

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

Gilmar Cordeiro da Silva

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL NO PROCESSO DE EXTRUSÃO  
INDIRETA A FRIO, CONSIDERANDO O EFEITO DO CAMINHO DE  
DEFORMAÇÃO**

Belo Horizonte

2011

Gilmar Cordeiro da Silva

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL NO PROCESSO DE EXTRUSÃO  
INDIRETA A FRIO, CONSIDERANDO O EFEITO DO CAMINHO DE  
DEFORMAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Rubens  
Gonçalves Carneiro

Belo Horizonte

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S586s Silva, Gilmar Cordeiro da  
Simulação numérica e experimental no processo de extrusão indireta a frio, considerando o efeito do caminho de deformação / Gilmar Cordeiro da Silva. Belo Horizonte, 2011.  
176f.: il.

Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro  
Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Métodos de simulação. 2. Metais – Conformação. 3. Método dos elementos finitos. I. Carneiro, José Rubens Gonçalves. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.7.04

Gilmar Cordeiro da Silva

**Simulação numérica e experimental no processo de conformação por extrusão  
Indireta a frio considerando o efeito do caminho de deformação**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Mecânica.

---

José Rubens Gonçalves Carneiro – (Orientador) PUC Minas

---

Prof. Dr. José Maria Ramón Caccioppoli - UFMG

---

Profa. Dra. Sara Aida Rodríguez Pulecio – USP

---

Prof. Dr. Denilson Laudares Rodrigues – PUC Minas

---

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito – PUC Minas

---

Prof. Dr. William de Melo Silva – PUC Minas

Belo Horizonte 19 dezembro de 2011.

**A Deus seja toda honra e toda glória.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade e perseverança dadas a mim para realização deste trabalho.

Ao amigo e Professor José Rubens Carneiro pela orientação, amizade, troca de experiências, e acima de tudo pelos ensinamentos transmitidos.

À minha Mãe pela dedicação e carinho.

Ao meu Pai pelo exemplo de luta. “in memoriam”.

À minha amada esposa Elizângela e ao meu filho Lucas pela ajuda na realização deste trabalho.

Às minhas Irmãs, Agna, Wagner, Gislene e Viviane pelo apoio e incentivo.

Ao meu irmão Agmar (“in memoriam”).

Ao laboratório de Fenômeno de Superfície (LFS)-USP, Prof. Dr. Titular Roberto Martins de Souza, Prof<sup>a</sup>. Dra. Sara Aida Rodríguez Pulecio e ao Leandro Justino, pela presteza e disponibilidade do laboratório para testes.

Ao amigo e Prof. Tarcísio José de Almeida e aos Colegas da Brasição Indústria e Comércio Ltda., pelo apoio.

Ao amigo Erlano Campos Reis pela doação do material ABNT 1010.

Ao amigo André Bragança pela constante ajuda e suporte técnico.

À Comunidade Evangélica Graça & Paz, pelas constantes orações.

À Valéria, Pós-Graduação pelo grande apoio.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A utilização da técnica de elementos finitos na simulação de processos de conformação mecânica e de propriedades mecânicas dos materiais é, ainda, um desafio. Tem sido possível com relativo sucesso, a análise dos processos de conformação a frio bem como suas otimizações ainda na fase de projeto. Dependendo da forma desejada, a conformação requer vários estágios, sendo que cada estágio é responsável por uma pequena deformação. No entanto, a obtenção da sequência de produção mais eficiente sob o ponto vista técnico e econômico é, muitas vezes, obtida através de métodos empíricos, o que leva à realização de muitos testes e ajustes. O presente trabalho avaliou a influência de variáveis de processo de extrusão bem como suas restrições no processo de conformação por extrusão invertida a frio, utilizando-se a simulação física matrizes fechadas e prensas hidráulicas. Simultaneamente, as etapas de extrusões do aço ABNT 1010 foram simuladas por elementos finitos considerando ou não a existência do caminho de deformação. As curvas de fluxo tensão efetiva x deformação efetiva utilizadas nas simulações numéricas do 1º estágio foram obtidas por intermédio de ensaio de tração convencional e ensaio de indentação instrumentada. As técnicas empregadas mostraram-se eficientes na obtenção tanto das curvas de fluxo quanto do perfil de deformação efetiva na simulação, utilizando o programa Deform 2D. A previsão de carga foi, também, feita, obtendo-se uma distribuição com erro médio e desvio padrão de 14,32 e 4,22 e 11,02 e 4,06 , respectivamente, para aço ABNT 1010 trefilado e recozido com diferentes geometrias do punção. A partir dos resultados obtidos no primeiro passe foi proposta uma técnica de levantamento das curvas de fluxo, considerando-se o efeito do caminho de deformação.

Palavras-chave: Simulação Numérica. Conformação. Ensaio de indentação instrumentada.

## ABSTRACT

Using the technique of finite element to the simulation of mechanical forming processes and the assessment of mechanical properties of materials is still a challenge. Analysis of cold forming processes has been accomplished, with relative success, as well as optimizations during project development. Depending on the desired shape, forming requires several stages, being each stage responsible for a small deformation. However, obtaining an efficient production sequence, from economical and technical standpoints is, in many instances, achieved by empirical methods which require a number of tests and adjustments. The present work assessed the influence of the extrusion process variables as well as their restrictions in cold inverted extrusion forming by physically simulating closed-form matrices and hydraulic presses. Simultaneously, extrusion stages of ABNT 1010 steel were simulated by applying finite element analysis considering or not the existence of deformation paths. The flow curves, effective stress versus effective strain, used in numerical simulations of 1 ° stage were obtained by means of conventional tensile test and instrumented indentation tests. The techniques employed revealed to be effective for obtaining both flux curves as well as effective deformation profiles using the software Deform 2D. Load prediction was also performed by obtaining a mean error distribution with standard deviation 14.32, 4.22, 11.02 and 4.06 respectively for ABNT 1010 steel in the cold-drawn and hot-rolled directions with different puncture geometries. From the obtained results for the first deformation step a technique was proposed for determining flux curves which take the deformation path into account.

Keywords: Numerical simulation. Forming. Hardness indentation test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão conceitual do atrito como função da pressão de contato. Evolução do atrito em função da tensão normal .....	28
Figura 2 – Esquema simplificado da classificação dos processos de conformação. ....	34
Figura 3 – Exemplo do processo de extrusão invertida com modelo de malha (a) e radial no qual se mostra o tarugo inicial e a peça conformada (b) .....	36
Figura 4 – Exemplo do processo de extrusão invertida e radial mostrando diâmetro do tarugo $d_0$ , diâmetro do flange, $d_B$ , diâmetro do punção, $d_{st}$ ; o altura do tarugo, $h_1$ ; altura da peça, $h_{st}$ ; curso do punção, $s$ ; raio da matriz, $r_1=r_2$ ..	37
Figura 5 – Fatores operacionais que afetam o processo de extrusão.....	38
Figura 6 – Aplicação do método visioelasticidade em conformação de chapas.....	42
Figura 7 – Aplicação do método visioelasticidade no processo de trefilação .....	42
Figura 8 – Representação esquemática dos possíveis contatos entre penetrador e amostra .....	46
Figura 9 – Etapas de uma simulação computacional envolvendo as três etapas de processamento .....	58
Figura 10 – Desenho esquemático da geometria da ferramenta de extrusão à frente, à ré e radial .....	60
Figura 11 – Foto da ferramenta de extrusão à frente com célula de carga .....	62
Figura 12 – Fluxograma esquemático dos métodos utilizados no trabalho .....	63
Figura 13 – Dimensões em mm dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração .....	65
Figura 14 – Estampo de corte .....	68
Figura 15 – Corpo de prova cisalhado, evidenciando superfície irregular do corte ..	69
Figura 16 – Torno CNC .....	69
Figura 17 – Centro de Usinagem Romi Discovery 560 .....	70
Figura 18 – Desenho dimensionado do corpo de prova usinado sem malha .....	71
Figura 19 – Desenho em 3D do projeto da ferramenta .....	71
Figura 20 – Disposição das marcações na face usinada do corpo de prova .....	72
Figura 21 – Programa utilizado para a marcação do corpo de prova .....	72
Figura 22 – Corpos de prova marcados .....	73
Figura 23 – Prensa hidráulica de simples efeito.....	73
Figura 24 – (a) Ferramenta em corte, (b) Ferramenta em perspectiva .....	74

Figura 25 – (a) Punções de extrusão (45,20,15,0) graus (b) Punção 30 graus montado no porta punção .....	75
Figura 26 – Ferramenta de extrusão desmontada e seus componentes .....	75
Figura 27 – Ferramenta de extrusão montada e os quatro punções.....	76
Figura 28 – Projetor de perfil pertencente ao laboratório de metrologia PUC Minas-Contagem.....	77
Figura 29 – Foto do dispositivo com o bloco de alumínio e os três imãs(a): Corpo de prova não deformado fixado ao dispositivo(b): Corpo de prova deformado a 45°fixado ao dispositivo(c) .....	77
Figura 30 – Posição dos círculos no corpo de prova sem deformação .....	78
Figura 31 – (a) Sentido dos eixos, formato e dimensões $dx$ e $dy$ do círculo inicial antes da extrusão, (b) formato dos círculos dimensões $dx$ e $dy$ após extrusão .....	79
Figura 32 – Regiões estudadas (A, B, C) e locais de marcações perdidas.....	80
Figura 33 (a), (b) e (c) – Laboratório de indentações instrumentada da USP e nanodurômetro .....	81
Figura 34 – amostras embutidas trefiladas e recozidas .....	82
Figura 35 – Região avaliada na determinação da carga .....	82
Figura 36 – Pontos da região avaliada na amostra sem deformação recozida e trefilada .....	83
Figura 37 – (a) Sentido de indentação (corpos de prova a 15°, 20°, 30° e 45°), (b) (corpo de prova a 0°) .....	84
Figura 38 – Microdurometro Buehler MMT3/645.....	85
Figura 39 – Amostra trefiladas sem deformação e deformadas a 0°,15°,20°,30° e 45° embutidas .....	85
Figura 40 – Sentido adotado nas Indentações no ensaio de microdureza.....	86
Figura 41 – Amostra do aço ABNT 1010 - (200x) .....	89
Figura 42 – Curvas, equações e resultante dos quatro corpos de prova trefilados...	91
Figura 43 – Curvas, equações e resultante dos quatro corpos de prova recozidos ..	91
Figura 44 – Gráfico comparativo entre as tensões versus deformações de engenharia experimental e modelada com os seus respectivos erros .....	93
Figura 45 – Gráfico da distribuição normal (curva gaussiana) das medidas realizadas.....	94

Figura 46 – Gráfico comparativo dureza Vickers (Gpa),carga (mN) e desvio padrão das amostras trefiladas e recozidas .....	95
Figura 47 – Gráfico comparativo entre as tensões versus deformações de engenharia experimental e a modelada por EII com os seus respectivos erros .....	104
Figura 48 (a) e (b) – Corpos de prova extrudados no estado recozido e trefilado respectivamente .....	106
Figura 49 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 0 <sup>0</sup> .....	107
Figura 50 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova recozido 0 <sup>0</sup> .....	107
Figura 51 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 20 <sup>0</sup> .....	108
Figura 52 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 20 <sup>0</sup> .....	109
Figura 53 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 45 <sup>0</sup> .....	110
Figura 54 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova recozido 45 <sup>0</sup> .....	110
Figura 55 – (a) Punção 0°; (b) Punção 15°; (c) Punção 20°; (d) Punção 30°; (e) Punção 45° .....	114
Figura 56 – Cargas(tons), malhas e ângulos dos punções .....	115
Figura 57 – Valores de carga (Kgf) em função do ângulo do punção .....	116
Figura 58 – Erro de carga da simulação .....	116
Figura 59 – Deformação efetiva região C punção 0° .....	117
Figura 60 – Distribuição valores simulados deformação efetiva região C .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das constantes usadas nas equações para o cálculo das propriedades mecânicas .....	52
Tabela 2 – Condições de Trabalho .....	87
Tabela 3 – Composições químicas em porcentagem em peso do aço ABNT 1010..	89
Tabela 4 – Expressões de Hollomon referente ao ensaio de tração dos quatro corpo de prova trefilados.....	90
Tabela 5 – Expressões de Hollomon ensaio de tração corpo de prova recozidos ....	90
Tabela 6 – Expressões de Hollomon média ensaio de tração corpo de prova trefilados/recozidos .....	90
Tabela 7 – Dados estatísticos .....	93
Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada corpo de prova trefilada carga 40Mn.....	96
Tabela 9 – Valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada corpo de prova recozido carga 70mN .....	97
Tabela 10 – Resultado de Microdureza – Amostra Trefilada e recozida não deformadas - Carga 50 Gramas.....	98
Tabela 11 – Resultados do algoritmo inverso corpo de prova trefilado sem deformação .....	99
Tabela 12 – Resultados do algoritmo inverso corpo de prova recozido sem deformação .....	99
Tabela 13 – Equações de Hollomon procedimentos A*, B* e C* .....	102
Tabela 14 – Erro total médio tensão de engenharia (EII) em relação a tensão de engenharia ensaio tração.....	103
Tabela 15 – Carga e deslocamento do punção na extrusão indireta dos corpos de prova trefilados.....	105
Tabela 16 – Carga e deslocamento do punção na extrusão indireta dos corpos de prova recozidos.....	105
Tabela 17 – Valores estatísticos obtidos na distribuição de deformação nas regiões A,B e C segundo a direção dos eixos X e Y para o punção com inclinação de 20°. .....	112
Tabela 18 – Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 20°- Carga 50gf .....	119
Tabela 19 – Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 20°- Carga 50gf .....	119

Tabela 20 – Resultado das soluções propostas algoritmo inverso amostra trefilada/extrudada a 20° .....	119
Tabela 21 – Resultado das soluções propostas algoritmo inverso amostra Recozida/extrudada a 20° .....	120
Tabela 22 – Equação de Hollomon – 2º Estágio .....	121

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características de alguns softwares comerciais.....	57
---------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBSD	Electron Backscattering Diffraction
LVDT	Linear variable differential transformer
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SFTC	Scientific Forming Corporation
USP	Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

$A_c$	Área projetada de contato penetrador-amostra ( $\mu\text{m}^2$ )
$A(h_c)$	Função de área para o contato penetrador-amostra
$A_p$	Profundidade de corte
$A_p$	Constante empírica obtida após o ajuste da curva de descarregamento
$A_V$	Área projetada da impressão residual ( $\mu\text{m}^2$ )
$A^*$	1º Procedimento
$B_0$	Coefficiente de Polinômio
$B_1$	Coefficiente de Polinômio
$B_2$	Coefficiente de Polinômio
$B_n$	Coefficiente de Polinômio
$B(ni)$	Valor numérico para cada ensaio obtido pela subtração do coeficiente de encruamento em relação ao coeficiente de encruamento médio dos quatro ensaios
$B^*$	2º Procedimento
$C$	Constante
$C_1$	Relação entre a carga máxima e a profundidade máxima da curva de carregamento
$C_2$	Constante obtida em ensaio de tração
$C_g$	Média geométrica dos valores exponenciais dos coeficientes de resistência
$C(ni)$	Valor de correlação entre coeficientes de resistência e sua média geométrica
$C^*$	3º Procedimento
$D$	Valor do somatório da correlação entre coeficiente de encruamento e sua média
$\bar{D}$	Média das medições
$d$	Tamanho médio do grão
$d_m$	Comprimento médio da diagonal da impressão

$dh$	Diferencial de altura
$dP$	Diferencial de carga
$d\varepsilon$	Incremento de deformação
$dt$	Incremento de tempo
$D_i$	Valor de cada medição
$d_x$	Dimensões finais dos eixos X e Y
$d_y$	Dimensões finais dos eixos X e Y
$e$	Deformação convencional
$\bar{e}_1$	Deformação de engenharia no início do escoamento (EII)
$\bar{e}_2$	Valor da deformação de engenharia na carga máxima (EII)
$e_v$	Deformações reais
$E$	Módulo de Elasticidade (MPa)
EII	Ensaio de indentação instrumentada
$E_1$	Valor do somatório do valor numérico para cada ensaio
$E_i$	Módulo de elasticidade do penetrador
$E_{mc}$	Cálculo de erro médio
$E_{mcEII}$	Cálculo de erro médio ensaio de indentação instrumentada
$E_{TM}$	Erro total médio
$E_r$	Módulo reduzido do conjunto penetrador-amostra (GPa)
$f$	Notação de função
$f'$	Fator de atrito
$gl$	Graus de liberdade
$H_0$	Dureza inicial do material (N/m <sup>2</sup> )
$h_c$	Profundidade de contato penetrador-amostra ( $\mu\text{m}$ )
$h_f$	Profundidade da impressão residual ( $\mu\text{m}$ )
$h_{max}$	Profundidade de penetração máxima ( $\mu\text{m}$ )
HP	Dureza com a correção (EII)
$h_s$	Descolamento da superfície ao redor do perímetro de contato   $\mu\text{m}$

$H_v$	Dureza Vickers
$HV$	Dureza Vickers (EII)
$HV_i$	Dureza Instrumentada ( $N/m^2$ )
$I(A)$	Incerteza de medição
$k$	Coefficiente de resistência (MPa)
$k'$	Valor do coeficiente de resistência da equação Hollomon obtida no ponto de escoamento
$k''$	Valor do coeficiente de resistência da equação Hollomon obtida no ponto de carga máxima
$k'''$	Coefficiente de resistência
$k_0$	Valor numérico
$k_f$	Constante característica do material
$k_H$	Constante característica do material
$k_H d$	Constante material
$kni$	Coefficiente de resistência de cada material tracionado
$l_0$	Comprimento inicial (mm)
$l_f$	Comprimento final (mm)
$m$	Índice de sensibilidade à velocidade de deformação
$m'$	Fator de cisalhamento
$m''$	Constante empírica obtida após o ajuste da curva de descarregamento
$M_j$	Valor do coeficiente de encruamento de cada curva
$\bar{M}_j(ni)$	Coefficiente de encruamento médio
$n$	Coefficiente de encruamento
$\bar{n}$	Coefficiente de encruamento no ensaio de indentação instrumentada
$n_x$	Tamanho da população x
$n_y$	Tamanho da população y
$P$	Carga aplicada no ensaio instrumentado de Dureza (mN).
$P_{max}$	Carga máxima no ensaio instrumentado de dureza (mN)

$Q_{max}$	Carga máxima (kgf)
$R_a$	Rugosidade média ( $\mu\text{m}$ )
$R_{a0}$	Rugosidade média inicial ( $\mu\text{m}$ )
$S$	Rigidez de contato penetrador-amostra ( $\text{mN}/\mu\text{m}$ )
$Stat t$	Variável estatística $t$ amostral
$S_0$	Área inicial ( $\text{mm}^2$ )
$\bar{s}$	Desvio padrão obtido para a população x e y
$T$	Temperatura da peça (Kelvin)
$t$	Tonelada
$t_{\alpha/2}$	$t$ crítico bi-caudal
$T_f$	Temperatura de fusão do material (Kelvin)
$T_h$	Temperatura homóloga (Kelvin)
$U_0^D$	Energia elástica de distorção por unidade de volume ( $\text{Joule}/\text{m}^3$ )
$U_0^{D*}$	Valor crítico característico do material ( $\text{Joule}/\text{m}^3$ )
$W_0$	Valor numérico
$Z_0$	Média logarítmica dos valores exponenciais do coeficiente de resistência

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\beta$	Constante que relaciona o módulo reduzido, a rigidez de contato e a área projetada de contato penetrador-amostra
$\Delta l$	Varição de comprimento (mm)
$\Delta R_{a0}$	Varição de rugosidade média inicial ( $\mu\text{m}$ )
$\varepsilon$	Constante que depende da geometria do penetrador
$\varepsilon_{v1}$	Valor de deformação verdadeira no ponto de escoamento (EII)
$\varepsilon_{v1.2}$	Deformação verdadeira no ponto de escoamento e carga máxima (EII)
$\varepsilon_{v2}$	Valor de deformação verdadeira no ponto de carga máxima (EII)
$\bar{\varepsilon}_v$	Deformação verdadeira
$\dot{\varepsilon}$	Velocidade de deformação ( $\text{s}^{-1}$ )
$\varepsilon_V$	Deformação verdadeira
$\varepsilon_r$	Deformação acumulada acima do ponto de escoamento (deformação representativa)
$\varepsilon_{r\theta}$	Deformação representativa em função do ângulo da ponta do penetrador
$\varepsilon_x$	Deformação na direção x
$\varepsilon_y$	Deformação na direção y
$\theta$	Ângulo da ponta do penetrador
$\mu$	Coefficiente de atrito ou constante de Coulomb
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\nu_i$	Coefficiente de Poisson do material do penetrador
$\Pi$	Produto
$\sigma$	Tensão de engenharia
$\bar{\sigma}$	Tensão de fluxo
$\bar{\sigma}_{c\text{exp}}$	Tensão engenharia experimental obtida em cada um dos ensaios no intervalo entre a deformação de escoamento e a deformação correspondente a carga máxima.
$\bar{\sigma}_{c\text{mod}}$	Tensão de engenharia modelada a partir da equação média

$\bar{\sigma}_c mod EII$	Tensão de engenharia modelada a partir de cada curva de Hollomon
$\sigma_f$	Tensão de escoamento final
$\sigma_n$	Tensão normal (MPa)
$\sigma_{0f}$	Constante característica do material
$\sigma_R$	Limite de resistência (MPa)
$\sigma_r$	Tensões reais
$\sigma_{v1}$	Valor tensão verdadeira no ponto de escoamento (EII)
$\sigma_{v2}$	Valor tensão verdadeira no ponto de carga máxima (EII)
$\sigma_{v1.2}$	Valor tensão verdadeira entre escoamento e carga máxima (EII)
$\sigma_y$	Limite de escoamento
$\sigma_x$	Tensão normal no eixo X (MPa)
$\sigma_z$	Tensão normal no eixo Z (MPa)
$\sigma_0$	Tensão de escoamento
$\sigma_1$	Tensão principal 1 (MPa)
$\sigma_2$	Tensão principal 2 (MPa)
$\sigma_3$	Tensão principal 3 (MPa)
$\sigma_{0,033}$	Tensão para uma deformação de 0,033 (MPa)
$\tau_f$	Tensão de fricção (MPa)
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima de cisalhamento
$\tau_{xy}$	Tensão de cisalhamento plano xy (MPa)
$\tau_{yz}$	Tensão de cisalhamento plano yz (MPa)
$\tau_{zx}$	Tensão de cisalhamento plano zx (MPa)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
1.1 Generalidades.....	22
1.2 Objetivos .....	24
1.2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	24
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1 Elementos da teoria da plasticidade .....	25
2.2 Critérios de escoamento.....	28
2.3 Curva de fluxo .....	30
2.4 Encruamento .....	31
2.5 Processos de fabricação .....	32
2.5.1 <i>Processos de conformação dos metais</i> .....	34
2.5.1.1 <u>Extrusão de metais</u> .....	35
2.6 Influência do caminho de deformação nas propriedades mecânicas .....	39
2.7 Técnicas de medição de deformação .....	40
2.7.1 <i>Visioplasticidade</i> .....	41
2.8 Dureza/microdureza versus tensão de fluxo .....	42
2.8.1 <i>Dureza instrumentada</i> .....	44
2.8.2 <i>Determinação da dureza instrumentada</i> .....	47
2.8.2.1 <u>Determinação de outras propriedades mecânicas</u> .....	49
2.9 Modelagem dos processos de conformação mecânica.....	54
2.10 Softwares comerciais de simulação computacional por elementos finitos .....	56
2.10.1 <i>Conceitos iniciais</i> .....	56
2.10.1.1 <u>Características funcionais do software Deform 2D®</u> .....	58
2.10.1.2 <u>Pré-processamento</u> .....	59
2.10.1.3 <u>Processamento</u> .....	59
2.11 Estado atual dos conhecimentos .....	60
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>63</b>
3.1 Etapa preparatória.....	64
3.1.1 <i>Curvas tensão deformação obtidas por ensaio de tração</i> .....	64
3.1.2 <i>Visioplasticidade</i> .....	68
3.1.2.1 <u>Confecção e marcação dos corpos-de-prova</u> .....	68
3.1.2.2 <u>Extrusão dos corpos-de-prova em prensa hidráulica</u> .....	73
3.1.2.3 <u>Mensuração da malha e determinação das deformações</u> .....	76
3.1.5 <i>Ensaio de indentação instrumentada amostras trefiladas e recozidas</i> .....	81
3.1.6 <i>Ensaio de indentação instrumentada amostras trefiladas/extrudadas e recozidas/extrudadas</i> .....	83
3.1.7 <i>Ensaio de microdureza</i> .....	84
3.1.8 <i>Curva tensão deformação obtida pelo Ensaio de indentação</i> .....	86
3.2 Simulação numérica.....	87
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>89</b>
4.1 Análise química .....	89
4.2 Curva tensão versus deformação obtidas no ensaio de tração.....	90

4.3 Resultados da mensuração da malha no corpo de prova .....	93
4.4 Avaliação da carga para o ensaio de indentação instrumentada .....	94
4.5 Ensaio de indentação instrumentada nas amostras sem deformação.....	95
4.6 Ensaio de microdureza nas amostras sem deformação.....	97
4.7 Curva tensão versus deformação obtida pelo ensaio de indentação.....	99
4.8 Resultados extrusão indireta dos corpos-de-prova em prensa hidráulica. ....	104
4.9 Resultados determinação das deformações .....	106
4.10 Resultados simulação numérica.....	114
4.11 Equação de Hollomon para o 2º estágio de deformação .....	118
5 CONCLUSÕES .....	122
6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O APORTE DO TRABALHO .....	123
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	124
REFERÊNCIAS.....	125
APÊNDICE.....	135
ANEXOS .....	172

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Generalidades

Conforme Zhang et al. (2006) conformação de metal é um processo amplamente utilizado nas indústrias em razão do mínimo desperdício, precisão dimensional e propriedades mecânicas ajustadas. Os processos de conformar os materiais são divididos em compressão direta, indireta, tração, dobramento e cisalhamento. Dentre os processos de compressão indireta têm-se trefilação, extrusão e embutimento.

A conformação a frio apresenta vantagens econômicas sobre a usinagem, tais como: economia de material, produtividade e custo operacional dependendo da escala de fabricação.

Os aços mais utilizados na conformação a frio são os aços de baixo carbono tais como ABNT 1010, em substituição aos aços usinados (ABNT 12L14 e DIN 9SMn36) e de baixa liga tratados termicamente (ABNT 10B22). Todos esses aços (exceção do ABNT 1010 e ABNT 10B22) são usualmente empregados para fabricação dos terminais em processo de usinagem. Alguns parâmetros que influenciam a conformabilidade de arames foram analisados tais como a composição química, desoxidação, microestrutura, qualidade da superfície, revestimento superficial e velocidade do recalque (WEIDIG, et al. 1995). A fabricação da matéria-prima conformada a frio deve propiciar ausência de defeitos antes da operação através do controle de processo e condicionamento por escafoagem. Os principais defeitos que podem ocorrer na conformação são de forma, dobras, defeitos de preenchimento, trincas e marcas em decorrência da matriz que prejudicam o desempenho da peça em serviço.

O aprimoramento da técnica de conformação a frio envolve algumas dificuldades devido ao grande número de parâmetros constituintes do processo. Parâmetros de processo preferidos incluem menor número de etapas de conformação, menor número de ferramentas abrasivas, menor lubrificação e a estabilização do processo com o mínimo de rejeito possível. A conformação a frio pode se valer dos testes experimentais como um método de desenvolvimento, acarretando com isso, altos custos.

A modelagem computacional de cada estágio do processo de conformação pelo método de elementos finitos pode tornar o projeto da sequência mais rápido e eficiente, decrescendo o uso dos métodos convencionais de “tentativa e erro” (CHO, et al. 2003; LIMA; BUTTON, 2000). A existência de um banco de dados obtido experimentalmente e em combinação com “software” específico de simulação potencializa o valor da simulação, e, mais importante, a velocidade de desenvolvimento do processo.

As prensas mecânicas são de alta produtividade e elevado custo inicial em comparação às prensas hidráulicas. Justifica-se, portanto, este trabalho pela possibilidade que a simulação por elementos finitos proporciona em termos de se analisar as restrições da extrusão em prensa hidráulica em detrimento à prensa mecânica de alta velocidade de deformação em aços utilizados, na condição de conformado a frio.

Extrusão é o processo pelo qual um bloco de material é reduzido na seção transversal por forçá-lo através de um orifício sob alta pressão. Em razão das elevadas forças envolvidas, a maioria dos materiais são extrudados a quente onde a resistência à deformação é menor. O processo de extrusão a frio (direto e indireto), é possível para muitos materiais e constitui importante alternativa de processo comercial (DIETER, 1976).

A extrusão é feita em prensas hidráulicas ou mecânicas. Extrusão a frio se relaciona com a conformação a frio de arames e barras para produção de peças tais como eixos, pinos, parafusos e terminais para indústria automobilística. Conformação a frio resulta em alta produção de peças de material de custo baixo com excelente controle dimensional e acabamento superficial

A conformação mecânica muda as propriedades mecânicas do material. Há freqüentemente uma alteração da resistência mecânica, devido à deformação a frio. A magnitude dessa alteração não depende somente das dimensões iniciais e finais do produto, mas, também, do caminho de deformação a que o produto foi submetido. Após algum endurecimento inicial, existe a possibilidade que mais deformações possam amaciar o material.

O presente estudo utilizou a modelagem numérica via elementos finitos e métodos experimentais. O caminho de deformação aliado à viscoplasticidade e a técnica de elementos finitos, adicionada à comprovada correlação entre nanodureza e tensão de fluxo, constituíram idéias básicas que nortearam os experimentos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar por meio do método de elementos finitos, a resposta numérica do processo de conformação mecânica a frio, no qual envolve a etapa axissimétrica do processo de fabricação por extrusão indireta, com variação do ângulo do punção. Considerando-se, também, o efeito do caminho de deformação a fim de adequar os parâmetros necessários à simulação das etapas axissimétricas deste material.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Simular a etapa axissimétrica de extrusão invertida do aço ABNT 1010, utilizando-se uma curva tensão efetiva x deformação efetiva convencional.

Simular a etapa axissimétrica de conformação a frio do aço ABNT 1010, utilizando-se uma curva tensão efetiva x deformação efetiva que considere o efeito do caminho de deformação.

Correlacionar as curvas de fluxo obtidas por ensaio de tração e nanodureza.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica compreendeu a teoria da plasticidade, critérios de escoamento, curva de fluxo, encruamento e processos de fabricação que foram estudados com a intenção de investigar os mecanismos de deformação plástica no processo de extrusão. A curva de fluxo obtida por ensaio de tração convencional oferece informações sobre a deformação plástica e o fenômeno de encruamento. A conformação a frio provoca o fenômeno de encruamento e a tensão de fluxo formulada como variável de estado é dependente dos parâmetros de deformação, velocidade de deformação e temperatura. A tensão de fluxo do material deve ser considerada como uma variável dependente da história termomecânica e não somente dos parâmetros de conformação sendo que o efeito Bauschinger confirma essa dependência. Farhoumand e Ebrahimi (2009) analisaram o processo de extrusão à frente, à ré e extrusão radial, porém, consideraram a tensão de fluxo como dependente somente dos parâmetros de conformação.

### 2.1 Elementos da teoria da plasticidade

Os materiais de engenharia são utilizados em aplicações onde se necessita resistência mecânica. As diferenças entre as classes de materiais como ligação química e microestrutura afetam o comportamento mecânico originando-se as vantagens e desvantagens entre os materiais.

A deformação elástica não se associa à quebra de ligações químicas entre os átomos em um sólido. Se uma carga externa for aplicada a um material, a distância entre os átomos se altera por uma quantidade que depende do material e de sua estrutura e ligação. Essas distâncias, quando acumuladas sobre um pedaço de material de tamanho macroscópico, são chamadas deformações elásticas. A deformação plástica, na maioria das vezes, ocorre pelo movimento de discordâncias sob influência de cargas cisalhantes e, muitas vezes, concentradas em bandas de escorregamento. Como resultado da deformação plástica, os átomos mudam de vizinhos, retornando à configuração estável com novos vizinhos após a passagem da discordância. A deformação plástica não é um processo reversível como a deformação elástica, depende da maneira segundo a qual é exercida a sollicitação mecânica para se atingir o estado final (DOWLING,1993).

A finalidade de aplicar a teoria de plasticidade na conformação de metais é investigar os mecanismos de deformação plástica nesses processos. Os mecanismos de deformação fornecem os meios para determinação da fluidez do metal, como a geometria desejada é obtida pela deformação plástica e quais são as propriedades mecânicas esperadas da peça produzida. A fim de chegar a uma descrição matemática gerenciável da deformação de metais, diversas hipóteses simplificadoras são feitas (ALTAN; OH; GEGEL, 1983):

- a) deformações elásticas são negligenciadas com exceção da recuperação elástica em dobramento e deflexão de matriz em forjamento de precisão;
- b) o material é considerado contínuo e o volume é constante;
- c) dados dos testes de tração e compressão uniaxiais correlacionam-se com a tensão de fluxo em condições de deformação multiaxiais;
- d) anisotropia e efeito Bauschinger são negligenciados;
- e) atrito é expresso pela lei de Coulomb ou por uma tensão de cisalhamento constante.

O comportamento dos metais durante a conformação mecânica é fortemente influenciado por sua temperatura. Os processos de conformação podem ser classificados em função de uma “temperatura homóloga”, definida pela razão entre a temperatura de processamento do metal e sua temperatura de fusão, ambas em Kelvin (K) (Equação 1):

$$T_h = \frac{T}{T_f} \quad (1)$$

onde,  $T_h$  é a temperatura homóloga,  $T$  é a temperatura da peça e  $T_f$  é a temperatura de fusão do material em K.

Classicamente, o processo é considerado a quente para  $T_h \geq 0,5$ , a morno para  $0,3 < T_h < 0,5$  e a frio quando  $T_h \leq 0,3$  (HELMAN; CETLIN, 2005). Nas faixas de temperatura de trabalho a frio, a resistência ao escorregamento nos planos cristalinos cresce com o próprio escorregamento; isto conduz a um aumento da resistência com redução da ductilidade do metal, podendo ainda promover uma anisotropia de propriedades.

Na conformação de um metal, o fluxo de material é causado pela pressão transmitida da ferramenta à peça. As condições de atrito na interface material/matriz influenciam o fluxo, a formação de defeitos superficiais e internos, tensões atuantes na matriz, e necessidade de carga e energia. Há três condições básicas de lubrificação que governam a conformação de metais que são a seco, hidrodinâmicas e de contorno. A fim de avaliar o desempenho de vários lubrificantes e prever as pressões de conformação, utilizam-se as Equações 2 e 3.

$$\tau_f = \mu\sigma_n \quad (2)$$

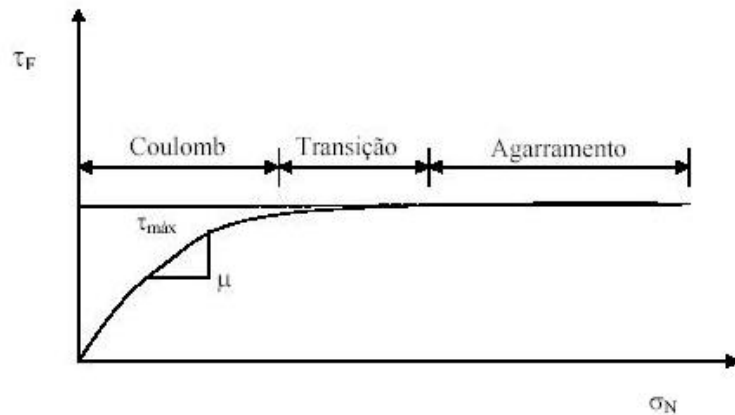
ou

$$\tau_f = f'\bar{\sigma} = m'\bar{\sigma}^{1/\sqrt{3}} \quad (3)$$

A Equação 2 indica que a tensão de fricção ( $\tau_f$ ) é proporcional à tensão normal ( $\sigma_n$ ) na interface matriz/material. A Equação 3 expressa que ( $\tau_f$ ) depende da tensão de fluxo ( $\bar{\sigma}$ ) do material e do fator de atrito ( $f'$ ) ou do fator de cisalhamento  $m'$ . Os valores de  $m'$  variam entre 0,05 e 0,15 na conformação a frio de aço, utilizando-se fosfato como sabão ou óleo como lubrificante. A lubricidade definida pelo fator  $m'$  é comumente avaliado pelo teste do anel (ALTAN; VAZQUEZ, 1983).

A Figura 1 mostra a visão conceitual do atrito como função da pressão de contato (WAGONER; CHENOT, 1996) e a evolução do atrito em função da tensão normal (HELMAN; CETLIN, 2005).

**Figura 1 – Visão conceitual do atrito como função da pressão de contato.  
Evolução do atrito em função da tensão normal**



Fonte: WAGONER; CHENOT, 1996; HELMAN; CETLIN, 2005.

## 2.2 Critérios de escoamento

Qualquer critério de escoamento é um postulado matemático que expressa o estado de tensões que induz o escoamento. A forma geral é dada pela Equação 4:

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = C \quad (4)$$

ou em termos das tensões principais (Equação 5):

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C \quad (5)$$

O critério de escoamento plástico de Tresca estabelece que a deformação plástica iniciar-se-á quando a máxima tensão de cisalhamento, associada ao estado de tensões causado pelo carregamento externo ( $\tau_{máx}$ ), atingir um valor crítico, característico de cada material (Equações 6 e 7) (WAGONER; CHENOT, 1996).

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad (6)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (7)$$

Von Mises estabelece que a deformação plástica iniciar-se-á quando a energia elástica de distorção por unidade de volume ( $U_0^D$ ), armazenada no material devido ao carregamento externo, atingir certo valor crítico característico do material ( $U_0^{D*}$ ). Matematicamente, o critério afirma que a deformação plástica começará quando (Equação 8):

$$U_0^D = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] = U_0^{D*} \quad (8)$$

Para o caso de tração pura, no momento do escoamento vale a Equação 9:

$$\sigma_1 = C_2; \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (9)$$

que levada à Equação (8), conduz à Equação 10:

$$U_0^{D*} = \frac{1+\nu}{6E} (2\sigma_1^2) \quad (10)$$

O valor  $C_1$  pode ser obtido em ensaios de tração, sendo possível obter  $U_0^{D*}$  para cada material. A expressão para o critério será então (Equação 11):

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} = C_2 \quad (11)$$

O critério de uma forma geral pode ser (Equação 12):

$$(\sigma_X - \sigma_Y)^2 + (\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_X)^2 + 6(\tau_{XY}^2 + \tau_{YZ}^2 + \tau_{ZX}^2) = 6C \quad (12)$$

Os valores para o escoamento previstos pelos dois critérios diferem no máximo em 15%, e ambos preveem resultados próximos aos experimentais, com maior exatidão para as previsões do critério de Von Mises (WAGONER; CHENOT,1996).

### 2.3 Curva de fluxo

A evolução da tensão com a deformação do material em certa temperatura, velocidade de deformação e microestrutura é chamada curva de fluxo. A curva de fluxo é um fator importante que afeta o comportamento à deformação plástica do material (XINBO et al. 2002). Há três ensaios utilizados para determinação da curva de fluxo, isto é, tração, torção e compressão.

As curvas de fluxo de algumas ligas podem ser descritas pela expressão de Hollomon (Equação 13):

$$\bar{\sigma} = k \bar{\varepsilon}_v^n \quad (13)$$

onde:

$k$  – coeficiente de resistência

$n$  – coeficiente de encruamento

As constantes  $k$  e  $n$  são determinadas a partir da linearização da curva tensão x deformação plástica verdadeira (Equação 14).

$$\ln \bar{\sigma} = n \ln \bar{\varepsilon}_v + \ln k \quad (14)$$

A velocidade de deformação é definida como (Equação 15):

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt \quad (15)$$

O acréscimo na velocidade de deformação aumenta a tensão de escoamento, a temperatura do material e a lubrificação entre ferramenta e peça (DIETER, 1976).

A evolução da tensão com a velocidade de deformação pode ser descrita pela Equação 16:

$$\bar{\sigma} = k' \dot{\varepsilon}^m \quad (16)$$

onde  $m$  é o índice de sensibilidade à velocidade de deformação. (ALTAN; OH; GEGEL, 1983) fornecem valores de  $k'$  e  $m$  para diferentes materiais nas diferentes temperaturas.

A equação completa que descreve a curva de fluxo é dada pela Equação 17:

$$\bar{\sigma} = k \bar{\varepsilon}_v^n \dot{\varepsilon}^m \quad (17)$$

## 2.4 Encruamento

A deformação plástica provoca o fenômeno chamado encruamento. O encruamento descreve o fenômeno pelo qual a resistência se altera durante a deformação plástica (DOHERTY; MARTIN, 1976). Sob o ponto de vista subestrutural, o encruamento é caracterizado pelo aumento na densidade de discordâncias e pelo tipo de arranjo no qual essas imperfeições cristalinas se apresentam. Durante a deformação plástica sempre estão presentes na rede cristalina as discordâncias. As discordâncias são necessárias para que ocorram mudanças de forma e/ou acomodações em regiões do cristal, nas quais ocorre deformação localizada como em contorno de grão. Outras discordâncias podem vir a acumular-se formando os emaranhados. O encruamento é tanto maior quanto maior for a dificuldade das discordâncias deslizarem e vencerem os campos de tensão gerados na rede cristalina por outras discordâncias existentes anteriormente. Esses bloqueios de discordâncias móveis originam os empilhamentos. A curva tensão-deformação é uma fonte de informação quantitativa relacionada às propriedades de encruamento do material. A modelagem do encruamento pode ser feita através de modelos mecanicistas e fenomenológicos. (CARNEIRO, 2000).

O encruamento pode ser isotrópico, cinemático e geral. Wagoner e Chenot (1996) definem a superfície de escoamento e como esta se apresenta para cada um desses encruamentos. A superfície de escoamento de Von Mises não explicita o modelo de encruamento e como se desenvolve a superfície de escoamento com a deformação.

A tensão de fluxo, formulada como variável de estado é dependente dos parâmetros de conformação (deformação, velocidade de deformação e temperatura), mas, nesse caso, não fornece resultados suficientemente precisos na simulação de

processos. Isso ocorre devido às mudanças no material durante o esquema de deformação, que não são consideradas na obtenção das curvas tensão-deformação em laboratório (KARHAUSEN; KOPP, 1992). A tensão de fluxo do material deve ser considerada como uma variável dependente da história termomecânica e não somente dos parâmetros de conformação. O efeito Bauschinger que ocorre na estrutura do estado trabalhado a frio exemplifica essa situação. Durante a deformação plástica, discordâncias vão se acumulando em barreiras, e eventualmente formam células. Quando a carga é retirada, as linhas de discordâncias não se movem apreciavelmente, pois a estrutura está mecanicamente estável. No entanto, quando a direção do carregamento é invertida, algumas discordâncias podem mover-se por uma distância apreciável sob a ação de tensões cisalhantes baixas, uma vez que as barreiras atrás das discordâncias não são fortes e próximas quanto as barreiras imediatamente à sua frente. Isso provoca um nível mais baixo da tensão de escoamento, quando a direção é invertida. Essa tensão de fluxo é função da estrutura existente e dos parâmetros de conformação.

## **2.5 Processos de fabricação**

A fabricação de peças pode ser classificada em cinco áreas gerais tais como processos de formação primários, conformação, corte, tratamento e junção (ALTAN; OH; GEGEL, 1983). Atualmente, diversas espécies de competição estão presentes, isto é, entre regiões, tecnologias, produtos, etc. A conformação a frio, em razão de sua economia de material, aumento de resistência, precisão geométrica dos componentes e altas taxas de produção, tornou-se uma das tecnologias de fabricação mais promissoras na produção de componentes automotivos. Contudo, dificuldades consideráveis podem ser encontradas em razão das elevadas tensões induzidas na peça e ferramentas por causa das cargas de conformação. A previsão e redução destas elevadas tensões no ferramental é de suma importância com efeito econômico significativo alcançado através de um acréscimo na vida dos elementos do ferramental. A redução no nível de tensões no ferramental por modificações no projeto tem uma maior influência na vida da ferramenta (MCCORMACK; MONAGHAN, 2001).

Os metais possuem características que permitem que sejam trabalhados de várias maneiras, quer seja em seu estado sólido ou a partir do estado líquido. O

sistema de conformação de metais depende de quatro grupos de parâmetros influentes:

- a) matéria-prima – com sua macro e micro geometria, propriedades físicas e mecânicas;
- b) ferramenta – com sua forma, qualidade de superfície, rigidez, sensibilidade às dilatações térmicas, resistência ao desgaste e à carga;
- c) máquina de conformação – com sua cinemática, rigidez e sensibilidade à transferência de calor;
- d) processo de conformação – com parâmetros incluindo impacto de lubrificantes, distribuição de deformação, velocidade de deformação e temperatura na peça, expansão da superfície, transferência e geração de calor.

A complexidade e inter-relação dos parâmetros envolvidos, quando se planeja um sistema de conformação de metal e, também, o fato que a fabricação das ferramentas e seus testes podem ser onerosos e demorados leva à conclusão que experiência e fundamento teórico (simulação por elementos finitos, por exemplo) são essenciais para esse planejamento.

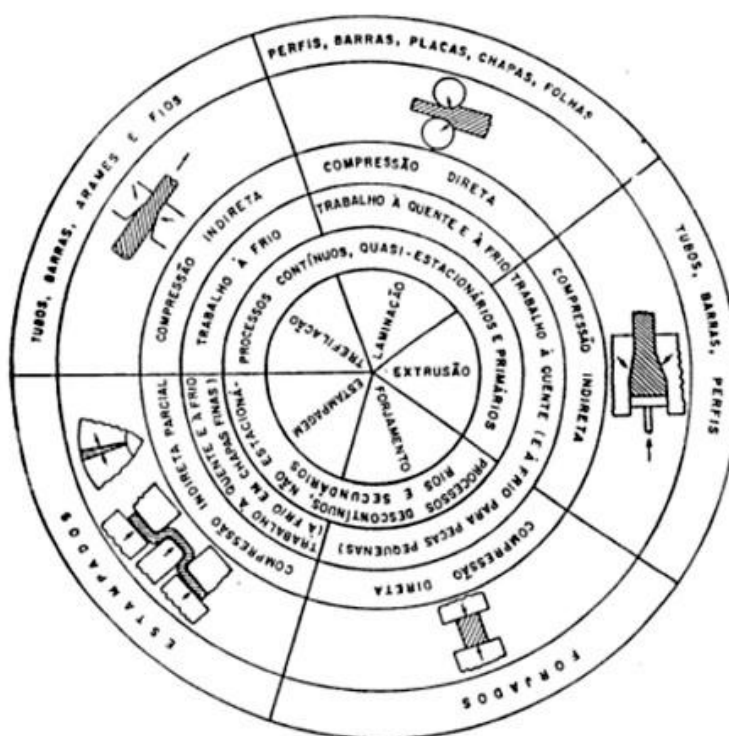
Kopp, Cho e Souza (1988) dividem a simulação de processos em três níveis de acordo com os parâmetros objetivados:

- a) o primeiro nível inclui módulos para descrição integral da deformação verdadeira, carga, resistência à deformação, tensão média, pressão e temperatura média. Os modelos são baseados na teoria elementar de plasticidade;
- b) no segundo nível, módulos com métodos de cálculo baseados no volume de um elemento contínuo são necessários para a descrição das propriedades locais. Elementos finitos e elementos de contorno são os métodos mais poderosos para o cálculo desses valores locais, tais como as tensões, deformações, velocidade de deformação, temperatura e o fluxo de material;
- c) no terceiro nível, as condições do material são levadas em consideração nos cálculos tais como a influência do contorno de grão, da textura, de inclusões não-metálicas e da anisotropia.

### 2.5.1 Processos de conformação dos metais

Entende-se como conformação dos metais a modificação de um corpo metálico para outra forma definida. Os processos de fabricação por conformação fundamentam-se na deformação plástica, onde se obtém a forma final sem alterar o volume e a massa do metal. Nos processos mecânicos de conformação plástica, as modificações de forma são provocadas pela aplicação de forças externas geralmente inferiores a força máxima de resistência do material. Os processos de conformação plástica podem ser classificados de acordo com o tipo de esforço predominante em: a) processos de conformação por compressão direta; (b) processos de conformação por compressão indireta; (c) processos de conformação por tração; (d) processos de conformação por cisalhamento; (e) processos de conformação por flexão. A Figura 2 mostra um esquema simplificado da classificação dos processos de conformação.

**Figura 2 – Esquema simplificado da classificação dos processos de conformação**



Fonte: BRESCIANI FILHO, et al.1997

Nos processos de conformação por compressão direta, predomina a solicitação externa por compressão sobre a peça de trabalho. Nesse grupo podem ser classificados os processos de forjamento (livre e em matriz) e laminação (plana e de perfis).

Nos processos de conformação por compressão indireta, as forças externas aplicadas sobre a peça podem ser tanto de tração como compressão, mas as que efetivamente provocam a conformação plástica do metal são de compressão indireta, desenvolvidas pela reação da matriz sobre a peça. Os principais processos que se enquadram nesse grupo são a trefilação e a extrusão de tubos e fios, e a estampagem profunda de chapas (embutimento).

O principal exemplo de processo de conformação por tração é o estiramento de chapas, em que a peça toma a forma da matriz através da aplicação de forças de tração em suas extremidades.

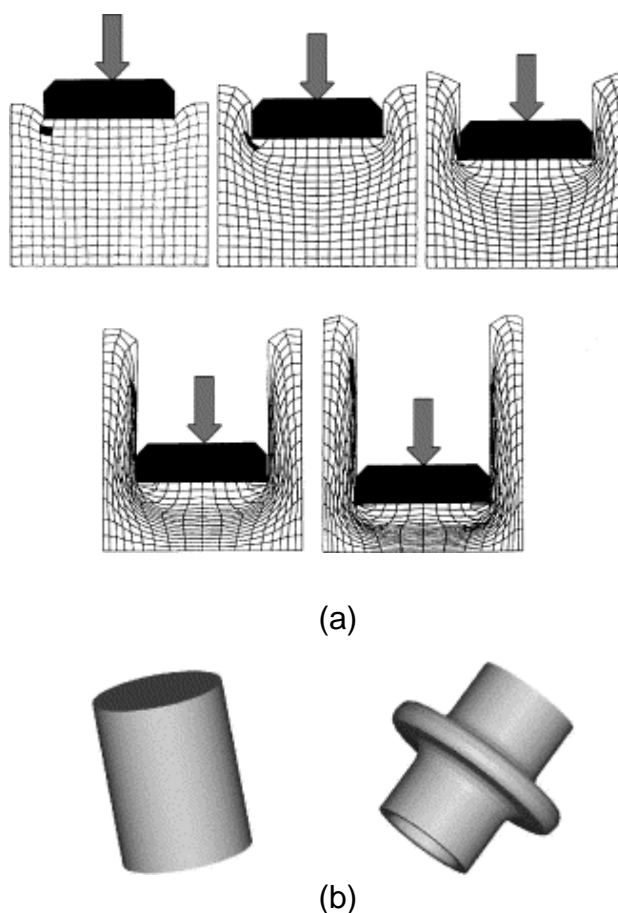
Os processos de conformação por cisalhamento envolvem forças cisalhantes suficientes ou não para romper o metal no seu plano de cisalhamento. Os melhores exemplos desse tipo de processo são a torção de barras e o corte de chapas.

No processo de conformação por flexão as modificações de forma são obtidas mediante a aplicação de um momento fletor. Esse princípio é utilizado para dobrar chapas, barras e outros produtos, como, por exemplo, pode-se citar dobramento livre, dobramento de borda, dobramento de matriz e calandragem.

#### **2.5.1.1 Extrusão de metais**

A extrusão é um dos processos de conformação mais utilizados dentre diferentes processos. Um tarugo é colocado em uma matriz e pressionado pelo punção, causando o fluxo do metal através da abertura da matriz. Pode-se classificar em a frente, a ré e lateral. A extrusão lateral, algumas vezes, chamada radial oferece um produto com a seção central saliente tendo protuberâncias completas ou segmentadas. O trabalho de pesquisa para extrusão lateral não é tão abundante quanto para extrusão a frente e invertida. É aceito classificar a operação de extrusão de acordo com a relação entre o fluxo de material e o movimento do punção (ÇAN; ALTINBALIK; AKATA, 2005). A Figura 3 apresenta exemplos dos processos de extrusão invertida.

**Figura 3 – Exemplo do processo de extrusão invertida com modelo de malha (a) e radial no qual se mostra o tarugo inicial e a peça conformada (b)**

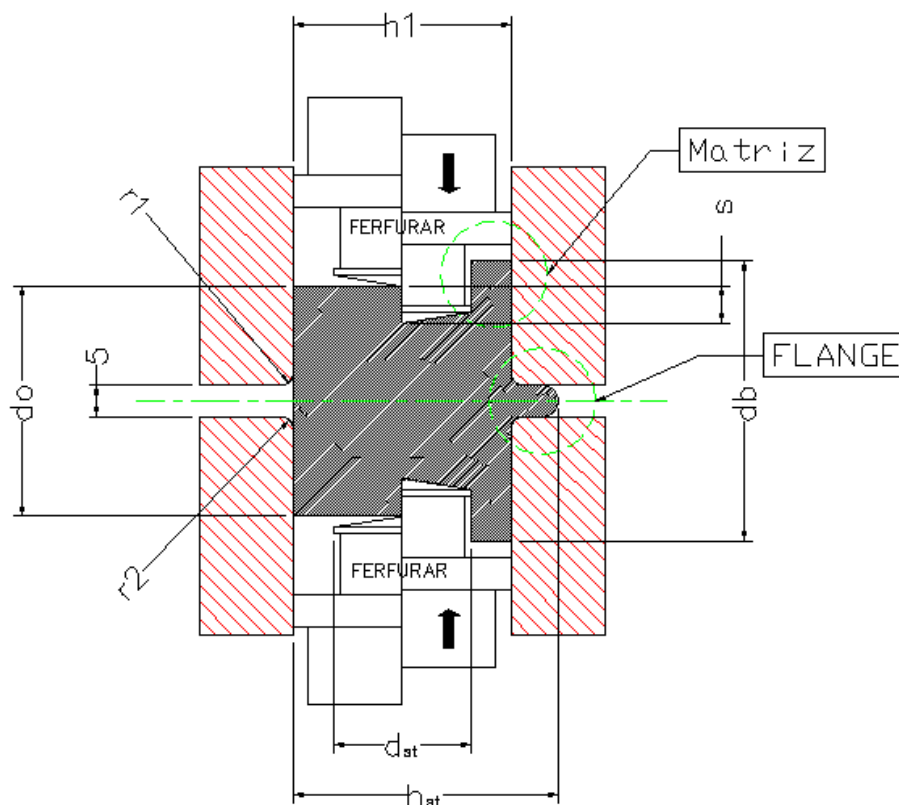


Fonte: (BARISIC, CUKOR; MATH, 2004; CHOI, CHOI; HWANG, 2001).

Wanheim, et al. (1998) analisaram o fluxo de material na extrusão radial de componentes tubulares. A obtenção de componentes sem defeitos tais como sucção (parede fina em relação à abertura) foi explicada devido ao fluxo heterogêneo seguido por uma diferença na taxa de encruamento de diferentes regiões do componente.

Há processos de extrusão combinados nos quais um tarugo é extrudado simultaneamente nas direções à frente, à ré, e lateralmente através de orifícios da montagem. Algumas operações básicas são, algumas vezes, combinadas em uma simples estação para conformar peças relativamente complexas. Extrusão radial e à ré são processos nos quais um ou dois punções movem-se axialmente causando fluxo radial em direção à cavidade da matriz e fluxo invertido entre o punção e matriz por meio do qual um flange e lata são formados (Figura 4).

**Figura 4 – Exemplo do processo de extrusão invertida e radial mostrando diâmetro do tarugo  $d_0$ , diâmetro do flange,  $d_B$ , diâmetro do punção,  $d_{st}$ ; o altura do tarugo,  $h_1$ ; altura da peça,  $h_{st}$ ; curso do punção,  $s$ ; raio da matriz,  $r_1=r_2$**



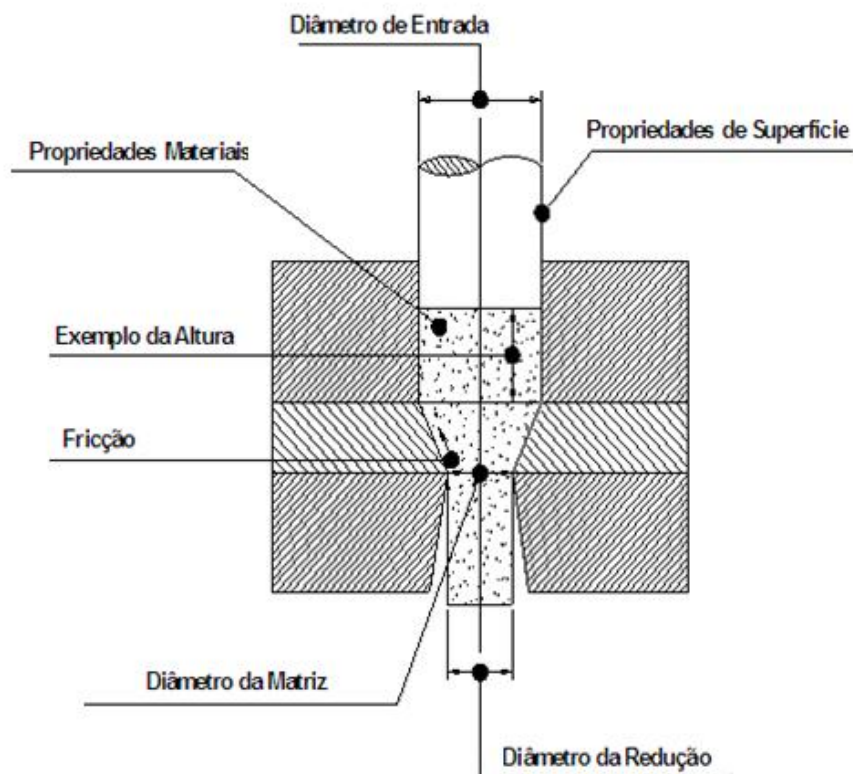
Fonte: (CHOI, CHOI; HWANG, 2001)

Este processo fornece vantagens econômicas, tais como alta produtividade e ajuste da resistência mecânica do produto. Contudo, nota-se que a extrusão invertida de lata de aço é uma das operações de forjamento a frio mais críticas em razão da pressão normal elevada no punção e às condições severas tribológicas no contato entre o punção e a parede interna da lata.

No processo de extrusão invertida, microestrutura fibrosa é formada pelo movimento de grão durante o fluxo de material. Este processo é extensivamente aplicado na fabricação de peças principais da indústria automobilística e aeroespacial que requerem alta dureza. Entretanto, durante o processo, a fricção entre a peça e ferramenta provoca deformação heterogênea e ocasiona elevação da força de conformação (KIM; PARK, 2003).

A Figura 5 mostra o processo de extrusão à frente em que se observam os principais fatores que interferem nas dimensões finais do produto.

**Figura 5 – Fatores operacionais que afetam o processo de extrusão**



Fonte: KUZMAN, 2001

A análise das operações de conformação requer a avaliação dos parâmetros de processo tais como carga e consumo de energia e a determinação das variáveis principais (deformação, força, fluxo) ao longo da peça. O problema consiste em determinar o tipo de modelo (analítico, estocástico ou numérico) que descreva a energia consumida (na forma de força versus movimento do punção) no processo de forma correta em comparação com o experimental. Barisic, Cukor e Math (2004); Gouveia, Rodrigues e Martins (1999) modelaram o processo de extrusão à frente através da formulação de Lagrange e Lagrange-Euler.

O modelo de fluxo, a distribuição de deformação e a força de extrusão foram bem simuladas dentro da região deformada plasticamente. Giuliano (2007), utilizando-se de software comercial de elementos finitos propôs um projeto em múltiplo estágio que preveniu defeito de fluxo no processo combinado de extrusão invertida e à frente de um tarugo. Long e Balendra (1998) concluíram que o comportamento elástico e mudanças de temperatura têm influência significativa na exatidão dimensional de componentes de aço ABNT 1015 e alumínio A199.5 na

extrusão invertida, não somente durante o carregamento e descarregamento da ferramenta, mas, também, durante a extração e resfriamento do punção e peça. O comportamento elástico da ferramenta e o material da peça têm uma maior influência no dimensional que as mudanças de temperatura geradas durante o processamento. Alterações nas condições de processo incluindo a velocidade do punção, o atrito interfacial e o raio da matriz de transição, também afetam a dimensão do componente (BALENDRA; LONG, 1998).

## **2.6 Influência do caminho de deformação nas propriedades mecânicas**

Uma característica muito importante dos metais é sua capacidade de ser transformado em uma pré-forma ou mesmo em um componente através da deformação plástica. A conformação mecânica muda as propriedades mecânicas do material. Há frequentemente uma alteração da resistência mecânica devido à deformação a frio. A magnitude dessa alteração não depende somente das dimensões iniciais e finais do produto, mas, também, do caminho de deformação a que o produto foi submetido. Após algum endurecimento inicial, existe a possibilidade que mais deformações possam amaciar o material.

O efeito Bauschinger em tração e compressão é a evidência mais comum do efeito do caminho de deformações sobre as propriedades dos metais (AGUILAR, et al. 1998).

O efeito do caminho de deformação sobre a resistência do cobre foi discutido por Thomsen, Yang e Kobayashi (1965). O resultado mostrou que o comportamento da liga de cobre trefilada ou extrudada, difere daqueles em que o material foi recozido e, posteriormente, deformados na mesma quantidade de deformação. Todos estes autores mencionam a presença de um transiente de tensão associados a mudança do caminho de deformação. Santos (2005) estudou o efeito do caminho de deformação no processo de trefilação de barras no aço inoxidável 420, chegando à conclusão que não houve aproximação entre os resultados simulados e testes físicos.

A demanda para melhorar qualidade dos produtos extrudados medidos através de sua qualidade de superfície e propriedades mecânicas requer melhor entendimento da resposta do material aos parâmetros de processo. Há estudos na literatura sobre este assunto, (SABOORI, et al. 2006) entretanto, na maioria dos

casos para extrusão direta de um único perfil com geometria axissimétrica. O fluxo do metal é dependente das variáveis de processo como: 1) condições de atrito; 2) geometria da ferramenta; 3) tensão de fluxo do material; 4) deformação; 5) velocidade de deformação.

## **2.7 Técnicas de medição de deformação**

Foram investigadas no trabalho (SILVA, 2003) as principais técnicas relacionadas com a determinação experimental das variáveis de campo, indispensáveis à compreensão da mecânica do material em deformação plástica e, conseqüentemente, ao suporte e à validação dos métodos de análise teóricos que serão descritas a seguir:

- a) Utilização de plasticinas faz-se geralmente através de dois procedimentos experimentais distintos; um baseia-se na marcação e medição de grelhas de círculos ou de quadrados em corpos-de-prova monocromáticos, enquanto que o outro recorre à utilização de corpos-de-prova policromáticos (habitualmente com duas cores);
- b) Técnicas experimentais indiretas baseadas em ensaios de microdureza estão limitadas aos casos em que apenas se pretende determinar as distribuições de deformação e tensão efetiva;
- c) Análise microestrutural em microscopia eletrônica de transmissão envolve a observação de discordâncias e sua distribuição espacial. Novas técnicas analíticas como a difração eletrônica (EBSD) permitem melhorar o exame da microestrutura deformada e suas características cristalográficas;
- d) Thomsen, Yang e Kobayashi (1965) associaram trabalho experimental e estudo analítico dos mecanismos de deformação no qual determinou o método da visioelasticidade. (SHABAIK; KOBAYASHI, 1996) Este método permite a determinação dos campos de velocidade, velocidade de deformação, deformação e tensão a partir da análise experimental do escoamento do material, sendo muito utilizado no estudo de processos de conformação em massa.

### **2.7.1 Visioplaticidade**

A técnica de visioplaticidade é iniciada com a marcação ou gravação de uma rede na região de interesse da peça, de acordo com o fluxo do metal (THOMSEN; YANG; KOBAYASHI, 1965). Esse plano é fotografado após cada incremento de deformação, possibilitando a observação do movimento das partículas, representado pela mudança de posição das interseções da rede impressa no material (distorção da rede). Para problemas de conformação mecânica, caracterizados por um estado de escoamento estacionário (como é o caso da trefilação), o experimento é simples, visto que as imagens fornecem informações para a determinação do campo de velocidades (SHABAİK; KOBAYASHI, 1996). A visioplaticidade permite o estudo detalhado de diversos processos, especialmente aqueles onde o fluxo é axissimétrico, sendo considerado o procedimento que descreve com precisão o comportamento do material parte importante de qualquer sistema de simulação de uma operação de conformação mecânica (CORRÊA, 2004; ROWE, 1977). Segundo Shabaik e Thomsen (1968); Shabaik e Kobayashi (1996); Semiatin e Delo (2000); Corrêa (2004) a técnica tem sido aplicada apenas em alguns poucos problemas, especialmente em operações associadas a extrusão. O trabalho experimental é complexo e consiste de uma série de cálculos, cuja precisão dos resultados depende de uma série de fatores, principalmente do procedimento de tratamento dos dados coletados. Desta forma, os trabalhos realizados por Shabaik, (1972); Dwivedi (1983); Shabaik e Kobayashi (1996); Pokras e Rvachev (1996); Wang (1998) não apresentaram uma solução final para o problema.

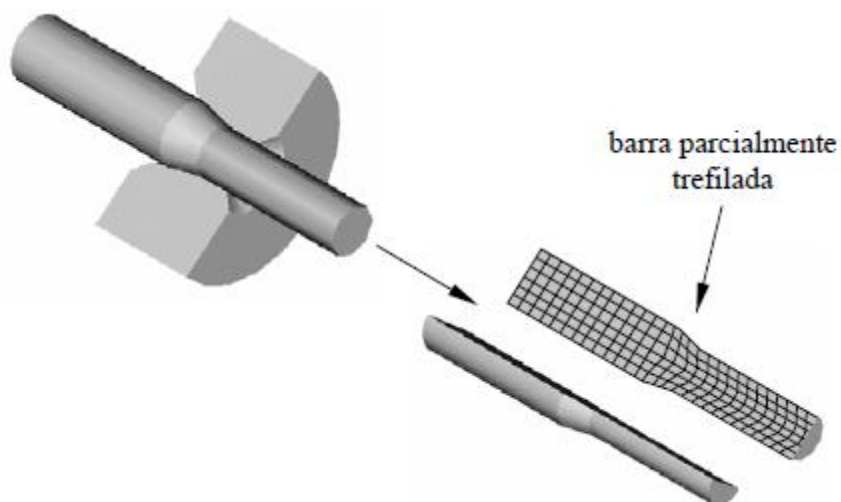
As Figuras 6 e 7 ilustram a aplicação do método de visioplaticidade nos processos de conformação de chapas e processo de trefilação de barras respectivamente.

**Figura 6 – Aplicação do método visioelasticidade em conformação de chapas**



Fonte: (SILVA; CARVALHO; LANDRE, 2008).

**Figura 7 – Aplicação do método visioelasticidade no processo de trefilação**



Fonte: (CORRÊA, 2004)

## **2.8 Dureza/microdureza versus tensão de fluxo**

Tabor (1951); Nunes e Larson (1963) apresentaram trabalhos abordando as relações entre tensão/deformação e dureza. Douthwaite, (1970) teve como ponto de partida a equação de Petch, relacionando a tensão de fluxo e tamanho de grão dado pela Equação 18, ao invés de utilizar a relação entre a tensão de fluxo e temperatura para verificar a relação proposta por Tabor (1951).

$$\sigma_f = \sigma_{0f} + k_f d^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

onde:  $\sigma_f$  é a tensão final de escoamento,  $\sigma_{0f}$  e  $k_f$  são constantes do material e  $d$  é o tamanho médio do grão.

Da mesma maneira que Nunes e Larson (1963); Douthwaite (1970) afirmou que uma relação semelhante à Equação 18 poderia ser obtida para a dureza Vickers, a qual difere da curva tensão de fluxo versus tamanho de grão apenas por uma constante, caso a relação de Tabor (1951) seja válida. A relação entre dureza e tamanho de grão seria descrita pela seguinte Equação 19:

$$H_f = H_0 + k_H d^{-\frac{1}{2}} \quad (19)$$

onde:  $H_f$  é a dureza Vickers,  $H_0$  e  $k_H$  são constantes do material e  $d$  é o tamanho médio do grão.

No estudo sobre avaliação do fator de deformação redundante, Cetlin e Silva (1994), descreveram um procedimento para obtenção da relação entre microdureza Vickers e tensão de fluxo, utilizando-se o ensaio de tração. Nessa metodologia, os seguintes passos são estabelecidos para obtenção da relação:

- a) Ensaio de tração até a ruptura de um corpo-de-prova recozido;
- b) Corte longitudinal da amostra fraturada e realizações das medidas de dureza e deformação efetiva em diferentes seções da amostra;
- c) Cálculo das tensões efetivas na curva do ensaio de tração do metal, para os valores de deformação do item anterior acrescidos de 8%;
- d) Elaboração do gráfico relação microdureza/tensão efetiva versus deformação efetiva acrescida de 8%.

No ensaio de tração até a ruptura, foi utilizado um corpo-de-prova escalonado para a obtenção de um maior número de medidas de deformação a partir de um único teste de tração. Os diâmetros do corpo-de-prova devem ser selecionados de forma a fornecer um grande intervalo de deformações dentro da região de deformação plástica.

O valor de microdureza Vickers correspondente a cada deformação deve ser o valor médio de medições realizadas na respectiva seção. As medidas de deformação são obtidas pela Equação 20, onde  $D_i$  e  $D_f$  são os valores das dimensões inicial e final respectivamente.

$$\bar{\varepsilon}_v = 2 \ln \left( \frac{d_o}{d_f} \right) \quad (20)$$

onde:  $\bar{\varepsilon}_v$  é a deformação verdadeira,  $d_o$  é a dimensão inicial e  $d_f$  é a dimensão final.

No cálculo das tensões efetivas a partir da curva do ensaio de tração do metal recozido, o acréscimo de 8% nos valores das deformações calculadas pela Equação 20 representa a deformação adicional introduzida pela indentação do penetrador.

Na montagem da curva relação microdureza Vickers tensão efetiva versus deformação acrescida de 8%, os valores da relação são obtidos dividindo a microdureza observada em cada deformação do ensaio de tração do corpo-de-prova escalonado pelo correspondente valor de tensão efetiva calculado no passo três do procedimento. Para os pares de pontos obtidos de acordo com esses procedimentos, a curva de tendência para a relação microdureza Vickers/tensão efetiva versus deformação acrescida de 8% pode ser definida através de programas computacionais comerciais contendo rotinas de ajustes de curvas.

### **2.8.1 Dureza instrumentada**

Os testes mais recentes de nanodureza utilizam um penetrador do tipo Berkovich (VASCONCELOS, 2006). O penetrador Berkovich é uma pequena ponta de diamante com geometria piramidal de base triangular. Seu uso vem sendo adotado devido a sua facilidade de produção, principalmente com relação a outros indentadores.

Testes de nanodureza apresentam vantagens quando relacionados aos mesmos testes que empregam grandes cargas. Em nanodureza, é possível analisar tanto materiais em volume quanto suas superfícies, além de revestimentos extremamente finos depositados em substratos. Um material testado pode ter sua

nanoestrutura avaliada através da indentação resultante com praticamente nenhum dano significativo causado na amostra. Portanto, trata-se de um teste virtualmente não destrutivo.

Testes dinâmicos de indentação são os mais utilizados atualmente para medidas em filmes finos. O uso de controle computadorizado associado a sensores de deslocamento torna o teste dinâmico capaz de obter resultados instantâneos da dureza do material. A diferença entre estes testes e os convencionais de indentação está essencialmente relacionada à capacidade de medida da profundidade da penetração simultaneamente à aplicação de uma carga controlada (BLANDO, 2001; BLANDO, 2005).

Em um teste dinâmico de indentação, a medida de dureza ocorre mediante um ciclo de aplicação de carga que se divide em carga e descarga (carregamento e descarregamento). Inicialmente, o penetrador entra em contato com a amostra com um valor de carga mínimo. Logo após o contato, a carga vai sofrendo incrementos que comumente variam de acordo com o número de passos e/ou com o tempo. O ciclo de carregamento é finalizado, ao alcançar o valor de carga máxima fixado, dando início ao ciclo de descarregamento. Nesta parte do ciclo, o penetrador começa a diminuir o contato com o material, sofrendo decrementos e alcançando o valor de carga mínima. Finalmente, retira-se completamente o penetrador da amostra.

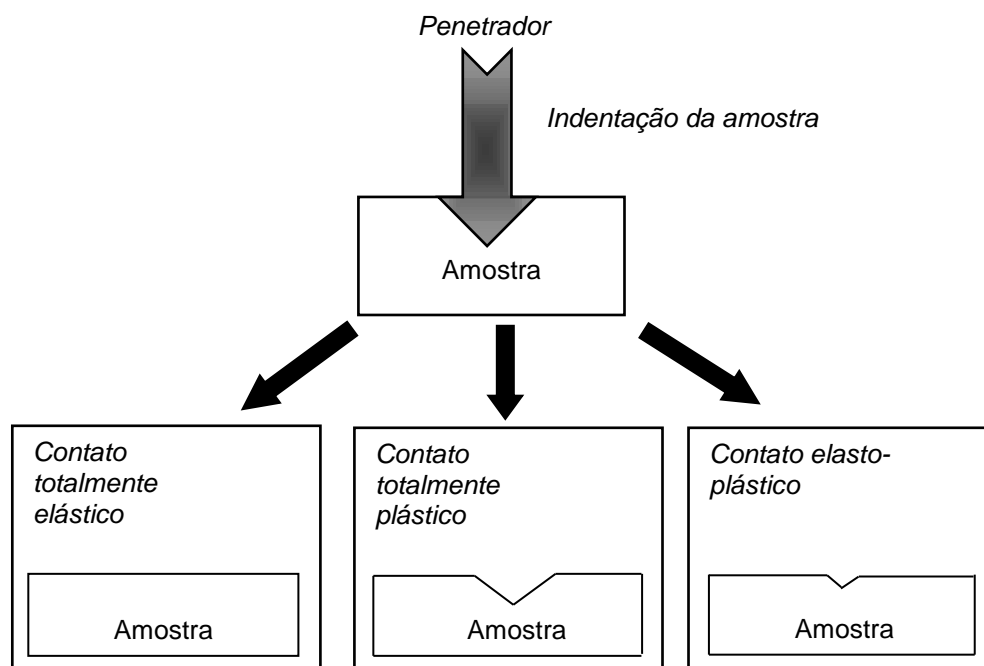
O valor de dureza pode ser estimado continuamente durante o ciclo de carga através de sensores que verificam a profundidade de penetração e a carga aplicada a cada instante. Assim, baseado na geometria conhecida do penetrador e nos valores de profundidade de carga, estima-se então a indentação causada no material e, conseqüentemente, o seu valor de dureza instantâneo.

O teste dinâmico permite avaliar outras propriedades mecânicas do material submetido a uma indentação através da declividade do ciclo de descarregamento com o seu módulo de elasticidade.

Durante o ciclo de carga, o penetrador penetra o material deformando-o plasticamente, causando escoamento e possível endurecimento, enquanto no ciclo de descarga ocorre a recuperação do material. A área de contato altera-se continuamente à medida que o penetrador penetra ou é retirado do material, dificultando a análise dos dados. Normalmente divide-se o contato entre penetrador

e material em três tipos distintos: totalmente elástico, elasto-plástico e totalmente plástico. A Figura 8 abaixo retrata esquematicamente cada tipo de contato.

**Figura 8 – Representação esquemática dos possíveis contatos entre penetrador e amostra**



Fonte: Elaborado pelo autor

No contato elástico, após a remoção da carga e conseqüentemente retirada do penetrador, o local do material onde foi realizada a indentação retorna ao seu estado original. Neste caso, a temporária indentação é uma cópia em negativo perfeita do penetrador, ou seja, o contato entre material e penetrador   perfeita. Já no contato elasto-plástico, as componentes elástica e plástica estão envolvidas no processo de indentação. É o tipo de contato comumente encontrado na grande maioria dos materiais e o que apresenta maior dificuldade de interpretação. Diferentemente dos outros, o contato totalmente plástico apresenta um tipo de indentação permanente, isto é, a componente elástica pode ser desprezada e é muito menor que a plástica e o material não retorna a sua condição original.

Apesar do número de informações proporcionadas pelo teste, a pequena magnitude das cargas e, conseqüentemente, a pequena penetração realizada no material dificultam bastante a execução da medida. Como no teste de indentação

convencional, a amostra deve apresentar uma área mínima de contato e um polimento fino com bom acabamento, para que desvios na medida não ocorram.

### 2.8.2 Determinação da dureza instrumentada

A dureza instrumentada na escala ( $HV_i$ ) é determinada, calculando-se nesta ordem: a rigidez de contato ( $S$ ), a profundidade de contato ( $h_c$ ), a área de contato projetada ( $A_c$ ), o módulo reduzido ( $E_r$ ) e a área projetada da impressão residual ( $A_v$ ).

A rigidez de contato é obtida derivando-se  $P$  em função de  $h$  e substituindo-se os valores de  $m''$ ,  $A_p$ ,  $h_f$ ,  $h = h_{max}$  na Equação 21:

$$S = \frac{dP}{dh} = m'' A_p (h_{max} - h_f)^{m-1} \quad (21)$$

onde:

$m''$  e  $A_p$  são constantes empíricas obtidas após ajuste da curva de descarregamento;

$P$  = carga aplicada no ensaio instrumentado de Dureza (mN);

A profundidade de contato está relacionada ao comportamento da deformação do material e à geometria do penetrador, e, para a carga máxima ( $P_{max}$ ), é dada pela Equação 22:

$$h_c = h_{max} - h_s \quad (22)$$

onde  $h_s$  é o deslocamento da superfície ao redor do perímetro de contato.

Nessa equação, Sneddon (1965) define  $h_s$  como (Equação 23):

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (23)$$

onde  $\varepsilon$  depende da geometria do penetrador, e é 0,7500, para penetradores Vickers ou Berkovich; 1,0000, para penetradores de base circular, e 0,7268, para penetradores cônicos.

Assim, retomando a Equação 22, obtém-se a Equação 24:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (24)$$

A área de contato projetada para a carga máxima é descrita através de uma função matemática tipo polinomial, chamada função de área, representada pela Equação 25:

$$A(h_c) = B_0 h_c^2 + B_1 h_c + B_2 h_c^{1/2} + \dots \quad (25)$$

onde  $B_0, B_1, \dots, B_n$  são os coeficientes do polinômio determinados pelo ajuste dos valores de  $A_c$  versus  $h_c$ , sendo possível  $n = 8$ , com  $B_0 = 24,5$ .

Com base nessa equação, Franco (2004) obteve o seguinte polinômio (Equação 26):

$$A_c = A_c(h_c) \approx 24,5h_c^2 + 6300h_c + 3150h_c^{1/2} + 3150h_c^{1/4} + 3150h_c^{1/8} + 3150h_c^{1/16} + 3150h_c^{1/32} \quad (26)$$

Assim,  $A_c$  é obtida substituindo-se  $h_c$  na Equação 26.

O módulo reduzido é uma função da área de contato e da rigidez de contato, conforme a Equação 27:

$$E_r = \beta \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (27)$$

onde  $\beta = 1,0124$  para penetrador Vickers (King,1987).

A área projetada da impressão residual é uma função da diagonal média da impressão, sendo (Equação 28):

$$A_V = \frac{d_m^2}{2\text{sen}(\theta/2)} \quad (28)$$

onde  $d_m$  é o comprimento médio da diagonal da impressão e  $\theta$  é o ângulo da ponta do penetrador ( $\theta = 136^\circ$  para penetrador Vickers).

Substituindo  $A_c = 1/2d_m^2$ , segundo Loubet, *et al.* (1984), na Equação 27, obtém-se a Equação 29:

$$d_m = \beta \frac{S}{E_r} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (29)$$

Essa expressão é válida quando não houver recuperação das diagonais após o descarregamento e recuperação somente da profundidade da indentação.

Estabelecidos esses cinco parâmetros, a dureza instrumentada, definida como a pressão média que o material suporta sob a carga máxima, pode ser expressa pela Equação 30:

$$HV_i = \frac{P_{max}}{A_V} \quad (30)$$

### **2.8.2.1 Determinação de outras propriedades mecânicas**

A partir dos ensaios instrumentados de dureza, têm sido desenvolvido métodos para a determinação do módulo de elasticidade ( $E$ ), do limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) e do coeficiente de encruamento ( $n$ ) (CHENG; CHENG; 1999; GIANNAKOPOULS; SURESH, 1999; DAO et al., 2001; MALZBENDER; WITH, 2002; BUCAILLE et al., 2003; CHOLLOACOOP; DAO; SURESH, 2003; CUPPARI, et al. 2003).

O módulo de elasticidade é determinado a partir da Equação 31:

$$\frac{(1-\nu^2)}{E} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} - \frac{1}{E_r} \quad (31)$$

onde:

$\nu$ : coeficiente de Poisson do material ensaiado;

$E_i$ : módulo de elasticidade do penetrador;

$E_r$ : módulo reduzido do conjunto penetrador-amostra;

$\nu_i$ : coeficiente de Poisson do material do penetrador.

Dao, et al. (2001) apresentaram um modelo, baseado numa análise dimensional e em simulações por elementos finitos, para estimar o limite de escoamento e o coeficiente de encruamento usando as curvas carga-profundidade.

Levando em conta a curva típica de tensão-deformação dos metais de engenharia, a lei de Hooke de elasticidade e o critério de von Mises, obtiveram uma equação que representa o comportamento elasto-plástico de um material, na qual estão envolvidos o limite de escoamento e o coeficiente de encruamento (Equação 32):

$$\sigma = \sigma_y \left( 1 + \varepsilon_r \frac{E}{\sigma_y} \right)^n \quad (32)$$

onde  $\varepsilon_r$  é uma deformação acumulada acima do ponto de escoamento, chamada de deformação representativa.

Posteriormente, esse modelo foi corrigido para vários ângulos de penetrador. Além de Chollocoop et al. (2003), Bucaille et al. (2003) realizaram estudos que permitiram uma redução na margem de erro no cálculo das propriedades mecânicas, resultando na seguinte equação envolvendo o coeficiente de encruamento (Equação 33):

$$\begin{aligned} & [-1,40557(A)^3 + 17,93006(A)^2 - 79,99715(A) + 122,650569]n^3 + \\ & [0,77526(A)^3 - 9,22091(A)^2 + 40,55620(A) - 63,88418]n^2 + \\ & [0,15830(A)^3 - 2,3733(A)^2 + 9,00157(A) - 9,58936]n + \\ & [-0,006831(A)^3 + 0,86295(A)^2 - 2,54543(A) + 6,20045] = D \quad (33) \end{aligned}$$

onde (Equação 34):

$$A = \ln\left(\frac{E_r}{\sigma_{0,033}}\right) \quad (34)$$

e (Equação 35):

$$D = \frac{S}{E_r h_{max}} \quad (35)$$

Em  $A$ ,  $\sigma_{0,033}$  é a tensão  $\sigma$  (da Equação 32) para  $\varepsilon_r = 3,3\%$  e para o ângulo de penetrador igual a  $70,3^\circ$ . Essa tensão é expressa pela Equação 36:

$$\sigma_{0,033} = \frac{C_1}{-1,131(A)^3 + 13,635(A)^2 - 30,594(A) + 29,267} \quad (36)$$

onde  $C_1$  pode ser obtido pela relação entre a carga máxima e a profundidade máxima da curva de carregamento ao quadrado (Equação 37):

$$C_1 = \frac{P_{max}}{h_{max}^2} \quad (37)$$

Como utilizaram vários ângulos de penetrador ( $70,3; 60; 50$ , e  $42, 3^\circ$ ), Bucaille, et al. (2003) constataram que a deformação representativa tem um valor diferente de  $3,3\%$  para cada um deles, de modo que  $\varepsilon_{r\theta}$  está relacionada com a geometria do penetrador segundo a Equação 38:

$$\varepsilon_{r\theta} = 0,105 \cot \theta \quad (38)$$

Retomando as Equações 32, 34 e 36, em que, em função de diferentes ângulos do penetrador,  $\sigma$  passa a ser considerada  $\sigma_\theta$ ,  $A$  considerada  $A_\theta$  e  $\sigma_{0,033}$  considerada  $\sigma_{r\theta}$ , obtém-se as Equações 39, 40, 41:

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_y \left( 1 + \varepsilon_{r\theta} \frac{E}{\sigma_y} \right)^n \quad (39)$$

$$A_\theta = \ln \left( \frac{E_r}{\sigma_{r\theta}} \right)^n \quad (40)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{C_1}{\tan^2 \theta [0,002552(A_\theta)^3] - 0,72526(A_\theta)^2 + 6,34493(A_\theta) - 6,47458} \quad (41)$$

Neste trabalho foram realizados diferentes testes para verificar a aplicabilidade das equações apresentadas ao longo deste item, utilizando-se as curvas carga-deslocamento dos aços AISI 1006 e AISI 304 obtidas por Cuppari (2002), e de aço TRIP. Como as propriedades mecânicas tiveram valores próximos dos previstos tanto em normas quanto em métodos experimentais (Ferrer, 2003), foi possível definir o algoritmo de cálculo da dureza, do módulo de elasticidade, do limite de escoamento e do coeficiente de encruamento.

Os valores das constantes citadas nas expressões anteriormente descritas são indicados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Valores das constantes usadas nas equações para o cálculo das propriedades mecânicas**

Constante	Valor
$\varepsilon$	0,7500
$\beta$	1,0124
$\theta$	136°
$\nu$	0,3
$\nu_i$	0,25
$E_i$	1000 GPa

Fonte: Farias, 2004

Esse algoritmo de cálculo pode ser assim descrito:

- a) Extrair  $P_{max}$ ,  $h_f$ ,  $h_{max}$  da curva carga-profundidade;
- b) Ajustar a porção da curva de descarregamento e determinar a rigidez de contato  $S$ ;
- c) Substituir os valores de  $P_{max}$ ,  $h_{max}$  e  $S$  na Equação 24 para determinar a profundidade de contato;
- d) Substituir  $h_c$  na Equação 26 para calcular a área de contato;
- e) Calcular o módulo reduzido, substituindo-se  $A_c$  e  $S$  na Equação 27;
- f) Calcular o módulo de elasticidade do material ensaiado a partir da Equação 31;
- g) Ajustar a porção da curva de carregamento à Equação 37;
- h) Caso  $\varepsilon_{r\theta} = 0,033$  (condição 1), substituir  $E_r$  e  $C_1$  na Equação 36 para calcular  $\sigma_{0,033}$ ;
- i) Caso  $\sigma_{0,033} < \sigma_{r\theta} e \varepsilon_{r\theta} > 0,033$  ou  $\sigma_{0,033} > \sigma_{r\theta} e \varepsilon_{r\theta} < 0,033$  (condição 2), substituir  $E_r$  e  $C_1$  na Equação 41 para calcular  $\sigma_{r\theta}$ ;
- j) Para calcular das duas condições anteriores, substituir  $\sigma_{0,033}$  ou  $\sigma_{r,0}$ ,  $E_r$ ,  $h_{max}$  e  $S$  na Equação 33 para calcular o coeficiente de encruamento;
- k) Caso  $\varepsilon_{r\theta} = 0,033$ , substituir  $n$ ,  $E$ ,  $\sigma_{0,033}$  e  $\varepsilon_r$  na Equação 39 para calcular o limite de escoamento;
- l) Caso ocorra a condição 2, substituir  $n$ ,  $E$ ,  $\sigma_{r\theta}$  e  $\varepsilon_{r\theta}$  na Equação 39 para calcular o limite de escoamento;
- m) Caso não ocorra a condição 2, assumir  $\sigma_y = \sigma_{0,033}$  e  $n = 0$ .

Estudo recente (PULECIO, 2010) proporcionou nova sequência de etapas para o cálculo de propriedades mecânicas de materiais com base nos dados de ensaio de indentação instrumentada obtidos com indentadores tipo Berkovich ou Vickers. As propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, limite de escoamento, coeficiente de encruamento e dureza) podem ser obtidas em um algoritmo inverso, quando conhecida a área residual da indentação ou ainda quando conhecido somente o módulo elástico do material. O Anexo A apresenta os diagramas dos algoritmos inversos quando se tem informações adicionais.

## 2.9 Modelagem dos processos de conformação mecânica

Os principais métodos de análise de processos de conformação são os métodos dos blocos, das linhas de escorregamento, do limite superior, limite inferior e dos elementos finitos. A necessidade de uma teoria para descrever os mecanismos do processo de conformação mecânica consiste na habilidade de se fazer uma previsão da tensão, deformação e velocidades para todos os pontos na região da peça. As várias aproximações diferem na complexidade e no grau para os quais elas encontram estas necessidades.

Os métodos analíticos possuem grandes restrições, e, atualmente, tem-se utilizado uma forma baseada em elementos finitos. Este método foi originalmente desenvolvido para análise de problemas estruturais, e tem sido aplicado para problemas de conformação mecânica, envolvendo condições elasto-plástico em deformação plana ou axissimétrica na compressão simples e extrusão.

Kobayashi, Oh e Altan (1989) desenvolveram uma formulação de escoamento plástico (flow formulation), que caracteriza o escoamento dos metais em deformação plástica de forma análoga ao escoamento dos fluidos viscosos incompressíveis. As deformações elásticas são desprezadas e os materiais são descritos através de leis de comportamento rígido-plásticas/viscoplásticas e as relações entre a tensão e a velocidade de deformação, se baseiam nas equações constitutivas de Levy-Mises. Esta formulação tem sido aplicada no estudo de processos de conformação plástica em massa bidimensionais e tridimensionais e serve de base a alguns programas comerciais (DEFORM 2D (3D), FORGE 2 (3), QFORM e FINEL).

Marcal e King (1967) introduziram a primeira formulação sólida de elementos finitos aplicada a grandes deformações elasto-plásticas/viscoplásticas. Essa formulação explica para a região de transição, onde a resposta do material é elástica no início do passo incremental e plástica para o fim. Refinamentos da formulação são baseados na integração numérica dos elementos que permite diferentes respostas do material estando presente para cada ponto de integração. Esta formulação foi designada de formulação Lagrangiana total e caracteriza-se por descrever a deformação do material relativamente ao estado inicial não deformado.

As aplicações da formulação sólida à simulação numérica de processos de conformação plástica são, na sua maioria, baseadas na formulação Lagrangiana atualizada a qual utiliza o estado deformado como estado de referência. A aplicação

desta formulação aos processos de conformação plástica está na base de alguns programas comerciais de elementos finitos (ABAQUS implicit, MARC).

A rigidez média foi primeiramente descrita por Rice e Tracy (1973), empregando-a em problemas elasto-plásticos. A rigidez média garante aproximação que o estado final de tensão está na superfície de escoamento.

Pode-se escolher a formulação Lagrangiana ou a Euleriana para problemas geometricamente não lineares. No método lagrangiano, a malha de elementos finitos é fixa ao material e se move juntamente no espaço. Já o método euleriano consiste no escoamento de um material através de uma malha fixa no espaço.

Kobayashi, Oh e Altan (1989) destacaram que, durante uma simulação numérica de processos de conformação usando malha lagrangiana são gerados os seguintes problemas computacionais:

- a) dificuldades da malha de elementos finitos em incorporar a forma da matriz com o aumento do deslocamento relativo entre a matriz e o corpo-de-prova;
- b) dificuldades em acomodar grandes deformações em um único sistema de malha;
- c) formação de elementos instáveis, com o jacobiano negativo, devido às grandes deformações localizadas.

Quanto aos métodos eulerianos, por considerarem a malha fixa no espaço, não são adequados para situações, onde as superfícies ou interfaces se movem substancialmente. Esse inconveniente pode ser minimizado com o uso de formulações atualizadas onde o estado de tensão e deformação do material é redefinido ao início de cada incremento de tempo.

Trabalhos de simulação computacional de processos de conformação plástica baseados na utilização de formulações dinâmicas têm sido apresentados contudo, ainda existem muitos problemas numéricos por resolver, dos quais se destacam: a necessidade de se utilizarem incrementos de tempo excessivamente baixos (da ordem dos  $10^{-6}$ ) e a possibilidade de se obterem soluções fisicamente impossíveis. Este último problema é consequência direta dos processos de conformação plástica não serem, na sua essência, processos dinâmicos. DYNA3D, PAMStamp e ABAQUS explicit são exemplos de programas comerciais que se baseiam em formulações dinâmicas.

## **2.10 Softwares comerciais de simulação computacional por elementos finitos**

### **2.10.1 Conceitos iniciais**

Apresenta-se desafio pela análise por elementos finitos e simulações de processo de conformar materiais e suas propriedades mecânicas do ponto de vista teórico e prático (MACKERLE, 2004).

Os softwares de simulação numérica estão se mostrando poderosas ferramentas, sendo crescente sua aceitação em análises de processos de fabricação. Necessita-se reduzir os custos de aquisição e aliar os conhecimentos teóricos sobre elementos finitos com a experiência em processo. Neste panorama, inúmeros trabalhos foram publicados e implementados na análise dos mais diversificados problemas e processos de conformação.

A modelagem matemática para simulação de fluxo e deformação de ligas foi aplicada à extrusão e recalque. Observou-se que avanços na obtenção de equações constitutivas foram necessários, enquanto que características de deformação, forças envolvidas e defeitos estiveram de acordo com a modelagem (ALTAN; VAZQUEZ, 1997). Simulação em 3D tem limitações e não se aplica em todas as situações e, também, ainda não é capaz de prever a microestrutura e propriedades do material conformado. Ferramentas de simulação de processo têm expandido sua capacidade além da modelagem de deformação com o intuito de alcançar uma desejável combinação de microestrutura, propriedades mecânicas, tensões residuais e exatidão dimensional no produto final. A modelagem de tratamento térmico que envolve diversos aquecimentos e ciclos de resfriamento em linha com a conformação está sendo estudada para ligas metálicas. Modelos termomecânicos utilizados para a previsão do fluxo de material e transferência de calor durante a deformação se tornaram uma ajuda no projeto de processo. A exatidão da simulação é crucial para utilidade dos modelos. Essa exatidão depende principalmente da qualidade da descrição das condições de contorno e dados das propriedades do material. Isto é particularmente importante na extrusão que, muitas vezes, envolve instabilidade de deformação (MISIOLEK, 1996).

O avanço na tecnologia de simulação na indústria tem ocorrido simultaneamente com a queda de preço experimentada de “hardware”, aumento de

sua velocidade e melhora nas interfaces gráficas para o usuário em programas comerciais.

Conforme Gardner et al. (2005), a escolha do software de simulação computacional por elementos finitos é um importante fator na determinação da qualidade e alcance das análises de conformação mecânica. Diferentes softwares possuem diferentes capacidades e diferentes graus de dificuldade de operação, com plataformas amigáveis ou não com o usuário. Além do mais, as diferentes técnicas de resolução de problemas utilizadas pelos softwares geram consequências diretas nos resultados obtidos na simulação.

Os programas atuais voltados para a solução de problemas de conformação mecânica possuem algoritmos específicos, que determinam automaticamente parâmetros como número e tamanho de elementos (definição da malha) e número de incrementos. No entanto, Santos, et al. (2001) acrescentam que nesses programas alguns parâmetros devem ser definidos pelo usuário e que exigem conhecimento mais aprofundado do “software”. O Quadro 1. apresenta as principais características de alguns softwares comerciais (GARDNER et al., 2005).

**Quadro 1 – Principais características de alguns softwares comerciais**

CARACTERÍSTICAS	SOFTWARES			
	SUPERFORM	DEFORM	ADVANTEDGE	ABAQUS
Facilidade de Preparação da Geometria das Ferramentas e Peças de Trabalho	Pode ser importada de outros softwares ou construída manualmente no próprio software.	Pode ser importada de outros softwares ou construída manualmente no próprio software.	Preparação muito rápida. Bibliotecas com as geometrias são fornecidas.	Somente construída manualmente no próprio software.
Características Metalúrgicas dos Materiais	Possui extensa lista de materiais. Permite inserir outros materiais.	Possui extensa lista de materiais. Permite inserir outros materiais.	Possui extensa lista de materiais. Permite inserir ligas aeroespaciais.	Não possui lista de materiais, mas podem ser inseridos com muitos detalhes.
Capacidade de Remalhamento Adaptativo	Utiliza remalhamento adaptativo com parâmetros de ajuste fino.	Utiliza remalhamento adaptativo com parâmetros de ajuste fino.	Utiliza remalhamento adaptativo sem parâmetros de ajuste fino.	Suporte parcial, sem muitos ajustes.
Controle Total	Algum nível de controle é permitido. Mas soluções de FEM não podem ser manipuladas	Algum nível de controle é permitido. Mas soluções de FEM não podem ser manipuladas	Mínimas alterações permitidas.	Muitas alterações permitidas. Funções de solução básica podem ser modificadas.

Fonte: GARDNER et al. 2005

A simulação numérica dos processos de conformação de materiais através do método de elementos finitos auxilia no estabelecimento e otimização das variáveis de processo e projeto de matriz. Os objetivos da modelagem dos processos de conformação são (ALTAN; VAZQUEZ, 2000):

- a) otimizar processo e projeto de matriz;
- b) assegurar preenchimento da matriz e prevenir defeitos;
- c) prever e controlar vida e falha da matriz;
- d) prever e controlar microestrutura e propriedades da peça conformada;
- e) reduzir o número de operações necessárias, “try-out” da matriz e tempos de fabricação;
- f) reduzir perdas de material e rejeição.

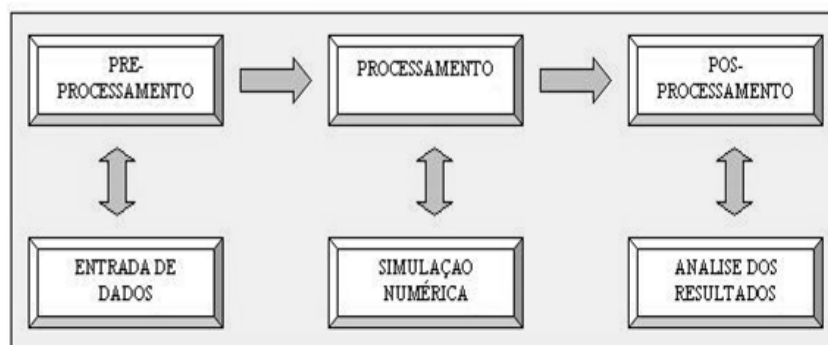
A habilidade para analisar processos tridimensionais complexos tem aberto avenidas para aplicação de simulação (TANG, et al. 2000).

#### **2.10.1.1 Características funcionais do software Deform 2D®**

Um programa de elementos finitos elastoplástico Deform 2D® foi utilizado para estudar os efeitos do ângulo do punção na geometria do produto e na carga necessária para a deformação em extrusão invertida.

Existem três etapas principais na elaboração de uma simulação numérica de um processo qualquer, conforme mostrado na Figura 9.

**Figura 9 – Etapas de uma simulação computacional envolvendo as três etapas de processamento**



Fonte: SANTOS, et al. 2001

Utilizando-se de recursos gráficos, pode-se visualizar distribuição de tensões, deformações, temperatura, fluxo de material, força, velocidade de deformação e evolução microestrutural. As informações obtidas podem variar de acordo com o tipo de análise (mecânica, termomecânica e microestrutural) ou, mais especificamente, com o tipo de software utilizado.

#### **2.10.1.2 Pré-processamento**

Esta etapa compreende a modelagem física e matemática do problema em questão. Na modelagem física, as geometrias das matrizes e da peça inicial devem ser definidas, utilizando-se interface gráfica do software ou sistemas CAD. Posteriormente, em função da geometria do modelo e das condições de carregamento, define-se o tipo de análise axissimétrica, 2D (deformação plana) ou 3D a ser implementada.

Os dados de entrada correspondentes ao material (curva de escoamento, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, calor específico, condutividade térmica e coeficiente de dilatação) devem ser obtidos experimentalmente em laboratório, uma vez que os dados da literatura podem não ser compatíveis com as características do processo real (temperatura dos componentes e do meio, por exemplo) (SANTOS, et al. 2001).

Para executar uma simulação, necessita-se de uma série de dados de entrada específicos que descrevem o processo tais como coeficiente de atrito entre a peça e matrizes, velocidade da prensa, deslocamento das ferramentas, temperatura da peça, matrizes e meio e coeficientes de troca de calor.

#### **2.10.1.3 Processamento**

O processamento é a etapa onde se realiza o cálculo computacional com o problema dividido em incrementos de deslocamentos. Nesta etapa, define-se qual a solução a ser adotada, isto é, mecânica, térmica, termomecânica ou microestrutural.

Erros inerentes à discretização acontecem, quando se usa uma malha inadequada do ponto de vista do método dos elementos finitos. Uma discretização apropriada não é obtida visando apenas uma correta representação da geometria, facilidade de imposição de carregamentos e condições de contorno, mas, também,

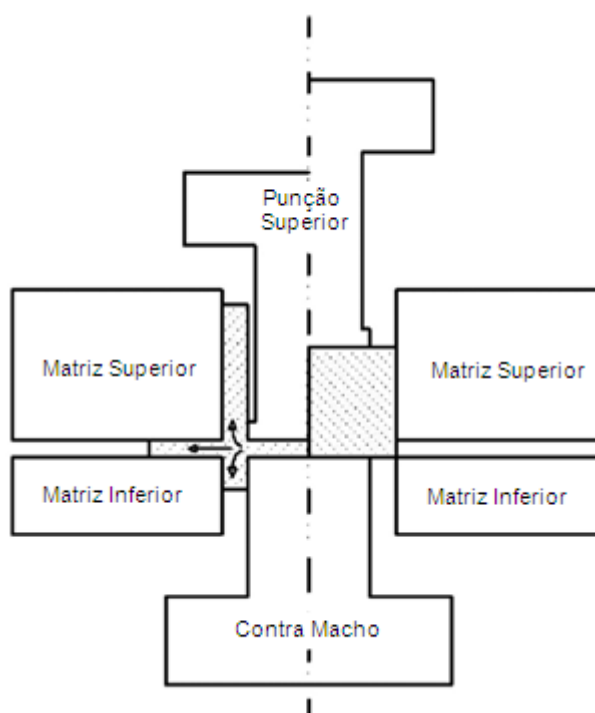
para permitir um desempenho numérico otimizado para os elementos que estão sendo utilizados. Os resultados numéricos são extremamente sensíveis à distorção dos elementos da malha (COOK, et al. 1989). Realizam-se as interações até se atingir convergência para cada incremento (SANTOS, et al. 2001).

Braga (2004) definiu na simulação do forjamento os critérios de remalhamento a partir da distorção do elemento, da curvatura da ferramenta (o usuário deve inserir qual o valor da distância máxima que a ferramenta pode penetrar na peça), desvio do ângulo ideal. Os parâmetros de remalhamento atuam junto aos critérios de remalhamento, sendo eles o máximo comprimento do lado do elemento, o valor máximo de elementos da malha e elementos prévios.

## 2.11 Estado atual dos conhecimentos

Farhoumand e Ebrahimi (2009) analisaram os processos de extrusão à frente, à ré e extrusão radial. A Figura 10 apresenta o desenho esquemático da ferramenta utilizada.

**Figura 10 – Desenho esquemático da geometria da ferramenta de extrusão à frente, à ré e radial**



Fonte: FARHOUMAND; EBRAHIMI, 2009

Foram utilizados métodos experimentais e numéricos, cujos resultados foram confrontados. A relação tensão versus deformação foi determinada usando-se um ensaio de compressão e a Equação de Hollomon. Para a simulação numérica foi utilizado modelos axissimétricos 2D e o software ABAQUS. O fator de atrito utilizado foi de 0,13.

Chen, et al. 2007 utilizaram o programa de elementos finitos DEFORM 3D para investigar o comportamento da deformação plástica em um corpo-de-prova de alumínio durante sua extrusão axissimétrica por intermédio de ferramenta cônica. Nesta simulação, tanto a matriz quanto o punção foram considerados corpos rígidos e a mudança de temperatura durante a deformação foi desprezada. Sobre várias condições de extrusão, a análise numérica investigou a distribuição de tensão – deformação, a distribuição do fator de dano, a carga e a velocidade de fluxo do corpo de prova no ponto de saída da ferramenta. Os autores obtiveram as seguintes conclusões: (1) A força de extrusão aumenta com o aumento do semi-ângulo de extrusão na faixa de  $10^\circ$  a  $35^\circ$ ; (2) O dano máximo ocorre sobre a superfície do corpo-de-prova na região de saída da ferramenta; (3) A deformação efetiva do corpo-de-prova aumenta com o aumento da taxa de extrusão; (4) A tensão efetiva sobre o corpo de prova aumenta e o fluxo velocidade diminui quando o semi-ângulo da ferramenta aumenta.

Uyyuru; Valberg, (2006) estudaram o fluxo de uma liga de alumínio sobre a cabeça de um punção utilizando-se o processo de extrusão a ré de um copo. Foi utilizado técnica de modelagem físico-combinado com simulações de elementos finitos. Para a análise numérica foi utilizado o código elementos finitos DEFORM onde variou-se o fator de atrito próximo de zero ( $m=0,001$ ) até ( $m=0,4$ ). Os dados principais de entrada para a simulação numérica incluíram o modelo do material, características mecânicas e parâmetros de fronteiras.

Long (2006) investigou os efeitos da deformação plástica e variação da temperatura da peça de trabalho e ferramenta sobre os erros dimensionais de um copo extrudado. Utilizou-se o software ABAQUS de análise de elementos finitos, as condições de contato e atrito entre a peça de trabalho e a ferramenta, seguiu o modelo de tensão cisalhante de Coulomb. Os autores chegaram a conclusão que a tensão de fluxo e propriedades da peça de trabalho têm um efeito decisivo sobre os erros dimensionais do copo extrudado.

Tiernan, et. al., 2005 utilizaram uma célula de carga incorporada na ferramenta a qual possibilitou determinar precisamente a força de extrusão enquanto um LVDT (linear variable differential transformer) supria o mensuramento automático durante a descida do punção. A Figura 11 apresenta a ferramenta montada em prensa na qual pode se visualizar a saída do cabo para aquisição de dados.

**Figura 11 – Foto da ferramenta de extrusão à frente com célula de carga**



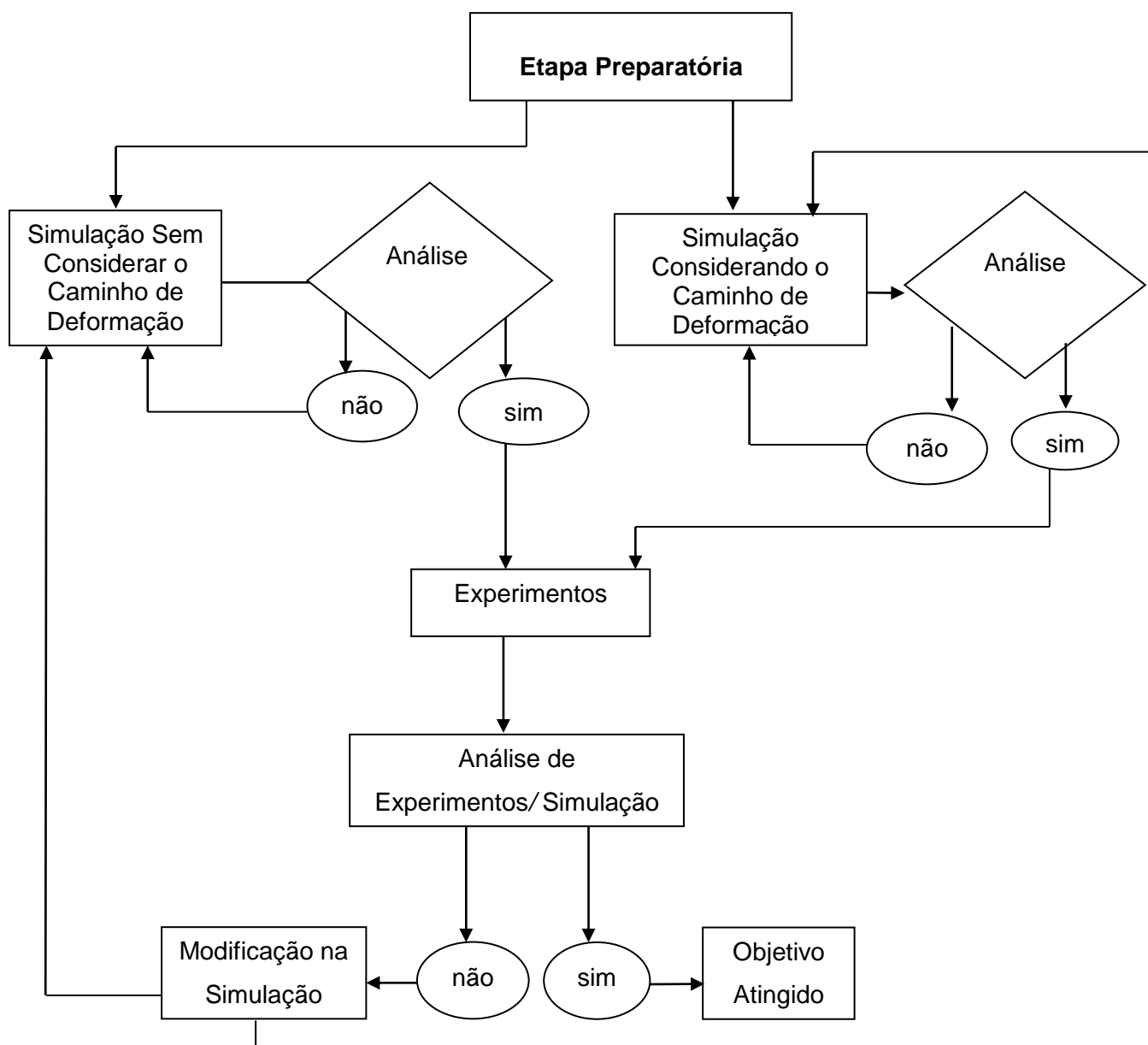
Fonte: Tiernan, et. al 2005

### 3 METODOLOGIA

O objetivo do trabalho é avaliar por meio do método de elementos finitos, a resposta numérica que envolve a etapa axissimétrica do processo de fabricação por extrusão indireta, considerando o efeito do caminho de deformação.

Para o estabelecimento das etapas do trabalho procurou-se conjugar atividades de simulações e experimentos. Essas atividades e suas interações foram descritas a seguir e podem ser visualizadas no fluxograma da Figura 12.

**Figura 12 – Fluxograma esquemático dos métodos utilizados no trabalho**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1 Etapa preparatória

Nesta etapa procurou-se obter as informações necessárias à simulação numérica (entrada de dados no Programa Deform 2D) e a realização dos experimentos.

O material utilizado na confecção dos corpos de prova foi o ABNT 1010 trefilado em forma de barras com diâmetro de 14mm e 3000mm de comprimento. Foram cortados oito corpos de prova para a obtenção da curva tensão deformação através do ensaio de tração. Destes oito corpos de prova quatro foram, posteriormente, recozidos para eliminar a influência do caminho de deformação. As amostras foram austenitizadas em temperatura de 900 C° por uma hora em banho de sal e resfriadas até a temperatura de 400 C°, e, em seguida ao ar até temperatura ambiente.

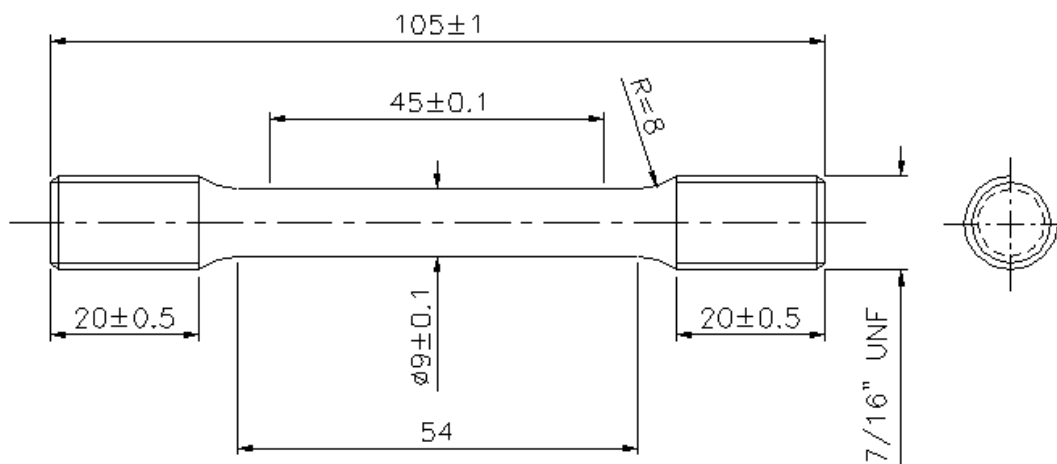
A análise química do aço ABNT1010 foi obtida em espectrômetro óptico de emissão e Leco. Os elementos químicos, carbono e enxofre foram analisados no Leco a partir de limalhas obtidas durante a usinagem dos corpos de prova.

As amostras para análise metalográfica foram cortadas no sentido perpendicular à direção da laminação. Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, polidas em lixas com granulometrias de 180, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000. Em seguida, foi feito polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta diamante com dimensões 7, 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Para análise da microestrutura, essas amostras foram atacadas com nital 5%.

#### **3.1.1 Curvas tensão deformação obtidas por ensaio de tração**

Os ensaios foram realizados no Centro de Desenvolvimento Tecnologia Nuclear em uma máquina universal Instron, com acionamento servo-hidráulico e célula de carga de 10t. Para o ensaio de tração foram usinados oito corpos-de-prova no material ABNT1010 (Figura 13).

**Figura 13 – Dimensões em mm dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração**



Fonte: Elaborado pelo autor

O valor do limite de escoamento foi obtido através do gráfico tensão versus deformação, a partir da deformação de 0,2%. Um extensômetro foi utilizado para a determinação da deformação na direção do comprimento do corpo-de-prova.

O limite de resistência foi obtido através da Equação 42.

$$\sigma_R = \frac{Q_{MAX}}{S_0} \quad (42)$$

O valor da carga máxima foi obtido no ponto máximo da curva carga em função da variação do comprimento inicial.

O alongamento foi calculado pela relação:

$$e = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (43)$$

onde  $l_0$  e  $l_f$  são, respectivamente, os comprimentos inicial e final.

A deformação e tensão verdadeira foram dadas pelas Equações 44 e 45.

$$\bar{\epsilon}_v = \ln(1 + e) \quad (44)$$

$$\sigma_v = \sigma(1 + e) \quad (45)$$

onde  $e$  é a deformação convencional, e é dada pela razão entre a variação do comprimento e o comprimento inicial.

O coeficiente de resistência  $k$  e o coeficiente de encruamento  $n$  foram calculados pela disposição de 4 pontos da região plástica em um gráfico da Equação 46 linearizada (GARCIA, et al. 2000).

$$\sigma_v = k (\bar{\epsilon}_v)^n \quad (46)$$

onde,  $\sigma_v$  e  $\bar{\epsilon}_v$  são, respectivamente, as tensões e deformações reais.

Após tratamento dos dados foram obtidas quatro equações de Hollomon para o material trefilado e quatro equações para o material recozido.

De posse destas equações foi determinada a equação média de Hollomon para cada material ABNT 1010 nos estados trefilado/recozido de acordo com o trabalho de Bergner e Zouhar (2000). Primeiramente, foi determinado o coeficiente de encruamento médio  $\bar{M}_j(ni)$  e a média geométrica dos valores exponenciais dos coeficientes de resistência ( $C_g$ ) de acordo com as equações (47) e (48) respectivamente.

$$\bar{M}_j(ni) = \frac{M_j(ni)}{4} \quad (47)$$

onde  $M_j(ni)$  é o valor do coeficiente de encruamento de cada curva.

$$C_g = \left( \prod (\exp^{k(ni)}) \right)^{1/4} \quad (48)$$

onde  $C_g$  é a média geométrica dos valores de  $k$  e  $k(ni)$  é o valor de  $k$  na equação linearizada e  $ni$  é o número de corpos de prova testados.

O valor de  $B(ni)$  para cada ensaio foi obtido de acordo com a Equação (49):

$$B(ni) = Mj(ni) - \bar{M}j(ni) \quad (49)$$

onde  $B(ni)$  é o valor numérico para cada ensaio obtido pela subtração do coeficiente de encruamento em relação ao coeficiente de encruamento médio dos quatro ensaios.

Os valores de  $C(ni)$ ;  $D$ ;  $E_1$ ;  $k_0$ ;  $W_0$ ; foram obtidos pelas Equações (50), (51), (52), (53) e (54):

$$C(ni) = \log\left(\frac{\exp^{k(ni)}}{C_g}\right) \quad (50)$$

$$D = \sum(B(ni) \times C(ni)) \quad (51)$$

$$E_1 = \sum(Bni)^2 \quad (52)$$

$$\Delta K_0 = 10^{-\left(\frac{D}{E_1}\right)} \quad (53)$$

$$W_0 = \frac{\sum(\log(\exp^{k(ni)} + (Mj(ni) * \log(\Delta k_0)))}{4} \quad (54)$$

A média logarítmica dos valores exponenciais do coeficiente de resistência  $Z_0$  foi obtida pela Equação 55:

$$Z_0 = \sum \frac{(\log(\exp^{k(ni)}))}{4} \quad (55)$$

A equação de Hollomon média é obtida por:

$$\sigma_v = Z_0 \left(\frac{\bar{\epsilon}_v}{\Delta K_0}\right)^{\bar{M}j(ni)} \quad (56)$$

O mesmo procedimento foi utilizado para obter a equação de Hollomon média para os corpos de prova recozidos.

### **3.1.2 Visioplaticidade**

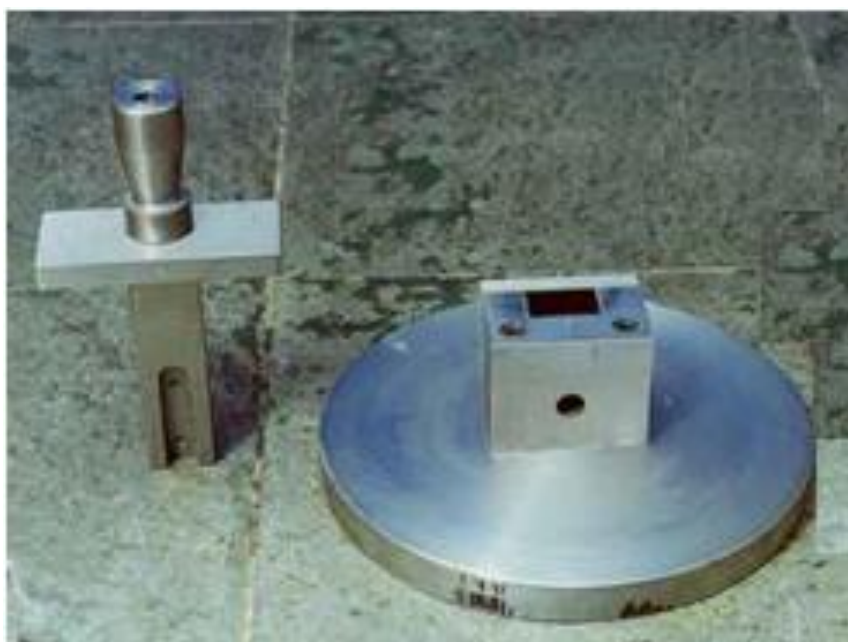
As deformações nas direções x e y foram obtidas utilizando-se o método de visioplaticidade realizado em três etapas:

- a) Confeção e marcação do corpo-de-prova para a extrusão;
- b) Extrusão dos corpos-de-prova em prensa hidráulica;
- c) Mensuração da malha e cálculos para se obter as deformações.

#### **3.1.2.1 Confeção e marcação dos corpos-de-prova**

Primeiramente, foi cortado da barra cilíndrica do material ABNT1010 trinta e seis corpos de prova com o diâmetro de 14mm e comprimento de 36mm. O corte foi realizado em um estampo com a utilização de uma prensa excêntrica modelo Kaerck com capacidade de 25t. A Figura 14 mostra o estampo de corte com conjunto superior (macho, porta punção e espiga), e o conjunto inferior (placa base inferior, matriz de corte e guia da barra).

**Figura 14 – Estampo de corte**



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 15 apresenta oito corpos de prova já cortados na seção transversal da barra com as dimensões de ( $\varnothing 14 \times 36$ )mm que apresentaram irregularidades na superfície cisalhada.

**Figura 15 – Corpo de prova cisalhado, evidenciando superfície irregular do corte**



Fonte: Elaborada pelo autor

Após o corte na seção transversal, os corpos de prova foram faceados no comprimento em um torno CNC centur 30D (Figura 16).

**Figura 16 – Torno CNC**



Fonte: Elaborada pelo autor

No faceamento destes corpos de prova foi utilizado pastilha de Widia (Walter DNMG 150608NMA), velocidade de corte 170mm/min e avanço no desbaste e acabamento de 0,1mm/v. A profundidade de corte utilizada para cada passe foi de  $A_p = 0,25\text{mm}$ .

Na operação de fresamento no sentido longitudinal dos corpos de prova foi utilizada uma ferramenta de corte com o diâmetro de 20mm, onde foi adaptada duas pastilhas de corte APMT 1135 PDER-H12 VP15 TF. A velocidade de corte utilizada para o fresamento foi de 170mm/min, avanço de corte de 0,1mm/dente, profundidade de corte de  $A_p = 0,2\text{mm}$  no desbaste e 0,08 na etapa de acabamento. A rotação utilizada tanto no desbaste quanto no acabamento foi de 2700 rpm.

Os corpos de prova foram fixados e alinhados em uma morça em um centro de usinagem Romi Discovery 560. A Figura 17 mostra o centro de usinagem utilizado no faceamento dos corpos de prova.

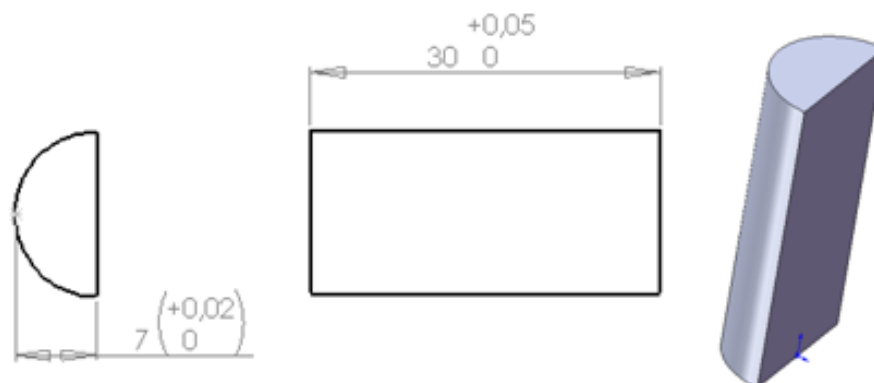
**Figura 17 – Centro de Usinagem Romi Discovery 560**



Fonte: Foto realizada pelo autor

Cada corpo de prova foi usinado ao longo de seu comprimento, de modo que sua seção transversal ficou com a forma e as dimensões mostradas na Figura 18.

**Figura 18 – Desenho dimensionado do corpo de prova usinado sem malha**

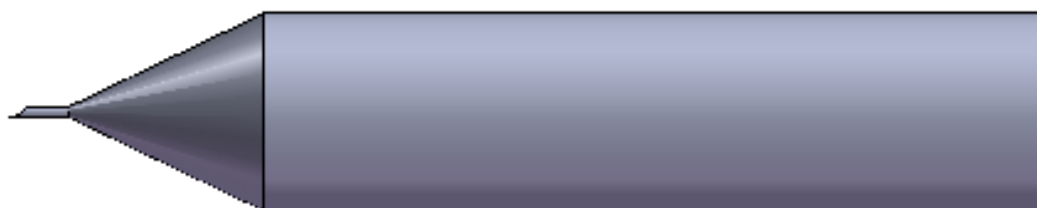


Fonte: Elaborado pelo autor

Antes da retirada de cada corpo de prova do centro de usinagem foi realizada a marcação por usinagem da malha na face usinada, eliminando-se com este procedimento quaisquer desvios de paralelismo.

O primeiro passo para a realização das marcações por usinagem foi o estudo do modelo e afiação da ferramenta utilizada. Foram considerados a disponibilidade de material e dimensões das pinças da Discovery Romi. A Figura 19 apresenta o desenho em 3D do projeto da ferramenta realizado no software SolidWork`s.

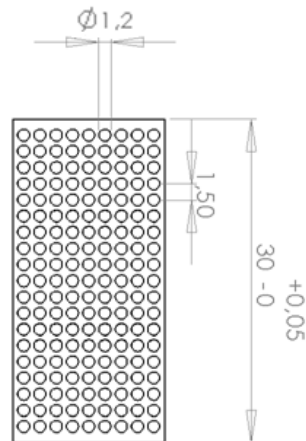
**Figura 19 – Desenho em 3D do projeto da ferramenta**



Fonte: Elaborado pelo autor

O segundo passo foi a determinação do número de marcações e sua disposição na face usinada, conforme mostra a Figura 20.

**Figura 20 – Disposição das marcações na face usinada do corpo de prova**



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram realizados um total de 171 marcações em cada corpo de prova, sendo 9 marcações em cada linha e 19 marcações em cada coluna.

A elaboração do programa de usinagem foi realizada e enviada para o centro de usinagem via RS232. A Figura 21 mostra o programa utilizado para a marcação do corpo de prova.

**Figura 21 – Programa utilizado para a marcação do corpo de prova**

```

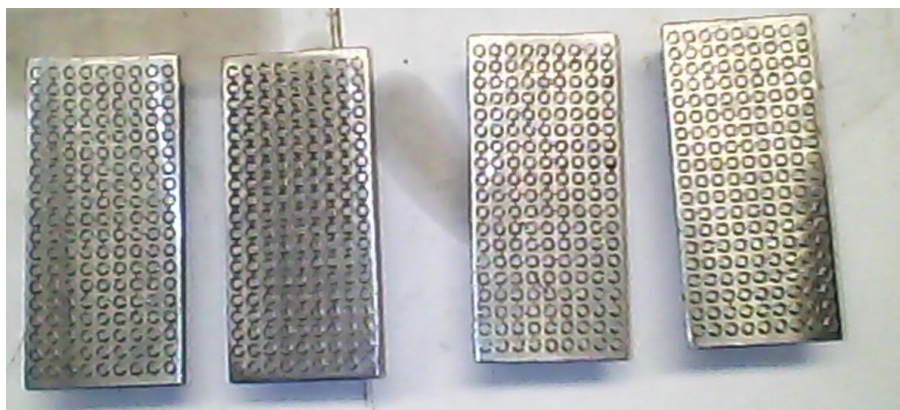
N10 G90 G94 G71 G17
N20 G54 G0 Z50 D01
N30 T01;;;( FERRAMENTA MARCAR);;;
N40 M6
N50 G54 D01
N60 S5888 M3M8
N70 F10
N80 MCALL CICLE83(10,0,-0.05,,1,1,0.1,0.1,1,1,3,,0.1,1)
N90 ABC:
N100 HOLES(-6,-13.5,0,1.5,1.5,9,19)
N110 END LABEL
N120 MCALL
N130 G0 Z200
N140 M30

```

Fonte: Elaborado pelo autor

A profundidade da marcação dos círculos foi de 0,03mm. A Figura 22 mostra o corpo de prova após a marcação pelo processo de usinagem.

**Figura 22 – Corpos de prova marcados**



Fonte: Foto realizada pelo autor

### **3.1.2.2 Extrusão dos corpos-de-prova em prensa hidráulica**

As operações de extrusão foram realizadas em uma prensa hidráulica de simples efeito com capacidade de 100t (Figura 23).

**Figura 23 – Prensa hidráulica de simples efeito**

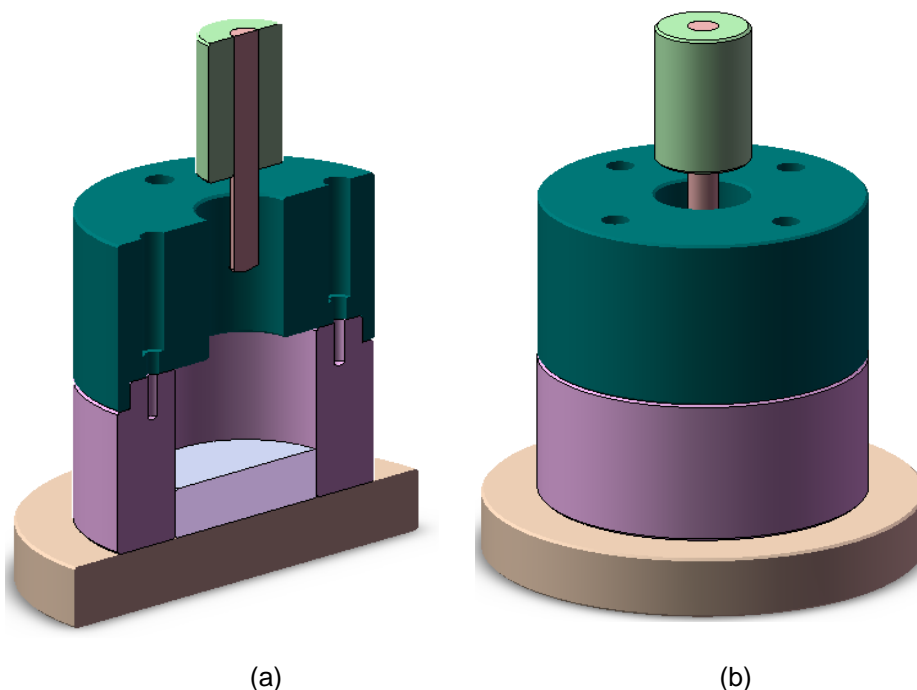


Fonte: Foto realizada pelo autor

O manômetro instalado na prensa é da marca Famabras, capacidade de 100t, menor divisão de 1t, com diâmetro do mostrador de 93mm. Ele foi calibrado, utilizando-se bomba de calibração, série 0362, capacidade 1000kgf/cm<sup>2</sup>, conforme norma NBR 14105. A temperatura do local foi de 20 ± 2°C e umidade relativa de 50 ±10%. Utilizou-se calibrador de pressão digital, marca Ascroft, n° de série AQS-8901. O erro total máximo obtido foi igual a 1,0t para pontos entre 25 e 75t (Anexo B).

A ferramenta utilizada para a extrusão dos corpos de prova foi confeccionada na Brasição Indústria e Comércio Ltda., que disponibilizou os equipamentos e ferramentas necessários para construção e testes. Primeiramente, foi realizado um projeto da ferramenta no software Solidwork's. No projeto foi considerado a capacidade de carga e tamanho da mesa da prensa disponível para a extrusão. As Figuras 24 (a) e (b) apresentam o desenho em 3D da ferramenta em corte e, em perspectiva, respectivamente.

**Figura 24 – (a) Ferramenta em corte, (b) Ferramenta em perspectiva**



Fonte: Elaborada pelo autor

A ferramenta para a extrusão é composta de cinco punções com inclinações de (0, 15, 20, 30 e 45) graus. Estes punções em aço ABNT D2 são intercambiáveis e

foram confeccionados em um torno CNC Centur 3D. Após a usinagem, os punções foram temperados e revenidos, objetivando a dureza final 60HRC. A Figura 25 (a) e (b) mostra, respectivamente, a fotografia dos punções com (45, 20, 15,0) graus e o punção de 30 graus montado no porta punção da ferramenta, após a sua usinagem.

**Figura 25 – (a) Punções de extrusão (45,20,15,0) graus (b) Punção 30 graus montado no porta punção**



(a)



(b)

Fonte: Fotos realizadas pelo autor

A Figura 26 apresenta a ferramenta para extrusão desmontada com os componentes, placa base inferior, punções, matriz alojada, guias dos punções, placa de choque e porta punções.

**Figura 26 – Ferramenta de extrusão desmontada e seus componentes**



Fonte: Fotos do autor

A Figura 27 apresenta a ferramenta montada e os quatro punções após a usinagem de acordo com o projeto inicial.

**Figura 27 – Ferramenta de extrusão montada e os quatro punções**



Fonte: Fotos do autor

Os trinta e seis corpos de prova trefilados, recozidos e marcados por usinagem foram inseridos dentro da matriz, com apoio na parte inferior da placa base temperada e retificada.

### **3.1.2.3 Mensuração da malha e determinação das deformações**

Para a mensuração das marcações nos corpos de prova foi utilizado um projetor de perfil marca Mitutoyo, modelo PH-A14 -172810, capacidade angular de 360° com movimento longitudinal e transversal de 50mm, Figura 28.

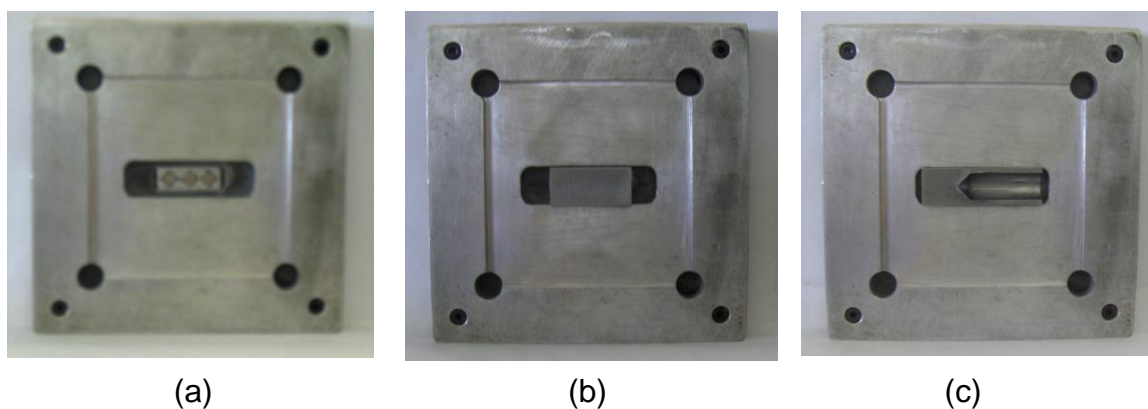
**Figura 28 – Projetor de perfil pertencente ao laboratório de metrologia PUC Minas- Contagem**



Fonte: Elaborado pelo autor

O equipamento foi utilizado primeiramente para verificar o diâmetro e distância centro a centro dos círculos após a marcação sobre a superfície dos corpos de prova não deformados. Os eixos coordenados foram estabelecidos utilizando o sistema matricial, ou seja, linha (eixo x) versus coluna (eixo y). O sistema linha recebeu a numeração de 1 a 19 e o sistema coluna de 1 a 9. Para a utilização do equipamento foi construído um dispositivo de modo a permitir a fixação das amostras sobre a mesa do projetor de perfil (Figura 29).

**Figura 29 – Foto do dispositivo com o bloco de alumínio e os três imãs(a):  
Corpo de prova não deformado fixado ao dispositivo(b): Corpo de  
prova deformado a 45°fixado ao dispositivo(c)**



(a)

(b)

(c)

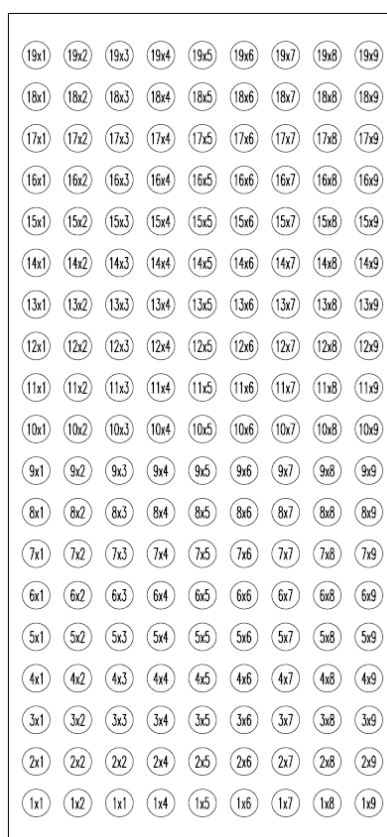
Fonte: Elaborado pelo autor

A fixação de cada amostra no dispositivo foi realizada por 3 imãs com diâmetro de 4mm e comprimento de 3mm. Estes imãs foram alojados na cavidade interna do dispositivo em um bloco de alumínio com dimensões de (6x10x25)mm. Para a fixação do dispositivo na mesa do equipamento foi utilizado um prisma magnético.

O dispositivo foi construído com folga no sentido de comprimento do corpo de prova para, também, atender as amostras trefiladas/extrudadas e recozidas/extrudadas.

A Figura 30 mostra a disposição dos círculos sobre a superfície do corpo de prova sem deformação.

**Figura 30 – Posição dos círculos no corpo de prova sem deformação**



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a medição dos círculos gravados no corpo de prova não deformado foi determinada a média aritmética das 342 medições efetuadas Equação 57.

$$\bar{D} = (\sum Di)/n^* \quad (57)$$

onde  $\bar{D}$  representa a média das medições,  $Di$  é o valor de cada medição e  $n^*$  é o número de medições efetuadas.

O desvio padrão das medições  $S(Di)$  e da média das medições  $S(\bar{D})$  foi determinado pelas equações (58) e (59).

$$S(Di) = \left[ \sum (Di - \bar{D})^2 / (n^* - 1) \right]^{1/2} \quad (58)$$

$$S(\bar{D}) = S(Di) / \sqrt{n^*} \quad (59)$$

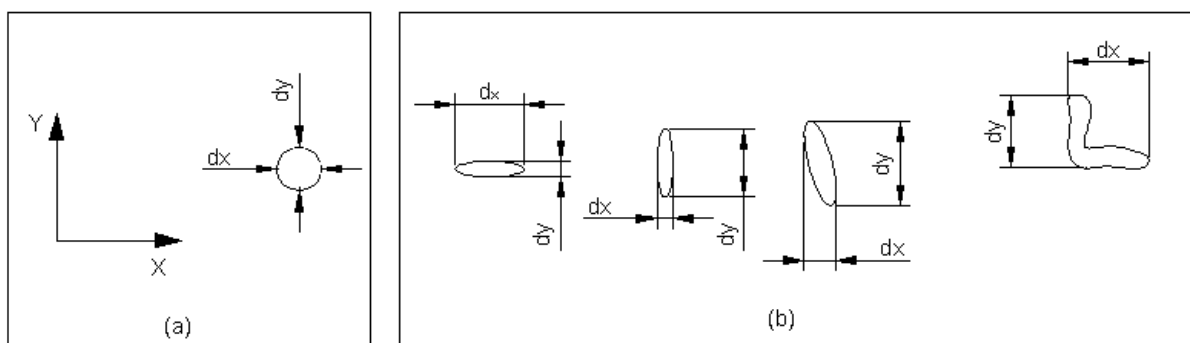
A expressão da incerteza de medição tipo A, determinada a partir das  $n^*$  medições, para  $\gamma$  graus de liberdade e nível de confiança de (p) =95% foi obtida pela equação (60).

$$I(U_A) = I(\bar{D}) = \pm * t_{95\%}(\gamma) * S(\bar{D}) \quad (60)$$

onde  $I(U_A)$  é a incerteza de medição,  $t_{95\%}$  é o valor do coeficiente “t de Student”.

A Figura 31 (a) e (b) mostra o círculo inicial com suas dimensões e o sentido utilizado nos eixos X e Y para as medições e alguns formatos dos círculos extrusão.

**Figura 31 – (a) Sentido dos eixos, formato e dimensões  $d_x$  e  $d_y$  do círculo inicial antes da extrusão, (b) formato dos círculos dimensões  $d_x$  e  $d_y$  após extrusão.**



Fonte: Elaborado pelo autor

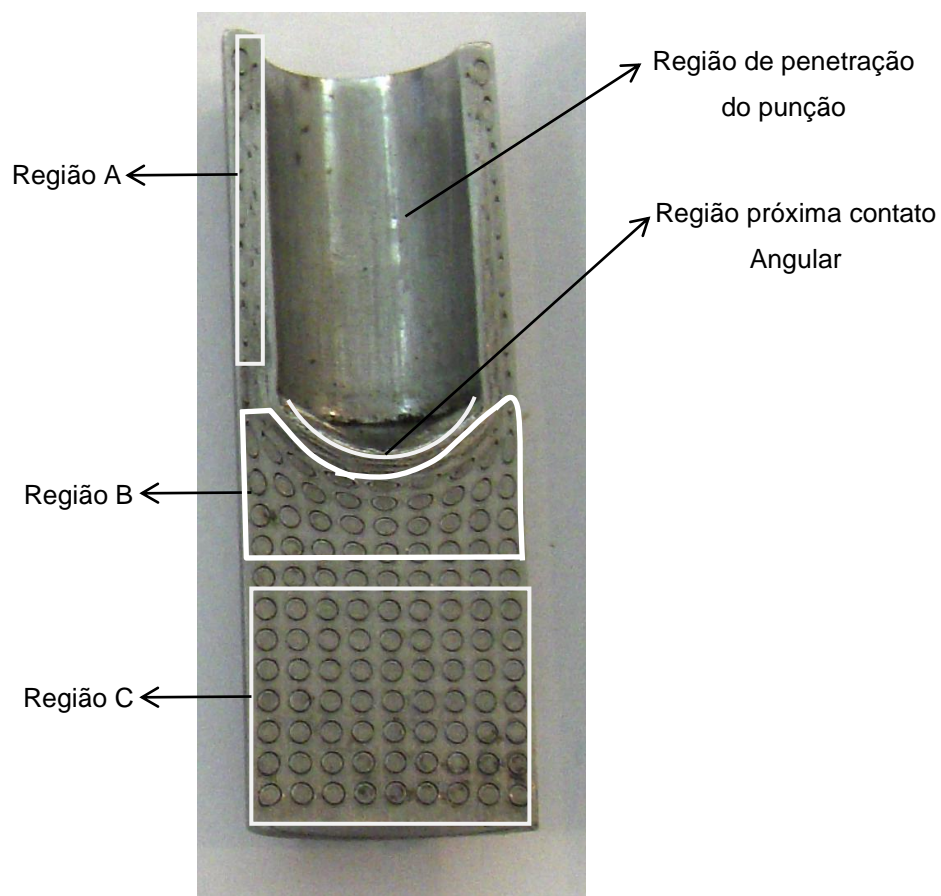
Para a mensuração dos círculos/elipses nos corpos de prova deformados foi mantido o sentido nos eixos X e Y com suas respectivas dimensões finais  $d_x$  e  $d_y$ .

Com o valor de  $\bar{D}$  e os valores finais  $d_x$  e  $d_y$  foi possível determinar os valores de deformações  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  a partir da equação 61:

$$\varepsilon_x = \ln\left(\frac{d_x}{\bar{D}}\right), \quad \varepsilon_y = \ln\left(\frac{d_y}{\bar{D}}\right) \quad (61)$$

Após a deformação dos corpos de prova, algumas marcações se perderam nas regiões de penetração do punção e na proximidade do contato angular. As deformações dos círculos foram estudadas em três regiões distintas (A, B e C) ao longo de toda a extensão corpo de prova . (Figura 32).

**Figura 32: Regiões estudadas (A, B, C) e locais de marcações perdidas**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.5 Ensaio de indentação instrumentada amostras trefiladas e recozidas

Para a obtenção das curvas tensão deformação dos ensaios de indentação instrumentada (EII), foram cortados 36 corpos de prova da barra com diâmetro de 14mm e comprimento de 3000mm as quais 18(dezoito) foram posteriormente recozidas utilizada.

Os ensaios foram realizados no laboratório de fenômenos de superfície na Universidade de São Paulo USP. Onde se observa o nanodurômetro Figuras 33 (a), e (b).

**Figura 33 (a), (b) e (c) – Laboratório de indentações instrumentada da USP e nanodurômetro**



(a)



(b)

Fonte: Fotos do autor

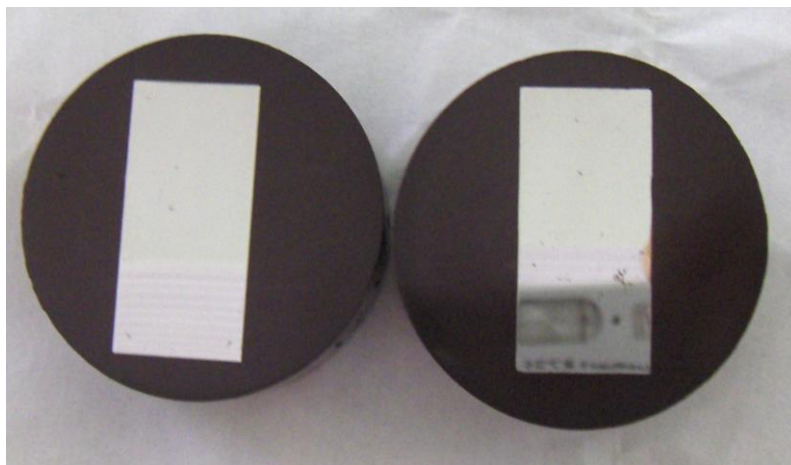
A Figura 33(a) e (b) mostra o micro indentador Fischercope e a central de aquisição de dados utilizados nas medições de nanodureza. Observa-se que a central de aquisição dos dados fica em mesa separada do microindentador, pois, durante as medições, deve se evitar vibração dentro do laboratório.

Parâmetro importante que afeta os resultados da indentação são o acabamento superficial, planicidade da amostra e carga utilizada. Para atender o acabamento/planicidade as amostras foram embutidas, lixadas e polidas com pasta de diamante de  $9\mu\text{m}$  e  $3\mu\text{m}$ , e, em seguida receberam um polimento final com sílica coloidal de  $0,04\mu\text{m}$ . Após essa preparação a planicidade foi verificada pelo

deslocamento máximo do indentador entre dois pontos lineares na região de avaliação.

Na determinação da carga utilizada no EII foram utilizados dois corpos de prova sendo um no estado recozido e outro trefilado conforme Figura 34.

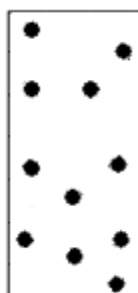
**Figura 34 – amostras embutidas trefiladas e recozidas**



Fonte: Fotos do autor

Foram feitas 11(onze) impressões aleatórias, utilizando cargas de 10mN, 40mN e 70mN, conforme Figura 35.

**Figura 35 – Região avaliada na determinação da carga**



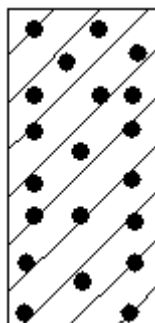
Fonte: Elaborada pelo do autor

O ciclo de carregamento no ensaio foi de acordo com o proposto por (PULECIO, 2010), ou seja, carregamento até a carga máxima, manutenção na carga máxima durante pelo menos 10s para reduzir os efeitos de fluência (creep), descarregamento e manutenção durante 30s na carga mínima. Nas etapas de carregamento e descarregamento foram adquiridos no mínimo 60 valores de carga a cada 0,1s.

Após as 11(onze) medições de nanodureza para as cargas de 10mN, 40mN e 70mN foram obtidos média e desvio padrão que permitiram escolher as cargas mais adequadas para o aço ABNT1010 trefilado e recozido. As cargas escolhidas foram aquelas que proporcionaram menor desvio padrão das medidas.

Após a definição da carga, as amostras trefilada e recozida foram alinhadas no sentido do eixo longitudinal do corpo de prova no micro indentador instrumentado (Fischerscope H100v). Foram executados 20 ensaios nas amostras trefiladas e recozidas. Nesses ensaios os deslocamentos de um ponto para o outro foram realizados manualmente devido o sentido de deslocamento automático do equipamento ser unidirecional. Foram avaliadas as regiões central e próximas ao diâmetro externo da amostra devido à diferença de deformação na peça trefilada no sentido radial. Nas amostras recozidas, também, foi realizado o mesmo procedimento. A Figura 36 mostra a região das indentações realizadas.

**Figura 36 – Pontos da região avaliada na amostra sem deformação recozida e trefilada**



Fonte: Elaborado pelo autor

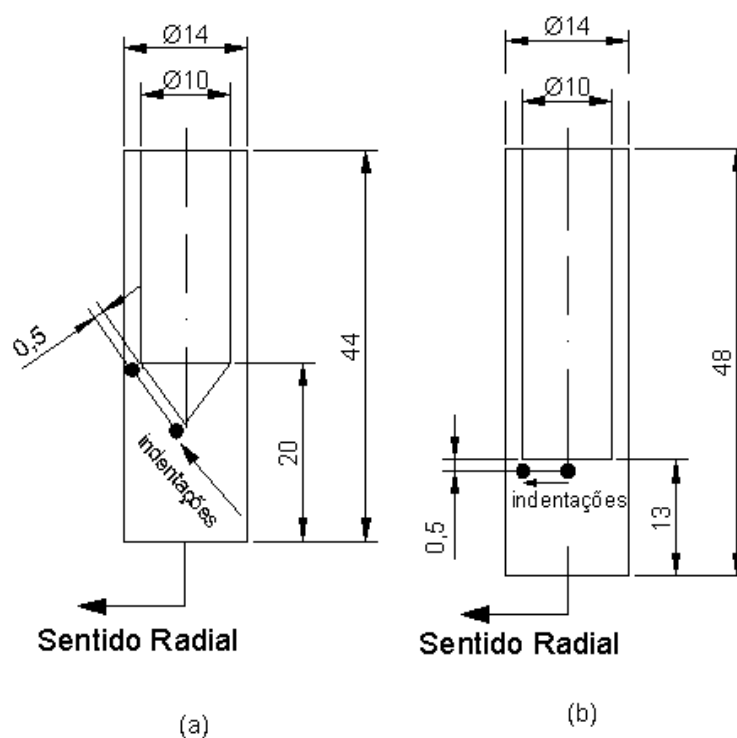
### ***3.1.6 Ensaio de indentação instrumentada amostras trefiladas/extrudadas e recozidas/extrudadas***

Nas amostras trefiladas/extrudadas e recozidas/extrudadas, também, foram realizados os mesmos cuidados, principalmente, com o acabamento e planicidade das amostras. Elas foram posicionadas na base do microindentador instrumentado (Fischerscope H100v) com o seu eixo longitudinal perpendicular ao eixo do penetrador. Foram utilizadas as medições no modo automático, e, portanto, fez-se necessário determinar uma caminho em linha reta para efetuar as medições. Nesse sentido, a região B foi escolhida porque a determinação da trajetória em linha reta

paralelo à variação angular de cada punção proporcionaria resultados de perfil de deformação diferente

O deslocamento do penetrador para efetuar as medições foi realizado no sentido do ângulo de extrusão das amostras, sendo que, a primeira indentação foi feita a 0,5mm da base de incidência do punção. As indentações posteriores foram executadas em toda extensão da aresta da amostra a partir da base do punção na extrusão, conforme mostrado (Figura 37).

**Figura 37 – (a) Sentido de indentação (corpos de prova a 15°, 20°, 30° e 45°),  
(b) (corpo de prova a 0°)**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.7 Ensaio de microdureza

Os ensaios de microdureza, também, foram realizados no laboratório de fenômenos de superfície na Universidade de São Paulo USP. Foi utilizado um microdurometro Buehler MMT3/645 certificado 2010/054 (Figura 38).

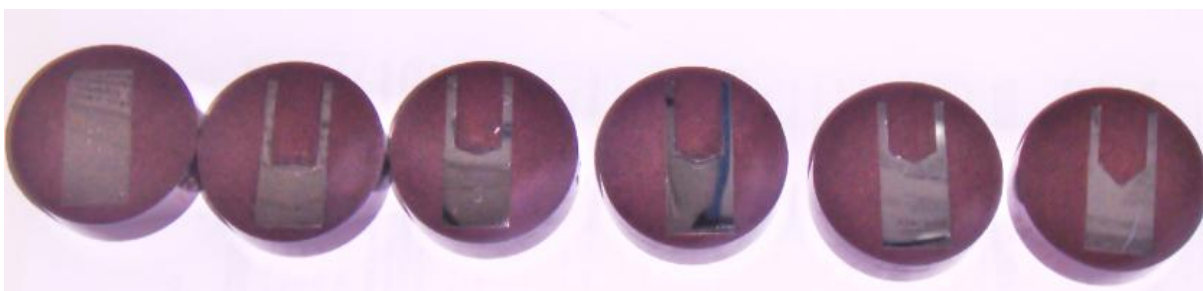
**Figura 38 – Microdurometro Buehler MMT3/645**



Fonte: Fotos do autor

A Figura 39 apresenta as amostras dos corpos de prova trefilados embutidos utilizado para a microdureza.

**Figura 39 – Amostra trefiladas sem deformação e deformadas a 0°,15°,20°,30° e 45° embutidas**

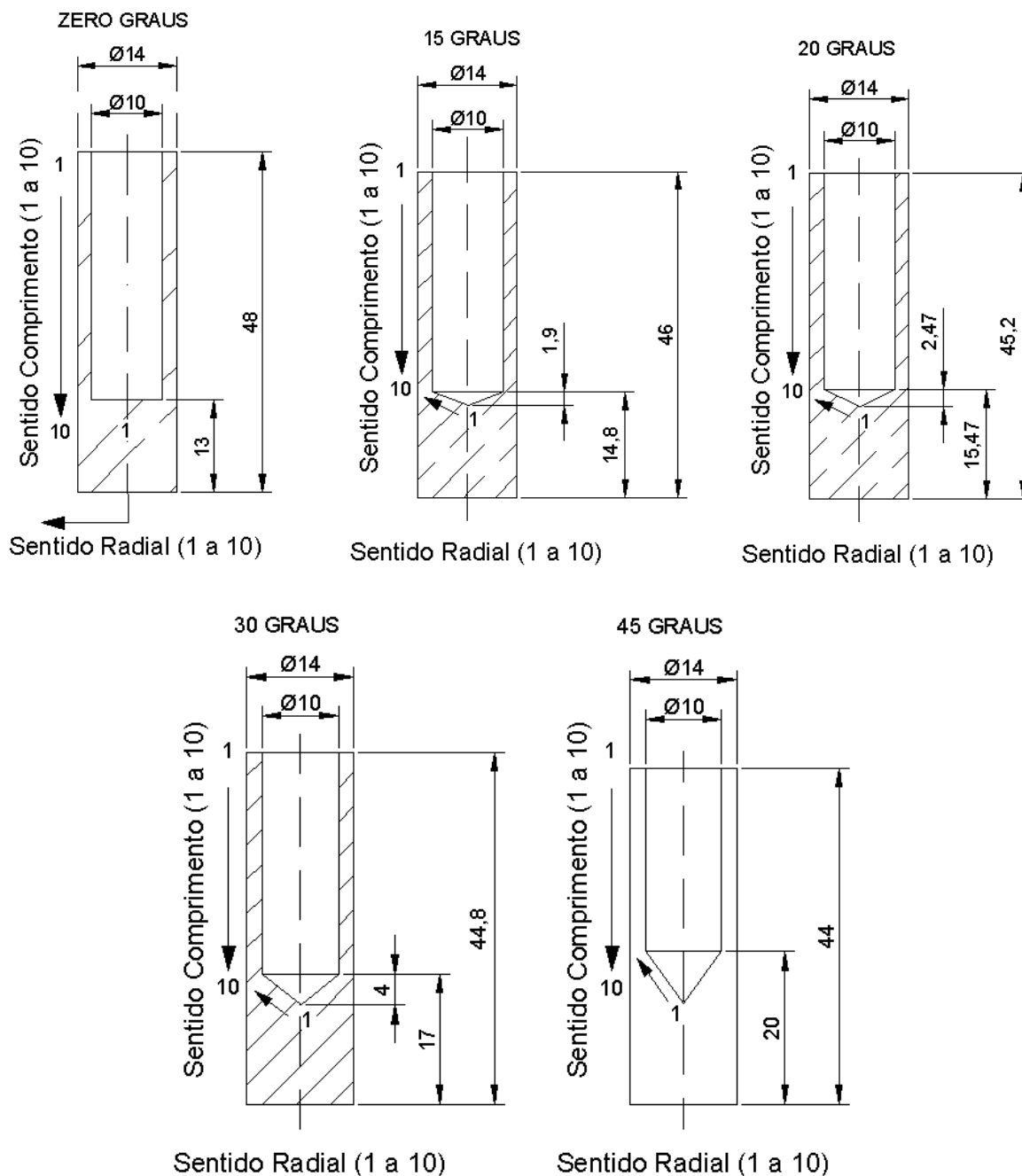


Fonte: Fotos do autor

A carga utilizada em cada indentação foi de 50gf durante 30s. Foram realizadas nas amostras 10 medidas aleatórias em toda a superfície. Nas amostras recozidas/extrudadas e trefiladas/extrudadas foram realizadas 10 medidas no sentido do ângulo de extrusão e 10 medidas no sentido de comprimento na região de menor espessura da amostra, conforme mostrado na Figura 40.

Neste ensaio, percebeu-se a formação de “pile-up” nas amostras, o que dificulta as medições.

**Figura 40 – Sentido adotado nas Indentações no ensaio de microdureza**



Fonte: Elaborado pelo autor

### **3.1.8 Curva tensão deformação obtida pelo Ensaio de indentação**

Os valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada foram inseridos no algoritmo inverso (PULECIO, 2010) para a determinação do módulo de elasticidade, do limite de escoamento, do coeficiente de encruamento e da dureza do material

ABNT 1010. O programa fornece as possíveis soluções da expressão analítica envolvendo tensão e deformação verdadeira

O programa apresenta resultados para as amostras que apresentaram “sink-in” e “pile-up” . O penetrador utilizado no ensaio de indentação foi o penetrador Vickers e o coeficiente de atrito de 0,1 foi utilizado no programa algoritmo inverso para a determinação das curvas soluções.

### 3.2 Simulação numérica

Nas simulações realizadas no presente trabalho, utilizou-se a formulação elasto-plástica do código comercial DEFORM-2D, a qual é associada a uma malha de elementos finitos e adota o funcional em termos da taxa de deformação.

O pré-processamento, o processamento e o pós-processamento das simulações foram realizadas, utilizando-se um pacote comercial de elementos finitos DEFORM 2D V\_8.0 elaborado pela Scientific Forming Corporation –SFTC.

Uma análise em termos do semi-ângulo de extrusão indireta e redução de área, para as condições de trabalho mostradas na Tabela 2 foram simuladas.

**Tabela 2 – Condições de Trabalho**

Condição de trabalho	Semi-ângulo de trabalho	Redução de área
1º	0	Ø14mm para Ø10 mm
2º	15	Ø14mm para Ø10 mm
3º	20	Ø14mm para Ø10 mm
4º	30	Ø14mm para Ø10 mm
5º	45	Ø14mm para Ø10 mm

Fonte: Elaborada pelo autor

Estas etapas tiveram por objetivo a geração dos resultados que serviram de comparação para as simulações considerando ou não efeito do caminho de deformação.

O número de passos de cada simulação foi em função do tempo real do trabalho experimental realizado.

As matrizes e punções foram considerados como materiais rígidos e o material deformado elastoplástico. A malha do material deformado foi gerada pelo

procedimento padrão do programa. Utilizou-se elementos isoparamétricos bi-lineares de quatro nós, conforme literatura (LEE; KOBAYASHI, 1971).

O modelo de atrito utilizado para descrever o contato entre matriz, material e punção foi de Coulomb. O coeficiente de atrito adotado nas simulações foi retirado da literatura (REIS, 2008).

Nas simulações numéricas foram utilizadas curvas obtidas por ensaio de tração e por ensaio de indentação instrumentada em corpos-de-prova do aço ABNT1010 recozidos e trefilados.

As curvas tensão deformação obtidas por ensaio de indentação instrumentada utilizadas nesta etapa do trabalho foram obtidas com o auxílio do trabalhos experimental desenvolvido de dureza instrumentada (VASCONCELLOS, 2006) e (PULECIO, 2010) O procedimento de obtenção das curvas e das simulações executadas é descrito em tópicos abaixo:

- a) Confeção dos corpos de prova;
- b) Avaliação da carga a ser utilizada para as medidas subsequentes de nanodureza;
- c) Definição da relação entre nanodureza e tensão efetiva, a partir de algoritmo;
- d) Extrusão invertida das condições de trabalho estabelecidas;
- e) Medidas de nanodureza das amostras extrudadas;
- f) Avaliação das medidas utilizando o algoritmo (PULECIO, 2010);
- g) Elaboração das curvas tensão efetiva x deformação efetiva das condições estudadas;
- h) Desenho das geometrias de cada condição estudada no pré-processador do pacote comercial de elementos finitos DEFORM V\_8.0;
- i) Definição das condições de contorno de acordo com a prensa utilizada na extrusão dos corpos de prova e literatura;
- j) Simulação no processador;
- k) Avaliação dos resultados no pós processador do programa;

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise química

A Tabela 3 mostra o resultado da análise química do material utilizado, em porcentagem em peso. A análise química foi realizada espectrometria de absorção atômica.

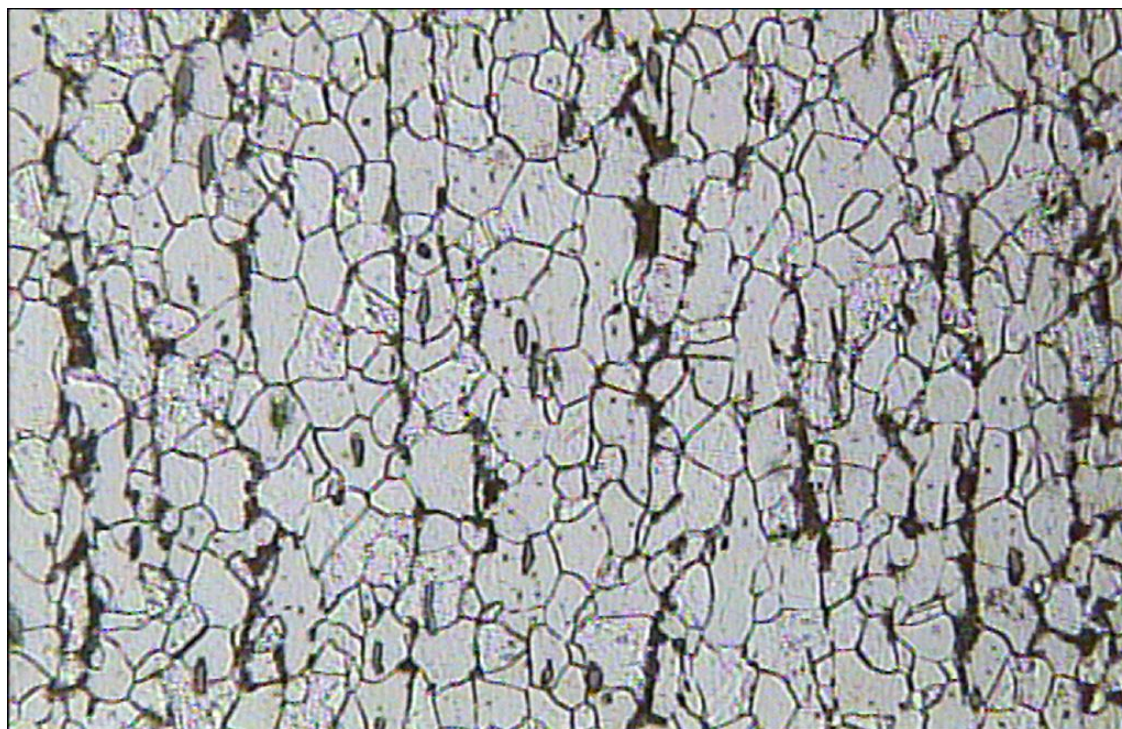
**Tabela 3 – Composições químicas em porcentagem em peso do aço ABNT 1010**

AÇO	C	Mn	Si	P	S	Pb	Ti	Al	N (ppm)
ABNT 1010	0,10	0,43	0,10	0,021	0,009	0,00	0,001	0,032	33

Fonte: Elaborada pelo autor

Evidenciou-se a presença de ferrita e perlita, nas amostras obtidas segundo as direções de laminação/trefilação, conforme Figura 41.

**Figura 41 – Amostra do aço ABNT 1010 - (200x)**



Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.2 Curva tensão versus deformação obtidas no ensaio de tração

As Tabelas 4 e 5 apresentam as quatro equações de Hollomon obtidas do material ABNT 1010 no estado inicial trefilado e recozido respectivamente.

**Tabela 4 – Expressões de Hollomon referente ao ensaio de tração dos quatro corpo de prova trefilados**

Corpo de Prova	Hollomon
1	$\sigma_V = 78,17 * (\varepsilon_V)^{0,0981}$
2	$\sigma_V = 96,27 * (\varepsilon_V)^{0,1302}$
3	$\sigma_V = 89,22 * (\varepsilon_V)^{0,1461}$
4	$\sigma_V = 78,46 * (\varepsilon_V)^{0,084}$

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 5 – Expressões de Hollomon ensaio de tração corpo de prova recozidos**

Corpo de Prova	Hollomon
1	$\sigma_V = 74,38 * (\varepsilon_V)^{0,3198}$
2	$\sigma_V = 76,49 * (\varepsilon_V)^{0,3306}$
3	$\sigma_V = 73,83 * (\varepsilon_V)^{0,3014}$
4	$\sigma_V = 73,66 * (\varepsilon_V)^{0,3004}$

Fonte: Elaborado pelo autor

De posse das equações (Tabelas 4 e 5) foi determinada a equação resultante de Hollomon de acordo com o trabalho de Bergner e Zouhar (2000). No Apêndice A, apresenta-se os cálculos e gráficos realizados para a obtenção da curva média tensão efetiva versus deformação efetiva dos corpos de prova deformados no estado trefilado e no estado recozido. A Tabela 6 apresenta as equações resultantes dos materiais trefilados/recozidos.

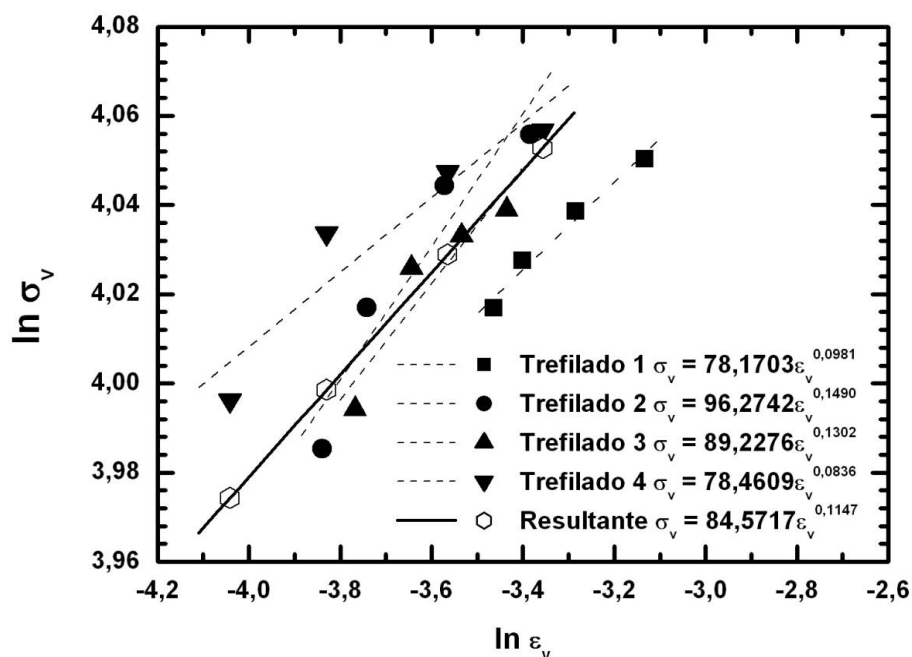
**Tabela 6 – Expressões de Hollomon média ensaio de tração corpo de prova trefilados/recozidos**

Corpo de Prova	Hollomon
Curva resultante material trefilado	$\sigma_V = 84,57 * (\varepsilon_V)^{0,1147}$
Curva resultante material recozido	$\sigma_V = 74,58 * (\varepsilon_V)^{0,3132}$

Fonte: Elaborado pelo autor

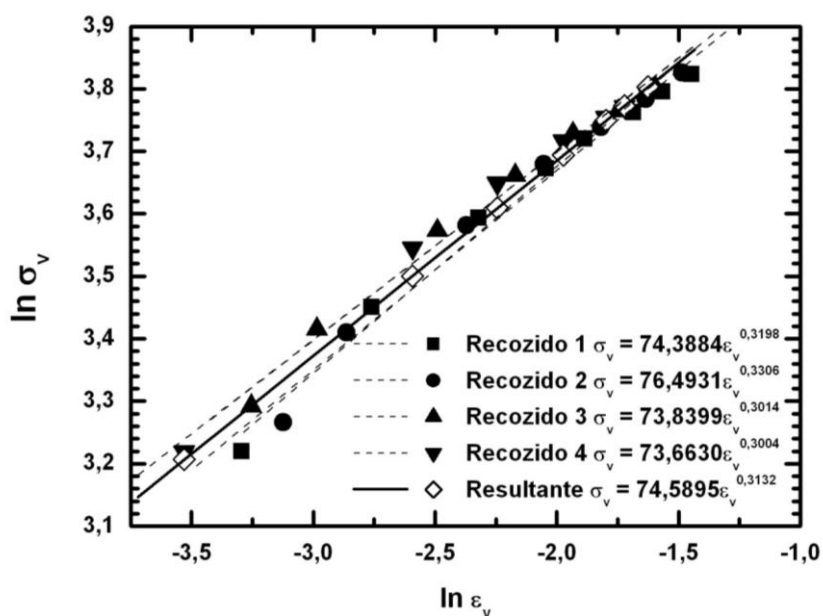
As Figuras 42 e 43 apresentam as curvas log de  $\sigma_v$  versus log  $\varepsilon_v$ , suas equações e a equação de Hollomon resultante no estado trefilado e no estado recozido respectivamente.

Figura 42 – Curvas, equações e resultante dos quatro corpos de prova trefilados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 – Curvas, equações e resultante dos quatro corpos de prova recozidos



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cálculo do erro médio ( $E_{mc}$ ) obtido entre a expressão modelada resultante da tensão efetiva em função da deformação efetiva e as curvas tensão

versus deformação engenharia obtidas experimentalmente foi utilizado a Equação (62):

$$E_{mc} = \frac{\sum_1^{n1} \left( \frac{(\bar{\sigma}_c mod - \sigma_c exp)}{\bar{\sigma}_c mod} \right)}{n1} \quad (62)$$

onde:  $n1$  é número de pontos selecionados entre a deformação de escoamento e deformação correspondente a carga máxima em cada curva experimental. Para o material trefilado e recozido foram obtidos 4 e 7 pontos respectivamente.

$(\bar{\sigma}_c mod)$  é a tensão de engenharia modelada a partir da equação média resultante  $\sigma_V$  dos ensaios experimentais.

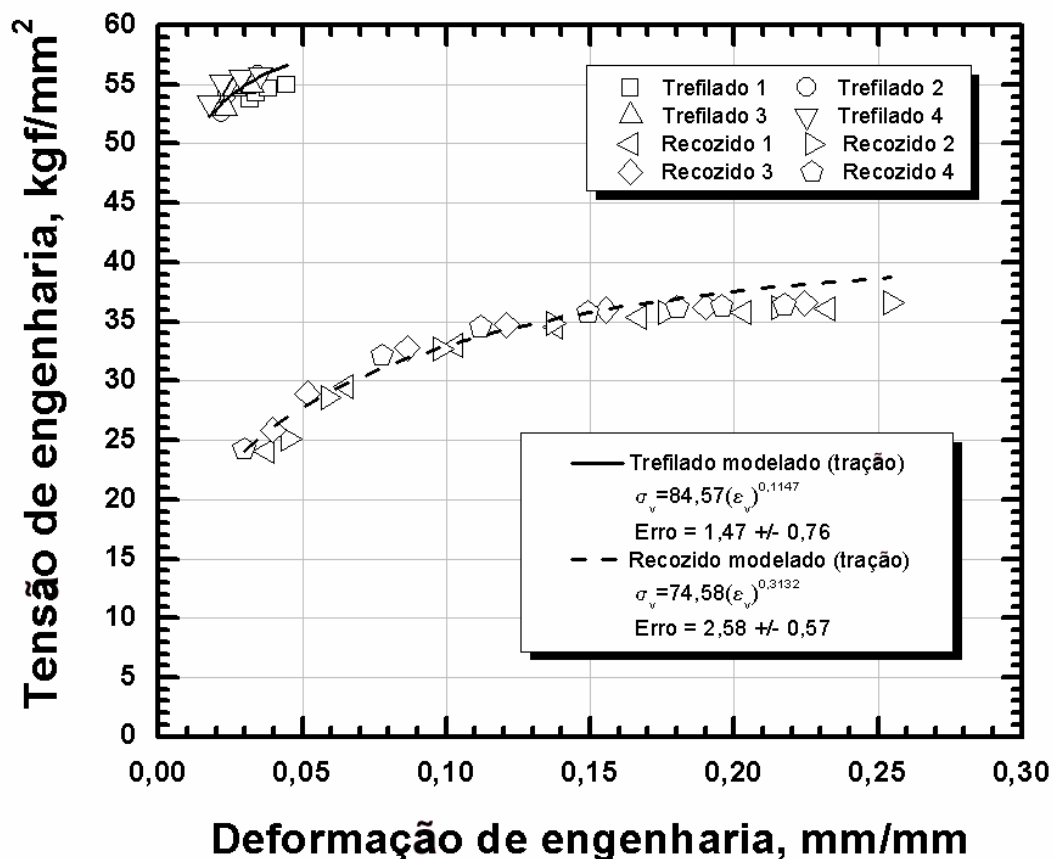
$(\sigma_c exp)$  é a tensão engenharia experimental obtida em cada um dos ensaios no intervalo entre a deformação de escoamento e a deformação correspondente a carga máxima.

O erro total médio ( $E_{TM}$ ) obtido na modelagem pode ser calculado pela equação (63):

$$E_{TM} = \frac{\sum E_{mc}}{4} \quad (63)$$

A Figura 44 apresenta o gráfico comparativo das 4 curvas tensão deformação de engenharia experimental e sua respectiva curva tensão deformação de engenharia modelada obtida pela equação resultante de Hollomon dos ensaios trefilados e recozidos, e o erro total médio, obtido entre a expressão modelada resultante (tensão efetiva em função da deformação efetiva) e as curvas tensão versus deformação engenharia obtido experimentalmente.

Figura 44 – Gráfico comparativo entre as tensões versus deformações de engenharia experimental e modelada com os seus respectivos erros



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Resultados da mensuração da malha no corpo de prova

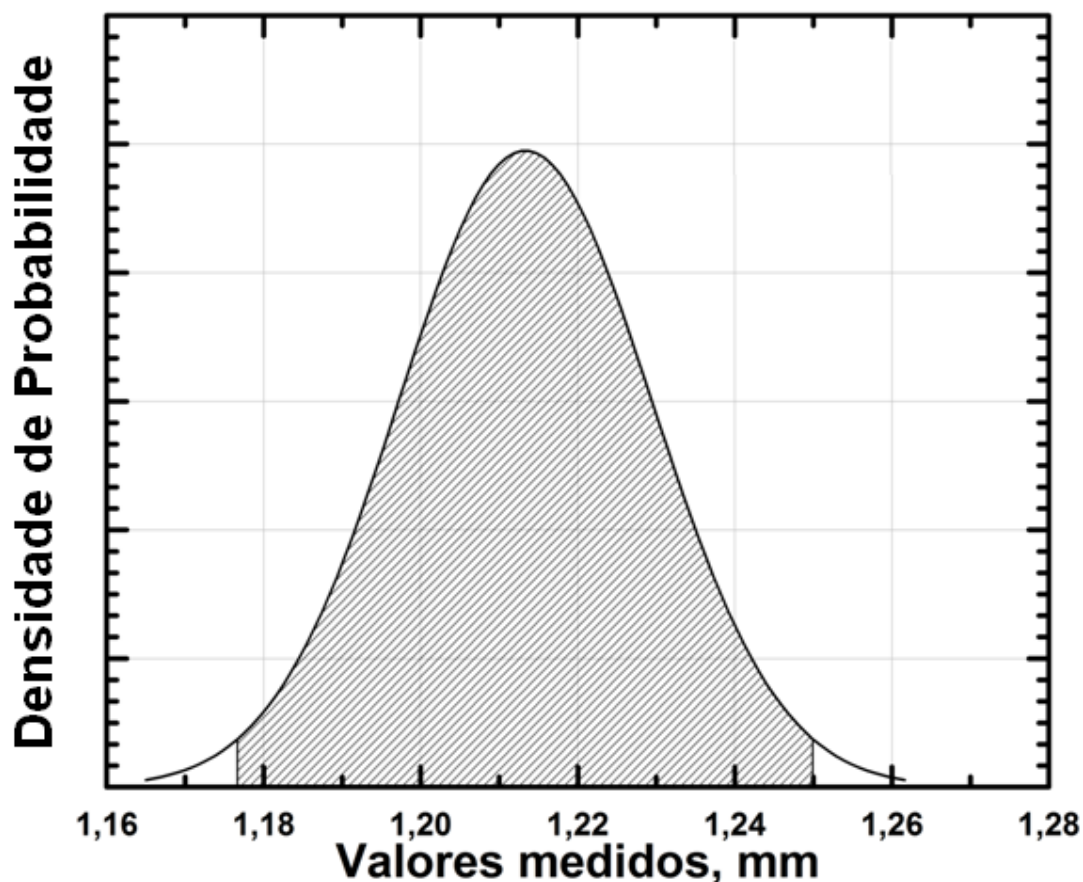
A Tabela 7 apresenta os cálculos estatísticos dos resultados das medições dos círculos gravados por usinagem que estão no Apêndice B. e a Figura 45 o gráfico da distribuição normal (curva gaussiana) das medidas realizadas.

Tabela 7 – Dados estatísticos

Tamanho da amostra	Média ( $\bar{D}$ )	Desvio padrão das medidas $S(D_i)$	Desvio padrão da media $S(\bar{D})$	Coefficiente de student $t_{95\%}$	Incerteza tipo A $I(A)$
342	1,213mm	0,016mm	$8,65 \times 10^{-4}$ mm	1,960	$\pm 0,00169$ mm

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 45 – Gráfico da distribuição normal (curva gaussiana) das medidas realizadas**



Fonte: Elaborado pelo autor

A técnica utilizada com projetor de perfil ampliação 300X com deslocamento manual segundo os eixos coordenados X e Y proporcionou um erro para as medições dos círculos gravados por usinagem de 3,7% em relação a média dos resultados. Esta técnica adotada se mostrou mais eficiente do que a executada por (REIS, 2008).

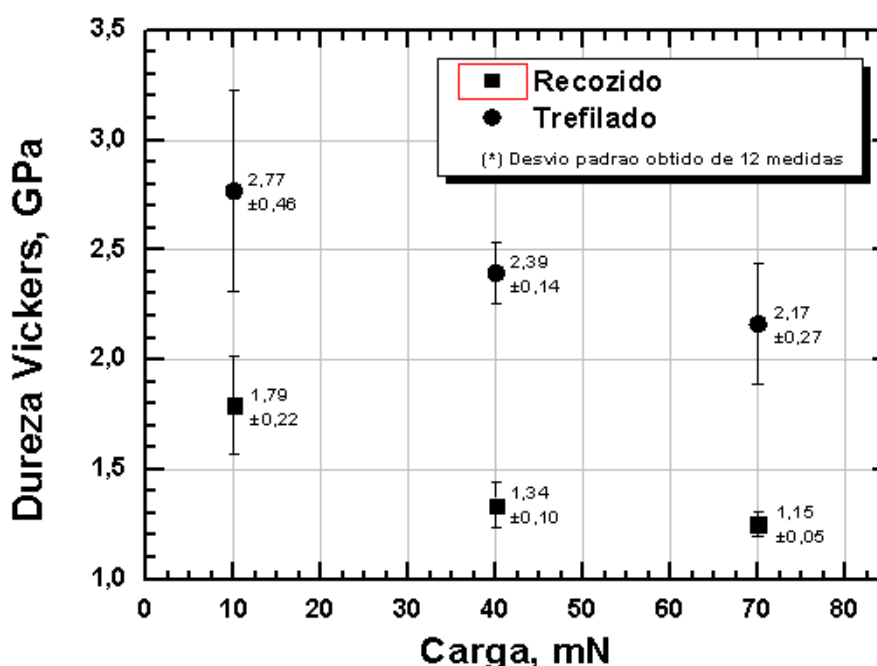
#### **4.4 Avaliação da carga para o ensaio de indentação instrumentada**

As Tabelas apresentadas no Apêndice C mostram os valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada das amostras trefiladas e recozidas onde foram utilizadas as cargas de 10mN, 40mN e 70mN.

Com os valores da média e desvio padrão das amostras trefiladas e recozidas, verificou-se o menor desvio padrão do conjunto de medições realizadas.

As cargas escolhidas após esta verificação foram respectivamente a de 40mN e 70mN para as amostras trefiladas e recozidas. A Figura 46 mostra o gráfico comparativo dos resultados obtidos das amostras trefiladas e recozidas em função da dureza Vickers, carga(mN) e o desvio padrão. Observou-se, também, que os valores das amostras trefiladas foram consistentemente superiores aos valores obtidos pelas amostras recozidas.

**Figura 46 – Gráfico comparativo dureza Vickers (Gpa),carga (mN) e desvio padrão das amostras trefiladas e recozidas**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5 Ensaio de indentação instrumentada nas amostras sem deformação

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada das amostras trefiladas e recozidas não deformadas onde foram utilizada as cargas de 40mN e 70mN respectivamente.

**Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada corpo de prova trefilada carga 40mN**

Nº	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	0,69	0,75	0,92	0,71	13,79	212,80	243,82	5,38	2,56	2,90	2,65
2	40	0,70	0,75	0,93	0,72	13,80	210,78	240,91	5,42	2,54	2,86	2,60
3	40	0,74	0,80	0,93	0,77	15,93	217,53	250,68	5,78	2,22	2,51	2,38
4	40	0,72	0,78	0,93	0,74	15,10	220,58	255,15	5,63	2,34	2,68	2,44
5	40	0,71	0,76	0,92	0,73	14,62	227,13	264,86	5,54	2,42	2,74	2,52
6	40	0,68	0,74	0,91	0,71	13,62	209,55	239,30	5,35	2,60	2,94	2,67
7	40	0,74	0,80	0,93	0,77	15,93	224,49	259,93	5,78	2,22	2,51	2,33
8	40	0,72	0,77	0,93	0,74	14,93	227,66	263,65	5,60	2,39	2,68	2,47
9	40	0,69	0,75	0,92	0,72	14,18	235,30	279,26	5,45	2,49	2,82	2,60
10	40	0,71	0,77	0,93	0,74	14,73	220,17	254,56	5,56	2,41	2,82	2,50
11	40	0,75	0,80	0,93	0,77	15,13	215,22	247,33	5,72	2,19	2,58	2,33
12	40	0,74	0,80	0,93	0,77	15,83	220,49	260,93	5,78	2,22	2,61	2,33
13	40	0,74	0,80	0,93	0,77	15,93	216,53	250,68	5,78	2,22	2,51	2,32
14	40	0,69	0,75	0,92	0,71	13,79	211,80	243,82	5,38	2,56	2,90	2,65
15	40	0,71	0,76	0,92	0,73	14,62	227,13	254,86	5,54	2,42	2,74	2,52
16	40	0,71	0,77	0,93	0,74	14,73	220,17	254,56	5,56	2,41	2,72	2,50
17	40	0,70	0,75	0,93	0,72	14,00	210,78	240,91	5,42	2,53	2,86	2,60
18	40	0,69	0,75	0,92	0,72	14,18	236,30	280,16	5,45	2,49	2,82	2,60
19	40	0,74	0,80	0,93	0,77	15,73	217,53	250,68	5,78	2,32	2,51	2,34
20	40	0,74	0,80	0,93	0,77	15,83	224,49	260,93	5,78	2,22	2,51	2,33
<b>media</b>	<b>40</b>	<b>0,71</b>	<b>0,77</b>	<b>0,93</b>	<b>0,74</b>	<b>14,81</b>	<b>220,30</b>	<b>254,86</b>	<b>5,57</b>	<b>2,39</b>	<b>2,71</b>	<b>2,49</b>
<b>desvio coefvar</b>	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,89</b>	<b>8,37</b>	<b>12,37</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,16</b>	<b>0,13</b>
<b>[%]</b>	<b>0</b>	<b>3,30</b>	<b>2,77</b>	<b>0,66</b>	<b>3,05</b>	<b>6,01</b>	<b>3,80</b>	<b>4,86</b>	<b>3,00</b>	<b>5,95</b>	<b>5,95</b>	<b>5,39</b>

Fonte: Elaborada pelo autor

**Tabela 9 – Valores obtidos no ensaio de indentação instrumentada corpo de prova recozido carga 70mN**

N°	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	1,34	1,41	0,96	1,38	50,12	189,78	215,34	10,15	1,23	1,40	1,33
2	70	1,32	1,39	0,95	1,35	48,30	180,12	198,48	10,17	1,28	1,45	1,37
3	70	1,33	1,39	0,96	1,36	48,88	191,54	213,93	10,13	1,27	1,43	1,36
4	70	1,30	1,36	0,95	1,36	48,74	194,35	217,79	9,90	1,32	1,50	1,42
5	70	1,30	1,36	0,95	1,33	47,74	184,35	217,79	9,90	1,32	1,50	1,42
6	70	1,32	1,38	0,95	1,35	47,58	183,93	203,58	9,99	1,30	1,47	1,39
7	70	1,33	1,39	0,96	1,36	48,98	191,54	213,93	10,13	1,27	1,43	1,36
8	70	1,34	1,41	0,96	1,38	50,12	189,78	215,34	10,25	1,23	1,40	1,33
9	70	1,34	1,41	0,96	1,37	49,96	193,02	215,97	10,24	1,24	1,40	1,34
10	70	1,40	1,46	0,96	1,43	53,87	191,96	214,50	10,63	1,15	1,30	1,24
11	70	1,35	1,41	0,96	1,38	50,12	191,78	215,34	10,15	1,23	1,40	1,33
12	70	1,33	1,39	0,96	1,39	48,87	193,95	204,18	10,13	1,27	1,43	1,37
13	70	1,33	1,38	0,96	1,34	47,57	189,66	211,35	9,99	1,30	1,47	1,40
14	70	1,30	1,36	0,95	1,34	48,74	189,35	208,79	9,90	1,32	1,50	1,42
15	70	1,36	1,43	0,96	1,39	51,24	184,95	205,96	10,37	1,21	1,37	1,30
16	70	1,38	1,44	0,96	1,40	52,06	182,45	201,60	10,45	1,19	1,34	1,28
17	70	1,33	1,39	0,96	1,36	48,88	190,54	213,93	10,13	1,27	1,43	1,36
18	70	1,34	1,41	0,96	1,38	50,12	195,78	215,34	10,19	1,23	1,40	1,33
19	70	1,30	1,36	0,95	1,33	48,74	192,35	217,79	9,90	1,32	1,50	1,42
20	70	1,34	1,41	0,96	1,38	50,12	199,78	215,34	10,25	1,23	1,40	1,33
<b>media</b>	<b>70</b>	<b>1,34</b>	<b>1,40</b>	<b>0,96</b>	<b>1,37</b>	<b>49,56</b>	<b>190,06</b>	<b>211,97</b>	<b>10,19</b>	<b>1,25</b>	<b>1,41</b>	<b>1,35</b>
<b>desvio</b>	<b>0</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>2,16</b>	<b>6,54</b>	<b>8,93</b>	<b>0,22</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>
<b>coefvar</b>												
<b>[%]</b>	<b>0</b>	<b>2,28</b>	<b>2,11</b>	<b>0,19</b>	<b>2,22</b>	<b>4,35</b>	<b>3,44</b>	<b>4,21</b>	<b>2,16</b>	<b>4,25</b>	<b>4,25</b>	<b>4,05</b>

Fonte: Elaborada pelo autor

No Apêndice D são apresentados os valores de dureza obtidos no ensaio de indentação instrumentada corpo de prova recozido carga 70mN e corpo de prova trefilado carga de 40mN para os corpos de prova deformados a 0°15°,20° 30° e 45°.

#### 4.6 Ensaio de microdureza nas amostras sem deformação

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos no ensaio microdureza nas amostras trefilada e recozida não deformadas onde foi utilizada a carga de 50 gramas em cada ensaio. Durante o ensaio foi percebido a formação de pile-up nas amostras trefiladas e recozidas.

**Tabela 10 – Resultado de Microdureza – Amostra Trefilada e recozida não deformadas - Carga 50 Gramas**

Pontos Medidos	Dureza (HV) (Kgf/mm <sup>2</sup> ) Trefilada	Dureza (HV) (Kgf/mm <sup>2</sup> ) Recozida
1	269,1	140,2
2	249,4	139,1
3	240,4	135,2
4	250,7	138,6
5	226,4	136,8
6	224,4	133,9
7	255,1	137,5
8	247,4	139,6
9	238,6	138,4
10	250,1	137,2
11	243,6	137,8
12	228,9	136,9
13	231,8	136,7
14	226,9	138,2
15	252,6	137,4
16	238,9	136,5
17	245,7	137,3
18	251,7	137,3
19	249,6	138,7
20	237,8	139,6
Média	242,9	137,6
Desvap	11,16	1,47

Fonte: Elaborada pelo autor

Percebeu-se que corpo de prova trefilado apresentou dureza média de 76,5% maior que a dureza média do corpo de prova recozido, e o valor do desvio padrão obtido das medidas mostra a não homogeneidade do material trefilado.

No Apêndice E é apresentado os valores e gráficos comparativos da microdureza no sentido radial e no comprimento, obtidos nos ensaios dos corpos de prova deformados recozidos e trefilados a 0°15°, 20° 30° e 45°.

#### 4.7 Curva tensão versus deformação obtida pelo ensaio de indentação

As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados do coeficiente de encruamento, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e dureza fornecidos pelo algoritmo inverso para os corpos de prova trefilado e recozido respectivamente, com a condição de formação de pile-up (PULECIO, 2010).

**Tabela 11 – Resultados do algoritmo inverso corpo de prova trefilado sem deformação**

Existência de pile-up nas indentações							
N°	n	E[GPa]	std(E)	Y [GPa]	std(Y)	HP[GPa]	std(HP)
1	0,00	229,74	21,65	0,86	0,19	1,79	0,24
2	0,05	236,72	22,92	0,77	0,17	1,87	0,24
3	0,13	250,73	25,44	0,40	0,14	2,04	0,24
4	0,20	257,69	26,65	0,39	0,12	2,13	0,24
5	0,25	264,66	27,85	0,38	0,11	2,22	0,25
6	0,27	267,48	28,32	0,37	0,10	2,25	0,25

Fonte: Elaborada pelo autor

**Tabela 12 – Resultados do algoritmo inverso corpo de prova recozido sem deformação**

Existência de pile-up nas indentações							
N°	n	E[GPa]	std(E)	Y [GPa]	std(Y)	HP[GPa]	std(HP)
1	0,00	157,63	8,32	0,36	0,03	0,98	0,05
2	0,05	163,20	8,65	0,32	0,03	1,04	0,05
3	0,10	168,69	8,99	0,27	0,03	1,10	0,05
4	0,15	174,05	9,32	0,23	0,02	1,16	0,05
5	0,20	179,26	9,65	0,19	0,02	1,21	0,06
6	0,25	184,36	9,97	0,15	0,02	1,27	0,06
7	0,32	191,18	10,41	0,10	0,01	1,35	0,06

Fonte: Elaborada pelo autor

Após análise de todas as soluções propostas pelo algoritmo inverso foi adotado como critério de escolha a solução que apresentou o valor do coeficiente de encruamento mais próximo ao valor do coeficiente de encruamento obtido na modelagem das curvas tensão versus deformação.

As soluções n°3 (Tabela 11) e 7 (Tabela 12) para os corpos de prova trefilado e recozido respectivamente foram escolhidas.

Para a determinação das equações de Hollomon obtidas pelos ensaios de indentações instrumentada (EII) foram utilizados 3 procedimentos A\*, B\* e C\*.

No procedimento A\* foram utilizados dados das soluções escolhidas nas Tabelas 11 e 12 referentes ao ponto de escoamento dos corpos de prova trefilados e recozidos respectivamente e foram mantidos os coeficientes de encruamento encontrados para as soluções escolhidas dos corpos de prova trefilados e recozidos. Foram utilizadas as equações (64), (65), (66) e (67).

$$\bar{e}_1 = 0,2\% \quad (64)$$

$$\varepsilon_{v1} = \ln(1 + \bar{e}_1) \quad (65)$$

$$\sigma_{v1} = Y (1 + \bar{e}_1) \quad (66)$$

$$\ln(\sigma_{v1}) = \ln(k') + \bar{n} * \ln(\varepsilon_{v1}) \quad (67)$$

onde:  $\bar{e}_1$  é a deformação de engenharia no início do escoamento (EII)

$\varepsilon_{v1}$  é o valor da deformação verdadeira no ponto de escoamento (EII);

Y é valor do limite de escoamento (EII);

$\sigma_{v1}$  é o valor tensão verdadeira no ponto de escoamento (EII);

$\bar{n}$  é o valor do coeficiente de encruamento (EII);

$k'$  é o valor do coeficiente de resistência da equação Hollomon obtida no ponto de escoamento.

No procedimento B\* foram utilizados somente dados das soluções escolhidas nas Tabelas 11 e 12 referente ao ponto de carga máxima dos corpos de prova trefilados e recozidos respectivamente. Foram utilizadas as equações (68),(69),(70), (71),(72) e (73).

$$HV = \frac{HP}{1,131244} \quad (68)$$

$$\sigma_r = \frac{HV}{3} \quad (69)$$

$$\varepsilon_{v2} = \bar{n} \quad (70)$$

$$\varepsilon_{v2} = \ln(1 + \bar{e}_2) \quad (71)$$

$$\sigma_{v2} = \sigma_r (1 + \bar{e}_2) \quad (72)$$

$$\ln(\sigma_{v2}) = \ln(k'') + \bar{n} \ln(\varepsilon_{v2}) \quad (73)$$

onde:  $HP$  é a dureza com a correção (EII) (PULECIO, 2010);

$HV$  é a dureza Vickers (EII);

$\sigma_r$  é valor do limite de resistência no ponto de carga máxima (EII);

$\varepsilon_{v2}$  é o valor da deformação verdadeira no ponto de carga máxima (EII);

$\bar{n}$  é o valor do coeficiente de encruamento (EII);

$\bar{e}_2$  é o valor da deformação de engenharia na carga máxima (EII);

$\sigma_{v2}$  é o valor tensão verdadeira no ponto de carga máxima (EII);

$k''$  é o valor do coeficiente de resistência da equação Hollomom obtida no ponto de carga máxima.

No procedimento C\* foram utilizados dados das soluções escolhidas nas Tabelas 11 e 12 referentes ao ponto de escoamento e ponto de carga máxima dos corpos de prova recozidos e trefilados respectivamente. Foram utilizadas as equações (64),(65) e (66) para determinar o par ordenado  $\ln(\sigma_{v1})$  e  $\ln(\varepsilon_{v1})$  referente ao ponto de escoamento e as equações (68), (69),(70),(71) e (72) para determinar o par ordenado  $\ln(\sigma_{v2})$  e  $\ln(\varepsilon_{v2})$  referente ao ponto de carga máxima

O coeficiente de resistência  $k'''$  e o coeficiente de encruamento  $\bar{n}_{1.2}$  foram calculados pela disposição dos pares ordenados da região plástica em um gráfico da Equação (74) linearizada

$$\sigma_{v1.2} = k''' (\varepsilon_{v1.2})^{\bar{n}_{1.2}} \quad (74)$$

Na Tabela 13 apresentam-se as equações de Hollomon obtidas com os 3 procedimentos A\*, B\* e C\* adotados.

**Tabela 13 – Equações de Hollomon procedimentos A\*, B\* e C\***

Localização	Equação de Hollomon corpo de prova trefilado (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Equação de Hollomon corpo de prova Recozido (Kgf/mm <sup>2</sup> )
Ponto de escoamento	$\sigma_{v1} = 89,91 * (\varepsilon_{v1})^{0,13}$	$\sigma_{v1} = 73,22 * (\varepsilon_{v1})^{0,32}$
Ponto de carga máxima	$\sigma_{v2} = 89,24 * (\varepsilon_{v2})^{0,13}$	$\sigma_{v2} = 78,88 * (\varepsilon_{v2})^{0,32}$
Pontos escoamento e carga máxima	$\sigma_{v1.2} = 88,93 * (\varepsilon_{v1.2})^{0,1283}$	$\sigma_{v1.2} = 80,23 * (\varepsilon_{v1.2})^{0,3347}$

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cálculo do erro médio ( $E_{mCEII}$ ) obtido entre a expressão modelada tensão efetiva em função da deformação efetiva obtida no ensaio de indentação instrumenta e as curvas tensão versus deformação engenharia obtida experimentalmente foi utilizado a Equação (75).

$$E_{mCEII} = \frac{\sum_{1}^{n1} \left( \frac{(\bar{\sigma}_c modEII - \sigma_c exp)}{\bar{\sigma}_c modEII} \right)}{n1} \quad (75)$$

onde:  $n1$  é número de pontos selecionados entre a deformação de escoamento e deformação correspondente a carga máxima em cada curva experimental. Para o material trefilado e recozido foram obtidos 4 e 7 pontos respectivamente.

$(\bar{\sigma}_c modEII)$  é a tensão de engenharia modelada a partir de cada curva de Hollomon obtida no ensaio de indentação instrumentada (EII).

$(\sigma_c \text{ exp})$  é a tensão engenharia experimental obtida em cada um dos ensaios no intervalo entre a deformação de escoamento e a deformação correspondente a carga máxima.

O erro total médio ( $E_{TMEII}$ ) obtido na modelagem pode ser calculado pela equação (76):

$$E_{TMEII} = \frac{\sum E_{mcEII}}{4} \quad (76)$$

A Tabela 14 apresenta o erro total médio obtido para cada expressão, entre a expressão modelada resultante (tensão efetiva em função da deformação efetiva) obtida pelo ensaio de indentação instrumentada (EII) de acordo com os procedimentos A\*, B\* e C\* e as curvas tensão versus deformação engenharia obtido experimentalmente.

**Tabela 14 – Erro total médio tensão de engenharia (EII) em relação a tensão de engenharia ensaio tração**

Nº	Curva	Ensaio	Material	Procedimento	Erro Total Médio (%)	Desvio Padrão dos erros
Nº1	$\sigma_{v1} = 89,91 * (\varepsilon_{v1})^{0,13}$	EII	Trefilado	A*	1,78	2,04
Nº2	$\sigma_{v2} = 89,24 * (\varepsilon_{v2})^{0,13}$	EII	Trefilado	B*	1,60	0,93
Nº3	$\sigma_{v1.2} = 88,93 * (\varepsilon_{v1.2})^{0,128}$	EII	Trefilado	C*	2,04	1,12
Nº4	$\sigma_{v1} = 73,22 * (\varepsilon_{v1})^{0,32}$	EII	Recozido	A*	2,86	0,70
Nº5	$\sigma_{v2} = 78,88 * (\varepsilon_{v2})^{0,32}$	EII	Recozido	B*	5,75	1,50
Nº6	$\sigma_{v1.2} = 80,23 * (\varepsilon_{v1.2})^{0,3347}$	EII	Recozido	C*	4,68	1,15

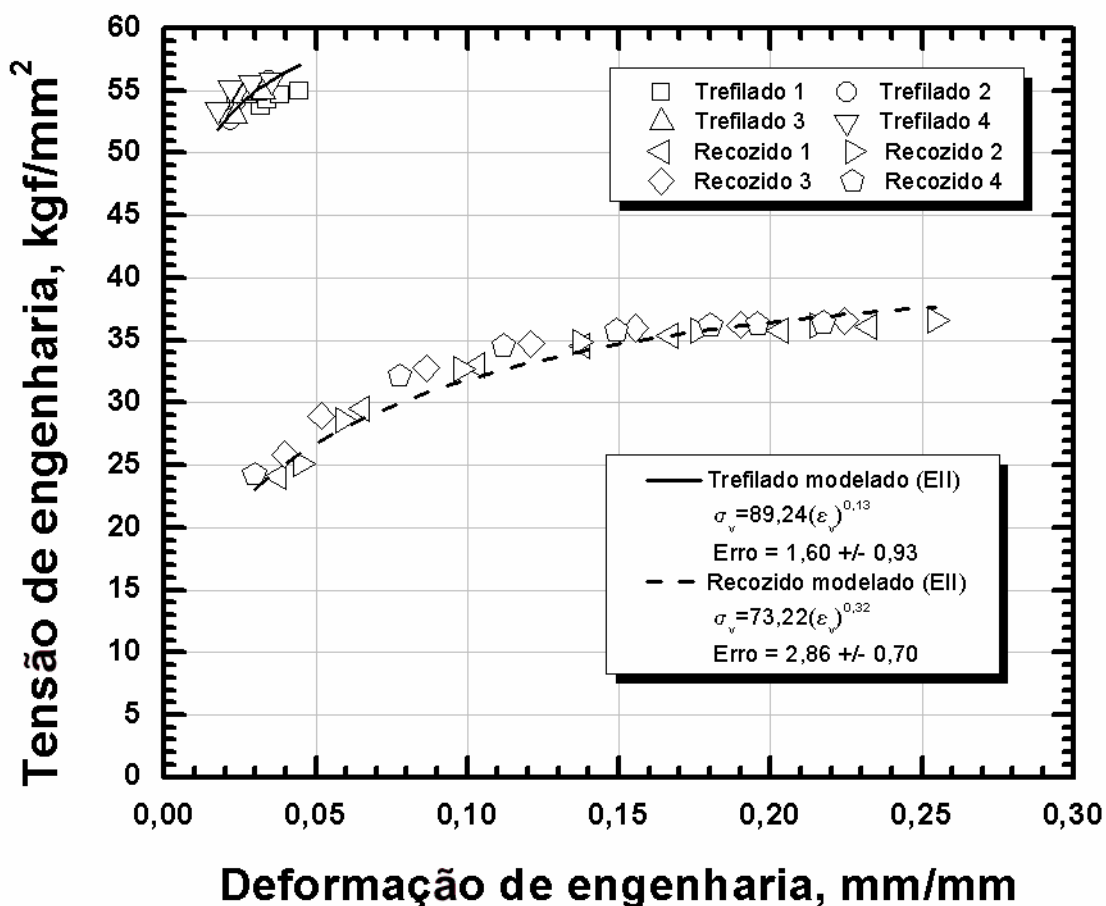
Fonte : Elaborado pelo autor

As expressões modeladas (EII) escolhidas para o material trefilado e o recozido foram as que apresentaram menor erro total médio e menor desvio padrão dos erros.

A Figura 47 apresenta o gráfico comparativo entre as 4 curvas tensão deformação de engenharia experimental e a modelada dos ensaios trefilados e recozidos obtidos por ensaio de indentação instrumentada, e o erro total médio, obtido entre a expressão modelada escolhida (tensão efetiva em função da

deformação efetiva) e as curvas tensão versus deformação engenharia obtido experimentalmente.

**Figura 47 – Gráfico comparativo entre as tensões versus deformações de engenharia experimental e a modelada por EII com os seus respectivos erros**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.8 Resultados extrusão indireta dos corpos-de-prova em prensa hidráulica

As Tabelas 15 e 16 apresentam os valores de carga e deslocamento dos punções após a extrusão indireta dos corpos de prova trefilado e recozido respectivamente.

**Tabela 15 – Carga e deslocamento do punção na extrusão indireta dos corpos de prova trefilados**

Ensaio	Inclinação (graus)	Curso (mm)	Carga (tons)
1ª Peça	0	19	26
2ª Peça	0	19	26
1ª Peça	15	19	26
2ª Peça	15	19	26
1ª Peça	20	19	26
2ª Peça	20	19	26
1ª Peça	30	19	28
2ª Peça	30	19	28
1ª Peça	45	19	26
2ª Peça	45	19	26

Fonte: Elaborada pelo autor

**Tabela 16 – Carga e deslocamento do punção na extrusão indireta dos corpos de prova recozidos**

Ensaio	Inclinação (graus)	Curso (mm)	Carga (tons)
1ª Peça	0	19	23
2ª Peça	0	19	23
1ª Peça	15	19	23
2ª Peça	15	19	23
1ª Peça	20	19	23
2ª Peça	20	19	23
1ª Peça	30	19	25
2ª Peça	30	19	25
1ª Peça	45	19	23
2ª Peça	45	19	23

Fonte: Elaborada pelo autor

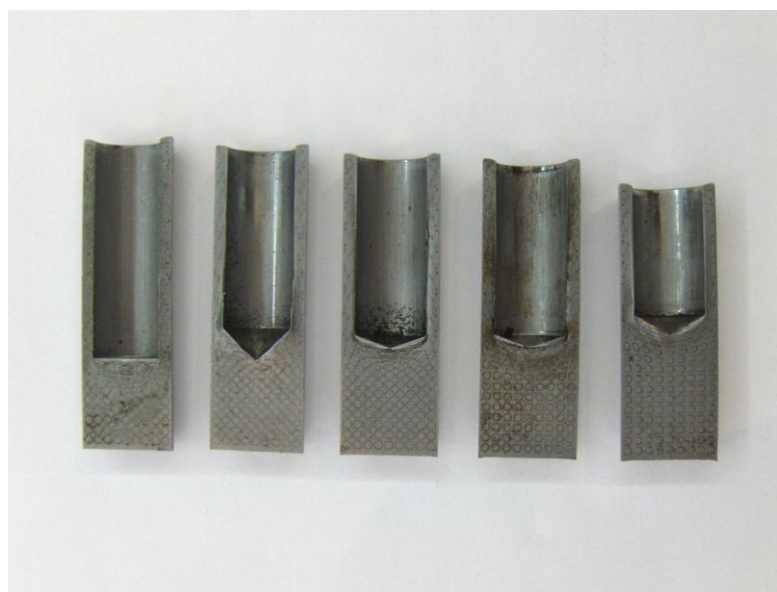
Observa-se que as Tabelas 7 e 8 mostram os valores de carga idênticos nos dois ensaios o que revela a baixa sensibilidade do manômetro na distinção dos valores de carga obtidos. Vale lembrar que a menor divisão da escala do manômetro é de 1,0 tonelada.

As Figuras 48(a) e (b) apresentam as fotografias dos corpos de prova extrudados nas inclinações com (0,15,20,30 e 45) graus no estado recozido e no estado trefilado respectivamente.

**Figura 48 (a) e (b) – Corpos de prova extrudados no estado recozido e trefilado respectivamente**



(a) Recozidas



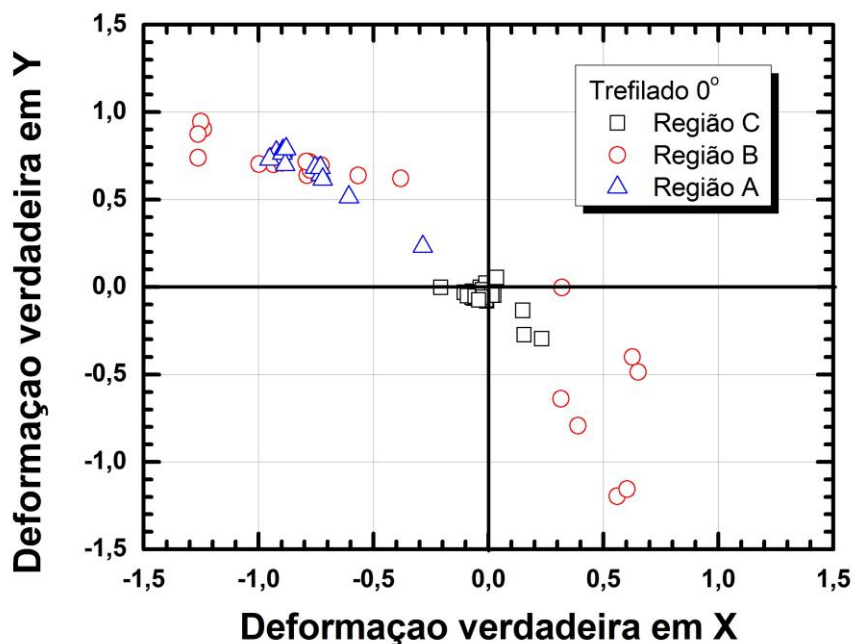
(b) Trefiladas

Fonte: Fotos do autor

#### **4.9 Resultados determinação das deformações**

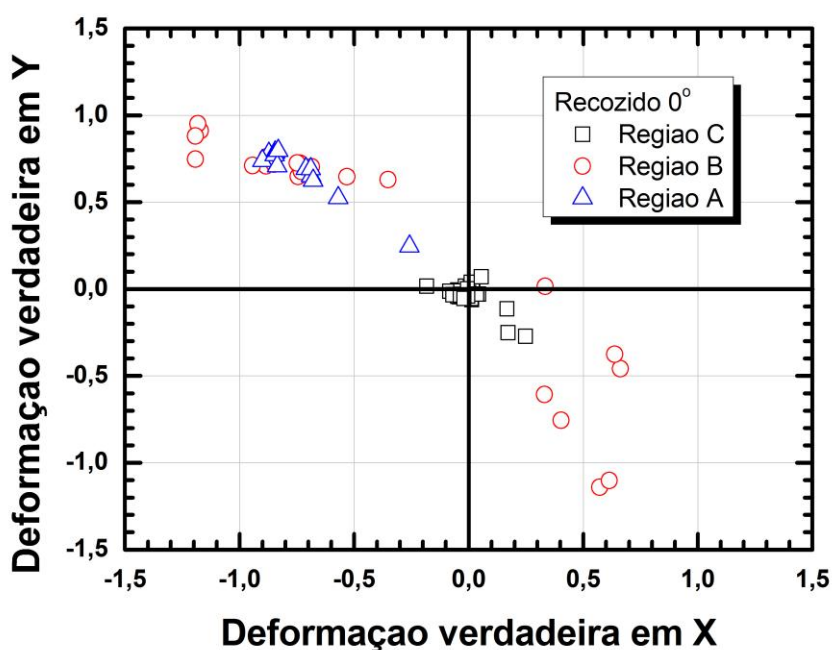
As Figuras 49 e 50 apresentam os gráficos das deformações nas regiões A,B e C (Figura 32) nos corpos de prova trefilado e recozido a 0° respectivamente.

Figura 49 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 0°



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 50 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova recozido 0°



Fonte: Elaborado pelo autor

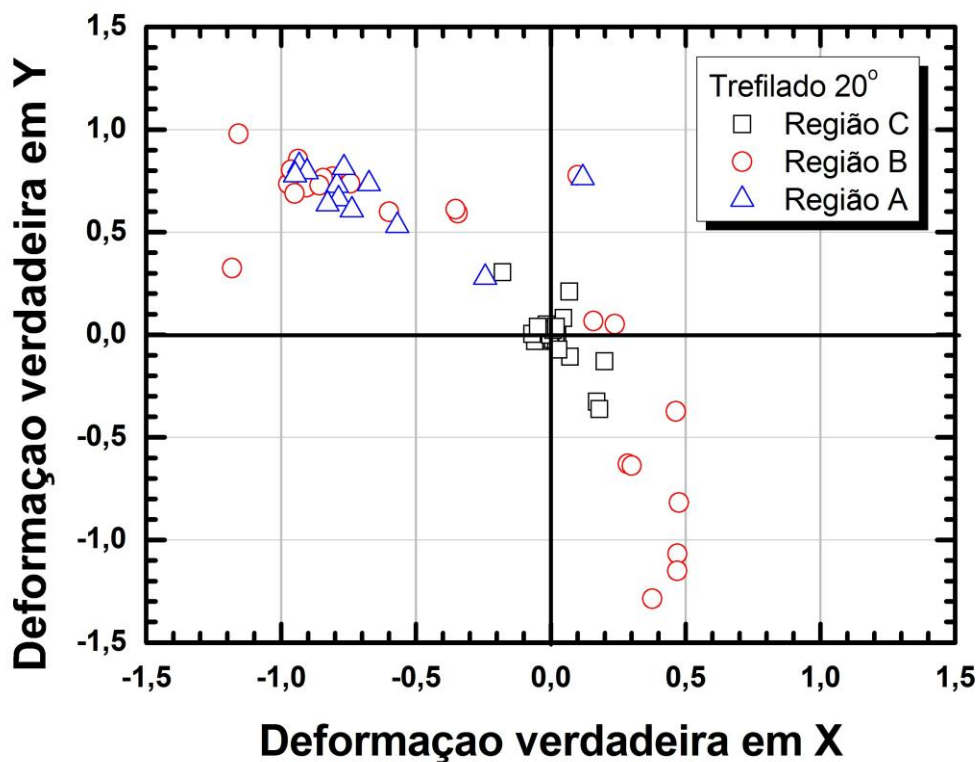
Na região C, as deformações obtidas foram praticamente inexistentes em razão da elevada distância do ponto final de atuação do punção. Esta elevada distância não permitiu o fluxo do material no sentido contrário a descida do final de curso do punção.

Na região B, houve deformações trativas e compressivas ao longo das direções X e Y. Esta região está localizada abaixo da linha de ação do punção, evidenciando deformações compressivas devido a ação da matriz e deformações trativas devido ao fluxo de material contrário ao movimento de descida do punção.

Na região A, ocorreram deformações preponderantemente trativas devido ao fluxo do material ser contrário ao deslocamento do punção.

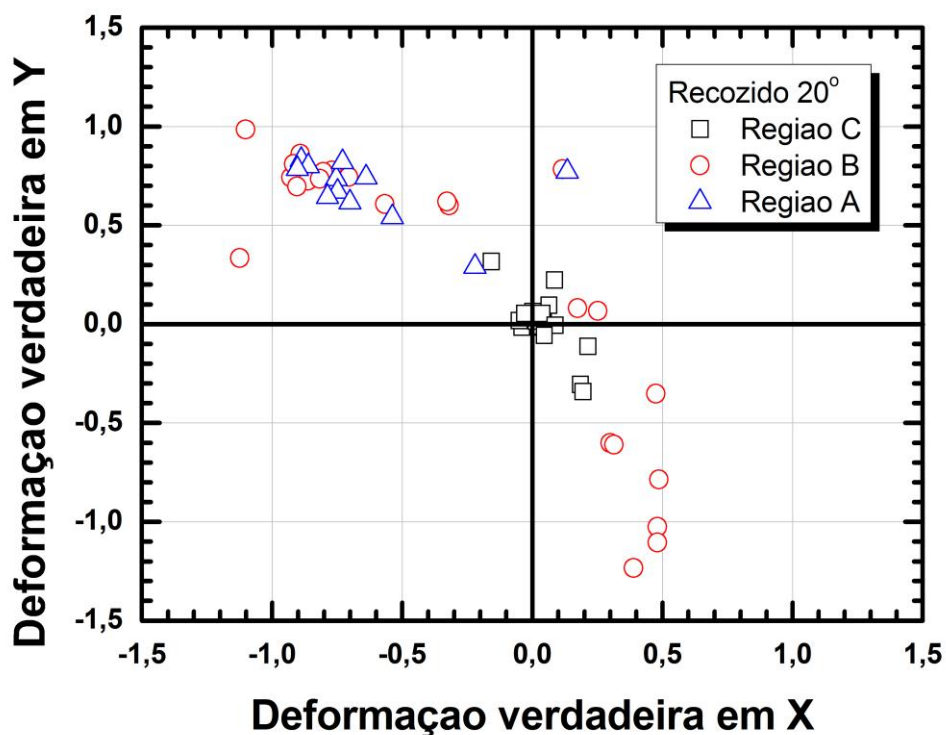
Ao variar o ângulo do punção de 0 até 30 graus (15°, 20 e 30) observou-se variação no perfil de deformação nas direções x e y. As figuras 51 e 52 mostram o perfil de deformação nas regiões A, B e C obtidas com o punção de 20 graus das amostras trefiladas e recozidas respectivamente.

**Figura 51 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 20°**



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 52 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 20<sup>0</sup>

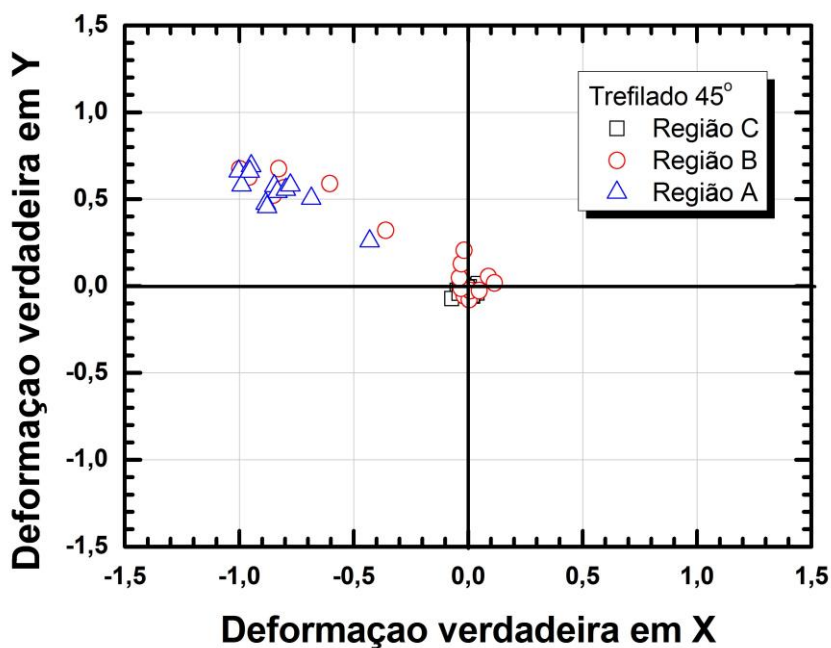


Fonte: Elaborado pelo autor

No Apêndice F é apresentado os perfis de deformações para os punções 15° e 30° no estado trefilado e recozido.

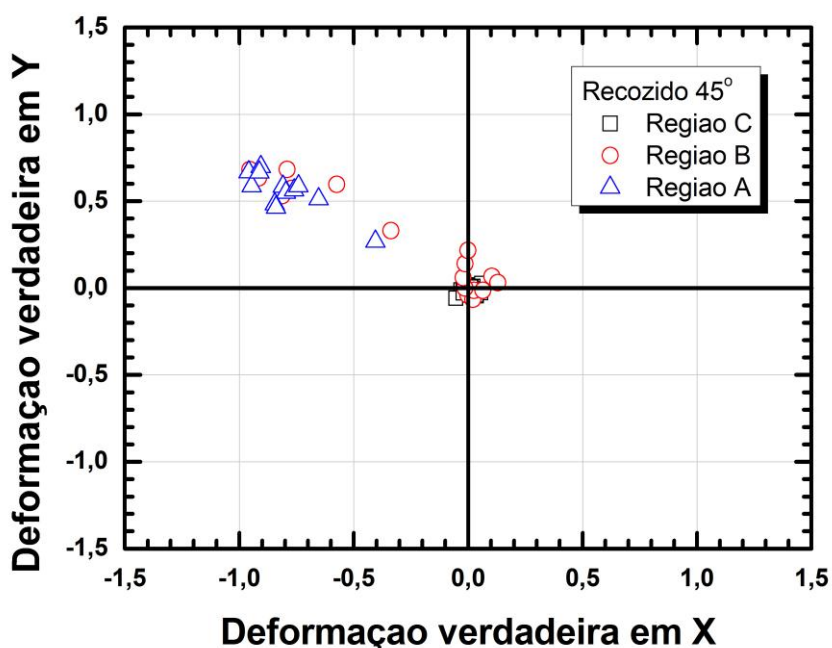
As Figuras 53 e 54 mostram o perfil de deformação nas regiões A, B e C obtidas com o punção de 45 graus nas amostras trefiladas e recozidas respectivamente.

Figura 53 – Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova trefilado 45°



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 54: Deformações nas regiões (A, B, C) corpo de prova recozido 45°



Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se que o perfil de deformação na região B foi diferente em comparação aos perfis obtidos para ângulos no intervalo de 0° a 30°.

Com o intuito de quantificar a distribuição de deformações segundo a direção dos eixos x e y avaliou-se a distribuição das deformações nas regiões A,B e C nas

diferentes inclinações dos punções nos corpos de prova extrudados recozidos e trefilados. Foram estabelecidas as hipóteses conforme as equações (77) e (78)

$$H_0: \bar{x}_x = \bar{x}_y \quad (77)$$

$$H_1: \bar{x}_x \neq \bar{x}_y \quad (78)$$

onde:  $\bar{x}_x$  é a média da população x

$\bar{x}_y$  é a média da população y

Foi utilizada a distribuição de Student, com o desvio padrão calculado pela equação (79)

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{(n_x - 1) * s^2(x) + (n_y - 1) * s^2(y)}{n_x + n_y - 2}} \quad (79)$$

onde:  $n_x$  é o tamanho da população x

$n_y$  é o tamanho da população y

$s^2(x)$  é a estimativa amostral da população x

$s^2(y)$  é a estimativa amostral da população y

$\bar{s}$  é o desvio padrão obtido para as populações x e y

A variável (*Stat t*) amostral foi obtida pela equação (80)

$$Stat\ t = \frac{\bar{x}_x - \bar{x}_y}{s * \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}} \quad (80)$$

As hipóteses dadas pelas equações (75) e (76) foram verificadas pela análise do valor de ( $t_{\alpha/2} = t$  crítico bi-caudal) com a variável (*Stat t*) amostral obtida pela equação (80).

O valor de  $(t_{\alpha/2})$  foi obtido em tabela estatística para a distribuição de Student, com graus de liberdade ( $gl$ ) dado equação (81)

$$gl = \text{menor valor de } (n_x \text{ ou } n_y) - 1 \quad (81)$$

A Tabela 17 apresenta os valores estatísticos obtidos na distribuição de deformação nas regiões A, B e C segundo a direção dos eixos X e Y para o punção com inclinação de 20°. Somente as regiões AB apresentaram a mesma media, ou seja, o mesmo perfil de distribuição de deformações nas direções X e Y.

**Tabela 17 – Valores estatísticos obtidos na distribuição de deformação nas regiões A,B e C segundo a direção dos eixos X e Y para o punção com inclinação de 20°.**

(continua)

RECOZIDO 20°		
Deformação na Direção X Região C B - RECOZIDO 20°		
Teste-t: Duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	C	B
Média	0,043744414	0,610948
Variância	0,003277426	0,087535
Observações	35	25
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	25	
Stat t	-9,459929861	
P(T<=t) uni-caudal	4,85675E-10	
t crítico uni-caudal	1,708140745	
P(T<=t) bi-caudal	9,71351E-10	
t crítico bi-caudal	2,059538536	REJEITADO
Deformação na Direção X Região B A - RECOZIDO 20°		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	B	A
Média	0,610947677	0,658527
Variância	0,087534543	0,061385
Observações	25	12
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	26	
Stat t	-0,512560553	
P(T<=t) uni-caudal	0,306292983	
t crítico uni-caudal	1,705617901	
P(T<=t) bi-caudal	0,612585966	
t crítico bi-caudal	2,055529418	ACEITÁVEL

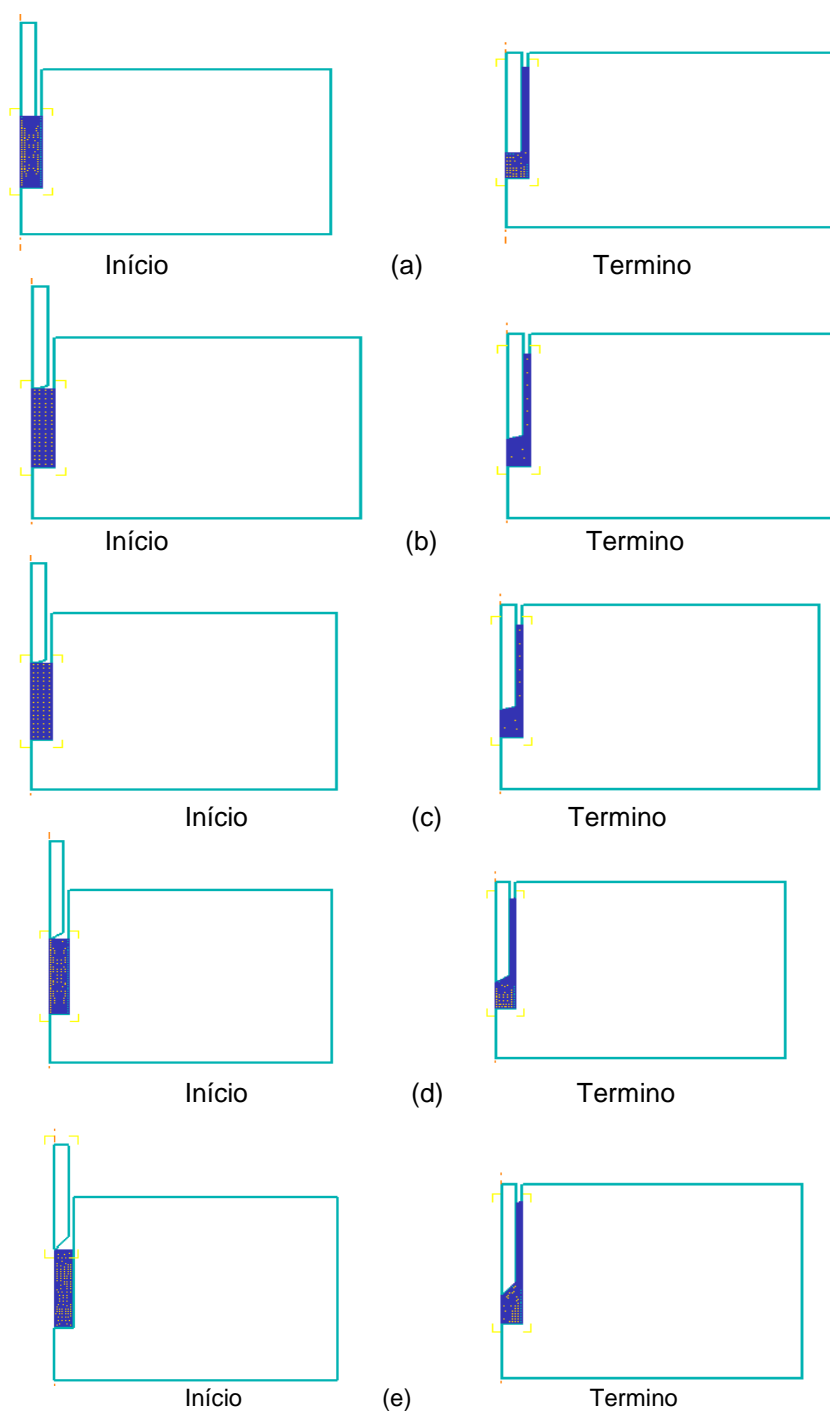
(conclusão)		
Deformação na Direção X Região C A - RECOZIDO 20°		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	C	A
Média	0,043744414	0,658527
Variância	0,003277426	0,061385
Observações	35	12
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	11	
Stat t	-8,518068684	
P(T<=t) uni-caudal	1,78979E-06	
t crítico uni-caudal	1,795884814	
P(T<=t) bi-caudal	3,57959E-06	
t crítico bi-caudal	2,200985159	REJEITADO
Deformação na Direção Y Região C B - RECOZIDO 20°		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	C	B
Média	0,063487669	0,696171
Variância	0,008038259	0,074575
Observações	35	25
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	28	
Stat t	-11,16228602	
P(T<=t) uni-caudal	4,02586E-12	
t crítico uni-caudal	1,701130908	
P(T<=t) bi-caudal	8,05171E-12	
t crítico bi-caudal	2,048407115	REJEITADO
Deformação na Direção Y Região B A - RECOZIDO 20°		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	B	A
Média	0,696170608	0,687361
Variância	0,074575106	0,023565
Observações	25	12
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	34	
Stat t	0,12525535	
P(T<=t) uni-caudal	0,450529547	
t crítico uni-caudal	1,690924198	
P(T<=t) bi-caudal	0,901059094	
t crítico bi-caudal	2,032244498	ACEITÁVEL
Deformação na Direção Y Região C A - RECOZIDO 20°		
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes		
	C	A
Média	0,063487669	0,687361
Variância	0,008038259	0,023565
Observações	35	12
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	14	
Stat t	-13,32103127	
P(T<=t) uni-caudal	1,21054E-09	
t crítico uni-caudal	1,761310115	
P(T<=t) bi-caudal	2,42108E-09	
t crítico bi-caudal	2,144786681	REJEITADO

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.10 Resultados simulação numérica

A Figura 55 mostra as geometrias das matrizes, dos corpos de prova e dos punções (0,15,20 ,30 e 45°) no passo inicial e final de cada simulação do primeiro estágio de deformação.

**Figura 55 – (a) Punção 0°; (b) Punção 15°; (c) Punção 20°; (d) Punção 30°; (e) Punção 45°**

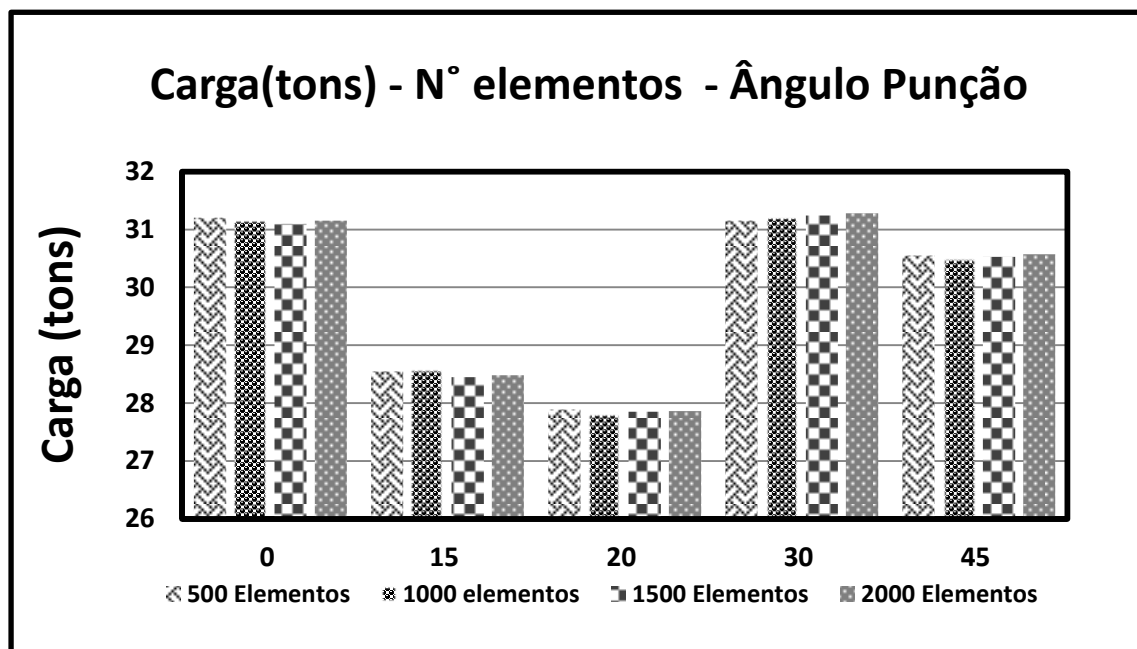


Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os punções tiveram o mesmo curso de deslocamento de 19mm independentemente do ângulo.

As malhas com 170, 300, 500,1000,1500 e 2000 elementos foram avaliadas inicialmente nas simulações. As malhas com 170 e 300 elementos não apresentaram convergência nos resultados referentes aos valores de carga na extrusão invertida. A Figura 56 apresenta os valores de carga em função do número de elementos da malha e ângulo do punção em que houve convergência nos valores de carga.

**Figura 56: Cargas(tons), malhas e ângulos dos punções**

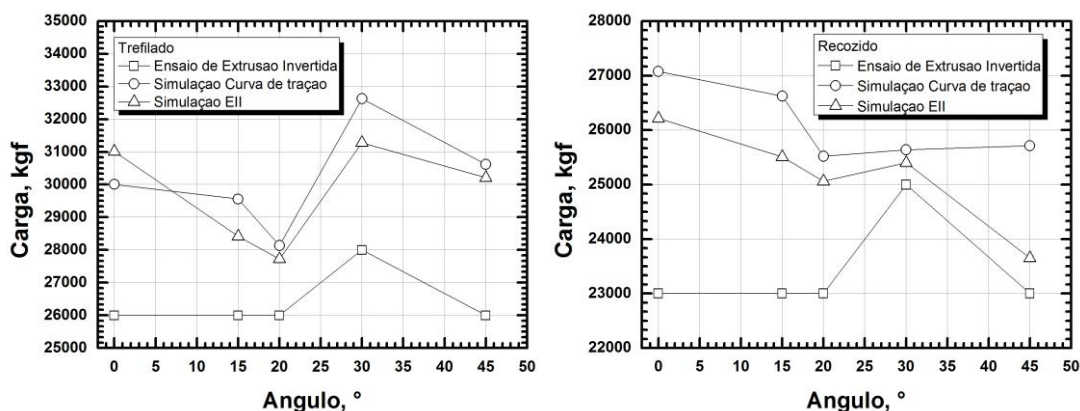


Fonte: Elaborado pelo autor

Pode se observar que a menor carga se deu nas simulações com o ângulo do punção de 20°. A malha com 500 elementos foi escolhida para as simulações devido ter ocorrido convergência nos resultados e menor tempo de processamento.

As Figuras 57 (a) e (b) apresentam o comportamento dos valores de carga (Kgf) em função do ângulo do punção para os materiais trefilados e recozidos obtidos por modelagem numérica e experimentalmente. Nas simulações numéricas utilizou-se a curva obtida por ensaio de tração e indentação.

**Figura 57 – Valores de carga (Kgf) em função do ângulo do punção**



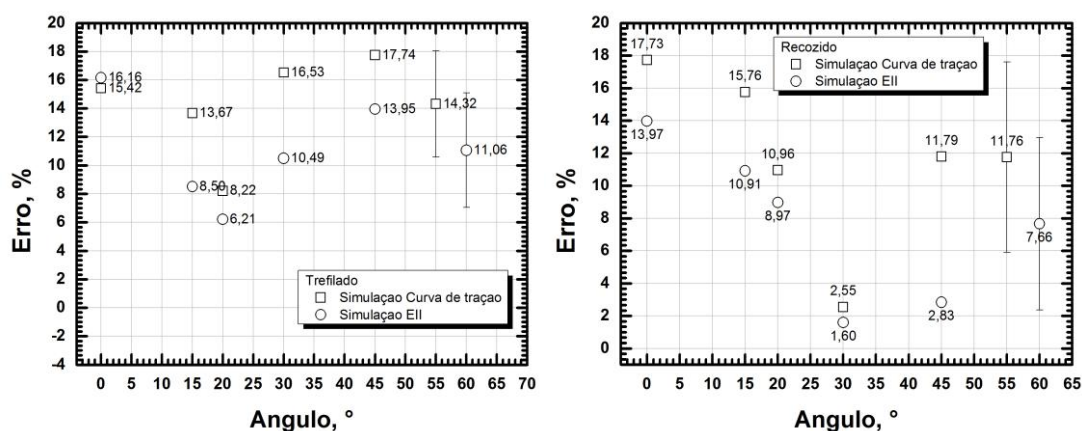
Fonte: Elaborado pelo autor

Pode se observar que os valores de carga necessária para as deformações dos corpos de prova trefilados e recozidos foram menores nos testes físicos (extrusão invertida) em relação às simuladas.

As simulações dos corpos de prova recozidos com a inclinação da cabeça do punção a 30° foram as que aproximaram em valor de carga. No teste físico de extrusão invertida com esta inclinação (30°) ocorreu ruptura do punção em dois ensaios realizados.

O erro de carga da simulação para o resultado obtido experimentalmente foi calculado para os diferentes ângulos dos punções. A Figura 58 apresenta estes valores do erro e, também, os valores do erro médio e desvio padrão.

**Figura 58 – Erro de carga da simulação**



Fonte: Elaborado pelo autor

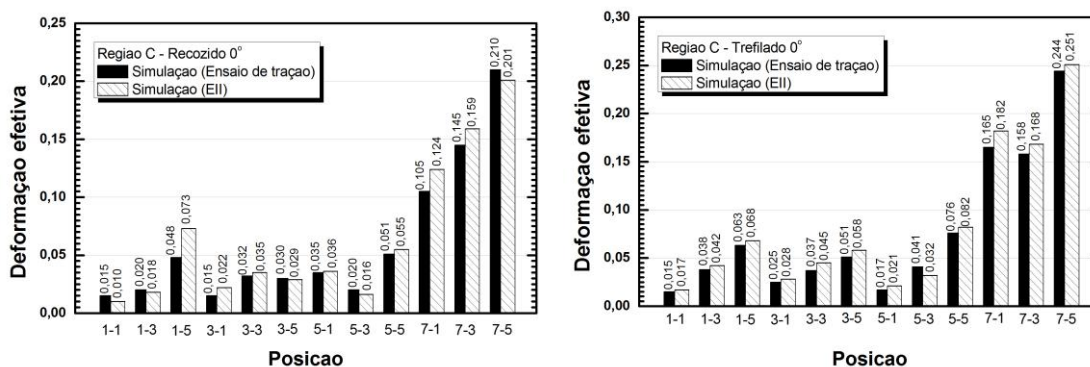
Observa-se que os erros individuais estiveram entre 6 e 17,84%. A distribuição dos erros experimentais apresentou média de 14,32 e 11,06 com desvios padrão de 4,22 e 4,06 para o corpo de prova trefilado.

Nas simulações dos corpos de prova recozidos os erros individuais estiveram entre 1,6 e 17,73%. A distribuição dos erros experimentais apresentou média de 11,76 e 7,66 com desvio padrão de 4,83 e 5,76

O teste de hipótese evidenciou que a simulação numérica obtidas com a curva tensão deformação por ensaio de tração ou indentação proporcionou a mesma distribuição nos erros de carga.

A Figura 59 apresenta as deformações efetivas para diferentes posições na região C dos corpos de prova recozido e trefilados e ângulo de punção a zero graus.

**Figura 59 – Deformação efetiva região C punção 0°**

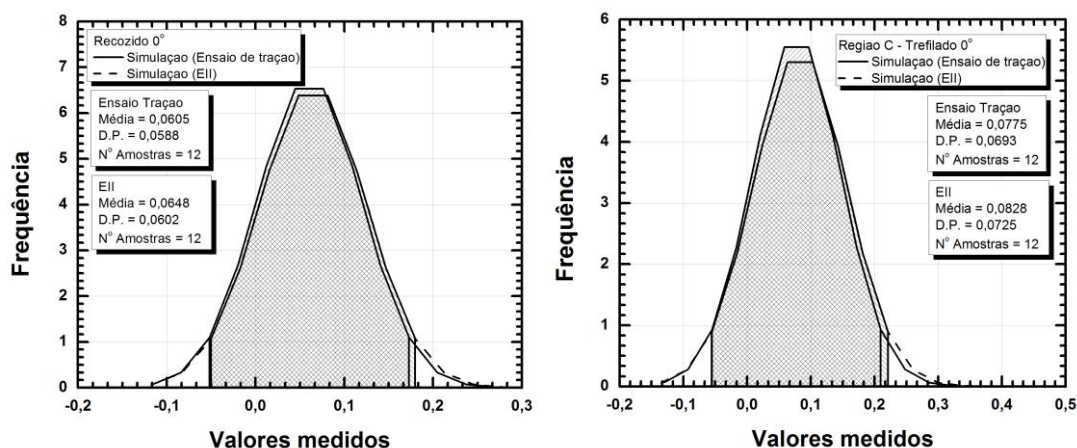


Fonte: Elaborado pelo autor

A evolução das deformações efetivas individuais apresentou a mesma configuração, utilizando-se as curvas tensão deformação obtidas por tração e indentação quer na condição material recozido ou trefilado.

A Figura 60 apresenta a distribuição dos valores simulados da deformação efetiva das posições na região C, utilizando-se a curva tensão deformação do ensaio de tração e indentação.

**Figura 60 – Distribuição valores simulados deformação efetiva região C**



Fonte: Elaborado pelo autor

Por intermédio do teste de hipótese verificou-se que as duas distribuições são semelhantes estatisticamente. Estes resultados foram os mesmos para as regiões B e A. Comprovou-se então a modelagem tanto de carga quanto deformação efetiva proporcionou o mesmo resultado considerando se a curva tensão deformação em tração e indentação.

No Apêndice G é apresentada a distribuição dos valores simulados da deformação efetiva das posições nas regiões estudadas, utilizando-se a curva tensão deformação do ensaio de tração e indentação.

#### 4.11 Equação de Hollomon para o 2º estágio de deformação

Pela análise das médias das microdurezas iniciais dos corpos de prova trefilado e recozido sem deformação (Tabela 10) e as médias das microdurezas após a deformação no primeiro estágio nas amostras trefiladas/extrudadas e recozidas/extrudadas com a inclinação da cabeça do punção a 20° (Tabela 18 e 19) respectivamente, concluiu-se que ocorreu encruamento em ambas as amostras.

Comparando os coeficientes de encruamentos das equações de Hollomon utilizadas nas simulações para o primeiro estágio (amostras sem deformação trefiladas e recozidas respectivamente ( $n=0,13$  e  $n=0,32$ )), concluiu-se que o coeficiente de encruamento para o 2º estágio em ambas as amostras tende a ser menor.

**Tabela 18 – Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 20°- Carga 50gf**

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	253,2	276,2
2	256,4	273,4
3	255,8	274,8
4	252,6	275,6
5	259,3	279,3
6	263,4	278,4
7	262,1	275,1
8	264,8	279,8
9	260,9	278,9
10	263,3	272,2
Média	259,1	276,37

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 19 – Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 20°- Carga 50gf**

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	286,6	272,1
2	295,8	275,4
3	291,2	278,3
4	297,9	277,8
5	306,9	279,1
6	301,4	276,6
7	297,5	286,1
8	295,2	283,7
9	298,6	282,3
10	295,9	281,8
Média	296,7	279,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados dos ensaios de indentações instrumentada realizado nas amostras trefilada/extrudada e recozida/extrudada Apêndice H, chegaram-se as soluções propostas pelo algoritmo inverso. As Tabelas 20 e 21 apresentam as soluções propostas para as amostras trefilada/extrudada e recozida/extrudada ambas com a cabeça do punção a 20°.

**Tabela 20 – Resultado das soluções propostas algoritmo inverso amostra trefilada/extrudada a 20°**

Existência de pile-up nas endentações							
N°	n	E[GPa]	std(E)	Y [GPa]	std(Y)	HP[GPa]	std(HP)
1	0	198,723473	11,060124	1,195751	0,093871	2,835178	0,134250
2	0,050	203,086958	11,413317	1,074990	0,086181	2,935559	0,133994
3	0,100	207,548544	11,777120	0,955215	0,078511	3,03964	0,134065
4	0,150	212,118475	12,148145	0,836056	0,070758	3,146279	0,134686
5	0,200	216,790921	12,523737	0,718574	0,06291	3,256801	0,135911
6	0,206	217,351871	12,568550	0,704823	0,061974	3,270136	0,136095

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 21 – Resultado das soluções propostas algoritmo inverso amostra Recozida/extrudada a 20°**

Existência de pile-up nas indentações							
N°	N	E[GPa]	std(E)	Y [GPa]	std(Y)	HP[GPa]	std(HP)
1	0	197,505807	12,677574	1,079387	0,221854	2,537163	0,388829
2	0,050	202,194821	12,812295	0,968247	0,203552	2,633439	0,390871
3	0,100	206,961962	12,985278	0,858071	0,185275	2,732379	0,393631
4	0,150	211,806103	13,199358	0,748644	0,166766	2,834018	0,397636
5	0,200	216,718611	13,450269	0,641059	0,147992	2,938195	0,403045
6	0,224	219,062812	13,579818	0,591345	0,139059	2,988283	0,406075

Fonte: Elaborado pelo autor

A escolha da melhor solução entre as propostas para o corpo de prova trefilado/extrudado e recozido/extrudado foi determinada pela comparação entre a dureza inicial obtida pela equação (68) e os valores obtidos de microdureza no sentido radial e comprimento após a realização do primeiro estágio Apêndice I. As equações (82) e (83) mostram os valores das durezas iniciais dos corpos de prova trefilado e recozidos não deformados respectivamente.

$$HV = \frac{HP}{1,131244} = \frac{2,71E^9}{1,131244} = 244,450Kgf/mm^2 \quad (82)$$

$$HV = \frac{HP}{1,131244} = \frac{1,35E^9}{1,131244} = 119,337Kgf/mm^2 \quad (83)$$

As soluções que apresentaram resultados mais próximos em comparação com os resultados obtidos por microdureza nos corpos de prova trefilados/extrudados e recozidos/extrudados foram as curvas de número três (3) Tabela (20) para o corpo de prova trefilado/extrudado e a curva número seis (6) Tabela (21) para o corpo de prova recozido/extrudado. As equações (84) e (85) mostram os valores de dureza para os corpos de prova trefilado/extrudados e recozidos/extrudados respectivamente.

$$HV = \frac{HP}{1,131244} = \frac{3,039164E^9(Pa)}{1,131244} = 2686,56Mpa = 274,130Kgf/mm^2 \quad (84)$$

$$HV = \frac{HP}{1,131244} = \frac{2,988283E^9(Pa)}{1,131244} = 2,641590 Mpa = 269,550Kgf/mm^2 \quad (85)$$

Para determinação da equação de Hollomon para o 2º estágio de deformação é proposto para os corpos de prova recozido o mesmo critério adotado na determinação da curva de Hollomon do 1º Estágio ou seja o procedimento A\* e para os corpos de prova trefilados é proposto o procedimento C\*. A Tabela 22 apresenta as equações de Hollomon obtidas para o segundo estágio de acordo com o ângulo do punção.

**Tabela 22 – Equação de Hollomon – 2º Estágio**

Ângulo Punção	Ensaio	Condição	Equação
0°	EII	Trefilado	$\sigma_{v1.2} = 110,69 (\varepsilon_{v1.2})^{0,153}$
15°	EII	Trefilado	$\sigma_{v1.2} = 131,71 (\varepsilon_{v1.2})^{0,076}$
20°	EII	Trefilado	$\sigma_{v1.2} = 100,82 (\varepsilon_{v1.2})^{0,008}$
30°	EII	Trefilado	$\sigma_{v1.2} = 104,93 (\varepsilon_{v1.2})^{0,006}$
45°	EII	Trefilado	$\sigma_{v1.2} = 138,39 (\varepsilon_{v1.2})^{0,056}$
0°	EII	Recozido	$\sigma_{v1} = 170,10 (\varepsilon_{v1})^{0,250}$
15°	EII	Recozido	$\sigma_{v1} = 272,75 (\varepsilon_{v1})^{0,170}$
20°	EII	Recozido	$\sigma_{v1} = 237,69 (\varepsilon_{v1})^{0,223}$
30°	EII	Recozido	$\sigma_{v1} = 226,74 (\varepsilon_{v1})^{0,226}$
45°	EII	Recozido	$\sigma_{v1} = 176,30 (\varepsilon_{v1})^{0,050}$

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 CONCLUSÕES

- a) O método proposto por Bergner e Zouhar aplicado à equação de Paris possibilitou ajuste adequado na obtenção da curva de Hollomon  
$$\sigma_v = k * (\bar{\epsilon}_v)^n$$
- b) A técnica de visioplasticidade empregando usinagem dos círculos apresentou média de 1,213mm e desvio padrão 0,016mm propiciou a obtenção do perfil de deformação mais eficientemente que o processo de marcação eletrolítica utilizado em trabalho anterior (REIS, 2008)
- c) A obtenção da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira utilizando-se as técnicas de ensaio de tração e ensaio de indentação instrumentada propiciaram os mesmos resultados sem a necessidade de correção proposta alguns autores.
- d) Os erros obtido nos valores de carga e deformação efetiva na simulação por elementos finitos em software Deform-2D foram similares estatisticamente ao se utilizar as curvas tensão verdadeira versus deformação verdadeira obtidas pela técnica de ensaio de tração ou ensaio de indentação instrumentada
- e) A distribuição do erro de carga entre a simulação por elementos finitos e os resultados obtidos experimentalmente apresentaram média de 14,32 e 11,06 com desvio padrão de 4,22 e 4,06 para o corpo de prova trefilado, e, média de 11,76 e 7,66 com desvio padrão de 4,83 e 5,76 para os corpos de prova recozidos
- f) O acréscimo na carga de extrusão envolvendo o aço ABNT1010 foi mais sensível à deformação que a modificação do ângulo do punção.
- g) Foi proposta uma metodologia de obtenção das curvas tensão verdadeira versus deformação verdadeira após passes de deformação
- h) Baseado na metodologia proposta verificou se que o ângulo do punção não afetou a curva para o segundo estágio.

## 6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O APORTE DO TRABALHO

O ensaio de indentação originalmente desenvolvido para avaliar dureza foi expandido para caracterizar outras propriedades mecânicas tais como limite de resistência, tenacidade à fratura e tensões residuais. Esse envolve as etapas de determinação da área de contato, representação da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira, ajuste da equação constitutiva e avaliação das propriedades de tração. As propriedades de tração tais como limite de escoamento e resistência obtidas nos teste de indentação situaram-se com erro em torno de  $\pm 10\%$  dos valores obtidos do ensaio de tração experimental. É proposta uma nova metodologia na qual, a partir dos valores de microdureza e nanodureza antes e pós passe, obtém-se a expressão analítica otimizada de Hollomon para múltiplos passes de deformação. A inserção destas curvas em softwares comerciais permitirá a obtenção do perfil de deformação efetiva e carga no passe de deformação

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Desenvolver de técnica de medição sem contato através de imagens com o auxílio de câmeras de vídeo, jogo de lentes e software capaz de capturar, ampliar, arquivar eletronicamente e mensurar malhas deformadas.
- b) Realização de simulações com multipasses de deformação com uso da técnica proposta .
- c) Realizar simulação em 3D com adaptação de flange no segundo estágio na geometria estudada

## REFERÊNCIAS

AGUILAR, Maria Teresa Paulino et al. Influence of strain path in the mechanical properties of drawn aluminum alloy bars. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 80-81, p. 376-379, 1998.

ALTAN, T.; VAZQUEZ, V. Status of process simulation using 2D and 3D finite element method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 71, n. 1, p. 49-63, nov. 1997.

ALTAN, T.; VAZQUEZ, V. Die design for flashless forging of complex parts. **Journal of Materials Processing Technology**, v.98, n.1, p. 81-89, 2000.

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H.L. **Metal forming: fundamentals and applications**. Ohio: American Society for Metals, Metals Park, 1983.

BALENDRA, R.; LONG, H. FE simulation of the influence of thermal and elastic effects on the accuracy of cold-extruded components. **Journal of Materials Processing Technology**, v.84, n. 1-3, p. 247-260, 1998.

BARISIC, B.; CUKOR, G.; MATH, M. Estimate of consumed energy at backward extrusion process by means of modelling approach. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 907-912, nov. 2004.

BERGNER, F.; ZOUHAR, G. A new approach to the correlation between the coefficient and the exponent in the power law equation of fatigue crack growth. **International Journal of Fatigue**, v. 22, n. 3, p. 229-239, mar. 2000.

BLANDO, E. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de revestimentos do tipo super-rede de dureza**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.

BLANDO, E. **Estudo de Técnicas de Indentação para caracterização de Materiais na região de Micro e Nanodureza**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Porto Alegre.  
BRESCIANI FILHO, Ettore et al. **Conformação Plástica dos Metais**. 5ª ed. Campinas: Unicamp, 1997.

BUCAILLE, J.; STAUSS, S.; FELDER, E.; MICHLER, J. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters. **Acta Materialia**, v. 51, n. 6, p. 1663-1678, apr. 2003.

BRAGA, L. F. **Simulação Computacional por Elementos Finitos do Processo de Forjamento em Matriz Fechada de Rodas SAE 4140 de Utilização em Ponte Rolante**. 2004. Dissertação (Mestrado Departamento de Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CARNEIRO, J. R. G. **Modelamento de curvas de fluxo para aços livres de intersticiais e microligados ao Ti, Nb e Nb-B na austenita**. 2000. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Metalurgia e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CETLIN, P. R.; SILVA, A. P. A comparison of redundant deformation factors in the drawing of round section bars. **Journal of Engineering and Materials Technology**, v. 116, n. 4, p. 574-575, oct. 1994.

CHEN, Dyi-Cheng, et al. Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimensional finite element method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192-193, p. 188-193, oct. 2007.

CHENG, Y. T.; CHENG, C. M. Can stress-strain relationship be obtained from indentation curves using conical and pyramidal indenters. **Journal of Materials Research**, v. 14, p. 3493-3496, 1999.

CHO, Hae Yong, et al. Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 135, n. 2-3, p. 375-381, 2003.

CHOI, H.; CHOI, J.; HWANG, B. The forming characteristics of radial – backward extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, n. 1-3, p. 141-147, 2001.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 3rd ed. New York: Wiley, 1989.

CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. 2004. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CHOLLOACOOP, N.; DAO, M.; SURESH, S. Depth-sensig instrumented indentation with dual sharp indenters. **Acta Materialia**, v. 51, n. 13, p. 3713-3729, aug. 2003.

CUPPARI, M. G. V. **Relação entre microestrutura e resistência à cavitação de ligas fundidas baseadas no sistema quaternário Fe-Cr-Ni-C**. 2002. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CUPPARI, Marcio Gustavo Di Vernieri et al. Efeito da presença de carbonetos no desgaste por cavitação de ligas fundidas baseadas no sistema quaternário Fe-Cr-Ni-C. In: 58 CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2003. p. 641-658.

ÇAN, Y.; ALTINBALIK, T. H.; AKATA, E. A study of lateral extrusion of gear like elements and splines. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, n. 1, p. 128-134, jul. 2005.

DAO, M. et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation. **Acta Materialia**, v. 49, n. 19, p. 3899-3918, nov. 2001.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**, 2 ed, Boston, McGraw Hill, 1976.

DOHERTY, R. D.; MARTIN, J. W. **Stability of Microstructure in Metallic Systems** Cambridge University Press, p. 420, 1976.

DOUTHWAITE, R. M. Relationship between the hardness, flow stress, and grain size of metals. **Journal of the Iron and Steel Institute**, p. 265-269, mar. 1970.

DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

DUBOIS, A. et al. A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing-extrusion-cold heading sequence. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 249, n. 10-11, p. 951-961, nov. 2001.

DWIVEDI, S. N. Plane strain viscoplasticity for dynamic and quasi-static deformation process. **Journal of Engineering for Industry**, v. 105, n. 3, p. 197-202, 1983.

FARIAS, M. C. M. **Influência da velocidade de deslizamento, da carga normal e da transformação martensítica induzida por deformação plástica na resistência ao desgaste por deslizamento dos aços inoxidáveis austeníticos.** 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FARHOUMAND, A.; EBRAHIMI, R. Analysis of forward-backward-radial extrusion process. **Materials and Design**, v. 30, n. 6, p. 2152-2157, jun. 2009.

FERRER, M. H. **Estudo das transformações de fase de aços TRIP Si-Mn microligadas com Nb.** 2003. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FRANCO, A. R. J. **Obtenção de revestimento duplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13.** 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000.

GIANNAKOPOULOS, A. E.; SURESH, S. Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation. **Scripta Materialia**, v. 40, n.10, p. 1191-1198, jan. 1999.

GIULIANO, G. Process design of the cold extrusion of a billet using finite element method Short Communication. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 28, n. 2, p. 726-729, 2007.

GOUVEIA, B. P. P. A.; RODRIGUES, J. M. C.; MARTINS, P. A. F. Finite element modelling of cold forward extrusion updated Lagrangian and combined Eulerian-Lagrangian formulations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 94, n. 2-3, p. 85-93, sep.1999.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, São Paulo: Artliber Editora, 2005.

ISHIKAWA, T; LEE, J.; LEE, Y. Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy. **Journal of Materials Processing Technology**, v.130-131, p. 532-539, dec. 2002.

KARHAUSEN, K; KOPP, R. Model for integrated process and microstructure simulation in hot forming. **Steel Research** , v. 63, n. 6, p. 247-256, 1992.

KING, R. B. Elastic analysis of some punch problems for a layered medium. **International Journal of Solids Structures**, v. 23, n. 12, p. 1657-1664, 1987.

KIM, Y. H.; PARK; J. H. Upper bound analysis of torsional backward extrusion process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.143-144, p. 735-740, dec. 2003.

KONG, L. X. ; NAHAVANDI, S. On-line tool condition monitoring and control system in forging processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v.125-126, p. 464-470, sep. 2002.

KOPP, R.; CHO, M. L.; SOUZA, M. M. Multi-level simulation of metal-forming processes. **Steel Research** , v. 59, n. 4, p. 161-164, 1988.

KOBAYASHI, S.; OH, S. I.; ALTAN, T. **Metal Forming and the Finite Element Method**, 1 ed., New York, Oxford University Press, 1989.

KUZMAN, K. Problems os accuracy control in cold forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, n. 1-3, p. 10-15, jun. 2001.

LEE, C. H., KOBAYASHI, S. Analyses of Axisymmetric Upsetting and Plane-Strain Side-Pressing of Solid Cylinders by The Finite Element Method. **Journal of Engineering for Industry**, v. 93, p. 445-454, may. 1971.

LIMA, C. M. O. R., BUTTON, S. T. Application of the finite element method in cold forging processes. **Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences**, v. 22, n. 2, p. 189-200, 2000.

LINK , W. **Metrologia Mecânica Expressão da incerteza de Medição**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 1997.

LONG, H.; Quantitative evaluation of dimensional errors of formed components in cold backward cup extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1-3, p. 591-595, jul. 2006.

LONG, H.; BALENDRA, R. Evaluation of elasticity and temperature effects on the dimensional accuracy of back-extruded components using finite element simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 80-81, p. 665-670, aug. 1998.

LOUBET, J. L. et. al. Vickers indentation curves of magnesium oxide (Mgo). **Journal of Tribology**. v.106, n. 1, p.43-48, 1984.

MACHADO, A. **Simulação computacional para fabricação terminal elétrico**. 2006. Monografia (Conclusão do Curso) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

MACKERLE, J. Finite element analyses and simulations of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985-2003). **Computational Materials Science**, v.31, n. 3-4, p. 187-219, nov. 2004.

MALZBENDER, J.; WITH, G. Indentation load-displacement curve, plastic deformation, and energy. **Journal of Material Research**, v. 17, p. 502-511, feb. 2002.

MARCAL, P. V., KING, I. P. Elastic-plastic analysis of two-dimensional stress systems by the finite element method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 9, n.3, p. 143-155, mar. 1967.

MCCORMACK, C.; MONAGHAN, J. A finite element analysis of cold-forging dies using two and three dimensional models. **Journal of Materials Processing Technology**, v.118, n. 1-3, p. 286-292, dec. 2001.

MISIOLEK, W.Z. Material physical response in the extrusion process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.60, n.1-4, p.117-124, jun. 1996.

NUNES, J.; LARSON, F. R. Low-temperature hardness and flow-stress relationships of metals. **Journal of the Institute of Metals**, v. 91, p.114-117, 1963.

OLIVER, W.C.; PHARR, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and sensing indentation experiments. **Journal of Materials Research**, v. 7, n. 6, p. 1564-1583, jun. 1992.

PARK, C.; LIM, J.Y.; HWANG, B. B. A process–sequence design of an axle-housing by cold extrusion using thick-walled pipe. **Journal of Materials Processing Technology**, v.75, n. 1-3, p. 33-44, mar. 1998.

POKRAS, V.D.; RVACHEV, M. A. Application of the R-functions method to viscoplastic analysis in metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 60, n. 1-4, p. 493-500, jun. 1996.

PULECIO, S. A. R. **Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional – análise de unicidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador.** 2010. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

REIS, E. C. **Simulação computacional e experimental na produção de um terminal do cabo do freio de mão em prensa hidráulica.** 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RICE, J.R., TRACY, D. M. Computational fracture mechanics. **Journal Materials**, p. 1-22, jan. 1973.

ROWE, G. W. **Principles of industrial metal working processes.** 4 ed. London: Edward Arnold, p. 407, 1977.

SABOORI, M. et. al. Experimental and numerical study of energy consumption in forward and backward rod extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1-3, p. 612-616, jul. 2006.

SANTOS, C. A. **Simulação numérica da trefilação axissimétrica do aço inoxidável 420 considerando o efeito do caminho de deformação.** 2005. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, J.W.S. et. al. Recursos informáticos agilizam o processo de conformação. **Revista Máquinas e Metais**, n. 428, p. 146-157, set. 2001.

SEMIATIN, S. L.; DELO, D. P. Equal channel extrusion of difficult to work alloys. **Materials and Design**, v. 21, n. 4, p.311-322, aug. 2000.

SCHÜNEMANN, M.; AHMETOGLU, M. A.; ALTAN, T. Prediction of process conditions in drawing and ironing of cans. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 59, n. 1-2, p. 1-9, may. 1996.

SHABAIK, A. H. Computer-aided viscoplasticity solution to axisymmetric extrusion through curved boundaries. **Journal of Engineering for Industry**, p. 1225-1231, nov. 1972.

SHABAIK, A.; KOBAYASHI, S. Computer application to the viscoplasticity method. **Journal of Engineering for Technology**, p. 1-8, 1996.

SHABAIK, A.; THOMSEN, E. G. Some additional studies of the mechanics of axisymmetric extrusions by the viscoplasticity method. **Annals of the International Institution for Production Research – CIRP**, v. 16, p. 41-48, 1968.

SILVA, G. C.; CARVALHO, G. D. C.; LANDRE JÚNIOR, J. Método numérico avalia a influência do coeficiente de atrito na estampagem. **Revista Corte e Conformação**, v.120, p. 78 – 90, 2008.

SILVA, G. C. **Substituição das etapas de usinagem pela conformação mecânica na fabricação de contatos para soldagem por resistência**, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalurgia e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SNEDDON, I. N. The relationship between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. **International Journal of Science Engineering** v. 3, n. 1, p. 47-57, may. 1965.

SOUZA, C.; CETLIN, P. R. The Influence of aluminum, silicon and titanium on cold headability of 0.2 percent carbon steel wire. **Wire Journal International**, v. 26, n. 8, p. 80-83, 1993.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de Materiais Metálicos**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blucher, p. 286, 1982.

TABOR, D. **The hardness of metals**. London: Oxford University Press, 1951.

TANG, J. et. al. Recent development of process simulation for industrial applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, n. 2, p 205-211, jan. 2000.

THOMSEN, E.G.; YANG, C. T.; KOBAYASHI, S. **Mechanics of plastic deformation in metal processing**. 1 ed. New York: The Macmillan Company, p. 486, 1965.

TIERNAN, P. et al. Modelling of cold extrusion with experimental verification. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 168, n. 2, p. 360-366, sep. 2005.

UYYURU, R. K.; VALBERG, H. Physical and numerical analysis of the metal flow over the punch head in backward cup extrusion of aluminium. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n. 2, p. 312-318, feb. 2006.

VASCONCELLOS, L. A. **Aplicação de filmes finos de titânio em componentes acetabulares de uhmwpe para proteção contra oxidação devido a exposição à radiação x**. 2006. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VAZQUEZ, V.; HANNAN, D.; ALTAN, T. Tool life in cold forging – an example of design improvement to increase servive life. **Journal of Materials Processing Technology** , v. 98, n. 1, p. 90-96, jan. 2000.

WANG, J. P. A new approach to visioplasticity in plane-strain extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, n. 1-3, p.144-154, jul. 1998.

WANG, J. P. The slip-line function model approach to plane dynamic analysis of visioplasticity. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 74, n. 1-3, p.1-9, feb. 1998.

WAGONER, R.H., CHENOT, J.L. **Fundamentals of Metal Forming**. New York: John Wiley & Sons, p. 389, 1996.

WANHEIM, T. et al. The influence of the constitutive behaviour of materials on the formability in the radial extrusion of tubular components. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 75, n. 1-3, p. 122-126, mar. 1998.

WEIDIG, C. et al. Dynamics strain aging in low carbon steel wire rods. **Wire Journal International**, v. 28, n. 1, p. 82-85, jan. 1995.

WILLIAMS, A.J.; CROFT, T. N.; CROSS, M. Computational modelling of metal extrusion and forging processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 573-582, sep. 2002.

XINBO, L. et al. Research on the flow stress characteristics of AISI 1006 and AISI 5140 in the temperature range of warm forging by means of thermo-mechanical experiments. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 122, n. 1, p. 38-44, mar. 2002.

ZHANG, X. Q. et al. Feature based integrated intelligent sequence design for cold extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 174, n. 1-3, p. 74-81, may. 2006.

## APÊNDICE

## APÊNDICE A – Planilha de erros curva resultantes

<b>Def.Eng. (e)</b>	Tensão engenharia Trefilado 1 Ensaio de Tração	<b>Curva Hollomom Média Trefilado Ensaio de Tração</b> $\sigma = 89,24.(\epsilon)^{0,13}$	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro (%)	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)	Desvio Padrão Erro Médio	Erro Total Médio (%)
0,0318	53,814	57,000	55,243294	2,59	0,46	2,83	0,467972	1,60
0,0339	54,275	57,485	55,597692	2,38				
0,0382	54,660	58,371	56,224496	2,78				
0,0445	54,967	59,552	57,012753	3,59				
<b>Def.Eng. (e)</b>	Tensão engenharia Trefilado 2 Ensaio de Tração	<b>Curva Hollomom Média Trefilado Ensaio de Tração</b> $\sigma = 89,24.(\epsilon)^{0,13}$	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)		
0,0218	52,659	54,254	53,098789	0,83	0,36	0,80		
0,0240	54,231	54,952	53,664497	1,05				
0,0285	55,252	56,194	54,63678	1,13				
0,0345	55,802	57,607	55,685939	0,21				
<b>Def.Eng. (e)</b>	Tensão engenharia Trefilado 3 Ensaio de Tração	<b>Curva Hollomom Média Trefilado Ensaio de Tração</b> $\sigma = 89,24.(\epsilon)^{0,13}$	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio		
0,0234	53,045	54,765	53,513636	0,88	0,32	0,59		
0,0265	54,583	55,663	54,226594	0,66				
0,0296	54,813	56,474	54,849643	0,07				
0,0327	54,967	57,213	55,400098	0,78				
<b>Def.Eng. (e)</b>	Tensão engenharia Trefilado 1 Ensaio de Tração	<b>Curva Hollomom Média Trefilado Ensaio de Tração</b> $\sigma = 89,24.(\epsilon)^{0,13}$	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio		
0,0177	53,445	52,830	51,910064	2,96	1,45	2,18		
0,0219	55,252	54,318	53,151082	3,95				
0,0287	55,645	56,245	54,676074	1,77				
0,0355	55,802	57,812	55,832324	0,05				

Tensão de engenharia Trefilado 1 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Trefilada - Ensaio de Indentação $\sigma = 89,93(\epsilon)^{0,1283}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro (%)	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)	Desvio Padrão Erro Médio	Erro Total Médio (%)
53,814	57,778	55,998	3,90	0,43	4,12	0,138885	2,04
54,275	58,263	56,351	3,68				
54,660	59,150	56,975	4,06				
54,967	60,331	57,758	4,83				
Tensão de engenharia Trefilado 2 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Trefilada - Ensaio de Indentação $\sigma = 89,93(\epsilon)^{0,1283}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)		
52,659	55,030	53,859	2,23	0,79	0,99		
54,231	55,730	54,423	0,35				
55,252	56,972	55,393	0,25				
55,802	58,386	56,439	1,13				
Tensão de engenharia Trefilado 3 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Trefilada - Ensaio de Indentação $\sigma = 89,93(\epsilon)^{0,1283}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio		
53,045	55,542	54,273	2,26	0,61	1,63		
54,583	56,441	54,984	0,73				
54,813	57,252	55,605	1,42				
54,967	57,992	56,154	2,11				
Tensão de engenharia Trefilado 4 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Trefilada - Ensaio de Indentação $\sigma = 89,93(\epsilon)^{0,1283}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio		
53,445	53,605	52,671	1,47	0,74	1,43		
55,252	55,094	53,911	2,49				
55,645	57,023	55,432	0,38				
55,802	58,591	56,584	1,38				

Def.Eng. (e)	Tensão engenharia Recozido 1 ensaio de Tração	Curva Hollomom Média Recozida Ensaio de Tração $\sigma = 78,88.(\epsilon)^{0,32}$ (Kgf/mm)	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro (%)	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)	Desvio Padrão Erro Médio	Erro Total Médio (%)		
0,0378	24,111	27,651	26,644	9,51	2,17	7,30	0,24004	5,75		
0,0654	29,577	32,957	30,934	4,39						
0,1032	32,952	38,135	34,568	4,67						
0,1381	34,560	41,859	36,781	6,04						
0,1671	35,363	44,498	38,126	7,25						
0,2035	35,765	47,389	39,378	9,17						
0,2325	36,087	49,458	40,127	10,07						
Def.Eng. (e)	Tensão engenharia Recozido 2 ensaio de Tração	Curva Hollomom Média Recozida Ensaio de Tração $\sigma = 78,88.(e)^{0,32}$ (Kgf/mm)	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)				
0,0450	25,073	29,241	27,982	10,39	2,36	7,19				
0,0587	28,608	31,836	30,071	4,86						
0,0978	32,719	37,490	34,149	4,19						
0,1370	34,856	41,752	36,722	5,08						
0,1761	35,761	45,248	38,473	7,05						
0,2152	36,172	48,249	39,704	8,90						
0,2543	36,583	50,898	40,578	9,85						
Def.Eng. (e)	Tensão engenharia Recozido 3 Ensaio de Tração	Curva Hollomom Média Recozida Ensaio de Tração $\sigma = 78,88.(e)^{0,32}$ (Kgf/mm)	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio				
0,0397	25,880	28,098	27,024	4,24	2,67	4,08				
0,0518	28,934	30,592	29,084	0,52						
0,0864	32,791	36,024	33,160	1,11						
0,1209	34,720	40,119	35,792	2,99						
0,1555	36,006	43,479	37,629	4,31						
0,1900	36,247	46,363	38,960	6,96						
0,2245	36,569	48,908	39,940	8,44						
Def.Eng. (e)	Tensão de engenharia Recozido 4 Ensaio de Tração	Curva Hollomom Média Recozida Ensaio de Tração $\sigma = 78,88.(e)^{0,32}$ (Kgf/mm)	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio				
0,0298	24,272	25,615	24,875	2,42	2,77	4,42				
0,0777	32,148	34,824	32,314	0,51						
0,1119	34,560	39,134	35,196	1,81						
0,1492	35,765	42,907	37,338	4,21						
0,1802	36,167	45,586	38,625	6,36						
0,1958	36,328	46,808	39,145	7,20						
0,2175	36,408	48,414	39,764	8,44						

Def.Eng. (e)	Tensão de engenharia Recozido 1 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Recozida - Ensaio de Indentação $\sigma = 80,23(\epsilon)^{0,3347}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro (%)	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)	Desvio Padrão Erro Médio	Erro Total Médio (%)		
0,0378	24,111	26,802	25,826		2,72	5,80	0,081456	4,68		
0,0654	29,577	32,204	30,227	2,15						
0,1032	32,952	37,514	34,005	3,10						
0,1381	34,560	41,354	36,337	4,89						
0,1671	35,363	44,085	37,772	6,38						
0,2035	35,765	47,085	39,125	8,59						
0,2325	36,087	49,237	39,948	9,67						
Def.Eng. (e)	Tensão de engenharia Recozido 2 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Recozida - Ensaio de Indentação $\sigma = 80,23(\epsilon)^{0,3347}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio (%)				
0,0450	25,073	28,416	27,193	7,79	2,68	5,84				
0,0587	28,608	31,059	29,337	2,48						
0,0978	32,719	36,850	33,567	2,53						
0,1370	34,856	41,243	36,275	3,91						
0,1761	35,761	44,862	38,145	6,25						
0,2152	36,172	47,979	39,482	8,38						
0,2543	36,583	50,738	40,450	9,56						
Def.Eng. (e)	Tensão de engenharia Recozido 3 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Recozida - Ensaio de Indentação $\sigma = 80,23(\epsilon)^{0,3347}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio				
0,0397	25,880	27,255	26,214	1,28	2,54	3,34				
0,0518	28,934	29,790	28,323	2,16						
0,0864	32,791	35,345	32,535	0,79						
0,1209	34,720	39,558	35,291	1,62						
0,1555	36,006	43,030	37,240	3,31						
0,1900	36,247	46,019	38,671	6,27						
0,2245	36,569	48,665	39,741	7,98						
Def.Eng. (e)	Tensão de engenharia Recozido 4 Ensaio de Tração	Curva Hollomon Recozida - Ensaio de Indentação $\sigma = 80,23(\epsilon)^{0,3347}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensão de engenharia Curva Hollomon Média	Erro %	Desvio Padrão Erro	Erro Médio				
0,0298	24,272	24,741	24,026	1,02	2,76	3,73				
0,0777	32,148	34,114	31,655	1,56						
0,1119	34,560	38,542	34,665	0,30						
0,1492	35,765	42,438	36,930	3,15						
0,1802	36,167	45,213	38,309	5,59						
0,1958	36,328	46,482	38,872	6,54						
0,2175	36,408	48,150	39,548	7,94						

## APÊNDICE B

Tabelas com Medições dos círculos gravados pelo processo de Usinagem no corpo de prova não deformado, medidas nas direções X e Y ,deformações regiões A, B e C com variação do ângulo do punção – dx (mm), dy (mm)

Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy
1-1	1,190	1,198	2-1	1,190	1,198	3-1	1,230	1,204	4-1	1,217	1,235
1-2	1,188	1,196	2-2	1,241	1,202	3-2	1,240	1,230	4-2	1,198	1,192
1-3	1,198	1,195	2-3	1,198	1,207	3-3	1,245	1,195	4-3	1,197	1,219
1-4	1,201	1,205	2-4	1,238	1,215	3-4	1,198	1,201	4-4	1,206	1,235
1-5	1,198	1,198	2-5	1,224	1,210	3-5	1,207	1,233	4-5	1,201	1,205
1-6	1,220	1,205	2-6	1,190	1,201	3-6	1,201	1,205	4-6	1,211	1,239
1-7	1,189	1,201	2-7	1,196	1,197	3-7	1,219	1,230	4-7	1,208	1,245
1-8	1,195	1,199	2-8	1,201	1,205	3-8	1,225	1,240	4-8	1,201	1,239
1-9	1,205	1,198	2-9	1,207	1,196	3-9	1,198	1,250	4-9	1,239	1,215
Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy
6-1	1,198	1,215	7-1	1,215	1,239	8-1	1,195	1,217	9-1	1,205	1,189
6-2	1,201	1,205	7-2	1,230	1,230	8-2	1,205	1,215	9-2	1,205	1,250
6-3	1,210	1,205	7-3	1,198	1,198	8-3	1,200	1,224	9-3	1,208	1,230
6-4	1,198	1,207	7-4	1,250	1,207	8-4	1,198	1,206	9-4	1,207	1,238
6-5	1,201	1,239	7-5	1,208	1,230	8-5	1,195	1,206	9-5	1,196	1,215
6-6	1,220	1,239	7-6	1,196	1,198	8-6	1,245	1,239	9-6	1,199	1,205
6-7	1,205	1,205	7-7	1,201	1,207	8-7	1,201	1,189	9-7	1,204	1,230
6-8	1,230	1,190	7-8	1,211	1,250	8-8	1,220	1,211	9-8	1,212	1,201
6-9	1,198	1,245	7-9	1,195	1,205	8-9	1,196	1,233	9-9	1,235	1,215
Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy
11-1	1,197	1,219	12-1	1,201	1,240	13-1	1,225	1,205	14-1	1,198	1,207
11-2	1,219	1,230	12-2	1,198	1,240	13-2	1,205	1,250	14-2	1,225	1,197
11-3	1,189	1,201	12-3	1,230	1,978	13-3	1,197	1,978	14-3	1,219	1,198
11-4	1,225	1,205	12-4	1,240	1,219	13-4	1,208	1,228	14-4	1,245	1,205
11-5	1,201	1,205	12-5	1,201	1,201	13-5	1,202	1,238	14-5	1,219	1,198
11-6	1,201	1,205	12-6	1,205	1,211	13-6	1,211	1,245	14-6	1,201	1,208
11-7	1,978	1,215	12-7	1,198	1,190	13-7	1,194	1,208	14-7	1,245	1,211
11-8	1,978	1,215	12-8	1,198	1,211	13-8	1,213	1,233	14-8	1,239	1,201
11-9	1,205	1,198	12-9	1,220	1,205	13-9	1,245	1,238	14-9	1,198	1,208
Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy	Posição	dx	dy
16-1	1,192	1,203	17-1	1,204	1,209	18-1	1,198	1,203	19-1	1,195	1,198
16-2	1,215	1,223	17-2	1,208	1,211	18-2	1,202	1,224	19-2	1,207	1,210
16-3	1,240	1,236	17-3	1,215	1,225	18-3	1,218	1,238	19-3	1,219	1,223
16-4	1,197	1,208	17-4	1,207	1,224	18-4	1,210	1,230	19-4	1,206	1,245
16-5	1,206	1,241	17-5	1,198	1,202	18-5	1,196	1,230	19-5	1,235	1,222
16-6	1,211	1,233	17-6	1,203	1,196	18-6	1,199	1,208	19-6	1,232	1,234
16-7	1,243	1,235	17-7	1,206	1,229	18-7	1,206	1,231	19-7	1,239	1,205
16-8	1,198	1,200	17-8	1,216	1,205	18-8	1,205	1,203	19-8	1,204	1,214
16-9	1,206	1,234	17-9	1,203	1,230	18-9	1,218	1,231	19-9	1,209	1,212





















## APÊNDICE C – Teste carga amostra recozida carga de 10mN, 40mN e 70mN

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	10	0,41	0,44	0,94	0,42	4,88	207,26	235,89	3,20	1,81	2,05	1,91
2	10	0,38	0,41	0,93	0,40	4,25	214,57	246,39	2,99	2,08	2,35	2,17
3	10	0,41	0,44	0,94	0,43	4,92	192,10	214,70	3,21	1,79	2,03	1,88
4	10	0,39	0,42	0,93	0,41	4,47	208,79	238,07	3,06	1,97	2,23	2,07
5	10	0,42	0,45	0,94	0,43	5,12	202,57	229,24	3,28	1,72	1,95	1,82
6	10	0,44	0,47	0,95	0,45	5,55	200,21	225,93	3,41	1,59	1,80	1,69
7	10	0,42	0,45	0,94	0,43	5,11	192,07	214,65	3,27	1,73	1,95	1,82
8	10	0,41	0,44	0,94	0,42	4,85	203,81	230,99	3,19	1,82	2,06	1,92
9	10	0,37	0,40	0,93	0,38	3,89	194,16	217,53	2,86	2,27	2,57	2,34
10	10	0,45	0,47	0,95	0,46	5,78	197,31	221,89	3,48	1,53	1,73	1,62
11	10	0,44	0,47	0,94	0,45	5,56	191,31	213,61	3,41	1,59	1,80	1,68
12	10	0,44	0,46	0,95	0,45	5,42	191,58	213,98	3,37	1,63	1,84	1,72
<b>media</b>	<b>10</b>	<b>0,42</b>	<b>0,44</b>	<b>0,94</b>	<b>0,43</b>	<b>4,98</b>	<b>199,64</b>	<b>225,24</b>	<b>3,23</b>	<b>1,79</b>	<b>2,03</b>	<b>1,89</b>
desvio	0	0,02	0,02	0,01	0,02	0,57	7,84	11,00	0,19	0,22	0,25	0,21
coefvar [porcet.]	0	5,93	5,29	0,70	5,63	11,39	3,92	4,88	5,80	12,26	12,26	11,37

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	1,00	1,05	0,95	1,02	28,06	184,99	205,02	7,67	1,26	1,43	1,35
2	40	0,98	1,03	0,95	1,00	26,97	199,63	225,13	7,52	1,31	1,48	1,41
3	40	1,01	1,05	0,95	1,03	28,42	196,26	220,43	7,72	1,24	1,41	1,34
4	40	0,98	1,03	0,95	1,00	26,92	192,96	215,88	7,51	1,31	1,49	1,41
5	40	0,93	0,98	0,95	0,95	24,47	206,39	234,64	7,16	1,44	1,63	1,55
6	40	1,02	1,07	0,96	1,04	29,04	195,79	219,78	7,80	1,22	1,38	1,31
7	40	1,03	1,08	0,95	1,05	29,51	185,19	205,29	7,87	1,20	1,35	1,29
8	40	0,93	0,97	0,95	0,95	24,21	203,49	230,55	7,13	1,46	1,65	1,57
9	40	0,95	1,00	0,95	0,97	25,55	196,75	221,12	7,32	1,38	1,56	1,48
10	40	0,91	0,96	0,95	0,93	23,54	196,76	221,12	7,03	1,50	1,70	1,60
11	40	0,96	1,01	0,95	0,98	25,99	197,95	222,78	7,38	1,36	1,54	1,46
<b>media</b>	<b>40</b>	<b>0,97</b>	<b>1,02</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>	<b>26,61</b>	<b>196,02</b>	<b>220,16</b>	<b>7,47</b>	<b>1,34</b>	<b>1,51</b>	<b>1,44</b>
desvio	0	0,04	0,04	0,00	0,04	2,03	6,55	9,06	0,29	0,10	0,12	0,11
coefvar [porcet.]	0	3,95	3,77	0,27	3,91	7,63	3,34	4,11	3,83	7,71	7,71	7,41

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	1,32	1,39	0,95	1,35	48,30	180,12	198,48	10,07	1,28	1,45	1,37
2	70	1,30	1,36	0,95	1,33	46,74	194,35	217,79	9,90	1,32	1,50	1,42
3	70	1,31	1,38	0,95	1,34	47,58	183,93	203,58	9,99	1,30	1,47	1,39
4	70	1,34	1,41	0,96	1,37	49,96	193,02	215,97	10,24	1,24	1,40	1,34
5	70	1,40	1,46	0,96	1,43	53,87	191,96	214,50	10,63	1,15	1,30	1,24
6	70	1,34	1,41	0,96	1,38	50,12	199,78	225,34	10,25	1,23	1,40	1,33
7	70	1,33	1,39	0,96	1,36	48,87	198,95	224,18	10,13	1,27	1,43	1,37
8	70	1,31	1,38	0,95	1,34	47,57	189,66	211,35	9,99	1,30	1,47	1,40
9	70	1,36	1,43	0,96	1,39	51,24	184,95	204,96	10,37	1,21	1,37	1,30
10	70	1,38	1,44	0,96	1,40	52,06	182,45	201,60	10,45	1,19	1,34	1,28
11	70	1,33	1,39	0,96	1,36	48,88	191,54	213,93	10,13	1,27	1,43	1,36
<b>media</b>	<b>70</b>	<b>1,34</b>	<b>1,40</b>	<b>0,96</b>	<b>1,37</b>	<b>49,56</b>	<b>190,06</b>	<b>211,97</b>	<b>10,19</b>	<b>1,25</b>	<b>1,41</b>	<b>1,35</b>
desvio	0	0,03	0,03	0,00	0,03	2,16	6,54	8,93	0,22	0,05	0,06	0,05
coefvar [porcet.]	0	2,28	2,11	0,19	2,22	4,35	3,44	4,21	2,16	4,25	4,25	4,05

### Teste carga amostra trefilada carga de 10mN, 40mN e 70mN

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	10,0	0,30	0,34	0,90	0,32	2,70	218,80	252,54	2,38	3,27	3,70	3,28
2	10,0	0,34	0,37	0,92	0,35	3,34	230,76	270,32	2,65	2,64	2,99	2,73
3	10,0	0,33	0,36	0,91	0,34	3,15	225,57	262,54	2,57	2,80	3,17	2,87
4	10,0	0,34	0,37	0,92	0,35	3,36	242,74	288,65	2,66	2,62	2,97	2,72
5	10,0	0,36	0,39	0,92	0,37	3,71	214,89	246,84	2,79	2,38	2,69	2,46
6	10,0	0,36	0,38	0,93	0,37	3,61	224,07	260,31	2,75	2,44	2,76	2,53
7	10,0	0,36	0,38	0,93	0,37	3,69	248,55	297,74	2,78	2,39	2,71	2,51
8	10,0	0,31	0,34	0,91	0,32	2,79	239,05	282,94	2,42	3,17	3,58	3,22
9	10,0	0,35	0,38	0,93	0,36	3,50	240,22	284,75	2,71	2,52	2,85	2,62
10	10,0	0,28	0,32	0,89	0,30	2,33	218,65	252,33	2,21	3,79	4,28	3,72
11	10,0	0,36	0,39	0,92	0,37	3,66	216,33	248,93	2,77	2,41	2,73	2,49
<b>media</b>	<b>10,0</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,92</b>	<b>0,35</b>	<b>3,26</b>	<b>229,06</b>	<b>267,99</b>	<b>2,61</b>	<b>2,77</b>	<b>3,13</b>	<b>2,83</b>
desvio	0,0	0,03	0,02	0,01	0,02	0,47	11,87	17,90	0,19	0,46	0,52	0,41
coefvar [porcet.]	0,0	7,56	6,21	1,52	6,91	14,28	5,18	6,68	7,41	16,48	16,48	14,36

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40,0	0,68517	0,745297	0,919325	0,71141	13,789192	212,796491	243,81943	5,378305	2,563444	2,89988	2,645925
2	40,0	0,69515	0,751355	0,925198	0,71683	13,997005	210,775272	240,910643	5,418681	2,525385	2,856825	2,604123
3	40,0	0,73899	0,796241	0,928102	0,76559	15,932354	217,525833	250,681818	5,781173	2,218619	2,509799	2,32349
4	40,0	0,72161	0,776241	0,92962	0,7449	15,096643	220,576317	255,150473	5,627509	2,341436	2,648735	2,442536
5	40,0	0,70604	0,763297	0,92499	0,73284	14,619363	227,127652	264,861722	5,537838	2,417877	2,735208	2,524607
6	40,0	0,67768	0,741241	0,91425	0,70696	13,619717	209,652619	239,301164	5,345152	2,595342	2,935964	2,674495
7	40,0	0,74235	0,795412	0,933292	0,76564	15,934703	224,487969	260,929932	5,7816	2,218292	2,509429	2,328248
8	40,0	0,72103	0,771412	0,934689	0,74064	14,927344	227,656054	265,651866	5,595866	2,367991	2,678775	2,472673
9	40,0	0,69461	0,751241	0,924618	0,72147	14,176101	237,300848	280,258306	5,453238	2,49348	2,820733	2,604902
10	40,0	0,7132	0,767412	0,929363	0,73559	14,727654	220,171539	254,555585	5,558311	2,400098	2,715096	2,498068
11	40,0	0,74682	0,801297	0,932013	0,77034	16,127354	215,221943	247,328916	5,816444	2,191793	2,479452	2,294791
media	40,0	0,71297	0,769131	0,92686	0,73747	14,813403	220,299322	254,859078	5,572192	2,393978	2,708172	2,492169
desvio	0,0	0,02355	0,021296	0,006097	0,02247	0,889977	8,374136	12,374669	0,167043	0,142469	0,161167	0,13429
coefvar [porcet.]	0,0	3,30328	2,768773	0,6578	3,04636	6,00792	3,801254	4,855495	2,99779	5,951143	5,951143	5,388468

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70,0	0,94477	1,010513	0,934936	0,97136	25,404409	239,930793	284,302757	7,30013	2,435298	2,754915	2,55011
2	70,0	1,06101	1,119314	0,947907	1,08318	31,432738	237,41012	280,425819	8,120207	1,968244	2,226564	2,088318
3	70,0	0,97071	1,034314	0,938509	0,99584	26,670908	238,628083	282,296048	7,479885	2,319655	2,624095	2,436689
4	70,0	1,02759	1,090314	0,942475	1,05314	29,752694	235,026872	276,782744	7,90022	2,079385	2,352291	2,198177
5	70,0	1,07312	1,129513	0,950071	1,09861	32,313595	265,557916	325,162405	8,2332	1,914591	2,165869	2,051649
6	70,0	1,02187	1,079513	0,946605	1,04349	29,222307	245,305207	292,651653	7,829486	2,117126	2,394985	2,241341
7	70,0	1,13306	1,185513	0,955758	1,15536	35,653448	261,456532	318,441007	8,648221	1,73524	1,96298	1,86667
8	70,0	1,07594	1,128314	0,953581	1,09935	32,355843	285,638173	359,133422	8,23858	1,912091	2,163041	2,055911
9	70,0	0,94881	1,012314	0,937266	0,97271	25,473441	239,271612	283,286526	7,310041	2,428698	2,74745	2,541253
10	70,0	0,93839	1,014513	0,924962	0,97058	25,364136	212,36033	243,190529	7,294341	2,439165	2,75929	2,530495
11	70,0	1,04857	1,111314	0,943541	1,07555	31,00175	235,193414	277,036617	8,064346	1,995607	2,257518	2,117778
12	70,0	0,91131	0,980513	0,929416	0,93936	23,792874	235,716876	277,835259	7,064794	2,600245	2,941511	2,704867
media	70,0	1,01293	1,074663	0,942086	1,03821	29,036512	244,291327	291,712065	7,790288	2,162112	2,445876	2,281938
desvio	0,0	0,06897	0,063169	0,00944	0,0672	3,670006	18,690904	29,706092	0,492702	0,272932	0,308753	0,261713
coefvar [porcet.]	0,0	6,80901	5,87799	1,002049	6,47289	12,639279	7,651071	10,183361	6,32457	12,623396	12,623396	11,468873

## APÊNDICE D – Valores de dureza EII Trefilado e Recozido carga 70mN e 40mN

### Recozida carga 70mN zero graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70,0	1,00	1,08	0,93	1,03	28,61	187,02	207,77	7,75	2,16	2,45	2,24
2	70,0	0,97	1,06	0,92	1,01	27,37	184,79	204,75	7,58	2,26	2,56	2,33
3	70,0	1,04	1,12	0,93	1,08	31,12	183,41	202,89	8,08	1,99	2,25	2,07
4	70,0	0,96	1,05	0,91	1,00	26,93	171,26	186,78	7,52	2,30	2,60	2,35
5	70,0	1,00	1,08	0,93	1,03	28,49	192,43	215,14	7,73	2,17	2,46	2,26
6	70,0	1,03	1,10	0,93	1,06	29,98	186,11	206,53	7,93	2,06	2,33	2,14
7	70,0	0,99	1,08	0,92	1,03	28,58	172,91	188,94	7,74	2,16	2,45	2,23
8	70,0	1,02	1,10	0,92	1,06	29,97	181,79	200,71	7,93	2,06	2,34	2,15
9	70,0	1,04	1,12	0,93	1,08	31,05	178,74	196,64	8,07	1,99	2,25	2,07
10	70,0	0,97	1,06	0,92	1,01	27,44	185,42	205,60	7,59	2,25	2,55	2,33
11	70,0	0,97	1,06	0,92	1,01	27,37	187,95	209,03	7,58	2,26	2,56	2,34
12	70,0	0,98	1,07	0,92	1,02	28,01	169,44	184,40	7,67	2,21	2,50	2,27
13	70,0	0,95	1,04	0,92	0,99	26,44	184,70	204,63	7,45	2,34	2,65	2,41
14	70,0	0,92	1,01	0,91	0,96	24,91	194,44	217,92	7,23	2,48	2,81	2,55
15	70,0	0,97	1,05	0,92	1,00	26,95	198,70	223,83	7,52	2,30	2,60	2,38
16	70,0	0,94	1,02	0,92	0,97	25,55	189,03	210,50	7,32	2,42	2,74	2,49
17	70,0	0,94	1,03	0,91	0,98	25,66	181,52	200,35	7,34	2,41	2,73	2,47
18	70,0	0,93	1,02	0,91	0,97	25,29	176,74	193,99	7,28	2,45	2,77	2,50
media	70,0	0,98	1,06	0,92	1,02	27,76	183,69	203,36	7,63	2,24	2,53	2,31
desvio	0,0	0,04	0,03	0,01	0,04	1,89	7,83	10,52	0,26	0,15	0,17	0,14
coefvar [porcet.]	0,0	3,81	3,22	0,73	3,48	6,82	4,26	5,17	3,40	6,73	6,73	6,23

### Recozida carga 70mN 15 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,78	0,88	0,89	0,83	18,46	215,45	247,67	6,22	3,35	3,79	3,37
2	70	0,73	0,83	0,88	0,77	16,04	204,42	231,86	5,80	3,86	4,36	3,79
3	70	0,81	0,90	0,90	0,85	19,40	201,14	227,24	6,38	3,19	3,61	3,20
4	70	0,81	0,90	0,90	0,85	19,60	216,31	248,91	6,41	3,16	3,57	3,20
5	70	0,75	0,84	0,89	0,79	16,83	207,00	235,51	5,94	3,68	4,16	3,64
6	70	0,79	0,88	0,90	0,83	18,76	211,96	242,61	6,27	3,30	3,73	3,32
7	70	0,76	0,85	0,89	0,80	17,26	213,31	244,56	6,02	3,58	4,05	3,57
8	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,74	235,17	277,01	6,10	3,49	3,94	3,53
9	70	0,76	0,85	0,89	0,80	17,29	218,79	252,52	6,02	3,58	4,05	3,58
10	70	0,75	0,84	0,89	0,78	16,72	220,31	254,76	5,92	3,70	4,19	3,69
11	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,73	225,99	263,16	6,10	3,49	3,95	3,51
12	70	0,75	0,84	0,89	0,79	16,87	217,82	251,11	5,95	3,67	4,15	3,65
13	70	0,76	0,84	0,90	0,79	17,02	224,54	261,01	5,97	3,64	4,11	3,64
14	70	0,75	0,84	0,90	0,78	16,60	213,17	244,36	5,90	3,73	4,22	3,68
15	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,71	221,51	256,53	6,10	3,49	3,95	3,51
16	70	0,74	0,83	0,89	0,78	16,37	234,06	275,31	5,86	3,78	4,28	3,79
17	70	0,79	0,87	0,90	0,83	18,48	235,08	276,86	6,23	3,35	3,79	3,40
18	70	0,81	0,89	0,91	0,85	19,36	221,29	256,20	6,37	3,20	3,61	3,24
19	70	0,80	0,88	0,90	0,83	18,86	228,05	266,24	6,29	3,28	3,71	3,33
media	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,74	219,23	253,34	6,10	3,50	3,96	3,51
desvio	0	0,03	0,02	0,01	0,03	1,10	9,81	14,39	0,19	0,21	0,24	0,19
coefvar [porcet.]	0	3,30	2,77	0,72	3,16	6,21	4,48	5,68	3,10	6,14	6,14	5,37

### Recozida carga 70mN 20 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um]^2	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,77	0,86	0,89	0,80	17,45	212,95	244,05	6,05	3,54	4,01	3,53
2	70	0,81	0,90	0,90	0,84	19,30	206,03	234,13	6,36	3,21	3,63	3,22
3	70	0,83	0,92	0,91	0,87	20,55	212,27	243,06	6,57	3,01	3,41	3,06
4	70	0,79	0,88	0,90	0,83	18,80	225,91	263,04	6,28	3,29	3,72	3,34
5	70	0,81	0,89	0,90	0,85	19,35	226,09	263,31	6,37	3,20	3,62	3,25
6	70	0,91	0,99	0,92	0,94	23,86	202,05	228,51	7,08	2,59	2,93	2,66
7	70	0,87	0,95	0,91	0,91	22,17	205,47	233,34	6,82	2,79	3,16	2,85
8	70	0,90	0,97	0,92	0,93	23,27	214,91	246,88	6,99	2,66	3,01	2,74
9	70	0,89	0,96	0,92	0,92	22,86	230,18	269,45	6,92	2,71	3,06	2,80
10	70	0,87	0,95	0,92	0,90	22,05	227,71	265,73	6,80	2,81	3,17	2,89
11	70	0,88	0,95	0,92	0,91	22,25	225,04	261,76	6,83	2,78	3,14	2,86
12	70	0,90	0,98	0,92	0,93	23,57	210,15	240,01	7,03	2,62	2,97	2,70
13	70	0,90	0,97	0,92	0,93	23,42	226,85	264,45	7,01	2,64	2,99	2,74
14	70	0,89	0,98	0,92	0,93	23,36	216,13	248,65	7,00	2,65	3,00	2,73
15	70	0,87	0,95	0,92	0,90	21,92	217,63	250,83	6,78	2,82	3,19	2,89
16	70	0,90	0,98	0,92	0,93	23,55	221,51	256,52	7,03	2,63	2,97	2,72
17	70	0,90	0,98	0,92	0,93	23,48	222,56	258,07	7,02	2,63	2,98	2,73
18	70	0,84	0,92	0,91	0,88	20,84	225,68	262,70	6,61	2,97	3,36	3,04
media	70	0,86	0,94	0,91	0,90	21,78	218,28	251,92	6,75	2,86	3,24	2,93
desvio	0	0,04	0,04	0,01	0,04	1,95	8,67	12,62	0,31	0,28	0,32	0,26
coefvar [porcet.]	0	5,09	4,21	0,99	4,67	8,95	3,97	5,01	4,57	9,75	9,75	8,70

## Recozida carga 70mN 30 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,82	0,90	0,90	0,85	19,73	212,49	243,37	6,43	3,14	3,55	3,18
2	70	0,86	0,94	0,91	0,90	21,76	216,33	248,94	6,76	2,84	3,22	2,92
3	70	0,84	0,92	0,91	0,88	20,72	222,31	257,70	6,59	2,99	3,38	3,05
4	70	0,88	0,96	0,92	0,91	22,40	218,31	251,83	6,86	2,76	3,12	2,84
5	70	0,92	1,00	0,92	0,95	24,44	207,21	235,82	7,16	2,53	2,86	2,61
6	70	0,88	0,96	0,91	0,92	22,62	212,24	243,01	6,89	2,74	3,09	2,81
7	70	0,88	0,96	0,92	0,92	22,74	219,66	253,81	6,91	2,72	3,08	2,80
8	70	0,85	0,93	0,90	0,89	21,23	209,35	238,86	6,67	2,91	3,30	2,97
9	70	0,91	1,00	0,92	0,94	23,99	182,00	201,00	7,09	2,58	2,92	2,62
10	70	0,86	0,95	0,91	0,90	21,93	199,85	225,43	6,78	2,82	3,19	2,87
11	70	0,86	0,95	0,91	0,89	21,55	193,66	216,84	6,72	2,87	3,25	2,90
12	70	0,92	1,00	0,92	0,95	24,47	207,58	236,34	7,16	2,53	2,86	2,61
13	70	0,91	1,00	0,92	0,95	24,26	204,52	231,99	7,13	2,55	2,88	2,63
14	70	0,93	1,01	0,92	0,96	24,87	206,69	235,07	7,22	2,49	2,81	2,57
15	70	0,88	0,96	0,91	0,91	22,58	210,28	240,19	6,88	2,74	3,10	2,81
16	70	0,92	1,00	0,91	0,96	24,71	203,86	231,07	7,20	2,50	2,83	2,59
17	70	0,88	0,97	0,91	0,92	22,73	205,58	233,50	6,91	2,72	3,08	2,79
18	70	0,84	0,93	0,91	0,88	21,01	209,46	239,03	6,64	2,94	3,33	3,00
media	70	0,88	0,96	0,91	0,92	22,65	207,85	236,88	6,89	2,74	3,10	2,81
desvio	0	0,03	0,03	0,01	0,03	1,53	9,55	13,47	0,23	0,19	0,21	0,18
coefvar [porcet.]	0	3,76	3,22	0,63	3,46	6,75	4,59	5,68	3,38	6,82	6,82	6,33

## Recozida carga 70mN 45 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,68	0,78	0,87	0,73	14,38	220,25	254,67	5,49	4,30	4,87	4,21
2	70	0,71	0,81	0,88	0,76	15,56	208,42	237,53	5,71	3,98	4,50	3,90
3	70	0,71	0,81	0,87	0,75	15,49	211,44	241,86	5,70	3,99	4,52	3,93
4	70	0,71	0,81	0,88	0,75	15,23	209,73	239,41	5,65	4,06	4,59	3,97
5	70	0,68	0,78	0,87	0,72	14,15	210,49	240,51	5,45	4,37	4,95	4,23
6	70	0,65	0,76	0,86	0,70	13,21	214,41	246,16	5,26	4,68	5,30	4,50
7	70	0,68	0,79	0,87	0,73	14,37	209,66	239,31	5,49	4,30	4,87	4,18
8	70	0,70	0,81	0,87	0,75	15,26	208,30	237,37	5,66	4,06	4,59	3,97
9	70	0,66	0,76	0,86	0,70	13,51	213,77	245,22	5,32	4,58	5,18	4,42
10	70	0,69	0,79	0,88	0,73	14,45	217,45	250,58	5,51	4,28	4,84	4,18
11	70	0,67	0,77	0,86	0,72	13,96	212,97	244,08	5,41	4,43	5,01	4,29
12	70	0,72	0,82	0,88	0,76	15,83	219,82	254,04	5,76	3,91	4,42	3,87
13	70	0,75	0,85	0,89	0,79	17,05	214,93	246,91	5,98	3,63	4,10	3,61
14	70	0,72	0,82	0,88	0,76	15,84	212,44	243,30	5,76	3,91	4,42	3,85
15	70	0,68	0,78	0,87	0,72	14,24	209,39	238,92	5,47	4,34	4,91	4,21
16	70	0,74	0,83	0,88	0,78	16,54	211,66	242,19	5,89	3,74	4,23	3,71
17	70	0,71	0,81	0,88	0,76	15,52	212,75	243,75	5,71	3,99	4,51	3,92
18	70	0,77	0,86	0,89	0,80	17,55	213,73	245,16	6,07	3,53	3,99	3,52
media	70	0,70	0,80	0,87	0,74	15,12	212,87	243,94	5,63	4,12	4,66	4,02
desvio	0	0,03	0,03	0,01	0,03	1,19	3,55	5,14	0,22	0,32	0,36	0,27
coefvar [porcet.]	0	4,43	3,42	1,04	3,98	7,87	1,67	2,11	3,92	7,75	7,75	6,65

## Trefilada carga 70mN Zero graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	0,71	0,76	0,94	0,73	14,62	275,33	341,46	5,54	2,42	2,73	2,56
2	40	0,77	0,82	0,94	0,79	17,04	247,92	296,76	5,98	2,07	2,35	2,20
3	40	0,71	0,76	0,93	0,73	14,68	242,70	288,59	5,55	2,41	2,72	2,53
4	40	0,65	0,71	0,92	0,67	12,36	226,42	263,80	5,09	2,86	3,23	2,94
5	40	0,75	0,80	0,94	0,77	16,11	263,29	321,43	5,81	2,19	2,48	2,33
6	40	0,73	0,78	0,94	0,75	15,33	268,27	329,64	5,67	2,31	2,61	2,44
7	40	0,75	0,80	0,94	0,77	16,24	242,12	287,68	5,84	2,18	2,46	2,30
8	40	0,71	0,76	0,93	0,73	14,37	247,88	296,70	5,49	2,46	2,78	2,58
9	40	0,72	0,76	0,94	0,74	14,71	256,46	310,35	5,56	2,40	2,72	2,53
10	40	0,71	0,76	0,94	0,73	14,55	237,75	280,95	5,52	2,43	2,75	2,54
11	40	0,82	0,87	0,95	0,84	19,16	253,42	305,48	6,34	1,85	2,09	1,97
12	40	0,75	0,81	0,93	0,78	16,45	231,64	271,64	5,87	2,15	2,43	2,27
media	40	0,73	0,78	0,94	0,75	15,47	249,43	299,54	5,69	2,31	2,61	2,43
desvio	0	0,04	0,04	0,01	0,04	1,70	14,67	23,30	0,31	0,25	0,28	0,24
coefvar [porcet.]	0	5,85	5,10	0,93	5,55	10,97	5,88	7,78	5,46	10,89	10,89	9,92

## Trefilada carga 70mN 15 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	0,55	0,62	0,88	0,58	9,15	202,50	229,15	4,38	3,86	4,37	3,77
2	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,47	199,98	225,62	4,69	3,37	3,82	3,36
3	40	0,57	0,65	0,88	0,61	10,01	207,42	236,11	4,58	3,53	4,00	3,51
4	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,99	220,63	255,23	4,58	3,54	4,00	3,54
5	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,47	219,38	253,39	4,69	3,38	3,82	3,40
6	40	0,68	0,74	0,91	0,71	13,66	206,61	234,96	5,35	2,59	2,93	2,66
7	40	0,64	0,71	0,91	0,67	12,33	224,03	260,25	5,09	2,87	3,24	2,95
8	40	0,58	0,66	0,88	0,62	10,51	196,20	220,35	4,69	3,36	3,81	3,35
9	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,33	201,36	227,55	4,87	3,12	3,53	3,14
10	40	0,61	0,69	0,89	0,64	11,33	187,77	208,78	4,88	3,12	3,53	3,11
11	40	0,59	0,67	0,88	0,63	10,85	184,72	204,65	4,77	3,26	3,69	3,23
12	40	0,54	0,61	0,87	0,57	8,90	210,66	240,74	4,32	3,97	4,49	3,90
13	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,67	214,14	245,76	4,73	3,31	3,75	3,34
14	40	0,58	0,65	0,88	0,61	10,24	199,38	224,77	4,64	3,45	3,90	3,43
15	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,48	207,97	236,90	4,69	3,37	3,82	3,38
16	40	0,59	0,67	0,88	0,62	10,67	185,37	205,53	4,73	3,31	3,75	3,28
17	40	0,58	0,67	0,87	0,62	10,48	173,09	189,17	4,69	3,37	3,81	3,30
18	40	0,63	0,70	0,90	0,66	12,00	204,06	231,35	5,02	2,95	3,33	2,99
19	40	0,68	0,74	0,91	0,71	13,59	203,60	230,69	5,34	2,60	2,94	2,67
media	40	0,60	0,67	0,89	0,63	10,90	202,57	229,52	4,77	3,28	3,71	3,28
desvio	0	0,04	0,03	0,01	0,04	1,26	13,13	18,37	0,27	0,36	0,40	0,32
coefvar [porcet.]	0	6,26	5,06	1,40	5,74	11,56	6,48	8,00	5,68	10,88	10,88	9,66

## Trefilada carga 70mN 20 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,53	222,66	258,23	4,70	3,36	3,80	3,39
2	40	0,60	0,67	0,89	0,63	10,78	216,34	248,95	4,75	3,28	3,71	3,31
3	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,40	209,06	238,46	4,67	3,40	3,85	3,39
4	40	0,61	0,67	0,91	0,64	11,07	226,39	263,77	4,82	3,19	3,61	3,24
5	40	0,56	0,63	0,89	0,60	9,69	219,69	253,85	4,51	3,65	4,13	3,64
6	40	0,55	0,62	0,89	0,58	9,31	221,34	256,28	4,42	3,80	4,29	3,77
7	40	0,62	0,69	0,90	0,65	11,46	201,86	228,24	4,90	3,08	3,49	3,10
8	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,18	218,01	251,39	4,84	3,16	3,58	3,20
9	40	0,61	0,67	0,90	0,64	11,06	227,41	265,29	4,82	3,20	3,62	3,25
10	40	0,55	0,62	0,89	0,58	9,07	225,43	262,32	4,36	3,90	4,41	3,86
11	40	0,60	0,67	0,90	0,63	10,94	215,64	247,93	4,79	3,23	3,66	3,26
12	40	0,60	0,66	0,90	0,63	10,69	216,43	249,08	4,74	3,31	3,74	3,33
13	40	0,62	0,68	0,90	0,65	11,38	220,30	254,74	4,89	3,11	3,51	3,16
14	40	0,56	0,63	0,89	0,59	9,39	212,31	243,12	4,44	3,77	4,26	3,72
15	40	0,61	0,67	0,90	0,64	11,03	210,59	240,64	4,81	3,21	3,63	3,23
16	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,15	218,98	252,80	4,84	3,17	3,59	3,21
17	40	0,62	0,68	0,91	0,64	11,21	219,15	253,05	4,85	3,15	3,57	3,20
18	40	0,61	0,68	0,91	0,64	11,20	227,28	265,09	4,85	3,16	3,57	3,21
19	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,91	217,36	250,45	4,56	3,57	4,04	3,56
media	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,60	218,22	251,77	4,71	3,35	3,79	3,37
desvio	0	0,02	0,02	0,01	0,02	0,76	6,59	9,59	0,17	0,26	0,29	0,23
coefvar [porcet.]	0	3,89	3,25	0,74	3,66	7,14	3,02	3,81	3,63	7,62	7,62	6,71

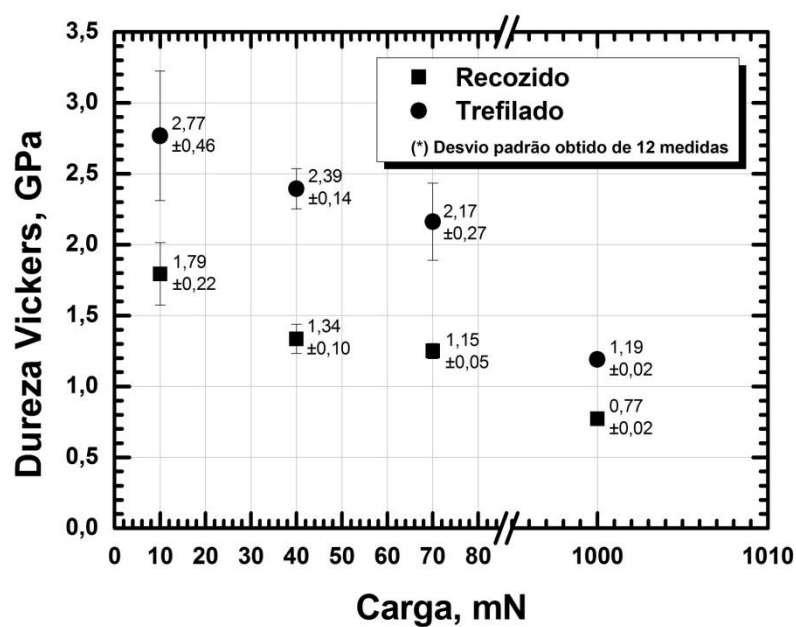
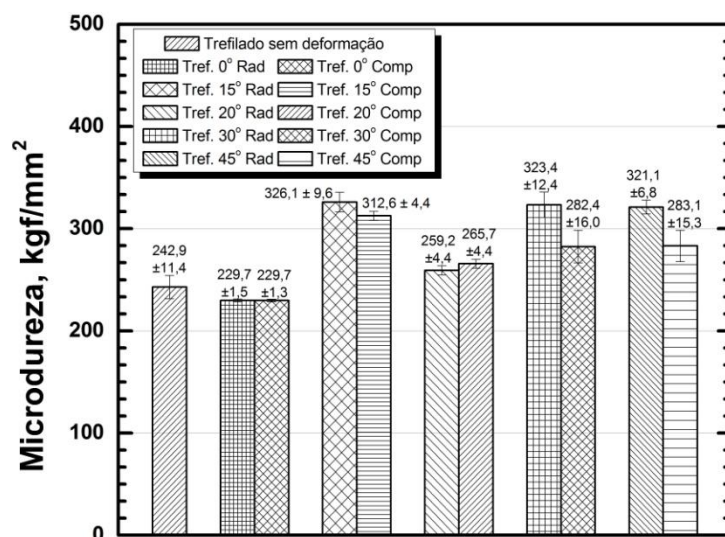
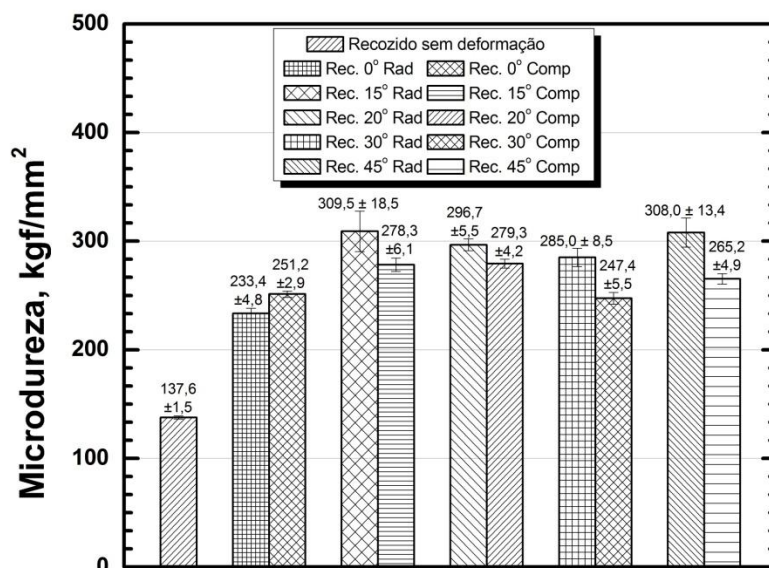
## Trefilada carga 70mN 30 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	0,55	0,64	0,87	0,59	9,57	192,33	215,02	4,48	3,69	4,18	3,62
2	40	0,58	0,66	0,89	0,61	10,33	192,07	214,65	4,65	3,42	3,87	3,38
3	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,17	207,94	236,86	4,84	3,17	3,58	3,19
4	40	0,60	0,68	0,89	0,63	11,02	200,03	225,68	4,81	3,21	3,63	3,22
5	40	0,59	0,67	0,88	0,63	10,72	193,03	215,97	4,74	3,30	3,73	3,28
6	40	0,56	0,64	0,87	0,60	9,71	196,21	220,37	4,51	3,64	4,12	3,58
7	40	0,59	0,67	0,89	0,63	10,73	205,59	233,51	4,74	3,30	3,73	3,30
8	40	0,63	0,70	0,90	0,66	11,90	191,06	213,27	5,00	2,97	3,36	2,98
9	40	0,60	0,68	0,89	0,63	10,99	196,71	221,06	4,80	3,22	3,64	3,22
10	40	0,57	0,66	0,88	0,61	10,21	188,26	209,45	4,63	3,46	3,92	3,41
11	40	0,58	0,66	0,88	0,60	9,94	166,12	180,10	4,57	3,56	4,02	3,40
12	40	0,64	0,72	0,90	0,67	12,42	187,81	208,84	5,10	2,85	3,22	2,87
13	40	0,69	0,77	0,90	0,73	14,41	174,64	191,21	5,50	2,45	2,78	2,50
14	40	0,57	0,66	0,87	0,61	10,20	187,40	208,29	4,62	3,47	3,92	3,41
15	40	0,60	0,68	0,88	0,64	11,12	172,19	188,00	4,83	3,18	3,60	3,13
16	40	0,59	0,67	0,88	0,62	10,48	166,37	180,42	4,69	3,37	3,82	3,26
17	40	0,65	0,72	0,90	0,68	12,53	173,18	189,30	5,13	2,82	3,19	2,82
18	40	0,65	0,74	0,88	0,69	13,09	151,83	161,95	5,24	2,70	3,05	2,67
media	40	0,60	0,68	0,89	0,64	11,14	185,71	206,33	4,83	3,21	3,63	3,18
desvio	0	0,04	0,04	0,01	0,04	1,28	15,10	20,22	0,27	0,34	0,38	0,30
coefvar [porcet.]	0	6,05	5,18	1,20	5,67	11,48	8,13	9,80	5,61	10,50	10,50	9,56

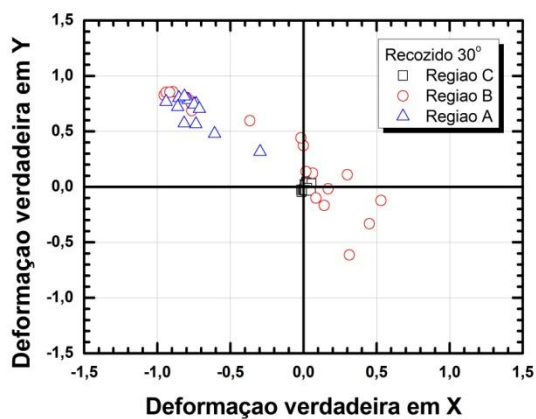
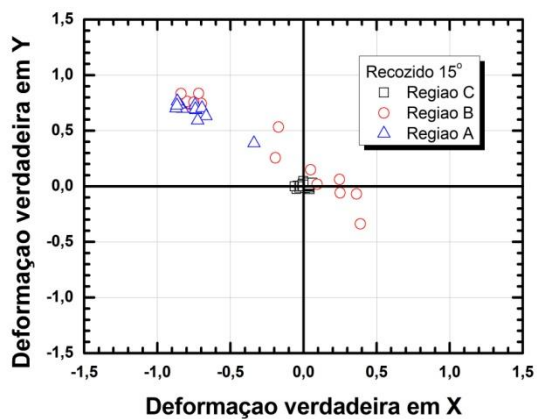
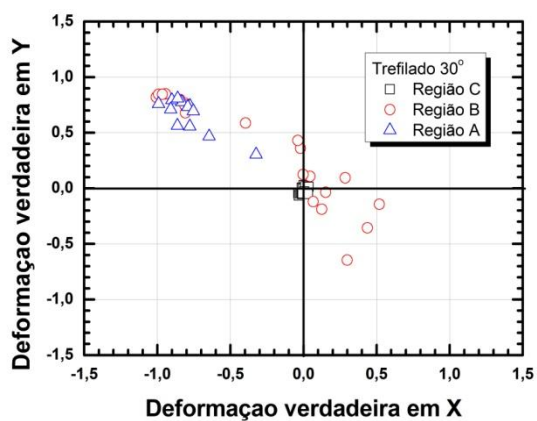
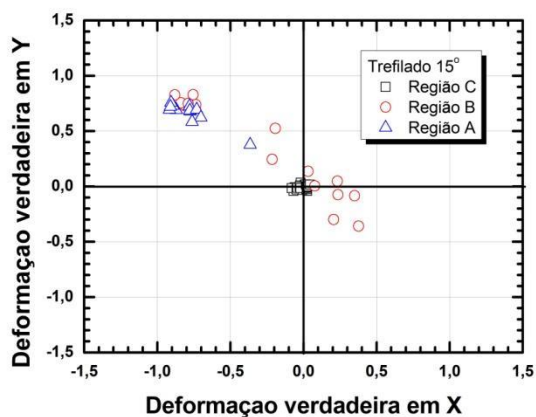
## Trefilada carga 70mN 45 graus

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	40	0,58	0,64	0,89	0,60	9,94	207,63	236,42	4,57	3,56	4,02	3,53
2	40	0,55	0,63	0,88	0,59	9,41	207,72	236,54	4,44	3,76	4,25	3,71
3	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,80	219,81	254,02	4,53	3,61	4,08	3,60
4	40	0,52	0,60	0,86	0,55	8,35	205,36	233,19	4,19	4,23	4,79	4,10
5	40	0,58	0,65	0,90	0,61	10,32	223,95	260,13	4,65	3,43	3,88	3,45
6	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,84	221,16	256,00	4,54	3,59	4,07	3,59
7	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,60	223,73	259,81	4,72	3,33	3,77	3,37
8	40	0,57	0,63	0,89	0,59	9,63	227,94	266,08	4,50	3,67	4,15	3,67
9	40	0,55	0,62	0,89	0,58	9,28	220,28	254,71	4,41	3,81	4,31	3,78
10	40	0,56	0,63	0,89	0,59	9,54	221,51	256,52	4,47	3,71	4,19	3,69
11	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,89	217,40	250,50	4,55	3,57	4,04	3,57
12	40	0,56	0,63	0,89	0,59	9,54	212,61	243,55	4,47	3,71	4,19	3,67
13	40	0,55	0,62	0,88	0,58	9,25	215,56	247,82	4,41	3,82	4,32	3,78
14	40	0,58	0,65	0,89	0,61	10,10	217,50	250,64	4,60	3,50	3,96	3,50
15	40	0,58	0,65	0,89	0,61	10,24	216,72	249,51	4,63	3,45	3,91	3,46
16	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,45	217,57	250,75	4,68	3,38	3,83	3,40
17	40	0,58	0,64	0,90	0,61	10,02	217,57	250,74	4,58	3,53	3,99	3,53
18	40	0,55	0,62	0,88	0,58	9,20	228,76	267,31	4,39	3,84	4,34	3,83
19	40	0,55	0,63	0,88	0,59	9,44	211,23	241,57	4,45	3,74	4,24	3,71
media	40	0,56	0,64	0,89	0,60	9,73	217,58	250,83	4,52	3,64	4,12	3,63
desvio	0	0,02	0,01	0,01	0,02	0,53	6,53	9,51	0,12	0,21	0,23	0,17
coefvar [porcet.]	0	3,23	2,36	0,96	2,76	5,44	3,00	3,79	2,75	5,67	5,67	4,79

## APÊNDICE E – Comparativo de Microdureza trefilado e recozido



## APÊNDICE F – Perfil de deformação amostra trefilada e recozida punção 15° e 30°





Região A - Deformações Efetivas - Trefilado 0°			Região A - Deformações Efetivas - Trefilado 15°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
14_1	0,952	1,030	14_1	0,954	1,120
14_2	1,440	1,440	14_2	1,510	1,720
15_1	0,952	1,030	15_1	0,867	1,120
15_2	1,770	1,480	15_2	1,420	1,660
16_1	0,908	0,990	16_1	0,790	1,100
16_2	1,360	1,390	16_2	1,300	1,590
17_1	0,852	0,901	17_1	0,737	1,030
17_2	1,280	1,310	17_2	1,200	1,530
18_1	0,692	0,684	18_1	0,647	0,845
18_2	1,090	1,090	18_2	1,100	1,360
19_1	0,416	0,392	19_1	0,425	0,646
19_2	0,797	0,837	19_2	0,895	1,180
Média	1,042	1,048	Média	0,987	1,242
Desvpad	0,352741042	0,310997544	Desvpad	0,31276068	0,320510563
Região A - Deformações Efetivas - Trefilado 20°			Região A - Deformações Efetivas - Trefilado 30°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
14_1	1,080	0,986	14_1	1,100	1,150
14_2	1,820	1,790	14_2	1,920	1,620
15_1	1,097	1,160	15_1	1,160	1,120
15_2	1,670	1,770	15_2	1,920	1,710
16_1	1,060	1,190	16_1	1,080	1,120
16_2	1,720	1,790	16_2	1,680	1,660
17_1	0,948	1,040	17_1	0,983	1,080
17_2	0,790	1,610	17_2	1,540	1,660
18_1	1,360	1,090	18_1	0,828	1,120
18_2	1,320	1,670	18_2	1,420	1,570
19_1	0,520	1,010	19_1	0,624	1,110
19_2	1,140	1,470	19_2	1,210	1,600
Média	1,210	1,381	Média	1,289	1,377
Desvpad	0,371552028	0,317505206	Desvpad	0,395814587	0,262
Região A - Deformações Efetivas - Trefilado 45°					
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)			
14_1	0,954	0,948			
14_2	1,450	1,310			
15_1	0,954	0,968			
15_2	1,450	1,410			
16_1	0,926	0,910			
16_2	1,470	1,420			
17_1	0,905	0,910			
17_2	1,410	1,350			
18_1	0,825	0,913			
18_2	1,370	1,380			
19_1	0,694	0,844			
19_2	1,250	1,380			
Média	1,138	1,145			
Desvpad	0,274971766	0,232837971			

Região B - Deformações Efetivas - Trefilada 0°			Região B - Deformações Efetivas - Trefilada 15°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
8_1	0,825	0,834	8_1	0,962	0,878
8_2	1,060	1,390	8_2	1,400	1,410
8_3	1,400	1,630	8_3	1,520	1,780
8_4	1,400	1,460	8_4	1,320	1,680
8_5	1,400	1,260	8_5	1,210	1,780
9_1	0,822	0,864	9_1	0,990	0,962
9_2	1,260	1,340	9_2	1,520	1,530
9_3	2,300	1,930	9_3	2,310	2,500
9_4	1,760	1,790	9_4	1,660	2,050
9_5	1,470	1,370	10_1	0,918	0,954
10_1	0,848	0,890	10_2	1,480	1,640
10_2	1,320	1,350	11_1	0,930	0,963
10_3	2,350	2,020	11_2	1,440	1,520
10_4	2,050	2,030	12_1	0,942	1,060
10_5	1,490	1,400	12_2	1,440	1,690
11_1	0,889	0,927	13_1	0,969	1,090
11_2	1,360	1,400	13_2	1,590	1,670
11_3	1,870	1,870			
12_1	0,873	0,945	Média	1,329	1,480
12_2	1,370	1,440	Desvpad	0,355	0,434
12_3	2,020	1,990			
13_1	0,913	1,820			
13_2	1,430	1,390			
13_3	1,870	0,968			
Média	1,431	1,430			
Desvpad	0,455	0,382			
Região B - Deformações Efetivas - Trefilada 20°			Região B - Deformações Efetivas - Trefilada 30°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
8_1	0,864	0,561	8_1	0,893	0,226
8_2	1,150	0,770	8_2	1,040	0,508
8_3	1,270	0,770	8_3	0,926	0,579
8_4	1,140	0,821	8_4	0,959	0,901
8_5	1,190	1,220	8_5	1,250	2,500
9_1	0,896	0,930	9_1	0,931	0,224
9_2	1,330	1,250	9_2	1,430	0,414
9_3	1,970	1,500	9_3	1,540	0,619
9_4	1,450	1,850	9_4	1,430	0,887
9_5	1,660	2,260	9_5	1,870	1,650
10_1	0,909	0,956	10_1	1,000	0,047
10_2	1,550	1,420	10_2	1,650	0,297
10_3	2,620	2,330	10_3	2,590	0,538
10_4	1,820	2,220	10_4	1,530	0,989
10_5	2,110	2,480	11_1	0,953	1,000
11_1	0,913	1,110	11_2	1,790	1,140
11_2	1,590	1,630	12_1	1,040	1,050
11_3	2,390	2,340	12_2	1,740	1,380
12_1	1,010	1,190	13_1	1,130	2,420
12_2	1,700	1,650	13_2	1,920	1,510
12_3	2,580	2,410			
13_1	1,040	1,060	Média	1,381	0,944
13_2	1,770	1,730	Desvpad	0,440	0,663
13_3	2,460	2,260			
Média	1,558	1,530			
Desvpad	0,549	0,601			
Região B - Deformações Efetivas - Trefilada 45°					
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)			
8_1	0,048	0,0010			
8_2	0,074	0,0010			
8_3	0,103	0,0010			
8_4	0,132	0,0010			
8_5	0,167	0,0010			
9_1	0,126	0,0010			
9_2	0,182	0,0010			
9_3	0,265	0,0010			
10_1	0,358	0,0013			
10_2	0,415	0,0013			
10_3	0,558	0,0385			
11_1	0,786	0,0490			
11_2	0,868	0,1050			
12_1	0,890	0,2880			
12_2	1,290	0,3710			
13_1	0,920	0,8150			
13_2	1,410	0,9130			
Média	0,505	0,152			
Desvpad	0,428	0,281			

Região B - Deformações Efetivas - Recozida 0°			Região B - Deformações Efetivas - Recozida 15°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
8_1	0,902	0,829	8_1	0,908	0,921
8_2	1,450	1,290	8_2	1,150	1,410
8_3	2,170	2,500	8_3	1,120	1,550
8_4	1,690	1,690	8_4	0,990	1,200
8_5	1,450	1,500	8_5	1,020	1,300
9_1	0,902	0,830	9_1	0,903	0,931
9_2	1,460	1,450	9_2	1,520	1,600
9_3	1,920	2,350	9_3	1,630	2,320
9_4	1,890	2,000	9_4	1,330	1,600
9_5	1,540	1,570	9_5	1,280	1,740
10_1	0,902	0,871	10_1	0,997	0,930
10_2	1,500	1,520	10_2	1,630	1,660
10_3	2,140	2,310	10_3	2,420	2,370
10_4	2,140	2,190	10_4	1,630	1,990
10_5	1,560	1,620	10_5	1,490	2,200
11_1	0,944	0,908	11_1	0,999	1,030
11_2	1,540	1,490	11_2	1,630	1,700
11_3	2,090	2,120	11_3	2,420	2,620
12_1	1,000	0,885	12_1	0,998	1,080
12_2	1,560	1,520	12_2	1,780	1,810
12_3	2,160	2,010	12_3	2,390	2,520
13_1	0,970	0,913	13_1	1,010	1,050
13_2	1,600	1,510	13_2	1,610	1,720
13_3	2,050	2,190	13_3	2,520	2,480
Média	1,564	1,586	Média	1,474	1,656
Desvpad	0,436	0,521	Desvpad	0,508	0,534
Região B - Deformações Efetivas - Recozida 20°			Região B - Deformações Efetivas - Recozida 30°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
8_1	0,861	0,867	8_1	1,000	0,580
8_2	1,150	1,180	8_2	1,420	0,642
8_3	1,270	1,220	8_3	2,000	0,558
8_4	1,150	1,040	8_4	2,420	0,580
8_5	1,900	1,330	8_5	1,320	0,600
9_1	0,861	0,876	9_1	0,997	0,915
9_2	1,280	1,470	9_2	1,320	1,130
9_3	1,660	2,140	9_3	2,010	1,080
9_4	1,280	1,470	9_4	2,440	0,940
9_5	1,300	2,320	9_5	1,320	0,915
10_1	0,861	0,937	10_1	1,000	0,938
10_2	1,550	1,540	10_2	1,520	1,520
10_3	2,620	2,330	10_3	2,150	1,800
10_4	1,820	1,910	10_4	2,040	1,640
10_5	2,110	2,650	11_1	1,000	0,983
11_1	0,913	0,985	11_2	1,420	1,530
11_2	1,590	1,570	12_1	0,997	0,931
11_3	2,390	2,640	12_2	1,520	1,670
12_1	1,010	0,970	13_1	1,090	0,932
12_2	1,700	1,720	13_2	1,620	1,470
12_3	2,580	2,450			
13_1	1,040	0,947	Média	1,530	1,068
13_2	1,770	1,590	Desvpad	0,474	0,392
13_3	2,460	2,540			
Média	1,547	1,612			
Desvpad	0,552	0,602			
Região B - Deformações Efetivas - Recozida 45°					
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)			
8_1	0,290	0,041			
8_2	0,331	0,052			
8_3	0,418	0,065			
8_4	0,690	0,080			
8_5	1,430	0,096			
9_1	0,291	0,078			
9_2	0,714	0,096			
9_3	0,714	0,137			
10_1	0,291	0,173			
10_2	1,190	0,229			
10_3	1,250	0,322			
11_1	0,897	0,468			
11_2	1,330	0,509			
12_1	0,892	0,901			
12_2	1,370	1,000			
13_1	0,925	0,938			
13_2	1,380	1,290			
Média	0,847	0,381			
Desvpad	0,410	0,392			

Região C - Deformações Efetivas - Trefilado 0°			Região C - Deformações Efetivas - Trefilado 15°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
1_1	0,015	0,017	1_1	0,028	0,033
1_3	0,038	0,042	1_3	0,035	0,037
1_5	0,063	0,068	1_5	0,025	0,028
3_1	0,025	0,028	3_1	0,015	0,018
3_3	0,037	0,045	3_3	0,009	0,007
3_5	0,051	0,058	3_5	0,016	0,018
5_1	0,017	0,021	5_1	0,028	0,029
5_3	0,041	0,032	5_3	0,018	0,013
5_5	0,076	0,082	5_5	0,009	0,008
7_1	0,165	0,182	7_1	0,013	0,015
7_3	0,158	0,168	7_3	0,032	0,037
7_5	0,244	0,251	7_5	0,042	0,045
Média	0,0775	0,082833333	Média	0,0225	0,024
Desvapda	0,069299471	0,072486589	Desvapad	0,010275375	0,01197219
Região C - Deformações Efetivas - Trefilado 30°			Região C - Deformações Efetivas - Trefilado 20°		
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)	Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)
1_1	0,008	0,002	1_1	0,011	0,009
1_3	0,003	0,004	1_3	0,031	0,028
1_5	0,012	0,014	1_5	0,011	0,018
3_1	0,022	0,025	3_1	0,032	0,031
3_3	0,026	0,024	3_3	0,026	0,028
3_5	0,051	0,057	3_5	0,016	0,014
5_1	0,018	0,016	5_1	0,067	0,072
5_3	0,048	0,041	5_3	0,009	0,011
5_5	0,037	0,036	5_5	0,015	0,025
7_1	0,025	0,023	7_1	0,281	0,286
7_3	0,027	0,029	7_3	0,169	0,18
7_5	0,047	0,049	7_5	0,324	0,329
Média	0,027	0,026666667	Média	0,082666667	0,085916667
Desvapd	0,015247951	0,016167526	Desvap	0,107411462	0,109131769
Região C - Deformações Efetivas - Trefilado 45°					
Posição	Simulação-(ensaio de tração)	Simulação-(EII)			
1_1	0,036	0,035			
1_3	0,048	0,049			
1_5	0,033	0,035			
3_1	0,002	0,004			
3_3	0,005	0,004			
3_5	0,047	0,041			
5_1	0,013	0,019			
5_3	0,028	0,027			
5_5	0,035	0,034			
7_1	0,048	0,042			
7_3	0,078	0,076			
7_5	0,042	0,044			
Média	0,035	0,034166667			
Desvapd	0,020	0,018880472			

## APÊNDICE H – Resultados dos ensaios de indentações instrumentadas amostras trefiladas/extrudadas e recozidas/extrudadas

Trefilado zero graus													
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]	
1	40	0,71	0,76	0,94	0,73	14,62	275,33	341,46	5,54	2,42	2,73	2,56	
2	40	0,77	0,82	0,94	0,79	17,04	247,92	296,76	5,98	2,07	2,35	2,20	
3	40	0,71	0,76	0,93	0,73	14,68	242,70	288,59	5,55	2,41	2,72	2,53	
4	40	0,65	0,71	0,92	0,67	12,36	226,42	263,80	5,09	2,86	3,23	2,94	
5	40	0,75	0,80	0,94	0,77	16,11	263,29	321,43	5,81	2,19	2,48	2,33	
6	40	0,73	0,78	0,94	0,75	15,33	268,27	329,64	5,67	2,31	2,61	2,44	
7	40	0,75	0,80	0,94	0,77	16,24	242,12	287,68	5,84	2,18	2,46	2,30	
8	40	0,71	0,76	0,93	0,73	14,37	247,88	296,70	5,49	2,46	2,78	2,58	
9	40	0,72	0,76	0,94	0,74	14,71	256,46	310,35	5,56	2,40	2,72	2,53	
10	40	0,71	0,76	0,94	0,73	14,55	237,75	280,95	5,52	2,43	2,75	2,54	
11	40	0,82	0,87	0,95	0,84	19,16	253,42	305,48	6,34	1,85	2,09	1,97	
12	40	0,75	0,81	0,93	0,78	16,45	231,64	271,64	5,87	2,15	2,43	2,27	
media	40	0,73	0,78	0,94	0,75	15,47	249,43	299,54	5,69	2,31	2,61	2,43	
desvio	0	0,04	0,04	0,01	0,04	1,70	14,67	23,30	0,31	0,25	0,28	0,24	
coefvar [porcet.]	0	5,85	5,10	0,93	5,55	10,97	5,88	7,78	5,46	10,89	10,89	9,92	

Trefilado 15 Graus													
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]	
1	40	0,55	0,62	0,88	0,58	9,15	202,50	229,15	4,38	3,86	4,37	3,77	
2	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,47	199,98	225,62	4,69	3,37	3,82	3,36	
3	40	0,57	0,65	0,88	0,61	10,01	207,42	236,11	4,58	3,53	4,00	3,51	
4	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,99	220,63	255,23	4,58	3,54	4,00	3,54	
5	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,47	219,38	253,39	4,69	3,38	3,82	3,40	
6	40	0,68	0,74	0,91	0,71	13,66	206,61	234,96	5,35	2,59	2,93	2,66	
7	40	0,64	0,71	0,91	0,67	12,33	224,03	260,25	5,09	2,87	3,24	2,95	
8	40	0,58	0,66	0,88	0,62	10,51	196,20	220,35	4,69	3,36	3,81	3,35	
9	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,33	201,36	227,55	4,87	3,12	3,53	3,14	
10	40	0,61	0,69	0,89	0,64	11,33	187,77	208,78	4,88	3,12	3,53	3,11	
11	40	0,59	0,67	0,88	0,63	10,85	184,72	204,65	4,77	3,26	3,69	3,23	
12	40	0,54	0,61	0,87	0,57	8,90	210,66	240,74	4,32	3,97	4,49	3,90	
13	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,67	214,14	245,76	4,73	3,31	3,75	3,34	
14	40	0,58	0,65	0,88	0,61	10,24	199,38	224,77	4,64	3,45	3,90	3,43	
15	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,48	207,97	236,90	4,69	3,37	3,82	3,38	
16	40	0,59	0,67	0,88	0,62	10,67	185,37	205,53	4,73	3,31	3,75	3,28	
17	40	0,58	0,67	0,87	0,62	10,48	173,09	189,17	4,69	3,37	3,81	3,30	
18	40	0,63	0,70	0,90	0,66	12,00	204,06	231,35	5,02	2,95	3,33	2,99	
19	40	0,68	0,74	0,91	0,71	13,59	203,60	230,69	5,34	2,60	2,94	2,67	
media	40	0,60	0,67	0,89	0,63	10,90	202,57	229,52	4,77	3,28	3,71	3,28	
desvio	0	0,04	0,03	0,01	0,04	1,26	13,13	18,37	0,27	0,36	0,40	0,32	
coefvar [porcet.]	0	6,26	5,06	1,40	5,74	11,56	6,48	8,00	5,68	10,88	10,88	9,66	

Trefilado 20 Graus													
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]	
1	40	0,59	0,66	0,89	0,62	10,53	222,66	258,23	4,70	3,36	3,80	3,39	
2	40	0,60	0,67	0,89	0,63	10,78	216,34	248,95	4,75	3,28	3,71	3,31	
3	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,40	209,06	238,46	4,67	3,40	3,85	3,39	
4	40	0,61	0,67	0,91	0,64	11,07	226,39	263,77	4,82	3,19	3,61	3,24	
5	40	0,56	0,63	0,89	0,60	9,69	219,69	253,85	4,51	3,65	4,13	3,64	
6	40	0,55	0,62	0,89	0,58	9,31	221,34	256,28	4,42	3,80	4,29	3,77	
7	40	0,62	0,69	0,90	0,65	11,46	201,86	228,24	4,90	3,08	3,49	3,10	
8	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,18	218,01	251,39	4,84	3,16	3,58	3,20	
9	40	0,61	0,67	0,90	0,64	11,06	227,41	265,29	4,82	3,20	3,62	3,25	
10	40	0,55	0,62	0,89	0,58	9,07	225,43	262,32	4,36	3,90	4,41	3,86	
11	40	0,60	0,67	0,90	0,63	10,94	215,64	247,93	4,79	3,23	3,66	3,26	
12	40	0,60	0,66	0,90	0,63	10,69	216,43	249,08	4,74	3,31	3,74	3,33	
13	40	0,62	0,68	0,90	0,65	11,38	220,30	254,74	4,89	3,11	3,51	3,16	
14	40	0,56	0,63	0,89	0,59	9,39	212,31	243,12	4,44	3,77	4,26	3,72	
15	40	0,61	0,67	0,90	0,64	11,03	210,59	240,64	4,81	3,21	3,63	3,23	
16	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,15	218,98	252,80	4,84	3,17	3,59	3,21	
17	40	0,62	0,68	0,91	0,64	11,21	219,15	253,05	4,85	3,15	3,57	3,20	
18	40	0,61	0,68	0,91	0,64	11,20	227,28	265,09	4,85	3,16	3,57	3,21	
19	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,91	217,36	250,45	4,56	3,57	4,04	3,56	
media	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,60	218,22	251,77	4,71	3,35	3,79	3,37	
desvio	0	0,02	0,02	0,01	0,02	0,76	6,59	9,59	0,17	0,26	0,29	0,23	
coefvar [porcet.]	0	3,89	3,25	0,74	3,66	7,14	3,02	3,81	3,63	7,62	7,62	6,71	

Trefilado 30 Graus													
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]	
1	40	0,55	0,64	0,87	0,59	9,57	192,33	215,02	4,48	3,69	4,18	3,62	
2	40	0,58	0,66	0,89	0,61	10,33	192,07	214,65	4,65	3,42	3,87	3,38	
3	40	0,61	0,68	0,90	0,64	11,17	207,94	236,86	4,84	3,17	3,58	3,19	
4	40	0,60	0,68	0,89	0,63	11,02	200,03	225,68	4,81	3,21	3,63	3,22	
5	40	0,59	0,67	0,88	0,63	10,72	193,03	215,97	4,74	3,30	3,73	3,28	
6	40	0,56	0,64	0,87	0,60	9,71	196,21	220,37	4,51	3,64	4,12	3,58	
7	40	0,59	0,67	0,89	0,63	10,73	205,59	233,51	4,74	3,30	3,73	3,30	
8	40	0,63	0,70	0,90	0,66	11,90	191,06	213,27	5,00	2,97	3,36	2,98	
9	40	0,60	0,68	0,89	0,63	10,99	196,71	221,06	4,80	3,22	3,64	3,22	
10	40	0,57	0,66	0,88	0,61	10,21	188,26	209,45	4,63	3,46	3,92	3,41	
11	40	0,58	0,66	0,88	0,60	9,94	166,12	180,10	4,57	3,56	4,02	3,40	
12	40	0,64	0,72	0,90	0,67	12,42	187,81	208,84	5,10	2,85	3,22	2,87	
13	40	0,69	0,77	0,90	0,73	14,41	174,64	191,21	5,50	2,45	2,78	2,50	
14	40	0,57	0,66	0,87	0,61	10,20	187,40	208,29	4,62	3,47	3,92	3,41	
15	40	0,60	0,68	0,88	0,64	11,12	172,19	188,00	4,83	3,18	3,60	3,13	
16	40	0,59	0,67	0,88	0,62	10,48	166,37	180,42	4,69	3,37	3,82	3,26	
17	40	0,65	0,72	0,90	0,68	12,53	173,18	189,30	5,13	2,82	3,19	2,82	
18	40	0,65	0,74	0,88	0,69	13,09	151,83	161,95	5,24	2,70	3,05	2,67	
media	40	0,60	0,68	0,89	0,64	11,14	185,71	206,33	4,83	3,21	3,63	3,18	
desvio	0	0,04	0,04	0,01	0,04	1,28	15,10	20,22	0,27	0,34	0,38	0,30	
coefvar [porcet.]	0	6,05	5,18	1,20	5,67	11,48	8,13	9,80	5,61	10,50	10,50	9,56	

Trefilado 45 Graus													
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]	
1	40	0,58	0,64	0,89	0,60	9,94	207,63	236,42	4,57	3,56	4,02	3,53	
2	40	0,55	0,63	0,88	0,59	9,41	207,72	236,54	4,44	3,76	4,25	3,71	
3	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,80	219,81	254,02	4,53	3,61	4,08	3,60	
4	40	0,52	0,60	0,86	0,55	8,35	205,36	233,19	4,19	4,23	4,79	4,10	
5	40	0,58	0,65	0,90	0,61	10,32	223,95	260,13	4,65	3,43	3,88	3,45	
6	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,84	221,16	256,00	4,54	3,59	4,07	3,59	
7	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,60	223,73	259,81	4,72	3,33	3,77	3,37	
8	40	0,57	0,63	0,89	0,59	9,63	227,94	266,08	4,50	3,67	4,15	3,67	
9	40	0,55	0,62	0,89	0,58	9,28	220,28	254,71	4,41	3,81	4,31	3,78	
10	40	0,56	0,63	0,89	0,59	9,54	221,51	256,52	4,47	3,71	4,19	3,69	
11	40	0,57	0,64	0,89	0,60	9,89	217,40	250,50	4,55	3,57	4,04	3,57	
12	40	0,56	0,63	0,89	0,59	9,54	212,61	243,55	4,47	3,71	4,19	3,67	
13	40	0,55	0,62	0,88	0,58	9,25	215,56	247,82	4,41	3,82	4,32	3,78	
14	40	0,58	0,65	0,89	0,61	10,10	217,50	250,64	4,60	3,50	3,96	3,50	
15	40	0,58	0,65	0,89	0,61	10,24	216,72	249,51	4,63	3,45	3,91	3,46	
16	40	0,59	0,66	0,90	0,62	10,45	217,57	250,75	4,68	3,38	3,83	3,40	
17	40	0,58	0,64	0,90	0,61	10,02	217,57	250,74	4,58	3,53	3,99	3,53	
18	40	0,55	0,62	0,88	0,58	9,20	228,76	267,31	4,39	3,84	4,34	3,83	
19	40	0,55	0,63	0,88	0,59	9,44	211,23	241,57	4,45	3,74	4,24	3,71	
media	40	0,56	0,64	0,89	0,60	9,73	217,58	250,83	4,52	3,64	4,12	3,63	
desvio	0	0,02	0,01	0,01	0,02	0,53	6,53	9,51	0,12	0,21	0,23	0,17	
coefvar [porcet.]	0	3,23	2,36	0,96	2,76	5,44	3,00	3,79	2,75	5,67	5,67	4,79	

RECOZIDA ZERO GRAUS													
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]	
1	<b>70,0</b>	1,00	1,08	0,93	1,03	28,61	187,02	<b>207,77</b>	7,75	2,16	<b>2,45</b>	2,24	
2	<b>70,0</b>	0,97	1,06	0,92	1,01	27,37	184,79	<b>204,75</b>	7,58	2,26	<b>2,56</b>	2,33	
3	<b>70,0</b>	1,04	1,12	0,93	1,08	31,12	183,41	<b>202,89</b>	8,08	1,99	<b>2,25</b>	2,07	
4	<b>70,0</b>	0,96	1,05	0,91	1,00	26,93	171,26	<b>186,78</b>	7,52	2,30	<b>2,60</b>	2,35	
5	<b>70,0</b>	1,00	1,08	0,93	1,03	28,49	192,43	<b>215,14</b>	7,73	2,17	<b>2,46</b>	2,26	
6	<b>70,0</b>	1,03	1,10	0,93	1,06	29,98	186,11	<b>206,53</b>	7,93	2,06	<b>2,33</b>	2,14	
7	<b>70,0</b>	0,99	1,08	0,92	1,03	28,58	172,91	<b>188,94</b>	7,74	2,16	<b>2,45</b>	2,23	
8	<b>70,0</b>	1,02	1,10	0,92	1,06	29,97	181,79	<b>200,71</b>	7,93	2,06	<b>2,34</b>	2,15	
9	<b>70,0</b>	1,04	1,12	0,93	1,08	31,05	178,74	<b>196,64</b>	8,07	1,99	<b>2,25</b>	2,07	
10	<b>70,0</b>	0,97	1,06	0,92	1,01	27,44	185,42	<b>205,60</b>	7,59	2,25	<b>2,55</b>	2,33	
11	<b>70,0</b>	0,97	1,06	0,92	1,01	27,37	187,95	<b>209,03</b>	7,58	2,26	<b>2,56</b>	2,34	
12	<b>70,0</b>	0,98	1,07	0,92	1,02	28,01	169,44	<b>184,40</b>	7,67	2,21	<b>2,50</b>	2,27	
13	<b>70,0</b>	0,95	1,04	0,92	0,99	26,44	184,70	<b>204,63</b>	7,45	2,34	<b>2,65</b>	2,41	
14	<b>70,0</b>	0,92	1,01	0,91	0,96	24,91	194,44	<b>217,92</b>	7,23	2,48	<b>2,81</b>	2,55	
15	<b>70,0</b>	0,97	1,05	0,92	1,00	26,95	198,70	<b>223,83</b>	7,52	2,30	<b>2,60</b>	2,38	
16	<b>70,0</b>	0,94	1,02	0,92	0,97	25,55	189,03	<b>210,50</b>	7,32	2,42	<b>2,74</b>	2,49	
17	<b>70,0</b>	0,94	1,03	0,91	0,98	25,66	181,52	<b>200,35</b>	7,34	2,41	<b>2,73</b>	2,47	
18	<b>70,0</b>	0,93	1,02	0,91	0,97	25,29	176,74	<b>193,99</b>	7,28	2,45	<b>2,77</b>	2,50	
media	<b>70,0</b>	<b>0,98</b>	<b>1,06</b>	<b>0,92</b>	<b>1,02</b>	<b>27,76</b>	<b>183,69</b>	<b>203,36</b>	<b>7,63</b>	<b>2,24</b>	<b>2,53</b>	<b>2,31</b>	
desvio	<b>0,0</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>1,89</b>	<b>7,83</b>	<b>10,52</b>	<b>0,26</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	
coefvar [porcet.]	<b>0,0</b>	<b>3,81</b>	<b>3,22</b>	<b>0,73</b>	<b>3,48</b>	<b>6,82</b>	<b>4,26</b>	<b>5,17</b>	<b>3,40</b>	<b>6,73</b>	<b>6,73</b>	<b>6,23</b>	

Recozida 15 Graus												
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,78	0,88	0,89	0,83	18,46	215,45	247,67	6,22	3,35	3,79	3,37
2	70	0,73	0,83	0,88	0,77	16,04	204,42	231,86	5,80	3,86	4,36	3,79
3	70	0,81	0,90	0,90	0,85	19,40	201,14	227,24	6,38	3,19	3,61	3,20
4	70	0,81	0,90	0,90	0,85	19,60	216,31	248,91	6,41	3,16	3,57	3,20
5	70	0,75	0,84	0,89	0,79	16,83	207,00	235,51	5,94	3,68	4,16	3,64
6	70	0,79	0,88	0,90	0,83	18,76	211,96	242,61	6,27	3,30	3,73	3,32
7	70	0,76	0,85	0,89	0,80	17,26	213,31	244,56	6,02	3,58	4,05	3,57
8	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,74	235,17	277,01	6,10	3,49	3,94	3,53
9	70	0,76	0,85	0,89	0,80	17,29	218,79	252,52	6,02	3,58	4,05	3,58
10	70	0,75	0,84	0,89	0,78	16,72	220,31	254,76	5,92	3,70	4,19	3,69
11	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,73	225,99	263,16	6,10	3,49	3,95	3,51
12	70	0,75	0,84	0,89	0,79	16,87	217,82	251,11	5,95	3,67	4,15	3,65
13	70	0,76	0,84	0,90	0,79	17,02	224,54	261,01	5,97	3,64	4,11	3,64
14	70	0,75	0,84	0,90	0,78	16,60	213,17	244,36	5,90	3,73	4,22	3,68
15	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,71	221,51	256,53	6,10	3,49	3,95	3,51
16	70	0,74	0,83	0,89	0,78	16,37	234,06	275,31	5,86	3,78	4,28	3,79
17	70	0,79	0,87	0,90	0,83	18,48	235,08	276,86	6,23	3,35	3,79	3,40
18	70	0,81	0,89	0,91	0,85	19,36	221,29	256,20	6,37	3,20	3,61	3,24
19	70	0,80	0,88	0,90	0,83	18,86	228,05	266,24	6,29	3,28	3,71	3,33
media	70	0,77	0,86	0,90	0,81	17,74	219,23	253,34	6,10	3,50	3,96	3,51
desvio	0	0,03	0,02	0,01	0,03	1,10	9,81	14,39	0,19	0,21	0,24	0,19
coefvar [porcet.]	0	3,30	2,77	0,72	3,16	6,21	4,48	5,68	3,10	6,14	6,14	5,37

Recozida 20 Graus												
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,77	0,86	0,89	0,80	17,45	212,95	244,05	6,05	3,54	4,01	3,53
2	70	0,81	0,90	0,90	0,84	19,30	206,03	234,13	6,36	3,21	3,63	3,22
3	70	0,83	0,92	0,91	0,87	20,55	212,27	243,06	6,57	3,01	3,41	3,06
4	70	0,79	0,88	0,90	0,83	18,80	225,91	263,04	6,28	3,29	3,72	3,34
5	70	0,81	0,89	0,90	0,85	19,35	226,09	263,31	6,37	3,20	3,62	3,25
6	70	0,91	0,99	0,92	0,94	23,86	220,05	228,51	7,08	2,59	2,93	2,66
7	70	0,87	0,95	0,91	0,91	22,17	205,47	233,34	6,82	2,79	3,16	2,85
8	70	0,90	0,97	0,92	0,93	23,27	214,91	246,88	6,99	2,66	3,01	2,74
9	70	0,89	0,96	0,92	0,92	22,86	230,18	269,45	6,92	2,71	3,06	2,80
10	70	0,87	0,95	0,92	0,90	22,05	227,71	265,73	6,80	2,81	3,17	2,89
11	70	0,88	0,95	0,92	0,91	22,25	225,04	261,76	6,83	2,78	3,14	2,86
12	70	0,90	0,98	0,92	0,93	23,57	210,15	240,01	7,03	2,62	2,97	2,70
13	70	0,90	0,97	0,92	0,93	23,42	226,85	264,45	7,01	2,64	2,99	2,74
14	70	0,89	0,98	0,92	0,93	23,36	216,13	248,65	7,00	2,65	3,00	2,73
15	70	0,87	0,95	0,92	0,90	21,92	217,63	250,83	6,78	2,82	3,19	2,89
16	70	0,90	0,98	0,92	0,93	23,55	221,51	256,52	7,03	2,63	2,97	2,72
17	70	0,90	0,98	0,92	0,93	23,48	222,56	258,07	7,02	2,63	2,98	2,73
18	70	0,84	0,92	0,91	0,88	20,84	225,68	262,70	6,61	2,97	3,36	3,04
media	70	0,86	0,94	0,91	0,90	21,78	218,28	251,92	6,75	2,86	3,24	2,93
desvio	0	0,04	0,04	0,01	0,04	1,95	8,67	12,62	0,31	0,28	0,32	0,26
coefvar [porcet.]	0	5,09	4,21	0,99	4,67	8,95	3,97	5,01	4,57	9,75	9,75	8,70

Recozida 30												
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,82	0,90	0,90	0,85	19,73	212,49	243,37	6,43	3,14	3,55	3,18
2	70	0,86	0,94	0,91	0,90	21,76	216,33	248,94	6,76	2,84	3,22	2,92
3	70	0,84	0,92	0,91	0,88	20,72	222,31	257,70	6,59	2,99	3,38	3,05
4	70	0,88	0,96	0,92	0,91	22,40	218,31	251,83	6,86	2,76	3,12	2,84
5	70	0,92	1,00	0,92	0,95	24,44	207,21	235,82	7,16	2,53	2,86	2,61
6	70	0,88	0,96	0,91	0,92	22,62	212,24	243,01	6,89	2,74	3,09	2,81
7	70	0,88	0,96	0,92	0,92	22,74	219,66	253,81	6,91	2,72	3,08	2,80
8	70	0,85	0,93	0,90	0,89	21,23	209,35	238,86	6,67	2,91	3,30	2,97
9	70	0,91	1,00	0,92	0,94	23,99	182,00	201,00	7,09	2,58	2,92	2,62
10	70	0,86	0,95	0,91	0,90	21,93	199,85	225,43	6,78	2,82	3,19	2,87
11	70	0,86	0,95	0,91	0,89	21,55	193,66	216,84	6,72	2,87	3,25	2,90
12	70	0,92	1,00	0,92	0,95	24,47	207,58	236,34	7,16	2,53	2,86	2,61
13	70	0,91	1,00	0,92	0,95	24,26	204,52	231,99	7,13	2,55	2,88	2,63
14	70	0,93	1,01	0,92	0,96	24,87	206,69	235,07	7,22	2,49	2,81	2,57
15	70	0,88	0,96	0,91	0,91	22,58	210,28	240,19	6,88	2,74	3,10	2,81
16	70	0,92	1,00	0,91	0,96	24,71	203,86	231,07	7,20	2,50	2,83	2,59
17	70	0,88	0,97	0,91	0,92	22,73	205,58	233,50	6,91	2,72	3,08	2,79
18	70	0,84	0,93	0,91	0,88	21,01	209,46	239,03	6,64	2,94	3,33	3,00
media	70	0,88	0,96	0,91	0,92	22,65	207,85	236,88	6,89	2,74	3,10	2,81
desvio	0	0,03	0,03	0,01	0,03	1,53	9,55	13,47	0,23	0,19	0,21	0,18
coefvar [porcet.]	0	3,76	3,22	0,63	3,46	6,75	4,59	5,68	3,38	6,82	6,82	6,33

Recozida 45 Graus												
no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	hf/hmax	hc [um]	Ac [um] <sup>2</sup>	Er [GPa]	E [GPa]	diag [um]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	70	0,68	0,78	0,87	0,73	14,38	220,25	254,67	5,49	4,30	4,87	4,21
2	70	0,71	0,81	0,88	0,76	15,56	208,42	237,53	5,71	3,98	4,50	3,90
3	70	0,71	0,81	0,87	0,75	15,49	211,44	241,86	5,70	3,99	4,52	3,93
4	70	0,71	0,81	0,88	0,75	15,23	209,73	239,41	5,65	4,06	4,59	3,97
5	70	0,68	0,78	0,87	0,72	14,15	210,49	240,51	5,45	4,37	4,95	4,23
6	70	0,65	0,76	0,86	0,70	13,21	214,41	246,16	5,26	4,68	5,30	4,50
7	70	0,68	0,79	0,87	0,73	14,37	209,66	239,31	5,49	4,30	4,87	4,18
8	70	0,70	0,81	0,87	0,75	15,26	208,30	237,37	5,66	4,06	4,59	3,97
9	70	0,66	0,76	0,86	0,70	13,51	213,77	245,22	5,32	4,58	5,18	4,42
10	70	0,69	0,79	0,88	0,73	14,45	217,45	250,58	5,51	4,28	4,84	4,18
11	70	0,67	0,77	0,86	0,72	13,96	212,97	244,08	5,41	4,43	5,01	4,29
12	70	0,72	0,82	0,88	0,76	15,83	219,82	254,04	5,76	3,91	4,42	3,87
13	70	0,75	0,85	0,89	0,79	17,05	214,93	246,91	5,98	3,63	4,10	3,61
14	70	0,72	0,82	0,88	0,76	15,84	212,44	243,30	5,76	3,91	4,42	3,85
15	70	0,68	0,78	0,87	0,72	14,24	209,39	238,92	5,47	4,34	4,91	4,21
16	70	0,74	0,83	0,88	0,78	16,54	211,66	242,19	5,89	3,74	4,23	3,71
17	70	0,71	0,81	0,88	0,76	15,52	212,75	243,75	5,71	3,99	4,51	3,92
18	70	0,77	0,86	0,89	0,80	17,55	213,73	245,16	6,07	3,53	3,99	3,52
media	70	0,70	0,80	0,87	0,74	15,12	212,87	243,94	5,63	4,12	4,66	4,02
desvio	0	0,03	0,03	0,01	0,03	1,19	3,55	5,14	0,22	0,32	0,36	0,27
coefvar [porcet.]	0	4,43	3,42	1,04	3,98	7,87	1,67	2,11	3,92	7,75	7,75	6,65

## APÊNDICE I – Valores obtidos de microdureza no sentido radial e comprimento após a realização do primeiro estágio

Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 0°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	230,9	229,6
2	230,3	228,3
3	229,6	227,6
4	232,8	228,8
5	229,1	229,3
6	229,4	231,6
7	228,4	230,3
8	227,1	230,1
9	229,6	229,3
10	230,2	231,6
Média	229,7	229,6

Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 15°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	300,9	308,2
2	318,6	306,3
3	322,4	303,5
4	326,4	306,6
5	330,3	308,6
6	328,5	309,8
7	330,1	308,8
8	319,6	312,7
9	325,2	318,3
10	301,3	310,6
Média	320,3	309,3

Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 20°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	253,2	276,2
2	256,4	273,4
3	255,8	274,8
4	252,6	275,6
5	259,3	279,3
6	263,4	278,4
7	262,1	275,1
8	264,8	279,8
9	260,9	278,9
10	263,3	272,2
Média	259,1	276,37

## Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 30°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	310,9	265,2
2	312,6	269,4
3	355,2	274,8
4	318,6	275,6
5	327,3	279,3
6	320,8	278,4
7	322,6	279,1
8	325,7	289,8
9	323,8	290,9
10	316,8	321,9
Média	319,4	282,4

## Resultado de Microdureza – Amostra trefilada 45°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	308,7	266,2
2	312,6	269,3
3	316,6	276,1
4	328,6	274,9
5	324,2	279,3
6	328,4	278,4
7	322,6	279,1
8	325,7	292,8
9	325,1	293,4
10	318,8	321,9
Média	321,1	283,4

## Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 0°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	235,6	244,6
2	239,2	250,3
3	234,4	252,6
4	232,8	253,8
5	239,8	252,3
6	232,4	252,6
7	228,3	253,3
8	225,2	252,7
9	229,6	252,3
10	237,2	247,8
Média	233,4	251,2

## Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 15°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	275,6	270,9
2	289,8	273,8
3	294,2	274,7
4	298,9	279,8
5	309,8	279,1
6	319,6	273,6
7	320,5	276,4
8	325,2	278,7
9	329,6	284,3
10	327,2	291,8
Média	309,1	278,3

## Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 20°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	286,6	272,1
2	295,8	275,4
3	291,2	278,3
4	297,9	277,8
5	306,9	279,1
6	301,4	276,6
7	297,5	286,1
8	295,2	283,7
9	298,6	282,3
10	295,9	281,8
Média	296,7	279,3

## Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 30°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	276,9	238,1
2	281,8	245,3
3	282,3	248,1
4	277,9	240,2
5	275,9	244,8
6	278,4	246,6
7	290,8	250,9
8	291,3	253,7
9	296,7	252,3
10	298,4	253,8
Média	285,0	247,3

## Resultado de Microdureza – Amostra Recozida 45°- Carga 50 Gramas

Pontos medidos (Hv) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Sentido Radial (1Centro a 10 Externo)	Sentido Comprimento (1Externo a 10 Interno)
1	296,7	258,1
2	291,9	265,7
3	292,6	268,9
4	297,8	260,1
5	302,9	264,9
6	322,8	260,6
7	320,7	263,9
8	319,3	265,7
9	326,7	270,3
10	308,4	273,8
Média	307,9	265,2

## Resultado de Microdureza – Amostra Recozida não deformada - Carga 50 Gramas

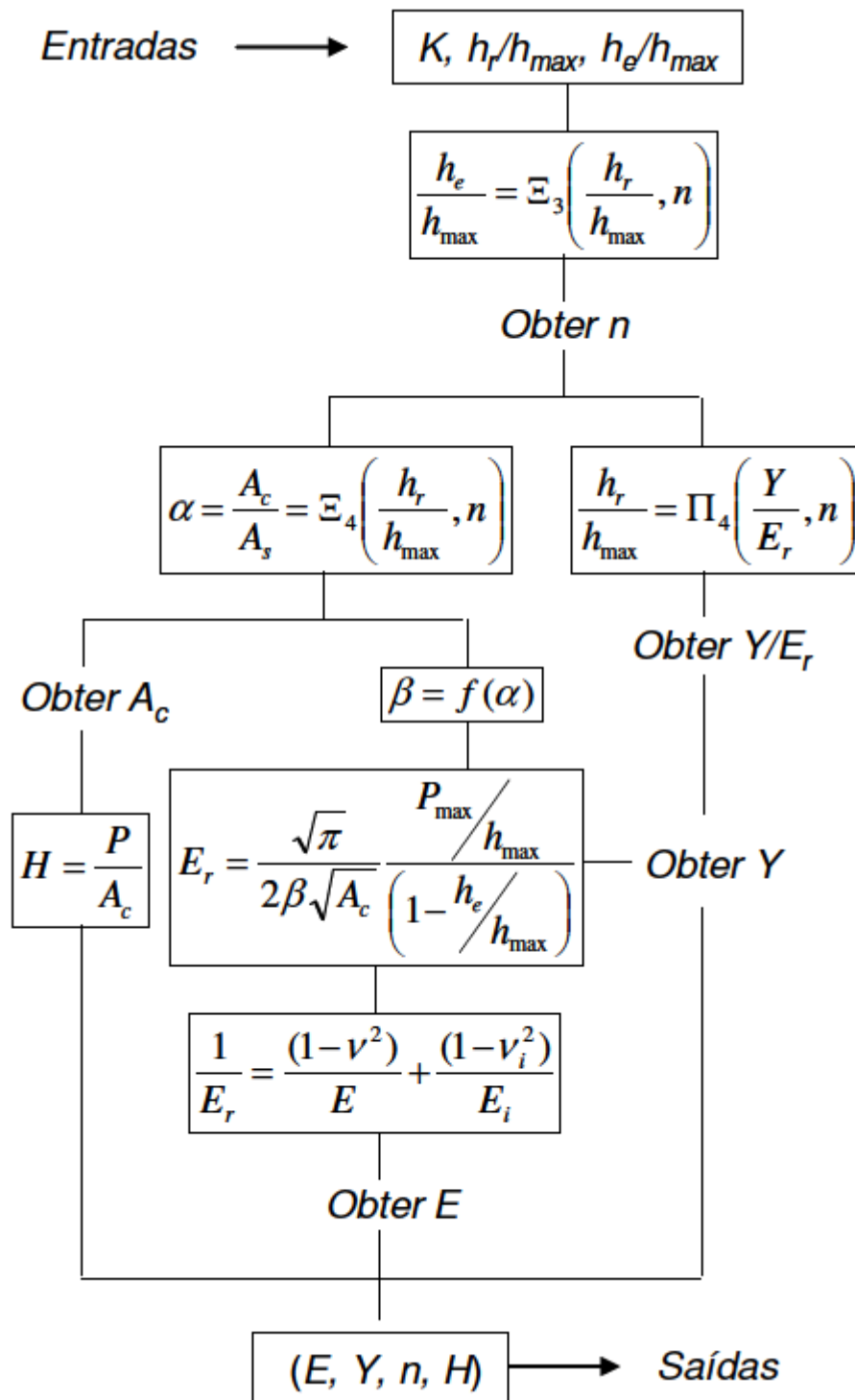
Pontos Medidos	Dureza (HV) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )
1	140,2
2	139,1
3	135,2
4	138,6
5	136,8
6	133,9
7	137,5
8	139,6
9	138,4
10	137,2
11	137,8
12	136,9
13	136,7
14	138,2
15	137,4
16	136,5
17	137,3
18	137,3
19	138,7
20	139,6
Média	137,6

## Resultado de Microdureza – Amostra Trefilada não deformada - Carga 50 Gramas

Pontos Medidos	Dureza (HV) – (Kgf/mm <sup>2</sup> )
1	269,1
2	249,4
3	240,4
4	250,7
5	226,4
6	224,4
7	255,1
8	247,4
9	238,6
10	250,1
11	243,6
12	228,9
13	231,8
14	226,9
15	252,6
16	238,9
17	245,7
18	251,7
19	249,6
20	237,8
Média	242,9

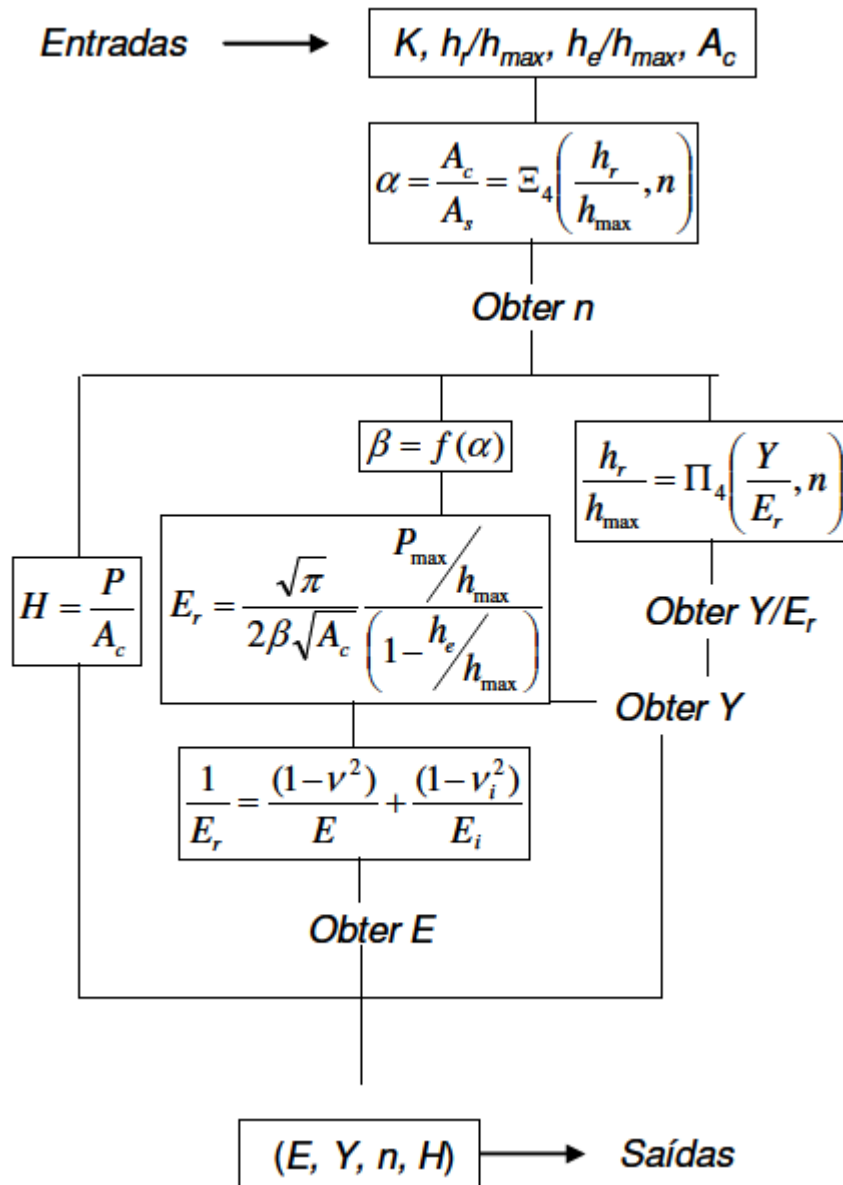
## ANEXOS

## ANEXO A – Algoritmo inverso



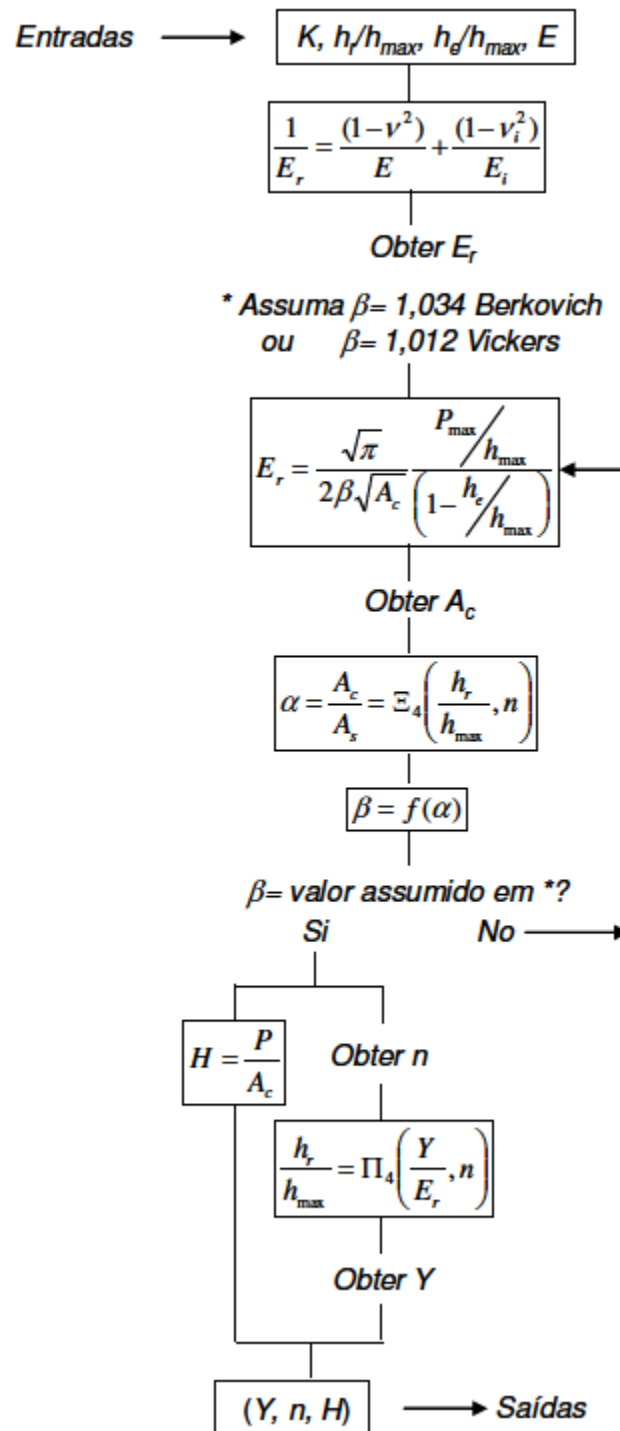
Fonte: PULECIO, 2010

Algoritmo inverso, quando conhecida a área residual de indentação



Fonte: PULECIO, 2010

Algoritmo inverso, quando conhecido o módulo elástico do material



Fonte: PULECIO, 2010

## ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO



O.S.: 02674/06-01

1/2

## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 19382/06

<b>Contratante:</b>	COMAM INDÚSTRIA LTDA.
	Av. Prefeito Alberto Moura, 200 - Sete Lagoas - MG.
<b>Solicitante:</b>	O mesmo.

**Descrições:**

<b>Instrumento:</b>	Manômetro		
<b>Marca:</b>	Famabras	<b>Identificação:</b>	MAN-003
<b>Modelo:</b>	S/m	<b>Série:</b>	S/nº
<b>Capacidade:</b>	0 a 100 ton	<b>Menor divisão:</b>	1 ton
<b>Ø do mostrador:</b>	93 mm		

**Procedimentos:** Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 revisão 02 e instrução de processo IPR-009 revisão 02.

**Norma de referência:** NBR 14105 Jun/98.

**Padrão utilizado:** Calibrador de pressão digital, marca Ascroft, nº de série AQS-8901, nosso nº MO.002, certificado nº PR-0062/03, calibrado pelo IFM em 21.01.03.

Próxima calibração: Jan/2007.

## RESULTADOS

CRESCENTE				
Indicação no Instrumento	Indicação no Padrão	Desvio Encontrado	Ue 95% (±)	Erro Total
( ton )	( ton )	( ton )	( ton )	( ton )
10	10,1	-0,1	0,2	0,3
30	30,7	-0,7	0,2	0,9
50	50,8	-0,8	0,2	1,0
70	70,7	-0,7	0,2	0,9
90	91,1	-1,1	0,2	1,3

DECRESCENTE				
Indicação no Instrumento	Indicação no Padrão	Desvio Encontrado	Ue 95% (±)	Erro Total
( ton )	( ton )	( ton )	( ton )	( ton )
10	10,2	-0,2	0,2	0,4
30	30,5	-0,5	0,2	0,7
50	50,6	-0,6	0,2	0,8
70	70,8	-0,8	0,2	1,0
90	91,0	-1,0	0,2	1,2

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições.

Classe de tolerância: A.

Erro máximo admissível para essa classe de manômetro: 1% da faixa total da escala para pontos entre 25 e 75% da faixa; 2% do total da escala para os demais pontos.



LABORATÓRIO QUALIFICADO  
PELA ANFAVEA  
NORMA ISO 17025/2001



LABORATÓRIO QUALIFICADO  
EM CONFORMIDADE  
NORMA ISO 17025/2001



ASSISTÊNCIA  
TÉCNICA ESPECIALIZADA

CALIBRATEC

Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.

Rua Doutor Nestor, 14 - Fonte Grande • CEP 32013-620 - Contagem - MG

Telefax: (31) 3398 9022 • Home-page: www.calibratec.com.br / E-mail: calibratec@terra.com.br

Unidade São Paulo - SP

Rua Djalma Dutra, 256 - Luz - CEP 01103-010 - São Paulo - SP

Fone: (11) 3326-0077 - Fax: (11) 227-7813 E-mail: calibratec@calibratec.com.br

Desde 1983

Unidade Curitiba-P

Trav. Otávio Ribas Guimarães, 91 - Vila Izabel - CEP 80320-1

Fone: (41) 3345 0022 Fax: (41) 3345 0101 E-mail: calibratec@calibratec.com.br



## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 19382/06

Nota: Instrumento calibrado sem ajuste.

Erro total = (|Desvio encontrado| + |Ue 95%|).

As incertezas declaradas são baseadas em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2$ , para um nível de confiança de aproximadamente 95%, de acordo com EA-4/02, conforme nosso procedimento PGQ-018 revisão 01.

**Condições Ambientais:**

Temperatura:  $20 \pm 2$  °C.  
Umidade relativa:  $50 \pm 10$ %.

**Considerações Finais:**

Data do recebimento: 18/07/2006.  
Data da calibração: 21/07/2006.  
Data da emissão do certificado: 23/08/2006.

LABORATÓRIO QUALIFICADO  
PELA ANFAVEA  
NORMA ISO 17025:2001



ITEM DA QUALIDADE  
EM CONFORMIDADE  
NORMA ISO 17025:2001

Thiago Machado  
Técnico Executante

Gleício Abreu  
Gerente Técnico

# CALIBRATEC

ITEM DA QUALIDADE  
CERTIFICADO PELO PMQP-100  
CONSTRUÇÃO CIVIL

ITEM DA QUALIDADE  
CERTIFICADO PELO PMQP-100  
CONSTRUÇÃO CIVIL

Assistência  
Técnica Especializada

Este certificado é válido exclusivamente para o instrumento calibrado descrito, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.

A sua reprodução total ou parcial dependerá de prévia autorização formal da Calibratec.

Este certificado está em conformidade com a norma NBR - ISO IEC-17025/2001.

Fasc/

### CALIBRATEC

Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.  
Rua Doutor Nestor, 14 - Fonte Grande • CEP 32013-620 - Contagem - MG

Telefax: (31) 3398 9022 • Home-page: [www.calibratec.com.br](http://www.calibratec.com.br) / E-mail: [calibratec@terra.com.br](mailto:calibratec@terra.com.br)

#### Unidade São Paulo - SP

Rua Djalma Dutra, 256 - Luz - CEP 01103-010 - São Paulo - SP  
Fone: (11) 3326-0077 - Fax: (11) 227-7813 E-mail: [calibratec@calibratec.com.br](mailto:calibratec@calibratec.com.br)

Desde 1983

#### Unidade Curitiba-P

Trav. Otávio Ribas Guimarães, 91 - Vila Izabel - CEP 80320-1  
Fone: (41) 3345 0077 Fax: (41) 3345 0101 E-mail: [calibratec@calibratec.com.br](mailto:calibratec@calibratec.com.br)