

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAS –PPGE3M

**WAGNER SILVEIRA SOARES**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DIRETA DE TUBOS DE  
AÇO SAE 1010**

Porto Alegre

2024

**WAGNER SILVEIRA SOARES**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DIRETA DE TUBOS DE  
AÇO SAE 1010**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer**

Porto Alegre

2024

WAGNER SILVEIRA SOARES

**ANÁLISE DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DIRETA DE TUBOS DE  
AÇO SAE 1010**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

BANCA EXAMINADORA: **REMOTO**

Prof. Dr. Eng. Alisson Duarte (UFMG)\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eng. Miguel Flach (ULBRA-RS)\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eng<sup>a</sup>. Luana De Lucca de Costa (IFSul)\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador do PPGE3M

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.  
Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?”

Isaac Newton

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por ter me oferecido esta oportunidade.

Aos meus pais, Antonio Valdimar Pedroso Soares e Leni Silveira Soares, que são meus suportes em todos os momentos.

A meu filho João Lucas de Lima Soares, por ser meu maior estímulo para seguir em frente diante de qualquer dificuldade.

A minha esposa Aline Monteiro de Lima, por me dar apoio e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing. LÍrio Schaeffer, pela grande oportunidade, auxílio e paciência.

A empresa Viemar Automotive, pela realização dos ensaios experimentais e simulação computacional, em especial ao meu colega de trabalho Eng. Tiago Chalinki pelo apoio.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao MSc. Eng. André Rosiak pela ajuda e assistência.

A todos os amigos, colegas e professores que auxiliaram nestes anos de pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 SITUAÇÃO DO PROBLEMA .....	12
1.2 OBJETIVO GERAL.....	12
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
1.4 JUSTIFICATIVA .....	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 CONCEITOS INICIAIS .....	15
2.2 PROCESSO DE EXTRUSÃO .....	16
<b>2.2.1 Processo de Extrusão Direta de Tubos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Deformações na Extrusão Direta para Barras Maciças e Tubos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3 Força de Extrusão Direta para Barras Maciças e Tubos (Fe).....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.4 Ferramentas para o Processo de Extrusão Direta .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.5 Lubrificação para o Processo de Extrusão Direta de Tubos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.6 Defeitos no Processo de Extrusão Direta de Tubos .....</b>	<b>22</b>
2.3 FLAMBAGEM EM TUBO.....	23
<b>2.3.1 Momento de Inércia (I) .....</b>	<b>25</b>
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	25
2.5 ENSAIOS MECÂNICOS.....	27
<b>2.5.1 Curvas de Escoamento (kf) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.2 Ensaio de compressão.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.3 Ensaio de dureza .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.4 Ensaio de dureza – Rockwell (HR) .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.5 Ensaio de achatamento.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.6 Metalografia .....</b>	<b>32</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	35
<b>3.1.1 Considerações sobre a Resistência a Deformação (kw) .....</b>	<b>37</b>
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO.....	38
<b>3.2.1 Ferramentas .....</b>	<b>38</b>

<b>3.2.1.1</b>	<b>Fabricação das Ferramentas .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.1.2</b>	<b>Encarçamento das Ferramentas.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Corte dos Tubos .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Máquina de Extrusão .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Ensaio de Compressão .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio de Dureza .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Ensaio de Achatamento de Tubos .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Ensaio de Metalografia .....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>DADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 15% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO (<math>\epsilon D_1</math>) .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 20% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO (<math>\epsilon D_1</math>) .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 25% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO (<math>\epsilon D_1</math>) .....</b>	<b>59</b>
<b>4.5</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 22,5% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO (<math>\epsilon D_1</math>) .....</b>	<b>61</b>
<b>4.6</b>	<b>FORÇA DE EXTRUSÃO (<math>F_e</math>) .....</b>	<b>62</b>
<b>4.7</b>	<b>ESFORÇO NA MATRIZ DE EXTRUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>CÁLCULO ANALÍTICO.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2</b>	<b>DADOS GEOMÉTRICOS DO TUBO .....</b>	<b>66</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Cálculo para Tensão de escoamento Média (<math>k_{fm}</math>).....</b>	<b>68</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Cálculo para o Ângulo da Matriz (<math>\alpha</math>) .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Cálculo para Força de extrusão (<math>F_e</math>) .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Cálculo para o Momento de (<math>I</math>) .....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Cálculo para Força Crítica de Flambagem (<math>F_{cr}</math>) .....</b>	<b>72</b>
<b>5.3</b>	<b>ENSAIO PRÁTICO DE EXTRUSÃO DIRETA .....</b>	<b>73</b>
<b>5.4</b>	<b>ANÁLISE DE DUREZA.....</b>	<b>77</b>
<b>5.5</b>	<b>ANÁLISE AO ACHATAMENTO DOS TUBOS .....</b>	<b>78</b>
<b>5.5.1</b>	<b>Ensaio de Achatamento de Tubos: Sem Deformação Relativa do Diâmetro Externo (<math>\epsilon D_1</math>).....</b>	<b>79</b>

<b>5.5.2 Ensaio de Achatamento de Tubos: 15% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo (<math>\epsilon D_1</math>).....</b>	<b>80</b>
<b>5.5.3 Ensaio de Achatamento de Tubos: 20% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo (<math>\epsilon D_1</math>).....</b>	<b>81</b>
<b>5.5.4 Ensaio de Achatamento de Tubos: 25% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo (<math>\epsilon D_1</math>).....</b>	<b>82</b>
<b>5.5.5 Ensaio de Achatamento de Tubos: 30% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo (<math>\epsilon D_1</math>).....</b>	<b>83</b>
<b>5.6 ANÁLISE DE METALOGRAFIA .....</b>	<b>84</b>
<b>6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
6.1 CURVA DE RESISTÊNCIA A DEFORMAÇÃO ( $k_w$ ) VERSUS CURVA DE ESCOAMENTO ( $k_f$ ).....	87
6.2 DEFORMAÇÃO VERDADEIRA ( $\phi$ ) .....	88
6.3 FORÇA DE EXTRUSÃO ( $F_e$ ) .....	89
6.4 MÁXIMA DEFORMAÇÃO RELATIVA DO DIÂMETRO EXTERNO ( $\epsilon D_1$ ) .....	90
6.5 DIÂMETRO EXTERNO ( $D_1$ ) APÓS EXTRUSÃO DIRETA.....	91
6.6 RESISTÊNCIA NA PAREDE DO TUBO.....	92
6.7 AUMENTO DA DUREZA .....	92
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>94</b>
<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>98</b>



## RESUMO

Este estudo propõe uma análise dos efeitos da Deformação Relativa ( $\epsilon$ ) no diâmetro externo dos tubos de aço SAE 1010 durante o processo de Extrusão Direta sem Mandril interno. Para tal, são empregados cálculos analíticos, Simulações Computacionais e experimentos práticos. Destaca-se que as propriedades mecânicas do produto final variam significativamente de acordo com o grau de extrusão empregado. Utilizando corpos de prova em formato de tubos com Diâmetro externo ( $D_0$ ) de 21,80mm, Diâmetro interno ( $d_0$ ) de 17,10mm e Comprimento ( $l_0$ ) de 200mm, o estudo investiga a influência da Deformação Relativa no diâmetro externo dos tubos ( $\epsilon D_1$ ) e seu impacto nas propriedades mecânicas do produto final até o momento crítico de flambagem. Os ensaios foram executados com a variação dos diâmetros no Canal de calibração da Matriz (diâmetro externo extrudado), tendo como ponto de partida uma Deformação Relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 15%, progredindo em incrementos de 5% de Deformação Relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) em cada etapa dos ensaios, sendo monitorado até alcançar o ponto de flambagem do tubo. Para suportar as tensões durante o processo, foram utilizadas Matrizes de aço AISI M2. Para minimizar a força de atrito, os tubos foram lubrificados com Fosfato de Zinco e sabão lubrificantes normalmente utilizados para conformação a frio. Resultados analíticos, simulações computacionais e testes práticos foram complementados por ensaios mecânicos, sendo realizado uma análise comparativa com a literatura. A abordagem permitiu determinar um valor máximo de extrusão, proporcionando uma compreensão aprofundada das características e limitações do processo. Os resultados destacam a segurança na extrusão de tubos de aço SAE 1010 com Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 22,5%, resultando em um aumento de aproximadamente 13% na dureza e notável aumento na resistência da solda para tubos com costura.

**Palavras-chave:** Aço SAE 1010; Extrusão Direta; Conformação a frio; Flambagem.

## ABSTRACT

The present study proposes a thorough analysis of the effects of Relative Deformation ( $\epsilon$ ) on the external diameter of SAE 1010 steel tubes during the Direct Extrusion process without an internal mandrel. Analytical calculations, computer simulations, and practical experiments were conducted in order to reach precise conclusions. We highlight that the mechanical properties of the final product vary significantly depending on the degree of extrusion applied. Using test specimens of tubes with an External Diameter ( $D_0$ ) of 21.80mm, Internal Diameter ( $d_0$ ) of 17.10mm, and Length ( $l_0$ ) of 200mm, this research investigates the influence of Relative Deformation on the external diameter of the tubes ( $\epsilon D_1$ ) and its impact on the mechanical properties of the final product until the critical buckling moment. The tests were carried out with variations in diameters in the Die Calibration Channel (extruded external diameter). We started with a Relative Deformation of the external diameter ( $\epsilon D_1$ ) of 15%, progressed incrementing 5% Relative Deformation of the external diameter ( $\epsilon D_1$ ) at each stage of the tests, while carefully monitoring until reaching the tube's buckling point. The study used AISI M2 steel dies in order to resist the stresses during the process. Additionally, to minimize frictional forces, the tubes were lubricated with Zinc Phosphate and other lubricating soaps commonly used in cold forming. Analytical results, computer simulations, and practical tests were complemented by mechanical tests. Finally, we conducted a comparative analysis based on specialized literature. Such approach allowed the determination of a maximum viable extrusion range, providing an in-depth understanding of the characteristics and limitations of the process. The results highlight the safety in extruding SAE 1010 steel tubes with Relative Deformation in the external diameter ( $\epsilon D_1$ ) of 22.5%, resulting in an approximate 10% increase in hardness and a noticeable improvement in weld strength for seamed tubes. These findings are valuable contributions to process optimization, advancing the efficient production of tubes with enhanced mechanical properties.

**Keywords:** SAE 1010 Steel; Direct Extrusion; Cold Forming; Buckling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho. ....	14
Figura 2: (A) Extrusão Direta de Tubo sem Mandril; (B) Extrusão Direta de Tubo com Mandril. (Autor, 2024) .....	17
Figura 3: Principais deformações verdadeiras ( $\varphi$ ) no processo de extrusão direta de um tubo (A) Deformações antes do processo de extrusão (B) Deformações após o processo de extrusão. (Autor, 2024).....	18
Figura 4: Processo de Extrusão Direta com Maciço e Tubo (A) Extrusão Direta de uma Barra maciça; (B) Extrusão Direta de um Tubo. (Autor, 2024).....	19
Figura 5: Recomendação de geometria para matriz de extrusão. (Billigmann, 1979) .....	21
Figura 6: Flambagem. (Hibbeler, 2009). ....	24
Figura 7: Parâmetros utilizados em Simulações Computacionais. (JUNIOR, 2007).....	27
Figura 8: Curva tensão ( $\sigma$ ) x Deformação verdadeira ( $\varphi$ ). (Marcontes, 2015).....	28
Figura 9: Curvas de escoamento (kf) (a) Representação da Curva de escoamento a frio; (b) Representação da Curva de escoamento a quente. (Schaeffer, 2006). ....	29
Figura 10: Curva de escoamento (kf) do aço Ck10. (Tschätsch, 2005). ....	29
Figura 11: Corpo de prova do ensaio de compressão para definição da curva de resistência a deformação (kw). (Autor, 2024).....	36
Figura 12: Ensaio de Compressão. ....	37
Figura 13: Corpos de prova após ensaio de compressão. ....	37
Figura 14: Curva de Resistência a Deformação (kw) do aço SAE 1010.....	38
Figura 15: Desenho para fabricação da matriz. ....	39
Figura 16: Torno CNC Doosan Lynx 2100 LMSB. ....	40
Figura 17: Matriz de Extrusão. ....	40
Figura 18: Medição de Rugosidade. ....	41
Figura 19: Conjunto de ferramental montado. ....	42
Figura 20: Máquina Serra Franho SC 70 A. ....	42
Figura 21: Tubos cortados .....	43
Figura 22: Linha para o processo de lubrificação dos tubos. ....	44
Figura 23: Tubos com e sem sabão lubrificante. ....	45
Figura 24: Estrusora hidráulica horizontal. ....	46
Figura 25: Posição inicial de extrusão x Prosição final de extrusão. ....	46
Figura 26: Instrumento para medição de concentricidade: (A) Instrumento sem o tubo; (B) Instrumento com o tubo. ....	47
Figura 27: Termo-Hidrômetro digital.....	47
Figura 28: Máquina universal de ensaio EMIC DL 1000. ....	48
Figura 29: Durômetro Heckert. ....	49
Figura 30: Calibração do durômetro.....	50
Figura 31: Corpos de prova para o ensaio de achatamento. ....	50
Figura 32: Etapas do ensaio de achatamento de tubos (A) Início do ensaio; (B) Ao longo do ensaio; (C) Final do ensaio. ....	51
Figura 33: Serra de fita vertical com volante e mesa inclinável da marca Acerbi. ....	52
Figura 34: Corpos de prova secção transversal e secção longitudinal para ensaio metalográfico. ....	52
Figura 35: Preparação dos corpos de prova: (A) Processo de embutimento; (B) Corpos de prova embutidos; (C) Preparação dos corpos de prova embutidos. ....	53

Figura 36: Microscópio metalográfico de platina invertida, marca Fortel. ....	54
Figura 37: Resultado numérico da distribuição de tensões. ....	55
Figura 38: Curva de escoamento aço Ck10 através da equação $kf = 740 \cdot \varphi 0,216$ . ....	56
Figura 39: Simulação computacional de extrusão direta - 15% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	57
Figura 40: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo. ....	58
Figura 41: Simulação Computacional de Extrusão Direta – 20% de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	58
Figura 42: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo. ....	59
Figura 43: Simulação Computacional de Extrusão Direta – 25% de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	60
Figura 44: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo. ....	60
Figura 45: Simulação Computacional de Extrusão Direta – 22,5% de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	61
Figura 46: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo. ....	62
Figura 47: Força de extrusão simulada utilizando o software Qform. ....	63
Figura 48: Momento da flambagem – Software Qform. ....	64
Figura 49: Tensões na Ferramenta – Software Qform. ....	65
Figura 50: Vida útil da Matriz de extrusão – Software Qform. ....	65
Figura 51: Tubo Antes e Depois do processo de Extrusão Direta. (Autor, 2024). ....	66
Figura 52: Corpos de prova após ensaio prático de extrusão direta. ....	76
Figura 53: Aumento de dureza na região do comprimento ( $L_c$ ) após extrusão direta. ....	78
Figura 54: Ensaio de achatamento sem deformações relativas do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	79
Figura 55: Força x Deslocamento – Tubo sem deformações relativas do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	80
Figura 56: Ensaio de Achatamento com 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	80
Figura 57: Força x Deslocamento – Tubo com 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	81
Figura 58: Ensaio de Achatamento com 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	81
Figura 59: Força x Deslocamento – Tubo com 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	82
Figura 60: Ensaio de Achatamento com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	82
Figura 61: Força x Deslocamento - Tubo com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	83
Figura 62: Ensaio de Achatamento com 30% de Deformação Relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	83
Figura 63: Força x Deslocamento - Tubo com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	84
Figura 64: Comparativo entre curva resistência a deformação ( $k_w$ ) e curva tensão de escoamento ( $K_f$ ). ....	87
Figura 65: Ensaio de compressão: Prático x Simulado. ....	88
Figura 66: Deformação verdadeira, $\varphi$ (-). ....	89
Figura 67: Força de extrusão ( $F_e$ ) – Cálculo Analítico. ....	90
Figura 68: Comparativos entre resultados obtidos pela Simulação Computacional e pelo Ensaio Prático. ....	91

Figura 69: Diâmetro Externo ( $D_1$ ) após Extrusão Direta.....	91
Figura 70: Comparativos de aumento da resistência ao achatamento – Ensaio de compressão lateral $0^\circ$ e $90^\circ$ . .....	92
Figura 71: Comparativo ao aumento de dureza entre ensaio prático e simulação computacional.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente de atrito. (Schaeffer, 2006).....	22
Tabela 2: Dimensões da matéria prima – Norma DIN EN 10305-2. ....	35
Tabela 3: Composição química: Certificado de qualidade.....	36
Tabela 4: Dados dos corpos de prova para o ensaio de achatamento de tubos. ....	51
Tabela 5: Dados do material para Simulação Computacional – QFORM. ....	56
Tabela 6: Dados do processo para simulação computacional – QFORM. ....	56
Tabela 7: Dados geométricos do tubo. ....	66
Tabela 8: Dados de deformação verdadeira. ....	68
Tabela 9: Valores de $kf_1$ e $kfm$ (N/mm <sup>2</sup> ).....	69
Tabela 10: Valores da força necessária para extrusão direta dos tubos.....	71
Tabela 11: Momento de inércia .....	72
Tabela 12: Força crítica necessária para flambagem.....	73
Tabela 13: Relação de força de extrusão e força crítica .....	73
Tabela 14: Resultado do ensaio prático de extrusão direta. ....	76
Tabela 15: Dimensões dos tubos após ensaio de extrusão direta. ....	77
Tabela 16: Concentricidade dos tubos após ensaio de extrusão direta.....	77
Tabela 17: Dimensões de dureza. ....	78
Tabela 18: Análise metalográfica: Sem deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ....	85
Tabela 19: Análise metalográfica: 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ..	85
Tabela 20: Análise metalográfica: 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ..	85
Tabela 21: Análise metalográfica: 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ..	86
Tabela 22: Análise metalográfica: 30% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). ..	86

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	Área inicial	$\text{mm}^2$
$A_t$	Área do tubo	$\text{mm}^2$
$B$	Comprimento do canal de calibração da matriz	mm
$C$	Coefficiente de resistência do material (constante para $\phi=1$ )	Mpa
$C_F$	Comprimento do cone de saída da matriz	mm
$D$	Diâmetro de entrada na matriz	mm
$D_0$	Diâmetro externo tubo	mm
$d_0$	Diâmetro interno tubo	mm
$D_1$	Diâmetro externo tubo após extrusão	mm
$d_1$	Diâmetro interno tubo após extrusão	mm
$E$	Módulo de elasticidade	Pa
$EF$	Ângulo do cone de saída da matriz	°
$F$	Força	N
$F_e$	Força de extrusão	N
$F_{cr}$	Força crítica de flambagem	kN
$I$	Momento de inércia	$\text{mm}^4$
$k_f$	Tensão de escoamento	$\text{N}/\text{mm}^2$
$k_{f_0}$	Tensão de escoamento inicial	$\text{N}/\text{mm}^2$
$k_{f_1}$	Tensão de escoamento no final do processo	$\text{N}/\text{mm}^2$
$k_{fm}$	Tensão de escoamento média	$\text{N}/\text{mm}^2$
$k_w$	Resistência a deformação	$\text{N}/\text{mm}^2$
$L$	Comprimento	mm
$l_0$	Comprimento inicial	mm
$l_1$	Comprimento final	mm

le	Comprimento não extrudado	mm
n	Coefficiente de encruamento	-
s	Espessura do tubo	mm



## SÍMBOLOS GREGOS

$\mu$	Coeficiente de atrito	-
$\alpha$	Ângulo da matriz (calculado)	°
$\beta$	Ângulo da matriz	°
$\varepsilon$	Deformação relativa	%
$\varepsilon D_1$	Deformação relativa no diâmetro externo do tubo	%
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma$	Tensão	N/mm <sup>2</sup>
$\varphi$	Deformação verdadeira	-

## LISTA DE ABREVIACOES

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
C.P.	Corpo de Prova
Dr.	Doutor
Eng.	Engenheiro
FEM	Método dos Elementos Finitos
IFSul	Instituto Federal de Educao, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense
IHM	Interface Homem Máquina
LdTM	Laboratório de Transformao Mecânica
MSc	Mestre
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentar
PPGE3M	Programa de Pós-Graduao em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
S.A.	Sociedade Annima
SAE	Society of Automotive Engineers
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## 1 INTRODUÇÃO

A conformação mecânica emerge como um dos mais comuns e ancestrais processos de fabricação mecânica. Este processo produz componentes de altíssima resistência mecânica e qualidade, abrangendo desde peças pequenas até peças de grandes tamanhos, peças menos complexas como uma simples prensagem ou extrusão, ou também peças de geometrias complexas que levariam muito tempo para serem produzidas em outro processo de fabricação. Segundo Button (2011), o processo de conformação dos corpos metálicos pode ser conceituado como a modificação da forma desse corpo metálico para outra forma definida.

A indústria metalúrgica tem constantemente buscado soluções eficientes e economicamente viáveis para a produção de componentes metálicos com geometrias complexas. Neste contexto, a extrusão direta surge como uma técnica de conformação mecânica promissora, capaz de proporcionar a fabricação de peças com alta precisão dimensional e integridade estrutural. Assim, a extrusão propõe uma alternativa promissora para a fabricação de tubos de aço SAE 1010. No entanto, apesar de sua crescente aplicação em outros metais, a aplicação da extrusão em tubos de aço SAE 1010 ainda requer uma investigação aprofundada.

O processo de extrusão é um processo de conformação mecânica que consiste na passagem forçada e controlada do material através de uma matriz adquirindo, assim, a forma predeterminada pela forma da matriz projetada para a peça, resultando na obtenção de uma peça com propriedades mecânicas superiores. O processo de extrusão pode ser subdividido como extrusão direta ou extrusão indireta, a variável que define essa subdivisão é o sentido do fluxo do material. No processo de Extrusão a ferramenta permanece em situação estática, enquanto o material é movimentado em direção da matriz.

O aço SAE 1010, por sua vez, é um aço de baixo teor de carbono amplamente utilizado em várias aplicações industriais. Devido suas propriedades mecânicas adequadas e facilidade de processamento, o aço SAE 1010 é frequentemente empregado na fabricação de tubos utilizados em setores como construção civil, automotivo e indústria de petróleo e gás.

Tradicionalmente, as discussões sobre extrusão tendem a focar predominantemente em materiais em formato maciço, resultando na escassez de informações sobre a execução do processo em corpos tubulares. Ao compreender melhor as características e o comportamento do aço SAE 1010 durante o processo de extrusão direta, será possível identificar oportunidade de otimização e aprimoramento desse método de fabricação, os resultados obtidos neste estudo podem contribuir com o avanço na indústria metalúrgica, fornecendo informações valiosas para

a produção eficiente e de alta qualidade para tubos de aço SAE 1010, podendo trazer benefícios significativos em termos de redução de custos, aumento de produtividade e melhoria da qualidade nos produtos finais.

### 1.1 SITUAÇÃO DO PROBLEMA

Devido ao grande avanço da indústria, a falta de estudos abrangentes sobre a aplicação de extrusão direta em tubos dificulta a compreensão dos efeitos desse processo nas propriedades mecânicas e na qualidade dos tubos produzidos. Logo, a otimização dos parâmetros de processo ainda não foi amplamente explorada nesse contexto específico. Além disso, a demanda por tubos de aço extrudados vem crescendo em diversos setores industriais. Faz-se então necessário o desenvolvimento de processos de fabricação mais eficientes e econômicos para atender essa demanda crescente.

Identificar o grau máximo de extrusão possível sem que o produto venha apresentar defeitos estruturais é um processo essencial nesta produção. Também se deve o estudo quanto a força necessária para o processo, e uma vez que quanto maior a resistência do material, maior deverá ser a força necessária de extrusão. Além disso, esta análise oferece oportunidade de melhorar a qualidade, aumentar a eficiência produtiva, reduzir custos e impulsionar o avanço tecnológico na indústria metalúrgica como um todo. Na produção de grandes lotes, pequenas melhorias ou ganho de produtividade e qualidade no produto podem significar uma grande redução de custos para as empresas.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é determinar o valor máximo de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) para tubos de aço SAE 1010 com diâmetro externo ( $D_0$ ) de 21,80mm e diâmetro interno ( $d_0$ ) de 17,10mm utilizando o processo de extrusão direta sem utilização de mandril interno.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analisar o comportamento mecânico do material em temperatura ambiente, com foco na compreensão de suas propriedades e respostas sob diferentes condições de carga.

2. Determinar os diâmetros externos ideais para o processo de extrusão através da análise de parâmetros críticos, considerando tanto os requisitos de fabricação quanto as propriedades mecânicas desejadas no produto final.

3. Avaliar e analisar criticamente os resultados experimentais, computacionais e analíticos, identificando padrões, anomalias e correlações significativas para informar o processo de tomada de decisão.

4. Determinar o valor máximo para a Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ) até o momento de flambagem, com análise detalhada dos fatores que influenciam esse fenômeno e suas implicações para o projeto e fabricação.

#### 1.4. JUSTIFICATIVA

Industrialmente, esta pesquisa tem como objetivo primordial dispor de informações relevantes sobre o processo de extrusão direta em aços SAE 1010. Sendo que, este tema contém bibliografia aprofundada. Outrossim, esta pesquisa pretende fornecer dados significativos da aplicação deste processo utilizando este aço para a execução de projetos em que exigem componentes com grande qualidade.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi realizado em oito capítulos, sendo eles: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Simulação Computacional, Análise Experimental, Discussão de Resultados, Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros. A figura 1 apresenta resumidamente o fluxograma do presente trabalho.

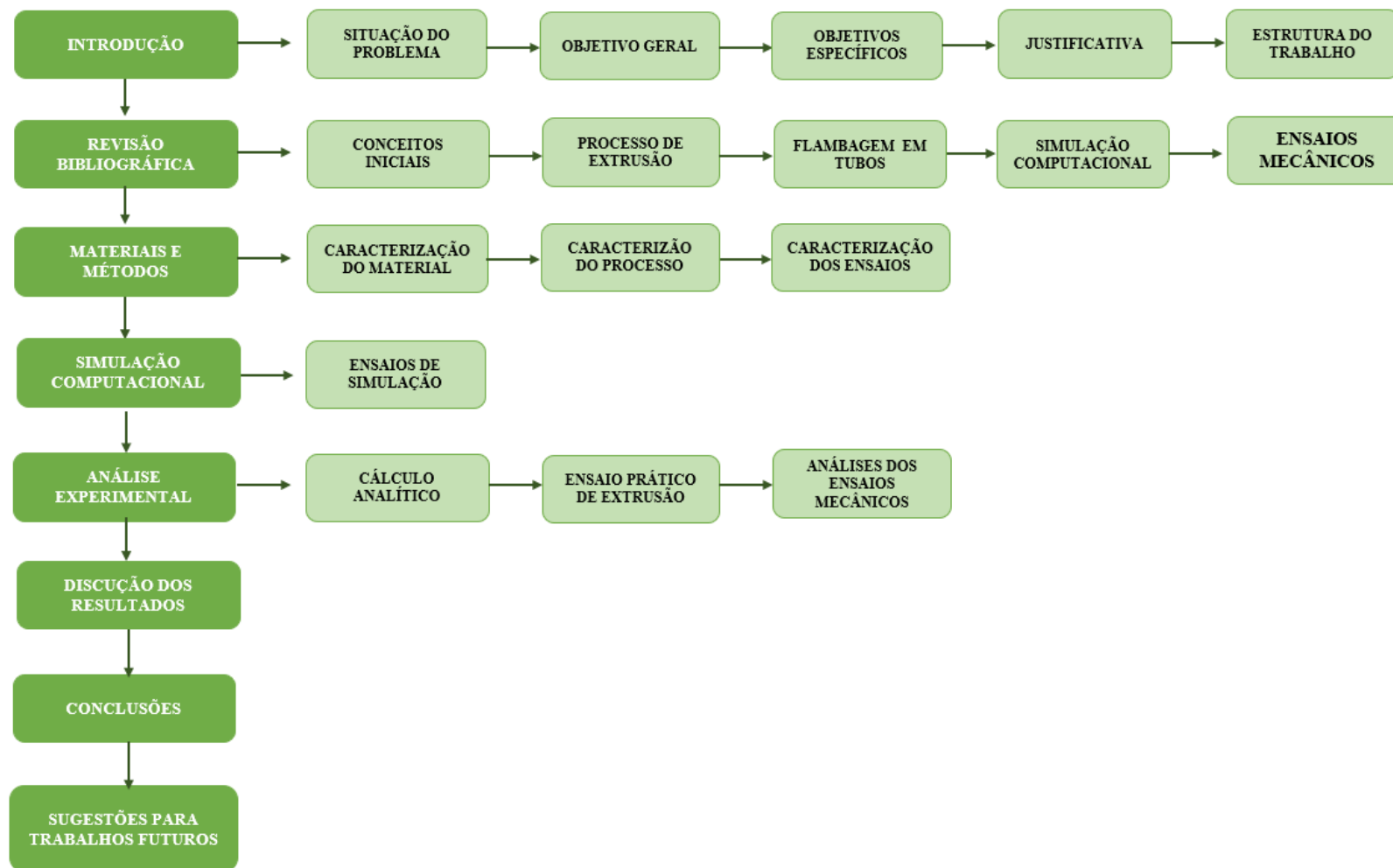


Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONCEITOS INICIAIS**

A respeito dos processos de conformação mecânica, Button (2011) conceitua que podem ser divididos em processos mecânicos, cujas mudanças acontecem pela aplicação de tensões externas, e às vezes em altas temperaturas, mas sem a liquefação do metal.

Os processos de conformação mecânica alteram a geometria do material (forma) por deformação plástica, através de esforços aplicadas por ferramentas adequadas, que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros. Este processo tem diversas vantagens, destacando-se: o bom aproveitamento da matéria; rapidez na execução; possibilidade de controle das propriedades mecânicas; possibilidade de grande precisão; tolerância dimensional; dentre outras. É importante observar, entretanto, que o ferramental e os equipamentos possuem um custo muito elevado, exigindo, desta forma, grandes produções para justificar o processo economicamente.

Esses processos podem ser classificados de várias formas, sendo as mais conhecidas são pela temperatura e pela tensão aplicada. Quanto à temperatura, pode-se classificar conforme as operações de trabalho, sendo elas: a quente, a morno e a frio. De acordo com Button (2011), os processos de conformação podem ser categorizados com base na temperatura de trabalho, distinguindo entre trabalho mecânico a frio e trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho excede o ponto de recristalização do metal, o processo é considerado como trabalho a quente, enquanto que quando a temperatura está abaixo desse ponto, é classificado como trabalho a frio.

Uma das vantagens deste processo é o fato de a produção das peças ser relativamente mais rápida quando comparada outros processos (como por exemplo a usinagem). Além disso, a conformação mecânica na fabricação de peças também apresenta capacidade de produzir componentes com excelente qualidade e resistência mecânica devido ao encruamento do material devido as tensões aplicadas. O encruamento, de acordo com Schaeffer (2020), ocorre quando a tensão aumenta progressivamente durante o processo de deformação. Em termos simples, o encruamento advém da deformação plástica do metal a frio, levando a um aumento na densidade de discordâncias. Esse aumento na densidade de discordâncias resulta em um aumento na resistência mecânica, mas uma diminuição na ductibilidade.

## 2.2 PROCESSO DE EXTRUSÃO

Extrusão é o processo em que a peça passa forçada contra a matriz conformadora com redução da sua seção transversal. O processo de extrusão é considerado como compressão indireta, pois quem provoca a tensão de compressão são as paredes internas da ferramenta, fazendo com que o material fluía por dentro do orifício. A extrusão pode ser subdividida em cinco subdivisões, são elas: *Extrusão Direta*, *Extrusão Indireta*, *Extrusão Hidrostática*, *Extrusão Lateral* e *Extrusão Combinada*, ambos os tipos de extrusão tem o mesmo princípio, sendo as mais comuns *Extrusão Direta* e *Extrusão Indireta*.

Uma característica da extrusão é que normalmente se tem o fluxo de saída do metal no centro da ferramenta, causando *escoamento frontal* do material no centro. Sendo assim, pode surgir defeitos no material, causados pelo atrito na interface matriz/material. Devido a este alto atrito, utiliza-se lubrificantes específicos para conformação. Os defeitos normalmente são internos e podem ser visíveis a olho nu ou não.

Segundo Schaeffer (2006), o processo de extrusão oferece diversas vantagens típicas, tais como economia significativa de matéria-prima devido à ausência de perdas por usinagem ou rebarbas em comparação com outros métodos. Além disso, o processo proporciona excelentes propriedades mecânicas devido à formação de uma microestrutura caracterizada pela fibragem contínua do material. Outras vantagens incluem a precisão dimensional, forma e peso absolutos, em comparação com acabamentos finais de usinagem, bem como a possibilidade de produção com economia de tempo e aumento do rendimento devido à coordenação e combinação das várias etapas do processo.

### 2.2.1 Processo de Extrusão Direta de Tubos

A extrusão direta é o tipo de extrusão mais simples de se ver, e ela ocorre quando o fluxo do material segue no sentido da força aplicada e o material extrudado passa pela matriz. Em tubos, podem ter diversas aplicações como: na indústria automotiva, aeroespacial, aeronáutica, dentre outras, pois, detém de ótimas propriedades mecânicas devido ao encruamento. O processo de extrusão de tubos é realizado por uma máquina chamada Extrusora, normalmente essas máquinas são hidráulicas. A extrusão de tubos pode ser realizada utilizando um mandril no interior do tubo, ou não. Para as peças extrudadas com mandril no interior do tubo, o diâmetro interno do tubo ( $d_i$ ) fica constante, logo, para peças extrudadas sem o mandril interno o diâmetro interno do tubo ( $d_i$ ) pode ficar não constante devido o fluxo do material. Na parede



do tubo (s) pode haver variações dimensionais devido não conter mandril interno, assim, resultando em uma peça final com diâmetro externo ( $D_1$ ) constante e diâmetro interno ( $d_1$ ) com variação dimensional.

A figura 2 apresenta a diferença entre uma peça sendo extrudada sem utilização do mandril interno e outra peça sendo extrudada com utilização do mandril interno.

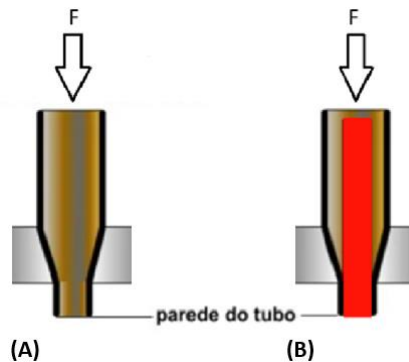


Figura 2: (A) Extrusão Direta de Tubo sem Mandril; (B) Extrusão Direta de Tubo com Mandril. (Autor, 2024)

### 2.2.2 Deformações na Extrusão Direta para Barras Maciças e Tubos

De acordo com Lirio Schaeffer (2020), a deformabilidade ou conformabilidade de um material refere-se à sua capacidade de suportar deformações plásticas sem que ocorram defeitos, rupturas, microtrincas ou falhas resultantes do processo de deformação.

Para peças cilíndricas as três principais deformações verdadeiras são: no comprimento ( $\varphi_l$ ), no perímetro ( $\varphi_p$ ) e no Raio ( $\varphi_r$ ).

- No comprimento:  $\varphi_l = \ln \frac{l}{l_0}$
- No perímetro:  $\varphi_p = \ln \frac{2\pi r}{2\pi r_0}$
- No raio:  $\varphi_r = \ln \frac{r}{r_0}$

Sempre que um corpo deforma seu volume mantém, isso se dá através da *Lei da Constância de Volume*. Matematicamente, é possível demonstrar a Lei da Constância de Volume através da equação:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

Pode-se deduzir que a deformação em área ( $\varphi_A$ ) é igual a deformação em comprimento

( $\varphi_L$ ) e é numericamente a maior das 3 deformações principais. A figura 3 apresenta as três principais deformações verdadeiras ( $\varphi$ ) para o processo de extrusão direta em um tubo.

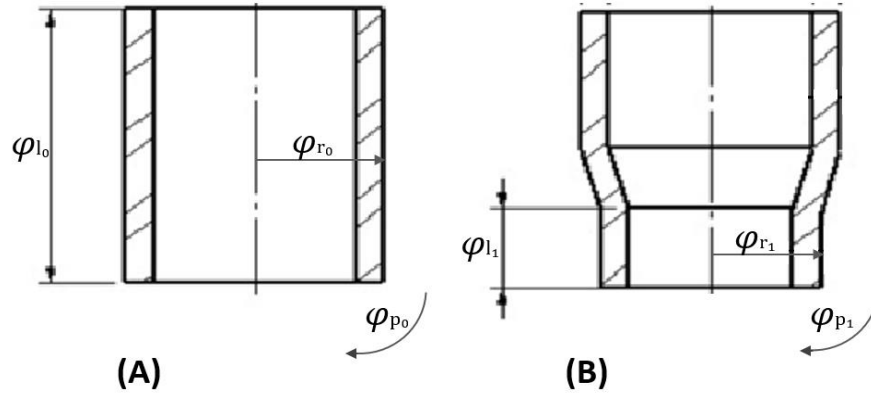


Figura 3: Principais deformações verdadeiras ( $\varphi$ ) no processo de extrusão direta de um tubo (A) Deformações antes do processo de extrusão (B) Deformações após o processo de extrusão. (Autor, 2024)

A figura 4 apresenta o processo de extrusão sendo realizado com geometria maciça e tubular, também é apresentado as equações de deformação relativa ( $\epsilon$ ) e deformação verdadeira ( $\varphi$ ), pelas equações 1, 2, 3 e 4.

- Deformação Relativa em área na extrusão de uma barra maciça:

$$\epsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \quad \text{Equação 1}$$

- Deformação Verdadeira em área na extrusão de uma barra maciça:

$$\varphi_A = \ln \frac{A_0}{A_1} = 2 \ln \left( \frac{D_0}{D_1} \right) \quad \text{Equação 2}$$

- Deformação Relativa em área na extrusão de um tubo:

$$\epsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{D_0^2 - d_0^2}{d_0^2 - d_1^2} \quad \text{Equação 3}$$

- Deformação Verdadeira em área na extrusão de um tubo:

$$\varphi_A = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \left( \frac{D_0^2 - d_0^2}{D_1^2 - d_1^2} \right) \quad \text{Equação 4}$$

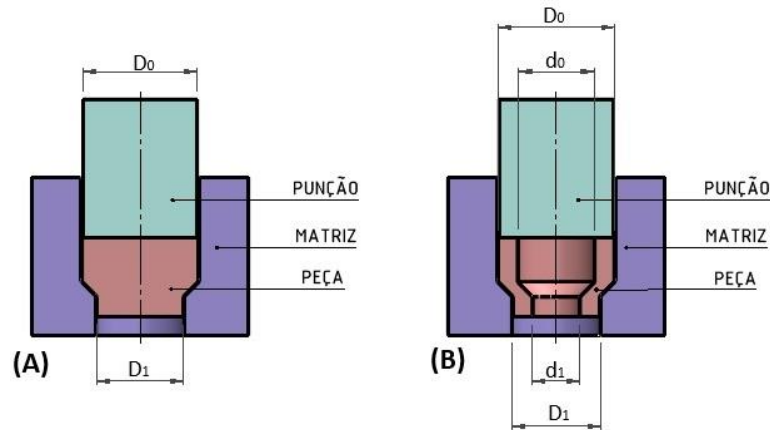


Figura 4: Processo de Extrusão Direta com Maciço e Tubo (A) Extrusão Direta de uma Barra maciça; (B) Extrusão Direta de um Tubo. (Autor, 2024)

É conhecido que em peças extrudadas existem três deformações principais, sendo a maior delas a deformação em comprimento ( $\varphi_L$ ), que, portanto, tem o mesmo valor da deformação em área ( $\varphi_A$ ). Em peças tubulares extrudadas sem mandril interno, ocorre uma variação na parede da peça, resultando em uma parede não uniforme ao longo do processo de extrusão, o que dificulta a medição precisa da área ao final do processo. Assim, optou-se por avaliar com precisão as deformações no diâmetro externo, pois este é extremamente uniforme e não sofre variações significativas ao longo do processo de extrusão.

### 2.2.3 Força de Extrusão Direta para Barras Maciças e Tubos (Fe)

A força necessária para executar o processo de extrusão direta para maciços e tubos é calculada pela equação 5:

$$F_e = A_0 \cdot k_{fm} \cdot \varphi \cdot \left( 1 + \frac{2\mu}{\text{sen}2\alpha} + \frac{2}{3} + \frac{\alpha}{\varphi} \right) + \pi \cdot D_0 \cdot \mu \cdot k_{f0} \cdot L_e \quad \text{Equação 5}$$

- $F_e$ : Força de extrusão direta (N)
- $A_0$ : Área inicial (mm<sup>2</sup>)
- $k_{fm}$ : Tensão de escoamento média (N/mm<sup>2</sup>)
- $k_{f0}$ : Tensão de escoamento inicial (N/mm<sup>2</sup>)
- $\varphi$ : Deformação verdadeira (-)
- $\alpha$ : Ângulo da ferramenta (°)
- $L_e$ : Comprimento não extrudado (mm);

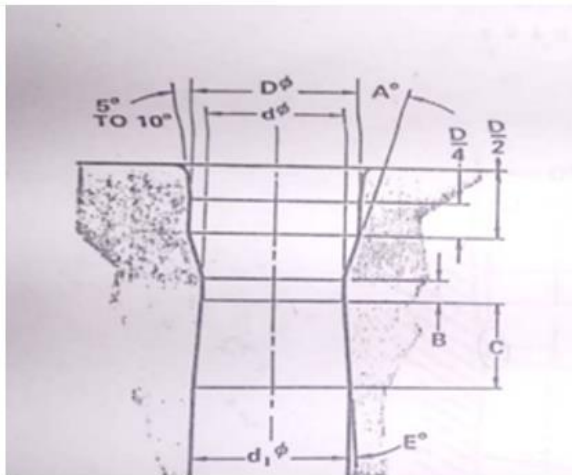
- $\mu$ : Coeficiente de atrito (-)

#### 2.2.4 Ferramentas para o Processo de Extrusão Direta

A ferramenta de extrusão, também chamada de matriz, é a ferramenta principal do projeto, pois é através dela que se obtém a medida final da extrusão. A ferramenta tem que ser projetada para suportar as cargas geradas pelo processo de conformação, caso contrário a ferramenta pode deformar plasticamente ou até mesmo levar a ruptura, podendo ocasionar em um acidente ao operador da máquina. Para que uma ferramenta seja mais adequada ao processo, é necessário que ela atenda a determinadas dimensões e relações de medidas específicas. Além disso, é crucial submetê-la a tratamento térmico para aumentar sua dureza, tornando-a capaz de suportar os esforços de compressão decorrentes do processo.

A matriz de extrusão, demonstrada na figura 5, é composta por uma secção cônica chamada de *cone de entrada*. Este cone de entrada tem a finalidade de guiar o material para *cone de trabalho*, onde é iniciada a redução de área do tarugo na qual é aplicado o esforço de compressão. O cone de trabalho deve minimizar o máximo o atrito para conseqüentemente não ocasionar defeitos na peça e na matriz. Após passar pelo cone de trabalho, o tarugo passa pelo *canal de calibração*, que é onde acontece o ajuste do diâmetro externo ( $D_1$ ), e ou perfil da peça, ou seja, a peça irá copiar este perfil, se o canal de calibração estiver com ranhuras ou marcas a peça irá ficar com estas mesmas fissuras. Após passar pela região de calibração, a redução de área estará pronta e a peça passará pelo *cone de saída*. Este cone tem a função de proporcionar uma saída livre para a peça sem causar danos na superfície do produto final, como pode ser visto na figura 5.

Vale ressaltar que, segundo Dieter et al. (2003), aumentar os valores do ângulo da ferramenta de extrusão ( $\alpha$ ) resultará em um acréscimo nos esforços exigidos no processo devido ao trabalho redundante.



A° = 15°  
d = Diâmetro de extrusão

ITEM	PARA TAMANHOS MAIS COMUNS DE EXTRUSÃO	PARA TAMANHOS INCOMUNS DE EXTRUSÃO
D	$D_0 + (0,05 - 0,1\text{mm})$	$\emptyset$ BLANK X 0,2mm
d1	$D_1 + 0,15\text{mm}$ APROX.	d X 0,2mm
B	1 - 2 mm	0,5 - 3mm
Cf	5 - 10 mm	PARA CONCORDAR COM "E"
E	PARA CONCORDAR COM "Cf"	15° máx.

Figura 5: Recomendação de geometria para matriz de extrusão. (Billigmann, 1979)

Em uma matriz de extrusão o parâmetro mais importante é o *ângulo da zona de trabalho*, que é responsável pelo comportamento e fluxo do material. Este ângulo pode variar desde um ângulo mais agressivo até um ângulo mais suave. Em uma extrusão com o ângulo de extrusão suave o fluxo do material segue uniformemente, e é possível observar menores tensões residuais geradas no perfil da peça extrudada.

### 2.2.5 Lubrificação para o Processo de Extrusão Direta de Tubos

Como em todo o processo de conformação mecânica, na extrusão de tubos existe uma força requerida para deformação, por consequência uma força normal é gerada na superfície da matriz e junto com isso, o movimento relativo da peça para a superfície da ferramenta uma tensão cisalhante na ferramenta é gerada. Um dos papéis do lubrificante, por sua vez, é de proteger estas superfícies e diminuir estas forças geradas através do processo. A não utilização deste lubrificante tem como resultado maiores pressões e forças exercidas na ferramenta, contudo, aumentando a energia necessária para realizar o processo de conformação.

Existem diversos lubrificantes que podem ser utilizados para o processo de Extrusão, como dispersões em grafite em meio aquoso, dispersões de grafite em meio oleoso, compostos sintéticos a base de sais, dispersões de sólidos lubrificantes – vidro, nitreto de boro (BN), disulfuro de molibdênio (MoS<sub>2</sub>) –, lubrificantes sólidos em pó – como o grafite. Para a extrusão a frio, um dos lubrificantes mais recomendados e utilizados são os revestimentos de Fosfato de Zinco com sabões alcalinos reativos.

Conforme Schaeffer (2014), durante o processo de conformação a frio, é comum realizar a limpeza da geratriz ou blank recozido com jato de granalha de aço. Esse procedimento não

apenas remove a oxidação superficial, mas também aumenta a área da superfície e reduz a área de contato inicial no forjamento. Essa preparação facilita a absorção de lubrificante e melhora as condições de atrito. Essa etapa é tradicionalmente chamada de fosfatização/ensaboamento, pois a fosfatização precede a aplicação do lubrificante, que geralmente é um sabão alcalino.

Quando é realizada a lubrificação através dos revestimentos de fosfato de zinco com sabões alcalinos reativos é necessário realizar uma série de etapas de pré-tratamento, sendo elas o *revestimento e lubrificação*. Segue etapas mais usuais para o processo de tratamento de superfície da peça a receber o lubrificante (desengorduramento; lavagem; decapagem; lavagem; ativação; fosfatização; lavagem; neutralização; revestimento do sabão lubrificante)

A tabela 1 apresenta o valor do coeficiente de atrito para o processo de extrusão direta e indireta.

Tabela 1: Coeficiente de atrito. (Schaeffer, 2006)

Processo	Extrusão Direta		Extrusão Indireta
	Peças Maciças	Peças Vazadas	
Coeficiente de Atrito	0,04 até 0,08	0,1 até 0,125	0,03 até 0,06

#### 2.2.6 Defeitos no Processo de Extrusão Direta de Tubos

A qualidade e as propriedades mecânicas do produto final são influenciadas pelo fluxo do metal, que pode ser equiparado ao escoamento de um fluido em um canal, segundo Moro (2006). Durante esse processo, os grãos do material tendem a se alongar, resultando em uma estrutura com uma orientação preferencial. É importante salientar que um fluxo inadequado pode levar à ocorrência de diversos defeitos no produto final.

Esses defeitos podem surgir em função de diversos fatores de influência do material. Contudo, são apresentados principalmente devido às condições de processo. Entre estes defeitos estão os vazios internos na parede da peça extrudada, defeito conhecido como Chevron. Esse tipo de defeito normalmente é apresentado quando se tem algum problema de escoamento do material devido a alta velocidade de extrusão, e a velocidade de deformação é maior na periferia do que no núcleo da peça. Além deste, também são bastante comuns defeitos gerados pela

deformação não homogênea, fazendo com que a peça fique com as paredes não uniformes, podendo ficar cônicas ou ovalizadas.

Outro problema elencado por Moro (2006), são as trincas superficiais são resultantes de altas temperaturas ou velocidades durante o processo de extrusão. Esses fatores causam um aumento significativo na temperatura da superfície do material, levando à formação de trincas e rasgos de natureza intergranular. Esse tipo de defeito é mais comum em ligas de alumínio, magnésio e zinco, embora também possa ocorrer em ligas de alta temperatura. Para prevenir tais defeitos, recomenda-se reduzir a velocidade de extrusão e diminuir a temperatura do tarugo.

Irregularidades na superfície da matriz podem resultar em arranhões, marcas e até mesmo trincas. Essas imperfeições podem ser atribuídas à presença de resíduos de óxidos metálicos na superfície da matriz ou à existência de partículas estranhas, frequentemente provenientes da própria ferramenta de extrusão. Em extrusões de tubos com comprimentos altos, podem apresentar defeitos de flambagem, empenamento ou dimensional fora do especificado. Estes defeitos são ocasionados pelo desalinhamento da máquina, ferramental não conforme ou relação de extrusão acima do recomendado.

### 2.3 FLAMBAGEM EM TUBO

Segundo Hibbeler (2000), flambagem é um fenômeno que ocorre em estruturas quando estão submetidas a forças de compressão axial. É um modo de falha na qual a estrutura se deforma lateralmente, geralmente assumindo uma forma instável, logo, as tensões internas geradas fazem com que o corpo se deforme. O fenômeno ocorre principalmente em elementos longos e esbeltos expostos a compressão em uma área relativamente pequena em relação ao seu comprimento.

Não é diferente nos processos de extrusão direta de tubos, uma vez que sempre que a Força de extrusão ( $F_e$ ) exceder a um valor crítico chamado de *Carga crítica de flambagem* ( $P_{cr}$ ) ou *Força crítica* ( $F_{cr}$ ) o corpo pode entrar em instabilidade e gerar o fenômeno de flambagem. Normalmente acontecendo em corpos de comprimentos longos em relação a área transversal de atuação da força de extrusão;

Na figura 6 é possível ver duas colunas sendo expostas a cargas axiais, na coluna (A) a força axial não excede o valor da força crítica de flambagem ( $F_{cr}$ ), logo, na coluna (B) a força axial excede o valor da Força crítica de flambagem ( $F_{cr}$ ), assim, fazendo com que o corpo flambe. A força crítica de flambagem ( $F_{cr}$ ) também pode ser definida como a carga axial

máxima em que o corpo pode suportar sem que ocorra a flambagem.

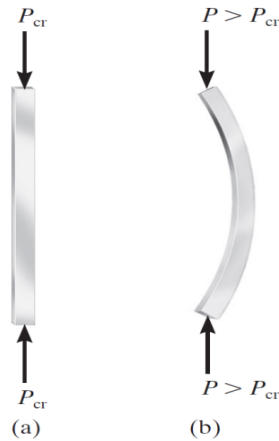


Figura 6: Flambagem. (Hibbeler, 2009).

Então, foi estabelecida a fórmula de Euler, que prevê o valor da força crítica de flambagem ( $F_{cr}$ ), equação 6.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad \text{Equação 6}$$

- $F_{cr}$ : Força crítica de flambagem ( $N/mm^2$ );
- $E$ : Módulo de Elasticidade (Pa);
- $I$ : Momento de inércia da secção ( $mm^4$ );
- $L$ : Comprimento do corpo (mm)

Com isso, é possível determinar:

- Equilíbrio estável:  $F < F_{cr}$  (não ocorre flambagem);
- Equilíbrio indiferente:  $F = F_{cr}$  (limite para ocorrer flambagem);
- Equilíbrio instável:  $F > F_{cr}$  (ocorre flambagem)

É importante notar que o cálculo da força crítica de flambagem ( $F_{cr}$ ) assume algumas condições ideais, como um corpo perfeitamente reto, carregamento axialmente centrado e material homogêneo e isotrópico. Na prática, muitos elementos estruturais podem não atender



essas condições ideais, e outros fatores como imperfeições geométricas e desalinhamentos também podem afetar a flambagem.

### 2.3.1 Momento de Inércia (I)

Momento de inércia é uma propriedade importante de uma seção transversal de um objeto em relação a um eixo específico, essa propriedade é usada principalmente para análise de corpos quando estão sujeitos a flexão ou torção. Segundo Halliday (2008), o momento de inércia, denotado por I, varia conforme o corpo em questão e o eixo em torno do qual o movimento está sendo realizado.

O momento de inércia (I) do tubo pode ser calculado da seguinte forma, na equação 7:

$$I = \frac{\pi^2 (D_0^4 - d_0^4)}{64} \quad \text{Equação 7}$$

- I: Momento de inércia (mm<sup>4</sup>) ;
- D<sub>0</sub>: Diâmetro externo (mm) ;
- d<sub>0</sub>: Diâmetro interno(mm)

## 2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Embora os processos de conformação mecânica sejam amplamente conhecidos na indústria, muitas empresas ainda adotam a abordagem antiquada de "tentativa e erro". Isso resulta em uma ampla gama de refugos, baixo rendimento no processo e aproveitamento inadequado de matéria-prima, entre outros fatores prejudiciais ao desempenho empresarial. Diante desse cenário, tornou-se necessário desenvolver métodos que otimizem o processo, permitindo acertos logo na primeira tentativa. Nesse contexto, o método dos elementos finitos (FEM), surgiu para auxiliar nos cálculos e especificações de projetos. Embora demande um investimento inicial significativo, o domínio desses softwares reduz drasticamente as chances de erro, proporcionando eficiência e economia a longo prazo.

Na conformação mecânica de materiais, como é o caso do tubo extrudado a frio, a simulação computacional desempenha um papel crucial na análise e previsão do comportamento do material durante o processo de fabricação. Ela oferece uma abordagem

virtual que permite estudar o comportamento do material em diferentes cenários, antes mesmo de executar experimentos reais. Isso economiza tempo, recursos e minimiza o desperdício do material, tornando-se uma opção valiosa para empresas e pesquisadores.

Conforme Simo (1998), a simulação computacional desempenha um papel crucial na otimização e análise de processos de conformação mecânica, permitindo a previsão do comportamento de materiais sob condições específicas. Esses métodos modelam geometricamente a peça a ser conformada e analisam os efeitos das forças aplicadas e outros parâmetros. Essa abordagem proporciona informações valiosas sobre a distribuição de tensões, deformações e possíveis falhas, contribuindo para a melhoria do processo e redução de custos.

Vale ressaltar, ainda, de acordo com Marcondes (2015), que os problemas de potencial abordam o fluxo difusivo de uma grandeza física, como massa ou calor, e apresentam diversas aplicações na engenharia, incluindo problemas relacionados à condução de calor, escoamento em meios porosos, distribuição de potencial elétrico ou eletromagnetismo, além de questões como a torção de barras prismáticas, entre outras.

O nome método elemento finito (FEM) se dá devido consistir na divisão de um corpo em diversas partes menores chamado de elementos, que são interligados por pontos comuns, conhecidos como nós ou pontos nodais. O conjunto destes nós é chamado de elementos de nós ou malha. Segundo Schaeffer (2020), o Método dos Elementos Finitos (FEM) é capaz de modelar os processos de conformação mecânica e prever fenômenos como recristalização e variação do tamanho de grão durante o processo. Ao fazer uso dessas capacidades, torna-se viável prever a microestrutura resultante, bem como as propriedades mecânicas associadas a essa microestrutura. Dentre os elementos finitos que já foram desenvolvidos, é mais comum encontrá-los nas formas triangulares, cúbicos e quadrilaterais, vai depender do tipo e da dimensão da peça a ser analisada se é unidirecional, bidimensional ou tridimensional.

Além da malha, existem outras diversas informações necessárias a serem adicionadas nos softwares, algumas dessas informações são de extrema importância, pois pode mudar totalmente a análise e entendimento da simulação computacional. A precisão das informações do processo e propriedades do material é crucial para garantir a confiabilidade de simulações computacionais, esses dados fornecem a base sobre a qual o modelo numérico é construído, influenciando diretamente a precisão e validade dos resultados obtidos. Com isso, a figura 7 apresenta um modelo de procedimentos criados para facilitar a preparação da simulação

computacional.

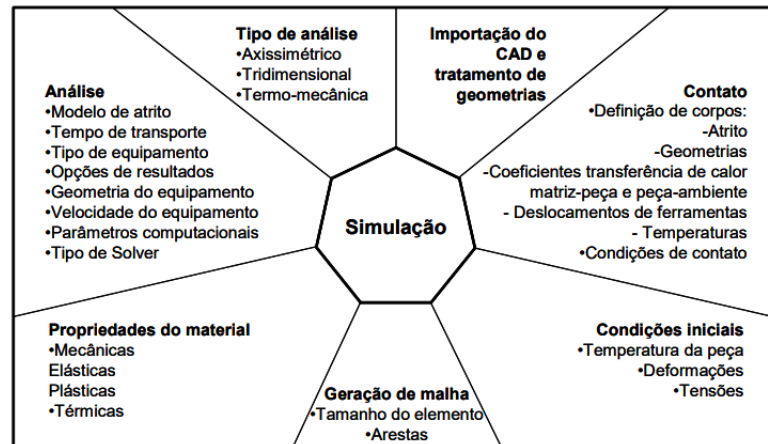


Figura 7: Parâmetros utilizados em Simulações Computacionais. (JUNIOR, 2007)

## 2.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos são métodos utilizados para estudar as propriedades e características do material. Através dos ensaios mecânicos é possível prever possíveis falhas, verificar o comportamento do material sob as condições de trabalho, medir a vida útil do componente, dentre outras especificidades muito importantes para o projeto. Qualquer projeto mecânico de engenharia requer um amplo conhecimento das propriedades, do comportamento e das características dos materiais. Ou seja, os ensaios servem para auxiliar o projetista na escolha correta do material.

Com intuito em deixar os ensaios confiáveis e seguros, foram criadas normas técnicas que estabelecem critérios de especificações para a realização dos ensaios, fazendo com que o mesmo material possa ser analisado em laboratórios diferentes, com instrumentos diversos, porém, apresente o mesmo valor em ambos. Segundo Zolin (2011), os ensaios não destrutivos referem-se àqueles que, após serem realizados, não causam nenhum tipo de marca ou sinal na peça e não a tornam inutilizável. Por outro lado, os ensaios destrutivos são caracterizados por deixarem algum tipo de sinal na peça, podendo até mesmo torná-la inutilizável.

Zolin (2011) teoriza que os ensaios não destrutivos se referem àqueles que, após serem realizados, não causam nenhum tipo de marca ou sinal na peça e também não a tornam inutilizável. Por outro lado, os ensaios destrutivos são caracterizados por deixarem algum tipo de sinal na peça, podendo até mesmo torná-la inutilizável.

Um dado crucial do material fornecido através de ensaios são as curvas de *Tensão* ( $\sigma$ ) x *Deformação Verdadeira* ( $\varphi$ ), apresentadas na figura 8. Esse dado apresenta comportamento elástico e plástico de um material quando submetido a esforços. Sempre que o corpo atingir a tensão limite de escoamento, esse inicia um processo de deformação permanente, chamado de deformação plástica. Se o corpo não atingir ao limite de escoamento, ele ainda estará em regime elástico. Ou seja, este corpo voltará a sua forma inicial.

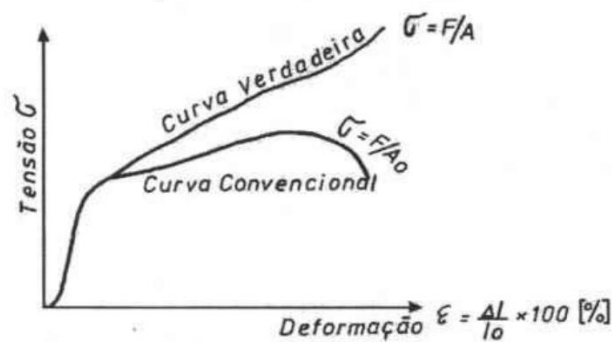


Figura 8: Curva tensão ( $\sigma$ ) x Deformação verdadeira ( $\varphi$ ). (Marcontes, 2015)

### 2.5.1 Curvas de Escoamento ( $k_f$ )

Um dos principais parâmetros do processo da conformação mecânica é a *Tensão de escoamento* ( $k_f$ ). A tensão de escoamento é a tensão máxima que pode ser aplicada a um material sem causar deformação plástica. O conhecimento desse parâmetro é de extrema importância para processos de conformação mecânica, pois possibilita a otimização do processo, definição precisa dos parâmetros de trabalho, aumento da vida útil da ferramenta, etc.

As curvas de escoamento podem ser obtidas por diferentes tipos de ensaios mecânicos, sendo os mais comuns: *Ensaio de Compressão*, *Ensaio de Tração* e *Ensaio de Torção*. Os ensaios consistem em registrar a força necessária para provocar a deformação. Para o caso de deformação a frio existe uma expressão matemática que descreve o comportamento da tensão de escoamento ( $k_f$ ), chamada de equação de *Hollomon* (equações 8 e 9):

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad \text{Equação 8}$$

$$k_w = k_f \left(1 + \frac{d}{l} \times \mu\right) \quad \text{Equação 9}$$

Nesta equação, ( $k_f$ ) representa a tensão de escoamento, ( $C$ ) é o coeficiente de resistência do material, ( $\varphi$ ) a deformação e ( $n$ ) é o coeficiente de encruamento. Logo, é possível perceber que ( $C$ ) e ( $n$ ) são constantes do material. O ( $k_w$ ) representa a resistência a deformação do material levando em consideração o atrito e a geometria da peça. A figura 9 apresenta curvas de escoamento variando diferentes deformações.

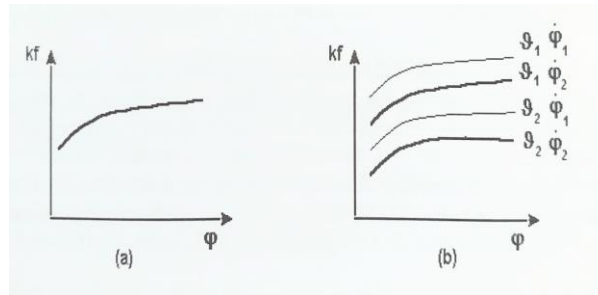


Figura 9: Curvas de escoamento ( $k_f$ ) (a) Representação da Curva de escoamento a frio; (b) Representação da Curva de escoamento a quente. (Schaeffer, 2006).

A figura 10 apresenta a curva de escoamento ( $k_f$ ) do material Ck10 extraída através de um ensaio de Compressão em temperatura ambiente. Neste ensaio feito por Tschätsch (2005) foi possível notar o comportamento do material ao sofrer as deformações e também coletar as informações de tensão de escoamento inicial ( $k_{f0}$ ), a tensão de escoamento final ( $k_{f1}$ ) e também a equação da curva de escoamento ( $k_f$ ), sendo assim:

- Tensão de escoamento inicial ( $k_{f0}$ ): 260 N/mm<sup>2</sup>
- Tensão de escoamento Final ( $k_{f1}$ ): 740 N/mm<sup>2</sup>
- Equação da curva de escoamento ( $k_f$ ):  $k_f = 740 \cdot \varphi^{0,216}$

Estes dados estão apresentados na figura 10, de acordo com Tschätsch (2005).

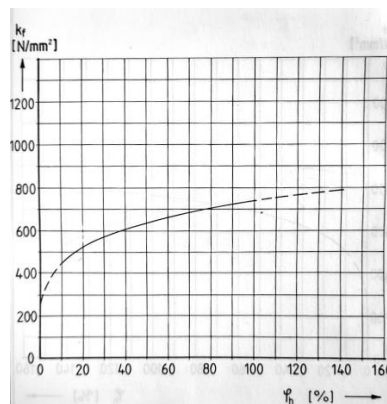


Figura 10: Curva de escoamento ( $k_f$ ) do aço Ck10. (Tschätsch, 2005).

### 2.5.2 Ensaio de compressão

O Ensaio de Compressão é muito utilizado para a determinação de propriedades mecânicas como o limite de resistência à compressão, limite de proporcionalidade, limite de escoamento, módulo de elasticidade (Young) e a curva de tensão-deformação dos materiais, podendo ser realizado nas máquinas universais de ensaios mecânicos. O ensaio de compressão funciona a partir da aplicação uniaxial de compressão em um corpo de prova geralmente com formato de cilindro ou prisma.

Em materiais dúcteis há predominância da zona elástica. Portanto, são comprimidos até atingirem o formato de disco. Neste processo, podem ser obtidas as propriedades de limite de proporcionalidade, limite de escoamento e módulo de elasticidade. Já para os materiais frágeis, a fase elástica terá pouca relevância, e o material romperá, ao invés de formar um disco. Assim, pode ser calculado somente o limite de resistência à compressão da amostra. Apesar de ser amplamente utilizado nas indústrias, o Ensaio de Compressão pode apresentar alguns problemas. O primeiro problema desta técnica é a questão do atrito entre o corpo de prova e as placas paralelas da máquina de ensaio. A principal norma técnica para a realização de ensaios de compressão em materiais metálicos é a ASTM E9-09 (2018).

### 2.5.3 Ensaio de dureza

O ensaio de Dureza consiste basicamente na impressão de uma pequena marca realizada na superfície plana da peça, essa impressão é feita por um Penetrador, podendo ser esférico ou pontiagudo. O equipamento é chamado de Durômetro, que mede a dureza através da profundidade ou as dimensões da impressão produzida pelo Penetrador. As medições podem seguir diferentes escalas dependendo do tipo de penetrador utilizado, da pré-carga utilizada e da carga principal aplicada. Ao que se consideram os materiais, os materiais macios apresentam uma impressão com área maior e mais profunda, refletindo em uma menor dureza determinada pelo equipamento. O ensaio de dureza é amplamente utilizado na indústria metal-mecânica devido à sua simplicidade, baixo custo e à capacidade de não inutilizar a peça ensaiada, caracterizando-o como um ensaio não destrutivo. Além disso, este fornece uma estimativa da resistência à tração do material.

Os Ensaio de Dureza são amplamente utilizados na indústria de componentes mecânicos pelo fato de fornecer dados quantitativos das características de resistência a deformação permanente das peças. Industrialmente, é muito utilizado para o controle das especificações de

entrada de matéria prima e também durante as etapas dos processos de fabricação dos componentes.

#### 2.5.4 Ensaio de dureza – Rockwell (HR)

Um dos ensaios de dureza mais utilizados na indústria é o ensaio Rockwell simbolizado por HR. Este ensaio é bastante utilizado pelo fato de gerar resultados rápidos e podendo ser lido diretamente na máquina de ensaio. O ensaio abrange a medição em diversos materiais com diferenças níveis de dureza. Este ensaio utiliza-se da profundidade da impressão causada por um Penetrador sob a ação de uma pré-carga, no qual os penetradores podem ser cones de diamante com 120° ou esferas de aço temperado. Este ensaio utiliza a norma ASTM E18-94.

Após a amostra estar preparada, o penetrador é aplicado sob uma pré-carga de 10 kgf, e esta pré-carga tem o objetivo de eliminar as imperfeições da superfície da peça e desconsiderar as deformações elásticas do material. Após aplicar a pré-carga deve-se acionar um braço mecânico na máquina para aplicar a carga principal de ensaio em velocidade constante, e a carga principal pode ser de 60, 100 ou 150 kgf. Depois de aplicar a carga principal uma impressão será formada na amostra, e esta impressão é gerada diretamente pelo penetrador. A profundidade da impressão é convertida em um valor de dureza e mostrada na máquina em um visor analógico, e para realização da leitura correta deve-se utilizar uma escala apropriada ao penetrador e a carga principal utilizada.

Ao especificar durezas Rockwell e superficial, é essencial indicar tanto o número de dureza quanto o símbolo da escala correspondente. A escala é identificada pelo símbolo HR, seguido pela designação apropriada. Por exemplo, 80 HRB representa uma dureza Rockwell de 80 na escala B, enquanto 60 HR30W indica uma dureza superficial de 60 na escala 30W.

#### 2.5.5 Ensaio de achatamento

O ensaio de achatamento é um procedimento utilizado para avaliar a ductibilidade e resistência de tubos metálicos, logo, é uma ferramenta útil para avaliar a qualidade do material e para projetos que estão sujeitos a forças de compressão. O ensaio é relativamente simples: basta colocar um tubo horizontalmente entre duas placas e submeter-se à compressão. Normalmente é usada uma máquina de ensaio universal para realizar o experimento. As placas da máquina são comprimidas, aplicando uma força crescente ao tubo fazendo com que o tubo fique “achatado”, com o objetivo de analisar o comportamento do material ao deformar, o ensaio dá por terminado quando as extremidades do tubo se tocam. O ensaio é considerado

qualitativo, pois o objetivo principal é analisar se o material vai romper ou não em alguma região, normalmente esse ensaio é utilizado para avaliar a solda em tubos que contém costura.

Conforme a norma SA-450/SA-450M, a solda dos tubos pode ser avaliada qualitativamente de duas maneiras, com o corpo de prova no formato meia cana, onde o tubo é partido ao meio com a região da solda voltada para cima ou com o tubo inteiro com a região da soldada na região lateral, ou seja, em 90° da força aplicada. Ambos os modelos de ensaio conseguem avaliar se a estrutura soldada vai resistir ao realizar a compressão no corpo de prova ou não.

Contudo, através deste ensaio também é possível analisar a quantidade de energia em que se é necessária para deformar plasticamente o tubo na região lateral e prever o quanto o mesmo resiste a esforços.

#### 2.5.6 Metalografia

A Metalografia, também chamada de Ensaio Metalográfico, é a análise estrutural e morfológica dos metais onde estuda a textura, a estrutura, a composição, as propriedades e também seus processos de fabricação. Seu maior objetivo é observar a microestrutura de metais e ligas e entender as características do material, como possíveis falhas, desgastes prematuros, fraturas, falhas por fadiga, dentre outros. Sua maior aplicação é para análises de estruturas soldadas e para processos de fabricação.

A Metalografia é realizada em laboratórios metalúrgicos e segue uma série de procedimentos normatizados para atender a preparação correta da amostra. A norma utilizada é a ASTM E3-11, que dispõe sobre as corretas técnicas para um ensaio de maior confiança e integridade. Resumidamente, o procedimento a seguir é: seleção da amostra, corte e desbaste, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico, após deve-se levar a amostra até o microscópio para a realização da análise metalográfica.

A amostra pode ser retirada tanto no sentido longitudinal quanto ao sentido transversal dos grãos. A amostra no sentido transversal possibilita visualização da natureza do material, microestrutura (como porosidade e inclusões, efeitos de tratamento térmico, etc), já as amostras no sentido longitudinal são muito aplicadas para análises de processos de fabricação, roscas, tratamentos superficiais e tratamentos térmicos.

O corte e desbaste da amostra deve ser realizado de maneira que não altere a microestrutura do material através do aquecimento ou de deformações excessivas. Se for utilizado corte a fogo,



não se deve analisar a região muito próxima do corte. O corte abrasivo é mais indicado pelo fato de resultar em superfícies planas com baixa rugosidade e por ser um processo rápido e seguro.

O embutimento consiste em circundar a amostra em conjunto a um material adequado tornando um corpo único e serve para poder manusear a amostra a ser ensaiada sem que haja riscos do preparador da amostra se machucar ao executar as próximas etapas de lixamento. Ao preparar peças embutidas também diminuem as chances de rasgar as lixas ou o pano de polimento. O embutimento pode ser realizado a frio ou a quente, a escolha vai depender das circunstâncias e da amostra. O embutimento a frio consiste em colocar a amostra a ser ensaiada dentro de um molde junto com resinas sintéticas de polimerização rápida como epoxi, poliéster ou PMMA. A grande vantagem do embutimento a frio é sua rapidez no preparo. O embutimento a quente é preparado com a utilização de uma prensa específica para embutir, consiste em aplicar materiais termoplásticos utilizando-se a pressão e o aquecimento entre 140 °C e 170°C para efetuar a polimerização, os materiais poliméricos mais utilizados são Bakelite em diferentes cores e Lucite normalmente transparente.

O lixamento tem a função de eliminar os riscos e marcas mais profundas da amostra, dando um acabamento mais refinado e preparando para a próxima etapa de polimento. O lixamento pode ser feito de maneira manual ou através de equipamentos, ambos modos devem iniciar o processo com lixas com grãos maiores e sucessivamente lixas com granulometria cada vez menor. Para aços normalmente usa-se uma sequência de lixas de 100, 220, 320, 420, 600 e 1200, só pode mudar a lixa assim que as marcas da lixa anterior desaparecerem e cada vez que mudar a lixa deve-se mudar o sentido de lixamento em 90°.

O polimento consiste em deixar a superfície com o melhor acabamento possível isento de riscos e marcas de modo a obter uma imagem melhor no microscópio. Normalmente utilizam-se politrizes rotativas e geralmente são empregados abrasivos em solução ou pasta normalmente alumina ou diamante. Ao utilizar abrasivos de alumina utiliza-se água como lubrificante e quando é usado Diamante utiliza-se álcool como lubrificante.

O ataque químico é uma das etapas mais importantes e é a última etapa antes da observação da amostra no microscópio, e ela tem a função de revelar a microestrutura e os constituintes da amostra para assim possibilitar melhor entendimento das propriedades. O ataque pode ser realizado por imersão, por gotejamento e por esfregação. Por imersão é o método mais utilizado,

que consiste em imergir a amostra na solução de ataque, enquanto por gotejamento a solução de ataque é gotejada sobre a superfície da amostra. Por fim, a esfregação consiste na solução de ataque ser embebida em um pedaço de algodão ou pano e é esfregado na amostra. A solução é definida pelo tipo de material a ser analisado, para o aço é mais usual o Nital (2ml de HNO<sub>3</sub> em 98ml de álcool).

Por último, deve-se levar a amostra ao microscópio para observação, existem mais de um tipo de microscópios, o mais utilizado é o microscópio de luz refletiva e transmitida (óptico), porém também existem o microscópio eletrônico de transmissão e o microscópio por varredura. A maior vantagem do microscópio de luz refletiva e transmitida é a facilidade de operação, ou seja, com pouco conhecimento em microscopia se consegue gerar imagens muito boas com a resolução de aprox.  $0,2\mu\text{m}$ .

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, adotou-se uma série de procedimentos cuidadosamente selecionados, combinando simulação computacional e análise experimental. O objetivo principal foi determinar o valor máximo de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) para os tubos de aço SAE1010, garantindo que o fenômeno de flambagem não ocorra.

A metodologia aplicada pode ser dividida em 3 etapas: Caracterização do material; Caracterização do processo; Caracterização dos ensaios.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material utilizado no presente trabalho é o aço SAE 1010 composto por uma liga de Ferro + Carbono com aproximadamente 0,10% de Carbono. A matéria prima do presente estudo foi fornecida pela empresa Mercante Aços e Metais LTDA. Os tubos utilizados têm as dimensões de diâmetro externo ( $D_o$ ) 21,8mm, diâmetro interno ( $d_o$ ) 17,10mm e comprimento ( $l_o$ ) 3000mm. Os tubos são obtidos através da laminação de uma chapa e em seguida soldado para formar o formato de tubo, logo em seguida para aprimorar suas propriedades mecânicas e remover a costura resultante do processo de soldagem é realizada uma etapa de trefilação a frio, esse tipo de procedimento é bastante utilizado para fins mecânicos onde se requer exatidão dimensional e ótimo acabamento superficial. A norma para *Tubos Trefilados com Costura Removida* utilizada no presente trabalho é a DIN EN 10305-2. Na tabela 2, podemos conferir as tolerâncias dimensionais da matéria prima estabelecidas pela norma DIN EN 10305-2.

Tabela 2: Dimensões da matéria prima – Norma DIN EN 10305-2.

Diâmetro externo, $D_o$ (mm)	Tolerância, $\pm$ (mm)	Diâmetro interno, $d_o$ (mm)	Tolerância, $\pm$ (mm)	Espessura, $S$ (mm)
20,00 à 22,00	0,08	12,00 à 21,00	0,15	0,50 à 4,00

O material tem sua excelência garantida através do *Certificado de Qualidade* (configurado no anexo – 1), documento de extrema importância para a liberação do aço. Este certificado atesta que os seguintes aços foram produzidos e testados de acordo com os mais rigorosos padrões de qualidade e especificações técnicas. Esse documento apresenta detalhes do produto como tipo de aço, norma de referência, composição química, propriedades mecânicas, entre outros. Também são apresentados resultados de ensaios como ensaio de Tração e ensaio de Dureza. Além disso, o certificado de qualidade contempla a data de emissão do documento e a assinatura de autoridades responsáveis pela qualidade e produção do aço, a fim de garantir qualidade e confiança dos aços produzidos. A tabela 3 apresenta a composição química do aço conforme o certificado de qualidade.

Tabela 3: Composição química: Certificado de qualidade.

Composição Química (%)									
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
0,13	0,51	0,014	0,008	0,019	0,005	0,021	0,001	0,006	0,038

Para maior precisão e entendimento sobre as propriedades mecânicas do material e sobre o comportamento sob carga, as curvas de resistência a deformação (kw) específicas foram calculadas para o material em estudo. O conhecimento da curva de resistência da deformação (kw) é imprescindível em qualquer processo de conformação mecânica. Para determinação da curva foram realizados três ensaios de compressão em 3 amostras do tubo diferentes, seguindo uma proporção de tamanho de 1,5:1. As dimensões dos corpos de prova foram as seguintes: diâmetro externo ( $D_o$ ) 21,80 mm, diâmetro interno ( $d_o$ ) 17,10 mm e comprimento ( $l_o$ ) 33 mm, como pode ser visto na figura 11. Essa abordagem possibilitou a coleta de dados altamente confiáveis e representativos do material em estudo.

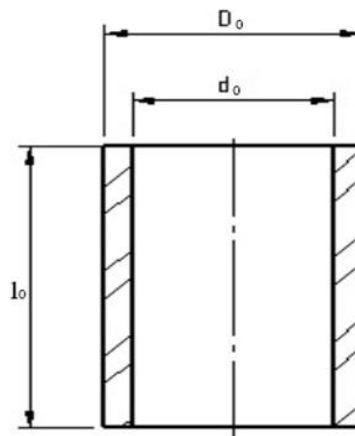


Figura 11: Corpo de prova do ensaio de compressão para definição da curva de resistência a deformação (kw).

(Autor, 2024)

Para a realização do ensaio prático de compressão, os corpos de prova foram submetidos a um processo de polimento em suas faces, visando reduzir o atrito com as placas da máquina. Entretanto, optou-se por utilizar óleo mineral como lubrificante entre as faces dos corpos de prova e as placas da máquina. A figura 12 ilustra as fases inicial, intermediária e final do ensaio de compressão.



Figura 12: Ensaio de Compressão.

A representação dos três corpos de prova, identificados como (A), (B) e (C), é apresentada a seguir após a conclusão do ensaio de compressão. É perceptível que ambos os corpos de prova exibiram comportamento semelhante durante o ensaio, indicando também a presença de embarilhamento não uniforme nos corpos de prova, como ilustrado na figura 13. A imagem apresenta os corpos de prova a 180° para melhor representação da região com maior deformação.



Figura 13: Corpos de prova após ensaio de compressão.

### 3.1.1 Considerações sobre a Resistência a Deformação (kw)

Para obter a curva da resistência à deformação (kw) em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ), foi utilizada a equação 4 para os dados de deformação verdadeira ( $\varphi$ ) e excluída a região elástica da curva. Esse procedimento foi realizado por meio do software *Excel*. A região plástica do material é identificada após o limite de escoamento ( $k_f$ ) e se estende até a tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x.}$ ) do material. Com base nesses dados, foi possível construir a curva de resistência à deformação (kw) do material, conforme representado na figura 14.

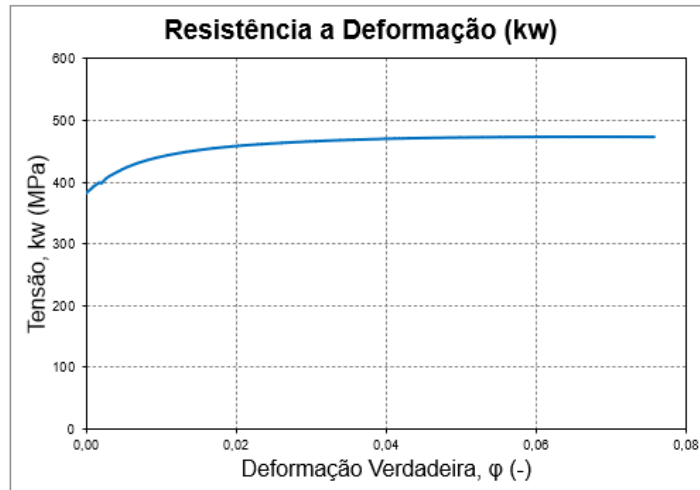


Figura 14: Curva de Resistência a Deformação (kw) do aço SAE 1010.

Com isso, é possível comparar a semelhança entre a curva de resistência à deformação (kw) e a curva de escoamento (kf) de Tschastsch (página 29). Observa-se um comportamento similar, onde ambas as curvas apresentam deformações plásticas semelhantes com a mesma quantidade de tensões necessárias para alcançá-las. A curva de resistência à deformação (kw) requer aproximadamente 380 MPa para iniciar a deformação plástica. Por outro lado, a curva de escoamento (kf) de Tschastsch atinge os mesmos 380 MPa de tensão com 0,05% deformação plástica.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

Este sub-capítulo destina-se a apresentar de forma abrangente as máquinas, instrumentos e ferramentas utilizadas ao longo do processo de execução do ensaio prático de extrusão direta dos tubos de aço SAE1010. Este capítulo abrange uma variedade de elementos, incluindo acessórios, instrumentos, dispositivos e outros recursos empregados no decorrer do ensaio.

#### 3.2.1 Ferramentas

Neste projeto, foram utilizadas ferramentas com anéis de encarcamento de aço AISI H13. A ferramenta de extrusão é do material AISI M2, e tem seu acabamento superficial polido. Para fabricação, foi criado o desenho técnico da ferramenta colocando como cotas “A”, “B” e “C” as variáveis da matriz respeitando os *ângulos*, *zona de trabalho* e o *ângulo de saída* conforme. (Figura 15).

As dimensões das matrizes foram estritamente fabricadas com as indicações da figura 5

(página 21), a qual apresenta as diretrizes e proporções necessárias para a fabricação de uma matriz de extrusão. Os diâmetros utilizados foram estabelecidos por meio dos cálculos da deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), conforme equação 11 (Página 64).

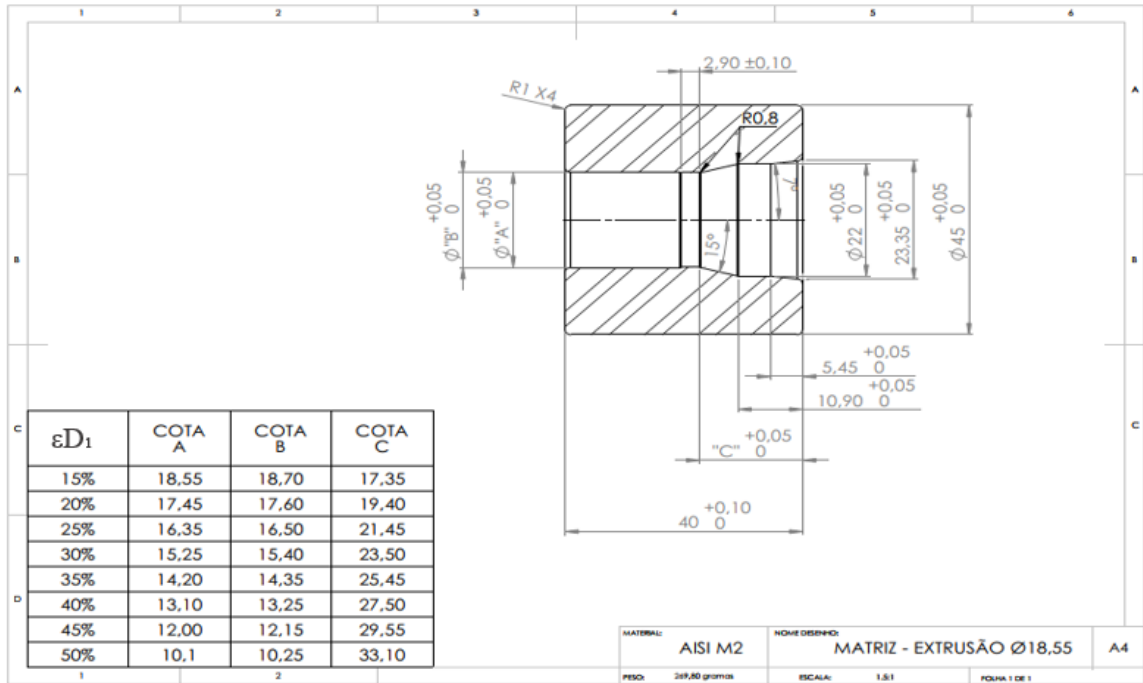


Figura 15: Desenho para fabricação da matriz.

### 3.2.1.1 Fabricação das Ferramentas

As matrizes de extrusão foram fabricadas no setor de Ferramentaria da empresa Viemar Automotive. Para a fabricação foi utilizado um Torno CNC da marca Doosan do modelo Lynx 2100 LMSB, utilizando o comando Fanuc Serie I. A figura 16 apresenta:

- Torno Doosan do modelo Lynx 2100 LMSB
- Placa do Torno 8".
- Comando Fanuc Serie I



Figura 16: Torno CNC Doosan Lynx 2100 LMSB.

Ao todo foram fabricadas cinco ferramentas, cada uma projetada para executar o ensaio prático variando as deformações relativas no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de: 15%, 20%, 25%, 30% e 35%. (Figura 17)

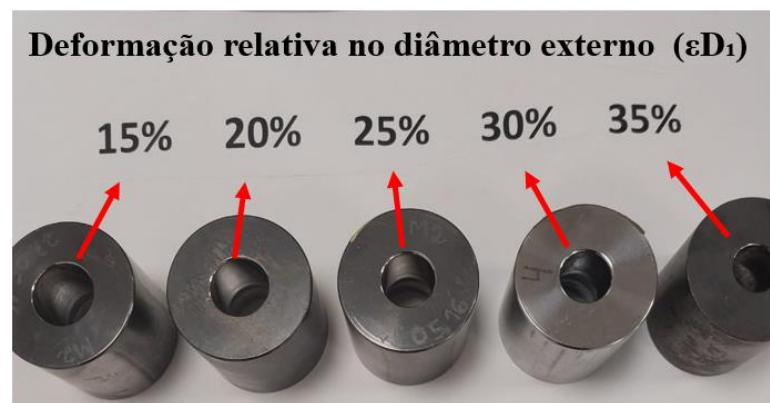


Figura 17: Matriz de Extrusão.

Com a finalidade de reduzir o atrito e aprimorar o escoamento do material durante o processo de extrusão, procedeu-se ao polimento das matrizes utilizando feltro e pasta abrasiva. Este processo resultou em uma superfície com rugosidade média ( $R_a$ ) de  $0,161\mu\text{m}$  e rugosidade total ( $R_z$ ) de  $1,223\mu\text{m}$ , conforme representado na figura 18.





Figura 18: Medição de Rugosidade.

### 3.2.1.2 Encarçamento das Ferramentas

Com o objetivo de diminuir as tensões na matriz provenientes do processo de extrusão, foi estabelecido via simulação computacional os diâmetros e interferências dos encarçamentos.

Na figura 19, é possível verificar as dimensões de interferências e a montagens das ferramentas. Os blocos **AMARELOS** representam a ferramenta (matriz), os anéis, e o calço da matriz. Já os blocos **VERMELHOS** representam os valores das interferências. O conjunto de ferramentas tem o processo de montagem “dentro para fora”, ou seja, primeiro se montam as ferramentas internas e depois as ferramentas externas. A montagem segue a seguinte ordem:

- Passo 1: Montar o CALÇO e a FERRAMENTA dentro do ANEL 1;

OBS: Esta montagem tem interferência de 0,05 mm, os diâmetros são paralelos e a montagem deve ser realizada de cima para baixo.

- Passo 2: Montar o ANEL 1 dentro do ANEL 2.

Vale lembrar que esta montagem tem interferência de 0,40 mm, os diâmetros têm 1° de conicidade para facilitar a montagem e a montagem deve ser realizada de cima para baixo.

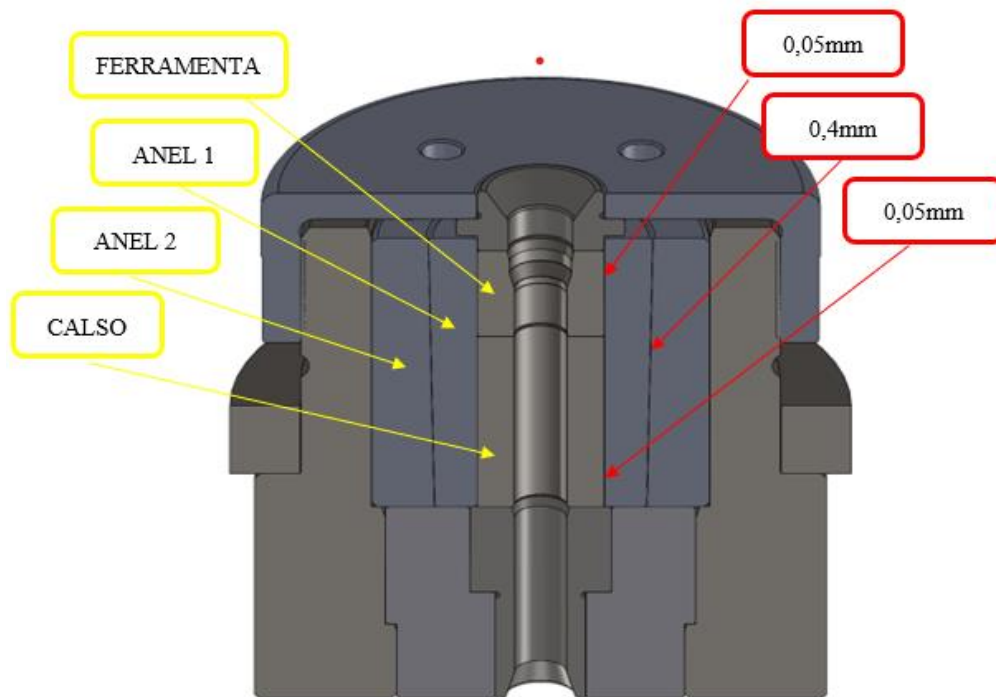


Figura 19: Conjunto de ferramental montado.

### 3.2.2 Corte dos Tubos

Os tubos foram cortados utilizando uma serra circular automática da marca Franho modelo *SC 70 A*, que apresenta alto desempenho e ótimo acabamento de corte. O sistema é composto por alimentação automática, sendo possível utilizar barras com comprimento de até 7000mm, escaneamento automático da bitola do material e controle automático de todos os parâmetros de corte, conforme apresentados na figura 20.



Figura 20: Máquina Serra Franho SC 70 A.

A figura 21 apresenta os Tubos cortados com o comprimento ( $l_0$ ) de 200mm para realização dos ensaios práticos de extrusão direta.



Figura 21: Tubos cortados

Para a realização dos ensaios práticos de extrusão direta, os corpos de prova passaram por um processo de preparação que incluiu um tratamento superficial com Fosfato de Zinco, seguido da aplicação de um sabão lubrificante especialmente formulado para forjamento a frio. O procedimento de aplicação do sabão envolve uma sequência metódica de etapas, onde tanto a temperatura quanto o tempo de imersão são ajustados de acordo com parâmetros técnicos previamente estabelecidos.

A linha de tratamento representada pela figura 22 é composta por uma série de 8 tanques, cada um contendo os produtos químicos relevantes para o processo de lubrificação. As peças a serem lubrificadas são transferidas de um tanque para o próximo utilizando uma talha elétrica, seguindo um fluxo organizado e cronometrado. Esse processo cuidadosamente planejado garante que as peças sejam devidamente tratadas e lubrificadas, otimizando assim o desempenho do ensaio de extrusão subsequente.



Figura 22: Linha para o processo de lubrificação dos tubos.

O processo de lubrificação seguiu as seguintes etapas subsequentes:

- 1º Etapa – Desengraxe: Remover qualquer oleosidade e/ou sujeira presente na superfície dos tubos. O processo é realizado com temperatura entre 75 a 90°C por tempo de 5min.
- 2º Etapa – 1º Enxágue por Imersão: Retirar o excesso de desengraxante do processo anterior. O processo é realizado em temperatura ambiente e o tempo do mergulho é de 30 a 40 segundos;
- 3º Etapa – 2º Enxágue por Imersão: Retirar qualquer sujeira da superfície dos tubos que permaneceram. O processo é realizado em temperatura ambiente e são feitos dois mergulhos com tempo entre 30 e 40 segundos.
- 4º Etapa – Ativador: Criar uma camada de estrutura mais fina, com cristalização refinada e de maior densidade. Melhora a capacidade de fosfatização, através do seu condicionamento superficial. O processo é realizado com temperatura entre 35 a 45°C por três a cinco minutos.
- 5º Etapa – Fosfatização: Criar um revestimento de conversão para aumento de área superficial dos tubos, e assim preparar a superfície para receber o sabão lubrificante. O processo é realizado com temperatura entre 70 a 80°C por cinco minutos.
- 6º Etapa – 3º Enxágue por Imersão: Retirar o excesso de ácido e sais de fosfato, não convertidos do processo anterior. O processo é realizado em temperatura ambiente e o tempo do mergulho é de 30 a 40 segundos;
- 7º Etapa – Neutralizador: Neutralizar a acidez remanescente do processo anterior de

fosfatização para aumento de vida útil do banho de sabão. O processo é realizado com temperatura entre 45 a 55°C por três minutos.

- 8º Etapa – Sabão Lubrificante: Criar um revestimento lubrificante para posterior ensaio prático de extrusão direta. O processo é realizado com temperatura entre 68 a 75°C por três minutos;

Após seguir rigorosamente cada etapa com os parâmetros, abaixo são demonstrados os corpos de prova com a camada superficial de lubrificante, podendo ser comparado o tubo sem o sabão lubrificante. A imagem não apenas evidencia a presença do lubrificante, mas também destaca a diferença notável entre superfícies tratadas e não tratadas com o processo lubrificação. (Figura 23)



Figura 23: Tubos com e sem sabão lubrificante.

### 3.2.3 Máquina de Extrusão

A máquina na qual foram conduzidos os experimentos práticos foi uma extrusora horizontal hidráulica com capacidade de 50 Ton., cujo curso máximo é de 1000 mm e ela apresenta velocidade constante (Figura 24). A máquina não possui uma marca específica, pois foi reformada e modificada através da empresa Hidrofex Manutenção Industrial LTDA. A máquina é composta por um cilindro hidráulico com diâmetro de 200mm, 4 guias lineares com revestimento de Cromo para garantir o alinhamento e precisão. Além disto, o Martelo possui buchas de bronze lubrificadas com graxa a base de lítio, e o deslocamento preciso do cilindro hidráulico se dá através de uma régua eletrônica controlada por uma IHM. Por fim, a extrusora também é adequada para NR-12 (Norma Regulamentar para Máquinas e Equipamentos) (2022).



Figura 24: Extrusora hidráulica horizontal.

Com o intuito de antecipar e prevenir possíveis colisões na máquina, medir o percurso e, ainda mais importante, obter um entendimento mais profundo do processo na prática, foi inicialmente conduzida uma simulação computacional utilizando o software *SolidWorks 2022*. Essa simulação considerou as posições iniciais e finais do processo de extrusão analisando o curso de deslocamento ( $l_e$ ) de 100 mm do martelo da extrusora (Figura 25).

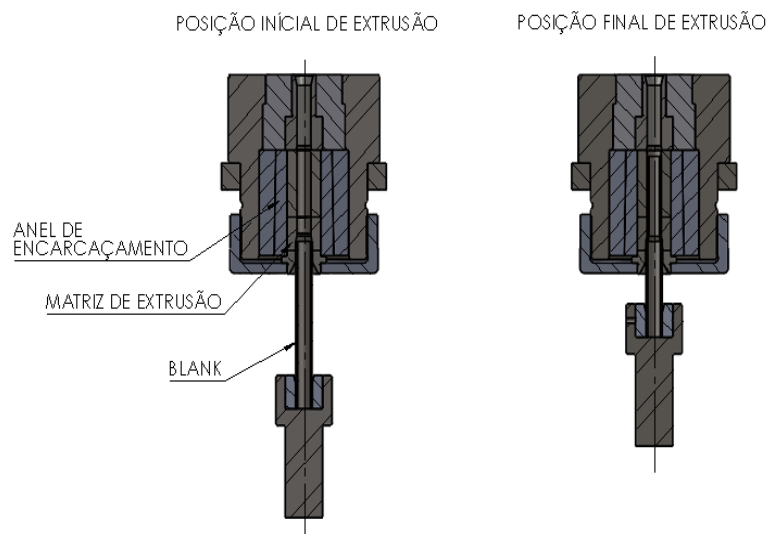


Figura 25: Posição inicial de extrusão x Posição final de extrusão.

Com o intuito de medir a concentricidade dos tubos antes e após executar os ensaios de extrusão direta, foi utilizado um instrumento específico para medir a concentricidade de peças com o perfil semelhante. Este instrumento é composto por bases rolamentadas para facilitar o movimento de giro da peça e tem um braço articulado que reflete a medida de concentricidade para um relógio comparador executar a medida com precisão. A figura 26 ilustra o instrumento

para medição.

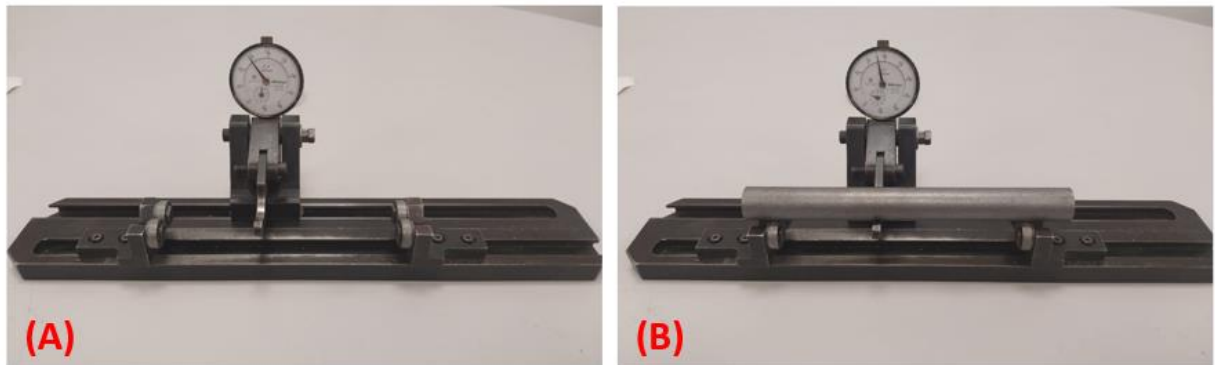


Figura 26: Instrumento para medição de concentricidade: (A) Instrumento sem o tubo; (B) Instrumento com o tubo.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Com objetivo de avaliar as propriedades mecânicas dos tubos de aço SAE 1010 e também analisar o comportamento sob diferentes condições, foi estabelecida uma série de ensaios mecânicos destrutíveis e não-destrutíveis.

Os ensaios foram conduzidos no laboratório de metalurgia da empresa Viemar Automotive. Essas avaliações foram realizadas em um ambiente rigorosamente controlado, seguindo as diretrizes da norma NBR 17025, a qual estabelece padrões para sistemas de gestão da qualidade em laboratórios. A figura 27 apresenta um termo-hidrômetro digital marcando temperatura de 22,2°C e 68% de umidade relativa.



Figura 27: Termo-Hidrômetro digital.

#### 3.3.1 Ensaio de Compressão

Com o objetivo de obter a curva de resistência a deformação (kw) e visando assegurar maior precisão e fidelidade aos cenários reais, procedeu-se a realização do ensaio de

compressão nos tubos. O ensaio de compressão baseia-se em submeter uma amostra do material a uma força compressiva, geralmente ao longo do seu eixo. A principal norma técnica para a realização de ensaios de compressão em materiais metálicos é a ASTM E9-09 (2018). O equipamento empregado para a realização foi uma máquina universal de ensaios modelo *EMIC DL 1000*, a qual possui capacidade máxima de carga de 150 kN para condução de ensaios. A figura 28 ilustra a máquina universal de ensaios



Figura 28: Máquina universal de ensaio *EMIC DL 1000*.

### 3.3.2 Ensaio de Dureza

Com o objetivo de analisar o comportamento do tubo de aço SAE 1010 após o processo de extrusão direta, foi realizado um ensaio de dureza em 3 amostras de cada peça ensaiada e também do tubo antes de sofrer o encruamento proveniente do processo. Realizou-se o ensaio de dureza HRB uma vez que o material era aço de baixo teor de carbono, o qual tem escala de dureza de 20 HRB até 100 HRB.

O ensaio de dureza consiste basicamente na impressão de uma pequena marca realizada na superfície plana da peça. Essa impressão é feita por um *Penetrador*, podendo este ser esférico ou pontiagudo. A norma técnica para realização dos ensaios de dureza é a ASTM E18 (2022).

Conforme Fredel (2015), os ensaios de dureza são amplamente utilizados na indústria de componentes mecânicos pelo fato de fornecer dados quantitativos das características de resistência a deformação permanente das peças. Industrialmente, este processo é muito utilizado para o controle das especificações de entrada de matéria prima e também durante as etapas dos



processos de fabricação dos componentes.

A figura 29 apresenta o Durômetro de bancada analógico da marca *Heckert* utilizado para realização do ensaio na escala *Rockwell HRB*, utilizado penetrador esférico de 1/16'' (1,5875mm), pré-carga de 10kgf e carga máxima de 100kgf.

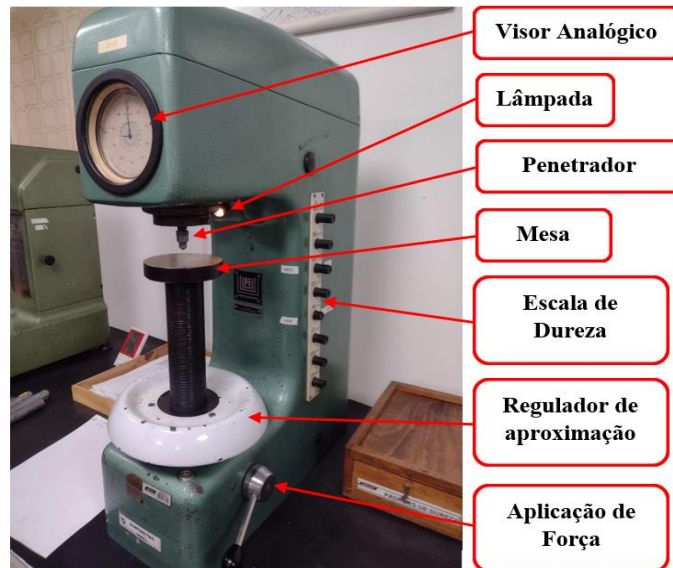


Figura 29: Durômetro Heckert.

Primeiramente foi realizada a preparação da amostra, que por sua vez deve estar com a superfície mais plana possível. A amostra foi lixada utilizando uma lixadeira de cinta com a lixa de 60G. Vale ressaltar que a área lixada deve ser razoavelmente grande, pois, para maior precisão de ensaio, deve-se medir a dureza em mais de um ponto e em locais diferentes da amostra (início, meio, e fim do comprimento extrudado) e o penetrador deve estar perpendicular à amostra.

Antes de iniciar as medições de dureza foi realizada a aferição do equipamento, na qual foi utilizado um bloco cilíndrico padronizado com dureza de 62,1 HRB. Ainda, foi registrada a dureza em mais de um ponto para garantir a integridade e confiança de leitura do equipamento. (Figura 30)



Figura 30: Calibração do durômetro.

Após a aferição do equipamento, procedeu-se a medição de dureza dos corpos de prova. O primeiro corpo de prova a ser ensaiado foi o tubo sem passar pelo processo de extrusão direta. Posteriormente, realizou-se a medição da dureza nos tubos que foram submetidos a deformações.

### 3.3.3 Ensaio de Achatamento de Tubos

O ensaio de achatamento foi realizado utilizando amostras dos tubos em sua integridade. Os comprimentos ( $L_e$ ) dos corpos de prova foram estabelecidos seguindo uma relação de 1:1,5, conforme norma SA-450/SA-450M. Este ensaio foi conduzido em duas configurações: com a costura do tubo posicionada a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$ , ou seja, com a solda voltada para cima, e lateralmente em relação à direção da força aplicada na máquina universal de ensaio *EMIC DL 1000* (conforme ilustrado na figura 28). A figura 31 apresenta os corpos de prova para o ensaio de achatamento de tubos e a tabela 4 apresenta os dados dos corpos de provas.

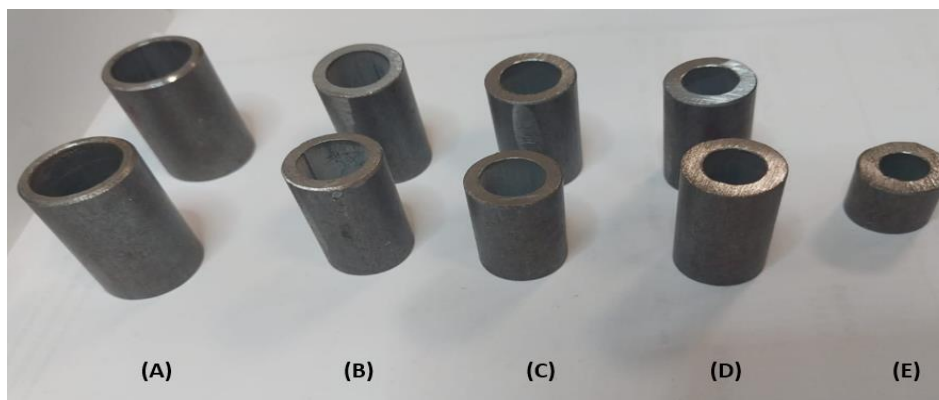


Figura 31: Corpos de prova para o ensaio de achatamento.

Tabela 4: Dados dos corpos de prova para o ensaio de achatamento de tubos.

DADOS DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE ACHATAMENTO DE TUBOS			
Corpo de Prova	Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ) %	Diâmetro Externo, $D_1$ (mm)	Comprimento, $L_e$ (mm)
A	0	21,8	33
B	15%	18,55	28
C	20%	17,45	26
D	25%	16,35	25
E	30%	15,25	23

Após a preparação dos corpos de prova, procedeu-se o ensaio de achatamento dos tubos. Na figura 32, podem ser observados os momentos do ensaio, desde o início até o término, destacando que o ensaio é concluído somente quando a parede superior entra em contato com a parede inferior.

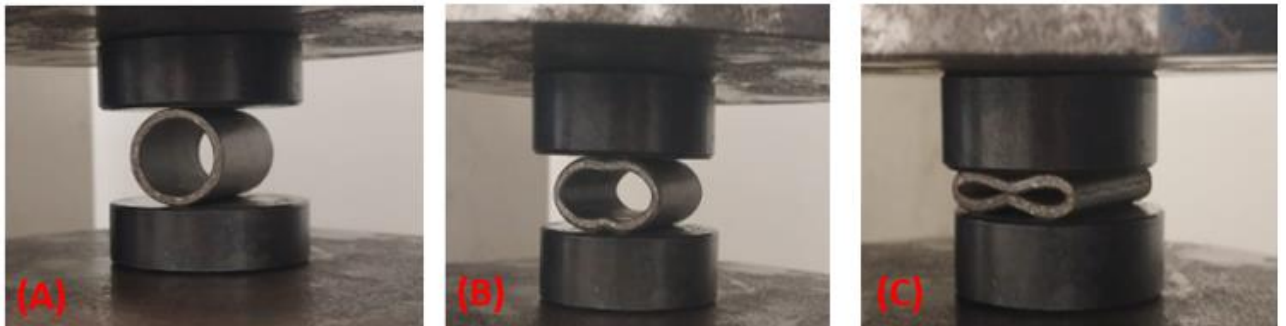


Figura 32: Etapas do ensaio de achatamento de tubos (A) Início do ensaio; (B) Ao longo do ensaio; (C) Final do ensaio.

### 3.3.4 Ensaio de Metalografia

Com o intuito de analisar o comportamento da microestrutura do tubo de aço SAE 1010 após o processo de extrusão direta variando a deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ), conduziu-se o ensaio de metalografia. Este procedimento foi aplicado em um corpo de prova de cada tubo que passou pelo ensaio prático de extrusão, bem como no tubo antes de sofrer o encruamento decorrente do processo. A norma utilizada para proceder o ensaio de metalografia foi a ASTM E3-11 (2017), que versa sobre as corretas técnicas para um ensaio de maior confiança e integridade.

Para realizar o corte dos corpos de prova dos tubos a serem ensaiadas, utilizou-se uma serra de fita vertical com volante e mesa inclinável da marca Acerbi, conforme demonstrado na figura 33.

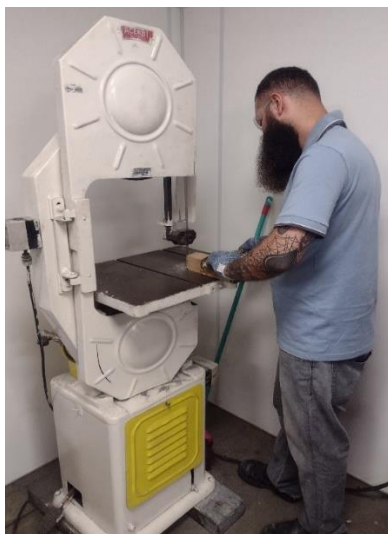


Figura 33: Serra de fita vertical com volante e mesa inclinável da marca Acerbi.

Foi efetuado o corte dos corpos de prova tanto na secção transversal quanto na secção longitudinal em relação ao sentido da extrusão direta realizada nos tubos de aço SAE 1010. Foram coletados corpos de prova do tubo sem passar pelo processo de extrusão, seguido da retirada de corpos de prova dos tubos com deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 15%, 20%, 25% e 30%, conforme demonstrado na figura 34.

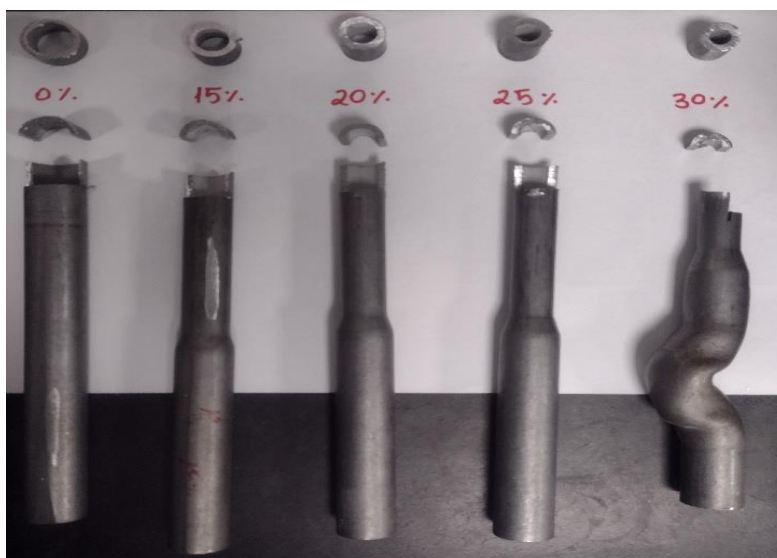


Figura 34: Corpos de prova secção transversal e secção longitudinal para ensaio metalográfico.

Após a extração dos corpos de prova, tanto na secção transversal quanto na secção longitudinal, deu-se início à preparação para o processo de embutimento a frio. Cada molde de bronze foi preenchido com dois corpos de prova (um da secção transversal e outro da secção

longitudinal). O molde de bronze apresenta um diâmetro interno cônico para facilitar a desmontagem. A composição da resina acrílica consistiu na solução de Resina Acrílica + Acrílico Auto Polimerizante, com uma proporção de 2,5 partes de Resina Acrílica para cada 1 parte de Acrílico Polimerizante (conforme detalhado no Anexo 2). A solução de resina acrílica teve tempo de secagem de aproximadamente 20 min, e, após a secagem, foi realizada a desmontagem do molde de bronze.

Após a desmontagem dos moldes, procedeu-se a preparação dos corpos de prova utilizando uma lixadeira metalográfica de um prato. A primeira lixa empregada foi de granulação 60G, seguida por lixas de granulações menores (220G, 320G, 400G, 600G e 1200G). A troca de lixa somente ocorreu após a remoção completa de todas as marcas e riscos provenientes da lixa anterior, garantindo um acabamento uniforme. A cada troca de lixa, foi realizada uma rotação de 90° na amostra. O processo de lixamento foi constantemente refrigerado com água em temperatura ambiente, e cada etapa teve uma duração aproximada de 4 minutos.

Após as peças estarem uniformemente lixadas com a última lixa de 1200G, foi realizado o processo de polimento utilizando uma politriz metalográfica de 1 prato. Para o polimento foi utilizado um disco de feltro e lubrificação contínua com solução de alumina nº3 + água e para melhor qualidade foi realizado movimentos da amostra no sentido contrário a rotação do feltro. Antes de iniciar o processo de polimento das amostras foi realizado a limpeza do feltro com algodão. O processo durou aproximadamente 7 minutos. A figura 35 apresenta as etapas de preparação dos corpos de prova.

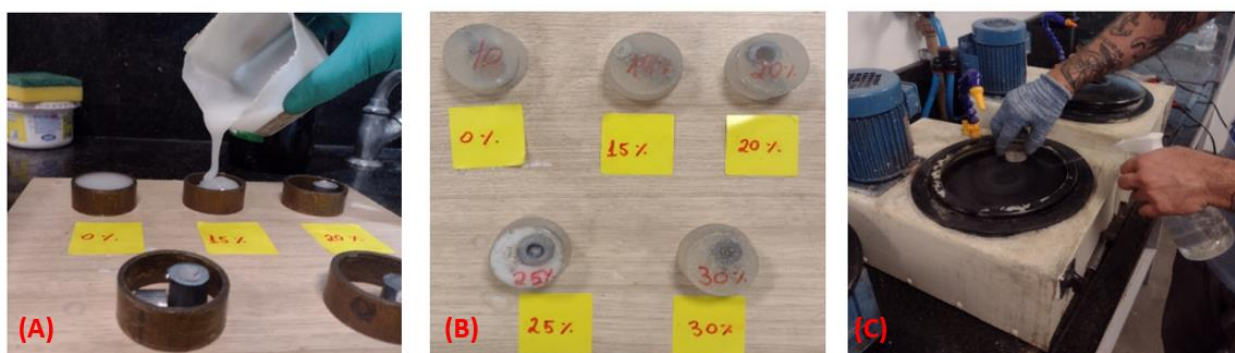


Figura 35: Preparação dos corpos de prova: (A) Processo de embutimento; (B) Corpos de prova embutidos; (C) Preparação dos corpos de prova embutidos.

Após a conclusão do processo de polimento, tornou-se necessário realizar a limpeza na face a ser observada. Para isso, foi aplicado álcool na superfície, seguido de secagem com um secador. O fluxo de ar do secador foi direcionado a aproximadamente 30 centímetros da

amostra, ao longo do sentido longitudinal, evitando a aplicação direta do vento no ângulo reto da face da amostra.

Por fim, procedeu-se o ataque químico por imersão utilizando o nital, uma solução composta por ácido nítrico e álcool, que tem a finalidade de revelar a microestrutura e os constituintes da amostra. Um recipiente foi preenchido com a solução de nital, e a amostra foi imersa por aproximadamente 8 segundos. Posteriormente, a amostra foi cuidadosamente seca utilizando um secador, com o fluxo de ar direcionado no sentido longitudinal da amostra, a uma distância de aproximadamente 30 centímetros.

Após a conclusão de todo o processo de preparação dos corpos de prova, procedeu-se a observação utilizando um microscópio metalográfico de platina invertida, da marca *Fortel*, conforme apresentado na figura 36.

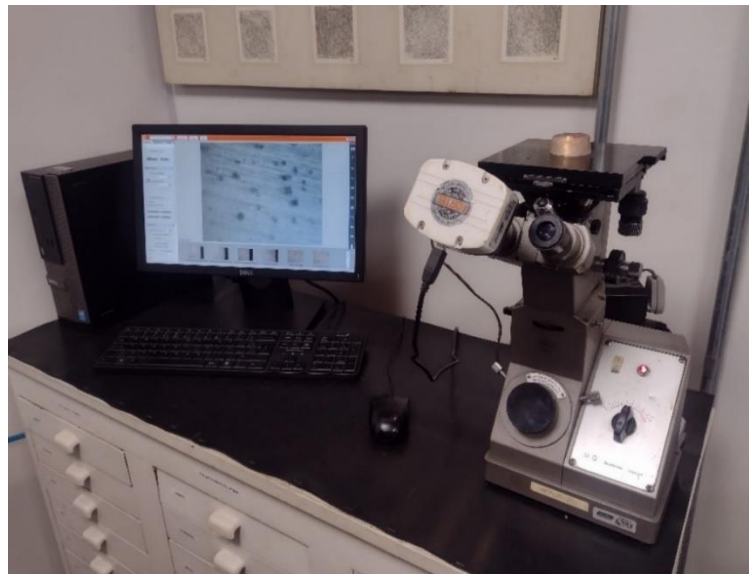


Figura 36: Microscópio metalográfico de platina invertida, marca *Fortel*.

#### 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Antes da realização do ensaio prático de compressão, foi conduzida uma simulação computacional. A fim de avaliar o comportamento dos tubos de aço SAE 1010 extrudados a frio, foi utilizado o software Qform, que pode proporcionar uma vasta precisão sobre as tensões, deformações e possíveis defeitos. (figura 37)

A simulação teve o objetivo de prever o limite em que se é possível extrudar o tubo, garantindo a qualidade e eficiência no processo. Este procedimento definiu os parâmetros da máquina de ensaios, além de fornecer uma base para comparação com o ensaio prático de compressão.

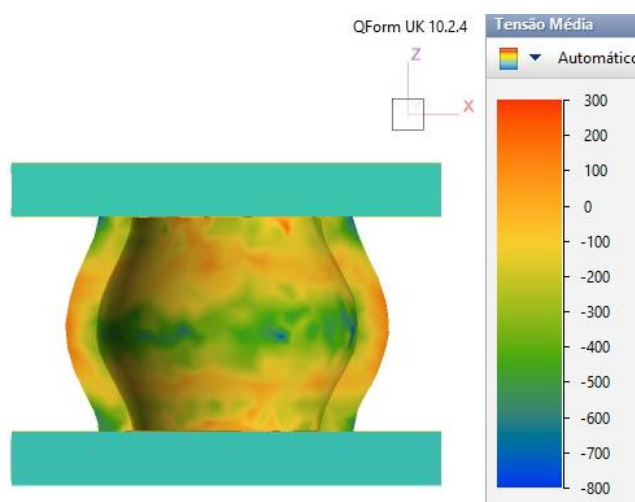


Figura 37: Resultado numérico da distribuição de tensões.

##### 4.1 DADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para uma simulação precisa é necessário importar os dados do material e os dados do processo mais próximos possíveis do caso real, pois fornece resultados mais confiáveis, logo, dados precisos permitem análises mais acuradas, garantindo a confiabilidade das informações obtidas na simulação.

Para tal, utilizou-se a equação da curva de escoamento (kf) do material Ck10 de Tschatsch (Figura 10):  $\mathbf{kf} = 740 \cdot \boldsymbol{\varphi}^{0,216}$ . Nas tabelas 5 e 6 e na figura 38 estão representados dados do material e processo.

Tabela 5: Dados do material para Simulação Computacional – QFORM.

DADOS DO MATERIAL	
MATERIAL	Aço SAE 1010
DENSIDADE [ $\rho$ ]	7837 kg/m <sup>3</sup>
CONDUTIVIDADE TÉRMICA [ $\lambda$ ]	1,11914e-5 – BASE 20°
CALOR EXPECÍFICO [c]	491 J/(kg.K)
MÓDULO DE YOUNG [E]	2,1 e+11 Pa

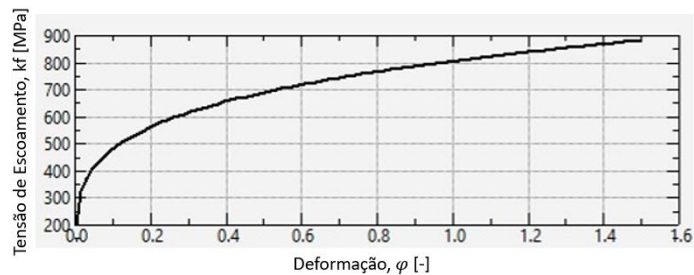


Figura 38: Curva de escoamento aço Ck10 através da equação  $kf = 740 \cdot \varphi^{0,216}$ .

Tabela 6: Dados do processo para simulação computacional – QFORM.

DADOS DO PROCESSO		
TIPO DE MALHA	ADAPTATIVA	
LUBRIFICANTE [ $\mu$ ] [-]	0,05	SABÃO LUBRIFICANTE
TEMPERATURA [°C]	20°	
COMPRIMENTO EXTRUDADO [Le]	100 mm	

Após realizar a preparação da simulação computacional, foi então realizada a simulação. Primeiramente foi realizado a análise de extrusão do material variando a deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ )

#### 4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 15% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO ( $\epsilon D_1$ )

A primeira simulação computacional foi com 15% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Neste caso, o tubo deve extrudar do diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para diâmetro externo ( $D_1$ ) 18,55mm, nota-se que o material apresenta escoamento contínuo sem causar flambagem ou encalque no tubo. Além disso, é possível perceber também que o tubo copia perfeitamente o perfil do ângulo do cone de trabalho da matriz. (Figura 39)



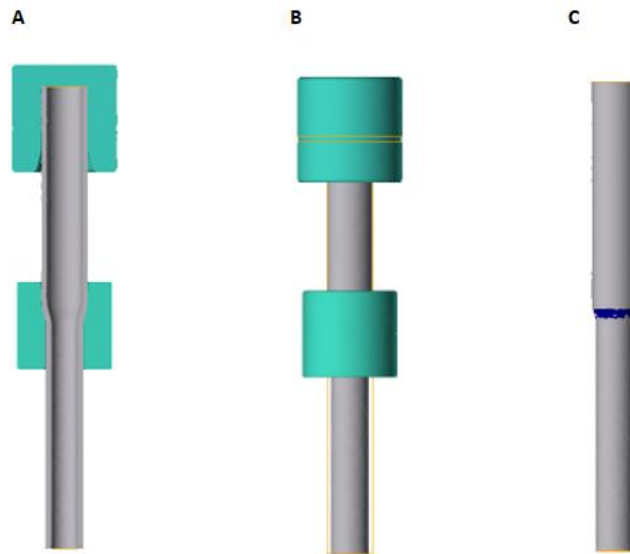


Figura 39: Simulação computacional de extrusão direta - 15% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

- A: Imagem do tubo em vista de corte;
- B: Imagem do tubo em vista completa;
- C: Imagem apenas do tubo extrudado.

Importante ressaltar que o tubo está na cor **cinza** e as ferramentas em cor **verde**. Na imagem C, a cor **azul** representa a zona de contato do tubo com a matriz.

Na figura 40 são apresentadas as linhas de fluxo de escoamento do material e também as variações dimensionais do tubo após executar o processo de extrusão. Nota-se que o tubo segue perfeitamente o fluxo do cone de trabalho, sem ter contato com o cone de entrada. Contudo, percebe-se que o diâmetro extrudado copia exatamente o diâmetro do canal de calibração, porém, ocorre uma pequena diminuição no diâmetro externo ( $D_1$ ) do tubo extrudado. Neste, a ferramenta possui o canal de calibração de  $\text{Ø}18,55\text{mm}$  e o tubo extrudado resulta em  $17,80$  no diâmetro externo ( $D_1$ ). É possível também analisar que ocorre variação na parede do tubo, onde tem parede inicial ( $s$ ) de  $2,35\text{mm}$  e após a extrusão a parede do tubo fica com aproximadamente  $2,7\text{mm}$ .

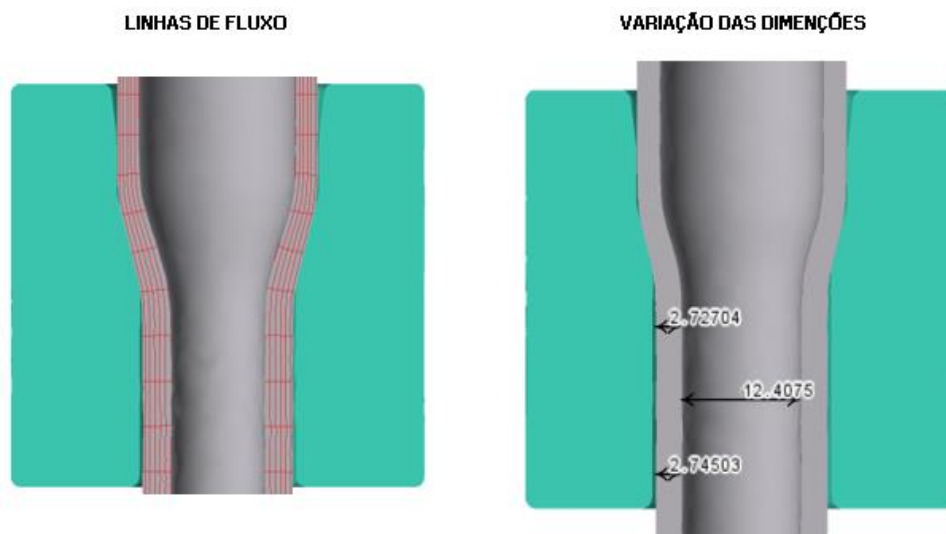


Figura 40: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo.

#### 4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 20% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO ( $\epsilon D_1$ )

Na simulação utilizando 20% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). O tubo deve extrudar de diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para diâmetro externo ( $D_1$ ) 17,45mm. Nota-se que o material realiza a extrusão, porém, percebe-se que o diâmetro interno do tubo não fica uniforme. Também é possível notar que o tubo não copiou perfeitamente o ângulo do cone de trabalho quando comparado à simulação de 15% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). (Figura 41)

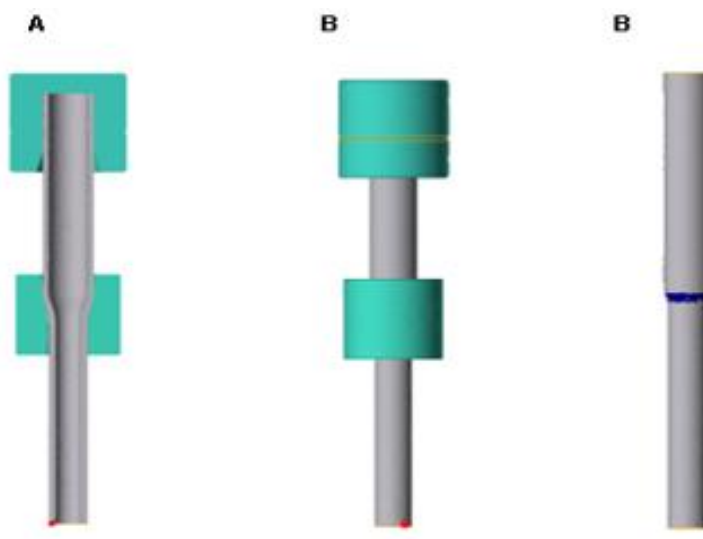


Figura 41: Simulação Computacional de Extrusão Direta – 20% de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Na figura 42 são apresentadas as linhas de fluxo de escoamento do material, percebe-se o comportamento é semelhante ao processo anterior e nota-se também que o tubo após o processo de extrusão teve acréscimo na espessura da parede, a qual, após a extrusão ficou com parede (s) de aprox. 2,8mm. Logo, o diâmetro externo do tubo também não copiou corretamente o perfil do canal de calibração da matriz, pois ficou com diâmetro externo ( $D_1$ ) de aprox. 16,7 mm.

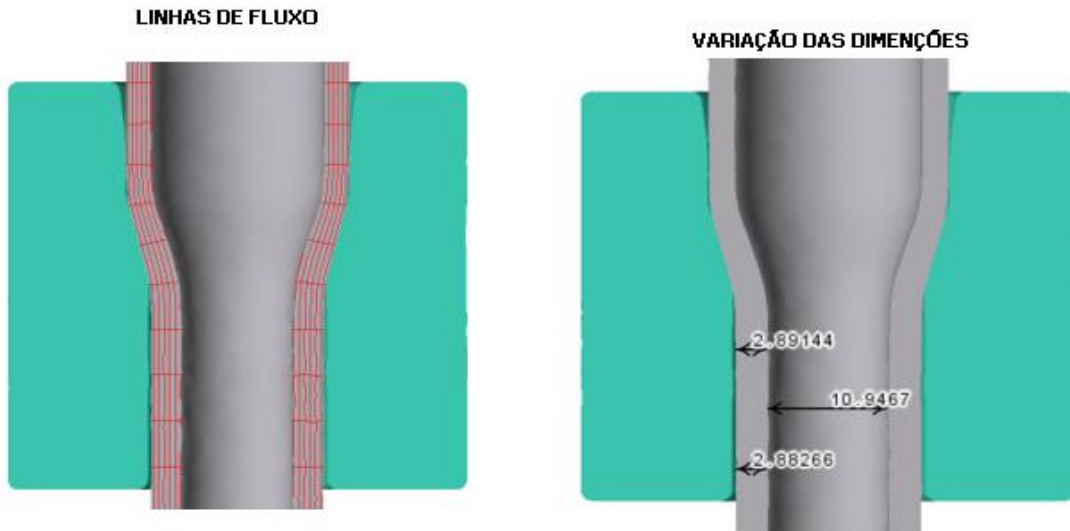


Figura 42: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo.

#### 4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 25% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO ( $\epsilon D_1$ )

A simulação utilizando 25% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), o tubo deve extrudar de diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para diâmetro externo ( $D_1$ ) 16,35mm. Neste caso, percebe-se que o material inicia o processo de extrusão e logo em seguida o fluxo de extrusão cessa e começa o fenômeno de flambagem e encalque no tubo. É possível notar que o material gera um embarrilhamento na região do cone de entrada da ferramenta, e, com isso, o material para de seguir o fluxo de extrusão e gera o efeito de flambagem, conforme exposto na figura 43.

Através das marcações em azul na imagem (C), é possível perceber o momento em que o material entra em contato do Cone de entrada da ferramenta, assim gerando uma extrusão não uniforme. Isto faz com que a força de atrito entre o tubo e a ferramenta aumente,

consequentemente aumentando a força necessária para extrudar o tubo.

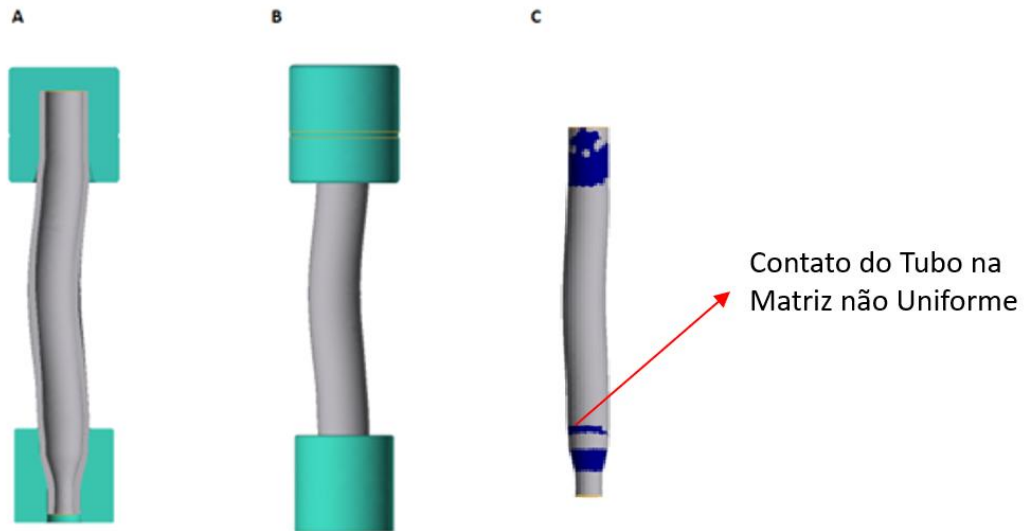


Figura 43: Simulação Computacional de Extrusão Direta – 25% de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Na figura 44, pode-se analisar o comportamento do fluxo de material, que segue o padrão das simulações anteriores. Porém, com a imagem aumentada, percebe-se melhor o momento da flambagem, onde através da linha em amarelo na imagem, o material tende a não seguir um escoamento uniforme e encalca sobre o Cone de entrada da ferramenta. Logo, percebe-se que é exatamente o momento no qual inicia-se o fenômeno de flambagem, em que a força de extrusão ( $F_e$ ) supera a força crítica ( $F_{cr}$ )

Nota-se também que, ao passo que o pouco que o material extrudou, ocorreu também um aumento significativo na espessura do tubo ( $s$ ), onde a espessura resultou em aprox. 2,9 mm.

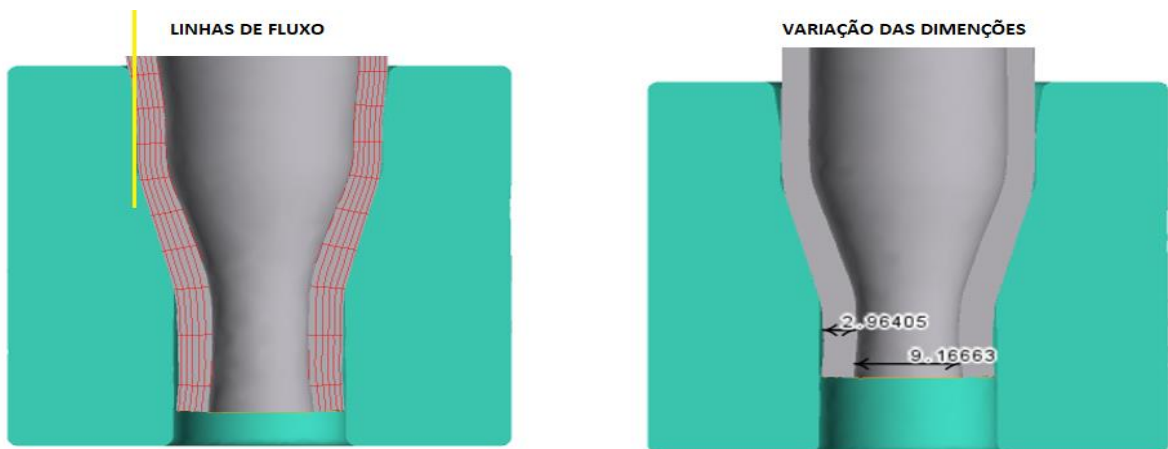


Figura 44: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo.

#### 4.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: 22,5% DE DEFORMAÇÃO RELATIVA NO DIÂMETRO EXTERNO ( $\epsilon D_1$ )

Após realizar as simulações com 20% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), onde o tubo extrudou de diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para diâmetro externo ( $D_1$ ) 17,45 e não flambou e a simulação de 25% deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), onde o tubo flambou para extrudar o diâmetro externo ( $D_1$ ) 16,35mm, foi executada uma simulação computacional intermediária para garantir mais precisão no resultado e definir o limite de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Com isso foi realizada a extrusão dos tubos com 22,5% deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), na qual o tubo deve extrudar para o diâmetro externo ( $D_1$ ) 16,90mm.

Na figura 45, pode-se analisar que o tubo extrudou de maneira uniforme não ocorrendo o fenômeno de flambagem durante o comprimento ( $L_e$ ) de 100mm. Nota-se também que o material não teve contato com o cone de entrada da ferramenta.

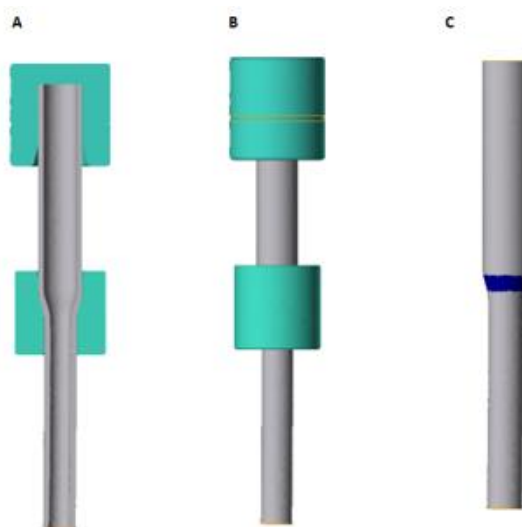


Figura 45: Simulação Computacional de Extrusão Direta – 22,5% de Deformação Relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Na figura 46, confere-se que mesmo estando próximo ao estágio onde ocorre flambagem, as linhas de fluxo se mantêm contínuas e seguindo o fluxo da extrusão. Logo, novamente, percebe-se que a espessura do tubo aumentou e o diâmetro externo do tubo ( $D_1$ ) ficou menor que o diâmetro do anel de calibração da ferramenta. Neste, a espessura ( $s$ ) resultou em aproximadamente 3,08 mm e o diâmetro externo do tubo ( $D_1$ ) resultou em aprox. 16,2 mm.

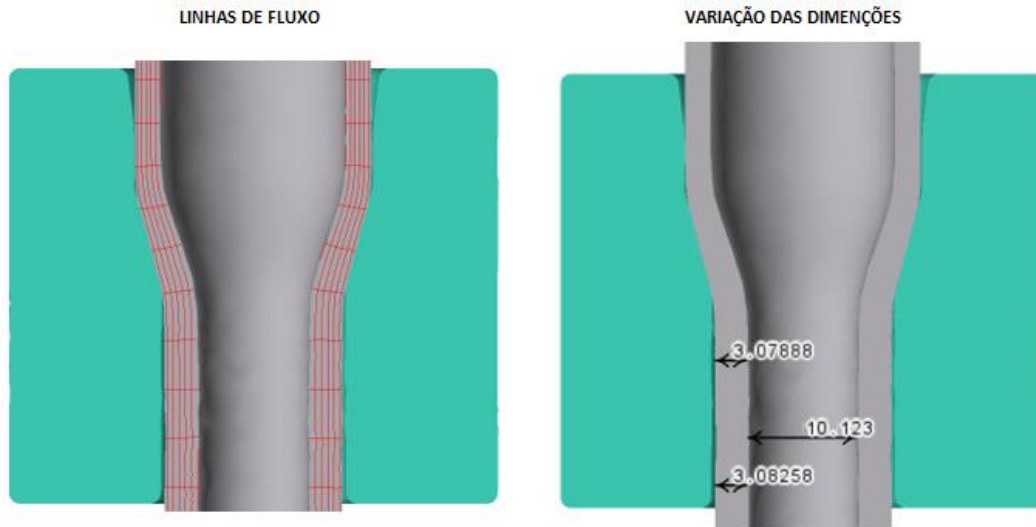


Figura 46: Linhas de fluxo e variação dimensional do tubo.

Contudo, percebe-se via simulação computacional que a espessura da parede do tubo ( $s$ ) varia ao longo das reduções. Onde, quanto maior for a deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), maior tende a aumentar a medida de espessura da parede do tubo. Notou-se também que o tubo após a extrusão não copia perfeitamente o diâmetro do canal de calibração da matriz, pois, em todos os casos o diâmetro de extrusão ( $D_1$ ) resultou em um diâmetro menor do que o diâmetro cone de calibração.

#### 4.6 FORÇA DE EXTRUSÃO ( $F_e$ )

Após realizar as análises de extrusão do material foi analisado a força de extrusão ( $F_e$ ). A figura 47 apresenta as forças de extrusão através de um gráfico Força x Deslocamento, no qual os valores de força (kN) estão no eixo Z e os valores de deslocamento (mm) estão no eixo X.

Na deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 15 %, onde o tubo reduziu o diâmetro externo de 21,80mm para diâmetro 17,10mm, foram necessários 28,929 kN de força de extrusão ( $F_e$ ). Nota-se que a força foi constante e não teve muita instabilidade ao longo do deslocamento.

Na deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 20 %, onde o tubo reduziu o diâmetro externo de 21,80mm para 16,70 mm, foi necessário 30,716 kN de força de extrusão ( $F_e$ ). Confirma-se via simulação que ao diminuir o diâmetro do canal de calibração da matriz de extrusão aumenta-se a força necessária para executar o processo, logo teve aumento de aprox. 10 kN de força de extrusão ( $F_e$ ) em relação a deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 15%.

Na deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ) de 22,5 %, onde o tubo reduziu o diâmetro externo de 21,80mm para 16,20 mm, foram necessários 46,483 kN de força de extrusão ( $F_e$ ). Notou-se comportamento uniforme e semelhante as simulações anteriores.

Na deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ) 25 %, foi onde aconteceu o fenômeno de flambagem no tubo. Nota-se que após o martelo da extrusora deslocar 21,47mm (consequentemente o tubo extrudou 21,47mm), resultou uma força de extrusão ( $F_e$ ) de 59,529 kN, logo ao invés de completar a extrusão do tubo houve deslocamento não uniforme gerando a flambagem.

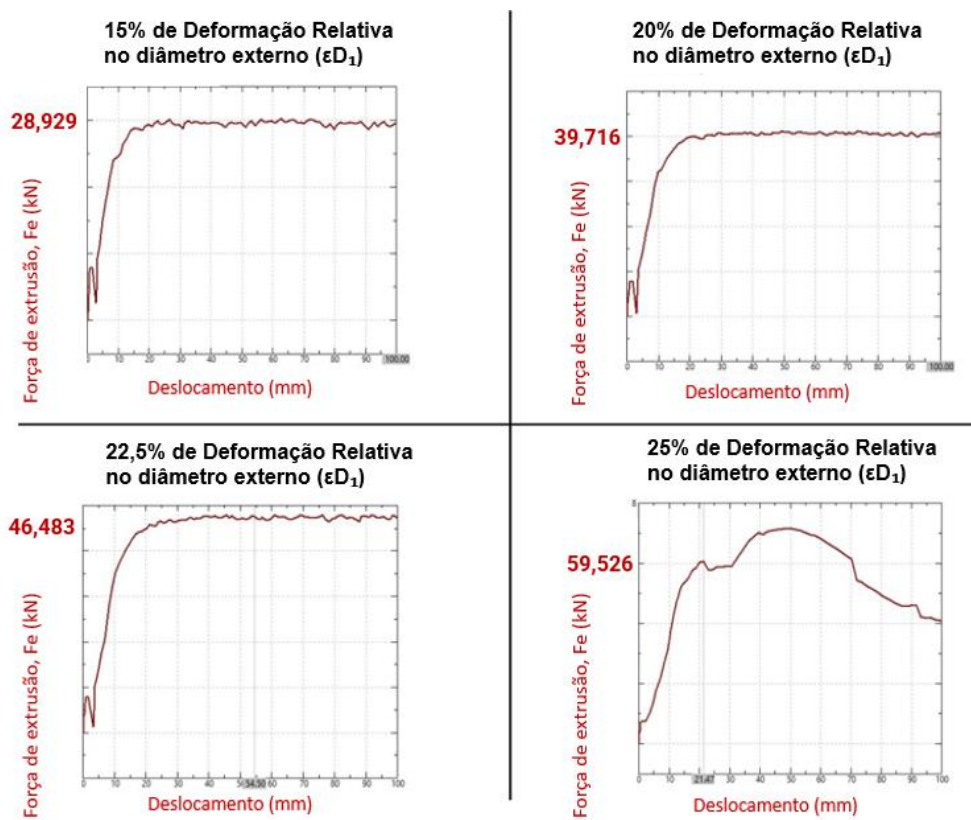


Figura 47: Força de extrusão simulada utilizando o software Qform.

A figura 48 apresenta de forma detalhada o momento em que ocorre a flambagem na deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ) 25%. Na região, é possível analisar através da demarcação em **vermelho** o momento em que ocorre a deformação não uniforme durante a extrusão. Interessante ressaltar que no deslocamento do martelo de 21,47mm, ocorre a deformação não uniforme, consequentemente aumentando a Força de extrusão ( $F_e$ ) para 59,529 kN. Contudo, ocorre a flambagem logo após esse momento.

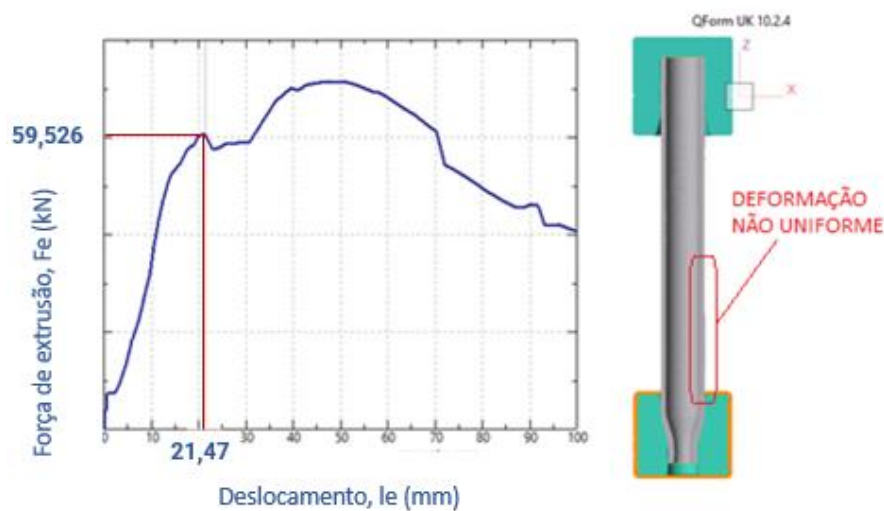


Figura 48: Momento da flambagem – Software Qform.

#### 4.7 ESFORÇO NA MATRIZ DE EXTRUSÃO

Para garantir a integridade da matriz, foram realizadas as simulações computacionais da matriz em todos os casos, a fim de garantir que a ferramenta não ultrapassasse a zona de deformação plástica. Foi provado através de simulação que a ferramenta sofre a maior tensão cisalhante na situação de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) 25%, ou seja, no momento em que ocorre a flambagem.

Através da figura 49, gerada pelo software QForm, é possível visualizar que no instante de maior tensão, são geradas apenas tensões compressivas na ferramenta, a tensão na região do canal de calibração da ferramenta é de -268,80 MPa. Na imagem de simulação computacional, o gradiente de cores na ferramenta representa os pontos com as tensões localizadas.



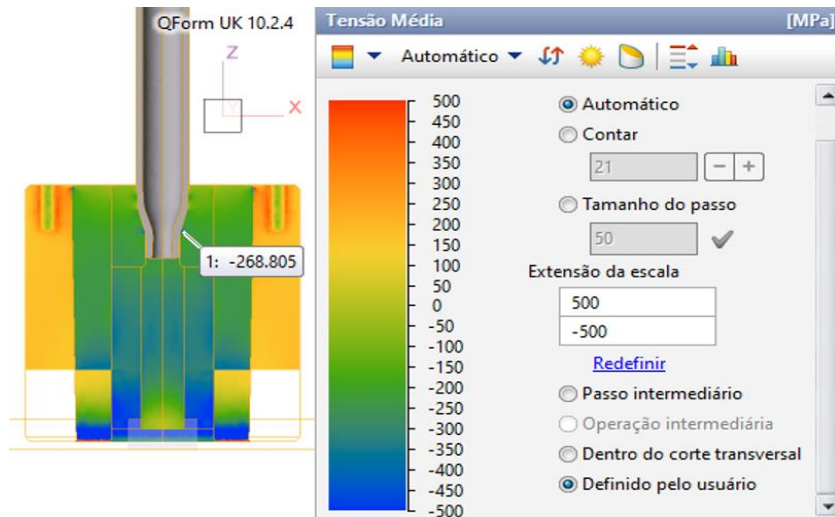


Figura 49: Tensões na Ferramenta – Software Qform.

Após a análise das tensões na matriz de extrusão, foi conduzida uma avaliação da sua vida útil. Os resultados dessa análise indicaram uma vida útil excepcionalmente extensa para a ferramenta. De fato, essa vida útil pode ser considerada praticamente infinita, uma vez que a ferramenta demonstrou capacidade para suportar aproximadamente 11.700.000.000 ciclos antes de atingir o ponto de ruptura. Conforme figura 50.

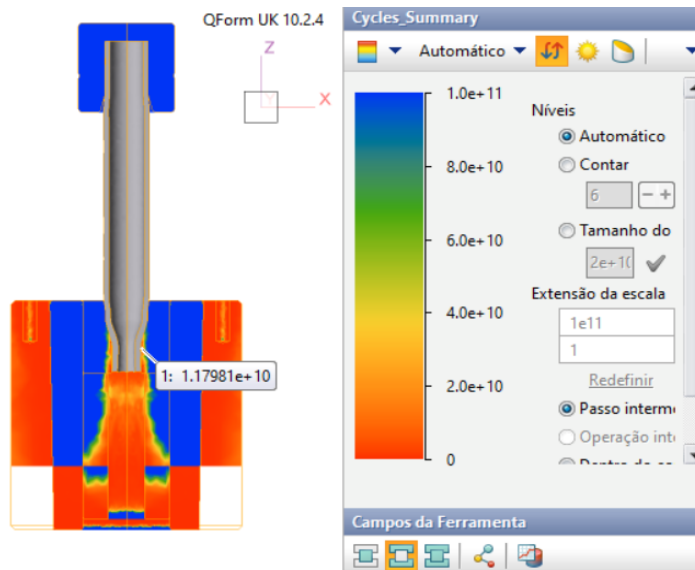


Figura 50: Vida útil da Matriz de extrusão – Software Qform.

Devido a máquina já ter as Carcaças existentes e não conter histórico de fraturas nas carcaças, foi fabricada e analisada apenas a matriz de extrusão.

## 5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 5.1 CÁLCULO ANALÍTICO

O cálculo analítico é uma ferramenta fundamental para a análise e otimização de projetos de engenharia. Com base em princípios matemáticos e teorias avançadas, é possível obter soluções precisas, destacando seus conceitos essenciais e sua relevância para um melhor desenvolvimento nos projetos.

Este subtítulo tem como objetivo fornecer uma base teórica sólida sobre os conceitos fundamentais do cálculo analítico, com ênfase nas aplicações práticas para a sua otimização. Garantindo-se assim a qualidade do produto final e no aprimoramento do processo de extrusão direta para os tubos de aço SAE 1010.

Contudo, após serem realizados e apresentados os resultados dos cálculos analíticos será feita uma análise para avaliar viabilidade e integridade do processo.

### 5.2 DADOS GEOMÉTRICOS DO TUBO

As dimensões fundamentais dos tubos, antes de serem submetidos ao ensaio prático de extrusão direta, estão descritas na tabela 7. A figura 51 ilustra de maneira detalhada as dimensões principais dos tubos antes e depois do mencionado ensaio. Nessa representação visual, é possível compreender, de forma esquemática, as alterações que ocorreram, destacando claramente as diferenças entre o estado inicial e o resultado obtido após a condução do ensaio prático de extrusão direta.

Tabela 7: Dados geométricos do tubo.

Diâmetro Externo $D_0$ (mm)	Diâmetro Interno $d_0$ (mm)	Comprimento $l_0$ (mm)
21,80	17,10	200

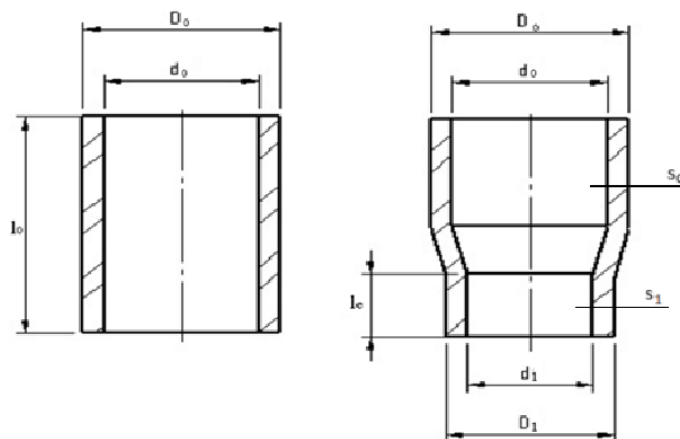


Figura 51: Tubo Antes e Depois do processo de Extrusão Direta. (Autor, 2024)

Para a realização de uma análise precisa no processo de extrusão direta de tubos, é fundamental estipular os devidos diâmetros que serão submetidos ao ensaio. O diâmetro é uma medida crítica, pois influencia diretamente na geometria e na capacidade de fluxo do material durante a extrusão.

Contudo, a escolha cuidadosa dos diâmetros é essencial para garantir a qualidade nas etapas posteriores. Logo, para determinação dos diâmetros externos, foi calculado o diâmetro externo depois do processo de extrusão ( $D_1$ ), iniciando com 15% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\varepsilon D_1$ ) e aumentando conseqüentemente de 5% até chegar em 50% de deformação relativa ( $\varepsilon D_1$ ). Todos os demais cálculos foram a partir destes diâmetros determinados. Para todos os ensaios, o comprimento de extrusão ( $L_e$ ) foi 100mm.

Os diâmetros apropriados foram derivados utilizando a equação inicial 12, que, após manipulação matemática, evoluiu para a equação 13.

$$\varepsilon D_1 = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

$$D_1 = D_0 \left( 1 - \frac{\varepsilon D_1}{100} \right) \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- $D_0$  : Diâmetro externo antes da extrusão (mm)
- $d_0$  : Diâmetro interno antes da extrusão (mm)
- $D_1$  : Diâmetro externo depois da extrusão (mm)
- $d_1$  : Diâmetro interno depois da extrusão (mm)
- $\varepsilon D_1$ ; Deformação relativa do  $D_1$  (%)

Para calcular a área do tubo ( $A_t$ ) foi utilizado a Equação 14.

$$A_t = \frac{\pi D_0^2}{4} - \frac{\pi d_0^2}{4} \quad \text{Equação 12}$$

Para calcular a deformação verdadeira em área foi utilizada a Equação 2, já apresentada.

A tabela 8 apresenta os valores individuais de diversos dados do processo, sendo eles: deformação relativa no diâmetro externo ( $\varepsilon D_1$ ); diâmetro externo antes da extrusão ( $D_0$ ); diâmetro interno antes da extrusão ( $d_0$ ); diâmetro externo após extrusão ( $D_1$ ), diâmetro interno após extrusão ( $d_1$ ); área externa do tubo ( $A_{ext.}$ ); área interna do tubo ( $A_{int.}$ ); área do tubo ( $A_t$ ) e deformação verdadeira em área ( $\varphi_A$ ).

Tabela 8: Dados de deformação verdadeira.

$\varepsilon D_1$ (%)	$D_0$ (mm)	$d_0$ (mm)	$D_1$ (mm)	$d_1$ (mm)	$A_t$ (mm <sup>2</sup> )	$\varphi_A$ (-)
0	21,8	17,1	21,8	17,1	143,59	0
15	21,8	17,1	18,53	13,83	119,45	0,184
20	21,8	17,1	17,44	12,74	111,41	0,254
25	21,8	17,1	16,35	11,65	103,36	0,329
30	21,8	17,1	15,26	10,56	95,31	0,410
35	21,8	17,1	14,17	9,47	87,26	0,498
40	21,8	17,1	13,08	8,38	79,22	0,595
45	21,8	17,1	11,99	7,29	71,17	0,702
50	21,8	17,1	10,9	6,2	63,12	0,822

### 5.2.1 Cálculo para Tensão de Escoamento Média (kfm)

A tensão de escoamento média (kfm) é a média entre a tensão de escoamento no momento inicial da deformação ( $kf_0$ ) e a tensão de escoamento ao final da deformação, conforme os valores apresentados na tabela 9.

$$kfm = \frac{Kf_0 + Kf_1}{2} \quad \text{Equação 13}$$

- $kf_0$ : 260 N/mm<sup>2</sup>
- $kf_1$  : foi calculado individualmente para todas as deformações já apresentadas utilizando a Curva de escoamento  $kf = 740 \cdot \varphi^{0,216}$

Dados extraídos da curva de escoamento (kf) do aço Ck10, conforme Tschatsch (2005).

Tabela 9: Valores de  $k_{f1}$  e  $k_{fm}$  (N/mm<sup>2</sup>).

$\epsilon D_1$ (%)	TENSÃO DE ESCOAMENTO FINAL, $k_{f1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	TENSÃO DE ESCOAMENTO MÉDIA, $k_{fm}$ (N/mm <sup>2</sup> )
15%	513,42	386,71
20%	550,31	405,15
25%	581,95	420,98
30%	610,32	435,16
35%	636,57	448,28
40%	661,45	460,72
45%	685,54	472,77
50%	709,31	484,65

### 5.2.2 Cálculo para o Ângulo da Matriz ( $\alpha$ )

O cálculo do ângulo da matriz ( $\alpha$ ) é fundamental para determinar a força de extrusão ( $F_e$ ) em matrizes que contém ângulos de extrusão. Neste estudo foi utilizada uma matriz com ângulo de 15°, conforme apresentado figura 5.

$$\alpha = \frac{\beta \cdot \pi}{180} \quad \text{Equação 14}$$

- $\alpha$ : Ângulo da matriz para o cálculo de força de extrusão (rad)
- $\beta$ : Angulo na matriz (rad)

O ângulo da matriz é de 15°, porém para utilizar a equação 24 deve-se subtrair do ângulo de 90° devido ao posicionamento do eixo. Na equação, deve-se subtrair o ângulo da matriz (15°) do ângulo reto (90°) devido ao posicionamento do ângulo da matriz.

$$\alpha = \frac{75 \cdot \pi}{180}$$

Foi encontrado para o ângulo da matriz ( $\alpha$ ) 1,3 rad.

### 5.2.3 Cálculo para Força de extrusão ( $F_e$ )

A força de extrusão desempenha um papel fundamental ao estabelecer a força necessária

para conduzir o processo de extrusão nos tubos de aço SAE1010, considerando um comprimento ( $L_e$ ) de 100 mm e variando os valores de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Com os valores de força de extrusão ( $F_e$ ) calculados nas diferentes situações de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) em conjunto com os resultados de força crítica ( $F_{cr}$ ), pode-se determinar o momento em que o Tubo entra em colapso e ocorre o fenômeno de flambagem. Para calcular a força de extrusão ( $F_e$ ), foi utilizada a equação 7 já apresentada. Para obter um valor preciso de força de extrusão é necessária uma série de informações detalhadas sobre o material e o processo. Além disso, é importante considerar o atrito entre o material e a matriz, pois ele também afetará a força de extrusão ( $F_e$ ).

$$F_e = 143,59\text{mm}^2 \cdot k_{fm} \cdot \varphi \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot 0,1}{\sin 2 \cdot 1,3} + \frac{2}{3} + \frac{1,3}{\varphi} \right) + \pi \cdot 21,80\text{mm} \cdot 0,1 \cdot 260\text{N/mm}^2 \cdot 100\text{mm}$$

Dados para execução do cálculo de força de extrusão ( $F_e$ ):

At: 143,59mm <sup>2</sup> (Tabela 7);	$\alpha$ : 1,3 rad;
k <sub>fm</sub> : Vai variar (Tabela 7);	D <sub>o</sub> : 21,80mm (Tabela 7);
$\varphi$ : Vai variar (Tabela 7);	k <sub>fo</sub> : 480 N/mm <sup>2</sup> (Figura 1);
$\mu$ : 0,1 (Tabela 1);	L <sub>e</sub> : 100mm;
F <sub>e</sub> : Força de extrusão (N);	

A tabela 10, apresenta os valores individuais para força de extrusão ( $F_e$ ) para os tubos de aço SAE 1010.

Tabela 10: Valores da força necessária para extrusão direta dos tubos.

$\epsilon D_1$ (%)	FORÇA DE EXTRUSÃO, $F_e$	
	Quilonewton (kN)	Tonelada (t)
15%	27,13	2,77
20%	28,40	2,90
25%	29,75	3,03
30%	31,19	3,18
35%	32,76	3,34
40%	34,49	3,52
45%	36,42	3,71
50%	38,61	3,94

#### 5.2.4 Cálculo para o Momento de (I)

O momento de inércia (I) do tubo é uma propriedade essencial para a análise dos corpos sujeitos aos momentos de flexão durante o processo de extrusão. Para calcular o momento de inércia (I) foi utilizada a equação 9 já apresentada e os valores calculados são apresentados na tabela 11.

$$I = \frac{\pi^2 (21,80\text{mm}^4 - D_1^4)}{64}$$

Dados para execução do cálculo de momento de inércia (I):

- I: Momento de inércia ( $\text{mm}^4$ );
- $D_0$ : 21,80 mm (Tabela 7);
- $D_1$ : Vai variar (Tabela 7)

Tabela 11: Momento de inércia

$\epsilon D_1$ (%)	MOMENTO DE INÉRCIA, I (mm <sup>4</sup> )
15%	12539,532
20%	10203,623
25%	8179,584
30%	6444,887
35%	4977,005
40%	3753,411
45%	2751,577
50%	1948,976

### 5.2.5 Cálculo para Força Crítica de Flambagem (Fcr)

A força crítica para flambagem (Fcr) é uma propriedade mecânica importante para determinar a capacidade de um componente estrutural resistir a flambagem. O cálculo para determinar a carga máxima utilizando a fórmula de *Euler* está apresentado na equação 8 e os valores calculados na tabela 12.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1e11Pa \cdot I}{100mm^2}$$

Dados para execução do cálculo da Força Crítica de Flambagem (Fcr):

- Fcr: Força crítica de flambagem (Mpa);
- E: 2,1e+11Pa (Tabela 4);
- I: Vai variar (Tabela 8);
- Le: 100 (mm)



Tabela 12: Força crítica necessária para flambagem.

$\epsilon D_1$ (%)	FORÇA CRÍTICA, $F_{cr}$	
	Quilonewton (kN)	Tonelada (t)
15%	64,97	6,63
20%	52,87	5,39
25%	42,38	4,32
30%	33,39	3,41
35%	25,79	2,63
40%	19,45	1,98
45%	14,26	1,45
50%	10,10	1,03

Contudo, após os cálculos de força de extrusão ( $F_e$ ) e força crítica ( $F_{cr}$ ) é possível determinar o instante em que o tubo vai flambar. Com isso, foi montada a tabela 13 para deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Nesta, para ocorrer a flambagem, a força de extrusão ( $F_e$ ) deve ser superior a força crítica ( $F_{cr}$ ), ocasionando flambagem nos tubos.

Tabela 13: Relação de força de extrusão e força crítica

$\epsilon D_1$ (%)	FORÇA DE EXTRUSÃO, $F_e$ (kN)	FORÇA DE EXTRUSÃO, $F_e$ (t)		FORÇA CRÍTICA, $F_{cr}$ (kN)	FORÇA CRÍTICA, $F_{cr}$ (t)	
15%	27,13	2,77	<	64,97	6,63	Não Flamba
20%	28,40	2,90	<	52,87	5,39	Não Flamba
25%	29,75	3,03	<	42,38	4,32	Não Flamba
30%	31,19	3,18	<	33,39	3,41	Não Flamba
35%	32,76	3,34	>	25,79	2,63	Flamba
40%	34,49	3,52	>	19,45	1,98	Flamba
45%	36,42	3,71	>	14,26	1,45	Flamba
50%	38,61	3,94	>	10,10	1,03	Flamba

Portanto, através dos cálculos analíticos, foi possível prever que é possível realizar o processo de extrusão direta nos tubos de aço SAE 1010 sem que haja flambagem em até 30% de deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Após esse valor de deformação relativa vai ocorrer o fenômeno de flambagem nos tubos.

### 5.3 ENSAIO PRÁTICO DE EXTRUSÃO DIRETA

Após a conclusão da Simulação Computacional e do Cálculo Analítico avançou-se para a

etapa subsequente: a condução do Ensaio Prático de Extrusão Direta utilizando os tubos de aço SAE 1010. O processo foi cuidadosamente dividido em etapas que asseguraram resultados precisos e confiáveis.

Primeiramente, uma fase crucial consistiu na preparação dimensional dos corpos de prova. Os tubos foram mantidos com diâmetro externo ( $D_0$ ) de 21,80 mm e foi ajustado o seu comprimento ( $L_0$ ) para 200mm. Em seguida, procedeu-se à aplicação do processo de lubrificação dos corpos de prova. Essa etapa foi essencial para otimizar as condições de atrito durante o ensaio prático de extrusão direta.

Ao assegurar que os corpos de prova estivessem adequadamente lubrificados e com as dimensões corretas, foi possível dar início ao ensaio prático de extrusão direta. Neste ponto, a variável principal do experimento envolveu a manipulação dos diâmetros de canal de calibração das matrizes, conseqüentemente variando as deformações relativas no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Diversos tamanhos de redução foram implementados, permitindo explorar diferentes cenários e avaliar os efeitos correspondentes. É importante destacar que, neste processo, não foi utilizado um mandril interno, resultando em uma conseqüente redução do diâmetro interno ( $d_1$ ) dos tubos à medida que ocorria a extrusão.

O ensaio foi planejado de forma gradual, começando com a deformação relativa no diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) inicial de 15%. A partir desse ponto, as porcentagens de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) foram incrementadas em 5% em cada etapa subsequente. A condução dos ensaios continuou até o ponto em que ocorreram situações de flambagem e/ou encalque nos tubos, indicando o limite operacional do processo.

Ao longo de todos os ensaios, o comprimento da extrusão ( $L_e$ ) foi fixado em 100 mm, garantindo uma consistência nas condições de teste. Para aumentar a confiabilidade dos resultados, cada ensaio foi repetido utilizando três corpos de prova distintos. Essa abordagem, de empregar múltiplos corpos de prova, foi adotada com o intuito de minimizar variações aleatórias e proporcionar uma avaliação mais robusta e precisa das respostas do material durante o processo de extrusão.

**Ensaio 01:** No primeiro ensaio, letra (A), foi realizada a extrusão direta de 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). O tubo extrudou do diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para ( $D_1$ ) 18,55mm. Neste ensaio foi possível perceber que o material teve comportamento uniforme, acabamento bom, ficando isento de riscos e marcas.). O

comprimento extrudado ( $L_e$ ) não apresentou variação dimensional, o diâmetro externo ( $D_1$ ) não ficou cônico e a matriz de extrusão não foi danificada (isenta de riscos e marcas).

**Ensaio 02:** No segundo ensaio, Letra (B), foi realizada a extrusão direta de 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). O tubo extrudou do diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para ( $D_1$ ) 17,45mm. Neste ensaio o material teve o comportamento semelhante ao comportamento do primeiro ensaio: o material teve comportamento uniforme, acabamento bom (isento de riscos e marcas), o Comprimento extrudado ( $L_e$ ) não apresentou variação dimensional, o diâmetro externo ( $D_1$ ) não ficou cônico e a matriz de extrusão não foi danificada (isenta de riscos e marcas).

**Ensaio 03:** No terceiro ensaio, letra (C), foi realizada a extrusão direta de 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). O tubo extrudou do diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para ( $D_1$ ) 16,35mm. Neste ensaio percebeu-se que o material não fluiu tão bem quanto aos ensaios anteriores, uma vez que o comprimento extrudado ( $L_e$ ) não apresentou variação dimensional. Além disso, o diâmetro externo ( $D_1$ ) apresentou conicidade de 0,03mm – o diâmetro próximo ao ângulo da ferramenta ficou com  $\varnothing 16,37$ mm e o diâmetro na ponta do tubo ficou com  $\varnothing 16,40$ mm. A superfície extrudada apresentou pequenas marcas e a matriz de extrusão não foi danificada (isenta de riscos e marcas).

**Ensaio 04:** No quarto ensaio, letra (D), foi realizada a extrusão direta de 30% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). O tubo extrudou do diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,80mm para ( $D_1$ ) 15,25mm. Neste ensaio iniciou-se a extrusão direta, porém, após percorrer comprimento extrudado ( $L_e$ ) de aproximadamente 40mm, o tubo entrou em colapso e flambou (CP1 extrudou 41mm, CP2 extrudou 43mm e CP3 extrudou com 45mm). A superfície extrudada em ambos os corpos de prova apresentou pequenas marcas e riscos. No entanto, na matriz de extrusão, não foi observado nenhuma ocorrência de extravio.

**Ensaio 05:** No quinto ensaio, letra (E), o objetivo era realizar a extrusão direta de 35% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), no qual o tubo extrudaria do diâmetro externo ( $D_0$ ) 21,8mm ( $D_1$ ) 14,20mm. Porém, neste ensaio não foi possível realizar o processo de extrusão devido a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) ser muito agressiva. Logo no início do processo, quando o corpo de prova entrou na matriz já “trancou” no cone de entrada da ferramenta, com isso já iniciou o fenômeno de flambagem. No entanto, na matriz de extrusão, também não foi observada nenhuma ocorrência de extravio.

A tabela 14 apresenta a natureza dos resultados qualitativos sobre o ensaio prático de extrusão direta nos tubos de Aço SAE1010 e a figura 52 ilustra os corpos de prova após a execução dos ensaios.

Tabela 14: Resultado do ensaio prático de extrusão direta.

CP	$\epsilon D_1$ (%)	RESULTADO
A	15%	Não Flambou
B	20%	Não Flambou
C	25%	Não Flambou
D	30%	Flambou
E	35%	Flambou



Figura 52: Corpos de prova após ensaio prático de extrusão direta.

O resultado negativo obtido no ensaio com 30% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) (letra D) fornece informações valiosas sobre os limites práticos da extrusão direta e a necessidade de um equilíbrio entre a agressividade da deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) e a capacidade do material de suportar essas condições. Nesta etapa, foi viável executar uma porção inicial da extrusão. No entanto, ao prosseguir com o processo, surgiu o fenômeno de flambagem, o que comprometeu a possibilidade de realizar extrusões com comprimentos mais extensos.

Foi constatado que o fenômeno do corpo de prova ficar com o diâmetro externo ( $D_1$ ) menor do que o diâmetro do canal de calibração da matriz de extrusão observado na simulação computacional se repetiu durante os ensaios práticos. Nesse caso, o tubo extrudado apresentou o diâmetro externo ( $D_1$ ) ligeiramente menor do que o diâmetro do canal de calibração da matriz

de extrusão, conforme previamente previsto. Os valores dos diâmetros externos ( $D_1$ ) após os ensaios práticos são apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Dimensões dos tubos após ensaio de extrusão direta.

$\epsilon D_1$ (%)	DIÂMETRO DO CANAL DE CALIBRAÇÃO DA MATRIZ DE EXTRUSÃO (mm)	DIÂMETRO EXTERNO APÓS ENSAIO PRÁTICO, $D_1$ (mm)
15%	18,55	18,10
20%	17,45	16,95
25%	16,35	16,05
30%	15,25	14,90

No entanto, outra observação relevante foi a concentricidade dos tubos após a realização do ensaio. Para avaliar essa característica, empregou-se um instrumento especializado destinado à medição da concentricidade, apresentado na figura 28. Esse dispositivo é composto por uma base equipada com roletes que permitem posicionar os tubos. Ao girar o tubo que está sendo medido, os desvios de concentricidade são refletidos em um relógio comparador, fornecendo uma leitura precisa do valor de concentricidade.

A tabela 16 tem o intuito de registrar os valores de concentricidade obtidos nos tubos ao longo dos Ensaios. É importante ressaltar que o tubo sem deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) apresentou concentricidade de 0,15 mm.

Tabela 16: Concentricidade dos tubos após ensaio de extrusão direta.

$\epsilon D_1$ (%)	CONCENTRICIDADE CP1 (mm)	CONCENTRICIDADE CP2 (mm)	CONCENTRICIDADE CP3 (mm)	MÉDIA
15%	0,22mm	0,24mm	0,25mm	0,237mm
20%	0,42mm	0,49mm	0,51mm	0,473mm
25%	0,84mm	0,86mm	0,86mm	0,853mm

É relevante destacar que à medida que a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) dos tubos aumentou, a concentricidade também aumentou. Além disso, é interessante ressaltar que, nos três corpos de prova, a concentricidade se manteve próxima entre si.

#### 5.4 ANÁLISE DE DUREZA

Após a execução do ensaio prático de extrusão direta e também realizar o dimensional dos tubos de aço SAE1010 procedeu-se o ensaio de dureza, com o principal objetivo de medir o aumento da dureza na região extrudada após variar as deformações relativas do diâmetro

externo ( $\epsilon D_1$ ). O ensaio foi realizado utilizando o durômetro Heckert apresentado na figura 31.

O tubo, sem experimentar deformações, exibiu aproximadamente 74 HRB. Observou-se um acréscimo de cerca de 10 pontos de dureza, atribuído ao encruamento resultante do processo de extrusão direta. Além disso, destacou-se a consistência na dureza dos três corpos de prova, indicando uma variação mínima. Tabela 17 apresenta os valores de dureza medidos na escala HRB.

Tabela 17: Dimensões de dureza.

$\epsilon D_1$ (%)	DUREZA 1 (HRB)	DUREZA 2 (HRB)	DUREZA 3 (HRB)	MÉDIA DE DUREZA (HRB)
0%	74	73	75	74
15%	76	80	79	78,3
20%	83	82	83	82,7
25%	83	84	83	83,3
30%	84	83	85	84

A seguir, é possível analisar graficamente o aumento da dureza dos tubos após o processo de extrusão direta na figura 53.

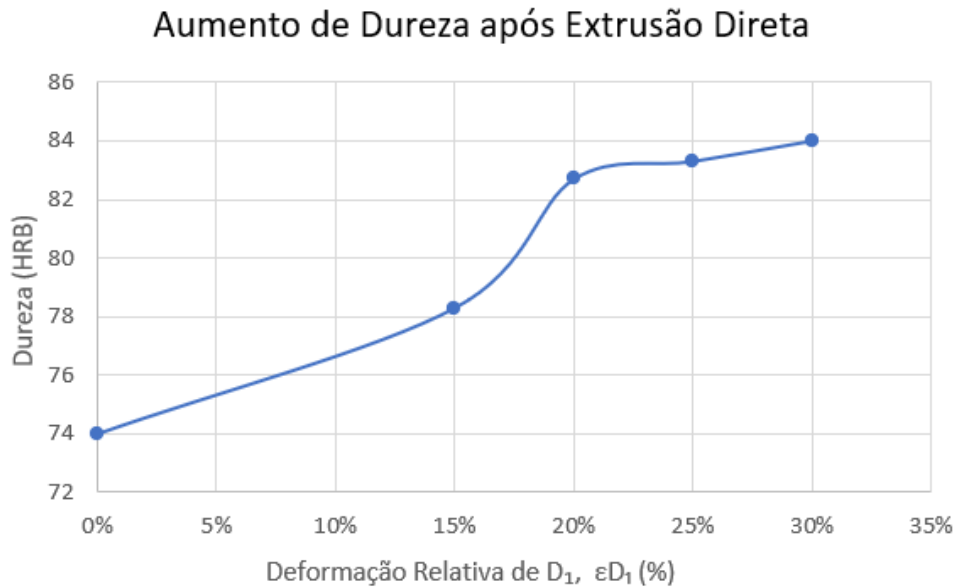


Figura 53: Aumento de dureza na região do comprimento ( $L_c$ ) após extrusão direta.

## 5.5 ANÁLISE AO ACHATAMENTO DOS TUBOS

Com o objetivo em analisar a resistência da solda nos tubos de aço SAE 1010, foi realizado o ensaio de achatamento de tubos antes e após o processo de extrusão direta. O ensaio foi realizado com as amostras do tubo inteiras conforme a figura 31, com a costura do tubo a 0° e

a 90°, ou seja, com a solda voltada para cima e também com a solda na lateral ao sentido da força aplicada. A máquina utilizada foi a máquina universal de ensaio *EMIC DL 1000* apresentada na figura 28.

#### 5.5.1 Ensaio de Achatamento de Tubos: Sem Deformação Relativa do Diâmetro Externo ( $\epsilon D_1$ )

Para realização do ensaio foi utilizado o tubo sem deformações relativas do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Observou-se que ao proceder o ensaio o corpo de prova com a solda em um ângulo de 90° ocorreu uma ruptura na área adjacente à solda. Por outro lado, ao conduzir o ensaio com a região soldada posicionada para cima, não houve ocorrência de ruptura, entretanto, foram identificadas algumas marcas de estrição na região afetada pela soldagem. (Figura 54)



Figura 54: Ensaio de achatamento sem deformações relativas do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Na sequência, procedeu-se à análise da força exigida em ambos os ensaios, com o intuito de avaliar a Força necessária para efetuar o achatamento dos tubos. Evidenciou-se uma semelhança no comportamento de ambos os Tubos, com uma Força aproximada de 30 kN sendo requerida para o ensaio de achatamento. (Figura 55)

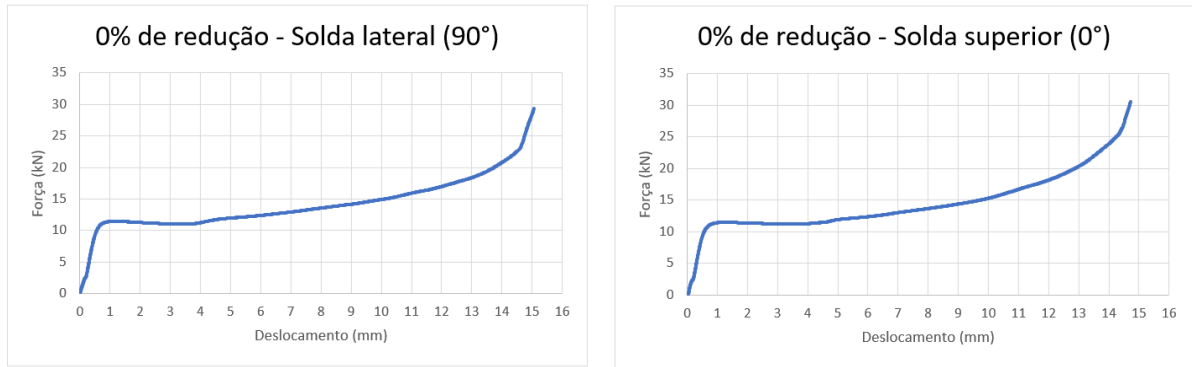


Figura 55: Força x Deslocamento – Tubo sem deformações relativas do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

### 5.5.2 Ensaio de Achatamento de Tubos: 15% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo ( $\epsilon D_1$ )

Por meio do ensaio realizado nos tubos com 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), foi observado que tanto no caso da soldagem a 90° quanto no ensaio com a região soldada posicionada voltada para cima, ocorreu ruptura na área adjacente à solda. (Figura 56)



Figura 56: Ensaio de Achatamento com 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Ao analisar as forças, constatou-se que no ensaio em que a região soldada estava na posição lateral resultou em ruptura no tubo, porém, não apresentou o momento no gráfico devido ser no final do ensaio. Por outro lado, no ensaio em que a solda voltada para cima, observou-se que o tubo rompeu após um deslocamento de 4 mm, com uma força de aproximadamente 20 kN. (Figura 57)



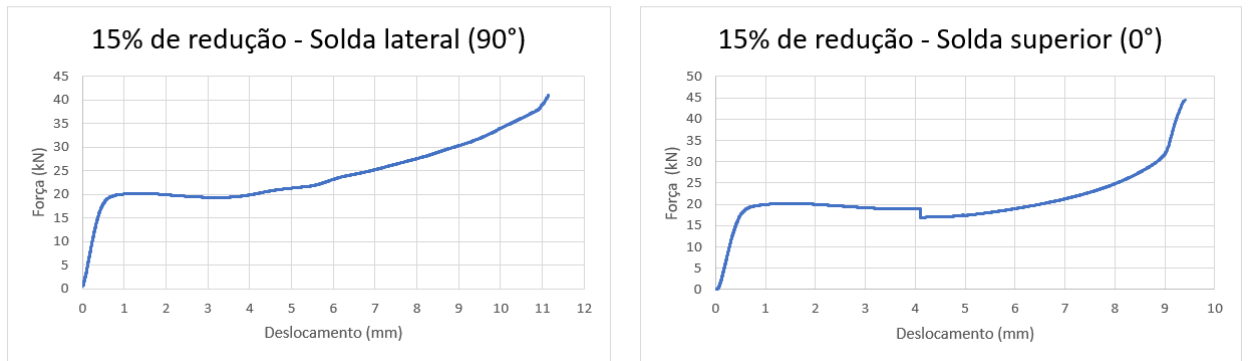


Figura 57: Força x Deslocamento – Tubo com 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

### 5.5.3 Ensaio de Achatamento de Tubos: 20% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo ( $\epsilon D_1$ )

Por meio do ensaio conduzido no tubo com redução de 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), foi evidenciado que no caso da soldagem a 90° não ocorreu ruptura na área adjacente à solda, manifestando-se somente algumas sutis marcas de estrição. No entanto, no ensaio em que a região soldada foi direcionada para cima, observou-se de fato uma ruptura na zona da região soldada. (Figura 58)



Figura 58: Ensaio de Achatamento com 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Ao analisar as forças empregadas nos ensaios, verificou-se que no teste em que a solda foi posicionada lateralmente, uma carga de 60 kN foi aplicada sem resultar em ruptura. Em contraste, o ensaio no qual a solda foi colocada na parte superior apresentou um comportamento

semelhante ao observado no teste de 15% de Deformação Relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ). Nesse cenário, houve ruptura ocorrendo em um deslocamento de cerca de 5 mm, com uma força aproximada de 20 kN. (Figura 60)

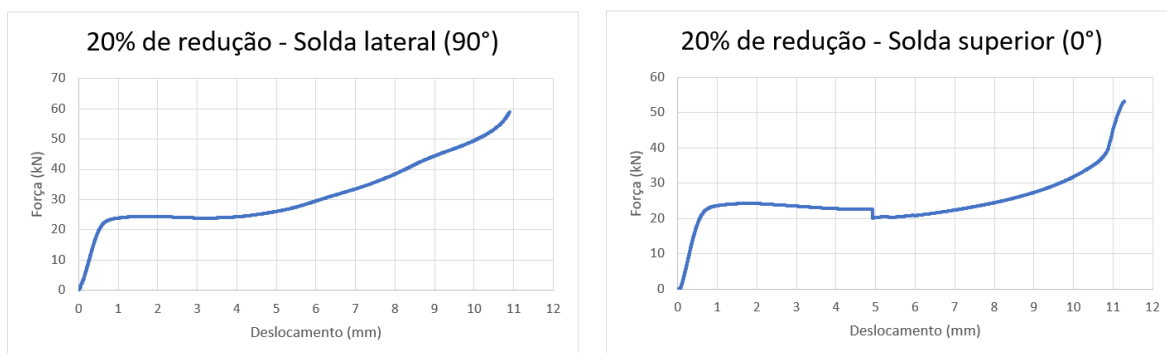


Figura 59: Força x Deslocamento – Tubo com 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

#### 5.5.4 Ensaio de Achatamento de Tubos: 25% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo ( $\epsilon D_1$ )

Mediante a realização do ensaio no tubo com uma redução de 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), constatou-se que em ambas as situações de teste não houve ocorrência de ruptura na área próxima à solda, e tampouco foram identificadas quaisquer marcas de estrição. (Figura 60)



Figura 60: Ensaio de Achatamento com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Ao analisar ambos os ensaios de achatamento dos tubos, constatou-se que tanto na soldagem na região lateral quanto na região superior não se apresentaram rupturas ou presença

de marcas de estrição. Isso ocorreu sob a aplicação de uma força aproximada de 90 kN. (Figura 61)

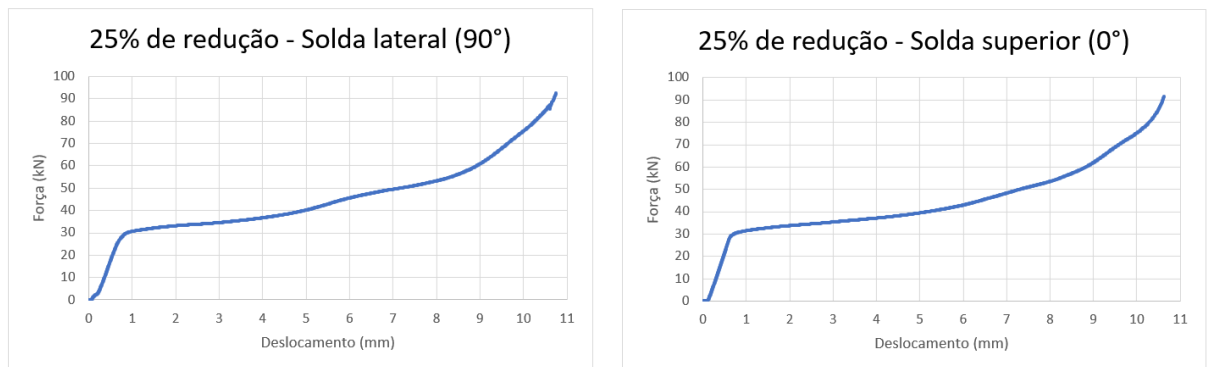


Figura 61: Força x Deslocamento - Tubo com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

### 5.5.5 Ensaio de Achatamento de Tubos: 30% de Deformação Relativa do Diâmetro Externo ( $\epsilon D_1$ )

Por meio do ensaio realizado no tubo com 30% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), evidenciou-se que em ambas as situações de teste não houve ocorrência de ruptura na região adjacente à solda, além de não terem sido observadas marcas de estrição. Conseqüentemente, foi possível notar que o comportamento do tubo apresentou notável uniformidade durante o processo de compressão, resultando no completo contato das paredes superior e inferior. (Figura 62)

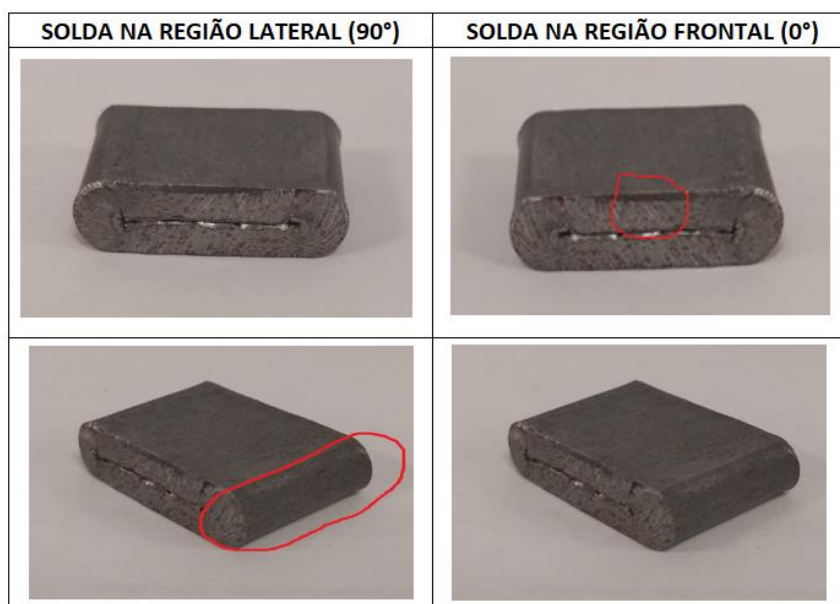


Figura 62: Ensaio de Achatamento com 30% de Deformação Relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Após a análise do comportamento dos ensaios em ambas as situações, verificou-se uma

similaridade no comportamento de ambos. Quando a solda estava posicionada na região superior, a força máxima registrada foi ligeiramente superior à força observada quando a solda estava posicionada na região lateral, para um mesmo valor de deslocamento, figura 63.

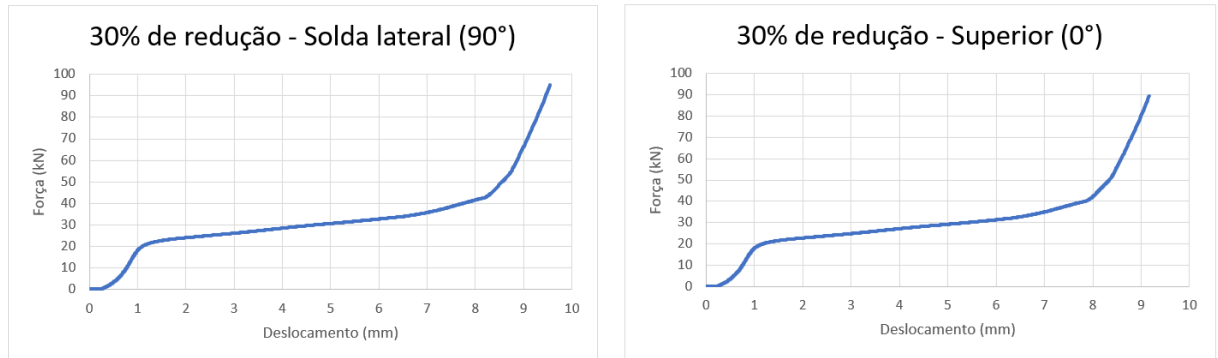


Figura 63: Força x Deslocamento - Tubo com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

## 5.6 ANÁLISE DE METALOGRAFIA

Após a execução dos ensaios anteriores foi preparado e executado o ensaio de metalografia. Este ensaio teve como objetivo principal analisar a microestrutura dos tubos de aço SAE1010 antes e após o ensaio prático de extrusão direta variando a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

Através das imagens obtidas pelo microscópio metalográfico de platina invertida, da marca *Fortel*, conforme mostrado na figura 38, foi possível observar o encruamento do material após sofrer deformações. É evidente que, em cada estágio, à medida que a taxa de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) aumentou, o material apresentou maior grau de encruamento. Este fenômeno foi confirmado pelos resultados do ensaio de dureza, indicando um aumento na dureza do material ao longo do processo.

As imagens metalográficas do tubo de aço SAE 1010, para melhor análise e interpretação foi utilizado aumento de 100X, 200X e 400X conforme as tabelas 18, 19, 20, 21 e 22.

Tabela 18: Análise metalográfica: Sem deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).







20% de ( $\epsilon D_1$ )	ZOOM 100X	ZOOM 200X	ZOOM 400X
SESSÃO TRANSVERSAL			
SESSÃO LONGITUDINAL			

Tabela 19: Análise metalográfica: 15% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).







15% de ( $\epsilon D_1$ )	ZOOM 100X	ZOOM 200X	ZOOM 400X
SESSÃO TRANSVERSAL			
SESSÃO LONGITUDINAL			

Tabela 20: Análise metalográfica: 20% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).



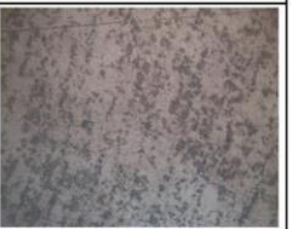



20% de ( $\epsilon D_1$ )	ZOOM 100X	ZOOM 200X	ZOOM 400X
SESSÃO TRANSVERSAL			
SESSÃO LONGITUDINAL			

Tabela 21: Análise metalográfica: 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

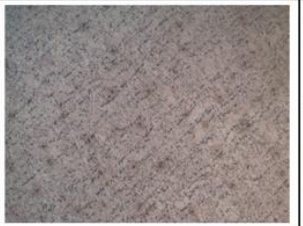


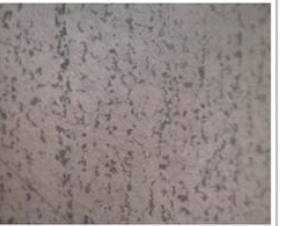






25% de ( $\epsilon D_1$ )	ZOOM 100X	ZOOM 200X	ZOOM 400X
SESSÃO TRANSVERSAL			
SESSÃO LONGITUDINAL			

Tabela 22: Análise metalográfica: 30% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ).

30% de ( $\epsilon D_1$ )	ZOOM 100X	ZOOM 200X	ZOOM 400X
SESSÃO TRANSVERSAL			
SESSÃO LONGITUDINAL			

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados de ensaios experimentais, promovendo uma comparação meticulosa com os valores derivados da simulação computacional. Essa análise aprofundada não apenas aprimora a compreensão do tema, mas também desempenha um papel crucial na orientação para a definição conclusiva dos resultados obtidos nesta pesquisa.

### 6.1 CURVA DE RESISTÊNCIA A DEFORMAÇÃO (kw) VERSUS CURVA DE ESCOAMENTO (kf)

A caracterização preliminar evidenciou que na utilização de tubos de aço SAE1010 resultou em uma curva de resistência à deformação (kw) similar à curva de escoamento (kf) do aço SAE1010 de Tschatsch.

Ao comparar as curvas de resistência a deformação (kw) dos tubos de Aço SAE1010 e a curva de escoamento (kf) por Tschatsch, foi observada uma notável semelhança nos valores. A tensão de escoamento inicial (kfo), representando a tensão para iniciar deformações plásticas, foi próxima em ambos os conjuntos de dados, cerca de 380 MPa com deformação verdadeira ( $\varphi$ ) de 0%. À medida que a deformação avança para 10%, ambas as curvas mantêm tensões (kw) e (kf) em aproximadamente 450 MPa, indicando um comportamento consistente do material durante esse intervalo de deformação. Essa uniformidade oferece informações valiosas sobre o comportamento mecânico do aço SAE1010 nessas condições específicas. (Figura 64)

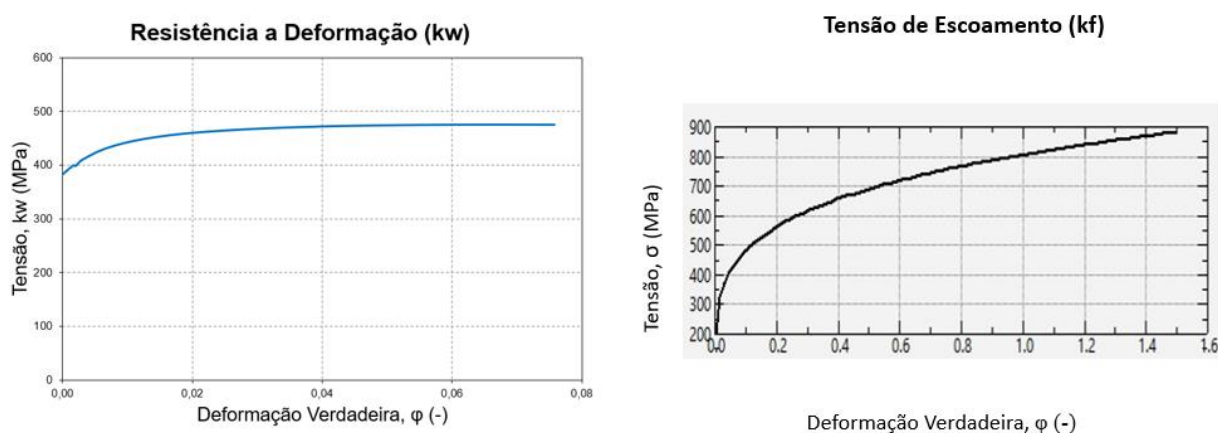


Figura 64: Comparativo entre curva resistência a deformação (kw) e curva tensão de escoamento (Kf).

Esses resultados ressaltam a adequação dos tubos de aço SAE1010 para processos de extrusão direta a frio e também que é possível utilizar o Ensaio de Compressão como método

de análise para materiais de perfil Tubular além de apresentar a similaridade de resultados obtidos.

Ainda, a fim de comparar o ensaio simulado com o ensaio prático, foi criado um gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm). Nele, os dados do ensaio prático são apresentados na cor **AZUL** e os dados simulados na cor **AMARELA**, conforme figura 65. Verifica-se que os dados encontrados no ensaio prático se assemelham aos previstos pela simulação. Confere-se assim a importância anteriormente apresentada da realização de simulações para antever a necessidade de determinados recursos e poupar tempo em aplicações práticas, como na indústria.

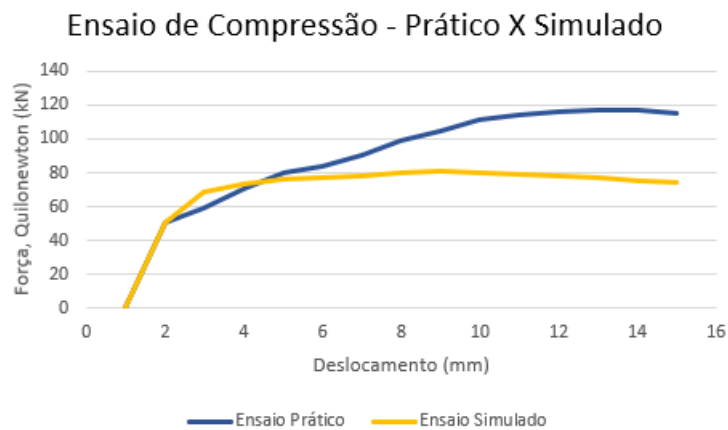


Figura 65: Ensaio de compressão: Prático x Simulado.

## 6.2 DEFORMAÇÃO VERDADEIRA ( $\varphi$ )

Ao modificar a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), observa-se uma variação correspondente na deformação verdadeira ( $\varphi$ ). O aumento da deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) está associado a um aumento não linear na deformação verdadeira ( $\varphi$ ). Iniciando com zero deformações, esse aumento progressivo atinge 35% na deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), resultando em uma deformação verdadeira ( $\varphi$ ) de 0,498. Esse comportamento não linear destaca a resposta específica do material à deformação e é crucial para compreender o seu desempenho em diferentes condições de carga. (Figura 66)



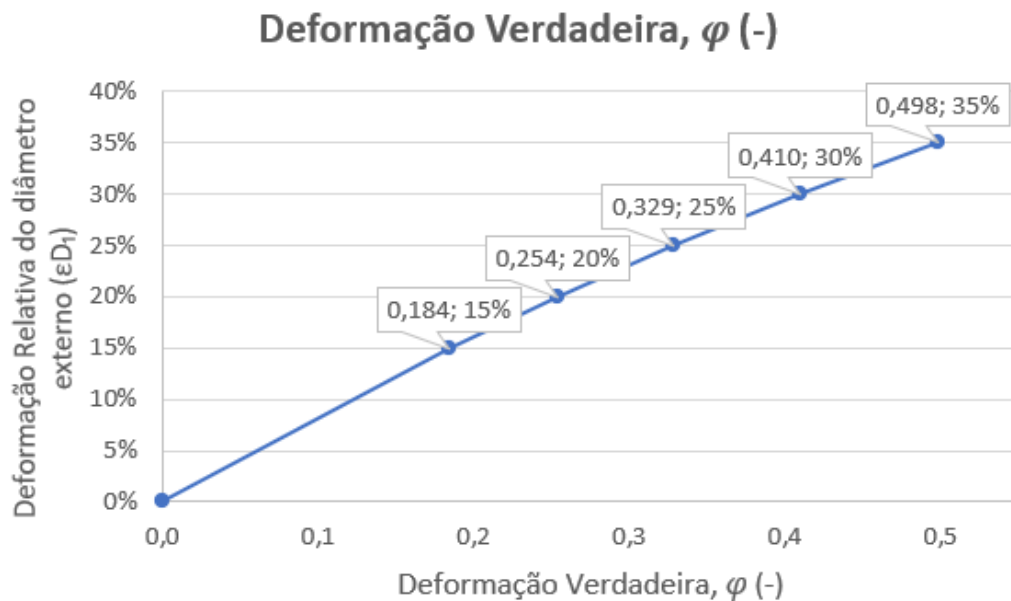


Figura 66: Deformação verdadeira,  $\varphi$  (-).

### 6.3 FORÇA DE EXTRUSÃO ( $F_e$ )

Durante os ensaios, observou-se uma pequena discrepância entre as forças de extrusão ( $F_e$ ) calculadas e simuladas, embora ambas tenham uma tendência de aumento com o aumento da deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon_{D1}$ ). No ensaio prático, a medição da força de extrusão ( $F_e$ ) não foi possível devido à falta de uma célula de carga na extrusora. Na simulação computacional, a força de extrusão ( $F_e$ ) máxima atingiu 46,483 kN, enquanto no cálculo analítico, o máximo foi de 32,76 kN. No entanto, é importante ressaltar que, para uma produção fabril real, geralmente se recomenda utilizar apenas cerca de 70% da capacidade da máquina para evitar danos em situações de picos de força não planejados. (Figura 67).

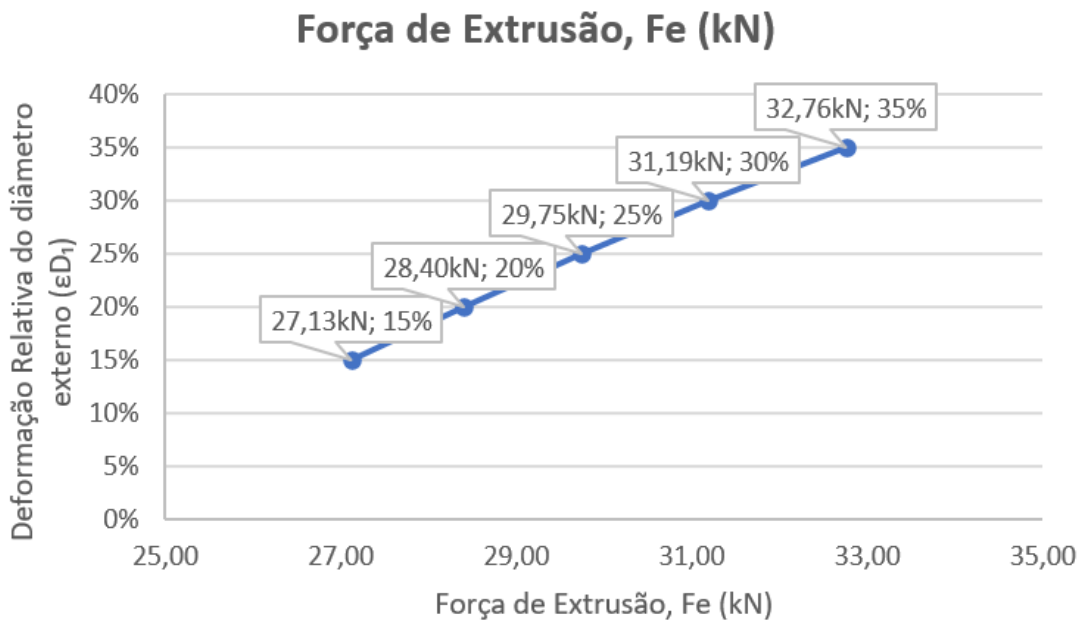


Figura 67: Força de extrusão (Fe) – Cálculo Analítico.

#### 6.4 MÁXIMA DEFORMAÇÃO RELATIVA DO DIÂMETRO EXTERNO ( $\epsilon D_1$ )

Através dos cálculos analíticos, simulações computacionais e ensaios práticos, constatou-se a viabilidade de extrudar com segurança tubos de aço SAE 1010, alcançando uma deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 22,5%. O ensaio prático permitiu a execução do processo de extrusão com 25% de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) antes da ocorrência da flambagem. No entanto, recomenda-se limitar a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) em 22,5% para eliminar riscos de refugos em potenciais produções em massa. A figura 68 apresenta os resultados obtidos através da simulação computacional e também do ensaio prático.

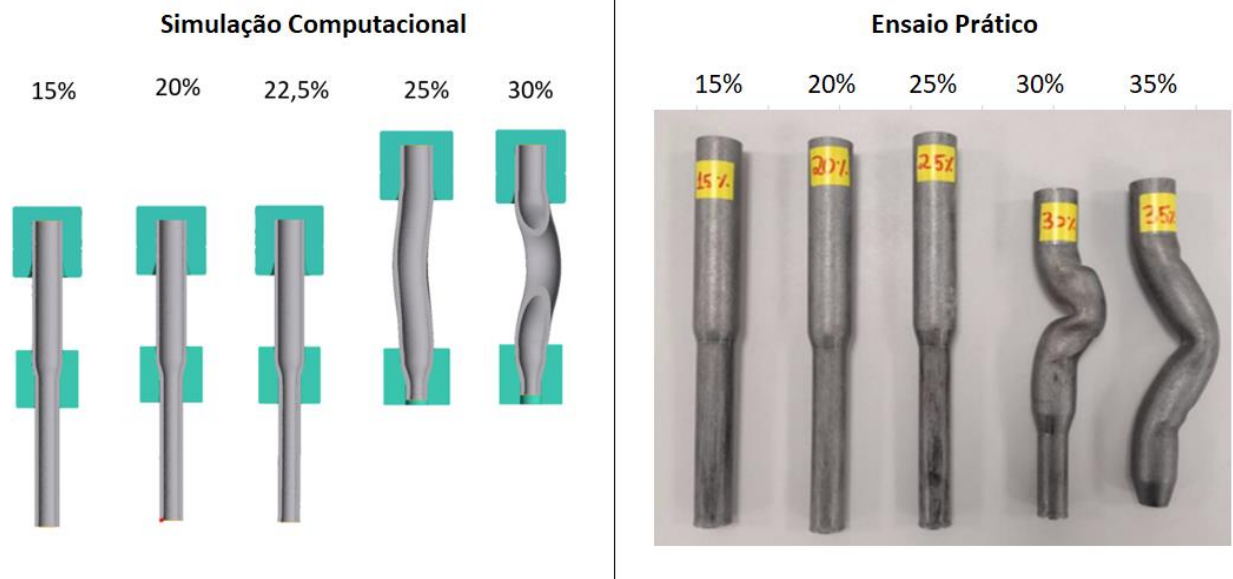


Figura 68: Comparativos entre resultados obtidos pela Simulação Computacional e pelo Ensaio Prático.

### 6.5 DIÂMETRO EXTERNO ( $D_1$ ) APÓS EXTRUSÃO DIRETA

Por meio tanto da simulação computacional quanto do ensaio prático, constatou-se que os tubos, ao passarem por deformações devido à sua condição vazada, não reproduzem com precisão o diâmetro do canal de calibração da matriz. O diâmetro externo ( $D_1$ ) dos tubos registra uma redução de cerca de 2,3% em comparação com o diâmetro do Canal de calibração da matriz. (Figura 69).

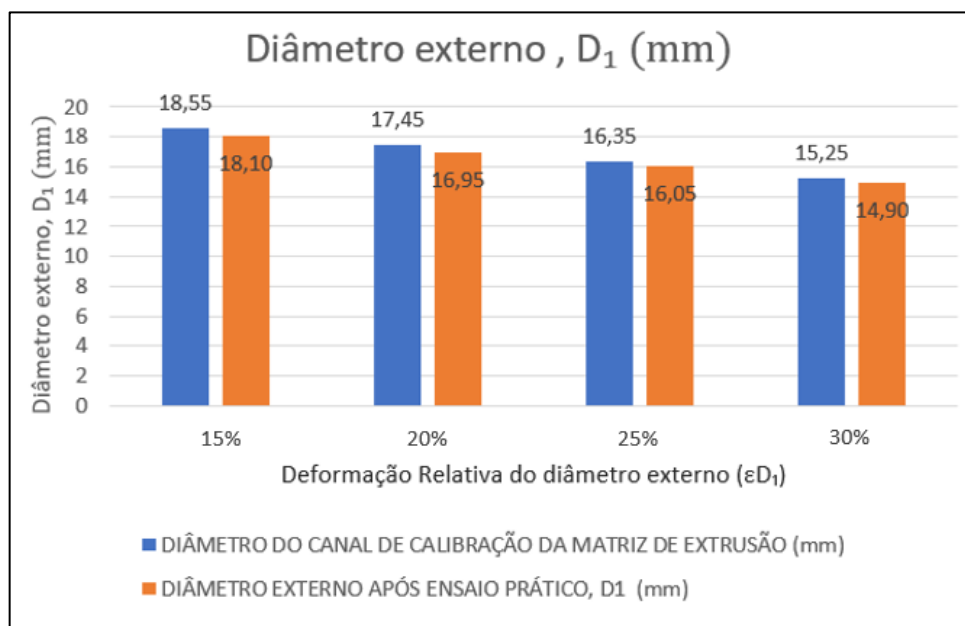


Figura 69: Diâmetro Externo ( $D_1$ ) após Extrusão Direta.

## 6.6 RESISTÊNCIA NA PAREDE DO TUBO

Observou-se uma variação na parede do tubo, indicando que o aumento na deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon_{D_1}$ ) resulta em variações e acréscimos na espessura da parede, conferindo maior resistência ao achatamento do tubo, comprovado através do ensaio de compressão lateral. A figura 70 apresenta o ganho de resistência mecânica tanto com a solda do tubo voltada a  $0^\circ$  quanto a  $90^\circ$ .

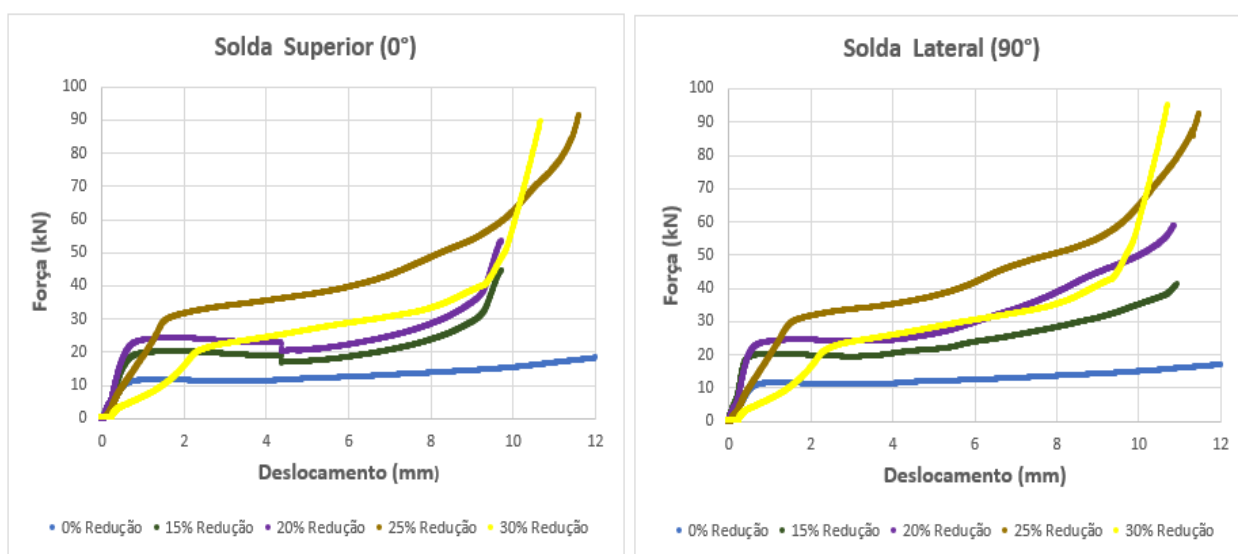


Figura 70: Comparativos de aumento da resistência ao achatamento – Ensaio de compressão lateral  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

## 6.7 AUMENTO DA DUREZA

Mediante a utilização de um durômetro para mensurar a dureza na escala HRB e simulações computacionais, foi possível analisar o incremento de dureza decorrente do encruamento durante o processo de extrusão direta de tubos de aço SAE1010. Inicialmente, o tubo apresentava uma dureza de 74 HRB, incrementando progressivamente a cada etapa de extrusão até atingir 82 HRB. Em outras palavras, o processo de extrusão, mediante encruamento, promoveu um aumento na dureza dos tubos, resultando em consequente elevação da resistência mecânica. Entretanto, ao empregar o software Qform, realizou-se uma comparação entre o aumento real de dureza e o aumento simulado por meio da simulação computacional. Os resultados revelaram um comportamento mecânico semelhante, com desvios padrões insignificantes. Considerando a escala Hockel, que por sua vez é a mais utilizada na indústria metalúrgica, foi possível perceber um aumento de dureza conforme o aumento de deformação.

A figura 71 representa graficamente os valores de dureza obtidos no ensaio prático (marcados como **X**) e os valores de dureza obtidos por meio da simulação computacional (marcados como **O**).

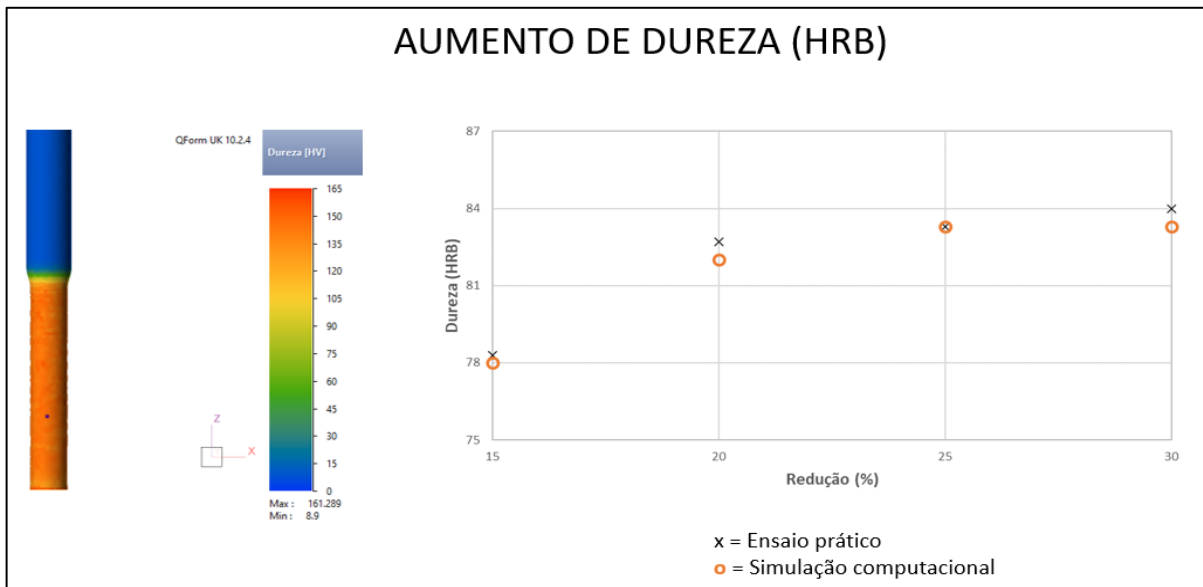


Figura 71: Comparativo ao aumento de dureza entre ensaio prático e simulação computacional.

Observou-se que, na deformação relativa máxima sem ocorrência de flambagem, foi possível obter um aumento de 13% na dureza do tubo de aço SAE1010. Também foi possível analisar via ensaio metalográfico, o fenômeno de encruamento devido aos esforços de compressão gerados pelo processo de extrusão direta a frio. Esse processo proporciona peças com significativo incremento na resistência mecânica e dureza, porém com diminuição na ductibilidade.

## 7 CONCLUSÕES

O estudo conduzido nesta pesquisa desempenhou um papel fundamental ao proporcionar um entendimento aprofundado do processo de extrusão direta a Frio em tubos de aço SAE1010, uma vez, que esse material carece de pesquisas no Brasil. A seguir, apresentam-se as principais conclusões que foram derivadas ao longo desses anos de pesquisa.

Dentre os diversos ensaios disponíveis para obter informações específicas sobre um material, o ensaio de compressão destaca-se como uma excelente opção para construir a curva de resistência do material (kw).

Foi viável estabelecer o valor máximo de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) de 22,5%, evitando a ocorrência do defeito de flambagem no corpo, o que contribuiu significativamente para evitar possíveis refugos e danos às peças durante o processo, tornando-o mais confiável e produtivo, especialmente em lotes de produção em grande escala.

No que se refere à força, observa-se um aumento na força de extrusão ( $F_e$ ) à medida que a proporção de deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) aumenta. Simultaneamente, houve um aumento na dureza dos tubos conforme a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ) aumentava, com um acréscimo de aproximadamente 13%. Também foi notado um aumento na resistência da solda e na parede do tubo, indicado pela necessidade de uma quantidade maior de força para achatar os tubos após o processo de extrusão. Estes efeitos são atribuídos ao fenômeno de encruamento, o que proporciona a possibilidade de eliminar um eventual processo de têmpera para aumentar a resistência mecânica da peça em algumas aplicações específicas.

Ao variar a deformação relativa do diâmetro externo ( $\epsilon D_1$ ), foi observado que ocorrem variações na espessura da parede do tubo ( $s$ ) e também no diâmetro externo ( $D_1$ ). Deformações mais acentuadas resultam em um maior aumento na espessura da parede do tubo, promovendo, assim, um incremento na resistência mecânica tanto no volume extrudado quanto na região da costura de solda do tubo. Este fenômeno culmina na produção de uma peça com propriedades mecânicas aprimoradas.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos pelo software Qform apresentaram uma notável proximidade com os dados coletados nos ensaios práticos, evidenciando-se como uma excelente alternativa para antecipar esses fenômenos.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Abaixo, são descritas algumas análises que podem ser consideradas para trabalhos futuros.

- Analisar o comparativo para flambagem entre corpos maciços e corpos tubulares;
- Analisar as tensões principais geradas no processo de extrusão sem mandril para tubos;
- Traçar e definir curvas de resistência a deformação (kw) para as os corpos após a extrusão, em especial para o diâmetro com maior percentual deformação.;
- Estudar o comportamento variando as temperaturas de trabalho “a frio, a morno e a quente”
- Analisar o efeito do ângulo do cône de trabalho da matriz;
- Avaliar o comportamento utilizando mandril no interior do tubo;

## REFERÊNCIAS


- ASTM. **E3 – 11**. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2017.
- ASTM. **E9 – 09**. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. 2018.
- ASTM. **E18 - 22**. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. 2022.
- BEER, F.P., JOHNSTON, JR., E.R. **Resistência dos Materiais**, 3.º Ed., Makron Books, 1989.
- BILLIGMANN, J., FELDMANN, H. D. **Estampado y Prensado à Máquina**. 2ª edição. Editora Reverté. Espanha. Book. 1979.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução**. Vol. 5. p 189 – 250. Editora LTC. Book. 2002.
- CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação – Mecânica dos Materiais**. 2ª Ed. São Paulo: Artliber Editora. Book. 2015.
- COLPAERT, H., SILVA, A. L. V. da C. e S. - **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4º Ed. Editora Edgard Blucher. Book. 2008.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Ed: Guanabara, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Book. 1981.
- FILHO, E. B., *et al.* **Conformação Plástica dos Metais**. 6ª ed. p. 383. Book. São Paulo 2011.
- FREDEL, M. C., ORTEGA, P., BASTOS, E. **Propriedades Mecânicas – Ensaio Fundamentais**. Vol. 1. Certmat Cerâmica. Book. 2015.
- HALLIDAY, D., RESNICK, D. **Fundamentos da Física: Vol. 1 – Mecânica**. 8ª Ed. Rio de Janeiro – RJ. LTC. Book. 2008.
- HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 3.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos. Book. 2000.
- MARCONDES, P. **Propriedades Mecânicas Fundamentais**. Apostila. Laboratório de Conformação Mecânica – DEMEC/UFPR. 2015.
- MARTINS, C. A. **Introdução ao Estudo da Flambagem de Barras**. Mecânica dos Sólidos II. Apostila. 2020.
- MELCONIAN, S. **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**. 20ª edição. São Paulo: Editora Érica, 2012.



- MORO, N. **Conformação Mecânica I – Generalidades, Laminação e Forjamento**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. 2007.
- NORMA REGULAMENTADORA. **NR – 12: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. 2022.
- ROCHA, O. F. L. da. **Conformação Mecânica**. Belém: IFPA. Apostila. 2012.
- ROHDE, R. A. **Metalografia: Preparação de amostras**. Apostila LEMM – Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais. 2010.
- SANTOS, L. H. dos. **Processos de Conformação a Frio – Parte 2: Curvas de Escoamento**. 2021.
- SCHAEFFER, L. **Forjamento - Introdução ao Processo**. Ed: Imprensa Livre, Porto Alegre, RS, Brasil. Book. 2001.
- SCHAEFFER, L. (2016). **Manufatura por Conformação Mecânica**. Ed Imprensa Livre, PORTO ALEGRE – RS. Book. Brasil.
- SIMO, J. C., HUGUES, T. J. R. **Computational Inelasticity**. p. 389. Spring. 1998.
- SOARES, W., SCHAEFFER, L. **Análise do Processo de Extrusão Direta de Tubos de aço SAE 1010**. 26ª Conferência Internacional de Forjamento – 42º SENAFOR. Brasil. 2023
- SONMEZ, H. **Research on The Effect of Lubrification on Extrusion Load in Direct Extrusion**. Artigo. Turkey. 1999.
- SUSKI, C. A. S. **Conformação Mecânica de Múltiplos Estágio**. Florianópolis - IFSC, 2014.
- TRESSIA, G., *et al.* Influência da Velocidade de Extrusão na Homogeneidade Microestrutural do Processo de Conformação Contínua. **TMN – Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. Vol. 15. n° 2. p. 182 – 188. 2018.
- TSCHAETSCH, H. **Metal Forming Practise: Processes, Machines, Tools**. BOOK.Spring. 2006.
- VAN VLACK, L. H. **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ed. Campus. Book. 2003.
- ZOLIN, I. **Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas**. 3ª Ed. Editora: E. TEC. Apostila. Brasil. 2011.

## ANEXOS

### Anexo 1: Certificado de qualidade – Fornecido pela empresa Viemar Automotive.

 <p>desde 1972 <b>Mercante</b> Tubos Laminados e Trefilados • Brilhosos • Peças</p> <p>Rua Emília Golin, 436- Jardim Aracília - Guarulhos / SP</p> <p>Telefone: +55 11 2147-7000 / +55 11 2147-7052</p>		CLIENTE / CUSTOMER:				Nº CERTIFICADO / CERTIFICATE NUMBER:			
		VIEMAR INDUSTRIA				2706 /21			
		NORMA TÉCNICA / SPECIFICATION				NOTA FISCAL / INVOICE			
		DIN 2393 / SAE 1008/10				82748			
QUANTIDADE / QUANTITY				CÓDIGO CLIENTE / CUSTOMER CODE		ORDEM DE PRODUÇÃO / PRODUCTION ORDER		DATA / DATE	
PESO/WEIGHT (Kg)		1535		*		116075		22/07/2021	
PEÇAS/PARTS (pc)		385		*		PRODUTO / PRODUCT		CÓDIGO DESENHO / CODE DESIGN	
TUBO DE AÇO TREFILADO ESPECIAL R/R		21,80X2,35							

LOTE / BATCH	CORRIDA / HEAT	ESPECIFICADO / SPECIFIED (%)											
		C	Min	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	V	
74697	3875607	≤ 0,13	0,30 - 0,60	≤ 0,030	≤ 0,050	*	*	*	*	*	*	*	
		ENCONTRADO / FOUND (%)											
		0,13	0,5100	0,0140	0,0080	0,0190	0,0050	0,0210	0,0010	0,0060	0,0380	→ *	

ENSAIOS MECANICOS / DESTRUTIVOS / MECHANICAL / DESTRUCTIVE TESTS											
	ESTADO DE FORNECIMENTO / STATE OF SUPPLY	DUREZA / HARDNESS	LR / TS (Mpa)	LE / YE (Mpa)	AL / STR (%)	EXPANSÃO / EXPANSION (%)	ACHATAMENTO / FLATTENING (%)	MAGNAFLUX	EDDYCURRENT	HIDROSTÁTICO / HYDROSTATIC	
										Pressão	Tempo
ESPECIFICADO / SPECIFIED	BKW	*	≥ 410	*	*	*	*	*			
ENCONTRADO / FOUND	BKW	80	510	383	16	*	*	*			

DIMENSIONAL							
ITEM	ESPECIFICADO / SPECIFIED	LIMITES / LIMITS	RESULTADO / RESULT	ITEM	ESPECIFICADO / SPECIFIED	LIMITES / LIMITS	RESULTADO / RESULT
1	Ø EXT 21,80	/ + 0,20	21,89 - 21,95	11			
2	Ø INT 17,10	± 0,10	17,05 - 17,08	12			
3	2,35	*	*	13			
4	COMPR. 3000	6000	3500 - 3900	14			
5				15			
6				16			
7				17			
8				18			
9				19			
10				20			

<p>Observações / Comments:</p>	<p style="font-size: small;">Certificamos que as características químicas encontram-se conforme o certificado de origem das usinas siderúrgicas</p> <p style="font-size: small;">We hereby certify that the chemical characteristics make the raw materials are related as certificate of origin of the steelworks</p>
	<p><b>Edmilson A. Santos</b></p> <p>Controle de Qualidade</p> <p style="font-size: x-small;">Quality Control</p> <p style="font-size: x-small;">Assinatura eletrônica</p> <p style="font-size: x-small;">Electronic Signature</p>

FM 054 - Rev. 04 - 20/02/2020

Anexo 2: Acrílico Auto Polimerizante e Resina Acrílica.

