

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**TIAGO NUNES CHALINSKI**

**CONFORMAÇÃO A FRIO EM AÇOS ENDURECIDOS TERMICAMENTE**

**São Leopoldo**

**2021**

TIAGO NUNES CHALINSKI

CONFORMAÇÃO A FRIO DE AÇOS ENDURECIDOS TERMICAMENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Ms. Fabiano da Silva Brites

São Leopoldo

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em especial aos meus pais, Renato Chalinski e Rosiane Nunes Chalinski por toda a dedicação, pela minha educação e pela formação como cidadão e me encorajando a enfrentar os obstáculos encontrados no caminho até aqui.

A minha esposa, Patrícia Jachetti Chalinski, por apoiar-me e incentivar-me a continuar quando estava desanimado durante toda a graduação e na execução deste trabalho.

Agradeço minha irmã Renata Chalinski, pela dedicação, durante a graduação aconselhando-me e apoiando nos dias de provas, e no meio da madrugada preparava café, para me manter acordado e motivado a estudar.

Agradeço de forma especial meus padrinhos Eliane e Gilson (infelizmente vítima do Covid), que me apoiaram a chegar até aqui. “Missão cumprida Dindo”!

Agradeço de forma especial, meu sogro e minha sogra, Egomar Jachetti e Neiva Raquel Jaquetti, por todo apoio durante essa trajetória e pelo incentivo e conselhos durante a minha caminhada até aqui.

Agradeço ao meu orientador Prof. Ms. Fabiano Brites, pelo ensinamento durante a cadeira de conformação, pelo acolhimento da minha proposta nas conversas antes do início das aulas, e por sua paciência de ensinar e orientar.

Ao Eng. Luiz Roberto Coutinho Manhães, por toda paciência em me transmitir todo o seu conhecimento e experiência que serviu de base para a escolha do tema.

Agradeço a empresa Viemar Automotive, por todos os recursos disponibilizados tais como softwares, equipamentos, ferramentas, materiais para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Roger Freitas e Eng. Gustavo Meneghello por me acolher e investir na escolha do meu tema e se colocar à disposição para me ajudar no que for preciso.



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento do processo de forjamento de um pino de ligação aplicado na suspensão de veículos de médio porte, fabricado em aço micro ligado no material DIN 41Cr4, com diâmetro de  $\varnothing 19,05$  mm, cisalhado e substituindo o processo de alívio de tensão por um processo de tratamento térmico a uma dureza de 24 a 30 HRc, obtendo resultados teóricos (analítico e simulação), validando-os na prática, através de ensaios físicos, ambos com um grau de deformação de  $\varphi_a = 0,78$ . O preenchimento das cavidades, as forças durante o processo de forjamento e análise do ferramental de forjamento foi obtido através de simulação pelo método de elementos finitos no Eesy-2-form. A análise experimental foi obtida através do teste de 20 corpos de prova. Após os ensaios de compressão, os dados obtidos foram tratados e aplicados na equação de Holloman para a obtenção da tensão de escoamento, possibilitando a realização dos cálculos da forma convencional de extrusão confinada e recalque interrelacionando as forças necessárias para o forjamento. Para a comprovação de preenchimento total da cavidade, foi fabricado o ferramental e realizado o processo de extrusão confinada, que permite uma redução aproximada de 25% do diâmetro inicial em uma prensa hidráulica de 2000 kN, da marca Menegotto. Os métodos teóricos e a simulação apresentam uma convergência entre si de 89%. Porém se observou, o método teórico e a prática apresentaram uma convergência de 93%. Através das curvas de Holloman, identificou-se as expressões que descrevem o comportamento do material sem tratamento térmico e com tratamento térmico, representando um impacto de 27% na tensão de escoamento.

**Palavras-chave:** Forjamento, Extrusão Confinada, Eesy2Form, Simulação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de deformação plástica: escorregamento e maclação.....	16
Figura 2 - Diagramas de tensão versus deformação de engenharia verdadeira para um aço dúctil. ....	17
Figura 3 - Células unitárias representadas na forma de esferas atômicas tangentes, esferas atômicas separadas.....	18
Figura 4 - Soluções sólidas substitucional e intersticial.....	19
Figura 5 - Defeitos pontuais, (a) lacuna; (b) intersticial; (c) átomo de impureza.....	20
Figura 6 - Discordância de cunha.....	21
Figura 7 - Modificações estruturais e das propriedades mecânicas na recuperação, recristalização e crescimento do grão (curvas ilustrativas das tendências). ....	22
Figura 8 - Gráfico simplificado do processo de tratamento térmico.....	24
Figura 9 - Diagrama de equilíbrio Fe-C .....	25
Figura 10 - Diagrama Fe-C ilustrando as fases conforme temperatura versus teor de carbono. ....	26
Figura 11 - Curvas TTT – Temperatura, Tempo e Transformação.....	27
Figura 12 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de esferoidização	28
Figura 13 - Microestrutura de um aço esferoidizado .....	28
Figura 14 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de recozimento ...	29
Figura 15 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de normalização..	30
Figura 16 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de recozimento ...	31
Figura 17 - Constância do Volume .....	32
Figura 18 - Gráfico de tensão e deformação utilizados para obtenção das constantes “ $\sigma_k$ ” e “n”.....	35
Figura 19 - Gráfico de tensão versus deformação verdadeira e a de engenharia.....	35
Figura 20 - Tipos de extrusão: (a) Extrusão direta livre; (b) Extrusão direta .....	38
Figura 21 - Critério para a obtenção das dimensões da matriz na extrusão confinada. ....	42
Figura 22 - Representação de recalque livre.....	42
Figura 23 - Representação da rugosidade em nível microscópico.....	43
Figura 24 - Forças presentes no deslizamento de um corpo.....	44
Figura 25 - Tipos de lubrificação hidrodinâmica .....	45
Figura 26 - Critérios de dimensionamento de matriz para extrusão confinada.....	46

Figura 27 - Matrizes fraturadas: a) Fratura longitudinal; b) Fratura radial. ....	47
Figura 28 - Anéis de contração em matriz de extrusão, com os respectivos materiais e durezas.....	49
Figura 29 - Representação da distribuição de tensão: (a) tubo de parede espessa e (b) tubo encarcado.....	50
Figura 30 - Formas construtivas para matrizes: (a) Ponto de concentração de tensão; (b) Matriz seccionada longitudinalmente; (c) Matriz seccionada perpendicularmente.	50
Figura 31 - Ilustração do software Eesy-2-form.....	52
Figura 32 - Tela inicial do Eesy-2-Form.....	53
Figura 33 - Preparação do perfil do <i>blank</i> , no Eesy-2-form .....	53
Figura 34 - Tela de definição da temperatura de trabalho.....	54
Figura 35 - Aba FERRAMENTAS, no Eesy-2-Form .....	54
Figura 36 - Aba <i>REMESHING</i> , no Eesy-2-Form .....	55
Figura 37 - Aba MATERIAL, no Eesy-2-Form .....	55
Figura 38 - Aba DADOS DE COMANDO, no Eesy-2-form .....	56
Figura 39 - Aba, RESULTADOS, no Eesy-2-form .....	56
Figura 40 - Fluxograma dos ensaios e procedimentos de pesquisa .....	57
Figura 41 - Projeto do produto forjado (dimensões em “mm”).....	58
Figura 42 - Perfil de dureza nos corpos de prova, I, II e III sem tratamento térmico. ..	59
Figura 43 - Perfil de dureza nos corpos de prova, I, II e III com tratamento térmico. ..	59
Figura 44 - Durômetro Microtest 737.....	60
Figura 45 - Durômetro Heckert.....	61
Figura 46 - Amostras I, II, III e IV sem tratamento térmico, e amostras V, VI, VII e VIII, com tratamento térmico, embutidas e polidas .....	62
Figura 47 - Microscópio OLYMPUS.....	62
Figura 48 - Corpo de prova para ensaio de compressão (dimensões em “mm”) .....	63
Figura 49 - Corpos de Prova de compressão, material sem tratamento térmico, da esquerda para direita I, II, III, IV e V;.....	64
Figura 50 - Corpos de Prova de compressão, material com tratamento térmico, da esquerda para direita I, II, III, IV e V;.....	64
Figura 51 - Máquina de ensaios universal – EMIC .....	65
Figura 52 - Desenho representativo identificando a redução (dimensões em “mm”) ..	66
Figura 53 - Modelamento tridimensional da matriz em Solidworks 2019.....	67
Figura 54 - Análise de elementos finitos no Software Eesy-2-form V5.53.....	68

Figura 55 - Projeto final em 3D da matriz para forjamento .....	68
Figura 56 - Torno NARDINI – NODUS ND 325 .....	71
Figura 57 - Torno CNC Doosan Lynx 220 LC.....	72
Figura 58 - Estação de polimento.....	73
Figura 59 - Linha de tratamento de superfícies – Viemar Automotive .....	74
Figura 60 - Ferramental de Forjamento.....	75
Figura 61 - Prensa hidráulica Menegotto 2000kN .....	76
Figura 62 - Gráfico de tensão versus deformação verdadeira com superposição das cinco curvas retiradas dos ensaios e a curva média dos corpos de prova sem ToTo .....	84
Figura 63 - Gráfico de tensão versus deformação verdadeira com superposição das cinco curvas retiradas dos ensaios e a curva média dos corpos de prova com ToTo .....	84
Figura 64 - Curva de tensão versus deformação do Aço PL41 – sem tratamento térmico.....	85
Figura 65 - Curva de tensão versus deformação do Aço PL41 – com ToTo .....	86
Figura 66 - Parâmetros da 1ª simulação de encarçamento do Eesy-2-Form V5.53	87
Figura 67 - Tensão tangencial na matriz inferior na 1º simulação de encarçamento no Eesy-2-form V 5.53.....	87
Figura 68 - Parâmetros da 2º simulação de encarçamento no Eesy-2-form V5.53 .....	88
Figura 69 - Tensão tangencial na matriz inferior .....	89
Figura 70 - Gráfico comparativo entre a força de recalque versus força de extrusão .	89
Figura 71 - Análise de preenchimento da matriz Inferior .....	90
Figura 72 - Ensaio não destrutivo de líquido penetrante (Amostra com ToTo) .....	92
Figura 73 - Amostras forjadas a frio (em cima amostras sem ToTo, abaixo amostras forjadas com ToTo.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características pela estrutura geométrica à células unitárias. ....	19
Tabela 2 - Coeficiente de resistência “ $\sigma_k$ ” e encruamento “n” .....	36
Tabela 3 - Classificação do processo em função da temperatura homóloga .....	37
Tabela 4 - Classificação dos processos de conformação: processos e produtos .....	37
Tabela 5 - Classificação qualitativa de aços para trabalho a frio.....	39
Tabela 6 - Limitações de deformação para os processos a frio de recalque, extrusão direta livre, extrusão direta confinada e extrusão indireta. ....	41
Tabela 7 - Valores referenciais de atrito para o processo de extrusão a frio.....	45
Tabela 8 - Diretrizes para quantidade de anéis de encarcamento .....	48
Tabela 9 - Redução de área e identificação da redução .....	66
Tabela 10 - Parâmetros da simulação de forjamento .....	67
Tabela 11 - Tabela de parâmetros e cálculos da força de extrusão .....	69
Tabela 12 - Tabela de parâmetros e cálculo das forças de recalque .....	70
Tabela 13 - Ensaio de dureza nos corpos de prova sem ToTo .....	78
Tabela 14 - Ensaio de dureza nos corpos de prova com ToTo .....	79
Tabela 15 - Metalografia de 4 amostras, Aço PL 41 (DIN 41Cr4), ataque nital 10% sem tratamento térmico.....	80
Tabela 16 - Metalografia de 4 amostras, Aço PL 41 (DIN 41Cr4), ataque nital 10% com tratamento térmico.....	81
Tabela 17 - Comparação entre resultados (Simulação, Teoria e Experimental) .....	91

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
CPM	<i>Gesellschaft für Computeranwendung, Prozess – und Materialtechnik mbH</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e .V.</i>
HC	Hexagonal Compacta
HRc	<i>Hardness Rockwell c</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PDI	Pesquisa Desenvolvimento e Inovação
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
ToTo	Tratamento Térmico
Unisinos	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Viemar	Viemar Automotive
MVF	Método de volume finitos
FEM	Elementos finitos
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
HRc	Dureza Rockwell
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
HRB	Dureza Rockwell escala B

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[mm <sup>2</sup> ]
$A_0$	Área inicial	[mm <sup>2</sup> ]
$A_1$	Área final	[mm <sup>2</sup> ]
$b_0$	Profundidade inicial	[mm]
$b_1$	Profundidade final	[mm]
$d_0$	Diâmetro inicial	[mm]
$d_1$	Diâmetro final	[mm]
E	Módulo de Elasticidade	[MPa]
F	Força	[N]
$F_a$	Força de atrito	[N]
$F_e$	Força de Extrusão	[N]
$F_m$	Força de Movimentação	[N]
$F_n$	Força Normal	[N]
$F_r$	Força de Atrito se opõe na normal	[N]
G	Módulo de rigidez	[GPa]
$h_0$	Altura inicial	[mm]
$h_1$	Altura final	[mm]
k	Coeficiente de atrito com a superfície limpa	[Adimensional]
$l_0$	Largura inicial	[mm]
$l_1$	Largura Final	[mm]
$m_a$	Coeficiente de sujidades da superfície	[Adimensional]
n	Coeficiente de encruamento	[Adimensional]
$P_R$	Máxima pressão radial	[MPa]
$P_{re}$	Máxima pressão radial encarçado	[MPa]
$T_{Fusão}$	Temperatura de fusão	[K]
$T_{Mat}$	Temperatura do <i>blank</i>	[K]
$T_h$	Temperatura Homóloga	[Adimensional]
$V_0$	Volume Inicial	[mm <sup>3</sup> ]
$V_1$	Volume Final	[mm <sup>3</sup> ]
°C	Temperatura	[°C]
$\alpha$	Semi-ângulo	[Radianos]
$\mu$	Coeficiente de atrito	[adimensional]
$\alpha_{opt}$	Ângulo ótimo de extrusão	[Radianos]
$\gamma$	Coeficiente de Poisson	[Adimensional]
$\varepsilon$	Deformação relativa	[Adimensional]
$\varepsilon_b$	Deformação relativa em função da profundidade	[Adimensional]
$\varepsilon_h$	Deformação relativa em função da altura	[Adimensional]
$\varepsilon_l$	Deformação relativa em função da largura	[Adimensional]
$\sigma$	Tensão	[MPa]
$\sigma_0$	Tensão de escoamento antes da deformação	[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais nas direções cartesianas	[MPa]
$\sigma_e$	Tensão de escoamento	[MPa]
$\bar{\sigma}_e$	Tensão de escoamento média	[MPa]
$\sigma_{eq}$	Tensão equivalente	[MPa]
$\sigma_k$	Coeficiente de resistência do material	[MPa]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[MPa]
$\tau_{eq}$	Tensão de cisalhamento equivalente	[MPa]

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.</b>	<b>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
1.2.1.	OBJETOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>1.3.</b>	<b>DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.5.</b>	<b>ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1.	MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA .....	16
2.2.	TRATAMENTO TÉRMICO .....	23
2.2.1.	DIAGRAMA Fe-C .....	24
2.3.	ESTRUTURA DOS AÇOS RESFRIADOS LENTAMENTE .....	25
2.4.	CURVAS TTT .....	26
2.5.	PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	27
2.5.1.	ESFEROIDIZAÇÃO.....	27
2.5.2.	RECOZIMENTO.....	28
2.5.3.	NORMALIZAÇÃO.....	29
2.5.4.	TÊMPERA E REVENIMENTO .....	30
2.6.	CRITÉRIOS DE DEFORMAÇÃO .....	31
2.6.2.	TENSÃO .....	33
2.7.	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO .....	36
2.8.	EXTRUSÃO.....	38
2.9.	FORÇA DE EXTRUSÃO .....	39
2.11.	RECALQUE E FORÇA DE RECALQUE .....	42
2.12.	ATRITO E LUBRIFICAÇÃO.....	43
2.13.	PROJETO DE MATRIZES.....	46
2.14.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROCESSO DE FORJAMENTO .....	51
2.15.	EESY-2-FORM .....	52
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>57</b>
3.1.	PROJETO DO PRODUTO FORJADO .....	57
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	58
3.2.1.	ANÁLISE DO CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO.....	58



	12
3.2.2. DUREZA .....	59
3.2.3. METALOGRAFIA .....	61
3.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO .....	63
3.4. PROJETO DOS FERRAMENTAIS .....	65
3.5. ANÁLISE DO PROCESSO DE FORJAMENTO .....	69
3.6. ANÁLISE ATRÁVES DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FORJAMENTO .....	70
3.7. ANÁLISE EMPÍRICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO .....	70
3.8. ANÁLISE POR LÍQUIDO PENETRANTE .....	77
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>78</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	78
4.1.1. CERTIFICADO DO MATERIAL .....	78
4.1.2. DUREZA .....	78
4.1.3. METALOGRAFIA .....	79
4.1.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO .....	83
4.1.5. PROJETO DAS FERRAMENTAS .....	86
4.1.6. ANÁLISE TEÓRICA .....	89
4.1.7. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE FORJAMENTO .....	90
4.1.8. ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	91
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>93</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE A – DESENHO DO FERRAMENTAL .....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE B – ESQUEMA DE ENCARÇAÇAMENTO .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A - NORMA ASTM E9 (PAG.01).....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO B – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO PL41.....</b>	<b>107</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de forjamento a frio em metais é empregado na indústria metal mecânica, permitindo grande precisão dimensional, além da possibilidade de obtenção de peças complexas com acabamento superficial excelente, próximo à forma final da peça, sendo também denominada de *near-net-shape*. No contexto atual da indústria automobilística há elevada concorrência oriunda da indústria chinesa, portanto a redução de custo é de extrema importância. Baseado nessa situação global, a tecnologia de forjamento propicia competitividade, aproveitando a matéria prima da melhor forma possível e, bem como, eliminando desperdícios e usinagens posteriores. Aliado a isso, e a partir do desenvolvimento de equipamentos extremamente tecnológicos é possível obter produção em larga escala com extrema velocidade, contribuindo para o aumento da competitividade. Mediante essa tendência global de baratear ao máximo os produtos, gera a necessidade de aprimorar e melhorar a eficiência dos produtos em campo. A simulação de processos de forjamento, vem reduzindo o tempo investido com tentativa e erro, liada ao processo do forjamento a frio, possibilita melhorar as propriedades mecânicas dos aços forjados, como exemplo, aumento da resistência à fadiga em componentes de suspensão e direção de veículos automotores, o que não seria conseguido por outros processos.

### 1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho foi motivado em função da necessidade de reduzir custos num componente automotivo, substituindo o processo de alívio de tensão por tratamento térmico após o corte dos *blanks*. Atualmente, o processo utiliza um alívio de tensão após o corte por cisalhamento, gerando um aumento de *lead time* do processo. E após, a peça forjada é enviada para o fornecedor de tratamento térmico para ainda realizar a têmpera total, retornando para a empresa e sendo necessário um processo de laminação para o controle e adequação da rugosidade.

### 1.2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar os impactos de eliminar os processos de alívio de tensão e laminação, submetendo o componente

à um processo de têmpera e revenimento e posteriormente, realizando uma extrusão confinada, com intuito de melhorar o fluxo do produto dentro da fábrica, reduzindo os custos de fabricação.

### 1.2.1. OBJETOS ESPECÍFICOS

- a) Simular e introduzir a faixa de dureza e tipo de microestrutura que propicia o melhor escoamento do material possibilitando, através de cálculos e simulações em softwares de forjamento, uma extrusão confinada a partir de única operação;
- b) Avaliar, por meio de elementos finitos, as tensões residuais do forjamento pelo processo atual e pelo processo proposto, sendo possível dimensionar os ferramentais de forjamento;
- c) Validar a simulação com a prática através do forjamento, via prensa vertical hidráulica.

### 1.3. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O processo de forjamento a frio em aços é uma tecnologia composta por diversos fatores, desde o tipo de material a ser forjado até projeto das ferramentas. Devido já ser comprovada a eficácia do processo de forjamento, esse trabalho tem o foco direcionando apenas para o forjamento dos *blanks* tratados termicamente e o projeto das ferramentas. Os lubrificantes para forjamento serão utilizados, os disponíveis comercialmente, e os parâmetros de máquina e velocidade de deformação serão mantidos os mesmos já utilizados dentro da forjaria da Viemar Automotiva.

Após o forjamento do produto, serão realizados ensaios destrutivos, tais como metalografia, e não destrutivos através de líquido penetrante. Porém, o produto final não será validado novamente em campo e nem em teste de durabilidade, por ser tratar de um item já consolidado na empresa.

### 1.4. JUSTIFICATIVA

Por intermédio este trabalho busca utilizar os recursos de simulação, afim de verificar a microestrutura e dureza mais indicada para o forjamento, pois devido a

formação da microestrutura martensítica, quanto maior for a dureza menor será os descolamentos dos planos de escorregamentos. Utilizando o recurso de simulação ainda se pode conhecer as cargas no ferramental de forjamento, sendo assim possibilitando a definição do projeto de forma rápida e eficiente. E por final realizando o teste prático, certifica-se que todo o trabalho de análise e projeto, foi executado corretamente sendo validado pelo forjamento dos corpos de prova.

### **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

- Capítulo 2 – Fundamentação teórica, com intuito de embasar assuntos necessários para a realização deste trabalho de conclusão;
- Capítulo 3 – Explanação da metodologia aplicada para atender os objetivos deste trabalho;
- Capítulo 4 – Apresentação dos resultados obtidos tais como simulações, análises e ensaios físicos;
- Capítulo 5 – Exibição das conclusões obtidas neste trabalho de conclusão;
- Capítulo 6 – Sugestões de trabalhos futuros voltados para a área de forjamento a frio.

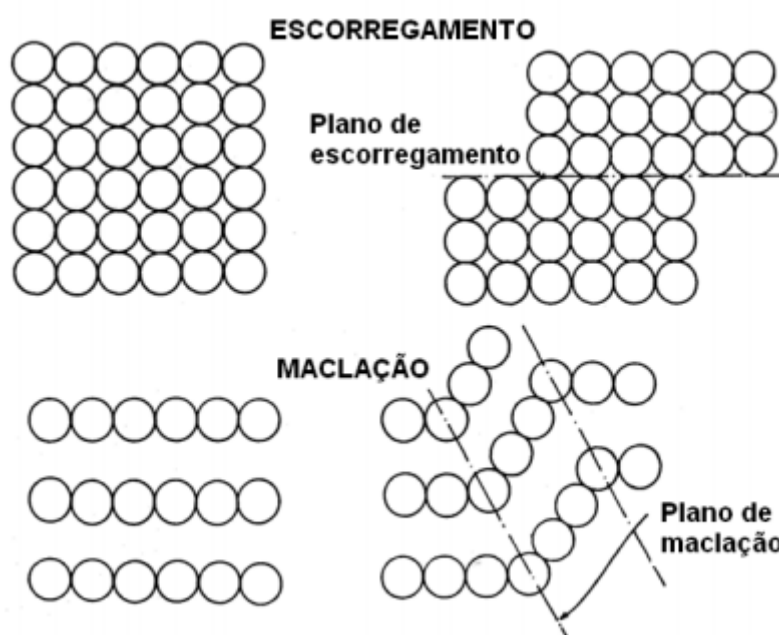
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Os processos de deformação são classificados entre deformação elástica e deformação plástica. A deformação elástica é oriunda de um processo de deformação não permanente, ou seja, após remover a carga aplicada, o material retorna a sua condição inicial. Porém durante o processo de forjamento, devido às altas solicitações mecânicas induzidas pelo processo, são geradas tensões capazes de ultrapassar o limite de escoamento do material a ser forjado, iniciando-se uma deformação permanente, ou seja, uma deformação plástica. Esse processo de deformação plástica ocorre basicamente por dois mecanismos estruturais básicos: através de escorregamento e de maclação. (CALLISTER E RETHWISCH, 2013)

No processo de escorregamento, ocorre o deslocamento de planos cristalográficos, também conhecidos como planos de escorregamento. Já no processo de maclação, partes do cristal inclinam-se em relação à outra parte a partir de um plano limite sendo denominado por sua vez de plano de maclação conforme ilustrado na Figura 1. (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

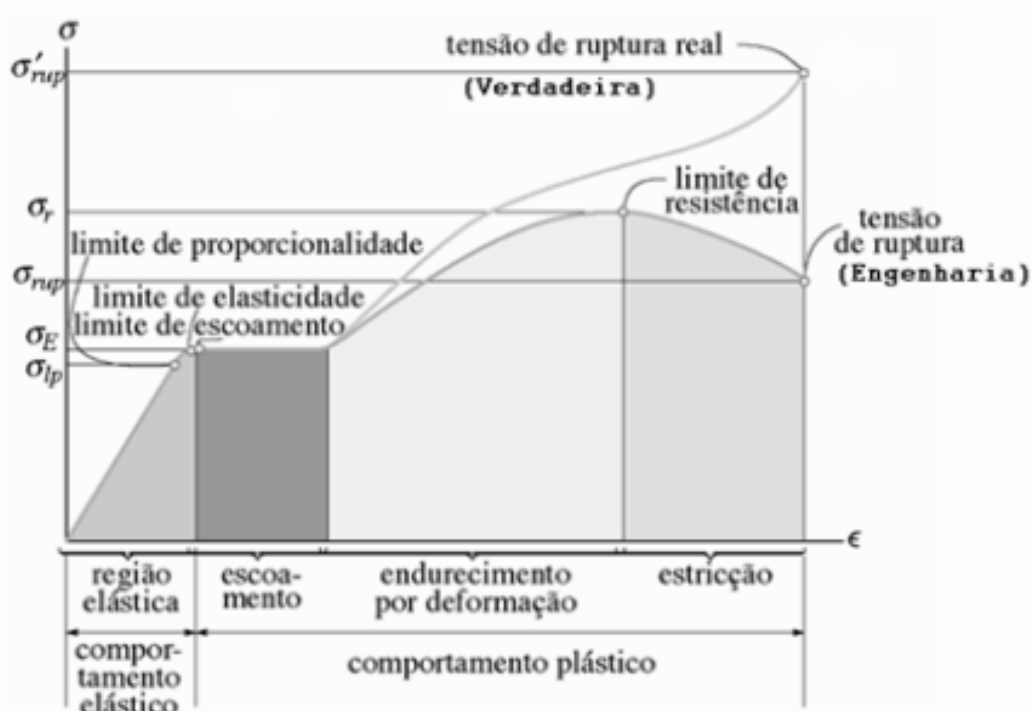
Figura 1 - Mecanismo de deformação plástica: escorregamento e maclação



Fonte: (Bresciani Filho et al., 2011, p. 100)

Durante o processo de conformação mecânica as tensões induzidas no processo muitas vezes chegam até próximo as tensões de ruptura do material. Para exemplificar isso, através de ensaio uniaxial de tração para um aço de baixo teor de carbono, sendo ensaiado em temperatura ambiente, pode-se obter a curva tensão versus deformação, (BRESCIANI FILHO et al., 2011), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Diagramas de tensão versus deformação de engenharia verdadeira para um aço dúctil.

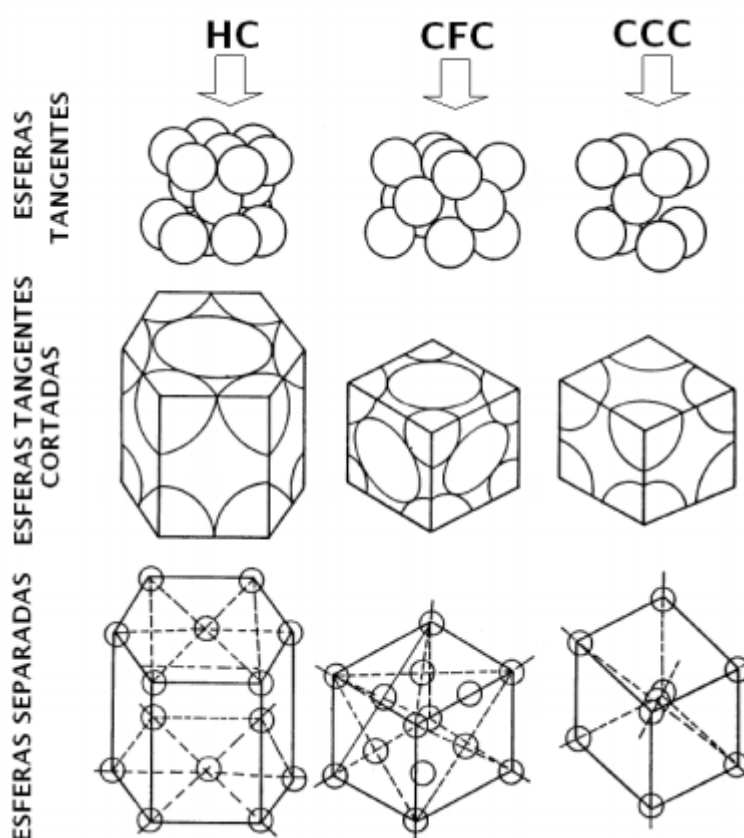


Fonte: (Hibbeler, 2010, p. 58)

Sendo assim, observa-se que a deformação plástica ocorre em nível atômico e que os sólidos são formados por agrupamentos atômicos, apresentando determinadas orientações, e se repetindo em três dimensões, por sua vez denominados de cristais. Esses cristais, formam uma estrutura denominada de estrutura cristalina. Baseado nisso é possível indicar a localização dos átomos determinando a forma desta estrutura. Para facilitar o entendimento das redes cristalinas se define a célula unitária de uma estrutura complexa, onde essa pequena parcela representa o menor agrupamento de átomos que mantém forma geométrica do cristal e a repetição dessa parcela nas três dimensões constituem o reticulado cristalino. (DIETER, 1981; BRESCIANI FILHO et al., 2011).

A estrutura cristalina, nos metais apresenta três formas básicas de estrutura, sendo hexagonal compacta (HC), estrutura cúbica de face centrada (CFC) e a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Devido a essas formas geométricas tais estruturas apresentam características e propriedades diferentes, durante o processo de deformação (ITMAN FILHO, 2010).

Figura 3 - Células unitárias representadas na forma de esferas atômicas tangentes, esferas atômicas separadas



Fonte: (Bresciani Filho et al., 2011, p. 92)

Na Figura 3, pode-se observar a distribuições e formas geométricas das estruturas cristalinas. Sabe-se que cada estrutura define as características e propriedades dos materiais durante o processo de deformação. Além disso, na Tabela 1, salientam-se algumas outras propriedades que também caracterizam a célula unitária, como fator de empacotamento, que é o número que expressa a fração ocupada por átomos em relação ao volume total da célula, sendo o valor máximo de 1,633. Têm-se ainda sistema de escoamento, que define a quantidade de planos possíveis de escorregar e seus graus de liberdade.

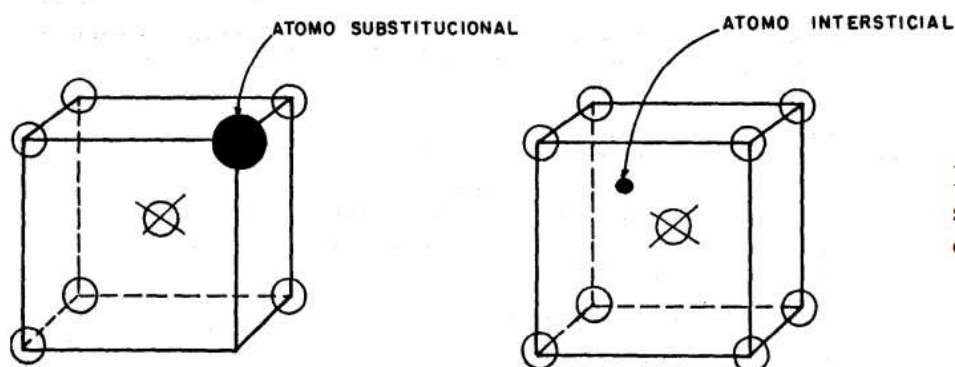
Tabela 1 - Características pela estrutura geométrica à células unitárias.

Estrutura cristalina	Exemplos de metais	Fator de empacotamento	Sistemas de escorregamentos	Conformabilidade
CCC	Cr, Fe, Mo, Nb, W, V	0,68	48 (16 planos e 3 direções)	Média
CFC	Al, Cu, Au, Pb, Ni, Ag	0,74	12 (4 planos e 3 direções)	Alta
HC	Be, Cd, Co, Mg, Ti, Zn	0,74	3 (1 plano e 3 direções)	Baixa

Fonte: (Compilado de Dieter, 1981, Bresciani Filho et al., 2011)

É de conhecimento que alguns outros fatores afetam a propriedade de conformabilidade dos aços. Um fator que tem influência é a adição de elementos de liga, visando qualificar às características dos aços. Portanto, para simplicidade da análise, quando outro elemento de liga é adicionado ao elemento base, pode-se ter a criação de uma solução sólida, sendo o primeiro componente o soluto e o segundo o solvente. Admiti-se que ocorre uma distribuição aleatória, sendo classificados como solução intersticial e substitucional, conforme a Figura 4. (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Figura 4 - Soluções sólidas substitucional e intersticial



Fonte: (Bresciani Filho et al., 2011, p. 92)

Solução substitucional, ocorre quando um átomo de metal substitui o átomo de outro metal, no reticulado cristalino. Contudo a solubilidade de um elemento poderá ser parcial e ou total podendo gerar uma distorção na rede cristalina. Nesse sentido a

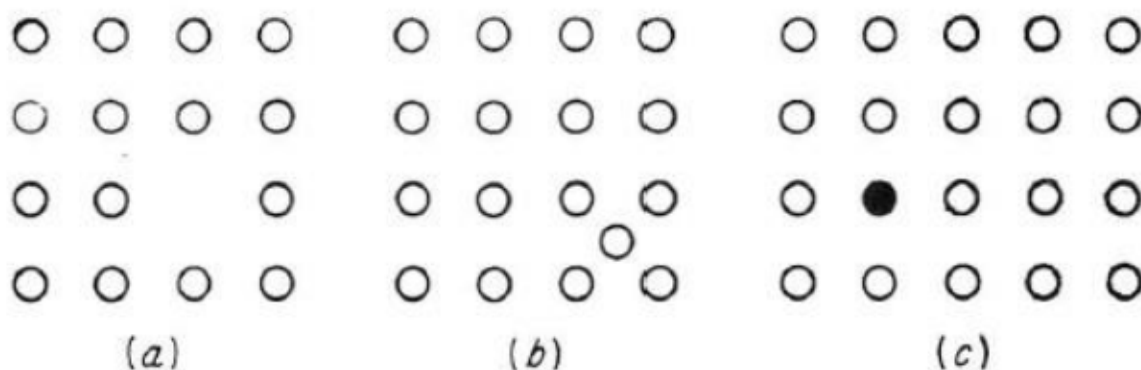


solução intersticial acontece quando, existe uma diferença entre raios atômicos do solvente e soluto, sendo possível haver um posicionamento do menor átomo dentro das lacunas existentes entre os átomos da célula unitária, esse tipo de processo não realiza distorções à rede cristalina. (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Sabe-se que a estrutura cristalina não é perfeitamente homogênea, embora assim é considerada para fins de cálculo e de estudos, porém na realidade o reticulado apresenta inúmeros defeitos também conhecido como discordâncias. Sendo estes classificados como defeitos pontuais, lineares e planares, e apresentam extrema influência na deformação plástica dos metais.

Os defeitos pontuais são classificados: como lacuna, onde existe a presença de átomos intersticiais e átomos de diversas durezas, os defeitos de linha ou também conhecido como defeitos de cunha, acontecem descontinuidades das arestas dos planos ao longo do cristal, e por fim os defeitos planares ou tridimensionais, geralmente representados pelos contornos de grão, contornos de maclação e falhas no empilhamentos na sequência dos planos (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Para exemplificar pode-se verificar na Figura 5.

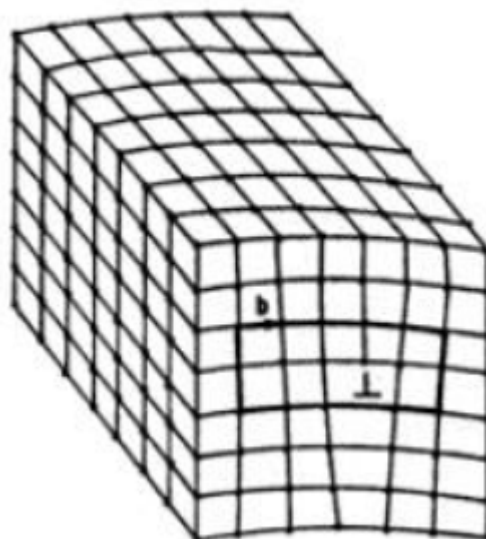
Figura 5 - Defeitos pontuais, (a) lacuna; (b) intersticial; (c) átomo de impureza



Fonte: (Dieter, 1981 , p. 97)

Já na Figura 6, pode-se compreender como esse tipo de defeito costuma atuar na estrutura cristalina.

Figura 6 - Discordância de cunha



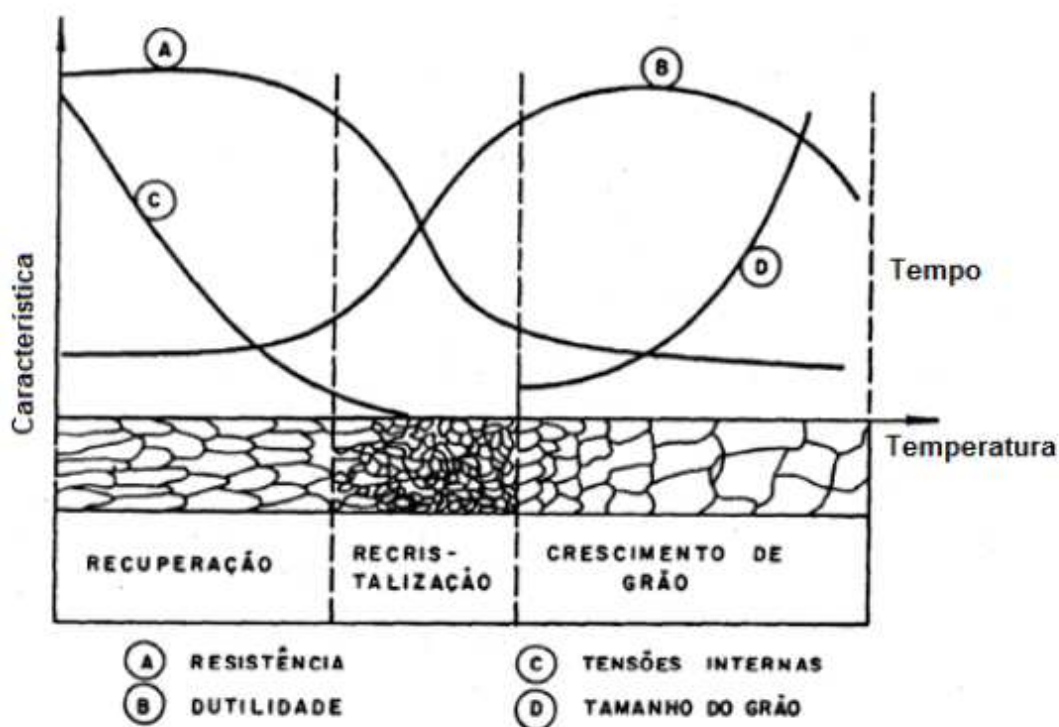
Fonte: (Dieter, 1981 , p. 111)

Baseado nas Figura 5 e

Figura 6, entende-se que os defeitos nas estruturas cristalinas são responsáveis pela deformação dos aços, pois a partir deles iniciam as deformações plásticas. Esses processos de deformação têm origem através dos planos e direções de escorregamento, coincidindo com as regiões de maior densidade atômica, devido à proximidade em que os átomos se encontram. Quando se acentua o processo de deformação, tem-se por resultado o aumento de densidade no cristal, e por sua vez, o aumento da interação entre elas. Sendo assim, ocorre o entrelaçamento das direções de movimentação dos planos de escorregamento, oriundo a esse entrelaçamento ocorre o aumento da tensão necessária para continuar o processo de deformação do metal. Por outro lado esse processo contribui para um efeito chamado encruamento, ou seja, devido ao aumento de resistência ao cisalhamento dos planos. Portanto todo material que já passou por um processo de encruamento e sendo submetido a novos processos que induzem maior encruamento, logo maior será a resistência a essa deformação sendo levado em consideração o grau de encruamento pré-existente. O encruamento geralmente é verificado no forjamento a frio, levando em consideração que nos processos de forjamento a quente, tem-se a influência do processo de recozimento simultâneo, devido à influência da temperatura de trabalho. Porém é possível reverter esse processo de encruamento através de tratamento térmico de recozimento, que por sua vez, tem como base aquecer o material a uma determinada

temperatura e mantê-lo por determinado tempo. (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Na Figura 7, pode-se compreender as fases definidas para este processo.

Figura 7 - Modificações estruturais e das propriedades mecânicas na recuperação, recristalização e crescimento do grão (curvas ilustrativas das tendências).



Fonte: (Bresciani Filho et al., 2011, p. 126)

Baseado na Figura 7, observa-se as seguintes fases:

- **Recuperação:** fase aonde encontra-se a redução ou eliminação das discordâncias, sendo isto possível pelo rearranjo das mesmas, referindo-se assim favorecendo a redução das tensões internas;
- **Recristalização:** etapa responsável por retornar as propriedades mecânicas do material, exatamente iguais ao do seu estado não deformado. Nessa etapa também inicia a nucleação de novos cristais que ao decorrer do processo vão absorvendo cristais vizinhos deformados e aumentando seu tamanho;
- **Crescimento de grão:** fase de continuação do processo anterior, e consiste no aumento do tamanho de grão em detrimento dos grãos vizinho já cristalizados.

## 2.2. TRATAMENTO TÉRMICO

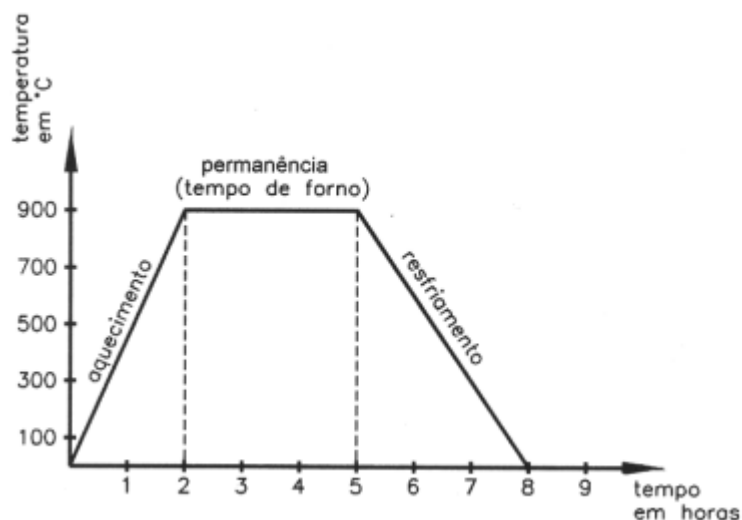
Vale lembrar que, cada estrutura cristalina é responsável por imprimir características nos aços. Porém existe a possibilidade de transformar esta estrutura para obter um aumento de resistência mecânica. O tratamento térmico (ToTo) é um processo que envolve operações de aquecimento e resfriamento subsequentes dentro de condições controladas de temperatura, tempo de exposição à temperatura, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento. Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são resumidos da seguinte maneira:

- Remoção de tensões internas (oriundas de resfriamento desigual, trabalho mecânico ou outros motivos);
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento de resistência mecânica;
- Melhora de ductibilidade;
- Melhora de usinabilidade;
- Melhora de resistência ao desgaste;
- Melhora das propriedades de corte;
- Melhora da resistência à corrosão;
- Melhora da resistência ao calor;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Comumente, os materiais metálicos submetidos a tratamento térmico são ligas de Fe-C, ou seja, aços. Porém existe a possibilidade de aplicar esse processo em materiais não ferrosos, como cobre e ligas de alumínio, sendo estes tratamentos térmicos de natureza mais simples. (CHIAVERINI, 1986)

Para exemplificar, o processo de tratamento térmico pode ser ilustrado conforme a Figura 8.

Figura 8 - Gráfico simplificado do processo de tratamento térmico



Fonte: (Tschiptschin, 2010, p. 1)

Segundo Tschiptschin (2010), devido à grande variedade de tratamentos térmicos e termoquímicos podendo ser empregada em aços, pode-se subdividi-los a grosso modo em dois grupos;

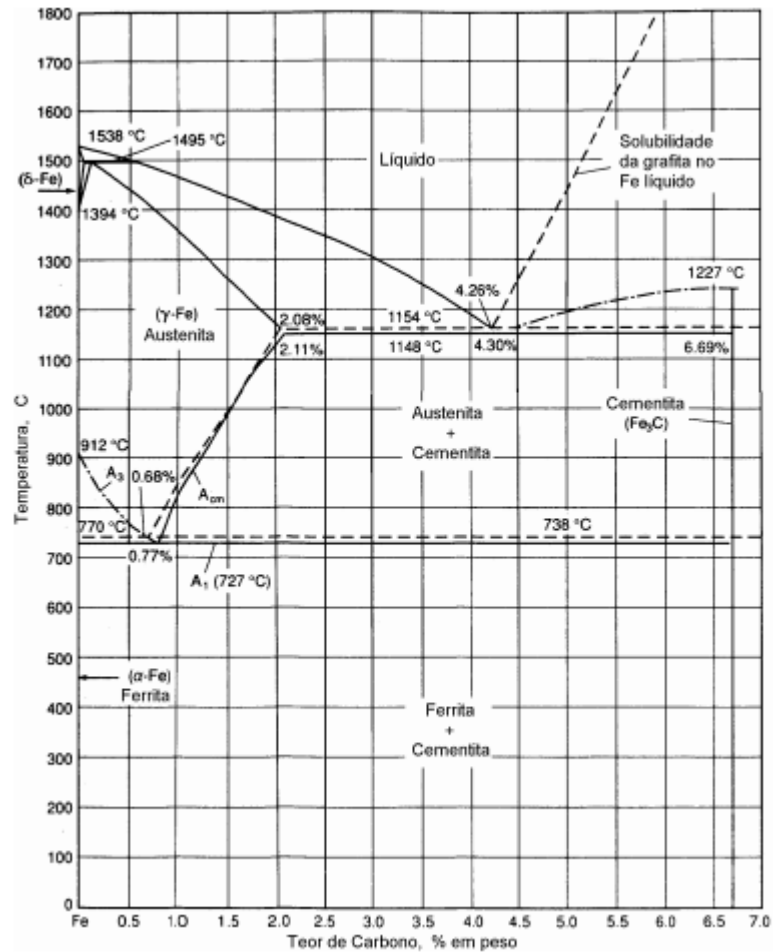
- Tratamentos térmicos de amolecimento: empregado para reduzir dureza, remover tensões residuais, melhorar tenacidade ou até mesmo quando se deseja refinar o tamanho de grão;
- Tratamentos térmicos de endurecimento: visa o aumento de resistência mecânica e a resistência ao desgaste.

Conforme Strohaecker et al, (2003), os tratamentos térmicos mais usuais são: esferoidização, recozimento; normalização e têmpera + revenimento.

### 2.2.1. DIAGRAMA Fe-C

O diagrama Fe-C (Figura 9), conforme utilizado na prática, é considerado um falso diagrama de equilíbrio, onde ele representa o equilíbrio metaestável entre ferro e um carboneto de ferro chamado cementita, tendo a sua forma estequiométrica  $Fe_3C$ . No diagrama de equilíbrio, as fases são representadas por letras gregas, porém no caso das ligas de ferro carbono estas fases também recebem um nome. Sendo assim tem-se as fases denominadas de ferrita, austenita e cementita, podendo estar na microestrutura do material dependendo do teor de carbono e da temperatura. (STROHAECKER et. al, p. 18)

Figura 9 - Diagrama de equilíbrio Fe-C

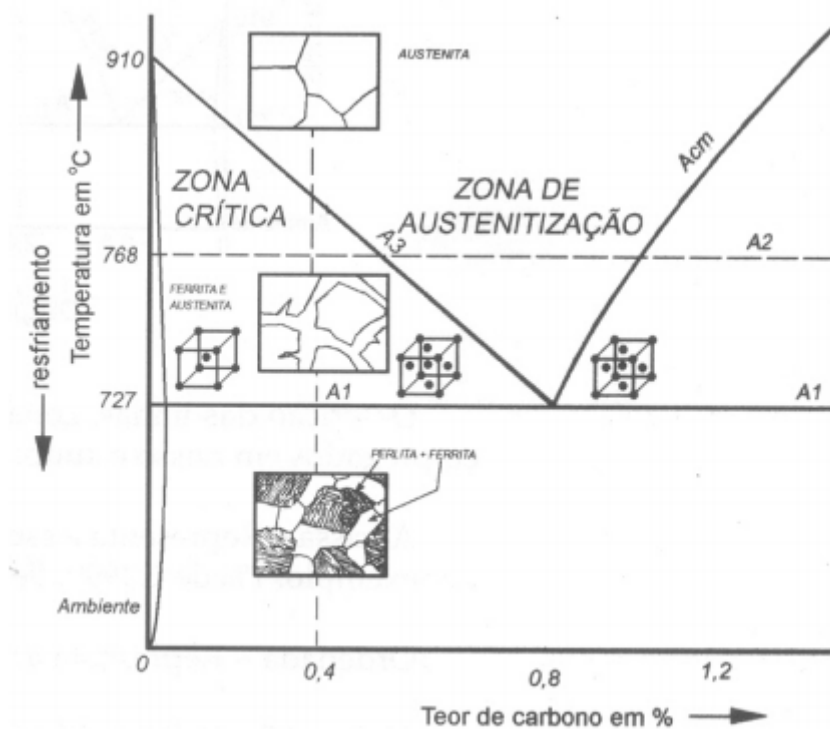


Fonte: (Strohaecker et. al, 2003, p. 18)

### 2.3. ESTRUTURA DOS AÇOS RESFRIADOS LENTAMENTE

Quando o teor de carbono é menor que 0,1% encontra-se no aço uma estrutura contendo somente ferrita, dando a característica de um material macio e dúctil. Sendo assim quando se avança para um aço com teor de carbono equivalente à 0,8% C, apresenta uma microestrutura 100% perlita. Por exemplo, quando um aço contendo 0,4% de C, é aquecido a 727°C, dentro da zona crítica, a perlita existente no aço se transforma em austenita e a ferrita se mantém estável, porém acima de 830°C toda a microestrutura se transforma em austenita. Se resfriar o material lentamente a austenita começa a se transformar em ferrita, dentro da zona crítica e em 727°C toda a austenita se transforma em perlita conforme Figura 10. (TSCHIPTSCHIN, 2010).

Figura 10 - Diagrama Fe-C ilustrando as fases conforme temperatura versus teor de carbono.

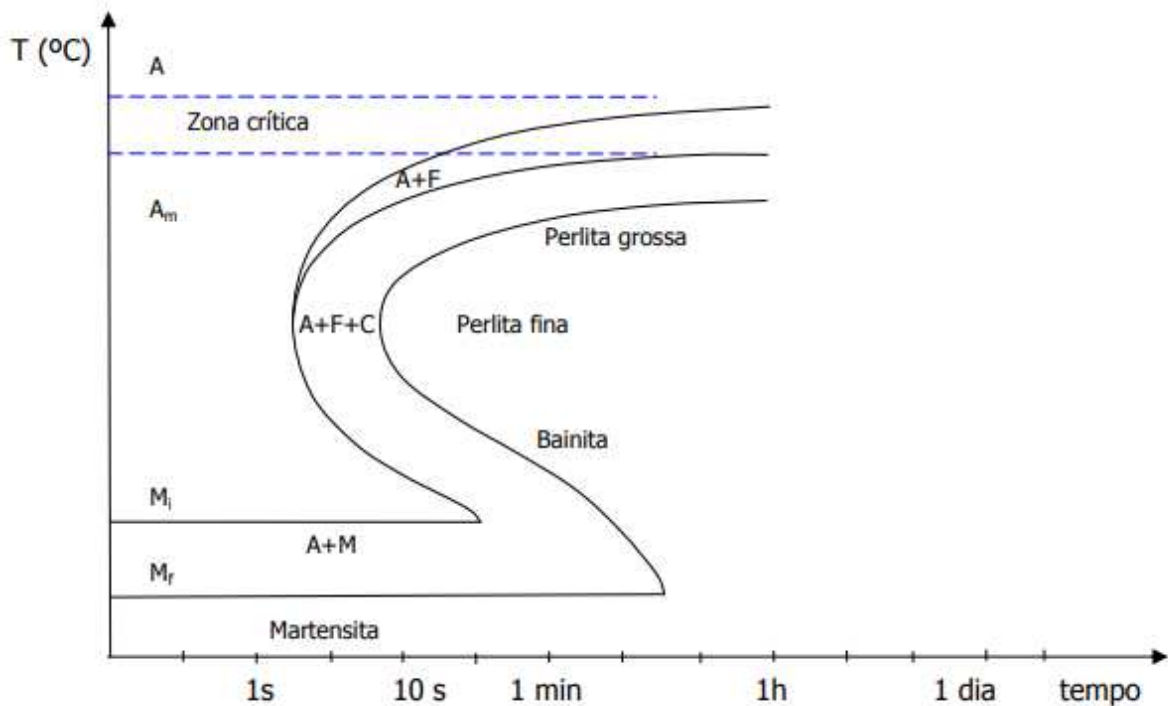


Fonte: (Tschiptschin, 2010 p. 9)

#### 2.4. CURVAS TTT

Quando os aços são resfriados com velocidades intermediárias outras microestruturas se formam, baseado nisso descreve-se o que ocorre durante o resfriamento dos aços submetidos a tratamentos isotérmicos. Sendo assim utiliza-se as curvas TTT – Temperatura, Tempo e Transformação, com essas curvas identifica-se as regiões de formação de ferrita, perlita, bainita e martensita, conforme ilustrado na Figura 11. (TSCHIPTSCHIN, 2010).

Figura 11 - Curvas TTT – Temperatura, Tempo e Transformação



Fonte: (Tschiptschin, 2010, p. 14)

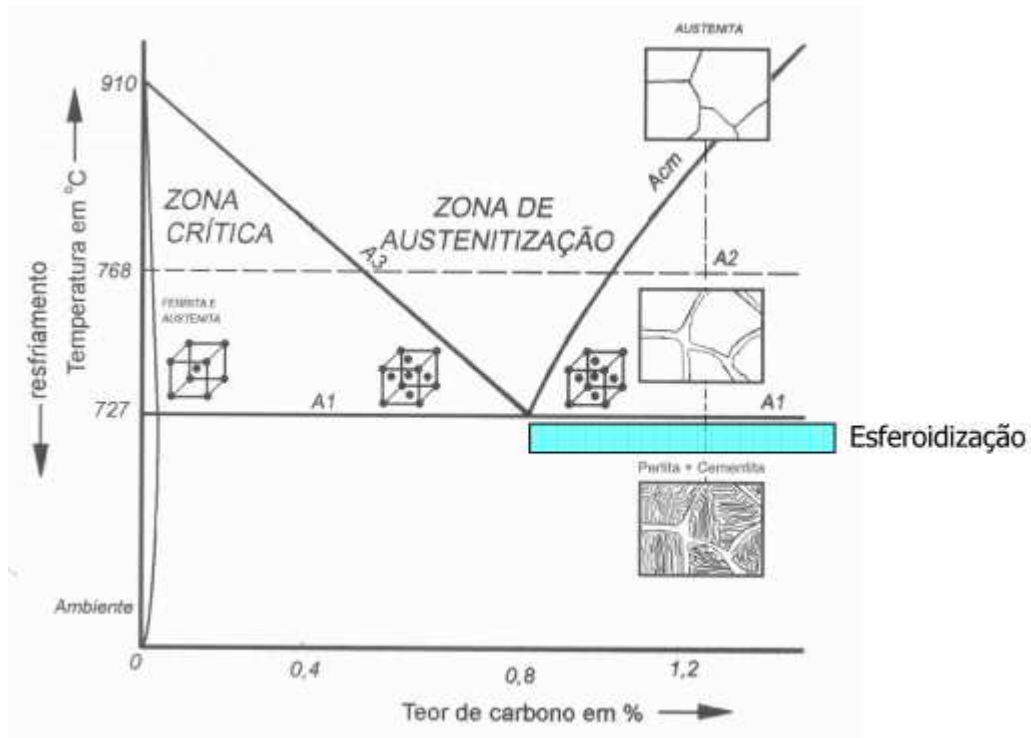
## 2.5. PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO

### 2.5.1. ESFEROIDIZAÇÃO

O processo de esferoidização é utilizado para aços com teores superiores a 0,5% de carbono, mas principalmente para aços hipereutetóides. Quando se deseja fazer um processo de usinagem ou de conformação de uma peça, o recozimento poderá não baixar a dureza o suficiente para que a tarefa seja executada. Este problema acontece principalmente em aços com elevados teores de elementos de liga e elevado teor de carbono. Para este tipo de aço uma estrutura formada por perlita e cementita apresentará uma dureza muito alta e a única alternativa será o processo de esferoidização. (STROHAECKER et. al, 2003).



Figura 12 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de esferoidização



Fonte: (Tschiptschin, 2010 p. 21)

Figura 13 - Microestrutura de um aço esferoidizado

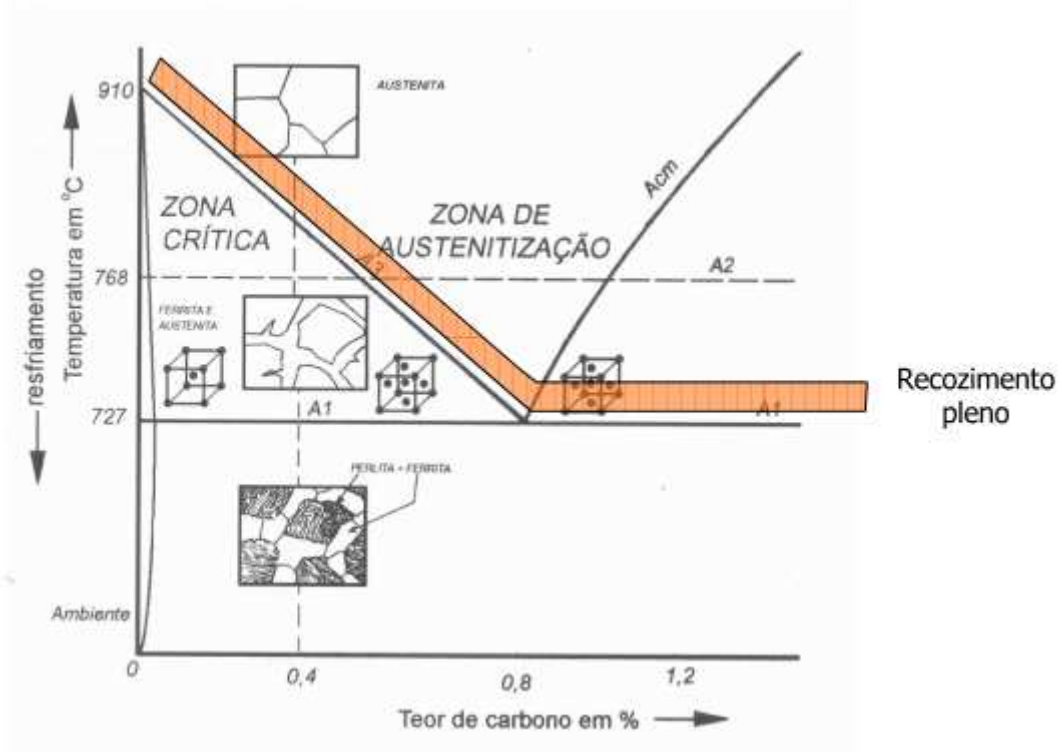


Fonte: (Strohaecker et. al, 2003)

## 2.5.2. RECOZIMENTO

O processo de recozimento (Figura 14) é aplicado para remover tensões, devidas aos processos de fundição e conformação mecânica, a quente ou a frio, diminuir a dureza, melhorar ductibilidade, ajustar tamanho de grão, ou seja, eliminar os efeitos de quaisquer tratamentos mecânicos e térmicos a que o material tenha sido submetido. (CHIAVERINI, 1986).

Figura 14 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de recozimento

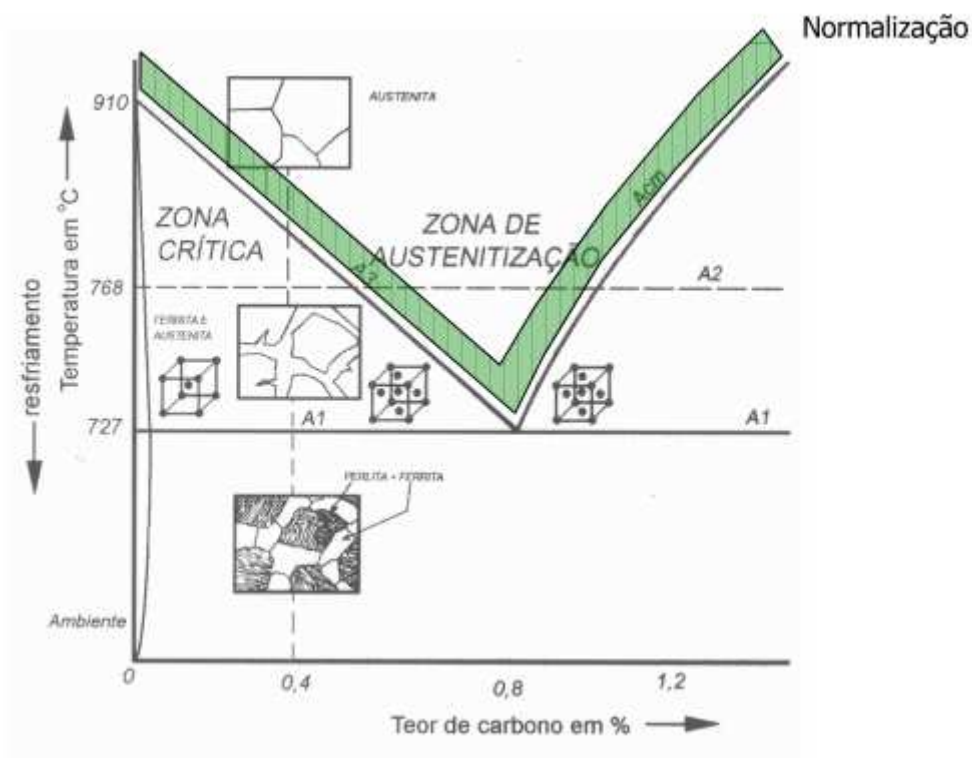


Fonte: (Tschiptschin, 2010, p. 20)

### 2.5.3. NORMALIZAÇÃO

O processo de normalização (Figura 15) produz propriedades semelhantes às obtidas no recozimento e em virtude disto muitas vezes os dois podem ser usados alternativamente para obter baixa dureza, boa ductilidade e para eliminar estruturas provenientes de tratamentos anteriores, como é o caso de tratamentos prévios de têmpera em peças fundidas ou forjadas. (STROHAECKER et. al., 2003)

Figura 15 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de normalização

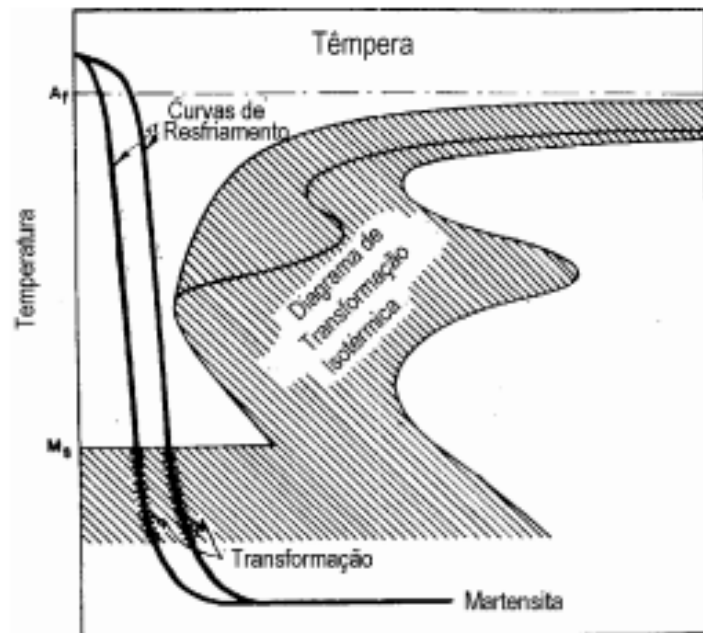


Fonte: (Tschiptschin, 2010, p. 23)

#### 2.5.4. TÊMPERA E REVENIMENTO

O processo de têmpera (Figura 16) é o mais importante dos aços, seu processo de aquecimento é parecido com o processo de recozimento ou normalização, porém no resfriamento é feito de forma brusca em meios líquidos. Nesse sentido os aços submetidos a esse processo adquirem alta, resistência ao desgaste, resistência a tração por sua vez, as propriedades relacionadas a ductilidade diminuem consideravelmente. Logo após a têmpera, o processo de revenimento deve ser realizado, com temperaturas inferiores a zona critica, modificando a estrutura obtida na têmpera, melhorando a ductibilidade, reduzindo valores de dureza e de resistência a tração. (CHIAVERINI, 1986)

Figura 16 - Diagrama de fases demarcando a região do processo de recozimento



Fonte: (Strohaecker et. al., 2003, p.42)

## 2.6. CRITÉRIOS DE DEFORMAÇÃO

Contudo para um processo de conformação além dos fundamentos teóricos sobre aspectos cristalográficos e as movimentações das discordâncias ainda necessita-se definir os parâmetros mensuráveis de tensão e deformação admissíveis.

### 2.6.1. DEFORMAÇÃO

Para exemplificar o processo de deformação em metais, levando em consideração a dificuldade de descrever plenamente este fenômeno, sendo ainda mais complexo quando se trata de grandes deformações. Para facilitar o entendimento existem hipóteses, sendo estas: isotropia, homogeneidade, continuidade e a lei da constância do volume.

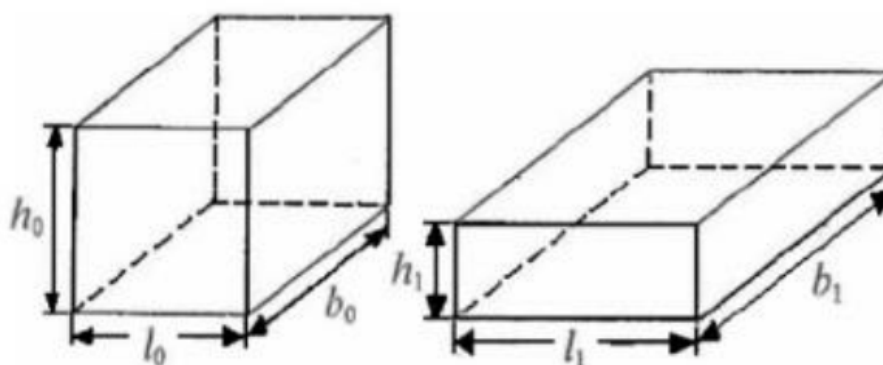
Conforme mencionado acima, a isotropia, basicamente consiste em conservar as propriedades mecânicas do metal em todas as direções. O conceito de homogeneidade e continuidade, entende-se que o material é perfeito como uma estrutura sem variações de tamanho de grão, nem na composição química, e que não haja defeitos na rede cristalina. (GRÜNING,1973)

Já a Lei da Constância do Volume considera que um *blank* não altera seu volume durante e após sofrer o processo de conformação. Sendo assim, a soma das três deformações principais é igualada a zero, originando a equação (1).

$$h_0 l_0 b_0 = h_1 l_1 b_1 \therefore V_0 = V_1 \quad (1)$$

sendo  $h_0$  e  $h_1$  a altura inicial e altura final, respectivamente,  $l_0$  e  $l_1$  (mm) representado a largura inicial e final, respectivamente,  $b_0$  e  $b_1$  (mm) são comprimento inicial e comprimento final, respectivamente,  $V_0$  (mm<sup>3</sup>) representando o volume inicial do *blank* e  $V_1$  (mm<sup>3</sup>) é o volume da peça deformada (GRÜNING,1973). A Figura 17 ilustra a equação acima, sendo denominado por Constância do Volume.

Figura 17 - Constância do Volume



Fonte: (Grüning, 1973, p. 16)

Baseado na Equação (1), verifica-se que os parâmetros iniciais da geometria de paralelepípedo, ilustrada da Figura 17, onde " $h_0 l_0 b_0$ ", são dimensões do estado inicial do *blank*, e  $h_1 l_1 b_1$ , são as dimensões do *blank* deformado. A intensidade da deformação pode ser escrita como deformação relativa ( $\varepsilon$ ) e a deformação verdadeira e logarítmica ( $\varphi$ ). Em processos onde tem-se um elevado grau de deformação, indica-se utilizar a deformação verdadeira. Sendo assim utiliza-se os parâmetros de deformação relativa e/ou verdadeira em função da dimensão do *blank*, que se está avaliando a deformação, onde " $\varepsilon_h$ ", " $\varepsilon_l$ ", " $\varepsilon_b$ ", " $\varphi_h$ ", " $\varphi_l$ ", " $\varphi_b$ ", respectivamente altura, comprimento e largura. Baseado nisso tem-se as seguintes equações (2) e (3).

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0}; \varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0}; \varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \quad (2)$$

$$\varphi_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0}; \varphi_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0}; \varphi_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \quad (3)$$

Logo, pode-se considerar que a equação (1), pode ser reescrita conforme equação (4).

$$\varphi_h + \varphi_l + \varphi_b = 0 \quad (4)$$

Sendo assim, ao ser feita uma análise de deformação em peças assimétricas deve-se realizar uma adaptação nos parâmetros de altura " $\varphi_h$ ", " $\varphi_l$ " para raio " $\varphi_r$ " e " $\varphi_b$ " para perímetro " $\varphi_p$ ", assim obtém-se a equação (5) (SCHAEFFER, 2006).

$$\varphi_h + \varphi_r + \varphi_p = 0 \quad (5)$$

### 2.6.2. TENSÃO

A tensão ( $\sigma$ ) é definida como sendo a razão entre a força (F) e a seção (A) correspondente onde a força atua, descrito na equação (6).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Um corpo quando submetido a um carregamento externo (devido à atuação de forças) origina o surgimento de tensões nas partes internas e externas, na interface peça e ferramenta. Entretanto analisando um corpo elementar, sendo posicionado em um ponto qualquer, observa-se em um dos planos tem-se a tensão normal ao plano ( $\sigma_{xx}$ ) e as tensões de cisalhamento ( $\sigma_{xy}$  ou  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ) contidas no plano, totalizando três tensões normais principais e seis tensões de cisalhamento atuando no corpo elementar (SCHAEFFER, 2016).

As teorias de escoamento, Tresca e von Mises, mostra que é dependendo da combinação das tensões atuantes, o corpo pode escoar plasticamente. Desta forma é obtido a tensão de escoamento equivalente ( $\sigma_{eq}$ ), sendo esta oriunda da energia de distorção quando esta atinge seu valor crítico. Então considerando von Mises, têm-se resumidamente que a  $\sigma_{eq}$  é calculada pela equação (7) (SCHAEFFER, 2016).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

Já para a Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento de Tresca, a  $\sigma_{eq}$  é calculada pela equação:

$$\sigma_{eq} = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

Além das teorias fornecerem o valor da  $\sigma_{eq}$ , também baseado nelas é possível definir o limite de escoamento por cisalhamento " $\tau_{eq}$ ", sendo este limite menor do que a tensão de escoamento obtida através de ensaio de tração uniaxial, descrito pelas equações (9) e (10).

Para von Mises,  $\tau_{eq}$  é calculado por:

$$\tau_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} = 0,577.(\sigma_{eq}) \quad (9)$$

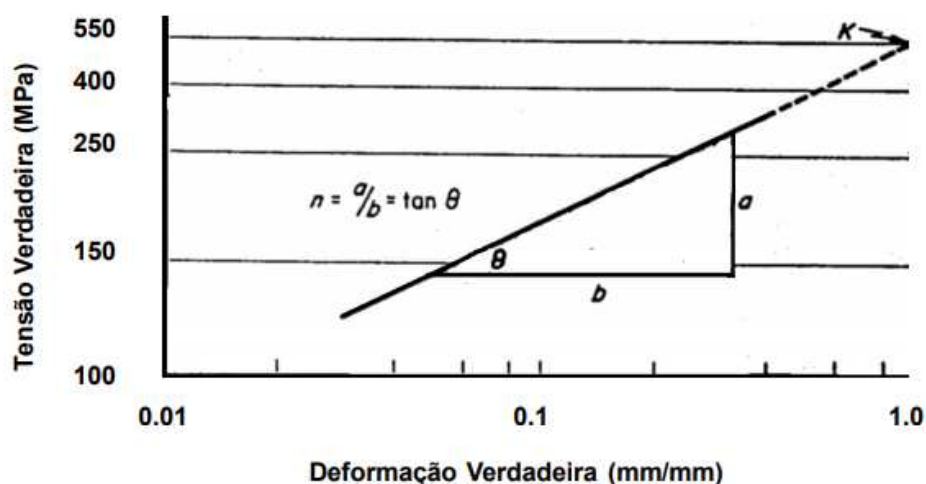
Para Tresca,  $\tau_{eq}$  é calculado por:

$$\tau_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{2} = 0,5.(\sigma_{eq}) \quad (10)$$

Sendo mais indicado para o processo de forjamento o uso da Teoria de von Mises, com objetivo de garantir o escoamento do material, bem como a deformação plástica. A tensão de escoamento " $\sigma_e$ ", é um dos parâmetros fundamentais para o processo de forjamento, pois a partir desse valor é possível quantificar forças e tensões durante o processo. No caso de trabalho a frio em aços de baixo teor de carbono emprega-se a equação de Holloman (11). Sendo " $\sigma_k$ " (coeficiente de resistência do *blank*) e "n", são obtidos através da projeção de uma curva log-log até  $\varphi = 1$  e a tangente do ângulo, conforme Figura 18 e Figura 19. Parâmetros obtidos de um ensaio uniaxial de compressão, conforme norma ASTM E9, ver Anexo A. (SCHAEFFER, 2006)

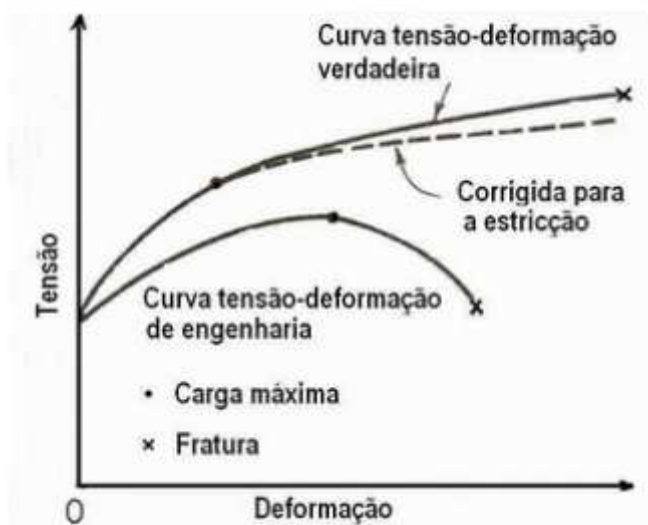
$$\sigma_e = \sigma_k \cdot \varphi^n \quad (11)$$

Figura 18 - Gráfico de tensão e deformação utilizados para obtenção das constantes “ $\sigma_k$ ” e “ $n$ ”.



Fonte: (Marcondes, 2013, p. 15)

Figura 19 - Gráfico de tensão versus deformação verdadeira e a de engenharia



Fonte: (Nemoto, 2004, p. 4)

Para a obtenção do coeficiente de resistência do *blank* “ $\sigma_k$ ”, é realizado um ensaio de compressão, onde são plotados os resultados em forma de gráfico tensão/deformação verdadeira ( $\sigma/\varphi$ ), pelo qual a tensão e deformação são calculadas lavando em consideração em cada instante do ensaio a área instantânea do corpo de prova. O procedimento para a realização desse ensaio encontra-se descrito na ASTM E9. Para exemplificar na Tabela 2 demonstra-se os valores de Tabela 2 - Coeficiente de resistência “ $\sigma_k$ ” e encruamento “ $n$ ” conforme (SCHAEFFER, 2004).



Tabela 2 - Coeficiente de resistência “ $\sigma_k$ ” e encruamento “n”

<b>Material</b>	<b>n</b>	<b><math>\sigma_k</math> ( MPa)</b>
<b>16MnCr5</b>	0,220	907,85
<b>SAE1035</b>	0,178	950,00
<b>Ck10</b>	0,216	740,00
<b>Ck45</b>	0,167	1000,00

Fonte: (Compilado de Schaeffer, 2007)

## 2.7. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Para classificar os processos de conformação, os principais parâmetros são a temperatura e o tipo de esforço predominante. A temperatura de trabalho é um parâmetro importante pois influencia na conformabilidade dos metais, portando temperaturas inferiores à de recristalização encontra-se no forjamento a frio, nesta faixa de temperatura a resistência ao escorregamento dos planos cristalinos, cresce com a deformação, gerando o efeito conhecido como encruamento. Logo acima da temperatura de recristalização se dá como forjamento a quente, devido à elevada temperatura, o efeito de encruamento é neutralizado durante o processo de forjamento devido a recristalização. (GRÜNING, 1973)

Já o forjamento a morno se situa em uma temperatura intermediária, visando unir as qualidades dos dois processos de forjamento a frio e forjamento a quente, portanto facilita a obtenção de peças de maior complexidade aliada com excelente acabamento superficial. Para esse tipo de processo de forjamento a morno se encontra no limite superior definido pelo aumento de força de forjamento, e o limite inferior pela oxidação, sendo utilizado como base para esse processo em aços em geral, a temperatura na faixa de 450° e 900°C. Ressaltando que nessa faixa também são restringidas pelas temperaturas de fragilidade ao azul em baixas temperaturas e fragilidade ao vermelho em altas temperaturas, ou seja, nessas faixas os aços tem redução na ductibilidade e conformabilidade. (SCHAEFFER,2004).

Com o intuito de refinar a classificação por temperatura, utiliza-se como parâmetros a temperatura homóloga ( $T_h$ ), que consiste na relação entre temperatura

do *blank* ( $T_{mat}$ ), e a temperatura no início de fusão do material a ser forjado ( $T_{fusão}$ ), ambas devendo ser em Kelvin, baseado nisso tem-se a equação (12).

$$T_h = \frac{T_{mat}}{T_{fusão}} \quad (12)$$

A subdivisão do processo quanto à temperatura é mostrada na Tabela 3. (HELLMAN E CETLIN, 2013)

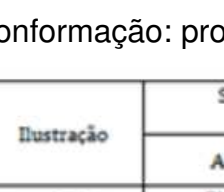
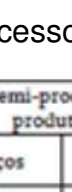


Tabela 3 - Classificação do processo em função da temperatura homóloga

Temperatura Homóloga	Classificação do processo
$0 < T_h \leq 0,3$	Frio
$0,3 < T_h \leq 0,5$	Morno
$0,5 < T_h \leq 1$	Quente

Fonte: (Compilado de Helman e Cetlin, 2013)

Além da classificação por temperatura, é possível classificar por tipo de esforço, sendo assim, têm-se os processos de compressão direta, compressão indireta, tração, cisalhamento e flexão, conforme Tabela 4. (BRESCIANI FILHO et al., 2011)

Tabela 4 - Classificação dos processos de conformação: processos e produtos

Processo	Força preponderante	Trabalho		Ilustração	Semi-produtos ou produtos	
		A quente	A frio		Aços	Não ferrosos
Laminação	Compressão direta	x			Placas Chapas Barras Perfis	Placas Chapas Barras
			x		Chapas	
Trefilação	Compressão indireta		x		Barras Arames Fios	Barras Arames Fios Tubos
Extrusão	Compressão indireta	x			Tubos	Barras Tubos Perfis
			x		Peças pequenas extrudadas	Peças longas extrudadas
Forjamento	Compressão direta	x			Peças forjadas	
			x		Peças pequenas forjadas	

Fonte: (Bresciani Filho et al., 2011, p. 16)

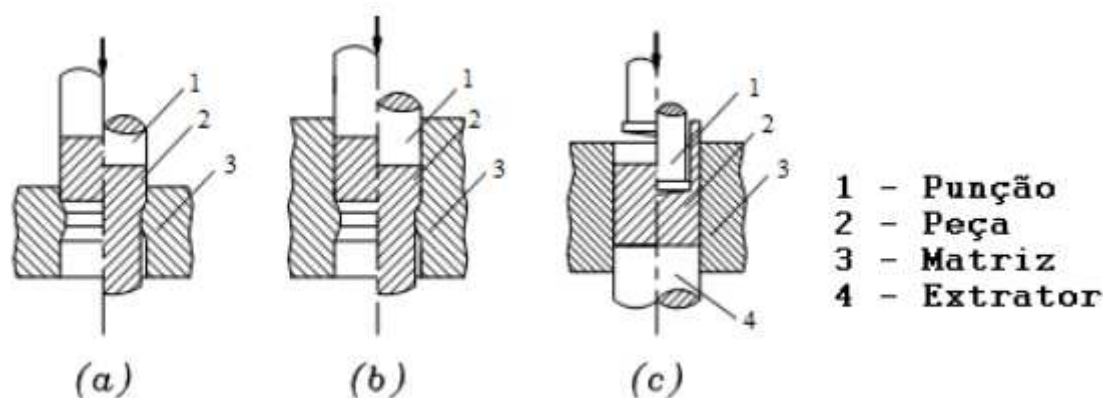
Importante salientar que os processos de forjamento, pode ser caracterizado, quanto a direção do fluxo de material, como exemplo, extrusão direta, extrusão inversa ou até mesmo processos combinados, dependendo da necessidade para obtenção da peça.

## 2.8. EXTRUSÃO

A extrusão a frio é um processo que consiste em aplicar uma força de compressão em um *blank*, fazendo que ele escoe por uma matriz com a forma desejada. (SCHAEFFER, 2004)

Esse processo pode ser dividido em extrusão direta (quando o fluxo de material escoar no sentido do movimento da aplicação da carga de compressão), a extrusão indireta ou inversa (quando o fluxo de material escoar para lado oposto a carga de compressão) e extrusão combinada (quando ocorre movimentos em ambos os sentidos). Sendo ainda possível subdividir em extrusão confinada, quando o *blank* está totalmente guiado dentro da matriz, e extrusão livre quando o *blank* não se encontra guiado totalmente na matriz. (BUTTON, 1999), conforme Figura 20.

Figura 20 - Tipos de extrusão: (a) Extrusão direta livre; (b) Extrusão direta confinada; (c) Extrusão inversa.



Fonte: (Adaptado de Button, 1999, p. 5)

Vale destacar que, de maneira geral, as forças exigidas para os processos de extrusão a frio em aços são elevadas, sendo assim necessita de máquinas robustas para a execução do processo. Outro fator importante é que na extrusão existem limitantes impostos pela resistência da matriz bem como o limite do aço a ser extrudado. (GRÜNING, 1973)

Para simplificar o entendimento na Tabela 5, é proposta uma classificação qualitativa quanto à conformabilidade dos aços para forjamento a frio. (BUTTON, 1999).

Tabela 5 - Classificação qualitativa de aços para trabalho a frio

ÓTIMA	BOA	REGULAR	RUIM
1008	1018	1035	1045
1010	1020	1038	1050
1013	1022	1040	1060
1016	1024	2330	1070
1017	1030	3140	1080
3115	3120	4130	1340
5015	3130	4140	4340
5115	4037	5140	4640
	5120	8640	6150
	8620		52100

Fonte: (Adaptado de Button, 1999, p. 23)

## 2.9. FORÇA DE EXTRUSÃO

Conforme GRÜNING, (1973) para determinar a força mínima necessária para a realização de uma determinada extrusão, pode ser calculada pela Equação (13).

$$F_e = A_0 \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \varphi_a \cdot \left(1 + \frac{2\mu}{\text{sen } 2\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varphi_a}\right) \quad (13)$$

Onde:  $\alpha$  representa o semi ângulo de entrada da matriz,  $d_0$  é diâmetro inicial do *blank*, o  $h_0$  representa a altura inicial do *blank*; e o  $d_1$  é o diâmetro final do *blank*.

Para a execução do cálculo pela equação (13), necessita-se de algumas informações como área da seção " $A_0$ ", tensão de escoamento médio " $\bar{\sigma}_e$ ", a deformação real em função da área " $\varphi_a$ " e por último o coeficiente de atrito " $\mu$ ".

A área da seção transversal circular inicial " $A_0$ " e final " $A_1$ ", são calculadas pela equação (14).

$$A_0 = \pi \cdot \frac{d_0^2}{4} \quad \therefore \quad A_1 = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \quad (14)$$

Já para a o cálculo da tensão média “ $\overline{\sigma_e}$ ”, utiliza a média apresentada na equação (15). (SCHAEFFER, 2007)

$$\overline{\sigma_e} = \frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2} \quad (15)$$

Importante ressaltar que “ $\sigma_0$ ” e “ $\sigma_e$ ” foram mencionados na Equação (11).

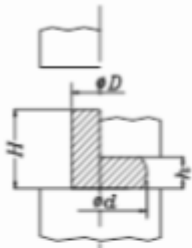
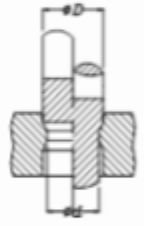
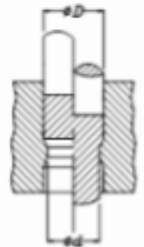
Portanto, para ser possível calcular a “ $F_e$ ”, necessita-se relacionar a deformação real com as áreas iniciais e finais da extrusão pela equação (16):

$$\varphi_a = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (16)$$

## 2.10. GRAU DE REDUÇÃO NA EXTRUSÃO DIRETA CONFINADA

Na extrusão confinada, são possíveis para aços de uma boa conformabilidade redução de área em torno de 70 a 75% por passe, já em aços de média a baixa conformabilidade a redução máxima possível de alcançar é de 50 a 55%, porém o limitante para que isso aconteça é a resistência mecânica dos materiais empregados na construção das ferramentas. Vale salientar que o comprimento do tarugo deve-se limitar entre duas a oito vezes, não sendo possível ultrapassar isso, devido o aumento considerável dos esforços de atrito no confinamento. (BUTTON, 1999). Para exemplificar a Tabela 6 apresenta as limitações do processo de extrusão.

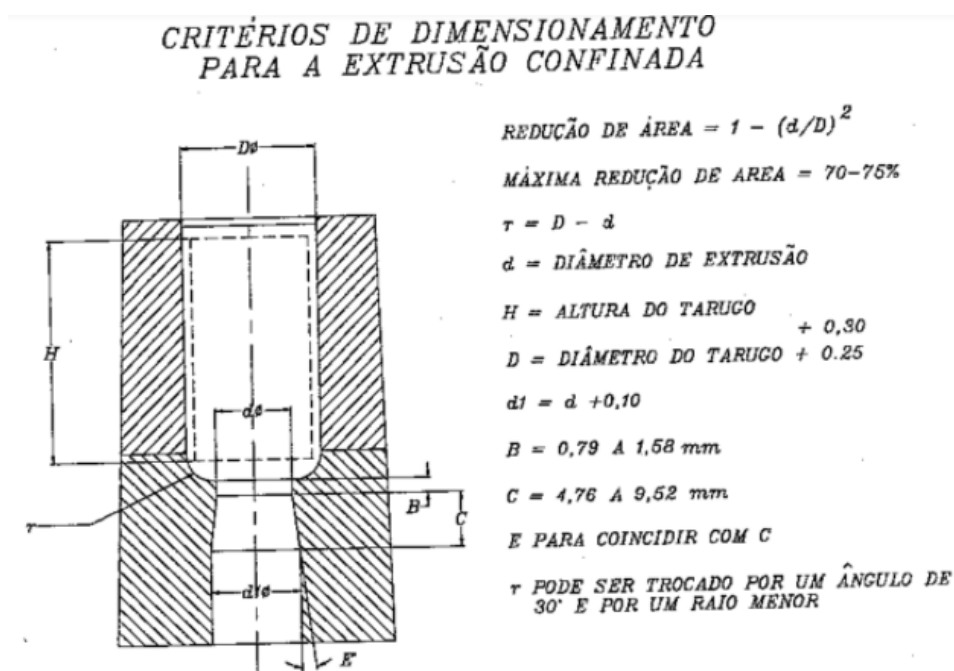
Tabela 6 - Limitações de deformação para os processos a frio de recalque, extrusão direta livre, extrusão direta confinada e extrusão indireta.

<i>Processo</i>	<i>Limite</i>
	$H < 2.5D$ $d < 2D$ $h > 0.25H$
	$d > 0.85D$
	$d > 0.5D$

Fonte: (Adaptado de Button, 1999, p. 8)

No caso de uma extrusão confinada, não tem influência dos fatores de flambagem, devido ao *blank*, estar confinado dentro da matriz, porém existem algumas regras que devem ser seguidas nos ferramentais para que possa ser possível atingir o processo de extrusão, conforme Figura 21.

Figura 21 - Critério para a obtenção das dimensões da matriz na extrusão confinada.



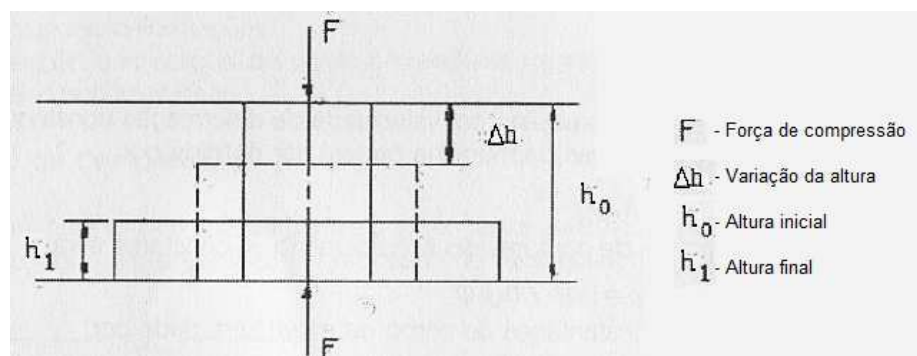
Fonte: (Button, 1999, p. 23)

Conforme Button (1999), há uma indicação de no ângulo da matriz de extrusão seja de 30°, para aços, isso auxilia na redução de esforço nas matrizes e conseqüentemente o aumento da vida útil da ferramenta.

## 2.11. RECALQUE E FORÇA DE RECALQUE

O processo de recalque simplesmente consiste em realizar uma compressão de um *blank*, até o mesmo atingir a deformação plástica conforme demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Representação de recalque livre



Fonte: (Schaeffer, 2004, p.42)

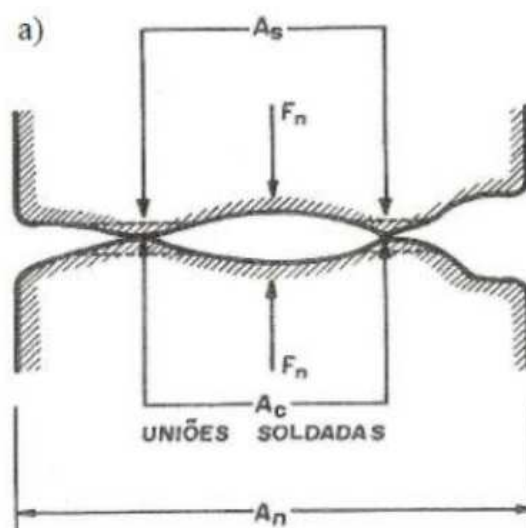
Para ser possível calcular a força de recalque " $F_{Rq}$ ", conforme descrita pela equação (17). Segundo Schaeffer (2007), a força para realizar um recalque livre pode ser determinada em função da altura " $h_0$ " e " $h_1$ ", além do atrito " $\mu$ ", da tensão de escoamento " $\sigma_e$ " e da área final " $A_1$ ".

$$F_{Rq} = A_1 \cdot \sigma_e \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1} \right) \right] \quad (17)$$

## 2.12. ATRITO E LUBRIFICAÇÃO

No processo de extrusão um fator de extremo impacto é o atrito, geralmente conhecido como atrito de contato, sendo conceituado como um mecanismo que aumenta a resistência ao deslizamento nas superfícies em contato, no caso do forjamento o contato entre *blank/matriz*. Para exemplificar esse mecanismo ocorre devido ao efeito de micro irregularidades entre superfícies, que com o aumento da força de compressão, maior serão as áreas de contato " $A_c$ " e áreas cisalhantes " $A_s$ ", derivando a uma área nominal " $A_n$ ". (HELLMAN e CETLIN, 2013)

Figura 23 - Representação da rugosidade em nível microscópico.



Fonte: (Adaptado de Helman e Cetlin, 2013, p. 77)

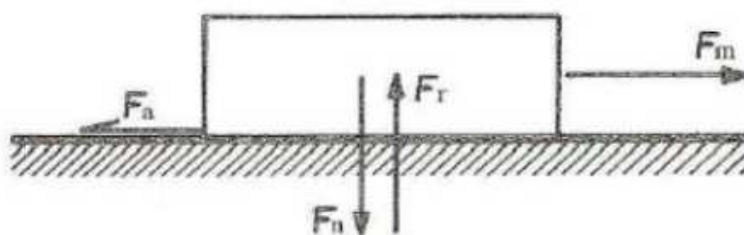
O fator de atrito de Coulomb (ou Coulombiano), pode descrito na equação (18) e ilustrado por uma experiência de deslizamento de blocos simples, conforme



demonstrado na Figura 24. Sendo, a força de atrito “ $F_a$ ” (N), a força de movimentação “ $F_m$ ” (N) e força de atrito se opondo a força normal “ $F_r$ ” (N). (HELLMAN e CETLIN, 2013)

$$\mu = \frac{F_a}{F_r} \quad (18)$$

Figura 24 - Forças presentes no deslizamento de um corpo



Fonte: (Adaptado de Helman e Cetlin, 2013, p. 74)

Vale salientar que após as simplificações matemáticas, chega-se a uma simplificação da Lei de Coulomb, descrita na equação (19), já na equação (20) representa a Lei de Amontons, onde “ $m_a$ ” (valor entre 0 e 1), sendo previsto para correção das sujidades da superfície, e o parâmetro “ $k$ ” sendo o coeficiente de atrito na condição de superfície extremamente limpa. (HELLMAN e CETLIN, 2013)

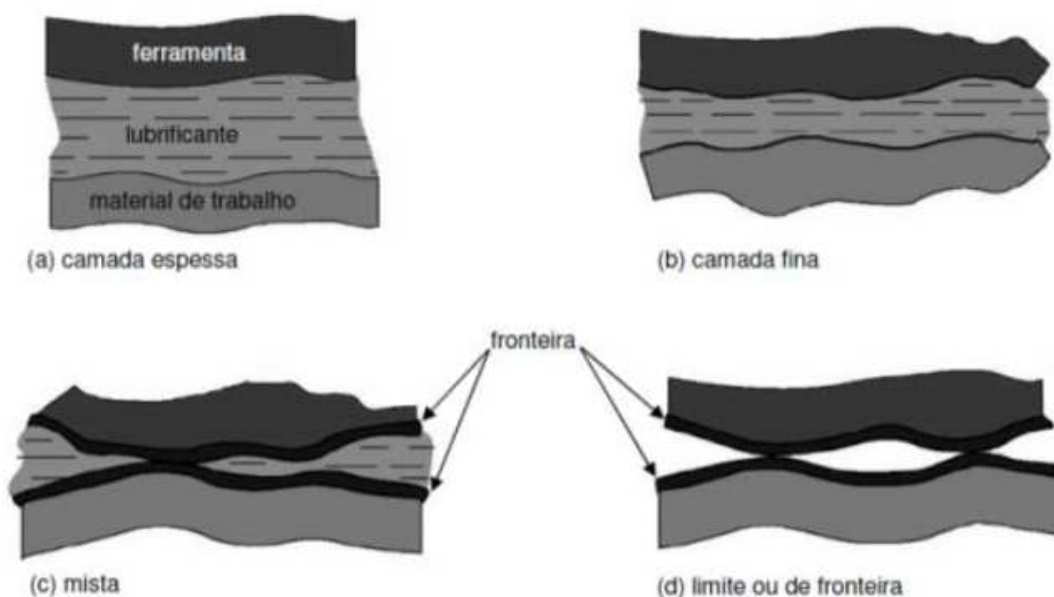
$$F_a = \mu \cdot F_n \quad (19)$$

$$\tau = \frac{\mu \cdot F_n}{A_n} \cong m_a \cdot k \quad (20)$$

No forjamento a frio, a lubrificação é conhecida como fosfatização/ensaboamento, sendo que a fosfatização sempre precede a aplicação de algum lubrificante, tratando basicamente de um sabão alcalino. Esta etapa é de extrema importância pois favorece a redução das forças de atrito existentes na região de interface metal/matriz, reduzindo a força de forjamento, além de auxiliar no aumento de vida útil do ferramental. (SCHAEFFER, 2006)

Os lubrificantes são divididos em secos (sólidos) e líquidos (hidrodinâmica). Os lubrificantes que são considerados líquidos a viscosidade se torna o parâmetro mais importante na preparação dos *blanks*, pois tem capacidade de formar uma película com potencial de 10 vezes maior que a rugosidade superficial, sendo assim elimina a possibilidade de contato direto entre *blank/matriz*. (HELLMAN e CETLIN, 2013)

Figura 25 - Tipos de lubrificação hidrodinâmica



Fonte: (Geier, 2007, p. 35)

Já a lubrificação sólida, necessita uma boa aderência ao substrato metálico, sendo assim a sua aplicação exige mais controle e um processo de aplicação mais complexo, sendo necessário processos de limpeza da superfície por decapagem química, após essa limpeza o *blank*, passa por um processo químico com o intuito servir de âncora para o lubrificante, que geralmente utilizado fosfato de zinco para aços de baixo carbono. Portanto para o processo de forjamento a frio, o uso de óleos e graxas, não são empregados devido à facilidade de ser expulsos e não suportarem elevadas temperaturas desenvolvidas no processo de forjamento. (GRÜNING, 1973)

Conforme Schaeffer (2006), o coeficiente de atrito é um dado de extrema importância para cálculos ou simulações, portanto para a definição do coeficiente de atrito, o teste do anel e o teste do tubo cônico, e traz valores de coeficiente de atritos, conforme explicitado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores referenciais de atrito para o processo de extrusão a frio

Processo	Extrusão direta	
	Peças Maciças	Peças Vazadas
Fator de Atrito	0,04 até 0,08	0,1 a 0,125

Fonte: (Schaeffer, 2006, p. 75)

Conforme Button (1999), indica que peças que foram lubrificadas á base de fosfato de zinco e sabão, o coeficiente de atrito é correspondente a 0,05.

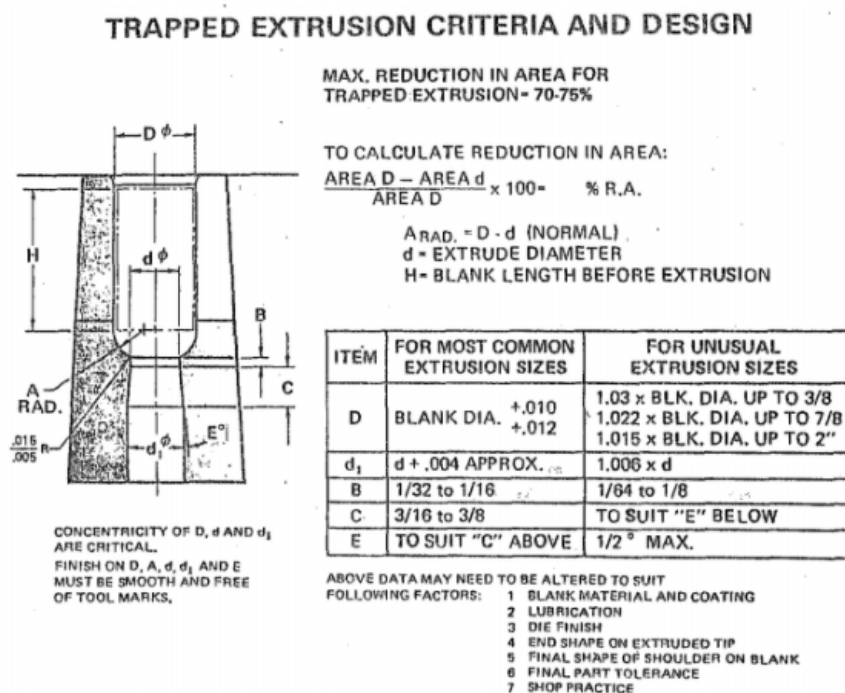
### 2.13. PROJETO DE MATRIZES

Para o processo de forjamento a frio, um fator importante é o projeto das ferramentas de conformação, por sua vez ela serão responsáveis por dar a forma do produto a ser forjado. Além disso, são submetidas a extremas pressões internas, que exigem um projeto robusto para que suportem a cargas durante o forjamento. Para isso utiliza-se materiais de alta resistência mecânica, com características especiais para suportar desgaste por abrasão, e a compressão.

Segundo Button (1999), são necessário 4 aspectos para a definição de um ferramental de forjamento, sendo elas: geometria da matriz, as forças e pressões que a matriz deverá suportar, escolha dos materiais para a construção do ferramental o encarcamento e anéis de contração.

Para um projeto de extrusão confinada a frio, geralmente é resultado de experiência e prática dos engenheiros, mas existem normas de construção que orientam quanto às geometrias, ângulos e folgas usuais. A Figura 26 ilustra a geometria indicada para um processo de extrusão confinada.

Figura 26 - Critérios de dimensionamento de matriz para extrusão confinada.

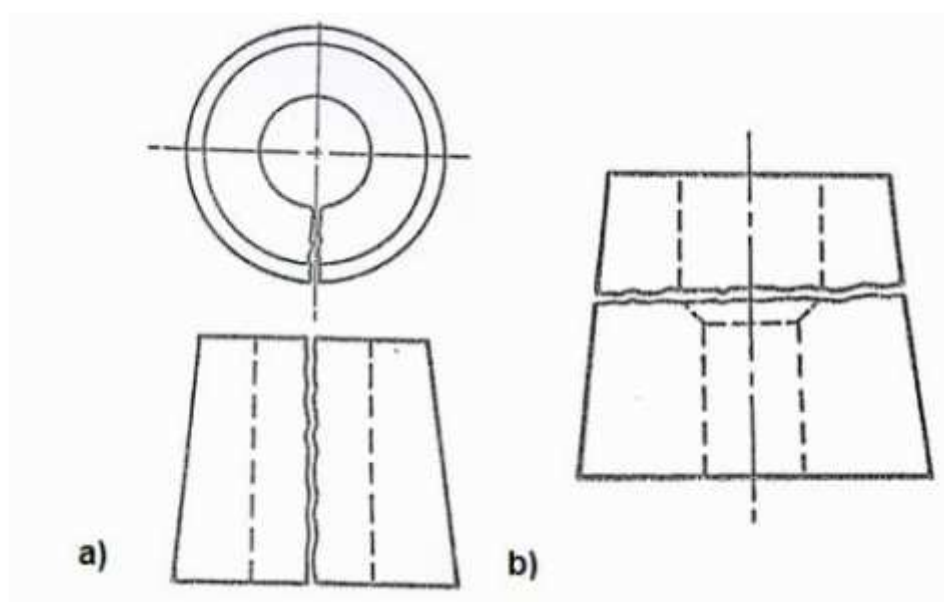


Para verificar se a matriz irá suportar as altas pressões internas, que será submetida durante o processo de extrusão, GRÜNING (1973) ilustra uma forma simplificada onde considera a matriz como um tubo de parede espessa. Onde a máxima pressão radial admissível “ $P_r$ ” (MPa) é dada pela equação (22), sendo em função do diâmetro inicial e final e da tensão de escoamento “ $\tau_{eq}$ ”.

$$P_R = \frac{1 - \frac{d_0}{d_1}}{2} \tau_{eq} \quad (21)$$

Baseado nesse método de cálculo, se a pressão da matriz for superior à pressão admissível, favorecerá a ruptura da ferramenta. Porém as fraturas têm diferentes tipos de avarias possíveis, no forjamento as falhas mais frequentes são as fraturas longitudinais e fraturas radiais ou transversais. (RODRIGUES e MARTINS, 2010). Para ilustrar isso a Figura 27, ilustra as matrizes fraturadas.

Figura 27 - Matrizes fraturadas: a) Fratura longitudinal; b) Fratura radial.



Fonte: (Adaptado da National, 1986, p. 150)

Conforme ilustrado na Figura 27, as fraturas do tipo A, falhas do tipo longitudinal são resultados de um encarçamento inadequado, ou seja, as tensões desenvolvidas durante o processo de extrusão superaram os limites das tensões compressivas induzidas pela interferência dos anéis de blindagem (encarçamento). Porém, a fratura do tipo B, fratura radial ou transversal, se desenvolve em pontos específicos da geometria da ferramenta que servem de concentradores de tensão, onde se propaga

uma trinca e vai evoluindo a cada ciclo, sendo isso frequente na troca de secção. (NATIONAL, 1986).

Para o processo de forjamento, o encarçamento é primordial para o projeto de matrizes, pois devido às elevadas cargas geradas durante a extrusão a frio, superam os limites de resistência que as matrizes por si próprias podem suportar. Portanto é utilizado o recurso do encarçamento, que visa induzir nos ferramentais tensões compressivas tangenciais e radiais, através de anéis de contração, que são definidos devido às cargas que poderão ser geradas durante o processo. Os encarçamentos geralmente são feitos a frio ou por dilatação térmica, sendo importante salientar que estes anéis que não podem ultrapassar seu limite elástico, pois se ultrapassar esse limite é gerada a fratura também. A Tabela 8, demonstra algumas diretrizes empíricas para encarçamento. (BUTTON, 1999)

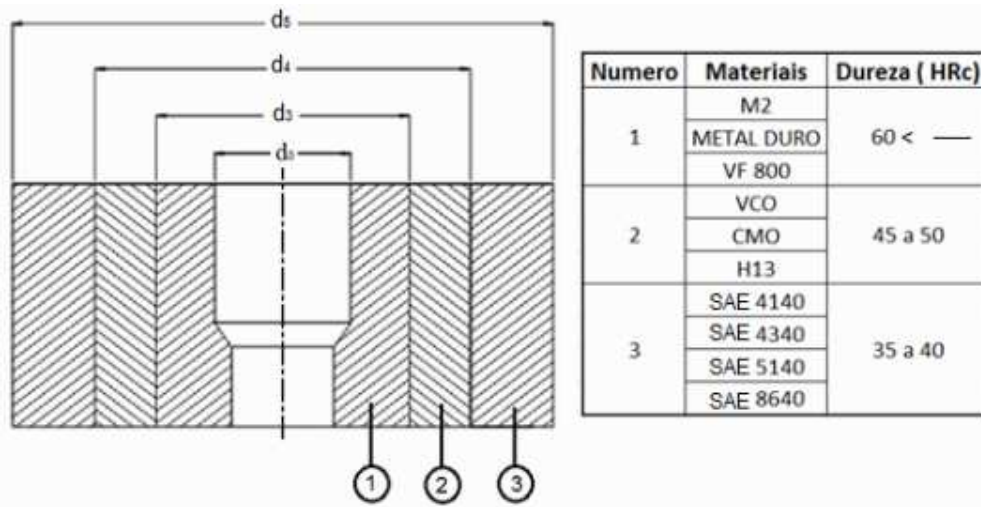
Tabela 8 - Diretrizes para quantidade de anéis de encarçamento

Pressão Interna ( $p_i$ ) N/mm <sup>2</sup>	Número de anéis requeridos	D/d	Diâmetro intermediário aproximado
$p_i < 1000$	nenhum	4 a 5	
$1000 < p_i < 1600$	um	4 a 6	$d_1 \approx 0.9 \sqrt{D \cdot d}$
$1600 < p_i < 2000$	dois	4 a 6	$d : d_1 : d_2 : D \approx 1 : 1.6 \text{ a } 1.8 : 2.5 \text{ a } 3.2 : 4 \text{ a } 6$

Fonte: (Button, 1999, p. 44)

Sendo a interferência diametral segundo BUTTON, (1999) é geralmente de 0,2% á 0,4% do respectivo diâmetro de interface. Os materiais indicados para esse tipo de projeto têm resistência decrescente partindo do núcleo para a periferia, como ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Anéis de contração em matriz de extrusão, com os respectivos materiais e durezas.



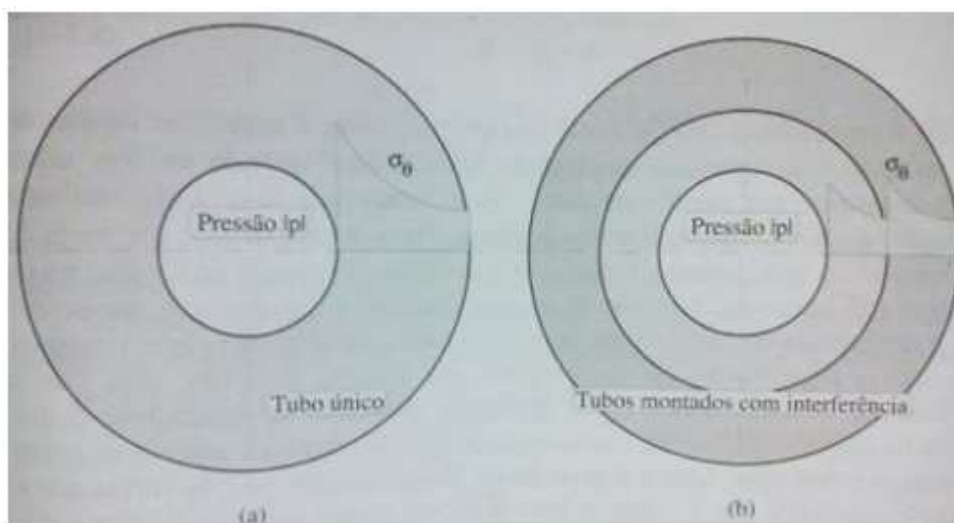
Fonte: (Compilado de National, 1986 e Button, 1999)

Com o intuito de determinar se o encarçamento está de maneira adequada, GRÜNING (1973), descreve uma relação entre a equação (22), aplicando nas matrizes e anéis de encarçamento, ainda somando as resistências que são oriundas do processo de forjamento. Além disso sendo levado em consideração os índices 1,2 e 3, contidos na Figura 28, com o intuito de identificar as variáveis, sendo assim a equação (22) resulta na pressão interna admissível encarçada “ $P_{re}$ ”.

$$P_{re} = \underbrace{\left( \frac{1 - \left( \frac{d_0}{d_{3,i}} \right)^2}{2} \tau_{eq} \right)}_1 + \underbrace{\left( \frac{1 - \left( \frac{d_3}{d_{4,i}} \right)^2}{2} \tau_{eq} \right)}_2 + \underbrace{\left( \frac{1 - \left( \frac{d_4}{d_5} \right)^2}{2} \tau_{eq} \right)}_3 \quad (22)$$

Quando é realizado o encarçamento a distribuição de tensão entre a matriz e a matriz encarçada pode ser demonstrada na Figura 29.

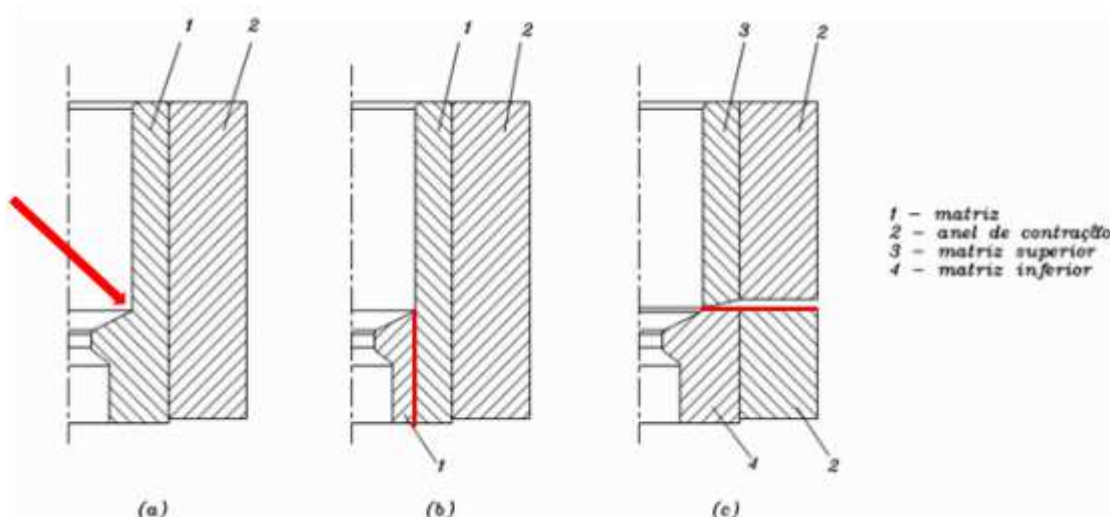
Figura 29 - Representação da distribuição de tensão: (a) tubo de parede espessa e (b) tubo encarçado.



Fonte: (Groehs, 2006, p. 8 - 33)

Vale salientar que não somente com os encarçamentos definidos, pode-se entender que o projeto está pronto. Conforme Button (1999), o perfil de montagem pode ocasionar em fraturas devidos a concentradores de tensão, baseado nisso sugere-se alguns artifícios de projeto ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Formas construtivas para matrizes: (a) Ponto de concentração de tensão; (b) Matriz seccionada longitudinalmente; (c) Matriz seccionada perpendicularmente.



Fonte: (Button, 1999, p. 42)

Porém, atualmente esses tipos de análises, são passíveis da utilização de simulações em softwares específicos de conformação, que tem o intuito de facilitar o

projeto de ferramentas, favorecendo o entendimento dos resultados obtidos por meio de simulações.

#### 2.14. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROCESSO DE FORJAMENTO

Devido à necessidade de manter a competitividade entre as indústrias do setor metal mecânico, onde o importante é produzir cada vez mais rápido ao menor custo, fica de certa forma inviável fazer melhorias nos processos ou lançar novos produtos através de métodos empíricos. Ou em atividade realizadas conhecida como “tentativa e erro”, sendo desta maneira o custo de produção aumenta e se torna inviável lançar produtos competitivos comercialmente. (SCHAEFFER, 2006)

A utilização de simulação pelo método de volumes Finitos (MVF) e elementos finitos (FEM), acelera o desenvolvimento, pois é possível resolver problemas complexos físicos matemáticos, além de fornecer dados como força de forjamento, preenchimento, possíveis defeitos durante o processo de forjamento.

Para Bresciani Filho (2011), as utilizações do método de elementos finitos, ocorre resumidamente pelos seguintes passos: a identificação das características do problema, definição do elemento a ser utilizado, divisão dos corpos em diversos elementos, montagem da matriz de rigidez, aplicações das condições de contorno para o equacionamento e resolução das variáveis de interesse.

Durante o processo de simulação de uma extrusão a frio, com auxílio de um software de simulação, necessita ter claro os principais parâmetros que os softwares utilizam para a resolução. (SCHAEFFER, 2006)

- I. Tipo, tamanho e número de elementos;
- II. Tipo de Solução (Térmicos, Mecânico ou termomecânico);
- III. Método de integração;
- IV. Curva de escoamento;
- V. Atrito;
- VI. Propriedades mecânicas e parâmetros térmicos.

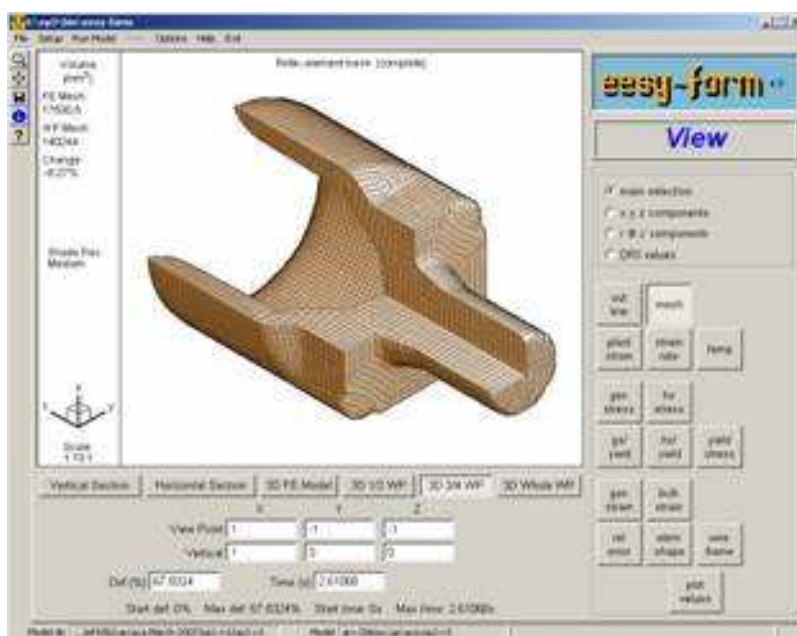
Atualmente existem diversas ferramentas de simulação de forjamento no mercado, todas com as análises de volume finito e elemento finito, sendo as mais conhecidas, Eesy-2-Form, Larstran/Shape, Qform, Simufact Forming, Forge. Esses softwares já se comunicam com softwares de CAD.



## 2.15. EESY-2-FORM

Para a realização deste trabalho, foi utilizado o software Eesy-2-form de análise de elementos e volumes finitos, que permite realizar a simulação do processo de forjamento. Basicamente o *setup*, inicia acrescentando o perfil do *blank*, podendo ser importado direto do modelo CAD, onde permite a inserção de dados como: perfil do *blank*, perfil das ferramentas superiores e inferiores, dados de material a ser forjado e parâmetros de máquinas. Após realizar esse *setup*, o software permite que realize a simulação de forjamento, conforme Figura 31.

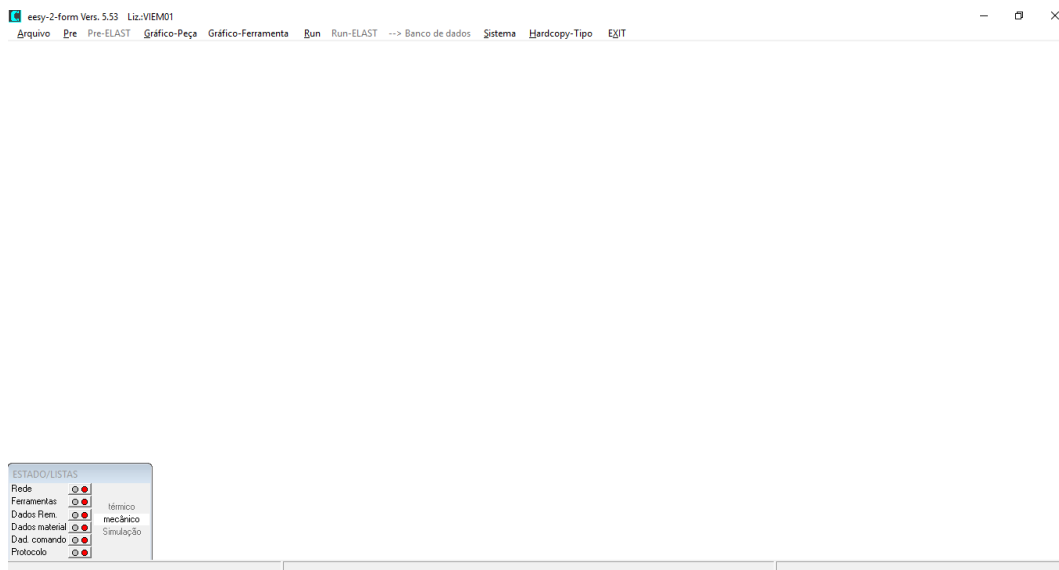
Figura 31 - Ilustração do software Eesy-2-form



Fonte: (Metalforming, 2020, s.p.)

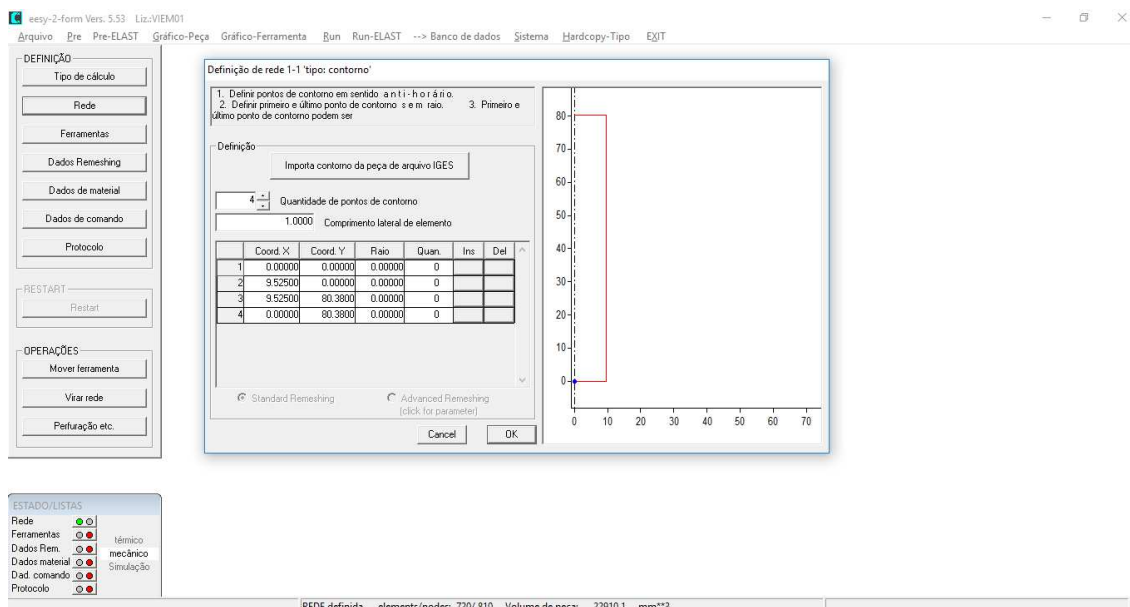
Para exemplificar o processo de preparação e interface do software, na Figura 32 é mostrado a tela inicial do Eesy-2-Form.

Figura 32 - Tela inicial do Eesy-2-Form



Fonte: (Elaborado pelo autor)

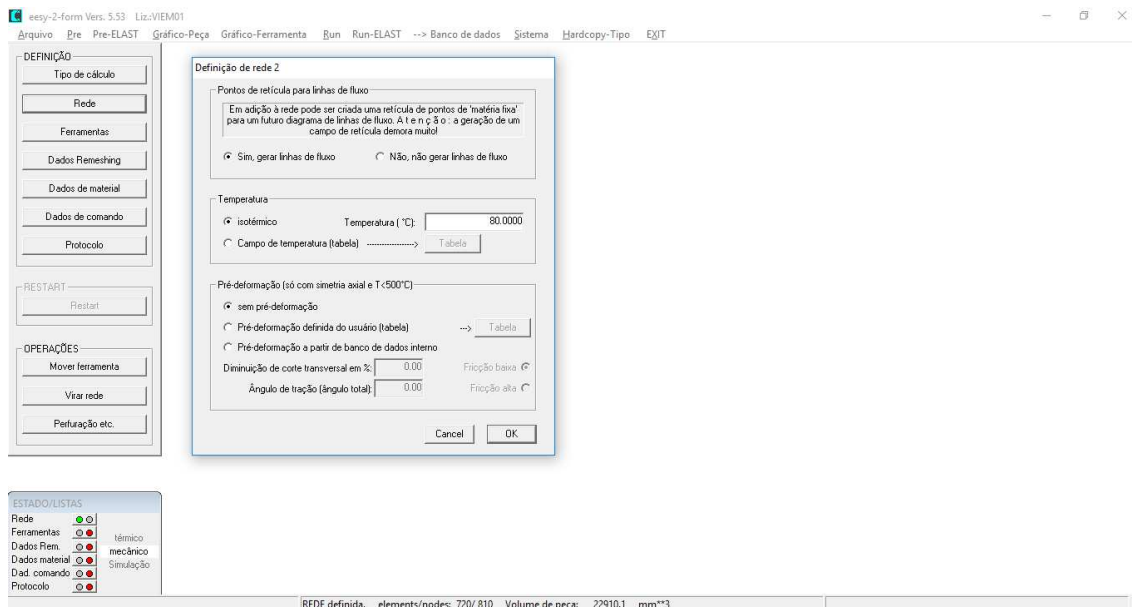
Na Figura 33, ilustra-se a tela REDE onde se informa o perfil do *blank*. Vale salientar que, por se tratar de uma análise axissimétrica, deve ser informado os diâmetros em forma de raio.

Figura 33 - Preparação do perfil do *blank*, no Eesy-2-form

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Após a definição do perfil do blank, deve se informar a temperatura de trabalho, esse parâmetro é 80°C, conforme Figura 34.

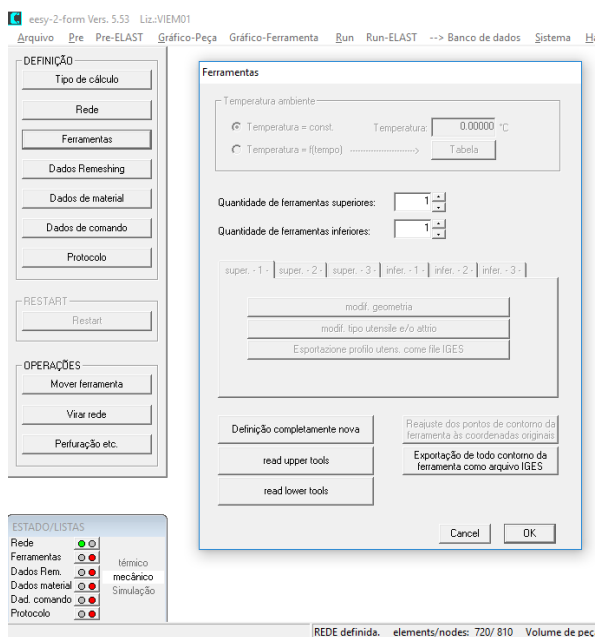
Figura 34 - Tela de definição da temperatura de trabalho.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Já na Figura 35, representa-se a aba FERRAMENTAS, onde se insere o perfil das ferramentas superiores e inferiores, salientando-se que esses perfis, foram extraídos diretamente do software CAD.

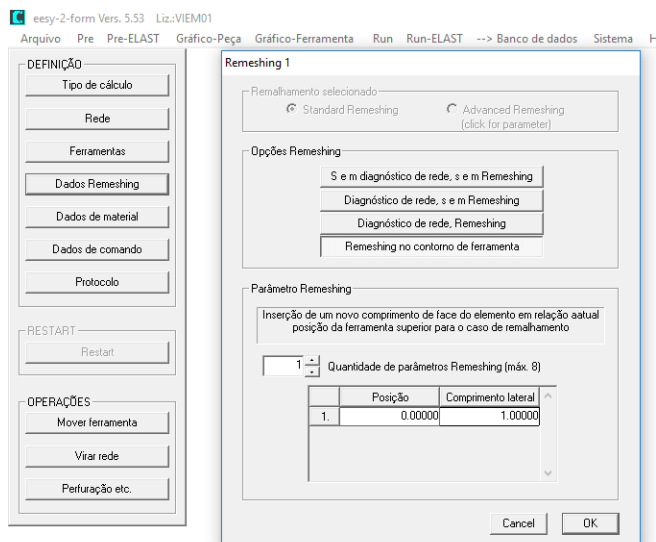
Figura 35 - Aba FERRAMENTAS, no Easy-2-Form



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Já na Figura 36, deve-se definir o tamanho da malha quadrática, usual para esse tipo de simulação, usando o parâmetro 1 mm.

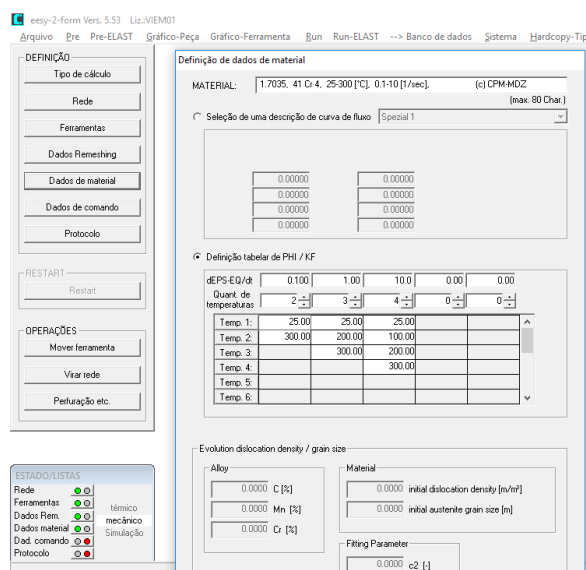
Figura 36 - Aba *REMESHING*, no Eesy-2-Form



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Com o perfil do *blank* e dos ferramentais, a próxima etapa ilustrada na Figura 37, é a definição do material que será ser forjado, importante destacar que a biblioteca de materiais foi obtida na aquisição do software. Esses dados foram adquiridos através de ensaios nos laboratórios da CPM (*Gesellschaft für Computeranwendung, Prozess – und Materialtechnik mbH*).

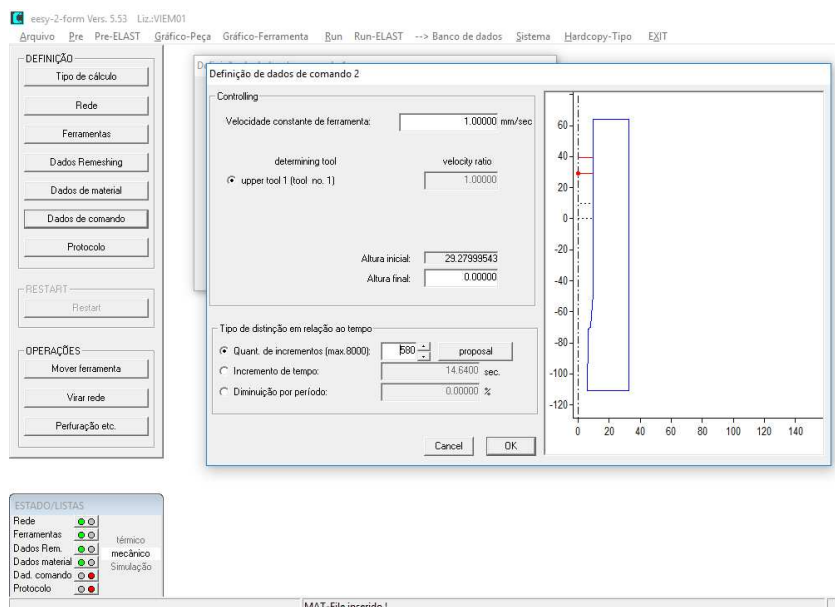
Figura 37 - Aba *MATERIAL*, no Eesy-2-Form



Fonte: (Elaborado pelo autor)

No próximo passo, na aba DADOS DE COMANDO (Figura 38), define-se os parâmetros de velocidade de deformação (, tipo de prensa a ser utilizada no processo e a posição de início e término de forjamento.

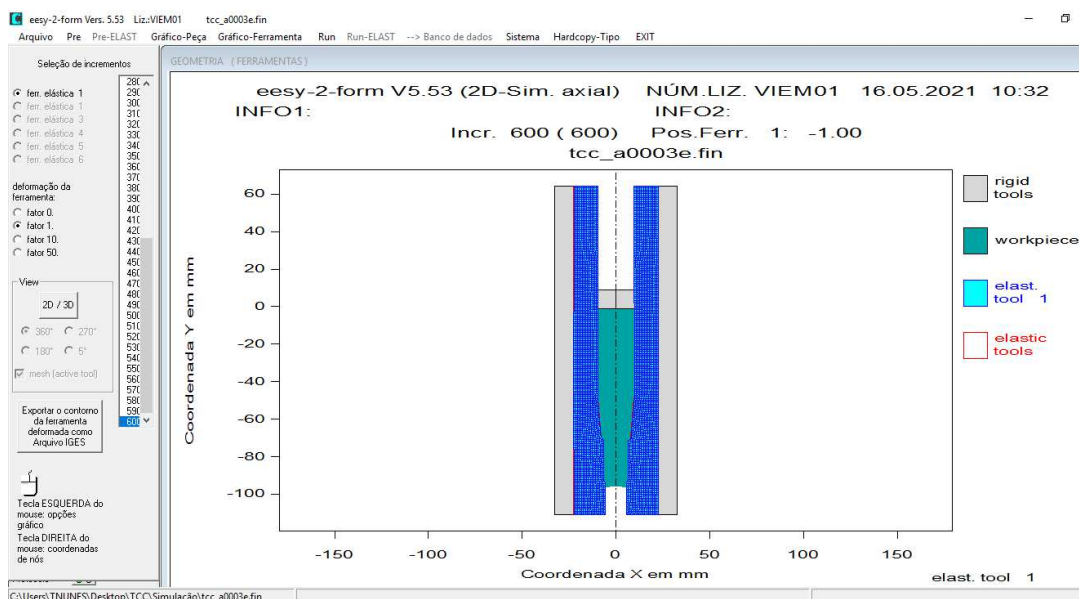
Figura 38 - Aba DADOS DE COMANDO, no Eesy-2-form



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Após a definição dos parâmetros no software, é possível realizar a simulação e os dados gerados são ilustrados na tela de resultados (Figura 39).

Figura 39 - Aba, RESULTADOS, no Eesy-2-form

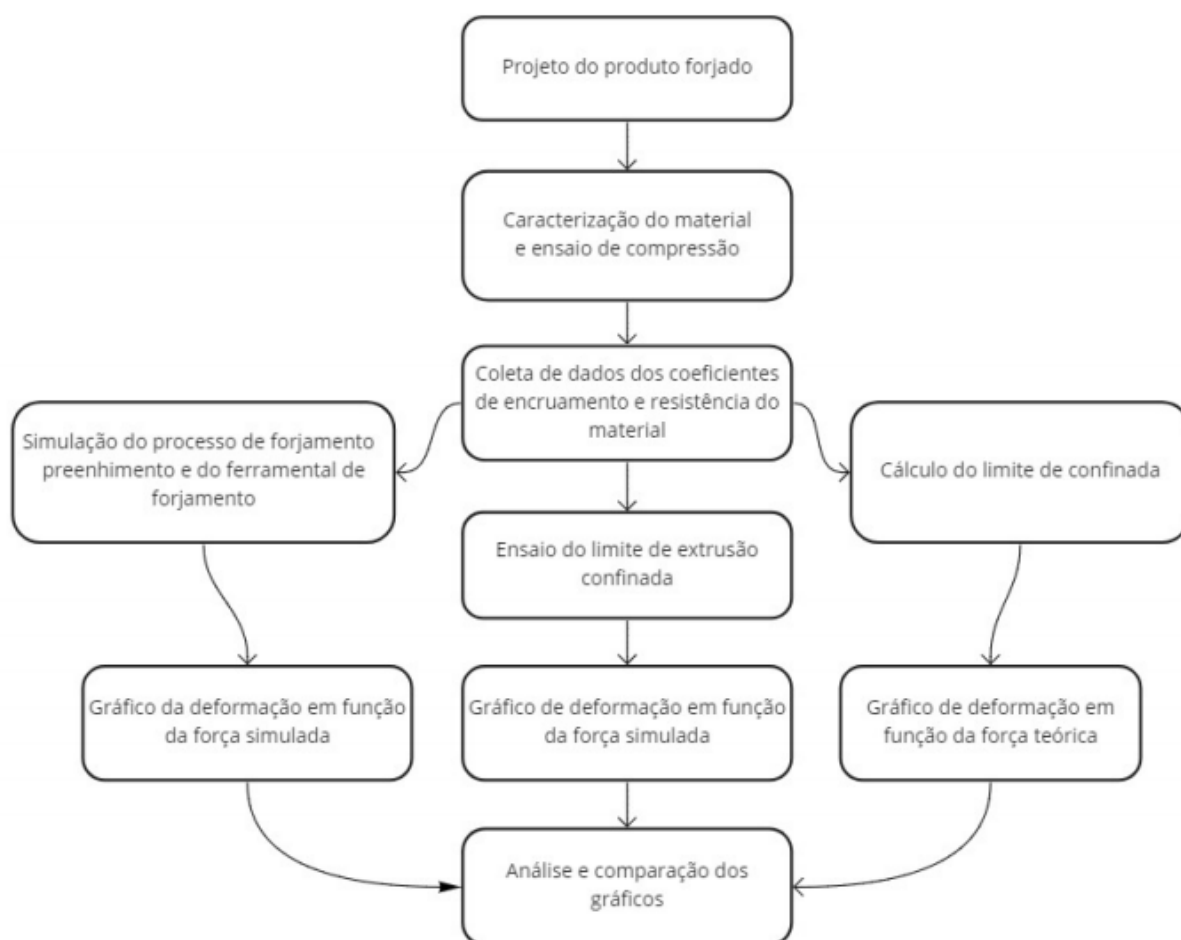


Fonte: (Elaborado pelo autor)

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho foi esboçada para atender os objetivos geral e específicos. Foi elaborado um fluxograma (Figura 40) que ilustra as etapas do trabalho.

Figura 40 - Fluxograma dos ensaios e procedimentos de pesquisa



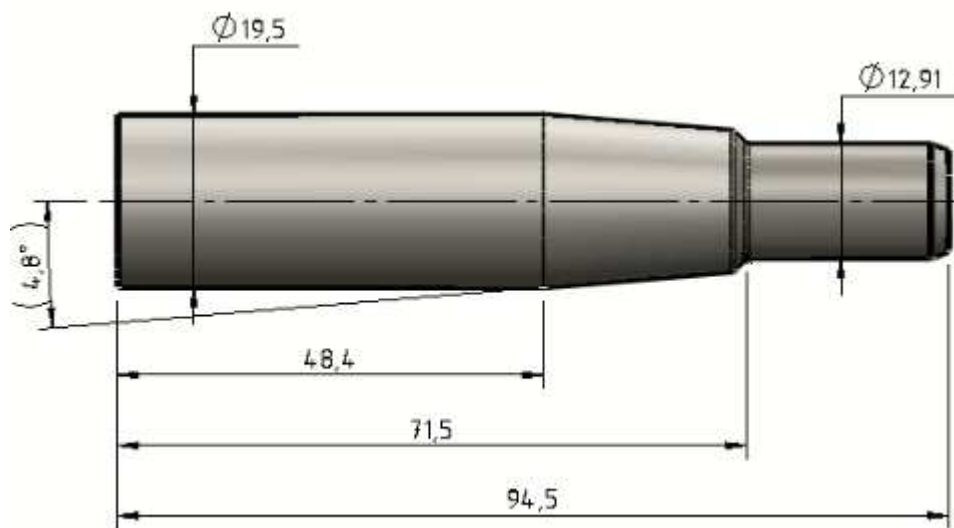
Fonte: (Elaborado pelo autor)

#### 3.1. PROJETO DO PRODUTO FORJADO

Para esse trabalho foi escolhido um pino de fixação da suspensão de carros da linha média, onde se encaixam utilitários com peso bruto total de 1970 kg. Para o projeto forjado, foi considerado a possibilidade de retirar, através de extrusão confinada a peça acabada. Sendo assim o projeto foi elaborado partindo de uma bitola de  $\varnothing$  19,05 mm

de diâmetro, de material DIN 41Cr4, com acabamento trefilado com tolerância h11. Na Figura 41 pode-se ver o *design* do produto.

Figura 41 - Projeto do produto forjado (dimensões em “mm”)



Fonte: (Elaborado pelo autor)

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Foram realizados ensaios destrutivos com base na certificação do aço visando caracterizar o material de estudo (DIN 41Cr4 trefilado com  $\varnothing 19,05$  mm), tais como: certificado de qualidade do aço, perfil de dureza, metalografia e ensaio de compressão.

#### 3.2.1. ANÁLISE DO CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO

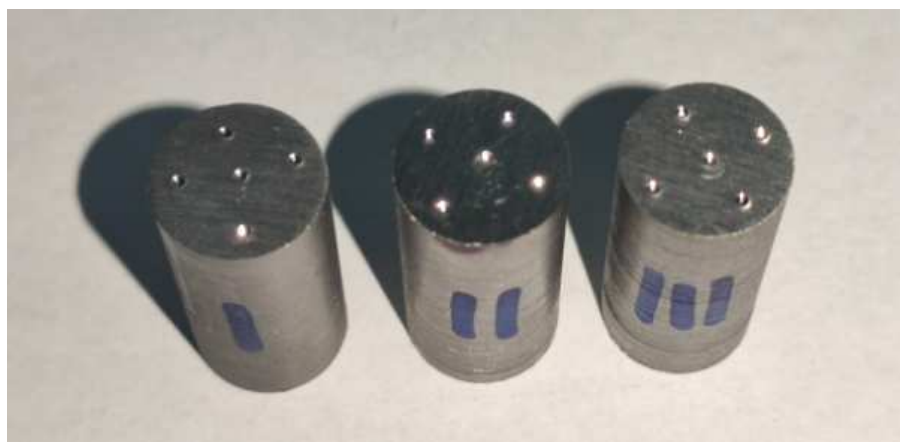
O certificado de qualidade do aço é um documento que é produzido na aciaria (Arcelor Mittal), e acompanha o material até o cliente (Viemar Automotive). Esse certificado é um dos documentos exigidos para a liberação de uma corrida de aço.

Através deste documento se verificada a composição química do material, dureza média do lote, descarbonetação, tamanho de grão e microinclusões, conforme indicado no Anexo B.

### 3.2.2. DUREZA

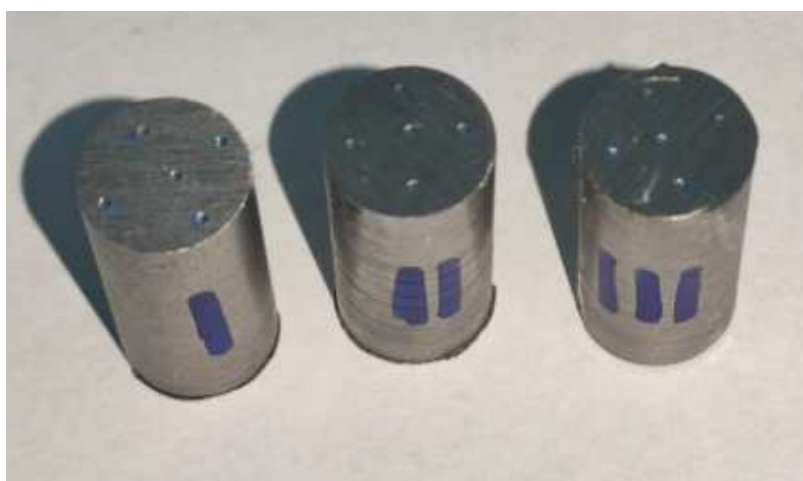
A medição do perfil de dureza, foi realizado em 3 corpos de prova (I,II,III), sendo faceadas suas extremidades para manter o paralelismo. Para cada corpo de prova foram medidos 5 pontos de dureza, sendo distribuídos em: 4 pontos na periferia e 1 ponto central. Nas amostras antes e após tratamento térmico, conforme indicado na Figura 42 e Figura 43.

Figura 42 - Perfil de dureza nos corpos de prova, I, II e III sem tratamento térmico.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Figura 43 - Perfil de dureza nos corpos de prova, I, II e III com tratamento térmico.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Para a realização desta etapa foram utilizados 2 durômetros disponíveis no Laboratório Metalúrgico da Viemar Automotive. O primeiro ensaio foi realizado em amostras sem ToTo, no durômetro MICROTTEST 737, instrumentado com um penetrador esférico de  $\varnothing 2,5$  mm escala em HB, conforme ilustrado na Figura 44.



Figura 44 - Durômetro Microtest 737



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Para realizar a medição de dureza nas amostras com ToTo, foi utilizado um durômetro Heckert, modelo 311/316, fabricante VEBWERKSTOFFPRÜFMASCHINEN instrumentado com um penetrador cônico de 120°, sendo medido a dureza em HRc, conforme Figura 45.

Figura 45 - Durômetro Heckert



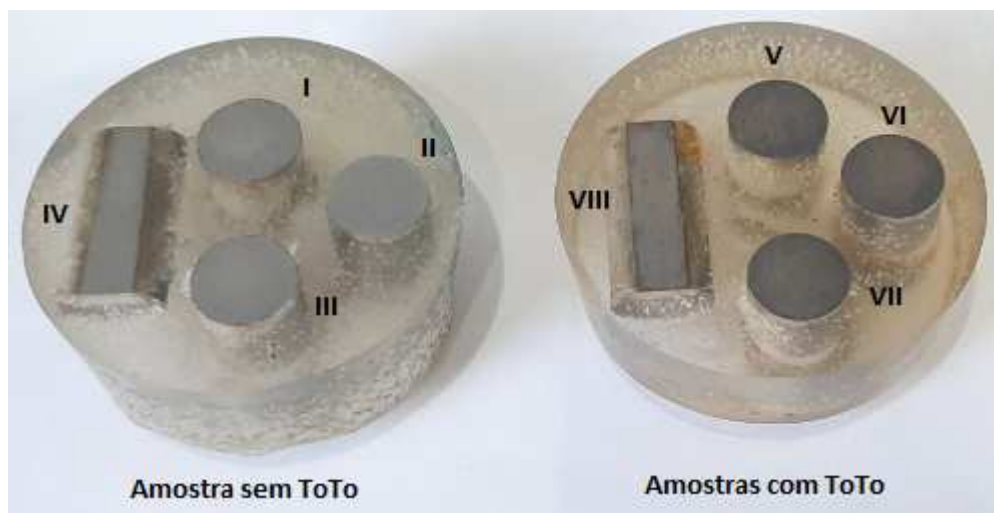
Fonte: (Elaborado pelo autor)

Para a realização da medição, utilizou-se uma pressão de 3 revoluções completas no marcador, sendo recomendado pelo fabricante, com intuito de eliminar folgas dos mecanismos e histerese. A realização deste ensaio possibilitou validar e determinar a dureza pela qual os resultados obtidos nesse projeto.

### 3.2.3. METALOGRAFIA

A metalografia foi realizado nos corpos de prova antes e após tratamento térmico, sendo 4 corpos de prova para cada amostra, onde 3 amostras embutidas de topo e 1 amostra embutida longitudinal. As amostras foram identificadas como I, II, III e IV para as amostras sem ToTo, e V, VI, VII e VIII para as amostras com ToTo. Conforme recomendado, as amostras foram embutidas em resina acrílica, facilitando a visualização metalográfica em microscópio. Para esta análise metalográfica as amostras foram preparadas, sendo lixadas com lixas de granulometria 240, 320, 400, 600, 1200, sendo polido após com um feltro rotativo e adicionado um abrasivo (alumina), com grãos de tamanho médio em suspensão de 0,3  $\mu\text{m}$ , qualificando as amostras o acabamento necessário, conforme a Figura 46.

Figura 46 - Amostras I, II, III e IV sem tratamento térmico, e amostras V, VI, VII e VIII, com tratamento térmico, embutidas e polidas



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Após toda a preparação da amostra, utilizou-se Nital 10% (10% ácido nítrico + 90% álcool), para o ataque químico e analisado as metalografias. Para as análises foi utilizado um microscópio OLYMPUS, modelo MG OLYMPUS TOKYO, Figura 47, do laboratório metalúrgico da Viemar Automotive.

Figura 47 - Microscópio OLYMPUS

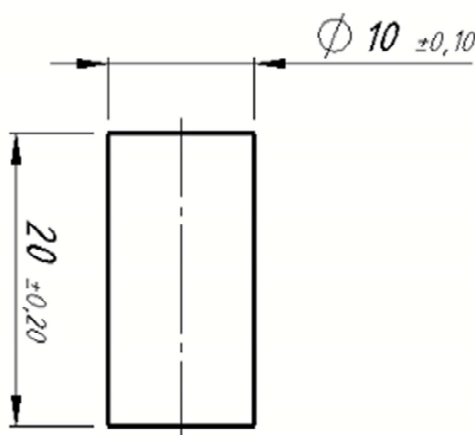


Fonte: (Elaborado pelo autor)

### 3.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Para a realização dos ensaios de compressão, foi utilizada uma máquina universal de ensaios de 100 kN. A norma de referência foi ASTM E9-09 (Ver anexo A) que define que a amostra deve ter dimensões de  $\varnothing$  13 mm x 25 mm. Porém para utilizar o equipamento de ensaios disponível no Laboratório Metalúrgico da Viemar Automotive foi realizado um redimensionamento das amostras para as seguintes dimensões  $\varnothing$  10 mm x 20 mm (Figura 48), que exige 70kN de força para a realização do ensaio. Na sequência foram utilizados 10 corpos de prova, completamente usinados, garantindo o paralelismo entre faces, onde 5 corpos de prova foram para o material sem ToTo e 5 para os corpos de prova com ToTo.

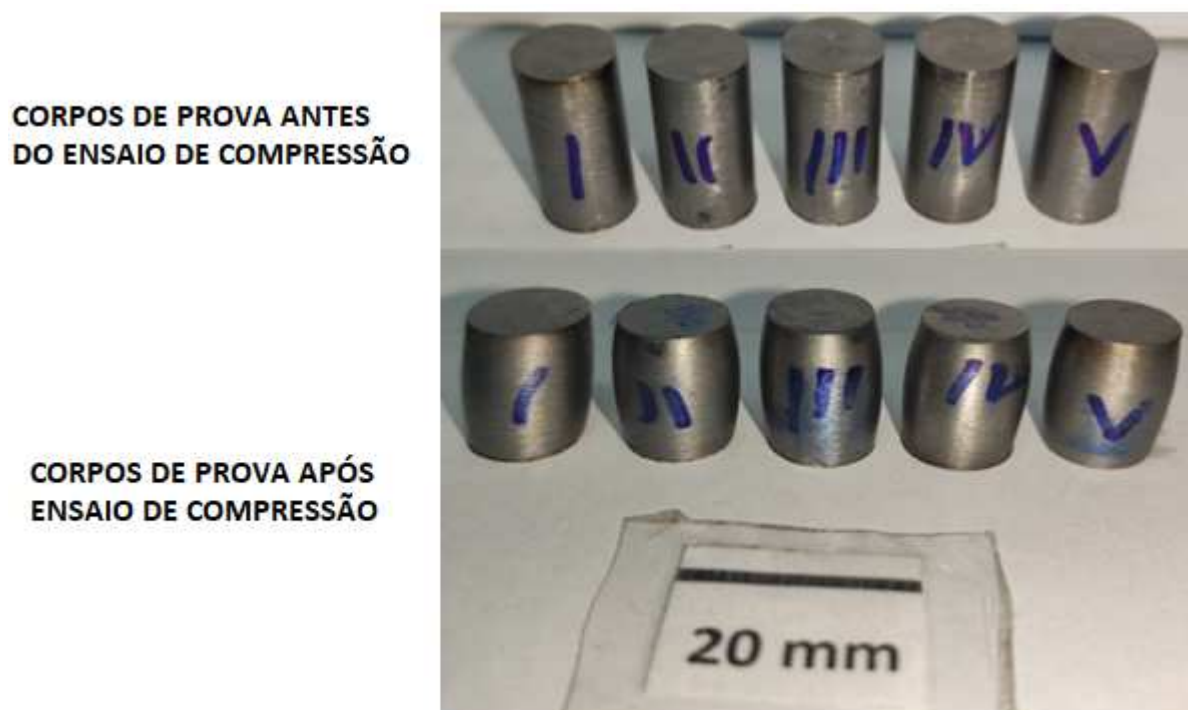
Figura 48 - Corpo de prova para ensaio de compressão (dimensões em “mm”)



Fonte: (Elaborado pelo autor)

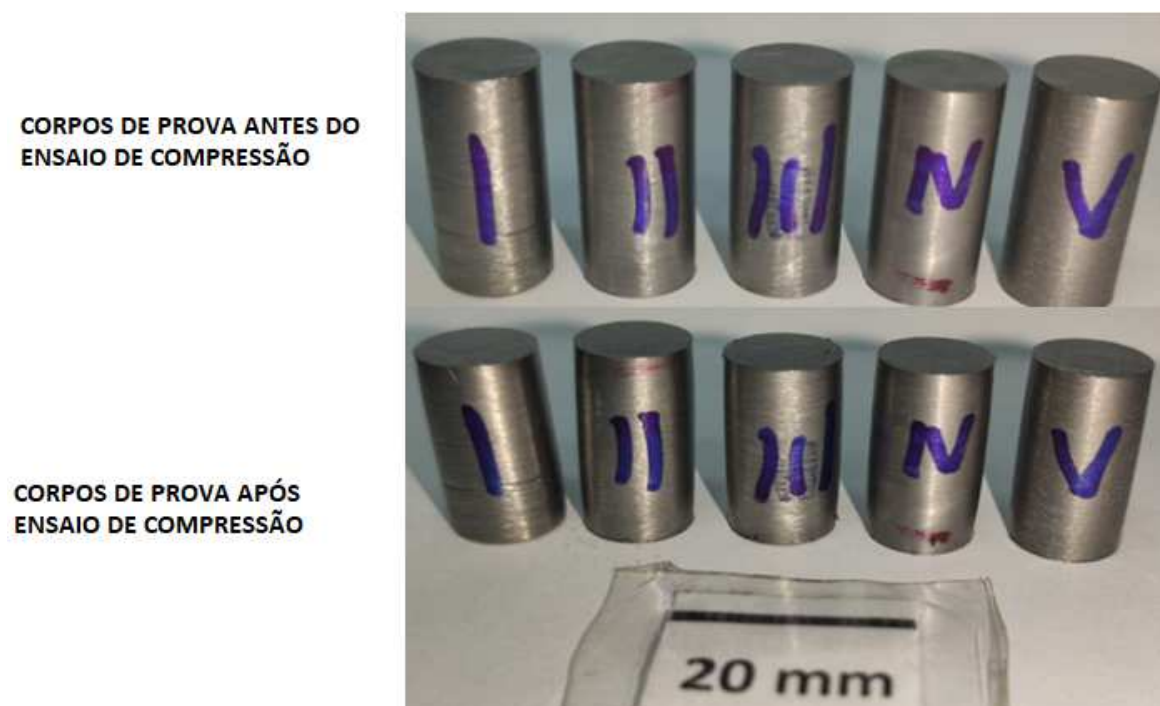
Os corpos de provas para o ensaio de compressão podem ser visualizados antes e após ensaio nas Figura 49 e Figura 50. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal marca EMIC, modelo DL10000N, de 100 kN de capacidade, (Figura 51). Visando facilitar a deformação e reduzir a influência da interface das bases de ensaio da máquina e corpos de provas foram lubrificadas com vaselina. Os dados obtidos durante o ensaio foram plotados graficamente, sendo a tensão “ $\sigma$ ” versus a deformação verdadeira “ $\varphi$ ”.

Figura 49 - Corpos de Prova de compressão, material sem tratamento térmico, da esquerda para direita I, II, III, IV e V;



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Figura 50 - Corpos de Prova de compressão, material com tratamento térmico, da esquerda para direita I, II, III, IV e V;



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Figura 51 - Máquina de ensaios universal – EMIC



Fonte: (Elaborado pelo autor)

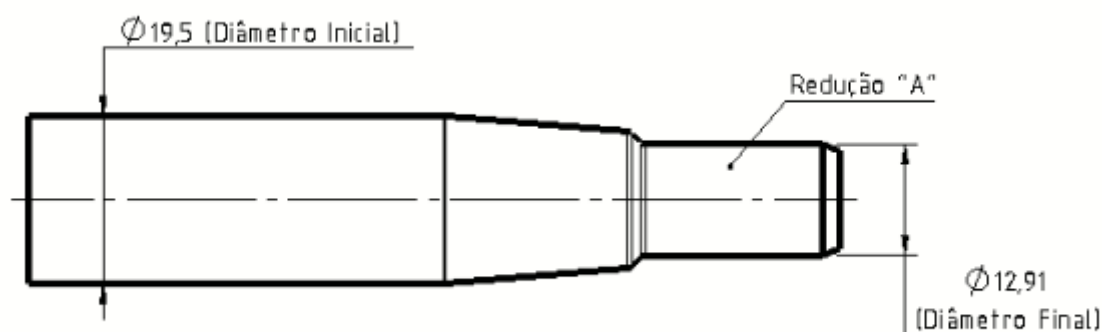
### 3.4. PROJETO DOS FERRAMENTAIS

Para o projeto das ferramentas de extrusão confinada, teve-se como premissa os seguintes fatores: a Viemar Automotive, forneceu todos os equipamentos, ferramentas, softwares de simulação e de CAD. Além disso, a empresa disponibilizou as ferramentas padronizadas e disponíveis para produção com seus devidos encaraçamentos usuais.

Baseado nisso foi realizado, uma verificação se este modelo de encaraçamento utilizado na empresa atenderia as tensões envolvidas no processo. Para facilitar o entendimento, conforme apresentado na Tabela 9, com intuito de identificar as reduções evidenciadas na Figura 52.



Figura 52 - Desenho representativo identificando a redução (dimensões em “mm”)



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Tabela 9 - Redução de área e identificação da redução

Diâmetro "Blank" Inicial (mm)	19,05
Diâmetro a ser extrudado (mm)	12,91
Deformação Verdadeira em área ( $\varphi_a$ )	0,78
Identificação da Redução	A

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Após essa breve identificação, realizou-se o projeto da matriz de conformação conforme previsto na Figura 52. Porém não foi possível utilizar a recomendação de raios devido à exigência do produto. Em seguida à identificação, realizou-se o projeto 3D da ferramenta de forjamento com auxílio do software CAD, denominado de Solidworks 2019, segundo ilustrado na Figura 53.

Figura 53 - Modelamento tridimensional da matriz em Solidworks 2019



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Com o projeto 3D realizado, iniciou-se o processo de simulação com auxílio de um software de elementos finitos, *Eesy-2-form Ver. 5.53*. Para realizar os cálculos das matrizes, este software exige que se faça a simulação de forjamento e após a simulação dos esforços das matrizes. Para a montagem da simulação foi utilizada uma simulação bidimensional, com uma análise assimétrica, devido ao componente, ser simétrico. Os dados da simulação são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros da simulação de forjamento

Tamanho da Malha Quadrática	1 mm
Atrito Columbiano	$\mu = 0,05$
Velocidade de Conformação	1 m/s

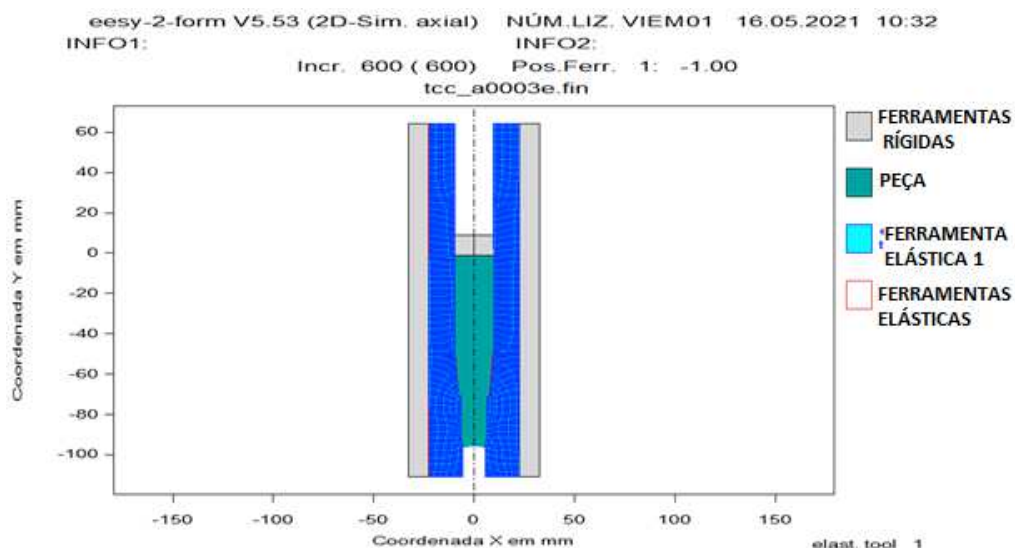
Fonte: (Elaborado pelo autor)

Observa-se que o atrito Coulombiano converge com os parâmetros definidos por Button, 1999 (p. 44), e que o software já traz isso como padrão. O material utilizado na simulação foi um AÇO 41Cr4, tratado termicamente entre 24 a 30 HRC de dureza, que



se encontra na biblioteca do software. Como esses dados foi possível conhecer todas as tensões distribuídas nas matrizes (Figura 54), vale lembrar que essa simulação foi realizada no setor da Engenharia de Conformação, da Viemar Automotive.

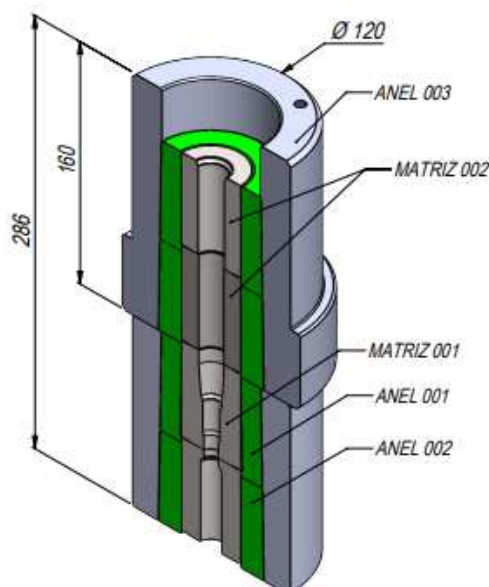
Figura 54 - Análise de elementos finitos no Software Eesy-2-form V5.53



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Com a análise realizada de encarçamento foi possível realizar a modelagem em 3D via software CAD, do projeto da matriz de forjamento ilustrado na Figura 55. No Apêndice A encontra-se o projeto detalhado das matrizes e carcaças utilizadas.

Figura 55 - Projeto final em 3D da matriz para forjamento



Fonte: (Elaborado pelo autor)

### 3.5. ANÁLISE DO PROCESSO DE FORJAMENTO

Ao realizar a análise do ferramental, será realizado a análise teórica de uma extrusão confinada de um *blank* de  $\varnothing$  19,05 mm, com um grau de redução e um recalque conforme ilustrado na Tabela 11. Para essa análise foram adotadas condições de contorno, a fim de simplificar este procedimento de cálculo:

- Matriz de forjamento e *blank*, foram considerados concêntricos;
- As faces do *blank* são paralelas;
- O ponto de aplicação de carga é exatamente na linha de centro do *blank*;
- As faces da travessa e mesa da prensa são paralelas.

Após as definições de contorno estabelecidas, foi estabelecida a força necessária extrusão e recalque para realizar o forjamento componente ilustrado na Figura 41. Para o cálculo da força de extrusão “ $F_e$ ”, foi utilizado a equação (13). Para realização do cálculo, o coeficiente de atrito foi exatamente o mesmo utilizado no projeto do ferramental e em concordância a obra de BUTTON, 1999 (p. 44). E os ângulos utilizados nos cálculos, foram utilizados a especificação de produto. Já a tensão média, foi calculada conforme a equação (15), considerando os dados oriundos dos ensaios de compreensão realizado anteriormente. Na Tabela 11 demonstra todos os dados considerados nos cálculos.

Tabela 11 - Tabela de parâmetros e cálculos da força de extrusão

$$F_e = A_0 \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \varphi_a \cdot \left( 1 + \frac{2\mu}{\text{sen } 2\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varphi_a} \right)$$

Amostra	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_e$ (MPa)	$\varphi_a$ (Adimensional)	$\mu$ (Adimensional)	$\alpha$ (Radianos)	$F_e$ (kN)
Sem ToTo	285,02	993,14	0,78	0,05	0,083	369,16
Com ToTo	285,02	1311,91	0,78	0,05	0,083	487,60

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Para definir a força de recalque “ $F_{rq}$ ”, foram mantidos os mesmos dados de atrito e de tensão de escoamento utilizados no desenvolvimento do cálculo da força de extrusão.

Para o cálculo da força de recalque, salienta-se que foi considerado um aumento de 0,45 mm, prevendo atender a especificação de produto, que exige um diâmetro de Ø 19,50 mm, resultando em uma variação de altura de 2,02 mm. A Tabela 12 apresenta todos os dados considerados nos cálculos.

Tabela 12 - Tabela de parâmetros e cálculo das forças de recalque

$$F_{Rq} = A_1 \cdot \sigma_e \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{d_1}{h_1} \right) \right]$$

Amostra	$A_1$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (MPa)	$d_1$ (mm)	$\mu$ (Adimensional)	$h_1$ (mm)	$F_{Rq}$ (kN)
Sem ToTo	298,65	1281	19,50	0,05	2,02	28,33
Com ToTo	298,65	1770	19,50	0,05	2,02	39,14

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Salienta-se que para a obtenção deste projeto não se faz necessário o cálculo de flambagem pois como se trata de uma extrusão confinada.

### 3.6. ANÁLISE ATRÁVES DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FORJAMENTO

A análise via Método de Elementos Finitos consistiu em realizar simulações utilizando o software Eesy-2-form V5.53, com o perfil da peça a ser obtido pelo processo de forjamento, juntamente com as respectivas matrizes (Apêndice A). Para a realização desta análise foram utilizados os mesmos parâmetros do projeto de matriz, onde foi utilizado uma modelagem 2D, uma malha quadrática com tamanho de 1mm, atrito Coulombiano de  $\mu = 0,05$ , aço 41Cr4 com e sem tratamento térmico e da biblioteca padrão do software e velocidade constante de 1 mm/s.

Foram realizadas 3 simulações a fim de simular o preenchimento da matriz e definir o encarçamento correto para o ferramental. Os resultados obtidos foram plotados em forma de gráficos.

### 3.7. ANÁLISE EMPÍRICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO

Para a elaboração desta análise, necessitou-se fabricar 3 anéis de blindagens para suportar o esforço durante o forjamento, que estão ilustrados na Figura 60, e os desenhos se encontram no Apêndice A. De extrema importância salientar que o

restante das carcaças já são ferramentas existentes na empresa. Para a fabricação destes anéis de blindagem, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Torno convencional NARDINI- NODUS 325 (Figura 56), onde foi realizado o desbaste do material externo aproximando a dimensão final (0,3mm de sobre-metal). Também foi realizado uma furação para posterior usinagem dos perfis internos;

Figura 56 - Torno NARDINI – NODUS ND 325



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

- Tratamento térmico (ToTo), esse processo inicia com alívio de tensão, sendo realizado um pré-aquecimento até a temperatura de 670°C, no tempo de encharque de 2 horas, após sendo resfriado lentamente até a temperatura de 200° e depois ar livre. Já processo de têmpera deve obedecer aos seguintes passos:
  - 1° Pré aquecimento: T: 600°C – Tempo: 60 minutos;
  - 2° Pré aquecimento: T: 820°C – Tempo: 60 minutos;
  - 3° Pré aquecimento: T: 900°C – Tempo: 30 minutos;
  - 4° Pré aquecimento: T: 1025°C – Tempo: 30 minutos.
  - Vale salientar que o resfriamento deverá ser realizado com uma pressão mínima de 5 a 6 bar, e logo após têmpera deverá ser

revenida a ferramenta. Já o revenimento das ferramentas deverá respeitar os seguintes padrões:

- 1º Revenido: T: 575°C – Tempo: 120 minutos(até a temperatura ambiente);
- 2º Revenido: T: 575°C – Tempo: 120 minutos (até a temperatura ambiente);

Esse procedimento é realizado na empresa TecnoVacum onde foi conforme o especificado nos desenhos;

- Torno CNC DOOSAN LYNX 220LC (Figura 57), as carcaças foram usinadas nas dimensões finais conforme especificado no desenho. Vale salientar que os anéis de blindagem, após sofrerem o ajuste de encarçoamento faz-se um tratamento superficial de nitretação, para evitar a deformação dos anéis de blindagem durante o encarçoamento. Já na matriz de forjamento é deixado 0,02 mm menor para ser realizado o processo de polimento.

Figura 57 - Torno CNC Doosan Lynx 220 LC



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

- Tratamento superficial de nitretação nos anéis de encarçoamento, esse processo garante a peça uma dureza superficial de 900 a 1000 HV, a uma

profundidade de 0,03 a 0,06 mm, realizado na empresa na Tempera Gaúcha.

- Estação de polimento manual (Figura 58), nesse posto de trabalho foi conferido aos diâmetros internos das matrizes o acabamento polido necessário, através de um equipamento de placa rotativa com as seguintes pastas diamantadas e os respectivos tempos:
  - Pasta diamantada grão 45, durante 20 minutos;
  - Pasta diamantada grão 30, durante 10 minutos;
  - Pasta diamantada grão 09, durante 10 minutos;

Figura 58 - Estação de polimento



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Foram elaborados 20 corpos de prova para a análise empírica, sendo utilizados 10 corpos de prova na situação sem tratamento térmico e 10 corpos de prova com tratamento térmico. Todos os corpos de prova tiveram as faces usinadas, garantindo dessa forma o paralelismo entre elas. Para a realização dos ensaios, foi padronizado as características que deveriam atender, sendo:



- Dureza conforme Tabela 13 e Tabela 14;
- Composição química conforme o certificado de garantia (Anexo B);
- Metalográfica conforme Tabela 15 e Tabela 16.;
- Comportamento físico conforme ensaio de compressão (Figura 62 e Figura 63).

Considerando, a lubrificação dos corpos de provas, estes foram submetidos ao processo de fosfatização e ensaboamento, sendo submetidos as seguintes etapas (Figura 59), desengraxe, enxague, ativador, fosfatização, enxague, neutralizador, ensaboamento e secagem.

Figura 59 - Linha de tratamento de superfícies – Viemar Automotive



Fonte: (Elaborado pelo autor)

O ferramental de forjamento foi todo separado e montado conforme previsto em projeto. O encarçamento foi realizado conforme os desenhos (Apêndice A). A Figura

60, ilustra o ferramental montado e os *blanks* fosfatizados e ensaboados para a realização do processo de forjamento.

Figura 60 - Ferramental de Forjamento



Fonte: (Elaborado pelo autor)

O ensaio de forjamento foi realizado na empresa Viemar Automotive, utilizando-se de uma prensa hidráulica de 2000 kN, tipo “H”, da marca Menegotto, como apresentado na

Figura 61.

A velocidade de forjamento foi de 13 mm/s para ambos os materiais, sendo necessária uma pressão de 35 bar para o material sem ToTo e 45 bar para o material com ToTo. O ferramental foi todo montado na própria prensa devido às interferências exigidas no projeto do ferramental.



Figura 61 - Prensa hidráulica Menegotto 2000kN



Fonte: (Elaborado pelo autor)

### 3.8. ANÁLISE POR LÍQUIDO PENETRANTE

Para garantir a qualidade das peças após forjamento, foi realizado um ensaio não destrutivo, onde são realizadas as seguintes etapas:

- Preparação da amostra: essa etapa consiste em limpar toda a superfície da peça, removendo tintas, camadas protetoras, graxas, óleos ou qualquer resíduo que impeça o penetrante de entrar nas descontinuidades da peça.
- Aplicação do líquido penetrante: consiste em aplicar um líquido penetrante geralmente da cor vermelha ou fluorescente, capaz de penetrar nas descontinuidades das peças.
- Remoção do excesso do líquido penetrante: após um tempo de aplicação do líquido penetrante, se remove o excesso, de modo que fique retido nas descontinuidades das peças.
- Revelação: é aplicado um talco branco, conhecido como revelador, com o intuito de sugar o líquido penetrante das descontinuidades e por sua vez as revelando.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

#### 4.1.1. CERTIFICADO DO MATERIAL

O certificado de qualidade do aço (Anexo B) apresenta a descrição do material e suas especificações metalúrgicas. O aço denominado comercialmente pela Arcelor Mittal como PL41 - equivalente 41Cr4 - trefilado e fornecido em redonda de Ø19,05 com tolerância dimensional h9 e comprimento de 6.000 mm, a qual indica respectivamente o aço (PL 41), qualidade superficial (trefilado), descarbonetação parcial de 0,13 mm e isento de descarbonetação total, tolerância (h9 – que para a referido diâmetro o afastamento superior é o inferior é -0,043mm) e geometria (Ø19,05 e comprimento de 6000 mm). A composição química do certificado fornecido pela Usina ArcelorMittal corresponde a um aço PL 41(DIN 41Cr4).

#### 4.1.2. DUREZA

Os resultados obtidos na medição de dureza, foram representados conforme a Tabela 13 e a Tabela 14, vale salientar que foram realizados 4 pontos na periferia e 1 ponto no núcleo do corpo de prova.

Tabela 13 - Ensaio de dureza nos corpos de prova sem ToTo

<b>Corpos de prova sem tratamento térmico</b>					
Corpo de Prova	I	II	III	Média	Desvio Padrão
Periferia	95 HRB	103 HRB	95 HRB	96,5 HRB	2,44
	97 HRB	97 HRB	94,5 HRB		
	95 HRB	97,5 HRB	94 HRB		
	96 HRB	98 HRB	95 HRB		
Núcleo	95 HRB	96 HRB	92 HRB	94,3 HRB	2,08

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Tabela 14 - Ensaio de dureza nos corpos de prova com ToTo

Corpos de prova com tratamento térmico					
Corpo de Prova	I	II	III	Média	Desvio Padrão
Periferia	24,5 HRc	25 HRc	26 HRc	25,6 HRc	0,71
	26 HRc	26 HRc	25 HRc		
	26 HRc	27 HRc	26 HRc		
	25 HRc	26 HRc	25 HRc		
Núcleo	25 HRc	26 HRc	29 HRc	26,6 HRc	2,08


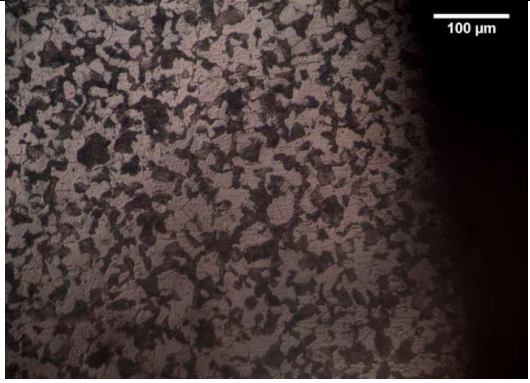

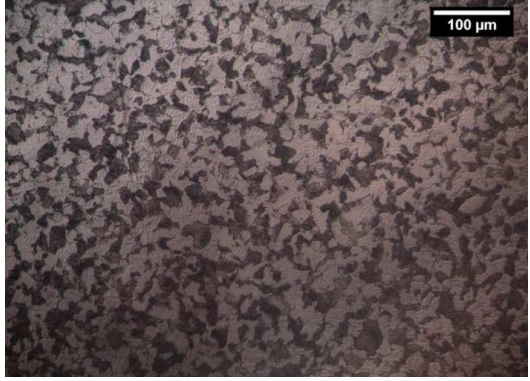
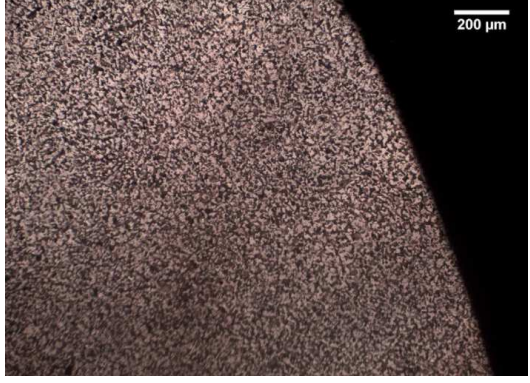

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Verifica-se que os corpos de prova não tratados termicamente ocorre um desvio padrão de 2,44, e os tratados termicamente obteve-se um desvio padrão de 0,71, ou seja, as amostras sem tratamento térmico possuem uma variação de dureza de aproximadamente 2,2 HRB, já as amostras tratadas termicamente apresentam uma variação de 1 HRc, onde identifica-se uma homogeneidade nas amostras tratadas.

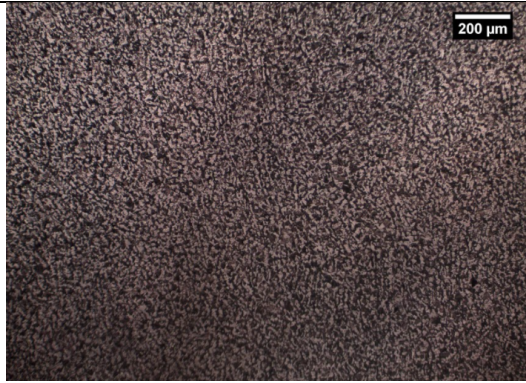
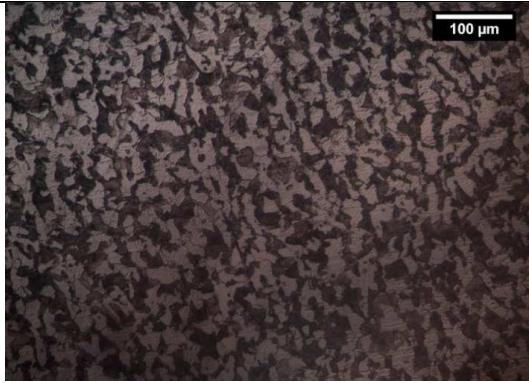
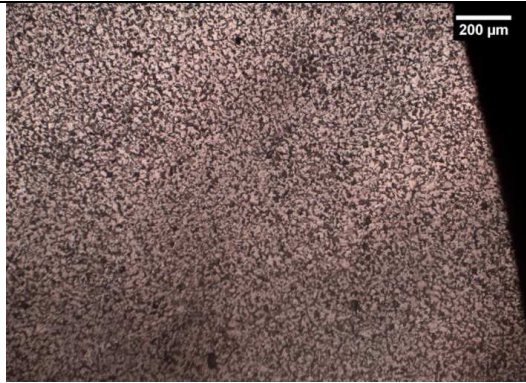
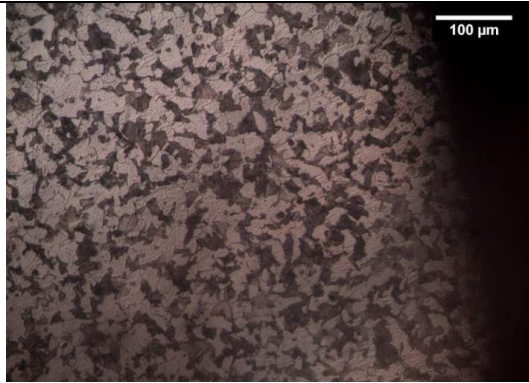
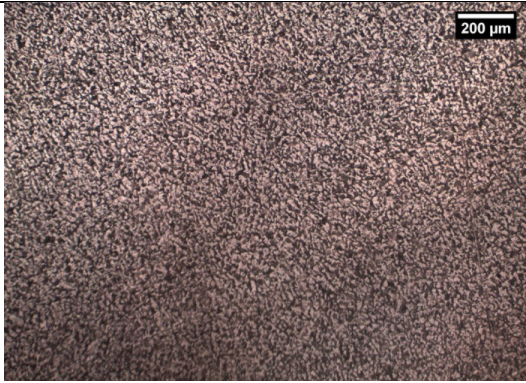
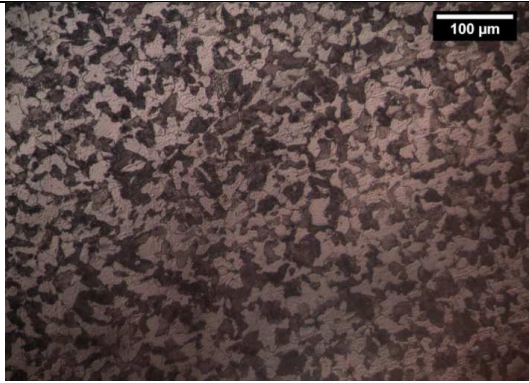

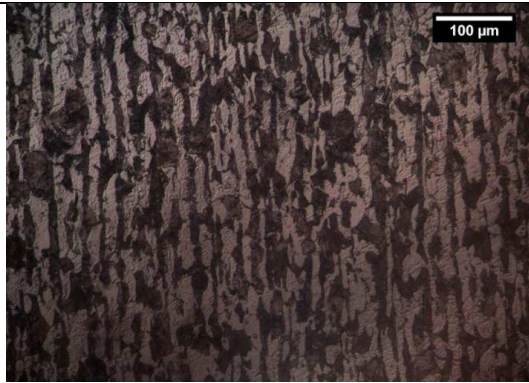
#### 4.1.3. METALOGRAFIA

O material PL 41 (DIN 41Cr4) aço micro ligado, com elementos de liga de forma que apresentam carbonetos, portando observa-se uma estrutura refinada e já globalizada e identifica-se ferrita e perlita (ferrita + cementita) com distribuição homogênea. As amostras tratadas termicamente apresentaram uma estrutura típica martensítica homogênea, onde encontra-se uma formação de martensita com perfil esferoidizada, resultado de uma dureza baixa, como esse tipo de estrutura se favorece o escoamento durante o forjamento. As metalografias podem ser vistas nas Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 - Metalografia de 4 amostras, Aço PL 41 (DIN 41Cr4), ataque nital 10% sem tratamento térmico

Amostra	Posição	100x - 200 $\mu$ m	400x - 100 $\mu$ m
-	Periferia		
	Núcleo		
=	Periferia		

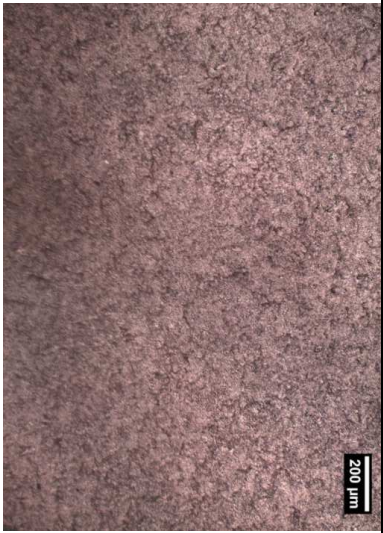
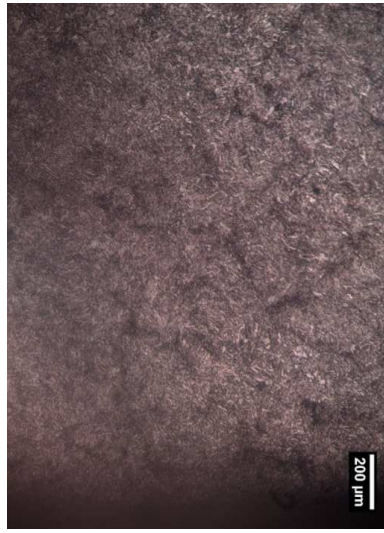
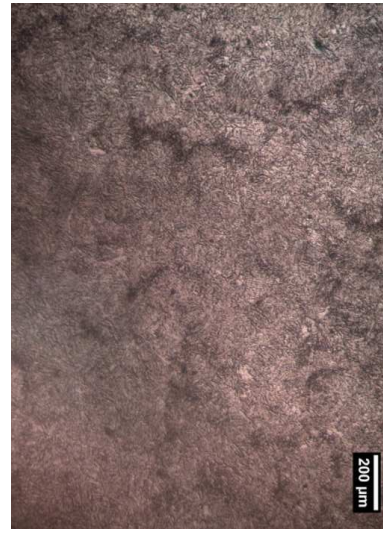
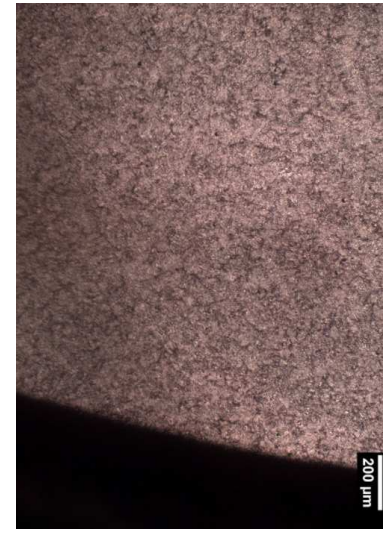
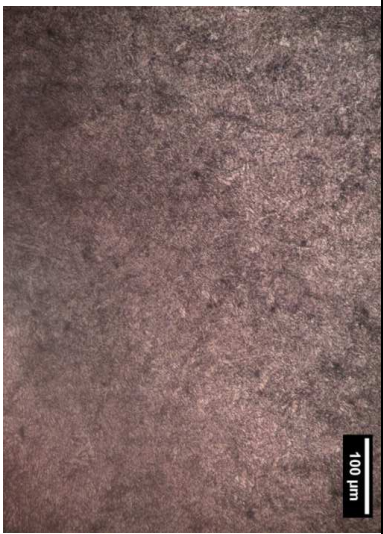
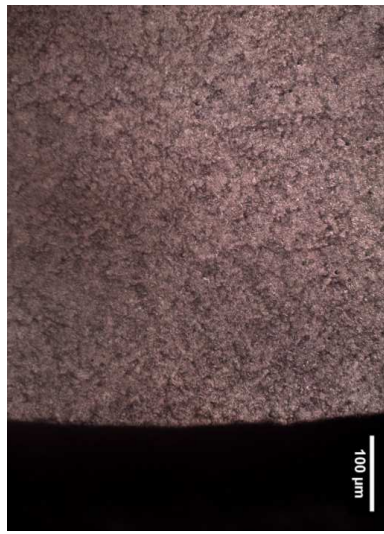
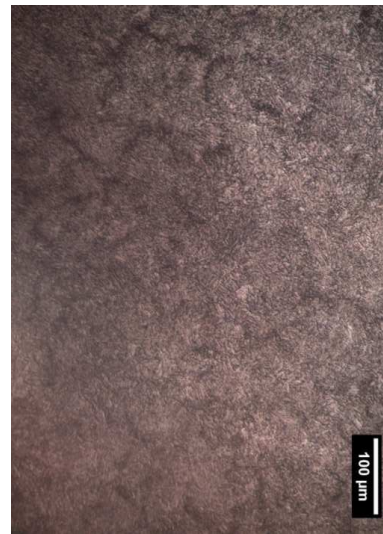



	Núcleo		
III	Periferia		
	Núcleo		
IV	Longitudinal		

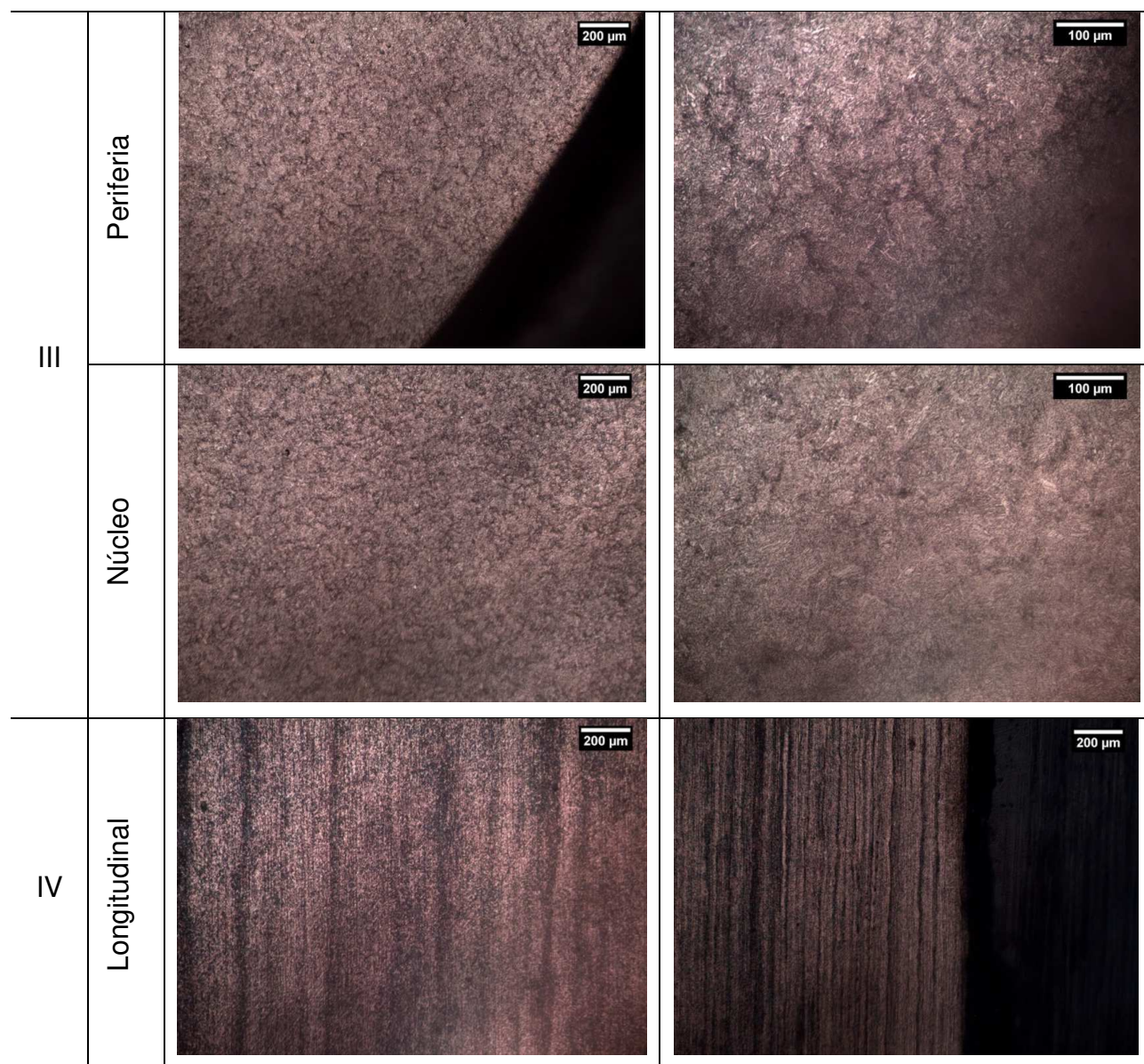
Fonte: (Elaborado pelo autor)

Tabela 16 - Metalografia de 4 amostras, Aço PL 41 (DIN 41Cr4), ataque nital 10% com tratamento térmico



=		∨		Amostra
Núcleo	Periferia	Núcleo	Periferia	Posição
				<i>100x - 200µm</i>
				<i>400x - 100µm</i>





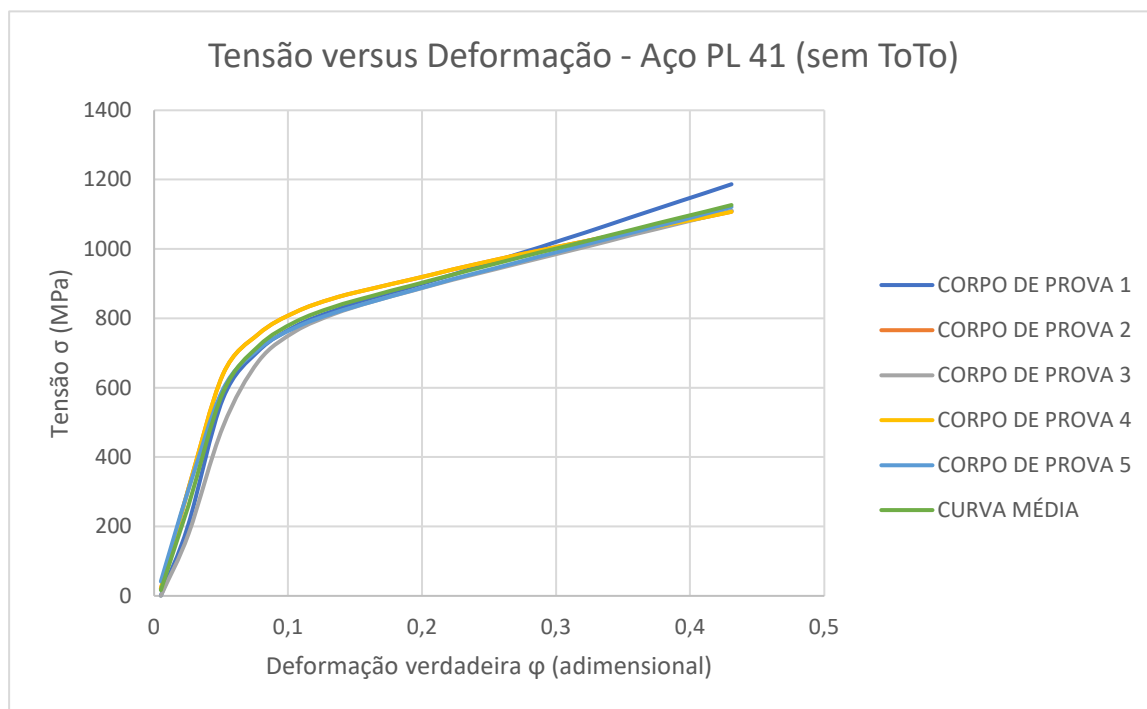
Fonte: (Elaborado pelo autor)

#### 4.1.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Durante o ensaio, os corpos de prova demonstraram resultados em conformidade com a teoria, conforme ilustrado nas Figura 62 e Figura 63. O material sem tratamento térmico apresentou uma tensão de escoamento de 705 MPa e com tratamento térmico 854 MPa. Importante ressaltar que foi utilizado toda a capacidade do equipamento de ensaio e mediante isso não foi possível levar o ensaio até a ruptura das amostras.

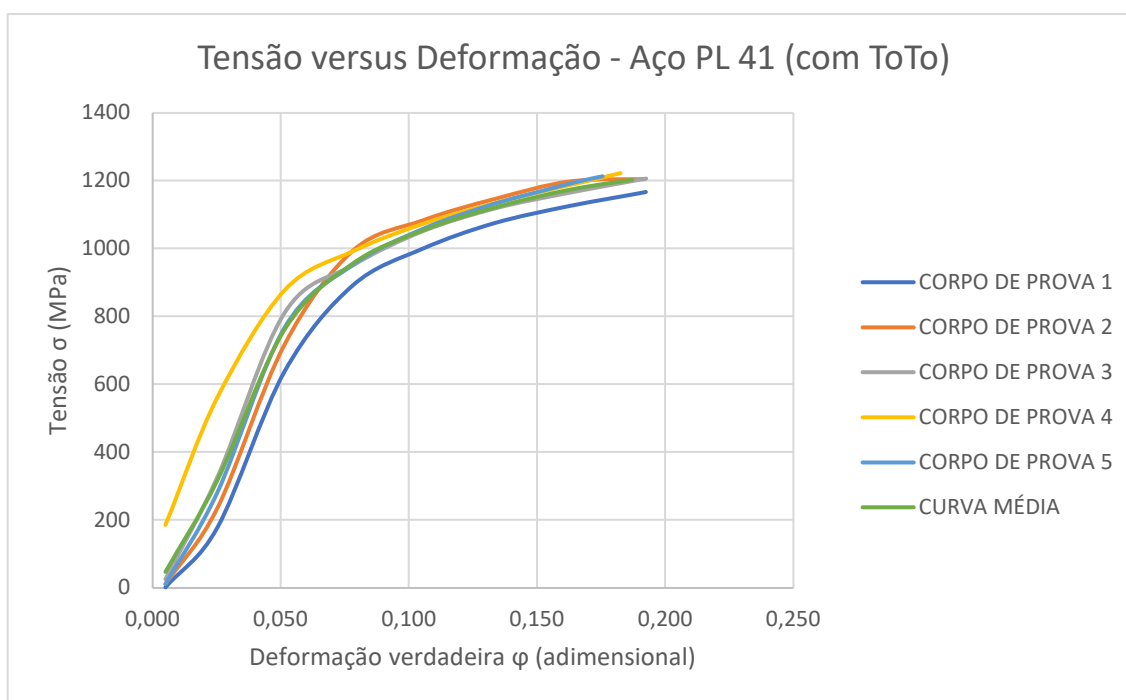


Figura 62 - Gráfico de tensão versus deformação verdadeira com superposição das cinco curvas retiradas dos ensaios e a curva média dos corpos de prova sem ToTo



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Figura 63 - Gráfico de tensão versus deformação verdadeira com superposição das cinco curvas retiradas dos ensaios e a curva média dos corpos de prova com ToTo

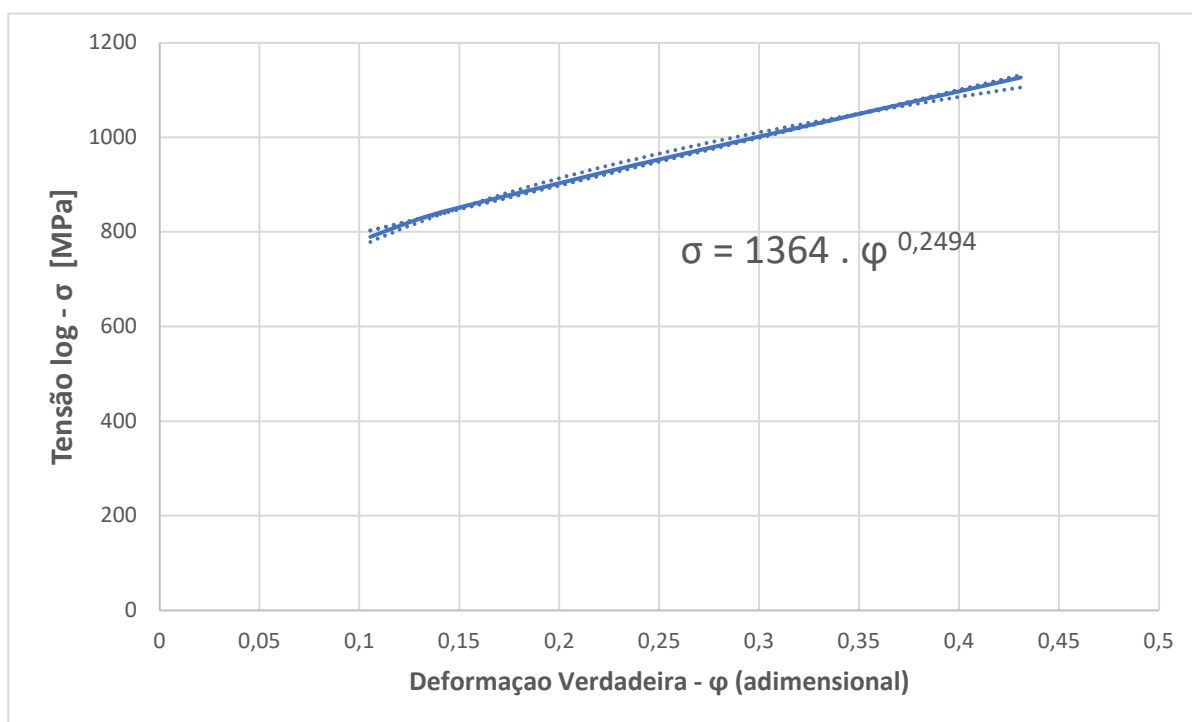


Fonte: (Elaborado pelo autor)

Para obter os coeficientes de resistência " $\sigma_k$ " das curvas e o encruamento "n" do material em análise, seguindo a equação de Holloman foi necessário plotar a curva de tensão versus deformação verdadeira em escala logarítmica ilustrado nas Figura 62 e Figura 63, mediante a equação (11) e baseando-se na Figura 18 e Figura 19.

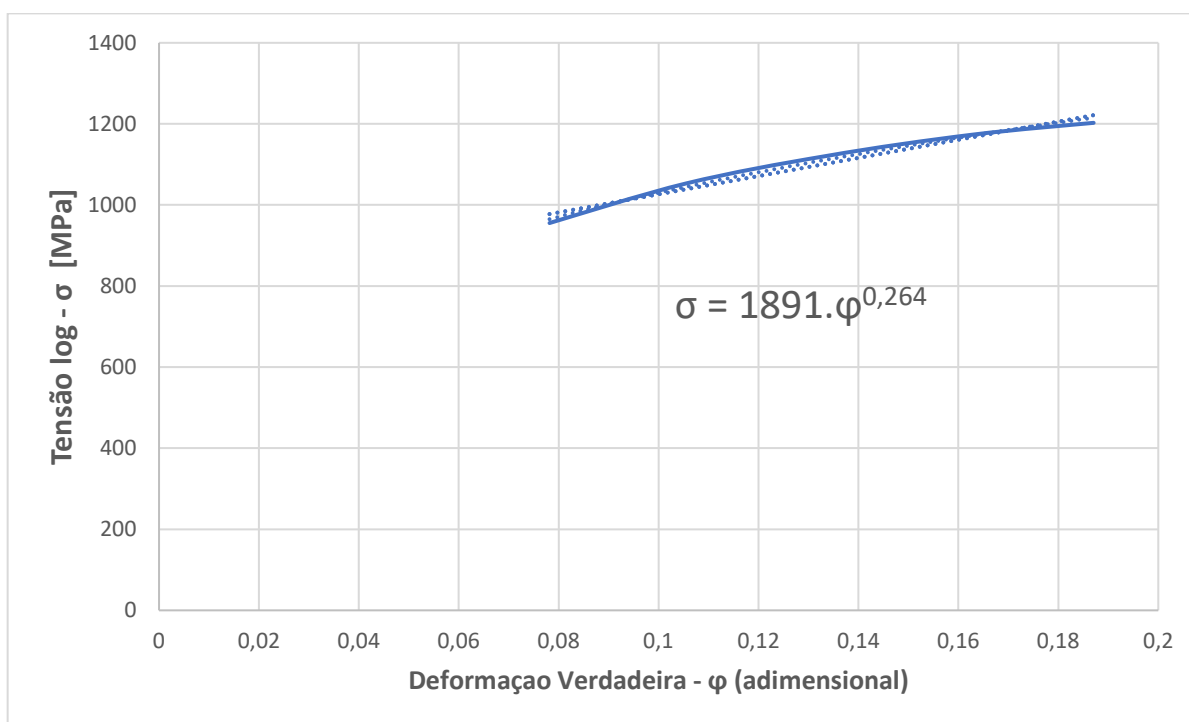
Plotou-se uma modulação da curva média das amostras entre as curvas da tensão " $\sigma$ " versus a deformação " $\varphi$ ", ressaltando que o gráfico ilustrado nas Figura 64 e Figura 65, não começa do ponto zero, isso se fez necessário a fim de eliminar a parcela do gráfico que corresponde a deformação elástica – fenômeno conhecido como Lei de Hooke.

Figura 64 - Curva de tensão versus deformação do Aço PL41 – sem tratamento térmico



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Figura 65 - Curva de tensão versus deformação do Aço PL41 – com ToTo



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Após a plotagem dos gráficos, nota-se os seguintes dados:

- Material PL41 (DIN 41Cr4) sem tratamento térmico tem-se a seguinte equação:  $\sigma = 1364 \cdot \varphi^{0,2494}$
- Material PL41 (DIN 41Cr4) com tratamento térmico obtém-se a seguinte equação:  $\sigma = 1891 \cdot \varphi^{0,264}$

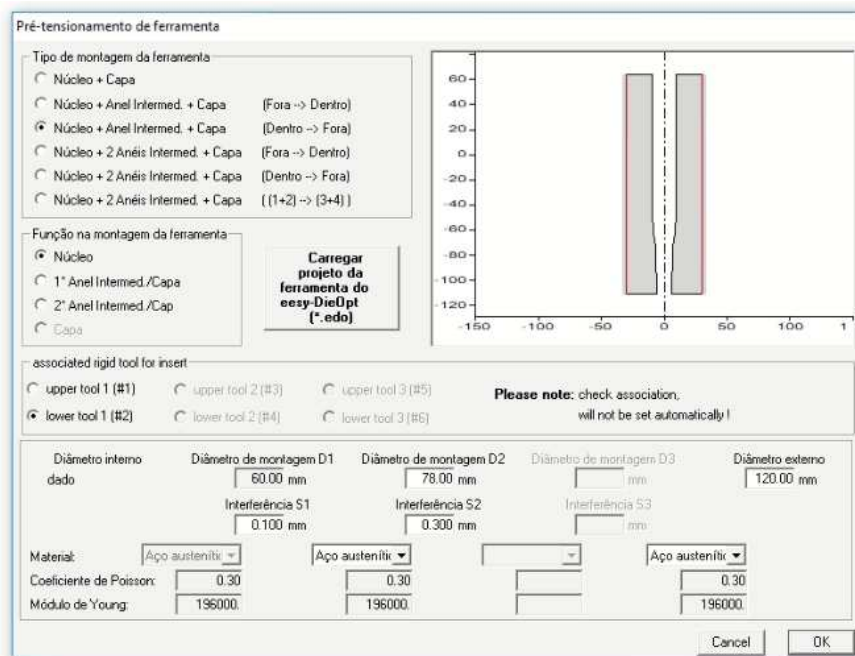
Salienta-se que o coeficiente de resistência " $\sigma_k$ " para o aço sem tratamento térmico é de 1364 MPa e o fator de encruamento de 0,2494. Já o aço tratado termicamente é de 1891 MPa, o coeficiente de encruamento "n" de 0,264. Observa-se a similaridade dos valores obtidos com aqueles mencionados na Tabela 2.

#### 4.1.5. PROJETO DAS FERRAMENTAS

Para atender as necessidades especificados pelo produto forjado, realizou-se o primeiro projeto de encarçamento da matriz já usual na empresa Viemar Automotive, se mostrando incapaz de suportar as cargas do processo. A análise através de elementos finitos, identificou-se tensões tangencias trativas, ou seja, a ferramenta iria

falhar por uma fratura longitudinal, de acordo indicado na Figura 27. Na Figura 66, demonstra os parâmetros de encarçamento utilizados na simulação.

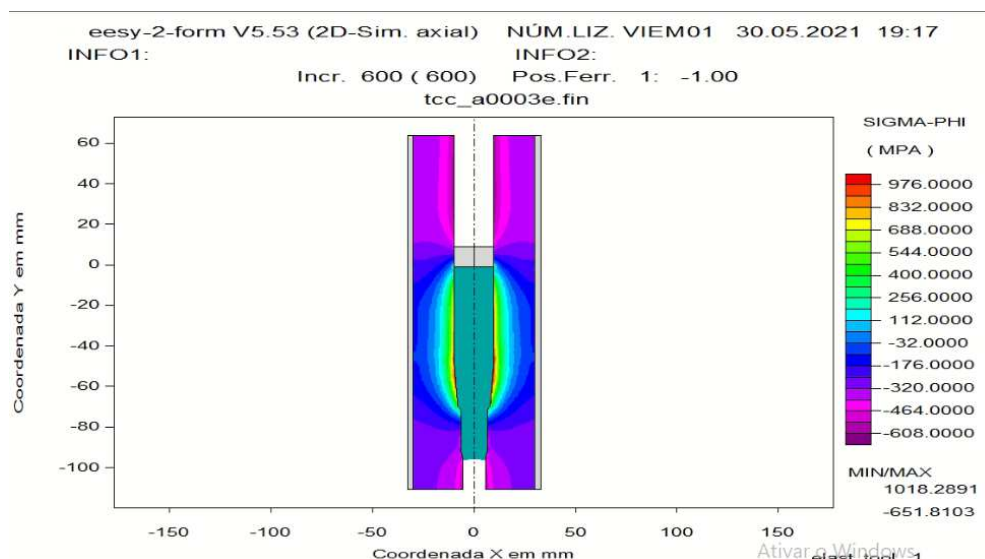
Figura 66 - Parâmetros da 1ª simulação de encarçamento do Eesy-2-Form V5.53



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Após a execução da simulação, identificou-se as tensões tangenciais resultante das cargas aplicadas durante o forjamento, na simulação apresentou uma região com tensão trativas de 976 MPa, ilustrado na Figura 67.

Figura 67 - Tensão tangencial na matriz inferior na 1ª simulação de encarçamento no Eesy-2-form V 5.53.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

No projeto do ferramental de forjamento, busca-se trabalhar com tensões compressivas em toda a sua extensão, em outras palavras, o ideal que as tensões trativas tendam a ser igual ou inferior as tensões compressivas, nessa condição evita-se a quebra do ferramental. Para conseguir realizar o forjamento deste componente foram realizadas novas simulações com intuito de reduzir a tensão trativa na matriz inferior. A solução encontrada, foi induzir maior tensão compreensiva, ou seja, aumentar a interferência entre matrizes. Para isso a primeira ferramenta foi montada com uma interferência de 0,5 mm já o segundo anel de blindagem foi encarçado com 0,6 mm de interferência conforme indicado na Figura 68. O desenho esquemático das interferências encontra-se no Apêndice C.

Figura 68 - Parâmetros da 2ª simulação de encarçamento no Eesy-2-form V5.53

Pré-tensionamento de ferramenta

Tipo de montagem da ferramenta

- Núcleo + Capa
- Núcleo + Anel Intermed. + Capa (Fora -> Dentro)
- Núcleo + Anel Intermed. + Capa (Dentro -> Fora)
- Núcleo + 2 Anéis Intermed. + Capa (Fora -> Dentro)
- Núcleo + 2 Anéis Intermed. + Capa (Dentro -> Fora)
- Núcleo + 2 Anéis Intermed. + Capa ((1+2) -> (3+4))

Função na montagem da ferramenta

- Núcleo
- 1º Anel Intermed./Capa
- 2º Anel Intermed./Capa
- Capa

Carregar projeto da ferramenta do eesy-DieOpt (\*.edu)

associated rigid tool for insert

- upper tool 1 (#1)
- upper tool 2 (#3)
- upper tool 3 (#5)
- lower tool 1 (#2)
- lower tool 2 (#4)
- lower tool 3 (#6)

Please note: check association, will not be set automatically!

Diâmetro interno dado	Diâmetro de montagem D1	Diâmetro de montagem D2	Diâmetro de montagem D3	Diâmetro externo
	60.00 mm	78.00 mm	mm	120.00 mm
	Interferência S1	Interferência S2	Interferência S3	
	0.500 mm	0.600 mm	mm	

Material: Aço austenítico

Coefficiente de Poisson: 0.30

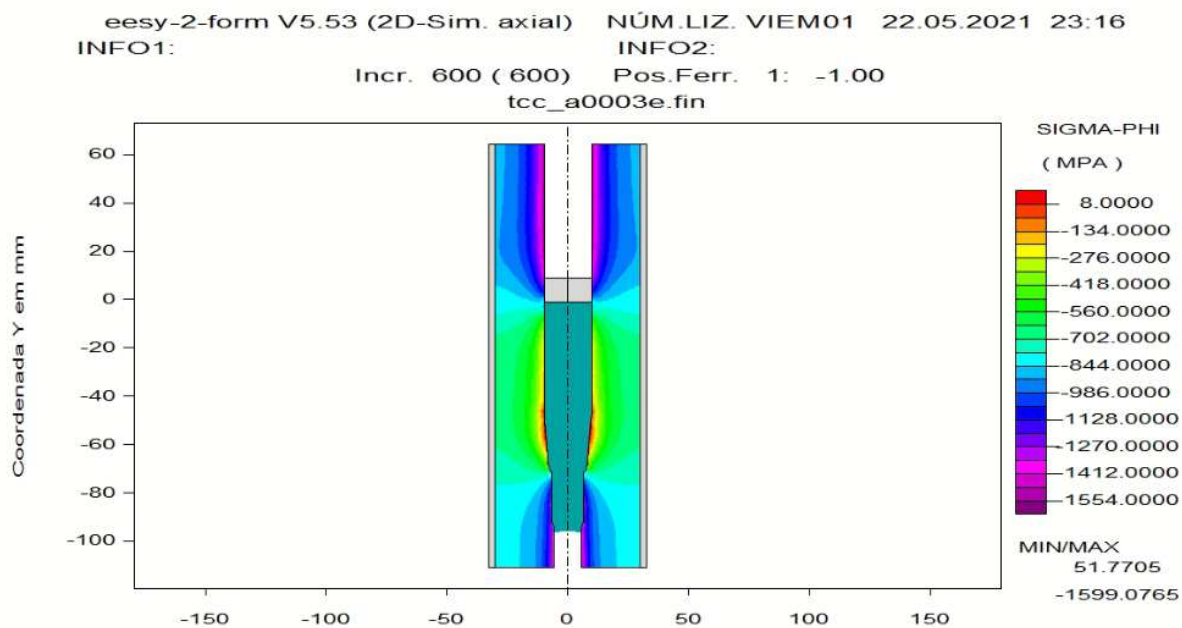
Módulo de Young: 196000

Cancel OK

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Com a configuração mencionada na Figura 68, atingiu-se o objetivo de reduzir a tensão tangencial trativa de 976 MPa para um pico máximo de 8 MPa, grandeza esta que foi desconsiderada. A Figura 69 ilustra a distribuição de tensão resultante.

Figura 69 - Tensão tangencial na matriz inferior

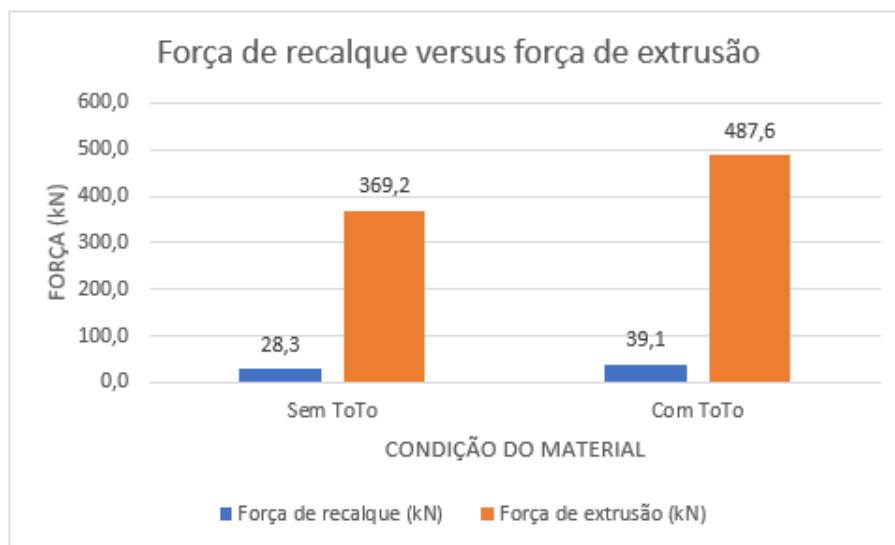


Fonte: (Elaborado pelo autor)

#### 4.1.6. ANÁLISE TEÓRICA

Os resultados obtidos nos cálculos de força de recalque " $F_{rq}$ " e força de extrusão " $F_e$ " mostram que a força de recalque é inferior a força de extrusão, sendo considerado o grau de redução de área ( $\varphi_a$ ) de 0,78 e a condição do material com e sem tratamento térmico, conforme ilustrado na Figura 70.

Figura 70 - Gráfico comparativo entre a força de recalque versus força de extrusão



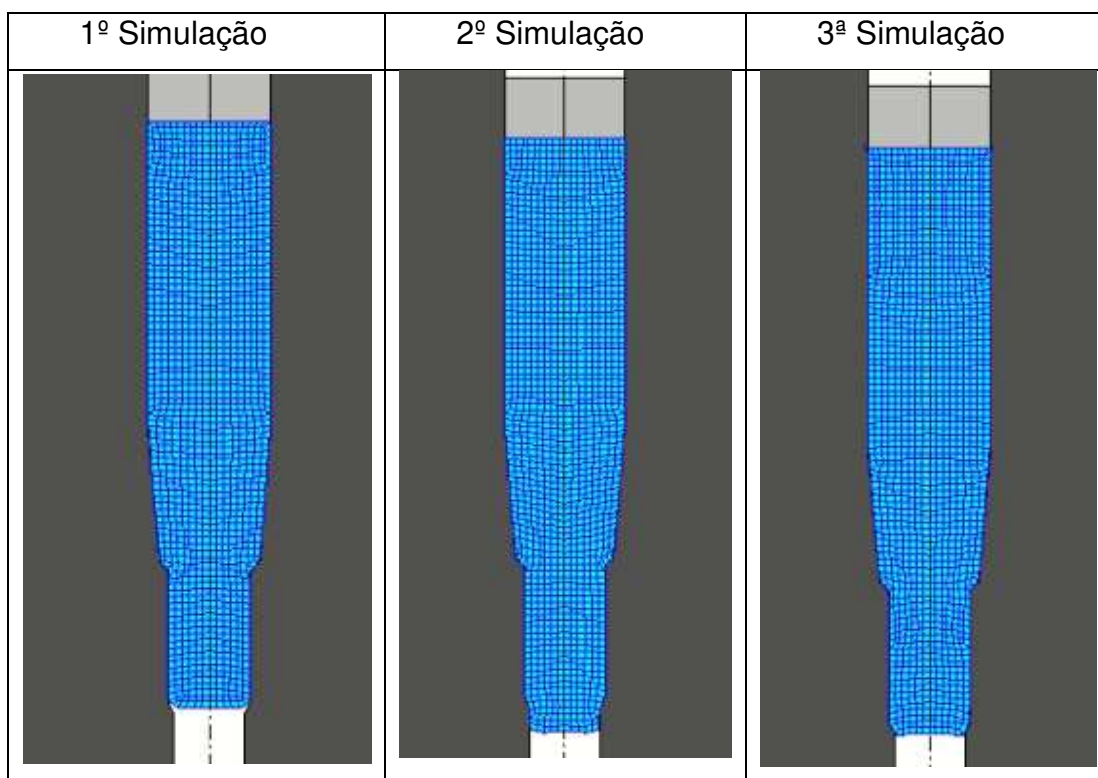
Fonte: (Elaborado pelo autor)

Verifica-se que por se tratar de um processo por matriz confinada, ou seja, todo o *blank* fica guiado dentro da ferramenta, elimina os efeitos de flambagem, por isso não foi realizado os cálculos, para esse método de falha.

#### 4.1.7. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE FORJAMENTO

Notou-se que durante a simulação do processo de forjamento, modificou-se o peso do componente, saindo de 220 grama para 215 grama, para que se ocorra o perfeito preenchimento da matriz sem falhas. Os resultados das simulações de preenchimento da matriz estão dispostos na Figura 71.

Figura 71 - Análise de preenchimento da matriz Inferior



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Outro ponto importante a salientar, foi a força de forjamento, no simulador para exercer a extrusão confinada a força máxima foi de 411,2 kN para o material sem tratamento e para o material com tratamento térmico de 545,6 kN. Baseado nisso a Tabela 17 indica o percentual entre a simulação e o cálculo teórico, o valor simulado ficou 10% maior que o valor calculado no material macio já o valor de 11% no material tratado termicamente. Essa variação pode ser justificada por fatores como coeficiente de atrito, e por o simulador ser um software 2D e realizar simulações axissimétrica,

onde em um ambiente 3D, outros fatores poderiam ser considerados, como centro de aplicação de carga, folgas entre punção e matriz, dando maior assertividade ao resultado analítico versus simulado.

Tabela 17 - Comparação entre resultados (Simulação, Teoria e Experimental)

<b>Material</b>	<b>Força de Forjamento Simulação</b>	<b>Força de Forjamento Cálculo</b>	<b>Força de Forjamento Experimental</b>	<b>% entre simulado versus teórico</b>	<b>% entre teórica versus prática</b>
<b>Sem Toto</b>	411,2 kN	369,2 kN	398,31 kN	10%	7%
<b>Com Toto</b>	545,6 kN	487,60 kN	512,12 kN	11%	5%

Fonte: (Elaborado pelo autor)

#### 4.1.8. ANÁLISE EXPERIMENTAL

No teste experimental, apresentou o forjamento do item com sucesso, conforme o previsto em projeto e convergiu com os resultados obtidos na análise realizada pelo método de elementos finitos. O ferramental suportou o forjamento sem nenhuma avaria, dimensional conforme o projeto. Na Figura 73 mostra os componentes forjados com e sem ToTo. A rugosidade após forjamento satisfaz os requisitos de projeto saindo do forjamento acabado, assim eliminando o passe de laminação após forjamento. A pressão de trabalho monitorada para o material sem ToTo foi de 35 bar de pressão e nas amostras forjadas a pressão foi de 45 bar. Baseado na área do cilindro hidráulico, obteve-se em uma força de 512,12 kN, para as amostras tratadas termicamente e 398,31 kN para as amostras sem tratamento térmico. A velocidade de conformação foi de 13 mm/s. Para garantir que as peças forjadas não apresentaram nenhum defeito, foi realizado teste de líquido penetrante, a fim de garantir a qualidade do componente, conforme ilustrado nas Figura 72.



Figura 72 - Ensaio não destrutivo de líquido penetrante (Amostra com ToTo)



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Figura 73 - Amostras forjadas a frio (em cima amostras sem ToTo, abaixo amostras forjadas com ToTo).



Fonte: (Elaborado pelo autor)

## 5. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos com a aplicação das metodologias propostas para a realizar o forjamento a frio em aço endurecidos termicamente, foi possível obter algumas conclusões, que atendem aos objetivos deste trabalho, sendo mencionadas a seguir.

No certificado, a dureza informada é de 252 HB, equivalente a 102 HRB. Vale salientar que esse material após o cisalhamento, esse material necessitava um processo de alívio de tensões, devido a um encruamento superficial, ocasionando falhas no forjamento. Após a realização do tratamento térmico de têmpera e revenimento, não houve a necessidade de manter o processo de alívio de tensão. Já mediante a composição química, identifica-se que se trata de um aço micro ligado semelhante ao PL41 ou DIN 41Cr4.

No quesito da metalografia, no material sem ToTo identificou-se uma estrutura mista de ferrita e perlita, digna de uma estrutura de um aço micro ligado, já a metalografia do aço temperado, demonstrou uma estrutura martensítica, própria de um aço que passou por um processo de têmpera e revenimento.

Já no ensaio de compressão, apresentou uma convergência bastante satisfatória, tanto do material tratado termicamente como o sem tratamento térmico. Após a plotagem do gráfico identificou-se uma diferença bastante significativa entre as curvas de tensão versus deformação do aço sem ToTo e do aço com ToTo, onde a plotagem do gráfico que descreve a equação de Holloman, indicou que a  $\sigma_e$  para um aço PL41 tratado termicamente pode ser descrita pela equação  $\sigma = 1891 \cdot \varphi^{0,264}$  e para o aço macio a equação que descreve a curva é  $\sigma = 1364 \cdot \varphi^{0,2494}$ , representando matematicamente um aumento 27% na tensão de escoamento. Isso pode ser percebido no comportamento das forças de extrusão e força de recalque. Entretanto o fator de encruamento se manteve similar e em concordância com a obra Schaeffer, 2007.

Analisando os dados obtidos na simulação numérica, percebe-se que será mandatório para garantir o comprimento da peça, é o controle dimensional do *blank*, onde se justifica o uso de um material com a qualidade superficial trefilada, reduzindo a amplitude da variação dimensional garantindo por sua vez o peso do *blank*.

No projeto do ferramental identificou-se, a tensão tangencial induzida no processo de forjamento, resultando em 976 MPa. Portanto foi necessário redimensionar os anéis de blindagem para suportar a carga de forjamento, ou seja, caso mantivesse os

parâmetros da 1ª configuração, o ferramental iria sofrer fratura longitudinal. Logo após a análise do ferramental por elementos finitos, mostrando que os métodos teóricos versus a simulação por elementos finitos obtiveram um grau de convergência de 89%.

Porém analisando o método teórico com o método prático, obteve-se uma convergência 93%, ou seja, o método analítico apresentou um grau de convergência maior que o método de elementos finitos, onde pode-se observar os seguintes detalhes:

- O método de elementos finitos, utilizando o *software Eesy-2-form V5.53*, com uma análise 2D, assimétrica, apresentou uma convergência nos corpos de prova em relação com o método prático de 89%. Seu resultado foi prejudicado em função do módulo 2D utilizado para a simulação trabalhar com simplificações de geometrias circulares em planas, que representam o comportamento do todo, e não prevê forças deslocadas do centro. Para essa aplicação o ideal seria trabalhar com o módulo 3D, que compreende todos esses pontos;

Já nos ensaios práticos, obteve-se sucesso no forjamento, as peças foram submetidas a ensaios de líquido penetrante, para eliminar quaisquer possibilidades de defeitos.

Objetivo apresentado neste trabalho, foi atingido, sendo possível eliminar o processo de alívio de tensões por têmpera total, e o processo posterior de laminação, atingindo os requisitos de produto no quesito rugosidade, sendo obtido através do forjamento. O *lead time*, reduziu cerca de 70%, devido a substituição do tratamento térmico e os processos de laminação que foi eliminado. Baseado na controladoria essa melhoria reduzirá em média até o final de 2021 cerca de R\$ 27.524,26.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros é possível ainda:

- Analisar da influência do escoamento em outros patamares de durezas;
- Analisar a microestrutura utilizando método de volumes finitos;
- Analisar o comportamento da mesma geometria com diâmetros diferentes;
- Analisar a influência da temperatura no processo de extrusão confinada.

## REFERÊNCIAS

Arfmann, Gerhard. CPM GmbH. s.d. <http://www.metalfforming.de/prod0215.htm>  
Acesso em 05 de Novembro de 2012.

Brites, Fabiano da Silva. **Apostila da disciplina de Conformação** (100613). São Leopoldo: Unisinos, 2011.

Brites, Fabiano da Silva. **Dissertação de mestrado, Desenvolvimento integrado de produto para forjamento**. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

Button, Sérgio Tonini. **Planejamento do processo e projeto de ferramentas para forjamento a frio**. Campinas: UNICAMP, 1999.

Chiaverini, Vicente. **Tecnologia mecânica**. 2ª. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

Dieter, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

E. Bresciani Filho, I. B. Silva, G. F. Batalha, S. T. Button. **CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS**. 6ª. Campinas: UNICAMP, Maio de 2011.

Filho, André Itman. **Curso básico de conformação mecânica**. Vitória, Agosto 2010.

Geier, Martin. **Considerações sobre Atrito para Processo de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel**. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: UFRGS, 2007.

Groehs, Ademar Gilberto. **Resistências dos Materiais e Vasos de Pressão**. São Leopoldo: Unisinos, 2006.

Grüning, Klaus. **8 Técnica da Conformação**. São Paulo: Poligno S. A., 1973.

Hibbeler, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7ª. São Paulo: Person, 2010.

Horacio Helman, Paulo Roberto Cetlin. **FUNDAMENTOS DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA DOS METAIS**. 2ª. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013.

Jorge, Paulo, e Martins Rodrigues. Tecnologia Mecânica / **Tecnologia da deformação Plástica**. 2ª. Vols. II - Aplicações Industriais. Escolar, 2010.

Machinery, National. "**Tool Seminar**." São Paulo, 1986.

Marcondes, Paulo. **Propriedades Mecânicas fundamentais**. Paraná: UFPR, 2013.

Norton, Robert L. **PROJETO DE MÁQUINAS, UMA ABORDAGEM INTEGRADA**. 2ª. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEMOTO, Yoshiro Lima. Dissertação de mestrado, **Determinação da curva de tensão – deformação verdadeira de metais isotrópicos usando corpos de chapa fina**. Dissertação de Mestrado, Florianópolis: UFSC, 2004.

Roque, Cristina Maria Oliveira Lima. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos no Planejamento da Seqüencia de forjamento a frio**. Dissertação de Mestrado, Campinas, SP: UNICAMP, 1996.

Schaeffer, Lirio. **Conformação Mecânica**. 2ª. Porto Alegre: Livre Editora, 2004.

Schaeffer, Lirio. **Conformação Mecânica Cálculos Aplicados em processos de Fabricação**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

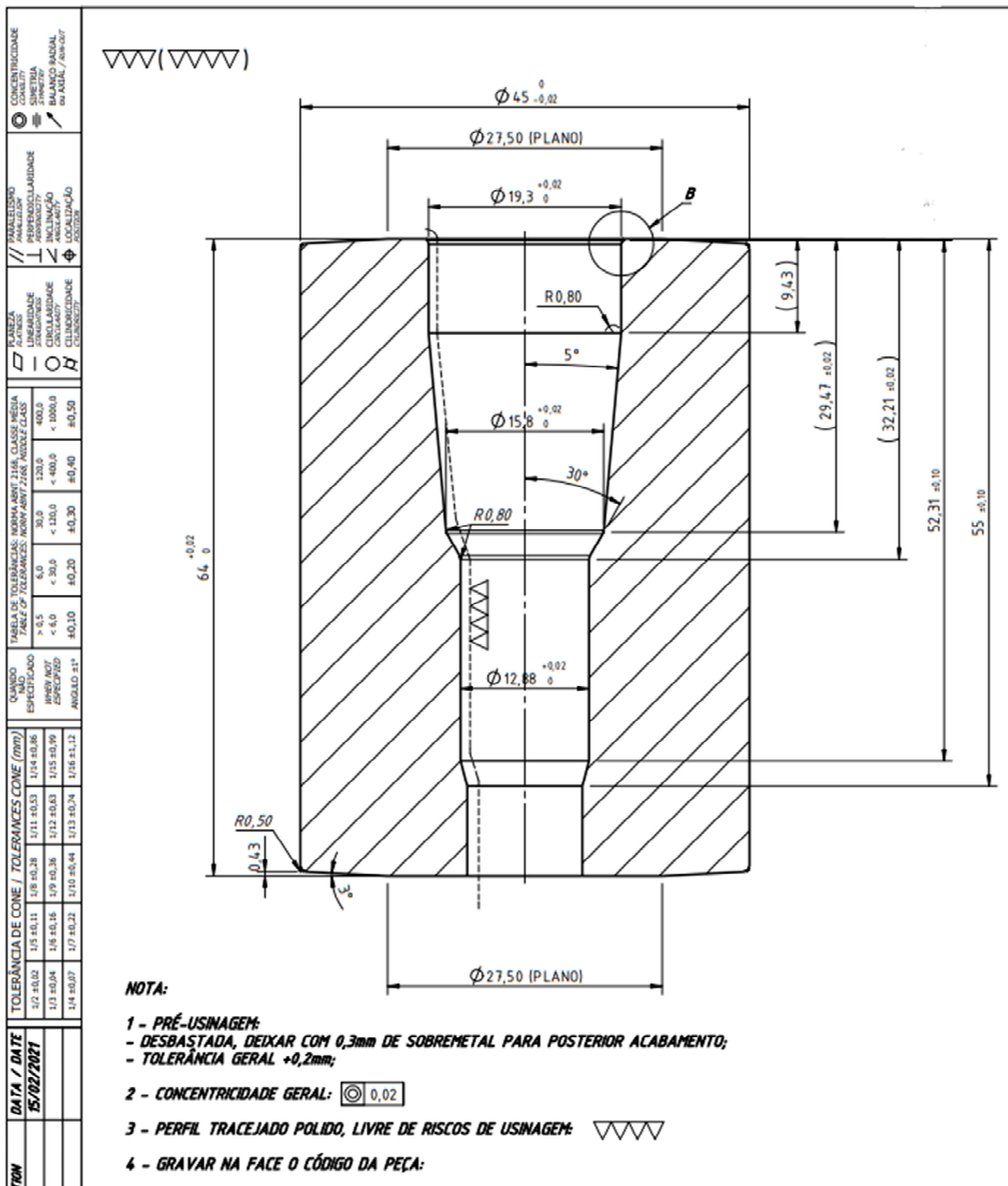
Schaeffer, Lirio. **Forjamento Introdução ao processo**. 2ª. Porto Alegre: Imprensa Livre Ltda, 2006.

Silva, Iris Bento da. Dissertação de mestrado, **Método da Simulação para determinar a tensão de extrusão a frio. Dissertação de Mestrado**, Campinas: UNICAMP, 1989.

Strohaecker, Telmo Roberto, e Frainer, Vitor José. **Princípios de Tratamentos Térmicos**. Porto Alegre: UFRGS

Tschiptschin, André Paulo. **Tratamento Térmico de Aços**. São Paulo: EPUSP

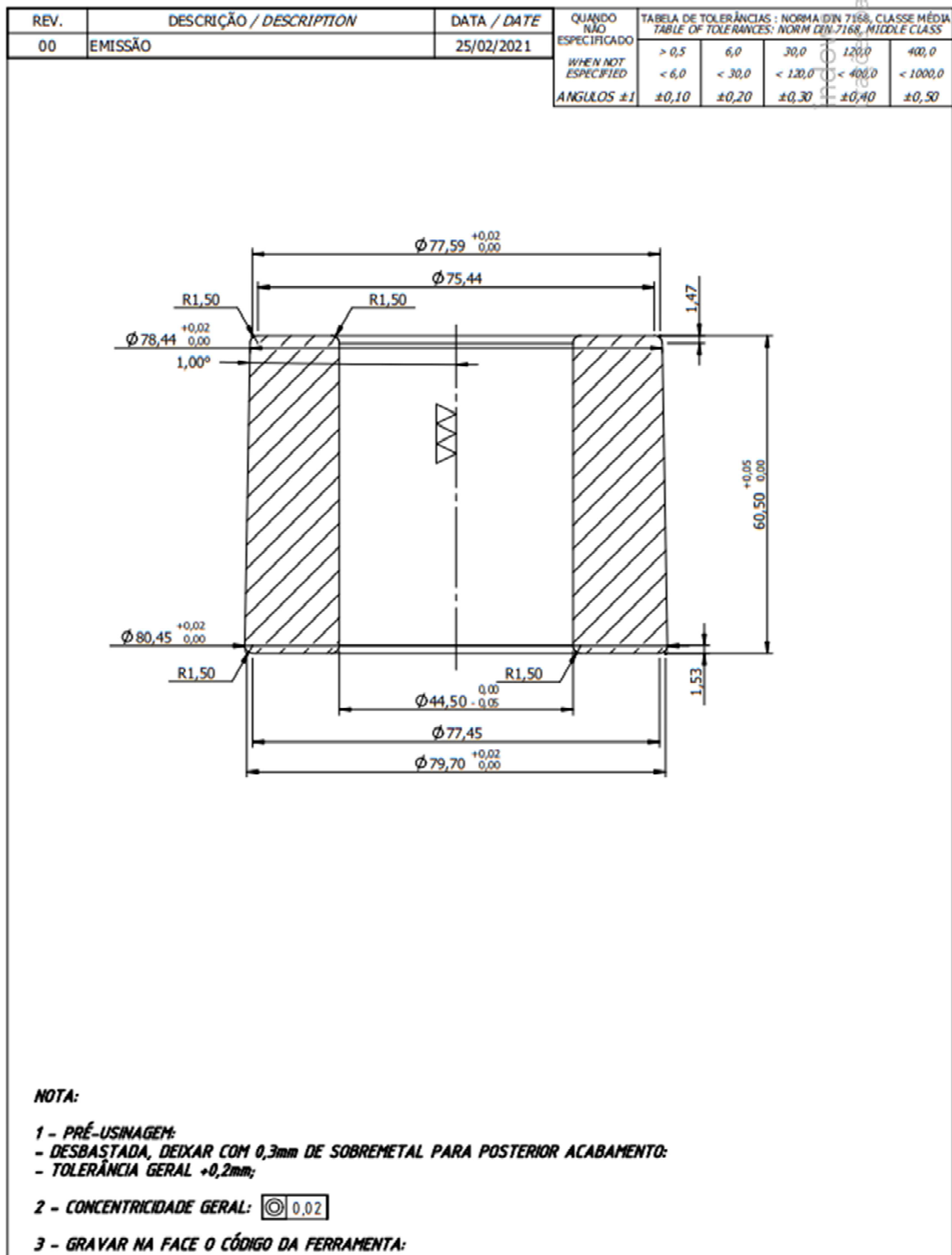
APÊNDICE A – DESENHO DO FERRAMENTAL

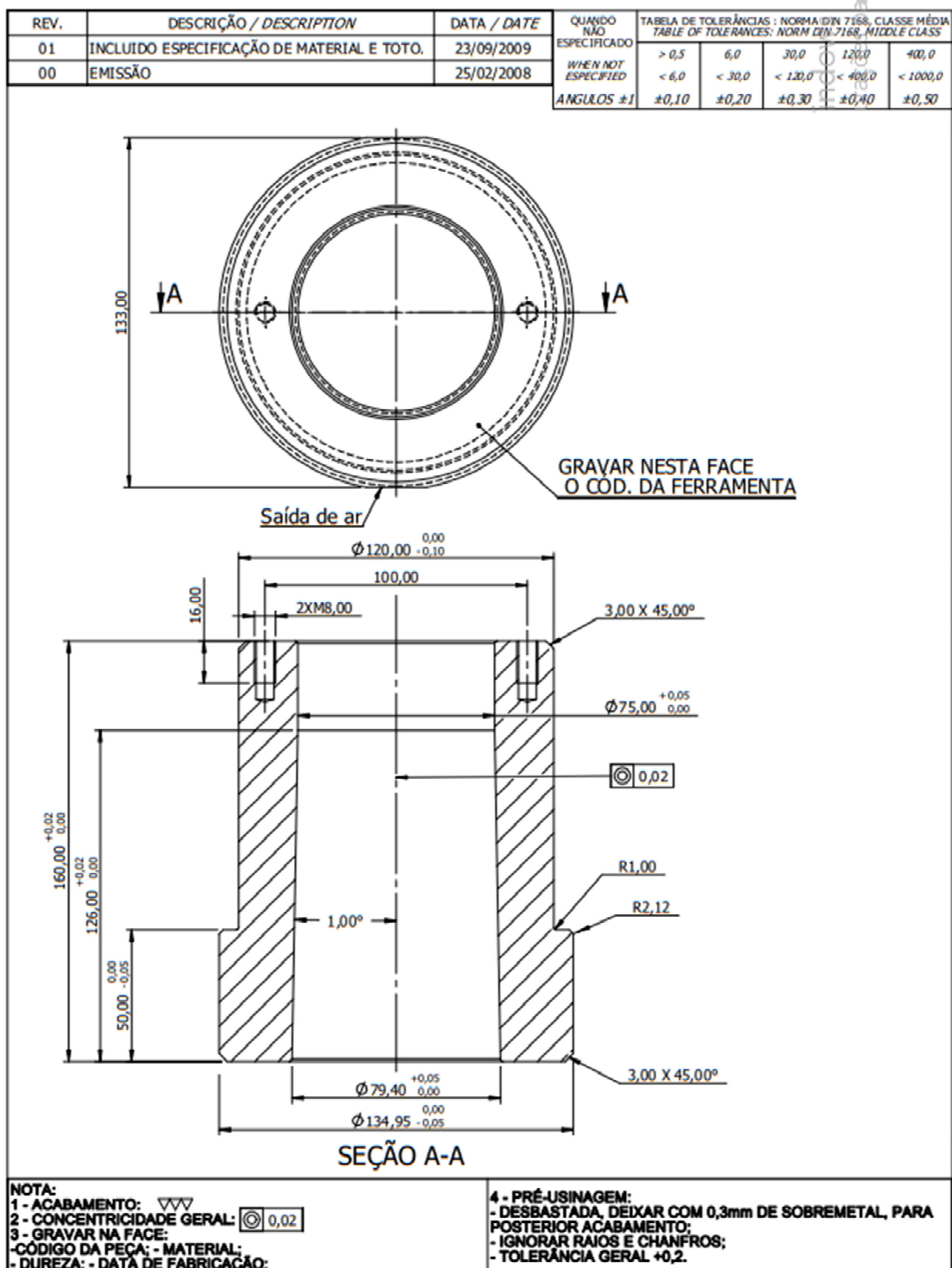




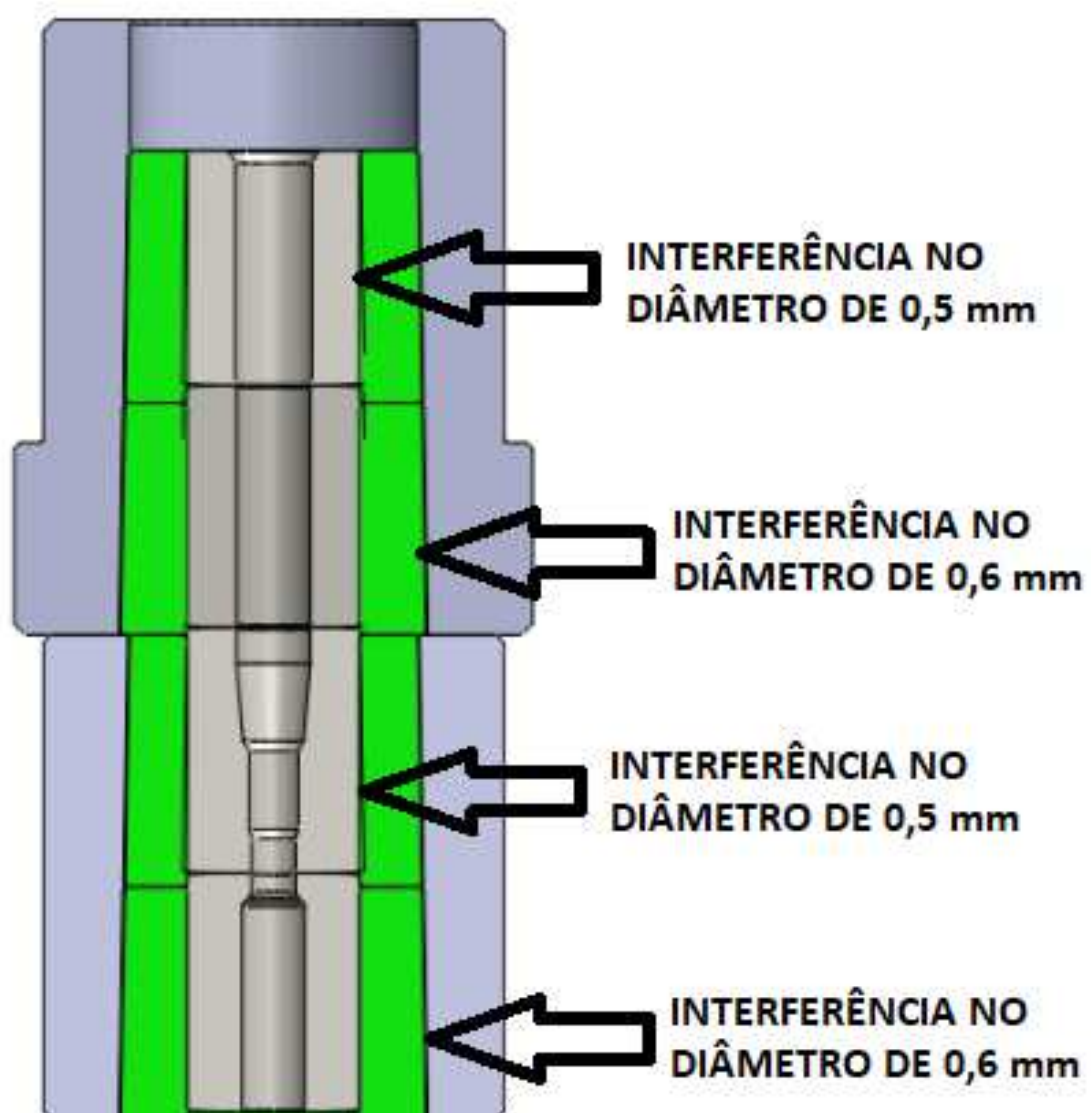








**APÊNDICE B – ESQUEMA DE ENCARÇAAMENTO**



## ANEXO A - NORMA ASTM E9 (PAG.01)



Designation: E9 – 09

## Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E9; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope

1.1 These test methods cover the apparatus, specimens, and procedure for axial-load compression testing of metallic materials at room temperature (**Note 1**). For additional requirements pertaining to cemented carbides, see **Annex A1**.

**Note 1**—For compression tests at elevated temperatures, see Practice **E209**.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are mathematical conversions to SI units that are provided for information only and are not considered standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

- B557** Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products
- E4** Practices for Force Verification of Testing Machines
- E6** Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
- E83** Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee **E28** on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee **E28.04** on Uniaxial Testing.

Current edition approved Nov. 1, 2009. Published December 2009. Originally published in 1924. Last previous edition approved in 2000 as E9-89a(2000) which was withdrawn March 2009 and reinstated in November 2009. DOI: 10.1529/E0009-09.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- E111** Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus
- E171** Specification for Atmospheres for Conditioning and Testing Flexible Barrier Materials
- E177** Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods
- E209** Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates
- E251** Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gauges
- E691** Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

### 3. Terminology

3.1 **Definitions:** The definitions of terms relating to compression testing and room temperature in Terminology **E6** and Specification **E171**, respectively, shall apply to these test methods.

#### 3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 **buckling**—In addition to compressive failure by crushing of the material, compressive failure may occur by (1) elastic instability over the length of a column specimen due to nonaxiality of loading, (2) inelastic instability over the length of a column specimen, (3) a local instability, either elastic or inelastic, over a small portion of the gage length, or (4) a twisting or torsional failure in which cross sections rotate over each other about the longitudinal specimen axis. These types of failures are all termed *buckling*.

3.2.2 **column**—a compression member that is axially loaded and that may fail by buckling.

3.2.3 **radius of gyration**—the square root of the ratio of the moment of inertia of the cross section about the centroidal axis to the cross-sectional area:

$$p = (IA)^{1/2} \quad (1)$$





**TABLE 2 Suggested Solid Cylindrical Specimens<sup>A</sup>**

NOTE 1—Metric units represent converted specimen dimensions close to, but not the exact conversion from inch-pound units.

Specimens	Diameter		Length		Approx <i>L/D</i> Ratio
	in.	mm	in.	mm	
Short	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25 ± 1	0.8
	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25 ± 1	2.0
Medium	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.50 ± 0.05	38 ± 1	3.0
	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	2.38 ± 0.12	60 ± 3	3.0
	1.00 ± 0.01	25.0 ± 0.2	3.00 ± 0.12	75 ± 3	3.0
	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	3.38 ± 0.12	85 ± 3	3.0
Long	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	6.38 ± 0.12	160 ± 3	8.0
	1.25 ± 0.01	32.0 ± 0.2	12.50 min	320 min	10.0

<sup>A</sup> Other length-to-diameter ratios may be used when the test is for compressive yield strength.

## ANEXO B – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO PL41

ArcelorMittal Aços Longos		<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b>				 ArcelorMittal												
Número: 0006392848/2019																		
Sistema de Gestão Integrado conforme as normas ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001																		
<b>Cliente:</b> VIEMAR INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA	<b>Pedido:</b> 640133	<b>Material:</b> 200458	<b>Aço:</b> PL41	<b>Corrida:</b> F445814	<b>Ordem de Venda:</b> 549961890	<b>Nota Fiscal:</b> 00001742												
<b>Produto:</b> TREFILADO REDONDO	<b>Especificação:</b> PL41 (Din41Cr4)	<b>Bitola:</b> 19,05 mm	<b>Acond.:</b> 6.000 mm	<b>Nº Lotes:</b> 1	<b>Peso (Kg):</b> 1030													
<b>Análise Química</b>							<b>Descarbonetação</b>											
C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	Nb	V	Ti	N	B	Ceq	Desc. Parcial	Desc. Total
0,4044	0,7708	0,2320	0,0110	0,0090	0,0224	0,0094	1,0952	0,0174	X	0,0017	X	X	0,0035	0,0030	X	X	0,13	Isento
<b>Propriedades Mecânicas</b>				<b>Microinclusões - ASTM E45</b>				<b>Tamanho do Grão</b>										
LR	LE	Z	A	DUREZA	A Fina	A Grossa	B Fina	B Grossa	C Fina	C Grossa	D Fina	D Grossa	Ferrítico	Austenítico	Tam Grão			
MPa	MPa	%	%	HB														
X	X	X	X	252	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7,0	X			
<b>Observações:</b> INSPECIONADO POR CORRENTE PARASITA COM SONDAS ROTATIVAS																		
Data: 30.09.2019																		
<p>Este documento certifica que o material aqui relacionado foi produzido, ensaiado e aprovado conforme requisitos de norma ou especificação solicitada.</p> <p>Certificamos que todo material relacionado acima foi produzido, testado e aprovado de acordo com a legislação vigente, não contém sulfuração em nível prejudicial ao ser humano.</p> <p>No caso de dúvidas, entre em contato com a nossa Assessoria ao Cliente 0800 015 1221 - <a href="http://www.arcelormittal.com.br">www.arcelormittal.com.br</a></p>																		
 <b>Eduardo Pires de Costa</b> Gerente Técnico Chief Metallurgist CREA RJ 06 1 00927 4																		
Página: 1/2																		