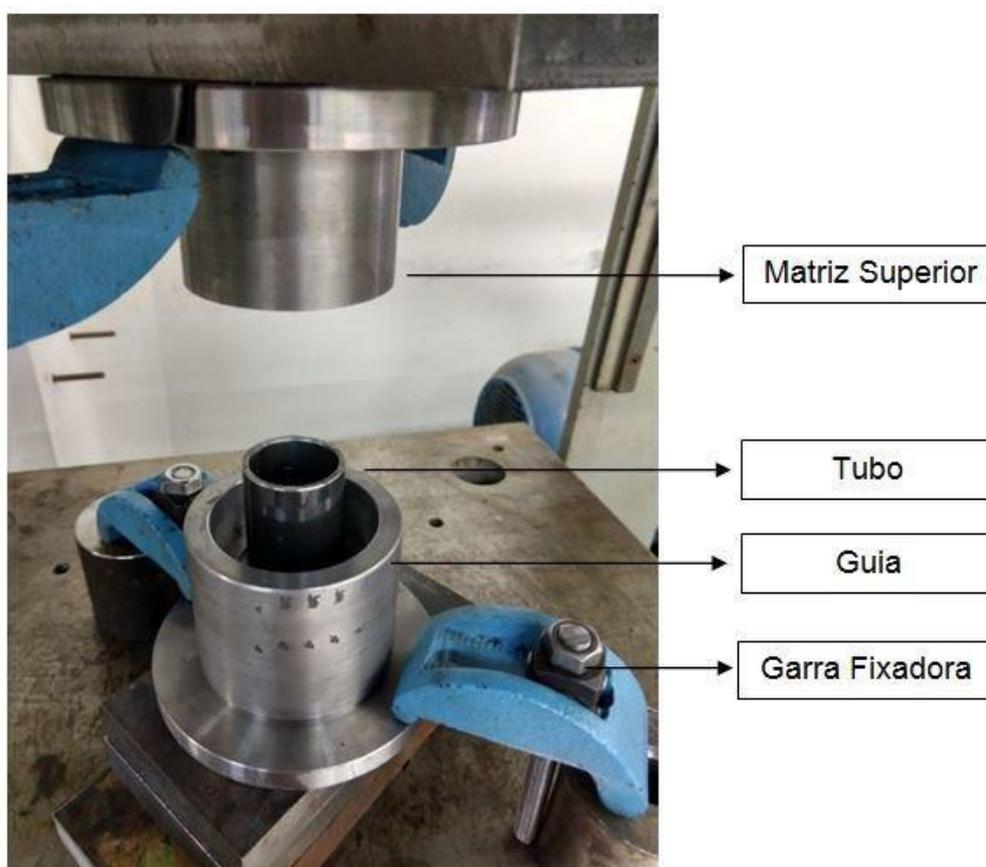
Após o pré-projeto das peças que compuseram o conjunto e o estudo numérico do processo de conformação mecânica do tubo, construiu-se cada parte para a realização dos testes experimentais. As matrizes foram usinadas no laboratório de usinagem da PUC Minas, Campus Coração Eucarístico e Contagem.

O teste experimental foi realizado no Laboratório de materiais de construção mecânica da PUC Minas, Campus Contagem. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica de duplo efeito com capacidade nominal de 70 toneladas no cilindro principal e 30 toneladas no cilindro secundário, apenas o cilindro principal foi utilizado nos ensaios.

### 3.6.1 Testes experimentais iniciais

Para os ensaios iniciais, as matrizes inferior e superior foram fixadas nas superfícies inferior e superior da prensa por garras acopladas com barras roscadas que permitem a liberação do tubo deformado, com o movimento vertical da base superior do equipamento. A Figura 20 apresenta a montagem realizada para os testes práticos.

**Figura 20- Montagem do teste prático: primeiro estágio**



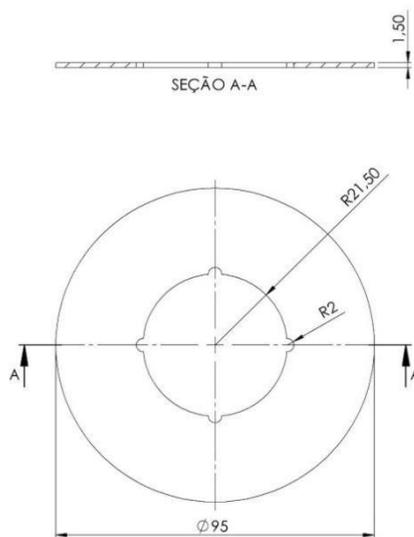
Fonte: Arquivo da autora.

No teste experimental, utilizou-se um lubrificante ambientalmente correto à base de éster, aplicado na superfície externa do tubo, de acordo com Silva *et al.* (2020).

No segundo estágio do processo de conformação do tubo, acrescentou-se as chapas de aço AISI 1008, aço inox e alumínio com espessura média de 2 mm que foram unidas aos tubos para a formação da junção. As chapas foram previamente furadas com o diâmetro externo do tubo, mantendo uma folga de 0,2 mm no sentido

do raio para livre encaixe. Nos furos foram feitos quatro rasgos diametricamente distribuídos com o objetivo de impedir a rotação da chapa após esta ser unida ao tubo, pois o material do tubo ao ser deformado e expandir para estas regiões, trava o movimento rotacional do tubo quando forem aplicados torques na junção (Fig. 21). Ensaio de torção foi realizado para analisar a resistência à torção na junção após os ensaios experimentais.

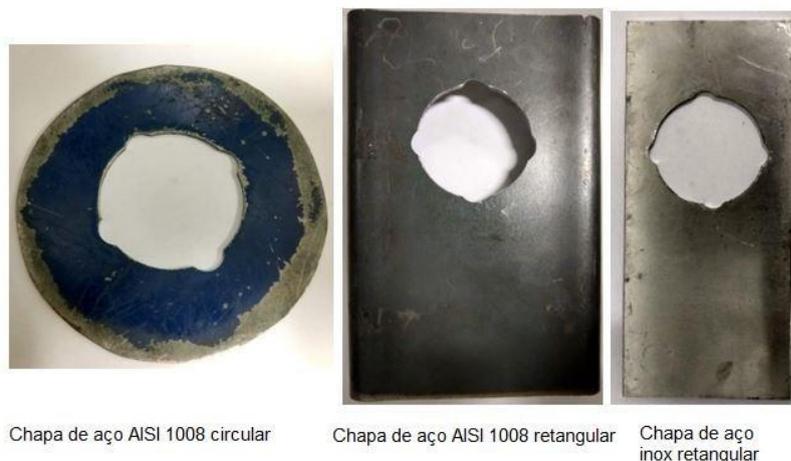
**Figura 21- Mecanismo para travamento rotacional da chapa unida ao tubo**



**Fonte: Elaborado pela autora.**

A Figura 22 mostra a variação de chapas de aço AISI 1008 e aço inox utilizadas na produção das junções nos ensaios experimentais e pode-se visualizar os quatro rasgos equidistantes realizados nos diâmetros das chapas.

**Figura 22- Variações de chapas unidas ao tubo por conformação mecânica**



**Fonte: Arquivo da autora.**

Devido à falta de rigidez entre o conjunto superior e inferior da prensa, durante a aplicação da força de compressão no tubo, ocorreu um deslocamento da matriz no sentido horizontal. Para evitar essa movimentação, utilizou-se a guia para garantir o alinhamento do conjunto durante o primeiro estágio do processo de deformação do tubo.

Porém, a presença das chapas no segundo estágio inviabilizou a utilização da guia durante o deslocamento vertical das matrizes, o que não garantiu a centralidade das matrizes e, conseqüentemente, gerou peças defeituosas no final do processo.

### *3.6.2 Testes experimentais finais*

Devido ao desalinhamento gerado na geometria final do tubo após o segundo estágio de deformação do tubo utilizando o conjunto das matrizes pré-projetadas, foram necessárias alterações do projeto experimental.

Para corrigir o desalinhamento da fabricação da junção, foi necessária a utilização de quatro colunas acopladas ao conjunto montado e guiadas por buchas simetricamente opostas. Estas colunas, ao travarem o movimento horizontal das matrizes, garantem a centralidade do conjunto e das peças durante o processo de deformação do tubo. O conjunto montado na prensa com as colunas estão apresentados na Figura 23.

**Figura 23- Conjunto montado com as colunas para testes experimentais.**



**Fonte: Arquivo da autora.**

Ao final do teste prático, as junções foram obtidas com a geometria final prevista em projeto. As dimensões finais dos corpos de prova foram medidas e comparadas com os valores gerados na simulação numérica.

### **3.7 Testes em aplicação**

Considerando as possibilidades de aplicações, como em sistemas de andaimes, o estudo da rigidez rotacional em sistemas evita falhas de operação, garantindo a segurança durante a aplicação de esforços, segundo Reynolds, Zhang e Ramussen (2017). Portanto, ensaio de torção foi realizado na peça final projetada para análise do torque resistido pela junção. O ensaio foi executado no laboratório de ensaio da Fiat Chrysler Automobiles (FCA), unidade de Betim, utilizando torquímetro digital com célula de carga da marca M.Shimizu com software coletor de dados de torque MSqnet.

A rigidez da união do tubo à chapa foi avaliada a partir do ensaio de torção na própria junção. Para a realização do teste, um dispositivo foi fabricado para o encaixe no torquímetro com eixo sextavado, conforme Figura 24.

**Figura 24- Dispositivo para encaixe no torquímetro**



Fonte: Arquivo da autora.

O dispositivo foi acoplado internamente ao tubo e travado por um parafuso de alta resistência. Para a realização do ensaio, a chapa foi fixada a uma morsa e o torque foi aplicado no eixo do encaixe no tubo (Fig.2 5).

**Figura 25- Ensaio de torção- (a) Dispositivo para ensaio de torção. (b) Montagem do conjunto**



a)



b)

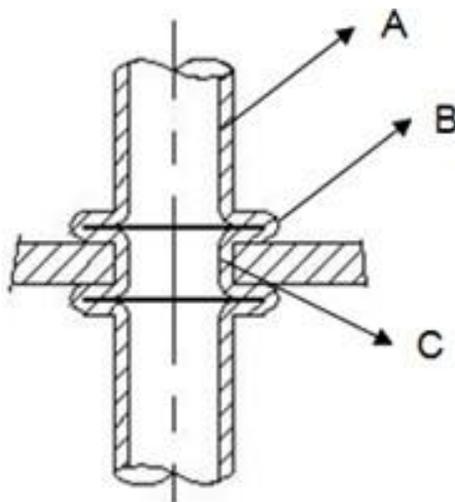
Fonte: Arquivo da autora.

### 3.8 Análise da microdureza da junção

Após a conformação, as alterações nas propriedades mecânicas e microestruturais foram analisadas a partir de ensaio de microdureza e de imagens microscópicas para verificar a variação do tamanho e orientação dos grãos nas regiões da junção do tubo na placa. Para os ensaios, uma amostra foi retirada da

região deformada plasticamente na peça final produzida nos testes experimentais. A Figura 26 representa as seções da junção estudadas: A: região sem deformação do tubo. B: região externa da junção e C: região interna da deformação exercida no tubo.

**Figura 26- Regiões da junção ensaiadas**



**.Fonte: Elaborada pela autora.**

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado no laboratório de materiais de construção mecânica da PUC Minas, Campus Contagem. Os dados do ensaio foram armazenados com a utilização do software EASY TEST. A carga aplicada no teste foi de 98,07 mN, com duração de 20 segundos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados gerados pela caracterização do material do tubo, dos ensaios para obtenção das propriedades mecânicas e tribológicas- o coeficiente de atrito-, além dos resultados simulados e experimentais do processo de conformação do tubo para a produção da junção projetada. Também apresenta o comportamento da força de conformação do tubo em ambos os estágios da metodologia.

### 4.1 Caracterizações do material

A caracterização do material do tubo foi obtida por espectrometria óptica e a composição percentual dos principais elementos está apresentada na Tabela 3. O certificado do ensaio com a composição química completa referente à média dos três ensaios pode ser visualizado no Anexo B.

**Tabela 3- Resultado da análise química por espectrometria óptica**

Elemento	Teor (%)
Carbono(C)	0,050
Manganês (Mn)	0,357
Fósforo(P)	0,015
Enxofre(S)	0,0037
Ferro (Fe)	99.4

Fonte: Adaptada pela autora (2019).

Segundo a norma AISI apresentada no referencial bibliográfico, a composição química do aço o caracteriza como aço carbono para estruturas AISI 1006, com as composições químicas percentuais de carbono, manganês, fósforo e enxofre dentro das faixas e limites da norma. Atta *et al.* (2019) utilizaram em estudo o aço AISI 1006 e apresentaram composições químicas percentuais próximas às certificadas pela microscopia óptica realizada, conforme Tabela 4.

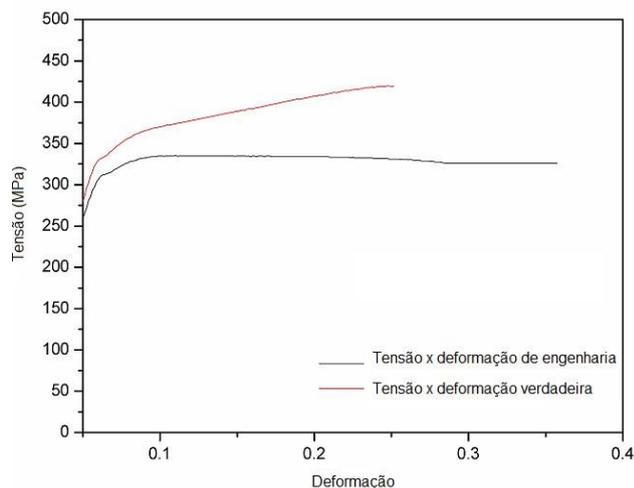
**Tabela 4- Resultado da análise química por espectrometria óptica AISI 1006**

Fe%	Mn%	C%	S%	P%
99,43-99,75	0,25-0,4	0,05	0,05	0,04

Fonte: Atta *et al.* (2019).

## 4.2 Curva tensão versus deformação

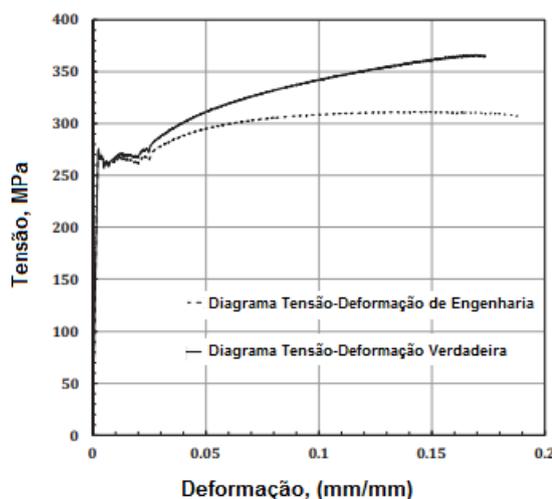
A partir da média dos dados obtidos nos ensaios de tração realizados no material do tubo, plotou-se as curvas de fluxo tensão versus deformação de engenharia e verdadeira, conforme apresentado na Figura 27.

**Figura 27- Curvas de tensão versus deformação AISI 1006**

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 28 ilustra as curvas de tensão versus deformação de engenharia e verdadeira para o aço AISI 1006, que foram obtidas por meio de ensaio de tração, realizado por Atta *et al.* (2019).

**Figura 28- Curva Tensão versus deformação do aço AISI1006**



Fonte: Atta *et al.* (2019).

Após a análise dos resultados obtidos no ensaio de tração, é possível comparar os limites de escoamento e de resistência do material em estudo está em conformidade com os trabalhos realizados por Atta *et al.* (2019).

### 4.3 Ensaio do anel

O coeficiente de atrito atuante durante a deformação do tubo foi determinado pelo ensaio do anel. As rugosidades médias dos sete corpos de prova e das placas inferior e superior utilizados no ensaio foram medidas antes da deformação, para que correspondesse à rugosidade presente no par tribológico tubo/matriz durante deformação do tubo nos testes experimentais, conforme Tabela 5. Os corpos de prova foram confeccionados com aço AISI 1006, enquanto as placas, do material aço AISI 4340, mesma composição do conjunto utilizado nos ensaios experimentais para tubo e matrizes.

**Tabela 5- Rugosidade média dos componentes ensaiados** (continua)

Parte	Anéis	Placas	Tubo	Matriz
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0.87	1.99	1.01	2.08
	1.11	1.85	0.93	1.56
	1.07	1.39	0.91	1.99
	0.96	1.45	0.44	1.28
	1.12	1.89	0.97	1.88

**Tabela 5- Rugosidade média dos componentes ensaiados**  
(conclusão)

Parte	Anéis	Placas	Tubo	Matriz
<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0.99	1.79	1.00	1.80
	1.07	1.88	1.08	1.01
<b>Valor médio</b>	1.03	1.75	0.97	1.80
<b>Classe de rugosidade</b>	N6-N7	N8-N7	N6-N7	N8-N7

Fonte: Dados de pesquisa.

A Figura 29, juntamente com a Tabela 6, apresenta os anéis após serem submetidos ao ensaio de compressão e a variação de suas dimensões.

**Figura 29- Anéis após ensaio de compressão**



Fonte: Arquivo da autora.

A Tabela 6 apresenta os dados obtidos partir dos ensaios dos sete corpos de prova:

**Tabela 6- Dimensões dos corpos de prova.**

Corpo de Prova	$\varnothing$ interno inicial (mm)	$\varnothing$ externo inicial (mm)	Altura inicial (mm)	$\varnothing$ interno final (mm)	$\varnothing$ externo final (mm)	Altura final (mm)
1	15,25	30,01	9,90	12,2	40,85	4,75
2	11,82	23,93	7,70	9,70	32,53	3,96
3	11,87	23,92	7,81	10,36	29,39	4,60
4	10,68	21,05	6,99	9,82	25,39	5,04
5	10,58	21,03	7,02	9,61	24,48	4,68
6	10,55	20,97	6,95	10,18	22,62	5,66
7	10,41	20,99	6,95	9,99	23,30	5,42

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da obtenção dos dados das variações dimensionais do anel, calculou-se o percentual das variações geradas em cada deformação empregada, conforme Tabela 7.

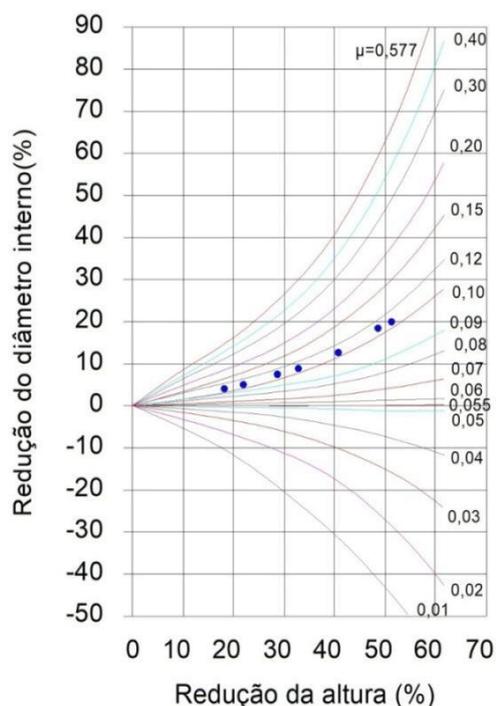
**Tabela 7- Variações percentuais na altura e no diâmetro interno dos corpos de prova**

Corpo de Prova	$\Delta h(\%)$	$\Delta \varnothing$ Interno (%)
1	22.014	4.899
2	18.561	3.507
3	33.333	9.168
4	27.897	8.052
5	41.101	12.721
6	48.571	17.936
7	52.020	20.000

Fonte: Dados da pesquisa.

Por fim, as variações percentuais geradas durante o ensaio de compressão do anel foram utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito entre os pares tribológicos (tubo, lubrificante e ferramentas), a partir da curva de calibração apresentada no trabalho de Bueno *et al.* (2010), conforme Figura 30.

**Figura 30- Resultado da curva de calibração do teste do anel**



Fonte: Dados do ensaio do anel.

Os pontos obtidos a partir do ensaio de compressão foram determinados na faixa de coeficiente de atrito entre os valores 0,10 e 0,12. Adotou-se como coeficiente de atrito na simulação numérica o valor médio de 0,11.

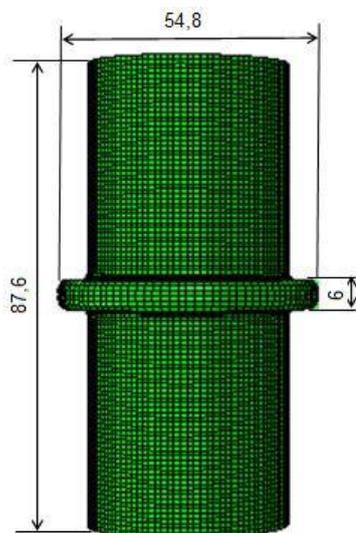
#### 4.4 Deformação no tubo de parede fina com costura: Primeiro estágio.

A partir da modelagem matemática e dos ensaios práticos, foi possível realizar a primeira etapa do processo, gerando resultados satisfatórios, apresentados a seguir.

##### 4.4.1 Resultado simulado: Primeiro estágio.

O modelo simulado numericamente permitiu a reprodução do processo de conformação em um tubo de parede fina e apresentou o resultado com as dimensões da altura e diâmetro do bojo e da altura final do tubo após o primeiro estágio, conforme a Figura 31.

**Figura 31- Resultado da simulação numérica do modelo**



Fonte: Imagem gerada pelo software Abaqus.

A partir dos resultados gerados numericamente no software Abaqus, foi possível analisar o preenchimento da cavidade interna da matriz na região deformada após a conformação e capturar a geometria final do tubo após finalizada a primeira etapa do processo.

Outro aspecto analisado foi a possível ocorrência de flambagem durante a atuação dos esforços, porém, o encaixe utilizado no interior do tubo atuou a fim de evitar este fenômeno.

#### *4.4.2 Resultado experimental: Primeiro estágio.*

Com o objetivo de validar o processo simulado numericamente, a conformação do tubo foi realizada experimentalmente e a deformação do tubo preencheu a cavidade da matriz, como apresentado na Figura 32.

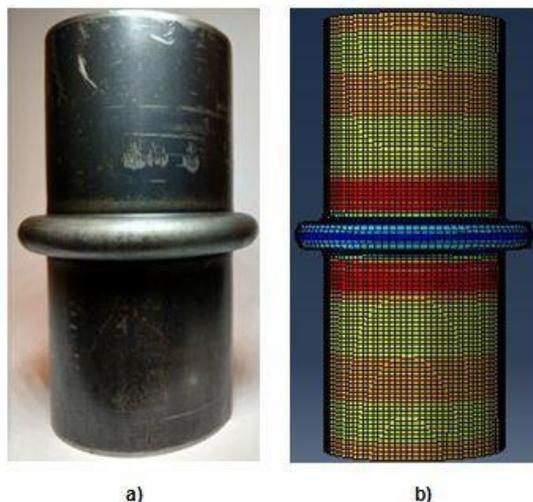
**Figura 32- Resultado parcial da deformação do tubo no primeiro estágio**



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 33 mostra a comparação entre a geometria do tubo após a primeira etapa de conformação realizada experimentalmente e o resultado da simulação numérica.

**Figura 33- Tubo conformado: Primeira etapa: a) Resultado experimental b) Resultado simulado**



Fonte: Elaborada pela autora.

As dimensões finais do tubo nas duas situações estão comparadas na Tabela 8.

**Tabela 8- Comparação das dimensões finais do tubo após a compressão no primeiro estágio.**

Dimensões (mm)	Teste Experimental	Simulação Numérica	Varição entre as dimensões (%)
Comprimento do tubo	87,50	87,60	0,11
Diâmetro externo do tubo	42,34	42,46	0,28
Diâmetro do bojo	54,70	54,80	0,18
Altura do bojo	6,10	6,00	1,64

Fonte: Dados da pesquisa.

As variações percentuais que ocorreram entre o resultado simulado e o prático são de pequena ordem de grandeza e, dentre elas, a maior variação ocorreu na altura do bojo. Este resultado pode estar relacionado com a alteração do comportamento do material do tubo ao ser deformado, pois na modelagem matemática não foi considerado o retorno elástico que ocorreu nos testes experimentais.

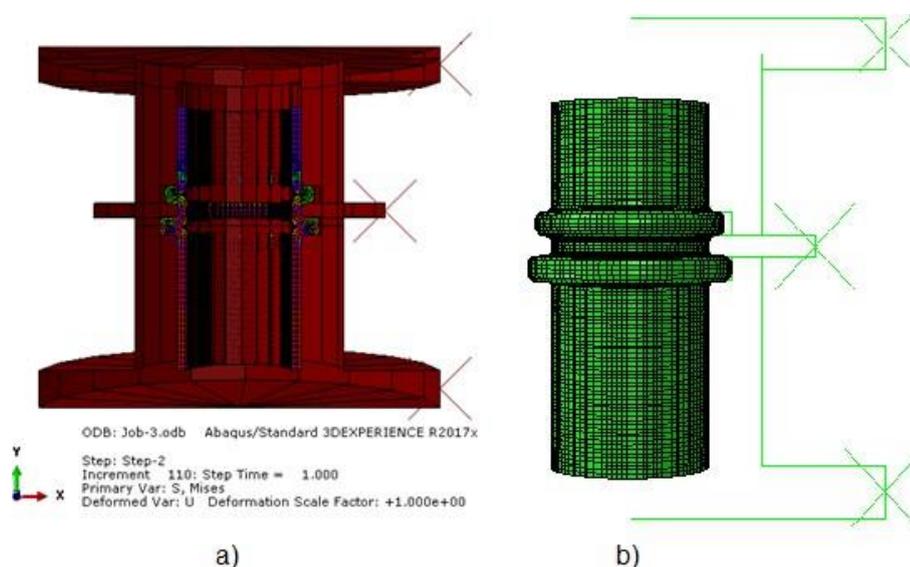
#### 4.5 Deformação no tubo de parede fina com costura: Segundo estágio.

Após a obtenção dos resultados simulados e práticos do primeiro estágio foram realizados os estudos numéricos do segundo estágio e, posteriormente, os ensaios experimentais foram capazes de gerar a geometria final da junção projetada.

##### 4.5.1 Resultado simulado: Segundo estágio.

Para a simulação numérica do segundo estágio, foi adicionada a chapa metálica a ser unida ao tubo. A Figura 34a mostra, em corte, o preenchimento das cavidades das matrizes após a deformação do tubo, enquanto a Figura 34b apresenta a geometria do tubo no final do segundo estágio.

**Figura 34- Resultado simulado do segundo estágio: a) Vista de corte do conjunto. b) Geometria final do tubo.**



Fonte: Imagem gerada pelo software Abaqus.

Após este resultado, o segundo estágio foi realizado experimentalmente, conforme apresentado a seguir.

#### 4.5.2 Resultado experimental: Segundo estágio.

O resultado final do segundo estágio do processo de junção do tubo à chapa metálica, em um primeiro momento, gerou uma peça com defeito, conforme Figura 33. Esta irregularidade ocorreu devido ao movimento horizontal das matrizes durante a conformação do tubo, pois não havia travamento nessa direção.

**Figura 34- Resultado inicial da junção de tubo em chapa metálica por conformação mecânica.**



**Fonte: Elaborada pela autora.**

O resultado concebido pelo estudo numérico não apresentou o defeito de fabricação da junção do tubo em chapas, como ocorrido nos testes práticos. Este fato deve-se à definição das matrizes e da chapa como estruturas analiticamente rígidas, ao criar os elementos do conjunto montado no software Abaqus, garantindo que não houvesse movimento horizontal do conjunto durante a conformação do tubo. Por isso, aliado aos resultados simulados numericamente, deve-se realizar testes experimentais para que o modelo seja validado, confirmando todos os parâmetros do processo de fabricação proposto.

Após a correção da falha verificada no segundo estágio do processo de fabricação da junção do tubo nas chapas metálicas, alterando o projeto com a inclusão das colunas fixas nas bases das matrizes, foi possível obter o produto final livre de defeitos, como mostra a Figura 35.

**Figura 35- Resultado experimental de junção de tubo em chapas metálicas.**



Fonte: Arquivo da autora.

A Figura 36 apresenta os resultados gerados pela simulação numérica e pelo ensaio experimental do processo de fabricação de união de tubos a chapas por meio da conformação a frio do tubo com costura.

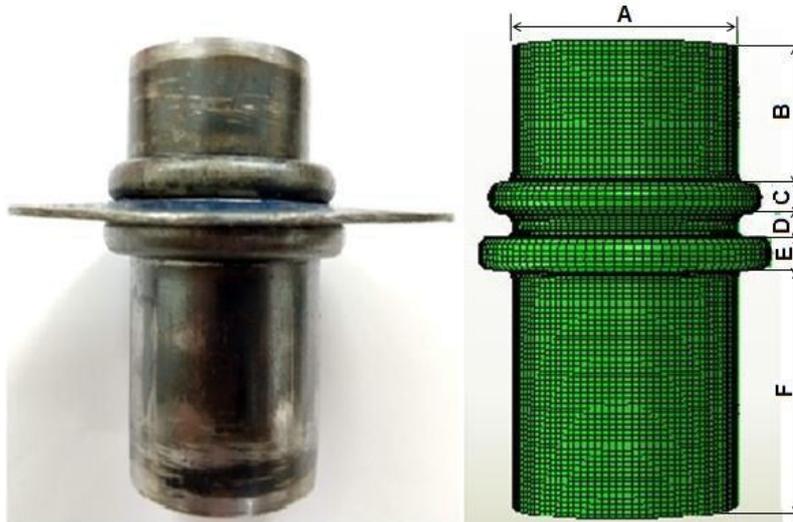
**Figura 36- Resultados simulados e experimentais do processo de junção de tubos a chapa por conformação mecânica.**



Fonte: Elaborado pela autora.

A modelagem numérica realizada no software Abaqus previu com sucesso a geometria e as dimensões finais do tubo após as duas etapas da conformação, conforme Figura 37:

**Figura 37- Geometria final do tubo**



Fonte: Elaborada pela autora.

A comparação das dimensões finais do tubo nos resultados simulado e prático está na Tabela 9:

**Tabela 9- Dimensões finais do tubo**

Dimensão (mm)	Simulado	Prático
A	42,60	42,60
B	19,00	18,95
C	7,00	6,90
D	2,00	2,00
E	6,00	6,00
F	47,00	46,95

Fonte: Dados de pesquisa.

Na simulação numérica, as matrizes e a chapa foram modeladas como partes rígidas e não deformáveis e não foi considerado o retorno elástico ocorrido no tubo, possivelmente gerando pequenas variações nas dimensões do tubo simulado e do teste prático.

O ensaio experimental foi repetido com chapas de diferentes geometrias e materiais, para a diversificação dos resultados e das aplicações permitidas por este processo de junção de tubos em chapas a partir da conformação mecânica. A Figura

38 apresenta os resultados finais para a junção do tubo em chapas finas de alumínio e aço comercial.

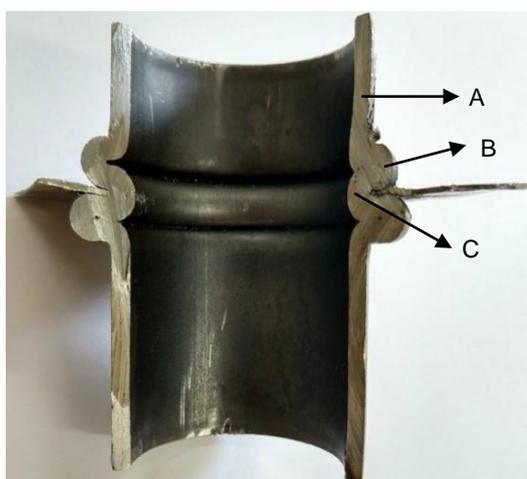
**Figura 38- Resultados finais para junções de tubos em diversos tipos de chapas.**



Fonte: Arquivo da autora.

A figura 39 mostra em corte a região interna da junção do tubo em uma chapa de aço inox.

**Figura 39- Vista da região interna da junção do tubo em chapa de aço inox.**



Fonte: Arquivo da autora.

A partir do corte axial no tubo, foi retirado um incremento da peça para que fosse embutidos e realizados análises de variações das propriedades mecânicas e micro estruturais nas regiões A, B e C do tubo.

#### 4.6 Análises de microdureza da junção

A variação da microdureza dos materiais está associada ao movimento das discordâncias durante a conformação a frio e as interações destas com o vazio e os contornos de grão existentes na microestrutura, segundo Sillis *et al.* (2018). Os autores salientam a importância deste estudo qualitativo aplicado aos processos de fabricação.

Os valores médios da microdureza na região de deformação do tubo com seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 10 abaixo.

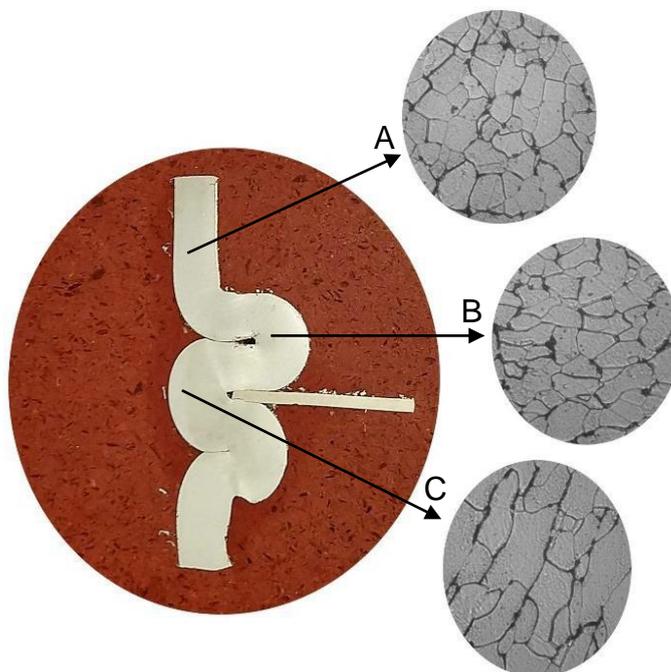
**Tabela 10- Microdureza média das regiões do tubo.**

Região da Junta	Microdureza média (HV)	Coeficiente de variação (%)
A	150,6 ± 5,45	3,62
B	179,3 ± 10,74	5,99
C	178,3 ± 13,76	7,72

Fonte: Dados de pesquisa.

O aumento de, aproximadamente, 18% da dureza observada é resultado do encruamento gerado pelo trabalho realizado a temperatura ambiente, gerando um aumento do limite de escoamento e resistência à tração. A região C apresentou maior percentual de coeficiente de variação, sendo a região que mais sofreu deformação e variação da geometria na seção interna da junção. O formato dos grãos também apresentou variações nas seções analisadas da junção. As imagens da variação do formato e da orientação dos grãos podem ser visualizadas na Figura 40.

**Figura 40- Variação do formato do grão nas seções do tubo.**



**Fonte: Elaborada pelo autor.**

Nas regiões A, B e C apresentadas na Figura 40 é possível verificar que, em B e C, o alongamento dos grãos ocorreu na direção de aplicação dos esforços durante a deformação plástica do tubo. Como na região A não ocorreram deformações e variações de geometria no tubo, os grãos possuem o formato menos alongado. A variação na microestrutura do tubo evidencia o encruamento gerado pelo trabalho a frio, esse fenômeno aumenta a resistência mecânica e a dureza do material, segundo Padilha e Siciliano (2005).

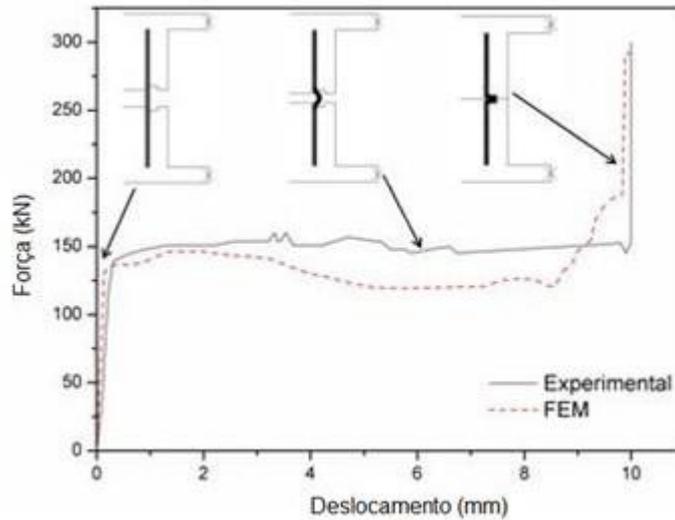
A junção de tubo em placas metálicas tem aplicação comercial em peças estruturais, portanto, o processo realizado permite assegurar um melhoramento nas propriedades mecânicas do composto sem a necessidade de materiais de adição, economia de energia e produção mais limpa.

#### **4.7 Forças de conformação**

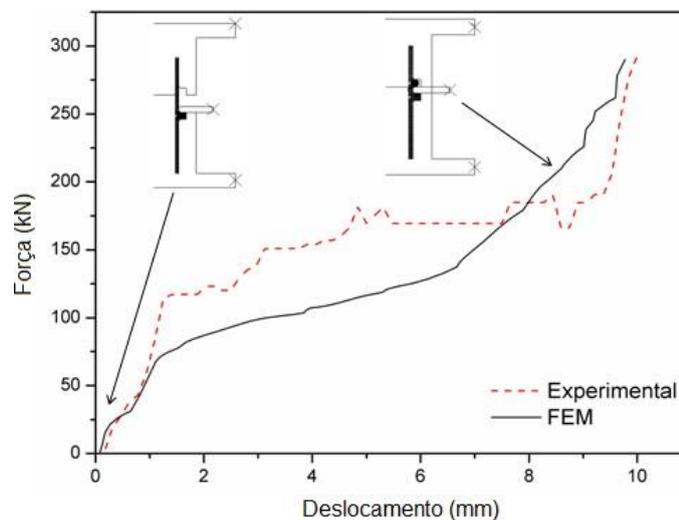
A evolução da força de conformação foi utilizada para gerar as curvas de força versus deslocamento em ambos os estágios na simulação numérica e nos ensaios experimentais durante a conformação do tubo. A Figura 41a apresenta o

comportamento da curva para o primeiro estágio, enquanto a Figura 41b, a etapa final do processo.

**Figura 41- Curva força versus deformação simulada numericamente: a) primeiro estágio b) segundo estágio.**



a)



b)

**Fonte: Dados da pesquisa.**

No primeiro estágio, o aumento inicial da força ocorre para superar à incompressibilidade do material e, em seguida, estabiliza enquanto o tubo é conformado com velocidade constante. Segundo Kukhar V. *et al.* (2018), uma das variáveis que mais influenciam na pressão de forjamento é a altura média do forjado.

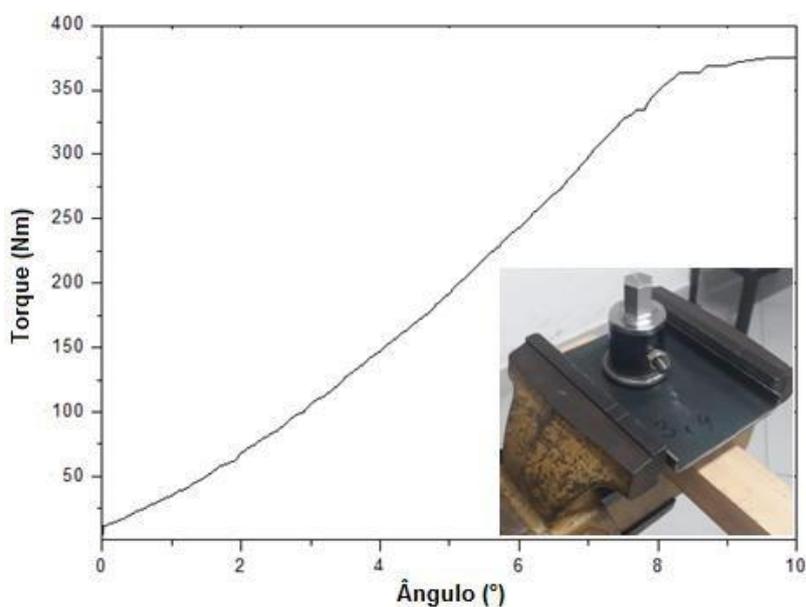
Portanto, no segundo estágio ocorre uma redução da carga necessária para o início conformação do tubo, devido à diminuição da relação entre a altura e o raio interno do tubo na etapa final do processo.

#### 4.8 Testes em aplicação

A curva torque versus ângulo (Fig. 42) permitiu avaliar o desempenho da junção, garantindo a aplicabilidade do método realizado em componentes industriais.

No ensaio, não houve movimento relativo entre a chapa e o tubo. Dessa forma, a junção não falhou com a torção exercida.

**Figura 42- Teste operacional com ensaio de torção.**



**Fonte: Dados de pesquisa.**

Considerando a vasta aplicação desta nova metodologia para a junção de tubos em chapas metálicas, a junção de tubo foi realizada em chapas de diversos tipos de metais e geometria. A Figura 43 mostra três junções de tubos em chapa redonda de aço AISI 1008, retangular de alumínio e de aço AISI 1008 em perfil.

**Figura 43- Junção de tubos em chapas de diferentes materiais e geometrias.**



**Fonte: Arquivo da autora.**

Os protótipos apresentaram as mesmas dimensões finais do tubo ao variar o material, a geometria e as dimensões das chapas utilizadas nas junções, o que permitiu a repetibilidade do processo.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho suportaram, de forma clara, a resolução de um problema atual na indústria de fabricação, que é a obtenção de junções em tubos sem a necessidade de soldagem ou componentes mecânicos.

Os resultados numéricos obtidos por simulação numérica utilizando o software Abaqus mostraram-se eficiente na otimização do processo, no projeto e construção das matrizes. Porém, devido às condições de rigidez do conjunto impostas durante a simulação, não foi necessária a utilização de colunas de sustentação no ferramental, conforme percebido nos ensaios práticos realizados.

O valor obtido experimentalmente para o coeficiente de atrito utilizado na modelagem matemática mostrou-se coerente, principalmente ao se avaliar a variação do comportamento da força de conformação nos resultados numéricos e práticos. O que garante a confiabilidade do teste do anel realizado.

Os resultados obtidos referentes ao ensaio de microdureza foram coerentes, pois apresentaram o aumento da dureza na região deformada, evidenciando o encruamento inerente ao trabalho a frio. Desse modo, pode-se concluir que a resistência da junção foi melhorada sem a necessidade de componentes mecânicos adicionais ou soldagem.

Por fim, o conteúdo deste trabalho atingiu o seu objetivo e pode auxiliar na disseminação desta aplicação, podendo viabilizar novas formas de junções de tubo em chapas na indústria.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o enriquecimento desta pesquisa e dessa nova metodologia desenvolvida para a junção de tubos em chapas por conformação mecânica, seria de grande importância os estudos e a análise dos esforços atuantes na matriz de conformação durante a deformação do tubo, pois o tempo de vida útil do ferramental está diretamente ligado a esses esforços. Outra sugestão é o estudo da variação do tamanho de grão das regiões de deformação do tubo, comparadas com regiões de não deformação para análise da variação resistência mecânica do material após a obtenção da junção.

Por fim, visando um estudo prático de aplicações desta junção em andaimes, seria importante uma análise de custos comparando o método tradicional de junção por soldagem e o realizado neste trabalho por conformação mecânica, considerando uma escala de produção real.



## REFERÊNCIAS

ABOLFATHI, M.; NIA, A. A. Optimization of energy absorption properties of thin-walled tubes with combined deformation of folding and circumferential expansion under axial load. **Thin-Walled Structures**, vol. 130, p. 57-70, 2018.

ALVES, L. M.; SILVA, C. M. A.; MARTINS, P. A. F. Joining of tubes by internal mechanical locking. **Joining of tubes by internal mechanical locking**, vol. 242, p.196-204, 2017.

ALVES, L. M.; DIAS, E. J.; MARTINS, P. A. F. Joining sheet panels to thin-walled tubular profiles by tube end forming. **Journal of Cleaner Production**, vol. 15, p. 712-719, 2013.

**ASM Metals Reference Book**, Third edition, Michael Baucio, Ed. ASM International, Materials Park, OH, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892/2002**: Materiais Metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8261/2019**: Perfil tubular, de aço carbono, formado a frio, com e sem costura, de secção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. **Manual de boas práticas**: módulo 1. São Paulo: ABPE, 2013. Disponível em: [http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/1\\_3.pdf](http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/1_3.pdf). Acesso em 06 nov. 2019.

ATTA, M. *et al.* Prediction of failure stages of Double lap joining using finite element analysis and artificial networks. **Engineering Failure Analysis**, vol. 97, p. 242-257, 2019.

BŁAZIK-BOROWA, E.; SZER, J. The analysis of the stages of scaffolding „life” with regard to the decrease in the hazard at building works. **Archives of civil and mechanical Engineering**, vol. 15, p. 516-524, 2015.

BORTSOV *et al.* Features of multi-electrode submerged-arc welding in the production of high-strength thick-walled pipes. **Metallurgist**, ano 3, vol. 57 n.3-4, p. 310-319, July. 2013.

BUENO *et al.* Ensaio do anel para avaliação do comportamento do coeficiente de atrito da liga de alumínio AA6351. **Estudos Tecnológicos**, vol. 6, n. 1, p. 11-21, jan/ Apr. 2010.

CIMELLARO, G. P.; DOMANESCHI, M. Stability analysis of different types of steel scaffolds. **Engineering Structures**, vol. 152, p.535-548, 2017.

CHEN, D.; DING, K; He, X. Ring test for evaluation of behavior of the friction coefficient of aluminum alloy. **Journal of Civil Engineering**, vol. 22, n. 7, p. 2344-2353, 2017.

CORRÊA, F. J.; SCHAEFFER, L. Estudo do processo de puncionamento por punção com ângulo convexo assistido por simulação numérica. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, vol. 10, n.3, p. 215-223, July-Sept. 2013.

ERITEN, M.; LEE, C.; POLYCARPOU, A. A. Measurements of tangential stiffness and damping of mechanical joints: Direct versus indirect contact resonance methods. **Tribology International**, vol. 50, p. 35-44, Jan. 2012.

FAN, Z.; LU, G.; LIU, K. Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes. **Engineering Structures**, vol. 55, p. 80-89, 2013.

GRUPTA, P.K. Numerical Investigation of Process Parameters on External Inversion of Thin-Walled Tubes. **Journal of Materials Engineering and Performance**, vol.23, n. 8, p. 2905-2917, 2014.

HIBBITT, K.; SORENSEN. "**Abaqus, User's manual version 6.5**". In Inc., Pawtucket, RI. 2004

HUANG, H. *et al.* Femtosecond fiber laser welding of dissimilar metals. **Applied optics**, vol. 53, n. 28, p. 6569-6578, Oct. 2014.

ILCIK, J.; AORRA, V.; DOLEJS, J., Design of new scaffold anchor based on the updated finite element model. **Engineering Structures**, vol. 118, p. 334-343, Apr. 2016.

JAY, A. *et al.* Large-Scale Bending Tests of Slender Tapered Spirally Welded Steel Tubes. **Journal of Structural Engineering**, vol 142, n. 12. p. 729–754, July. 2016.

KIRILENKO, O. M. *et al.* Improvement of complete technology for seamless pipe manufacture from carbon and low-alloyed steels. **Metallurgist**, vol.58, n.3, p. 207-211, Mar-Apr. 2014.

KONDRAT'EV, S. Y; ZOTOV, O. G.; SHVETSOV, O. V. Structural stability and variation of properties of aluminum alloys d16 and 1953 in production and operation of drill pipes. **Metal Science and Heat Treatment**, vol.55, n.9, p. 526-532, Jan. 2013.

KOZLOVSKY, P. *et al.* General tube law for collapsible thin and thick-wall tubes. **Journal of Biomechanics**, vol. 47, p. 2378-2384, 2014.

KUKHAR V. *et al.* Experimental research and method for calculation of 'upsetting-with-buckling' load at the impression-free (dieless) preforming of workpiece. **E3S Web of Conference**, vol. 33, 2018.

LOTHHAMMER, L. R. **Método para determinar o carregamento externo em dutos enterrados a partir da medição de tensões combinadas pela técnica de furo cego incremental**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LIU, Y. *et al.* An improved two-arcs deformational theoretical model of the expansion tubes. **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 133, p. 240-250, 2017.

PARK, K. S; VANTYNE, C. J; MOON, Y. H. Process analysis of multistage forging by using finite element method. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 187-178, p. 586-590, 2007.

REYNOLDS, J.; ZHANG, H.; RASMUSSEN, K. J.R. Investigation of U-head rotational stiffness in formwork supporting scaffold systems. **Engineering Structures**, vol. 136, p. 1-11, 2017.

SILLIS, R. B. *et al.* Dislocation networks and the microstructural origin of strain hardening. **Physical Review Letters**, vol. 121, p. 8-24, 2018.

SILVA, C. M. A *et al.* Environmentally friendly joining of tubes by their ends. **Journal of Cleaner Production**, vol. 87, p. 777-786, Oct. 2015.

SILVA G. C. *et al.* Analytical, numerical and experimental investigation of the influence of lubrication on the drawing behavior of copper alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 107, p. 1773-1784, 2020.

SKOPINSKII, V. N; BERKOV, N. A.; RUSANOV, O. A. Analyzing stresses in pipe joints to vessels with reinforcing rings. **Chemical and Petroleum Engineering**, vol. 43, n. 7-8, p. 445-451. 2007.

SUN, G. *et al.* Evaluation of defect density, microstructure, residual stress, elastic modulus, hardness and strength of laser-deposited AISI 4340 steel. **ActaMaterialia**, vol. 84, p. 172-189, Nov. 2015.

TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC. 1999.

YAMASHITA, M.; KENMOTSU, H.; HATTORI, T. Dynamic axial compression of aluminum hollow tubes with hat cross-section and buckling initiator using inertia force during impact. **Thin-Walled Structures**, vol. 50, p. 37-44, 2012.

ZAREH-DESARI, B.; DAVOODI, B. Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming processes. **Journal of Cleaner Production**, vol. 135, p. 1198-1209, July. 2016.

WANG, W; QUI, X. Coupling of creases and shells. **Journal of Applied Mechanics**, vol. 85, n.1, p. 105-112, Nov. 2018.



## ANEXO A - Certificado de calibração nº 175116 emitido pelo SENAI/MG



SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI)  
 CIT SENAI FIEMG – CAMPUS CETEC  
 Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto Florestal  
 31035-536 Belo Horizonte - MG - Brasil [www.fiemg.com.br](http://www.fiemg.com.br)

Gerência de Metrologia (GRM)

Tel.: (31)3489-2228, Fax: (31)3489-2226  
 e-mail: metrologiacit@fiemg.com.br

## Certificado de Calibração Nº 175116

Folha: 01/03

LABORATÓRIO ISAAC NEWTON  
 REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO (RBC)  
 LABORATÓRIO ACREDITADO PELA CGCRE



Cliente: *SOCIEDADE MINEIRA DE CULTURA*  
 Endereço: *Rua Rio Comprido, 4580, Cinco, 32010-025 Contagem - MG, Brasil*

Guia de Atendimento de Serviços Nº: 64832

Objeto: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS , tipo: eletromecânica , marca: EMIC, número de patrimônio: SOCIEDADE MINEIRA DE CULTURA 000207223, capacidade: 10 tf, medição por meio de: célula de carga, marca: PANANTEC, número de série: 039081-T, faixa nominal: 10 tf, indicação por meio de: indicador digital, marca: PANANTEC, faixa nominal: 5 dígitos, resolução: 1 dígito (0,001 tf)

Natureza do trabalho: CALIBRAÇÃO A TRAÇÃO segundo NBR NM-ISO 7500-1:2004 e Procedimento Técnico CIT SENAI FIEMG: PT 1101 (V. 2.0)

Data da calibração: 10.04.2017

Data da emissão: 17.04.2017

*Diego Navarro de Souza Oliveira*  
 Diego Navarro de Souza Oliveira  
 Técnico em Instrumentação CREA-MG 193625/TD  
 Responsável pelo Laboratório

*Luciene Aparecida Ferreira*  
 Luciene Aparecida Ferreira  
 Gerente de Metrologia

*Os resultados apresentados referem-se exclusivamente ao instrumento descrito como Objeto  
 Nas situações aplicáveis, o arredondamento dos números deste certificado foi realizado segundo as prescrições da NBR 5891/2014  
 O CIT SENAI FIEMG autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral*



**Gerencia de Metrologia (GRM)**

Tel.: (31)3489-2228, Fax: (31)3489-2226  
 e-mail: melrologiacit@fiemg.com.br

**Certificado de Calibração NQ 175116**

Folha: 02/03

1 Resultados

1.1 Faixa nominal 10 tf (tração)

1.1.1 Medoas

Valor fixo na máquina		Leitura no padrão / kN				Media cresc.	Media decresc.	Resolução relativa
/ tf	/ kN	F1	F2	F3	F4	/ k	/ kN	/ %
1,000	9,807	9,730	9,734	9,784	NA	9,49	NA	0,10
2,000	19,613	19,474	19,484	19,572	NA	19,510	NA	0,050
3,000	29,420	29,248	29,244	29,300	NA	29,264	NA	0,033
<b>4,000</b>	<b>39,227</b>	<b>39,014</b>	<b>38,990</b>	<b>39,084</b>	NA	<b>39,029</b>	<b>NA</b>	<b>0,025</b>
5,000	49,033	48,780	48,792	48,844	NA	48,805	NA	0,020
6,000	<b>58,840</b>	58,532	58,552	58,640	NA	58,575	NA	0,017
7,000	68,647	68,314	68,316	68,368	NA	68,333	NA	0,014
8,000	78,453	78,078	78,110	78,158	NA	78,115	NA	0,012
9,000	88,260	87,836	87,832	87,916	NA	87,861	NA	0,011
10,000	98,066	97,590	97,680	97,712	NA	97,661	NA	0,010

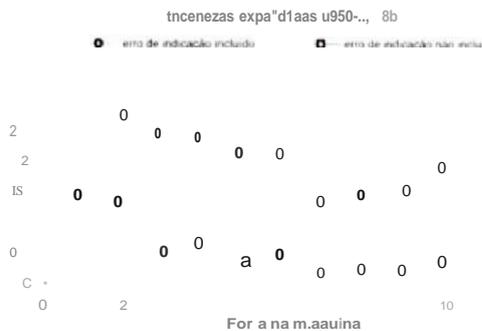
1.1.2 Incertezas

Valor fixo na máquina		Erro Indic.	Erro Repel.	Erro Revers.	Incertezas, U95% / %			
/tf	/kN	/%	/%	/%	Neff	k	incl. erro indic.	excl. erro indic.
1,000	9,807	0,59	0,55	NA	2,00E+00	4,53	3,0	1,5
2,000	19,613	0,53	0,50	NA	2,00E+00	4,53	2,7	1,3
3,000	29,420	0,53	0,19	NA	2,00E 00	4,53	2,5	0,52
4,000	39,227	0,51	0,24	NA	2,00E+00	4,53	2,4	0,65
5,000	49,033	0,47	0,13	NA	2,00E+00	4,53	2,1	0,37
6,000	58,840	0,45	0,18	NA	2,00E+00	4,53	2,1	0,50
7,000	68,647	0,46	0,079	NA	4,00E+00	2,87	1,3	0,16
8,000	78,453	0,43	0,10	NA	3,00E+00	3,31	1,4	0,22
9,000	88,260	0,45	0,096	NA	3,00E+00	3,31	1,5	0,21
10,000	98,066	0,42	0,12	NA	2,00E+00	4,53	1,9	0,36

1.1.3 Erro de zero

Determ.	F1	F2	F3	F4	maximo
<b>Erro / %</b>	0,0	0,0	0,0	NA	0,0

1.1.4 Representação gráfica das Incertezas



1.1.5 Classificação da faixa

For a limite inferior	Classe
1,00	1
2,00	



**SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI)**  
**CIT SENAI FIEMG - CAMPUS CETEC**  
 Av. Jose Candido da Silveira. 2000 • Bairro Horto Florestal  
 31035-536 Belo Horizonte - MG - Brasil [www.fiemg.com.br](http://www.fiemg.com.br)

**Gerência de Metrologia (GRM)**

Tel.: (31)3489-2228. Fax: (31)3489-2226  
 e-mail: metrolog.acit@fiemg.com.br

## Certificado de Calibração NQ175116

Folha: 03/03

### 2 Equipamentos utilizados na calibração

Id. GRM:	324.00	454.00
Funcão:	padrao de trabalho	instr. eletr. assoc1ada
Tipo:	transdutor de forca	modulo indicador digital
Marca:	HBM	HBM
Modelo:	24	MGC AB12 MOO
Faixa nom.:	100 kN	5 1/2 digitos
Pr6x. cal.:	06/2017	
Certificado:	141237	
6rgao cal.:	CETEC SENAI	
Incert.U95%:	0,064%	
Rastreab.:	INMETRO-Brasil	

### 3 Condições operacionais

3.1 Temperatura ambiente:  $T = 28,4^{\circ}\text{C}$

3.2 Operarão: Diego Navarro de Souza Oliveira e Jonathan Lopes de Souza • CIT SENAI FIEMG e Ernane Vinicius Silva - CUENTE

3.3 Local de instalacão da maquina: Laborat6rio de Materiais - CL.IENTE.

### 4 Observações

4.1 A Incerteza expandida de medicão relatada 6 declarada como a 1ncerteza padrao de mehcão mult1plicada por um fator de abrangencia  $k=2$ , o qual, para uma distribucão t com Neff graus de liberdade efetivos, corresponde a uma probabilidade de abrangencia de, aproximadamente, 95%. A incerteza padrao da medicão  $r_{01}$  determinada de acordo com a publicacão EA-4/02.

4.2 A incerteza padrao combinada de med açao foi realizada considerando-se os seguintes componentes: padrao (1nclui deriva), resoluiçao, erros de repetibilidade, de zero e de indicacão (quando aplicavel).

4.3 Siglas empregadas neste certificado: NA: nao-aplicavel; ND: nao-detectado.

### 5 Fatores de conversão adotados nas situações aplicáveis

Unidade	Para converter em N, multiplicar por	Unidade	Para converter em N, multiplicar por
kN	1000	poundal	0.138255
dyn	0,00001	ozr	0,2780139
kgl	9,80665	lbf	't,148222
kp	9,80665	kip	'14'18,222
tf	9806,65	tf (av)	8896,443
Mp	9806,65		

Laboratorio de Calib Jo acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR 150/IEC17025, sob o Ntimero CAL 0045



**ANEXO B- Certificado De Ensaio De Caracterização Do Aço AISI 1006**

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI  
Centro de Inovação e Tecnologia SENAI FIEMG  
Av. José Cândido da Silveira, 2000, Horto Florestal, Belo Horizonte - MG - CEP 31035-536  
Tel.: (31) 3489-2027 e-mail: [ist-metalmecanica@fiemg.com.br](mailto:ist-metalmecanica@fiemg.com.br)

**Instituto SENAI de Tecnologia Metalmecânica (ISTMM)**

**Certificado de Ensaio Nº 705640**

Folha: 1/3

CENTRO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA SENAI FIEMG  
LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS E METALGRÁFICOS

Cliente: *SAMARA CHRISTINA RODRIGUES SOARES*  
*Constança, 62, João Pinheiro*  
*30530260 Belo Horizonte, MG*

Guia de Autorização de Serviços (GAS) Nº: ISTMM-2019-39

Objeto: 01 amostra de aço – Identificação do cliente: Amostra metálica de aço.

Natureza do trabalho: Análise química por espectrometria ótica – PT 7426 – V1.0.

Data de conclusão  
22-02-2019

Data de emissão  
27-02-2019

Douglas Rocha Diniz  
Técnico Mecânico - CREA/MG 205698TD  
Responsável pelo Laboratório

*Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) descrita(s) no item 1.  
Nas situações aplicáveis, o arredondamento dos números apresentados neste certificado foi realizado segundo as prescrições da NBR 5891/2014  
O CIT SENAI FIEMG autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.*





\$ R/1lt;:IONAC;IOWL OE PIPRI;NOIZAG 111 IN0V5:IIIRIML -\$ENAI  
 CMlto de DO\ i TICmlcg- AIFil dG  
 A. J091i0,A,,llldD <fa \$j,,,,H, . 0110 floreg ,Beb <lllzon-e- 11'.-;CEJP 310\$-S36  
 Tel.: (31 3489-2027 e-mail: [ist-metalmeccarica@fiemg.com.br](mailto:ist-metalmeccarica@fiemg.com.br)

Instituto SENAI de tecnologia Metalmeccanica (ISiMM)

## Certificado de Ensaio N° 705640

Folha: 2/3

### 1 Identificação das amostras

Identificação do Laboratório	Identificação do cliente
IS17MM-2019-39-1	Amostra metálica de m;0

### 2 Resultados

Os teores indicados neste certificado referem-se à média de 03 (três) leituras efetuadas no equipamento.

#### RESULTADO DA ANÁLISE POR ESPECTROMETRIA ÓPTICA BASE FERRO (Fe)

ELEMENTO	C. carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)
TEOR (%)	0,050	0,034	0,357	0,015	0,0037	0,012
ELEMENTO	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)	Alumínio (Al)	Cobre (Cu)	Cobalto (Co)	Titânio (Ti)
TEOR (%)	<0,0025	<0,0010	0,041	0,0047	<0,0010	<0,0005
ELEMENTO	Níbio (Nb)	Vanádio (V)	Tungstênio (W)	Chumbo (Pb)	Boro (B)	Antimônio (Sb)
TEOR (%)	<0,0010	<0,0010	0,032	0,0093	0,0006	0,0041
ELEMENTO	Estanho (Sn)	Zinco (Zn)	Arsênio (As)	Bismuto (Bi)	Tântalo (Ta)	Cálcio (Ca)
TEOR (%TQ)	<0,0005	<0,000	0,003	<0,0015	<0,0070	<0,000
ELEMENTO	Cérebro (Ce)	Zircônio (Zr)	Lantânio (La)	Selênio (Se)	Nitrogênio (N)	Ferro (Fe)
TEOR (%)	<0,0020	0,0035	<0,0003	0,026	0,0062	99,4



Instituto SENAI de Tecnologia Metalmeccânica (ISTMM)

## Certificado de Ensaio Nº 705640

Folha: 3/3

### 3 Equipamento utilizado no ensaio

#### 3.1 Equipamentos

Identificação ISTMM	416.00
Função	Espectrômetro de emissão ótica de bancada
Marca	Spectro
Modelo	SpectroMaxx
Número de série	-

#### 3.2 Padrões

Os padrões primários de verificação utilizados no ensaio são anotados com X no campo Padrão utilizado.

Padrão utilizado				X
Identificação ISTMM	ISTMM 416.02	ISTMM 416.03	ISTMM 416.04	ISTMM 416.05
Número	BS. 61C	B.S. 316B	B.S. 410B	12X 15252 (LOTE Q)
Marca	BRAMMER	BRAMMER	BRAMMER	MBL ANALYTICAL LTD
Modelo	Referência do material AISI grade 8620	Referência do material AISI 316	Referência do material AISI 410	Aço de baixa liga
Número do Certificado	REV61C-032092	316B-121994	410B-123193	12X 15252 Q
Validade	Não definida	Não definida	Não definida	12/2029

Padrão utilizado	X			
Identificação ISTMM	ISTMM 416.06	ISTMM 416.07	ISTMM 416.08	ISTMM 416.09
Número	12X 44220 (LOTE A)	14X MN5 (LOTE T)	13X 12855 (LOTE M)	13X 17005 (LOTE D)
Marca	MBL ANALYTICAL LTD	MBL ANALYTICAL LTD	MBL ANALYTICAL LTD	MBL ANALYTICAL LTD
Modelo	AÇO DE BAIXA LIGA	AÇO MANGANÊS	Aço Inoxidável Austenítico	Aço Inoxidável Austenítico
Número do Certificado	12X 44220 A	14X MN5 T	13X 12855 M	13X 17005 D
Validade	08/2032	01/2035	05/2033	07/2034

### 4 Condições Operacionais

- 4.1 Temperatura ambiente:  $T = 23 \pm 5$  °C  
 4.2 Umidade relativa do Ar  $\leq 80\%$

### 5 Observações

- 5.1 Executado pelo Técnico Eduardo Gerson.  
 5.2 N/A – Não Disponível

### 6 Referência bibliográfica

- 6.1 PT 7426 - Procedimento de Operação do Espectrômetro de Bancada – V1.0 – 14-12-2016.