

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais - PPGE3M

Validação do Processo de Perfuração do Aço AISI4140 pelo Método de Puncionamento
Assistido por Simulação Numérica Comparado com Experimento Prático para Fabricação de
Eixos Vazados para Aeroogeradores

André de Jesus da Silva João

Dissertação para Obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais - PPGE3M

Validação do Processo de Perfuração do Aço AISI4140 pelo Método de Puncionamento
Assistido por Simulação Numérica Comparado com Experimento Prático para Fabricação de
Eixos Vazados para Aero geradores

André de Jesus da Silva João
Engenheiro de Produção

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS,
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais -
PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2015

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. – Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira
Escola de Engenharia/UFSC

Prof. Dr. Alexandre Milanez
Faculdade SATC

Dr. Eng^o. Alberto Moreira Guerreiro Brito
Escola de Engenharia / UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

“Não somos capazes de determinar a direção do vento...
...porém podemos ajustar nossas velas!”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, por nunca me deixar perder a fé nos momentos mais difíceis, mas principalmente, por colocar no meu caminho, pessoas tão especiais que não só me enriqueceram com seus exemplos de vida, como também me ajudaram a crescer e, com certeza, me fizeram hoje uma pessoa melhor.

Aos meus pais Waldir e Marli por sempre confiarem na força e no poder de transformação do estudo, também por acreditarem no meu potencial como profissional e engenheiro pesquisador.

À minha irmã Andréia pelos anos em que aprendi a dividir e compartilhar momentos familiares e de amizade, mesmo que hoje tenhamos pouco tempo de convivência.

Aos meus sobrinhos Alisson e Adriel, por não me deixarem perder a visão e a ingenuidade de ver o mundo como uma criança, sendo este o primeiro passo para ir a busca das respostas que o universo tem a nos oferecer.

À minha namorada, amante, companheira e amiga Jaqueline pela compreensão, apoio, amor, carinho e por, mesmo nos únicos momentos que possuímos juntos, abrir mão de horas e finais de semana para que eu pudesse concluir este trabalho.

Ao Professor Dr. - Ing. Lírío Schaeffer pela confiança e por propiciar um intenso conhecimento a respeito dos processos de fabricação metalúrgicos, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao Centro de Tecnologia e o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) por disponibilizar uma infra-estrutura de excelência e reconhecida na área de pesquisa.

Aos Pós Doutorandos Alexandre Polozine e Karime Ferreira cujas idéias, discussões e convivência apenas enriqueceram minha visão sobre a vida e o mundo.

Ao Doutor Alberto Guerreiro Moreira de Brito, pelos inestimáveis conselhos e observações ao longo deste projeto de pesquisa.

Aos Mestres Engenheiros Vinícius Martins, Fábio Junkes Corrêa, Dafne Waszak, Glaydson Simões Lopes, pelas valiosas contribuições além da motivação, descontração e convivência.

Aos Tecnólogos André Tavares, Diego Wermuth, Paulo Boesch e Diego Abich pelas inestimáveis contribuições nas atividades relacionadas com o trabalho como um todo.

Aos Graduandos Marcéu Heinzmann, André Rosiak e Raíssa Caldas pelas incontáveis vezes em que necessitei de auxílio e pude contar com o interesse e boa vontade, não apenas de ajudar, mas também onde aprendi ao mesmo tempo em que tentei ensinar o pouco conhecimento que possuo da melhor forma possível.

Aos Técnicos Marco Aurélio Villanova e Luís Eduardo Pilow, por realizarem de forma tão profissional um trabalho técnico, com extrema dedicação, inclusive muitas vezes como conselheiros.

Aos Técnicos em Mecânica José Carlos Araújo e Eletrotécnica Rudinei Melo pela pronta disposição e auxílio cujos quais foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

Ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro tanto ao projeto quanto ao auxílio de custo, sem os quais não poderia dedicar tempo exclusivamente para a conclusão deste trabalho.

Às empresas colaboradoras Favorit Aços Especiais, Villares Metals S.A. e em especial à Polimold por, de forma tão generosa, contribuírem para enriquecer o presente trabalho.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com objetivo de analisar, comparar e validar, pelos métodos de simulação numérica e experimental, o comportamento do processo de perfuração por puncionamento para o aço AISI4140. Esse estudo será a base para a fabricação de eixos vazados em aerogeradores de energia como, em substituição a eixos maciços usualmente obtidos por fundição. O processo de perfuração por puncionamento é relativamente simples quando comparado com processos de perfuração mais elaborados, como cortes à laser, eletroerosão, usinagem, etc. No desenvolvimento e otimização do processo de perfuração para aplicação nos referidos eixos, surge, como auxílio, o processo de perfuração por puncionamento assistido por simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos - FEM. Neste estudo os corpos de prova, os punções e todo ferramental do processo de perfuração em si, foram modelados computacionalmente no “software” “*Simufact.Forming 12.0*”, avaliando-se as melhores formas e geometrias dos punções para o processo de puncionamento. Na simulação numérica foi utilizado o aço presente na biblioteca do referido “software” que corresponde ao aço AISI4140. Os resultados presentes na análise do processo computacional de perfuração por puncionamento mostraram que os punções de geometria estreita são os que apresentaram as menores forças para perfuração dos corpos de prova quando comparados às outras geometrias (denominadas de inclinada e pontuda). Para os estudos experimentais, o ferramental proposto foi confeccionado e montado para a devida comparação com os resultados obtidos a partir da simulação computacional. Os experimentos práticos bem como as simulações computacionais, foram montados para corpos de prova cilíndricos a 1100 °C sendo perfurados por punções a uma velocidade de 3,7 mm/s. De acordo com os dados de força e deslocamento medidos pelo equipamento de aquisição de dados, pela célula de carga e pelo transdutor potenciométrico (LVDT), pôde-se realizar uma análise e estimativa das forças máximas que cada punção exerceu sobre as peças puncionadas. Os resultados das simulações computacionais demonstraram uma variação de 14% a 23% maiores das forças máximas de puncionamento, quando comparadas com as experimentais. Este resultado mostra que o “software” de simulação computacional pode prever, com boa aproximação, a força máxima de perfuração por puncionamento dos punções com diferentes formas e geometrias. O processo de perfuração por puncionamento pode ser considerado uma forma alternativa de perfuração para confecção de furos em corpos cilíndricos que, posteriormente, serão usados para manufatura de eixos vazados pelo processo de forjamento em matriz aberta.

Palavras Chaves: Puncionamento, Perfuração, Simulação Numérica, FEM, AISI4140.

ABSTRACT

This work was developed in order to analyze, compare and validate the methods of numerical and experimental simulation, the behavior of punching a punching process for AISI4140 steel. This study will be the basis for the manufacture of hollow shafts in wind turbine energy as a substitute for solid shafts usually obtained by casting. The puncturing by puncturing process is relatively simple compared to more elaborate drilling processes such as laser cutting, spark erosion, machining, etc. The development and optimization of the drilling process for use in these axes, emerges as an aid, the drilling process by punching assisted by computer simulation by Finite Element Method - FEM. In this study the samples, the punches and tooling throughout the drilling process itself, were computationally modeled on the "software" "Simufact.Forming 12.0", evaluating the best ways and geometries of the punches for the punching process. In numerical simulation was used this steel in the library of that "software" which is the AISI4140 steel. The results presented in the analysis of the computational process of drilling by punctionamento shown that close geometry punctures are those who had the lowest forces for drilling of the specimens when compared to other geometries (called inclined and pointed). For experimental studies, the proposed tooling was made and assembled for due comparison with the results obtained from computer simulation. Practical experiments and computer simulations were assembled cylindrical specimens at 1100 ° C being pierced by a punch of 3.7 mm / s. According to the data of force and displacement measured by the data acquisition equipment, the load cell and the potentiometric transducer (LVDT), it was possible to conduct an analysis and estimate of the maximum forces exerted on each punch punched parts. The results of computer simulations have demonstrated a variation of 14% to 23% higher maximum puncture forces of, when compared with the experimental. This result shows that the "software" of computer simulation can predict with good approximation, the maximum force of drilling by punching the punches of different shapes and geometries. The punching process for punching can be considered an alternative form of drill for making holes in cylindrical objects, which subsequently will be used to manufacture hollow shafts by forging process in an open array.

Key Words: Punching, Drilling, Numerical Simulation, FEM, AISI4140.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE ABREVIACÕES	15
LISTA DE SÍMBOLOS	16
LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Considerações Iniciais	18
1.2 Justificativa e Objetivos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Considerações Iniciais	22
2.2 Energias Renováveis	22
2.3 Aerogeradores de Energia.....	22
2.4 Aplicação de Eixos Vazados em Aerogeradores	25
2.5 Considerações Sobre os Processos de Fabricação	26
2.5.1 Conformação Mecânica - Forjamento	26
2.5.2 Tensão e Deformação de Aços e Ligas.....	28
2.5.3 Velocidade de Deformação	30
2.5.4 Curva de Escoamento	30
2.5.5 Importância do Coeficiente de Atrito	34
2.5.6 Equação de Cálculo da Perda Térmica	35
2.5.7 Considerações Sobre o Processo de Puncionamento.....	35
2.5.8 Perfuração por Cisalhamento	38
2.6 Cálculo Analítico da Força de Perfuração por Cisalhamento.....	44
2.7 Características do Aço AISI4140.....	45
2.8 Simulação Numérica - Modelo Matemático	46
2.8.1 Método dos Elementos Finitos - FEM.....	46

2.8.2	Trabalhos Realizados no LdTM com Simulação Numérica pelo FEM.....	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	50
3.1	Considerações Iniciais	50
3.2	Determinação da Curva de Escoamento	50
3.3	Parâmetros e Cálculo Analítico da Força de Puncionamento	53
3.4	Parâmetros de Simulação Computacional do Processo de Puncionamento	54
3.5	Experimento Prático de Perfuração por Puncionamento	59
3.6	Determinação Teórica e Prática da Perda Térmica no Puncionamento	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1	Considerações Iniciais	69
4.2	Determinação Experimental da Curva de Escoamento do Aço AISI4140.....	69
4.3	Simulação Numérica para o Processo de Puncionamento	71
4.4	Cálculo Analítico da Força de Puncionamento.....	80
4.5	Experimento Prático de Perfuração por Puncionamento	81
4.6	Comparações das Forças Máximas de Perfuração por Puncionamento	83
5	CONCLUSÕES	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
7	BIBLIOGRAFIA	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trabalhos Base para o Forjamento em Matriz Aberta no LdTM.	21
Figura 2: Principais Componentes de um Aerogerador.....	23
Figura 3: Geração de Energia Anual <i>Offshore</i> (MW).	24
Figura 4: Eixo Maciço Aplicado em Aerogeradores.	25
Figura 5: Esforço de Conformação Mecânica na Dimensão “z”.	30
Figura 6: Ensaio de Compressão. Adaptado de.	31
Figura 7: Tensão de Escoamento <i>versus</i> Deformação Verdadeira (LIN, 2008; 2009).	32
Figura 8: Curva de Escoamento - $\varphi = 0,1 \text{ s}^{-1}$	33
Figura 9: Curva de Escoamento - $\varphi = 1,0 \text{ s}^{-1}$	33
Figura 10: Curva de Escoamento – “ <i>Software Simufact. Forming 12.0</i> ” para $\varphi = 1,6 \text{ s}^{-1}$	34
Figura 11: Tipos de Processo para Fabricação de Furos. Adaptado de.....	36
Figura 12: Força de Perfuração “ <i>versus</i> ” Deslocamento.....	38
Figura 13: Puncionamento - Início do Processo.	39
Figura 14: Início da Deformação	40
Figura 15: Limite de Ruptura.....	41
Figura 16: Ruptura e Fases do Puncionamento.....	41
Figura 17: Ilustração das Zonas de Puncionamento.....	42
Figura 18: Comparação – Zona de Cisalhamento x Zona de Ruptura.	43
Figura 19: Relação de Punção x Corpo de Prova para Cálculo Empírico da Força para Puncionamento.....	44
Figura 20: (a) Célula de Carga e (b) Transdutor Potenciométrico - LVDT.	50
Figura 21: Experimento Determinação Curva de Escoamento - AISI4140	51
Figura 22: Matrizes para Ensaio de Compressão	51
Figura 23: Corpos de Prova - Ensaio de Compressão	52
Figura 24: Corpo de Prova Modelado - Simufact Forming 12.0	56
Figura 25: Punções com Geometria Estreita e Diferentes Ângulos	56

Figura 26: Punções com Geometria Inclínada e Diferentes Ângulos.....	57
Figura 27: Punções com Geometria Pontuda e Diferentes Ângulos	57
Figura 28: Matriz Inferior (Inserto).....	58
Figura 29: Fixador da Matriz Inferior e Matriz Inferior Posicionada	58
Figura 30: Montagem do Processo para Simulação Computacional.....	59
Figura 31: Corpo de Prova para Experimento de Puncionamento	60
Figura 32: Matriz Inferior (Inserto) - Experimento Prático de Puncionamento	60
Figura 33: Punção Estreito - Experimento Prático de Puncionamento	61
Figura 34: Placa Extratora - Experimento Prático	61
Figura 35: Pino Guia de Alinhamento das Matrizes	62
Figura 36: Mola Carga Extra Pesada - Modelo G25-076 - cortesia polimold S/A	62
Figura 37: Vista Explodida do Experimento Prático de Perfuração por Puncionamento	63
Figura 38: Esquema da Montagem Experimental para Processo de Puncionamento	64
Figura 39: Gráfico da Temperatura pela Equação de Perda Térmica - Teórica	67
Figura 40: Gráfico da Temperatura pela Medida com Termopares - Experimental	67
Figura 41: Curva de Escoamento – Tensão de Escoamento x Deformação Verdadeira - Aço AISI4140.....	71
Figura 42: Forças Máximas de Perfuração “ <i>versus</i> ” Geometrias dos Punções	72
Figura 43: Força x Deslocamento - Punção Estreito - Simulação Computacional	73
Figura 44: Força x Deslocamento - Punção Inclínado - Simulação Computacional.....	74
Figura 45: Força x Deslocamento – Punção Pontudo - Simulação Computacional.....	74
Figura 46: Deformação Equivalente - Ângulo de 05°	75
Figura 47: Deformação Equivalente - Ângulo de 10°	76
Figura 48: Deformação Equivalente - Ângulo de 15°	77
Figura 49: Deformação Equivalente - Ângulo de 20°	78
Figura 50: Deformação Equivalente - Ângulo de 25°	79
Figura 51: Gráfico de Força x Deslocamento - Experimental - Geometria Estreita	81

Figura 52: Miolo Expurgado – Zonas de Fratura e Cisalhamento	82
Figura 53: Corpos de Prova após Experimento Prático.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros Matemáticos - Curva de Escoamento do Aço AISI4140	32
Tabela 2: Elementos que compõe a liga de Aço SAE 4140	45
Tabela 3: Parâmetros para Obtenção da Curva de Escoamento - AISI4140	52
Tabela 4: Dados para Cálculo da Força Empírica de Puncionamento	53
Tabela 5: Parâmetros de Simulação Numérica	55
Tabela 6: Parâmetros do Procedimento Experimental	65
Tabela 7: Parâmetros - Cálculo de Perda Térmica	65
Tabela 8: Dados da Altura Instantânea " h_i " Área Instantânea " A_i " e da Força " F " Aplicada ..	69
Tabela 9: Dados para Construção da Curva de Escoamento do Aço AISI4140	70
Tabela 10: Forças Máximas – Geometrias e Ângulos dos Punções.....	72
Tabela 11: Forças Máximas - Puncionamento Experimental	82
Tabela 12: Diferenças entre Forças de Puncionamento - Analítica x Simulada x Prática	83

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	Acessórios Serviços Técnicos Metalúrgicos
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EDO	Equação Diferencial Ordinária
FAPERGS	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FMA	Forjamento em Matriz Aberta
FMF	Forjamento em Matriz Fechada
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
FEM	Finite Elements Method (Método dos Elementos Finitos)
TEP	Teoria Elementar da Plasticidade
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A: Área	mm ²
A ₀ : Secção inicial antes da conformação	mm ²
A _i : Secção instantânea durante a deformação	mm ²
A _p : Secção do punção	mm ²
A _s : Área superficial de contato entre punção e matriz	mm ²
b ₀ : Largura inicial do corpo de prova	mm
b _f : Largura final do corpo de prova	mm
c: Constante do material na curva de escoamento.	MPa
c _p : Calor específico do aço	kJ/kg.°C
d ₀ : Diâmetro da geratriz	mm
d _f : Diâmetro final após a deformação	mm
d _p : Diâmetro do punção	mm
D _p : Diâmetro total da peça puncionada	mm
F: Força	N
I: Coeficiente de transferência de calor por irradiação	W/m ² .K
h: Altura do corpo de prova	mm
h _i : Altura instantânea do corpo de prova	mm
k: Coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m ² .K
k _f : Tensão de escoamento do material	MPa
k _{f0} : Tensão de escoamento inicial do material	MPa
k _{fm} : Tensão de escoamento média	MPa
l ₀ : Comprimento inicial do corpo de prova	mm
l _f : Comprimento final do corpo de prova	mm
m ₁ : Constante matemática usada na curva de escoamento	_____
m ₂ : Constante matemática usada na curva de escoamento	_____
m ₃ : Constante matemática usada na curva de escoamento	_____
m ₄ : Constante matemática usada na curva de escoamento	_____
n: Coeficiente de encruamento do material	_____
P: Pressão	Pa
Q _s : Perda térmica por unidade de tempo	kJ/s
S _w : Curso do punção	mm
V ₀ : Volume inicial do corpo de prova	mm ³
V _f : Volume final do corpo de prova	mm ³

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\dot{\phi}$: Velocidade de deformação	s^{-1}
μ : Coeficiente de atrito	————
α_0 : ângulo de folga da ferramenta	$^{\circ}$ (graus)
γ_0 : ângulo de saída da ferramenta	$^{\circ}$ (graus)
Δf : Folga radial entre matriz inferior e punção	$^{\circ}$ (graus)
$\Delta \vartheta$: Variação da temperatura	$^{\circ}C$
δ : Constante de irradiação	$kJ/(m^2.K^4)$
ε : Emissividade	————
η_1 : Constante empírica para adaptação de curvas experimentais	————
η_2 : Constante empírica para adaptação de curvas experimentais	————
η_3 : Constante empírica para adaptação de curvas experimentais	————
ϑ : Temperatura absoluta do corpo de prova	$^{\circ}C$
ϑ_f : Temperatura final do corpo de prova	$^{\circ}C$
ϑ_m : Temperatura na ferramenta	$^{\circ}C$
ϑ_p : Temperatura na peça	$^{\circ}C$
ρ : Densidade do material	kg/m^3
σ : Tensão de escoamento	MPa
σ_{eq} : Tensão de escoamento equivalente	MPa
σ_x : Tensão na direção do eixo x	MPa
σ_y : Tensão na direção do eixo y	MPa
σ_z : Tensão na direção do eixo z	MPa
v : Velocidade da ferramenta	mm/s
v_f : Velocidade final da ferramenta	mm/s
φ : Deformação verdadeira	————
φ_b : Deformação verdadeira na largura	————
φ_{eq} : Deformação verdadeira equivalente	————
φ_h : Deformação verdadeira na altura	————
φ_l : Deformação verdadeira no comprimento	————
φ_x : Deformação verdadeira na direção do eixo x	————
φ_y : Deformação verdadeira na direção do eixo y	————
φ_z : Deformação verdadeira na direção do eixo z	————
τ_c : Tensão de cisalhamento	MPa

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os temas relacionados à preservação ambiental e em atividades sustentáveis pelas organizações mundiais são preocupações crescentes, dado o risco de contaminação e acidentes presentes em plantas de fonte de prospecção de energia fóssil e plantas de energia nuclear. Assim, o interesse e investimento, em outras fontes de energia, sendo estas as chamadas energias limpas ou renováveis, têm aumentado com o propósito de substituir as fontes de energia provenientes do petróleo, conhecida como fonte de combustível fóssil.

Existem diversas fontes de energias renováveis que podem ser citadas, como por exemplo, a energia eólica, energia solar, energia hídrica, energia geotérmica e a energia de biomassa, como alternativas. Dentre estas, a energia eólica pode ser destacada como uma das principais energias com pesquisas de desenvolvimento ao longo dos últimos anos, por ter a seu favor, a emissão zero de poluentes e por, principalmente aqui no Brasil, possuir muitos potenciais pontos geográficos para instalação de um complexo de aerogeradores, conhecidos como campos eólicos.

Em pesquisas para implantação de parques eólicos, não basta apenas ter uma grande área para instalação destes equipamentos, pois se faz necessário um estudo de campo sobre as principais condições climáticas deste local, principalmente um estudo sobre a frequência e velocidade dos ventos. Com isso é possível estimar o potencial de geração de energia eólica e decidir a viabilidade econômica do investimento em uma área para este fim. No entanto, mesmo com condições favoráveis à instalação de um campo eólico, a produção dos aerogeradores modernos de maior porte somente será viável se seus componentes também utilizarem elementos de máquinas de grande porte. Visto que estes equipamentos de geração eólica possuem componentes cujos pesos podem chegar a toneladas, logo, deve-se utilizar processos de fabricação como, por exemplo, fundição para fabricação, forjamento para melhorar as propriedades físicas e usinagem para dar o acabamento final, bem como melhorar a forma e geometria.

Os processos de fabricação que melhoram as características físicas e químicas dos produtos, bem como reduzem os custos envolvidos vêm progredindo com o avanço da tecnologia empregada nas indústrias. O desafio torna-se manter, ou melhorar a qualidade do produto final oferecido ao mercado, ao mesmo passo que se pretende diminuir os gastos ao longo da cadeia produtiva, aumentando-se assim a eficiência do ambiente fabril.

Desta forma é essencial que as indústrias foquem o investimento em pesquisas voltadas a melhorar os seus próprios processos de fabricação. Ao mesmo passo torna-se importante a aplicação de modelos matemáticos de forma a simular as condições destes processos; tanto do experimento quanto análise dos resultados obtidos comparados com o processo real.

A grande vantagem de simular um processo ou uma sucessão de processos é aperfeiçoar o uso dos recursos industriais, melhorando o nível de aprendizado com certos parâmetros e resultados não previstos garantindo assim, um melhor entendimento do processo em questão bem como melhorar a eficácia das condições fabris e parâmetros a serem controlados identificando quais são os mais críticos, sendo estes os que devem receber maior atenção para que o experimento alcance os resultados esperados.

Como forma de melhorar e prever os possíveis problemas e resultados dos processos de manufatura utiliza-se o modelamento matemático por simulação numérica, de modo a identificar quais são os pontos a serem melhorados com maior propriedade. Visa-se assim, manter o processo controlado, ou seja, em que os possíveis erros e problemas em um determinado processo ou conjunto de processos, de um produto a outro, possam ser previstos evitando desperdícios tanto de matéria-prima, quanto de desgaste de ferramental.

1.2 Justificativa e Objetivos

O projeto foi desenvolvido em parceria entre o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil; e o Instituto de Conformação Mecânica (IBF) da Universidade Técnica de Aachen (RWTH), Alemanha intitulado “*Bulk Metal Formed Parts for Power Plants*” pertencendo ao programa de cooperação “Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura” – BRAGECRIM.

A parte brasileira responsável pelos estudos foi o LdTM, no Centro de Tecnologia situado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. A instituição Alemã, responsável pela outra parte do projeto de cooperação, ficou a cargo da Universidade de Aachen. A principal meta foi avaliar qualitativa e quantitativamente, os erros apresentados ao longo do processo experimental comparado à simulação numérica.

O objetivo desta pesquisa é a análise, o desenvolvimento e a validação do processo de perfuração por punção para fabricação de eixos vazados para aplicação em aerogeradores de energia, com o intuito de reduzir significativamente o peso destes eixos e,

consequentemente evitar o desperdício de material quando comparados com os processos de fabricação de eixos maciços forjados ou fundidos, que são atualmente fabricados para estes equipamentos.

As primeiras fases de pesquisa deste projeto foram realizadas dentro do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) pertencente ao Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) focadas na conformação mecânica em matriz aberta em peças sólidas de 20kg e peças vazadas de 1kg. Estes estudos, iniciais, utilizaram simulações numéricas pelo método de elementos finitos realizadas no “*software*” PEP/Lastram. Posteriormente este “*software*” foi substituído pelo “*software*” de simulação numérica também por elementos finitos “*Simufact Forming 12.0*”. Alguns ensaios mecânicos com o material em estudo (AISI4140) foram fundamentais para o prosseguimento e um bom desenvolvimento deste trabalho, como o ensaio do anel para determinação do coeficiente de atrito e os ensaios a quente para determinação da curva de escoamento.

Em seguida foram dimensionados os eixos vazados para aplicação em aerogeradores com o intuito de se estudar o procedimento de perfuração por puncionamento em escala comparado com o eixo efetivo em utilização. Com o objetivo de aperfeiçoar o processo de puncionamento, foram tomados como base em alguns trabalhos em literatura acadêmica e em alguns experimentos de menor escala (mesmos procedimentos, porém tamanhos menores). As ferramentas utilizadas para este procedimento experimental foram punções com geometrias e ângulos de suas pontas bem definidos, de acordo com os resultados das simulações, bem como o inserto - matriz inferior - (este com ângulo de saída bem definido), a matriz superior (com fixação para os punções) e o suporte com fixação para a matriz inferior (inserto).

Para o desenvolvimento, construção do modelo matemático, elaboração das simulações e análise dos resultados pelo “*software*” de simulação numérica, foi fundamental a utilização do “*software*” de desenho e suporte gráfico “*Solid Works*”, onde posteriormente os modelos projetados foram exportados para dentro do “*software*” de simulação. Com base em estudos anteriores sobre a perfuração por puncionamento e alguns cálculos de esforços em conformação, foram escolhidas algumas possíveis geometrias ótimas de punções para utilização neste processo. Alguns resultados prévios de esforços obtidos pelas simulações se demonstraram satisfatórios quando comparados com a literatura pesquisada previamente.

De posse destes resultados iniciais via simulação numérica, o objetivo principal deste trabalho é investigar quais os principais parâmetros que influenciam o processo de perfuração por puncionamento e, da mesma forma, desenvolver e melhorar um processo experimental

que seja capaz de ser implantando em uma possível manufatura seriada destes eixos. A vantagem de avaliar um processo por meio de simulações computacionais é evitar os muitos gastos, desperdícios e tempo que um ambiente industrial demandaria por meio de um processo de tentativa e erros. O esquema apresentado na Figura 1 ilustra os trabalhos realizados e em andamento dentro do projeto BRAGECRIM pelo LdTM:

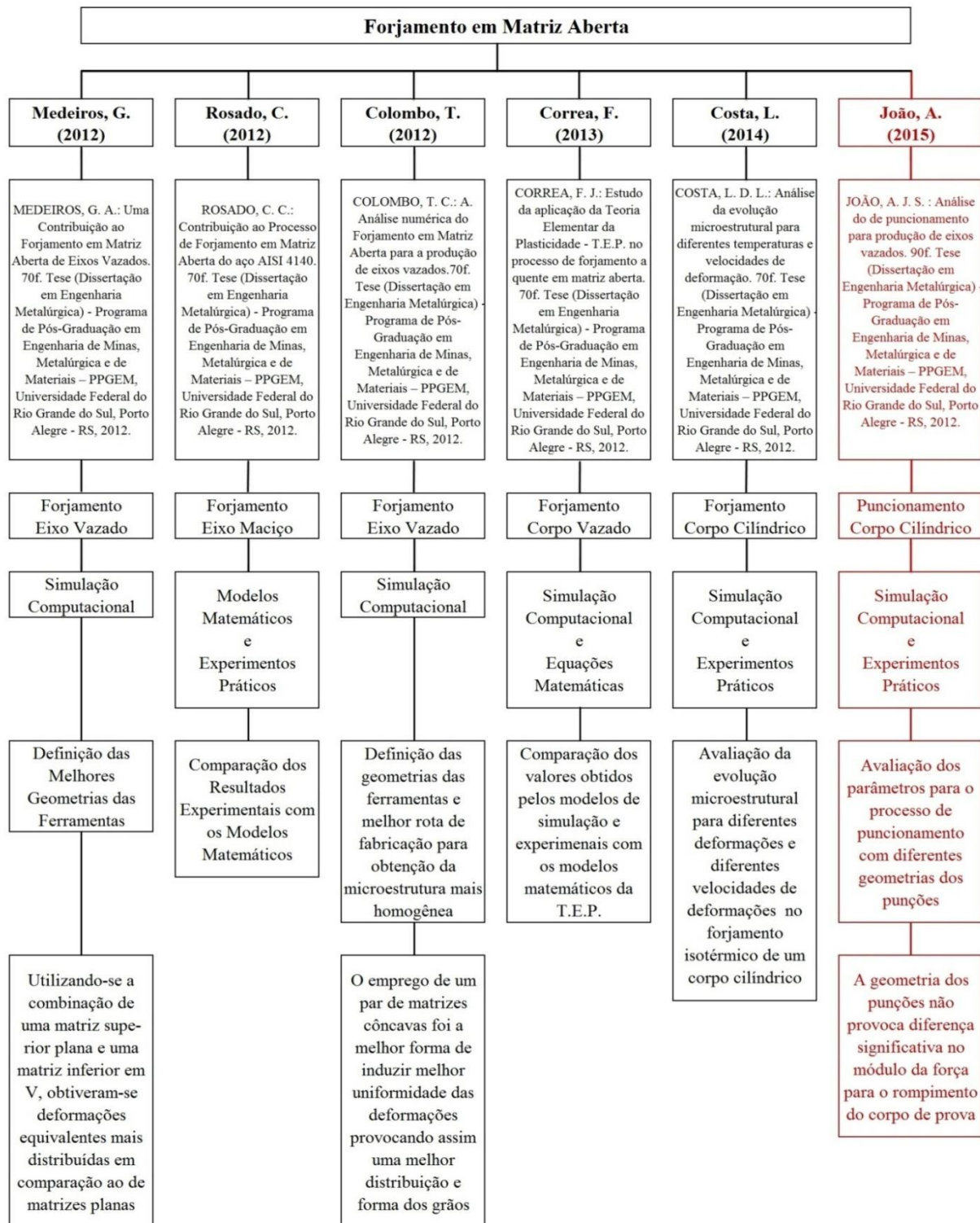


Figura 1: Trabalhos Base para o Forjamento em Matriz Aberta no LdTM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Para um melhor entendimento e compreensão das técnicas e procedimentos utilizados, neste capítulo serão expostas algumas fundamentações teóricas, sem as quais não seria possível a condução e a conclusão deste estudo.

2.2 Energias Renováveis

Num contexto recente, cada vez mais indústrias e empresas buscam o reconhecimento em frente aos seus fornecedores, clientes e no próprio meio de convívio social em que se encontram de serem consideradas como uma organização sustentável e ambientalmente correta com relação ao consumo consciente dos recursos naturais do planeta. Destes recursos, as fontes de energias mais limpas com menor geração de resíduos são uma ótima alternativa quando comparados com as fontes tradicionais [TONG, 2000].

2.3 Aerogeradores de Energia

Em comparação às diversas formas de energias limpas e renováveis, a energia eólica surge como uma opção que oferece inúmeras vantagens e benefícios, principalmente quando se compara esta com as fontes de energia tradicionais, como por exemplo, os combustíveis derivados do petróleo, ou melhor, combustíveis fósseis. Estas fontes emitem gases poluentes na atmosfera e, quando ocorre algum acidente em sua prospecção, poluem grandes áreas mar aberto contaminando e dizimando muitas espécies da fauna e da flora. Outro exemplo de fontes de energia tradicionais é a energia nuclear, que além de envolver materiais radioativos na produção de energia elétrica, quando ocorre algum acidente em uma planta deste tipo, pode vir a se tornar uma tragédia ambiental por contaminação radioativa.

Os aerogeradores de energia são máquinas eletromecânicas que transformam a energia da força do vento em energia elétrica. A utilização deste dispositivo para geração de eletricidade, não é algo novo, pois o primeiro gerador que se tem notícia foi um projeto de Charles Brush em 1888. Este aerogerador operava de maneira automática e sua construção continha 144 lâminas de cedro e possuía 17m de diâmetro de rotação. Alguns registros da época constam que este equipamento era capaz de gerar picos de até 12 kW. Porém o conceito dos aerogeradores que se têm hoje foram apresentados e desenvolvidos somente na década de 50. O aerogerador Gedser, cuja potência máxima era de 200 kW, foi apresentado em 1957 cuja estrutura principal era formada por uma torre tubular que sustentava de duas a três pás a favor do vento ligadas a um eixo horizontal. A partir deste modelo foi que se iniciaram inúmeros

estudos por pressão das organizações mundiais pelo desenvolvimento de fontes de energias renováveis [HANSEN, 2012; HAU, 2006; TONG, 2010].

O funcionamento dos aerogeradores de energia de uma forma geral é bem simples, a energia cinética proveniente dos ventos ou de uma massa de ar qualquer incide sobre as pás dos mesmos. Estas pás, com formato e design aerodinâmico, movem-se em sentido circular girando o eixo central a baixa rotação, que se encontra acoplado a elas no centro do dispositivo. Este eixo, ao girar, transforma a energia cinética em energia mecânica. Conectado a uma caixa de engrenagens multiplicadora de velocidade encontra-se um segundo eixo (à alta rotação) que está, também, conectado a um gerador elétrico transformando, enfim, a energia mecânica em energia elétrica [HANSEN, 2012; HAU, 2006; RENERGY, 2011].

Para fins de ilustração, é possível observar na Figura 2 alguns dos componentes responsáveis pela transformação de energia eólica em energia elétrica. Nesta figura é possível observar as peças e, entender o funcionamento dos aerogeradores de energia [MANWELL, 2002].

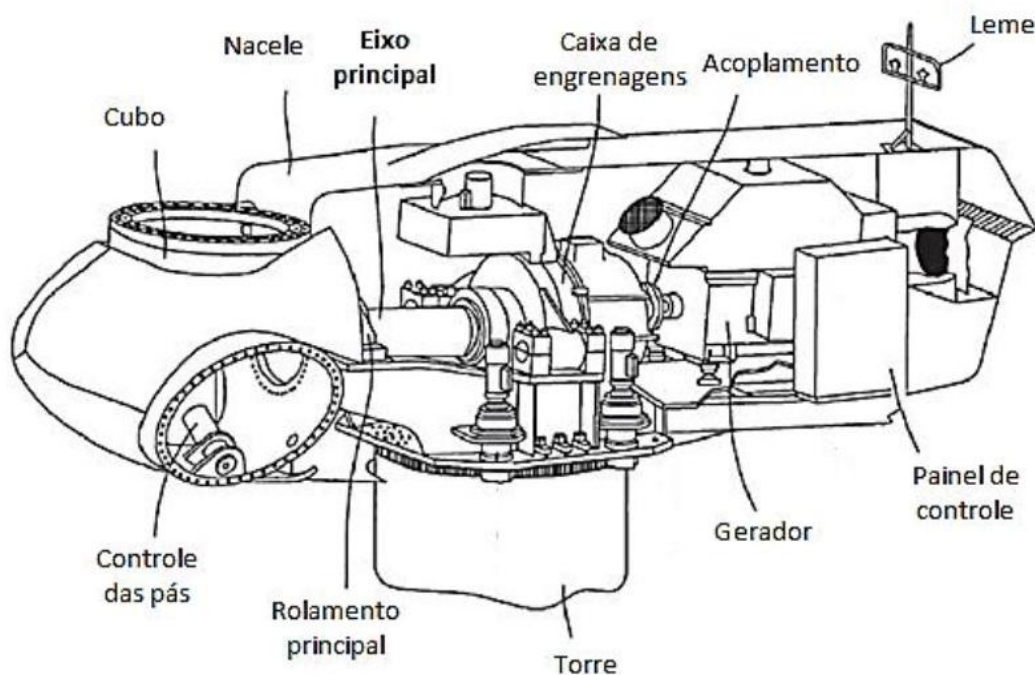


Figura 2: Principais Componentes de um Aerogerador. Adaptado de [TONG, 2010].

Com a evolução da indústria e melhoria dos processos de fabricação, foi possível reduzir, gradativamente, o custo de fabricação dos equipamentos de geração de energia eólica e, conseqüentemente plantas eólicas em determinadas regiões. Com isso, a exploração de energia eólica começou a se tornar competitiva em frente às fontes de energia tradicionais, mesmo sem conseqüências governamentais, como por exemplo, isenção de impostos, redução de

taxas para produção deste tipo de equipamento, dentre outros incentivos fiscais. Em contrapartida, ainda não é possível o armazenamento de energia de forma eficaz quando comparados com as fontes tradicionais de energia [MANWELL, 2002].

O desenvolvimento da tecnologia de novos materiais ao longo das últimas décadas elevou significativamente a potência dos aerogeradores de energia de 25 kW nos anos 90 para aproximadamente de 1 a 6 MW nos dias atuais. No desenvolvimento de aerogeradores de grande porte, a potência estimada é de 7 a 10 MW. Uma das alternativas para instalação de campos de geração de energia eólica é em áreas de alto mar, também conhecidos, na terminação inglesa, como “*offshore*” ilustrado na Figura 3. Estudos mostraram que a velocidade dos ventos chega a ser, em média, 20% maior em alto mar do que em campos abertos localizados no continente terrestre [TONG, 2010].

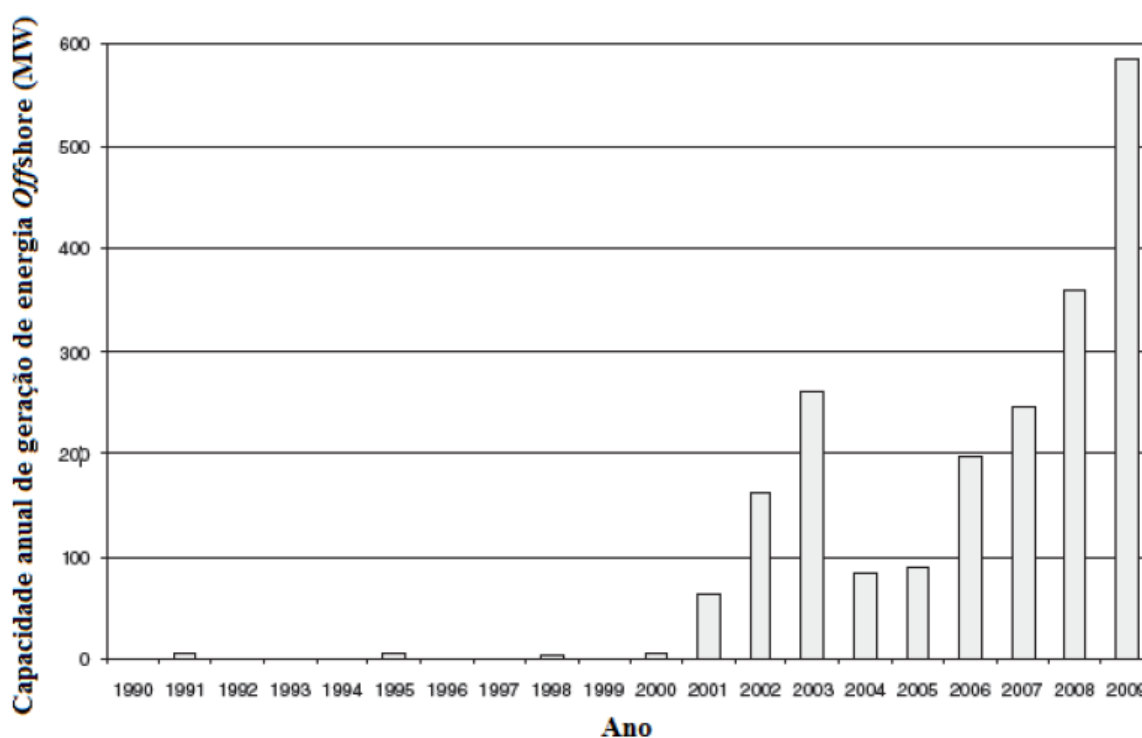


Figura 3: Geração de Energia Anual *Offshore* (MW). Adaptado de [TONG, 2010].

Em se tratando do desenvolvimento energético no Brasil, é fundamental o investimento para o desenvolvimento de novas fontes de energias renováveis, pois o país apresenta, em sua geografia, áreas favoráveis (em terra e alto mar) com elevado potencial para instalação e operação de campos de energia eólica. Estudos recentes mapearam, em território nacional, as diferentes regiões com as velocidades médias dos ventos, confirmando que o Brasil tem um grande potencial para uma matriz energética proveniente de aerogeradores de energia. Apesar das vantagens que a geração de energia eólica apresenta quando comparada

com os meios energéticos tradicionais, existem muitos obstáculos a serem superados para que a energia eólica seja confiável. Um desses desafios está diretamente relacionado com o processo de fabricação e desempenho dos componentes e peças, cujo um aerogerador de energia é formado, já que estes são submetidos à esforços mecânicos que variam de acordo com a intensidade e direção dos ventos. Os aerogeradores de grande porte exigem componentes cada vez mais resistentes a esforços mecânicos e às tensões de ruptura por fadiga, dada sua complexidade pelo aumento do tamanho destes equipamentos e, conseqüentemente, maior dimensão de suas peças [TONG, 2010].

2.4 Aplicação de Eixos Vazados em Aerogeradores

Os eixos maciços (ilustrado na Figura 4) ou vazados, em sua forma geral, são fabricados com o propósito de transmitir força ou torque por meio da rotação de um motor elétrico ou a combustão. Os mesmos são conectados a outros elementos de máquina como, por exemplo, engrenagens, polias, rodas, hélices, turbinas, dentre outros.

Para devida aplicação, os eixos apresentam diversos tamanhos e, conseqüentemente, os mais variados pesos, dependendo da aplicação a que se é exigido nos mais amplos campos da engenharia. Equipamentos industriais que exijam funcionamento por rotação como tornos mecânicos, fresadoras, laminadores são exemplos da aplicação de eixos na produção mecânica. Outra importante aplicação de eixos no dia-a-dia são os utilizados nos motores dos mais diversos veículos de transporte, como automóveis, aeronaves, navios, tratores, etc. [BUDYNAS, 2006]; [HAU, 2006]; [MANWELL, 2002].



Figura 4: Eixo Maciço Aplicado em Aerogeradores - Cortesia: Villares Metals.

Para o desenvolvimento e fabricação dos eixos, é necessário em um primeiro momento, analisar para qual fim será aplicado. Assim é possível determinar qual o tipo de material a ser empregado, tratado e moldado, bem como o processo de fabricação a ser adotado. Por exemplo, eixos cujas aplicações sejam menos críticas é possível adotar um material com menor resistência mecânica como os aços carbonos ou os laminados a quente. Entretanto quando se verifica um maior grau de “*stress*” com uma necessidade maior de segurança e qualidade do mesmo eixo, procura-se utilizar um material de aço-liga de alta resistência que possam melhorar suas propriedades mecânicas através de tratamento térmico. [BUDYNAS, 2006]. Na mesma proporção tem-se que eixos com menos de $\varnothing 80$ mm de diâmetro podem ser trefilados a frio. Eixos com diâmetros superiores a $\varnothing 80$ mm, normalmente, são fabricados pelo processo de fundição. Ressalva-se que eixos de grande porte, muito superiores a $\varnothing 80$ mm de diâmetro, necessitam de uma combinação de fundição-forjamento, onde neste caso utiliza-se o forjamento em matriz aberta [MANWELL, 2002].

Os componentes de eixos costumam sofrer tensões de flexão e torção, dado a sua aplicação em transmissão de energia e torque. É importante determinar qual a rotação máxima de aplicação, bem como se o mesmo irá empregar força de compressão ou tração juntamente com alta ou baixa rotação, como é o caso dos eixos utilizados em motores de aeronaves, onde os mesmos sofrem rotação-tração, ou em embarcações em que estes estão sujeitos à rotação-compressão. Para se escolher o melhor processo de fabricação do eixo é fundamental analisar quais os possíveis defeitos internos de forma a evitar possíveis concentradores de tensões e conseqüentemente, o surgimento e propagação de trincas. [FIA, 2007].

2.5 Considerações Sobre os Processos de Fabricação

Dentre os processos de fabricação de aços e ligas metálicas, a conformação mecânica, juntamente com a usinagem e a fundição, são as técnicas mais utilizadas no meio industrial. Ainda assim, o processo de conformação é a técnica que possui os registros históricos mais antigos dentre os três [ASM HANDBOOK, 1993]. O início histórico deste processo data de 8.000 anos antes de Cristo. Porém, foi em 4.000 anos antes de Cristo que se tem registros sobre a produção de ferramentas, armas a partir do bronze. Com a conseqüente melhoria dos processos e materiais empregados no final do século XIX, a conformação mecânica apresenta uma evolução gradativa e significativa [ASM HANDBOOK, 1993].

2.5.1 Conformação Mecânica - Forjamento

Até meados do século XIX as indústrias de forjados executavam suas atividades em matriz aberta, por conta das limitações dos equipamentos e maquinários existentes na época.

Com os avanços tecnológicos tanto dos equipamentos quanto dos materiais utilizados no ferramental das prensas, a capacidade e força aumentaram de 0,5 kN para até 10,0 kN. No final do século XIX, a maior revolução na indústria de forjamento para materiais ferrosos, foi em 1856 com a invenção do conversor Bessemer. Antes do uso desta invenção, era economicamente inviável se utilizar o aço como matéria-prima na maioria das aplicações que se tem hoje. Logo após a aplicação do processo de Bessemer, o custo do processo do aço reduziu significativamente se tornando próximo ao custo do processo do ferro fundido, e logo toda a indústria da época voltou-se ao uso do aço em seus processos [LANGE, 1997].

No início do século XX, a evolução das forjarias deu-se com os avanços científicos e os primeiros estudos realizados sobre o comportamento dos materiais empregados, análise experimental dos processos, tecnologia dos materiais e determinação da curva de escoamento dos diversos materiais. Tornando a ciência uma parceira fundamental das indústrias de conformação de metais [LANGE, 1997]. Nos dias atuais necessita-se da produção em massa de peças e componentes a um baixo custo e alto grau de confiabilidade, devido aos processos apresentarem baixos índices de perdas de material, redução dos custos de processo, maior controle sobre a qualidade do produto final e principalmente a capacidade da indústria desenvolver novos materiais, processos e, dessa forma, se adaptar com o mercado cada vez mais competitivo.

O processo de forjamento, dentre os métodos existentes, consiste na fabricação sucessiva de componentes metálicos cujas aplicações são as mais diversas na indústria metal mecânica [GEIER, 2004]. Assim esta técnica tem como objetivo deformar plasticamente uma geratriz por meio da compressão entre matrizes com a finalidade de se obter uma forma final previamente determinada [RUSINOFF, 1952 *apud* MARTELLO, 2007]¹.

De acordo com a classificação de [GEIER, 2004], o processo de forjamento pode ser a frio, a morno ou a quente, dependendo da temperatura utilizada para a deformação do material em questão.

Quanto ao tipo de processo, o forjamento pode ser classificado [RANDON, 2005]:

- Forjamento em Matriz Aberta (FMA): Usualmente neste tipo de forjamento utilizam-se matrizes com geometrias pouco complexas, como por exemplo, blocos retos ou com no máximo algum tipo de variação angular em “V”. Da mesma forma este tipo de forjamento é aplicado para peças de grande porte,

¹ MARTELLO, L. de: Desenvolvimento de processo de forjamento da liga de alumínio AA6351 com auxílio de computação numérica. Dissertação de Mestrado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

como eixos (maciços ou vazados), componente para motores usados na indústria naval, entre outros.

- Forjamento em Matriz Fechada (FMF): Neste processo as geometrias das matrizes empregadas apresentam uma complexidade considerada média. Utiliza-se para a produção em larga escala de diversos tipos de aços e ligas. Deve-se compreender e atentar para a conservação do ferramental frente à necessidade deste processo exigir um número elevado de ciclos para considerá-lo economicamente viável [MORAES, 2010].
- Forjamento em Matriz de Alta Precisão: Em um processo mais elaborado onde se exige uma maior complexidade para produção de peças e componentes mais elaboradas. Em uma visão geral este tipo de forjamento não gera nenhum tipo de desperdício de material em relação às rebarbas, em contrapartida é o que apresenta o maior custo comparado aos anteriores [SHAN, 2004].

2.5.2 Tensão e Deformação de Aços e Ligas

Para [SCHAEFFER, 2007] a tensão de escoamento “ k_f ”, é calculado pela razão entre a força aplicada “ F ” e a área da seção “ A ” onde se está sendo submetida esta força, equação 1.

$$k_f = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 1}$$

No processo de conformação, ao submeter um esforço mecânico em um corpo de prova, surgem tensões de tração, compressão ou cisalhamento, não apenas em sua área superficial externa, mas em todos os pontos internos de sua estrutura. Dependendo da combinação destas tensões, o material pode ou não sofrer o. O critério de von Mises de 1913 apresenta uma forma de como se pode comparar um certo estado complexo destas tensões com a tensão de escoamento obtida em ensaios uniaxiais utilizados para o levantamento das curvas de escoamento.

$$\sigma_{eq} \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2} \quad \text{Eq. 2}$$

O Critério de Tresca leva em consideração a tensão máxima e a tensão mínima atuantes em um ponto para determinar se haverá ou não escoamento plástico do material. Assim esta teoria, necessita o conhecimento prévio da maior e da menor tensão, bem como a tensão de escoamento do material. O objetivo de determinar a tensão equivalente pela teoria de Tresca é verificar se o material irá escoar de acordo as tensões aplicadas. Neste caso, o material em questão, somente irá escoar se, a tensão equivalente “ σ_{eq} ” for igual ou superior a

tensão de escoamento “ k_f ” do material. A Equação 3 foi descrita pela primeira vez em 1864 por Tresca:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Eq. 3}$$

A Teoria de Tresca, por convenção, está descrita como $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ onde é possível notar que, para o cálculo da tensão equivalente, a tensão intermediária não é considerada. Desta forma, segundo Tresca, pode-se concluir que o limite de tensão equivalente “ σ_{eq} ” de um dado material é definido como o estado limite de tensão plástica de determinado corpo ou material, ou seja, a partir desta tensão aplicada, inicia-se o comportamento plástico dos materiais metálicos.

Para o estudo referente à deformação em conformação mecânica, pode-se citar dois tipos bem característicos:

- Deformação Relativa;
- Deformação Verdadeira.

No caso especial do Forjamento em Matriz Aberta, as deformações verdadeiras podem ser calculadas de acordo com as equações 4, 5 e 6:

$$\text{Deformação na Largura:} \quad \varphi_b = \ln \frac{b}{b_0} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{Deformação no Comprimento:} \quad \varphi_l = \ln \frac{l}{l_0} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{Deformação na Altura:} \quad \varphi_h = \ln \frac{h}{h_0} \quad \text{Eq. 6}$$

Estas três deformações são relacionadas diretamente com as três dimensões possíveis de escoamento do material e, da mesma forma, com o sistema de coordenadas cartesianas em “x”, “y” e “z”, ilustradas na Figura 5.

Com base nestas três deformações principais, pode-se determinar qual a deformação equivalente, como ilustra a Equação 7:

$$\varphi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\varphi_b^2 + \varphi_l^2 + \varphi_h^2)} \quad \text{Eq. 7}$$

Em um corpo submetido a deformação plástica, o volume inicial do material a ser conformado é igual ao volume final deste mesmo corpo de prova, a isso é denominado a Lei da Constância dos Volumes. Desta forma, o somatório das deformações verdadeiras medidos ou calculados em que o material é submetido, deve ser igual a zero (Equação 8):

$$\varphi_b + \varphi_l + \varphi_h = 0 \quad \text{Eq. 8}$$

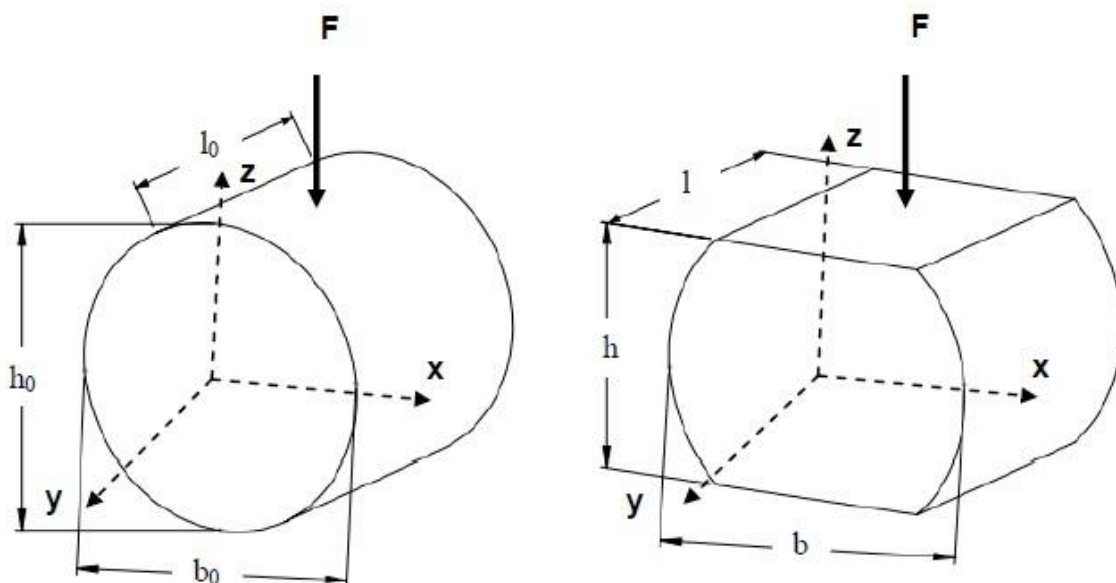


Figura 5: Esforço de Conformação Mecânica na Dimensão “z” [CORREA, 2013].

2.5.3 Velocidade de Deformação

Conforme explicado por [SCHAEFFER, 2006] a velocidade de deformação “ $\dot{\varphi}$ ”, pode ser calculado pela razão entre a velocidade da ferramenta “ $\dot{\vartheta}$ ” e a altura instantânea “ h_i ” como ilustrada pela Equação 9:

$$\dot{\varphi} = \frac{\dot{\vartheta}}{h_i} \quad \text{Eq. 9}$$

Usualmente o sentido de deslocamento das ferramentas e de deformação do material é o eixo “z”, ou seja, o corpo de prova tem sua dimensão reduzida em sua altura. O tipo de matriz, como por exemplo, plana, também influencia neste parâmetro como citados no trabalho de [TOBIAS, 1984].

2.5.4 Curva de Escoamento

A curva de escoamento no forjamento é o parâmetro de deformação mais importante, pois é necessária para quantificar a força e o trabalho envolvidos no processo. Dados essenciais para o projeto de matrizes e máquinas de conformação. A tensão de escoamento “ k_f ” pode ser representada por diferentes equações empíricas determinadas experimentalmente. As curvas de escoamento podem ser obtidas pela conformação à frio (Equação 10), quando o corpo de prova se encontra com temperatura ambiente, ou pelo processo de conformação a quente (Equação 11), quando a temperatura está acima da temperatura de recristalização do material [BULLOCH, 2006]:

$$k_f = c \cdot \varphi^n \quad \text{Eq. 10}$$

Para o processo de deformação à quente são necessários um maior número de variáveis e características para a descrição matemática da curva de escoamento k_f . Neste caso leva-se em conta a influência da temperatura (ϑ), a velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$), a deformação verdadeira (φ) como pode ser observada na Equação 11:

$$k_f = k_{f_0} \cdot e^{-m_1 \cdot \vartheta} \cdot \varphi_i^{m_2} \cdot \dot{\varphi}_i^{m_3} \quad \text{Eq. 11}$$

Para este caso, os parâmetros k_{f_0} , m_1 , m_2 e m_3 são constantes determinadas para os mais variados tipos de materiais fazendo com que as expressões matemáticas para determinação da curva de escoamento experimental sejam obtidas por meio de regressão matemática [HENSEL; SPITEL, 1978].

Durante o desenvolvimento científico e estudos realizados sobre o comportamento dos materiais empregados nas indústrias de forjados, a curva de escoamento pode ser obtida através de ensaios de tração, torção ou compressão, esta última ilustrada pela Figura 6. A confecção de curvas de escoamento através do ensaio de compressão justifica-se pela simplicidade de confecção dos corpos de prova cilíndricos e pela facilidade de execução em máquinas de ensaio convencionais, este ensaio está ilustrado na Figura 6 [GARCIA, 2012].

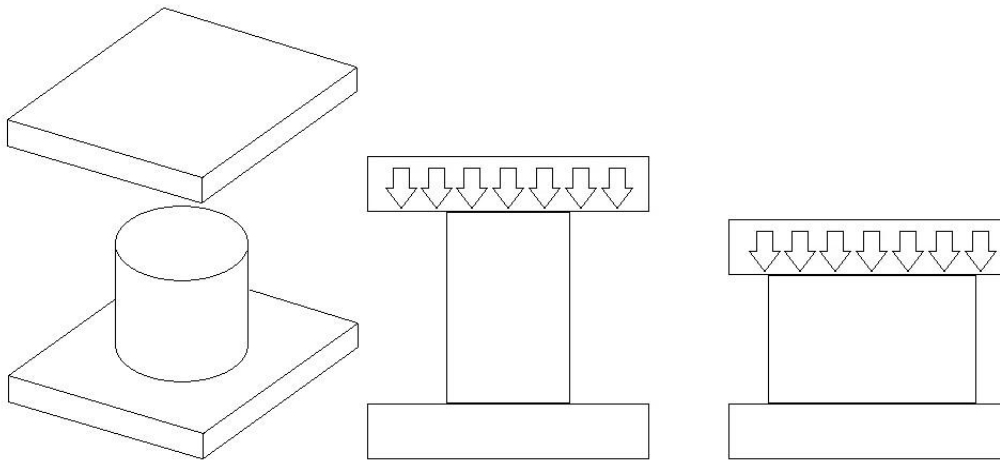


Figura 6: Ensaio de Compressão. Adaptado de [ASM HANDBOOK, 2001].

O forjamento é considerado à quente para temperaturas entre 950 °C e 1150 °C nos aços baixo e médio carbono (CHO *et al.*, 2005). Este procedimento de aquecer o material a ser conformado provoca a redução da tensão de escoamento fazendo com que o material em questão deforme, plasticamente, com menor esforço quando comparado com o forjamento a temperaturas abaixo de 950 °C [HIRSCHVOGEL; DOMMELEN, 1992].

Para este estudo, são mostradas, nos gráficos “a” e “b” da Figura 7, as curvas de escoamento (tensão de escoamento *versus* deformação verdadeira) para o aço AISI4140 sob a

influência de diferentes temperaturas [LIN, 2008; 2009]. As velocidades de deformação aqui consideradas são: para o gráfico (a) de $\dot{\varphi}_a=0,1 \text{ s}^{-1}$ e para o gráfico (b) de $\dot{\varphi}_b=1,0 \text{ s}^{-1}$.

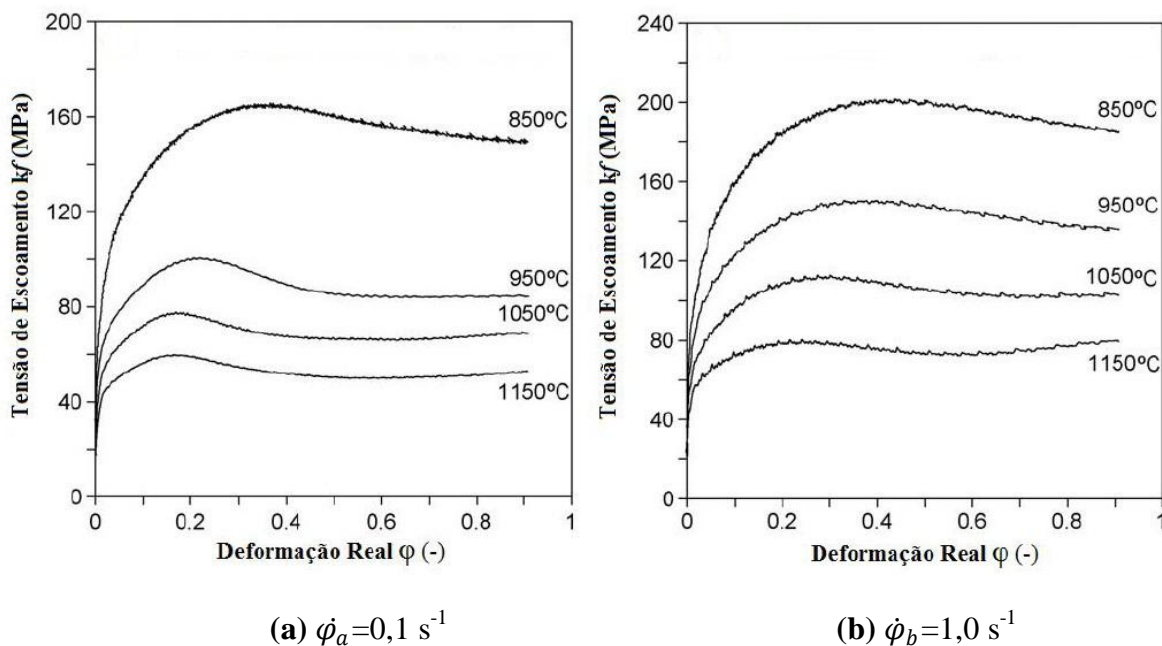


Figura 7: Tensão de Escoamento versus Deformação Verdadeira (LIN, 2008; 2009).

Para o cálculo da tensão de escoamento a quente, foi visto anteriormente a necessidade de alguns parâmetros matemáticos constantes (m_1 , m_2 e m_3) e a tensão de escoamento inicial do aço AISI4140 descrito na Tabela 1 [HENSEL; SPIETEL, 1978].

Tabela 1: Parâmetros Matemáticos - Curva de Escoamento do Aço AISI4140

Parâmetro	Valor	Unidade
m_1	0,0023	-
m_2	0,1160	-
m_3	0,1310	-
k_{f_0}	574,90	MPa

Fonte: Hensel, Spietel (1978).

As respectivas constantes da Tabela 1 foram obtidos a partir de experimentos práticos para determinação das curvas de escoamento. Estas curvas foram modeladas em uma equação matemática que resultou na determinação de m_1 , m_2 e m_3 [HENSEL; SPIETEL, 1978]. Utilizando a Equação 11 foi possível traçar as curvas de escoamento em função da deformação, velocidade de deformação e temperatura como ilustram as Figuras 8 e 9 cujas velocidades de deformação são, respectivamente, $\dot{\varphi} = 0,1 \text{ s}^{-1}$ e $\dot{\varphi} = 1,0 \text{ s}^{-1}$:

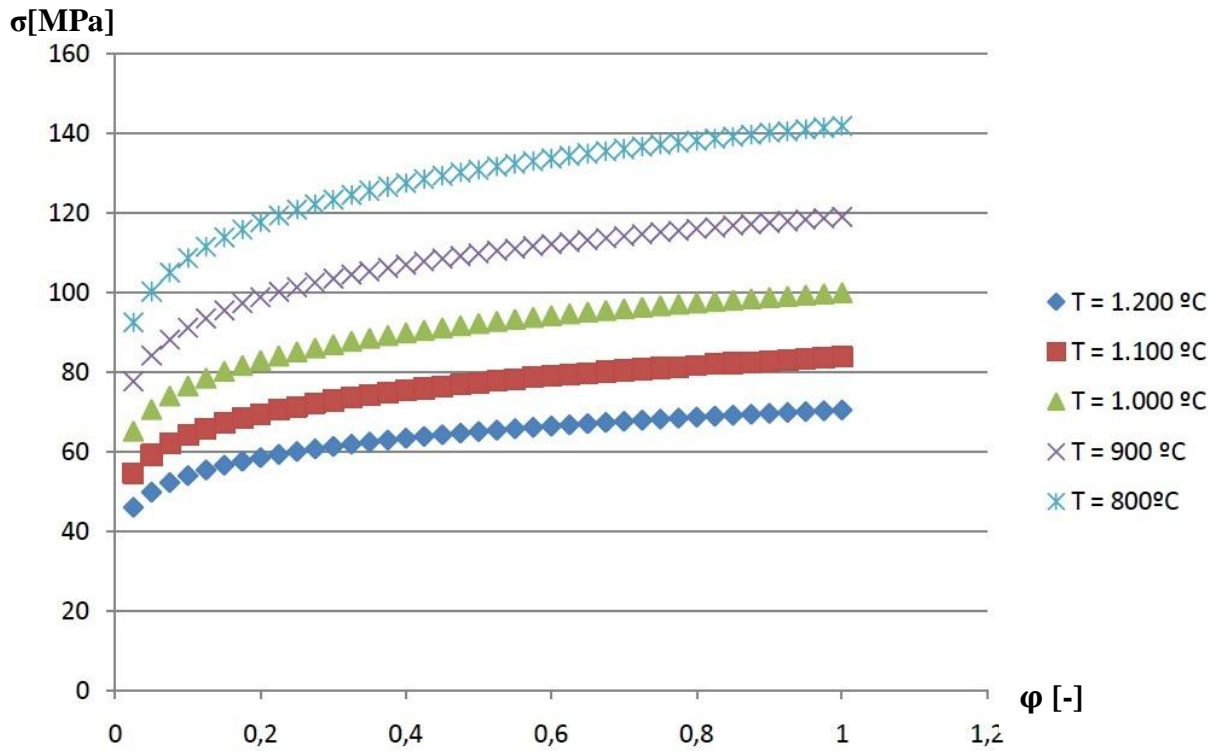


Figura 8: Curva de Escoamento - $\dot{\phi} = 0,1 \text{ s}^{-1}$ [HENSEL; SPITEL, 1978].

É possível observar, que entre diferentes curvas de escoamento, as diferenças encontradas nas curvas da Figura 8 e da Figura 9, devem-se tanto à variação de temperatura, quanto à variação da velocidade de deformação.

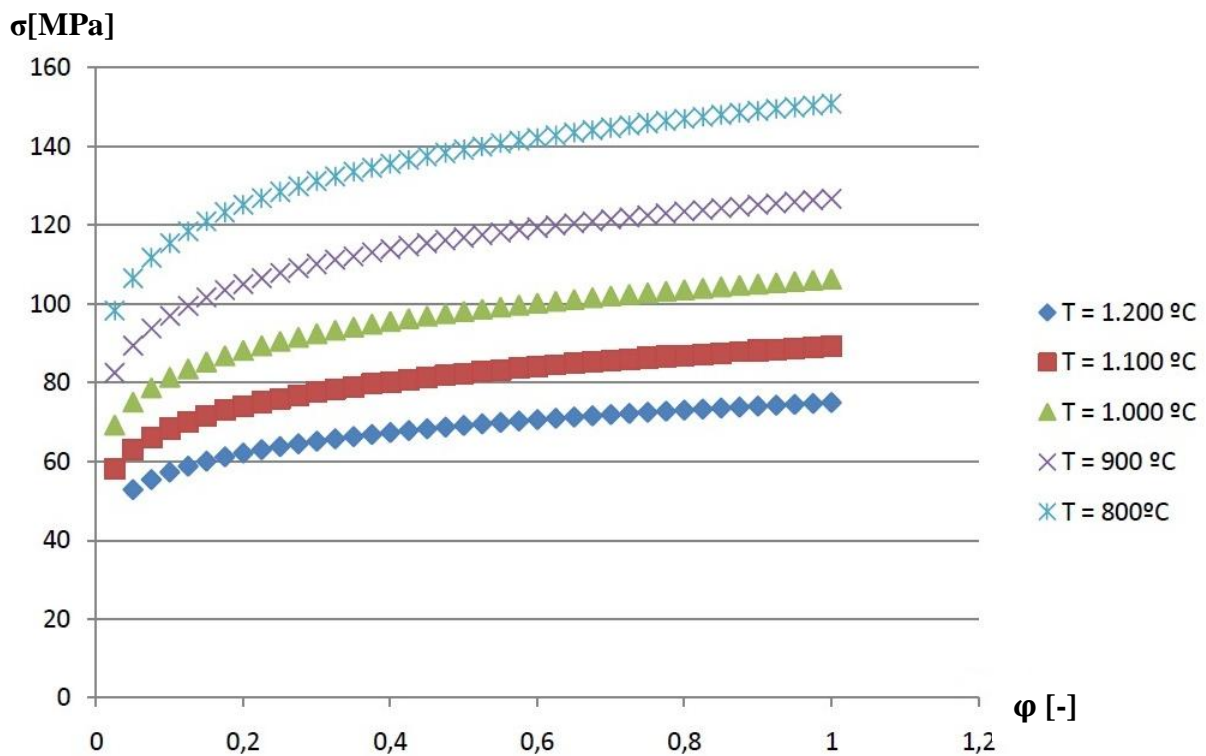


Figura 9: Curva de Escoamento - $\dot{\phi} = 1,0 \text{ s}^{-1}$ [HENSEL; SPITEL, 1978].

No “software” de simulação “Simufact Forming 12.0”, as curvas de escoamento encontradas para o material em estudo, o aço AISI4140, representadas na Figura 10.

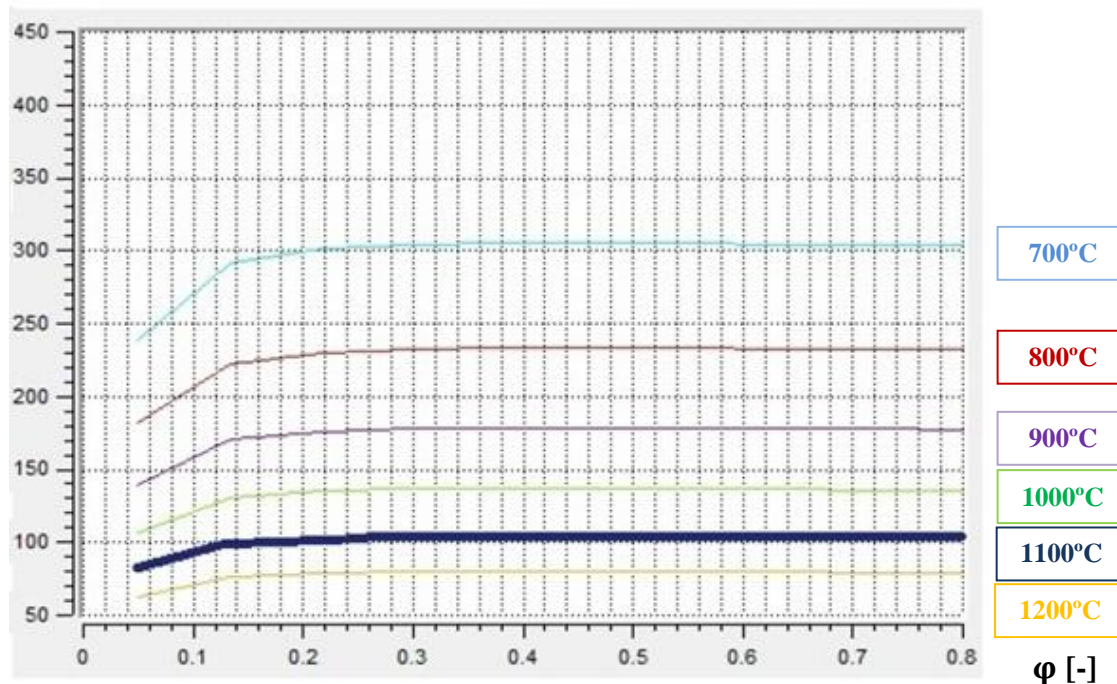
σ [MPa]

Figura 10: Curva de Escoamento – “Software Simufact. Forming 12.0” para $\dot{\phi} = 1,6 s^{-1}$.

Para as devidas comparações com a curva de escoamento prática, a curva utilizada na simulação numérica foi a de 1100° C, em destaque no gráfico da Figura 10, também são consideradas diferentes temperaturas e sua velocidade de deformação é $\dot{\phi} = 1,6 s^{-1}$.

Nas Figuras 8, 9 e 10 observa-se que a tensão de escoamento do aço AISI4140, diminui com a elevação da temperatura. O impacto desta análise é a maior facilidade de forjamento não apenas nestes tipos de aços, mas também pode ser aplicado em materiais, cuja ductilidade é consideravelmente baixa, propiciando a conformação destes elevando a temperatura induzindo ao aumento da ductibilidade dos materiais [LIN, 2008; 2009].

Nota-se que ao elevar a temperatura reduz-se a tensão de escoamento ao passo que ao elevar a velocidade de deformação também se observa o aumento da tensão de escoamento [HENSEL; SPIETEL, 1978].

2.5.5 Importância do Coeficiente de Atrito

Nos processos de conformação, entre eles o forjamento, a força aplicada ao se executar a pressão para deformação transmitida à geratriz pela matriz, provoca uma movimentação relativa entre a ferramenta e o componente deformado. Neste movimento entre as partes é onde pode ser verificada a presença do atrito no processo de conformação (denotado por “ μ ”). Este parâmetro tem relação direta com a vida útil das matrizes bem como com a qualidade da peça [WEY, 1994] e [SOFUOGLU, 1999]. Segundo [PETERSEN, 1998] o atrito presente entre o ferramental e o componente deformado tem relevância nos

parâmetros, como o escoamento do material pela matriz e na formação de possíveis defeitos. Para reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, pode-se utilizar algum tipo de lubrificação:

Para [ALTAN, 1999] são definidos três tipos básicos de lubrificação:

- Condição a Seco: ausência de lubrificação entre as superfícies;
- Condição Hidrodinâmica: apresenta camada de lubrificante entre as superfícies;
- Condição de Contorno: lubrificação intermediária entre as condições anteriores.

De maneira genérica, a forma mais eficaz para reduzir o coeficiente de atrito é fazer uso de lubrificantes específicos para cada caso. Dentre as principais características e objetivos, o lubrificante deve prevenir que a peça forjada não fique aderida à matriz, assim como ser um isolante térmico reduzindo perdas de calor entre os componentes do processo, não reagir quimicamente com os materiais empregados tanto na matriz como na peça, ser fácil de aplicar e remover, etc [SAIKI, 2006].

2.5.6 Equação de Cálculo da Perda Térmica

Para [INCROPERA, 2006] o cálculo da perda térmica por irradiação de acordo com a lei de Stefan-Boltzman, é demonstrada na Equação 12:

$$Q_s = \delta \cdot A \cdot \epsilon \cdot \vartheta^4 \quad \text{Eq. 12}$$

Tendo em posse o valor da perda térmica “ Q_s ”, é possível estimar a perda da temperatura em função do tempo entre a saída do forno com temperatura elevada e a temperatura ambiente onde se encontram as ferramentas de trabalho, como ilustra a Equação 13 [INCROPERA, 2006]:

$$\Delta\vartheta = \frac{Q_s}{V \cdot \rho \cdot c_p} \quad \text{Eq. 13}$$

2.5.7 Considerações Sobre o Processo de Puncionamento

Na fabricação mecânica, em especial processos que visam perfurar aços e ligas, pode-se evidenciar alguns diferentes tipos de métodos. Assim se torna necessário verificar quais são os melhores processos de perfuração conforme as respectivas necessidades técnico-financeiras de cada um [ANTUNES, 2008].

No presente estudo verifica-se a necessidade de avaliar os processos de perfuração existentes no ambiente metal-mecânico. Para se realizar furos em determinados componentes pode-se destacar: furação por brocas, serra-copo, eletroerosão, oxicorte, por forjamento e por puncionamento como ilustrado na Figura 11 [FARIA, 2007].

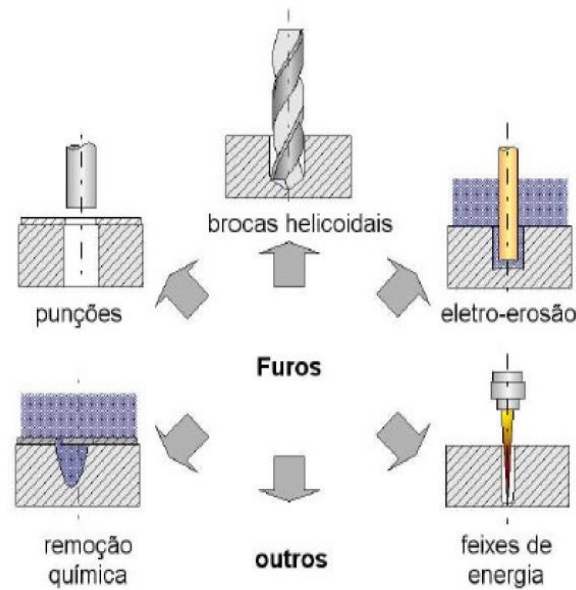


Figura 11: Tipos de Processo para Fabricação de Furos. Adaptado de [FARIA, 2007].

Alguns equipamentos com maior tecnologia embarcada, como por exemplo, centros de usinagem, em que, suas funções são praticamente automáticas, tornam o processo de perfuração mais confiável comparado aos tradicionais. Em outros equipamentos pode-se operar com os mais variados tipos de furação como a perfuração a laser, plasma, jato d'água, usinagem e puncionamento. Entretanto equipamentos assim tornam-se restritos à pequenas e médias indústrias, visto o alto custo e aquisição bem como o treinamento de profissionais para o seu devido uso [GROSS *et al.*, 2004].

O processo de usinagem ocupa, de forma geral, a maioria das fases do processo de fabricação na indústria metal-mecânica. Porém, este processo utilizado para furação, é o que mais necessita de fluídos de refrigeração e cuidados na retirada e transporte de cavacos. Estes problemas gerados nos remetem ao principal foco, onde o aumento da produtividade deve estar sintonizado com a redução de desperdícios, tanto de matéria-prima como ferramental. Evidenciam-se também os possíveis impactos ambientais causados, quando inadequadamente são descartados os fluidos de corte [STEMMER, 1993].

Na perfuração a laser, leva-se em conta sua alta flexibilidade sendo uma alternativa a fabricação de lotes menores. Todavia há um elevado custo de implantação em sua operação, como também esta técnica pode trazer uma interferência térmica em uma região adjacente ao furo do material bem como pode ser notada algumas estrias superficiais no furo. O furo por jateamento d'água apresenta uma aplicação mais restrita a materiais que não podem aquecer durante o processo de furação. Assim como o processo de furação por jato d'água, o oxycorte e a eletroerosão são de uso restrito e de alto custo de implantação [GROSS *et al.*, 2004].

O processo de perfuração por puncionamento surge como uma alternativa econômica e alta produtividade para confecção de furos em componentes metálicos. Este processo é amplamente utilizado para furar chapas por cisalhamento entre um punção e uma matriz. Comparando-se a perfuração por puncionamento com os citados anteriormente, nota-se um método fácil, rápido, econômico além de apresentar um bom acabamento e evitar o uso de fluídos de corte [BRITO, 2004].

A simulação computacional apresenta, dentre as diferentes vantagens, uma redução de desperdícios de ferramental, uso desnecessário de matéria-prima e tempo de processo [STEMMER, 1995].

Entretanto, na literatura pesquisada, o processo de puncionamento, em sua maioria está diretamente relacionado com chapas de espessuras mais finas, por apresentar uma utilização mais frequente na indústria. Para os casos em que se necessita a perfuração de uma espessura maior, como o presente trabalho, o meio científico carece de estudos relacionados a este tipo de pesquisa. Em alguns estudos foi possível encontrar alguns trabalhos que apresentam punções com diâmetros de 13,6mm e 15,7mm e, com corpos de prova com espessuras de 11,5mm e 12,5mm [LUO, 1999]. Neste estudo se observa que o rompimento do material ocorre após 30% da penetração do punção, ou seja, o avanço do punção até o início da trinca de corte do material foi de 30% da altura total do corpo de prova [LUO, 1999].

Esta proporção de 30%, medida em chapas mais espessas, é a mesma encontrada no processo de perfuração por punção em chapas de espessuras mais finas. Porém este fato não exime que quanto maior for a espessura do material a ser puncionado, maiores são as chances do surgimento de duas zonas de fratura. Ao longo do deslocamento do punção e, conseqüentemente o aumento do seu esforço mecânico, a região da aresta cisalhante do inserto é forçada para o interior da cavidade, portanto estes esforços de momento e cisalhamento chegam a um limite máximo de deformação, provocando o surgimento da zona de cisalhamento [GIORDANI, 2011].

O trabalho de [KLINGERBERG *et al*, 2008] ilustra algumas regiões que representam as fases de arredontamento do material - I e II, fase da propagação da trinca - III, fase do rompimento do material - IV e, por fim a fase da separação do miolo cisalhado - V. A Figura 12 mostra as respectivas fases de cada uma das etapas do rompimento do material pelo processo de puncionamento:

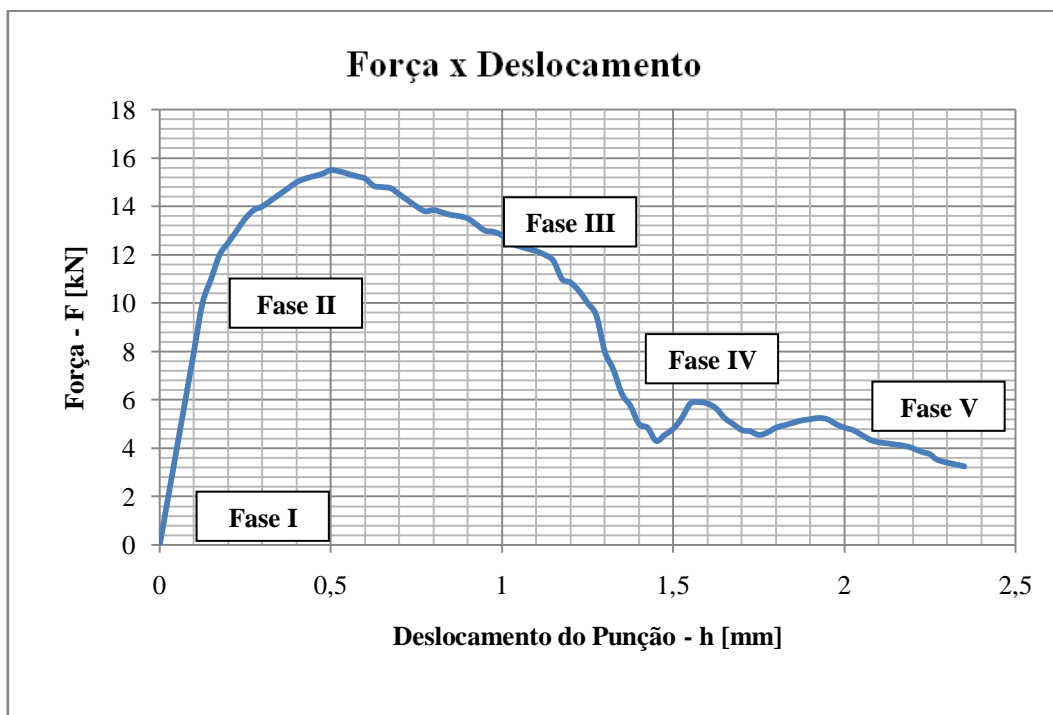


Figura 12: Força de Perfuração “versus” Deslocamento [Adaptado de KLINGENBERG *et al*, 2008].

A força para o rompimento do material aumenta de acordo com o avanço do punção. Após o rompimento nota-se uma redução significativa da força “versus” deslocamento da ferramenta, neste caso o punção. Porém o formato do gráfico gerado de Força x Deslocamento não difere para variações entre parâmetros característicos do processo, como por exemplo, velocidade de avanço, temperatura, dureza, folga entre as ferramentas, etc.

Os punções utilizados neste processo podem apresentar as mais variadas geometrias, porém duas são as principais consideradas: punções côncavos e punções convexos. Os punções côncavos são empregados no processo de perfuração de materiais de espessuras mais finas, enquanto os punções convexos são usualmente aplicados para perfuração de materiais mais espessos.

Para ambos os processos apresentam as mesmas características de perfuração, onde é aplicado uma força de perfuração em um determinado material com uma matriz inferior (inserto) no lado oposto com a geometria que melhor desempenha o cisalhamento do material [KLINGENBERG *et al.*, 2008].

2.5.8 Perfuração por Cisalhamento

O processo de perfuração por cisalhamento é um dos vários processos dentro da conformação mecânica, onde é caracterizado pelo deslocamento entre duas superfícies (punção e matriz), em sentidos opostos, sobre um determinado material que se pretende cortar

removendo o material puncionado, formando um orifício de forma e geometria pré-determinada [KLINGERBERG *et al.*, 2008].

Na perfuração por puncionamento, o material a ser perfurado, sofre uma deformação plástica na região onde o ferramental está submetido e um maior esforço dentro deste processo. Logo após a máxima força de cisalhamento, o material rompe e a parte cisalhada é expurgada do corpo de prova, gerando assim o orifício desejado. O puncionamento é usualmente o processo mais ágil quando em comparação para produção de furos em chapas, normalmente também é considerado um processo relativamente econômico para alta e média produção [BIANCO, 2003]. O avanço do punção, representado na Figura 13 ilustra o movimento de deslocamento até o início da deformação do material [GIORDANI, 2011].

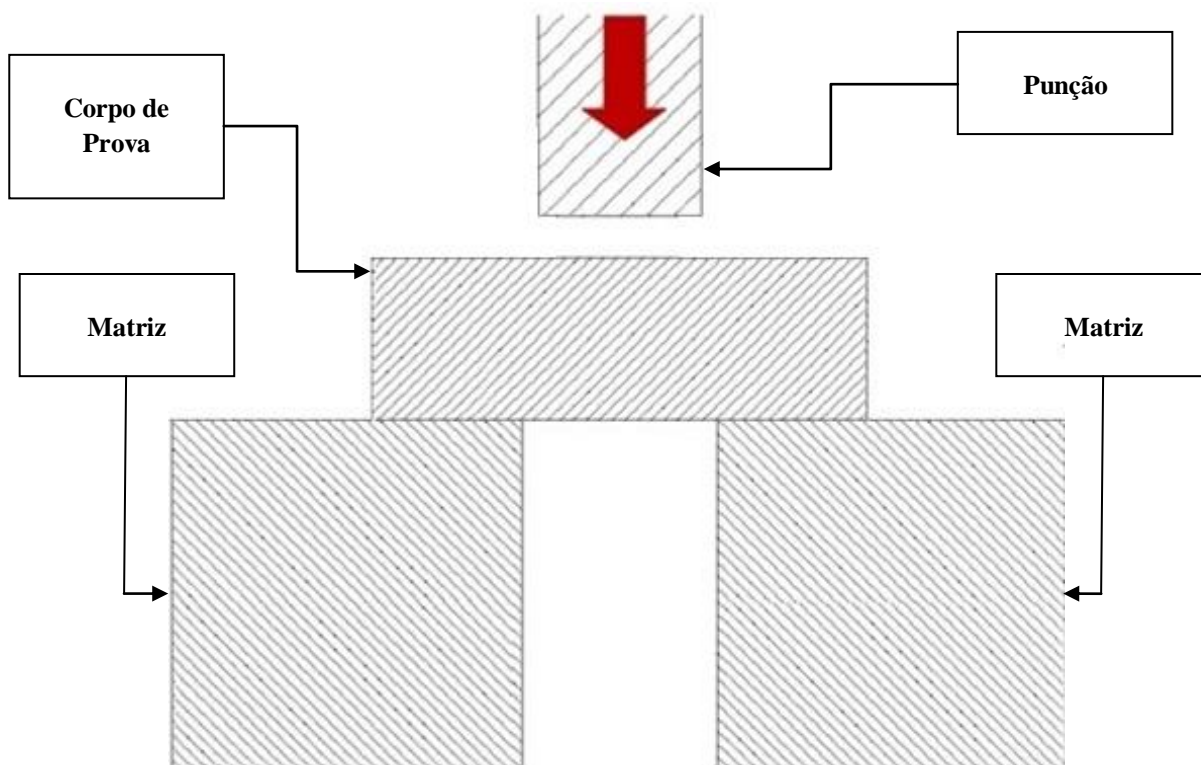


Figura 13: Puncionamento - Início do Processo [Adaptado de GIORDANI, 2011].

A força aplicada pelo punção deforma o material até que a superfície cisalhante da matriz inferior exerça um esforço no sentido oposto de modo que haja o rompimento do corpo de prova resultando assim, no orifício desejado.

Leva-se em consideração o formato cortante da superfície de contato entre a matriz inferior e o corpo de prova cujo objetivo é facilitar o rompimento do material. Para tanto é

necessário dimensionar uma folga circular entre o diâmetro externo do punção com o diâmetro interno do orifício cisalhante da matriz para a execução deste processo - Figura 14.

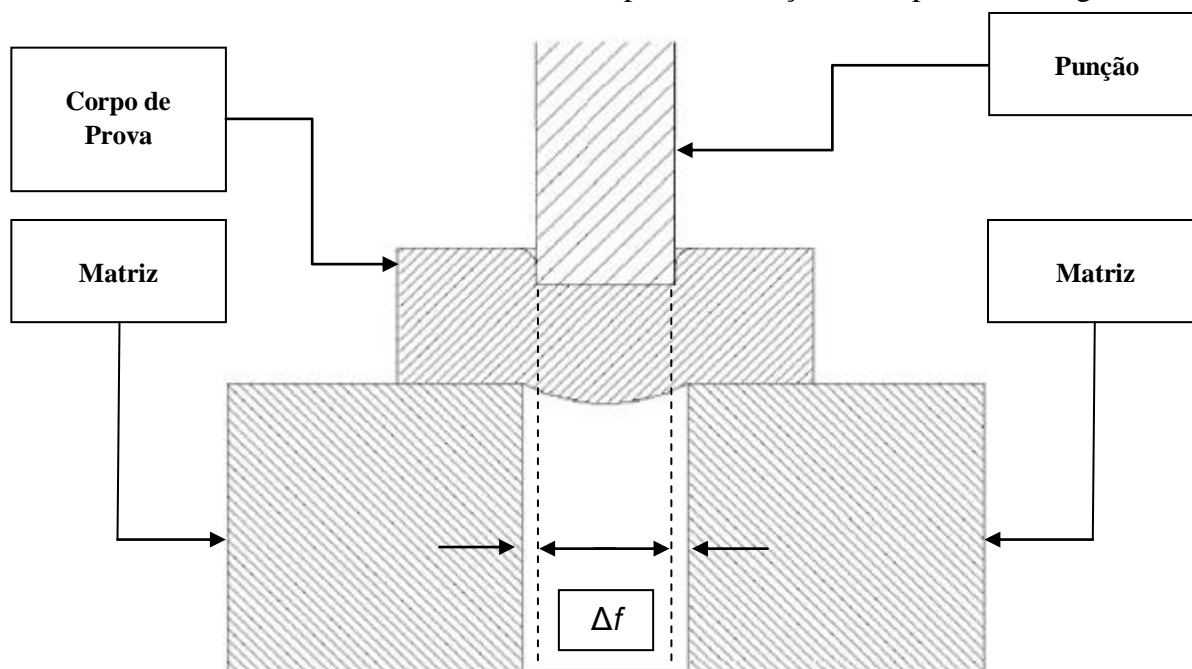


Figura 14: Início da Deformação [Adaptado de GIORDANI, 2011]

Diversos estudos foram feitos para determinar qual a melhor relação existente entre estes dois diâmetros, porém estes estudos são mais específicos para matérias com espessuras mais finas, o que não é o caso para o atual trabalho que visa à obtenção de eixos vazados [CORREA, 2013].

Logo que o punção inicia a deformação no material são visíveis algumas zonas de arredondamento na parte inferior do corpo de prova como uma metade esférica que pode ser observada na Figura 14.

O punção desloca-se forçando o material a cisalhar na região interna do inserto como pode ser observado na Figura 14. A folga radial, representada por “ Δf ”, é a diferença entre o diâmetro da cavidade interna da matriz inferior, ou seja, do inserto alocado no centro do posicionador da matriz e o diâmetro do punção de acordo com a espessura do material que se espera cisalhar [GIORDANI, 2011]. Em estudos de perfuração por puncionamento, estima-se uma relação proporcional de 30% do início da deformação inicial, onde o material realmente apresenta o início do rompimento e, conseqüentemente, o surgimento da região cisalhada (perfurada).

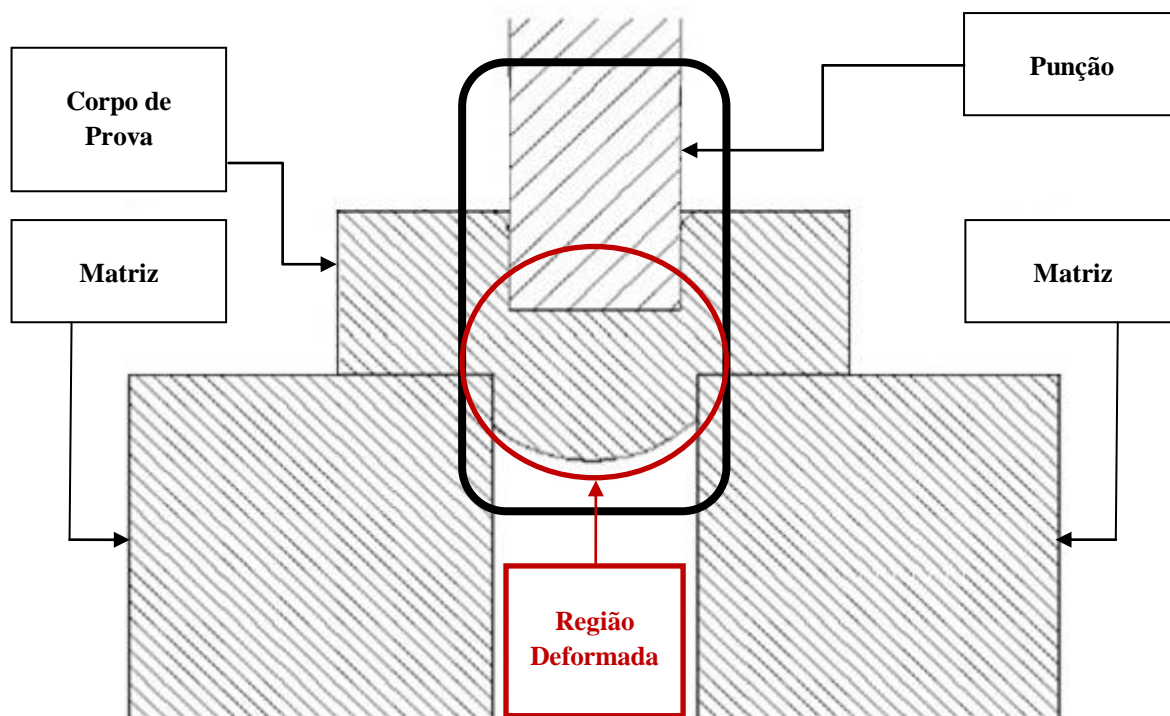


Figura 15: Limite de Ruptura [Adaptado de GIORDANI, 2011]

A Figura 16 ilustra uma ampliação da região destacada pela Figura 15 onde é demonstrado o processo de punçionamento, e, como pode ser observado entre o diâmetro externo do punção e o diâmetro interno da matriz inferior (inserto) há uma folga radial “ Δf ” para o corte do material [CORREA, 2013].

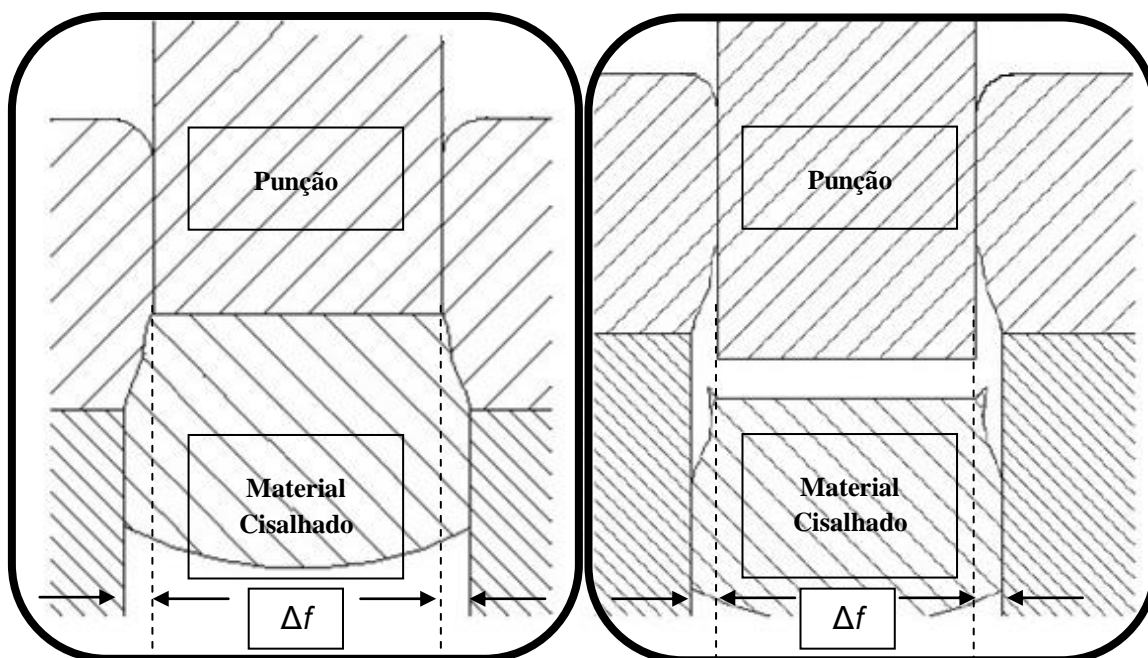


Figura 16: Ruptura e Fases do Puncionamento [Adaptado de GIORDANI, 2011]

Para a realização de um processo de perfuração por cisalhamento em materiais mais espessos, é necessário uma determinada folga entre o punção e matriz, conhecida como folga

radial. Para cada caso, ou seja, para punções côncavos ou convexos a variação da folga radial é calculada de acordo com a força cisalhante para perfurar o material.

O processo de puncionamento de uma placa de aço circular, fazendo-se uso de punções dos mais variados diâmetros externos, ângulos de concavidade e tratamentos térmicos das ferramentas, têm sido estudado em diversas literaturas pesquisadas, dentre elas a apresentada por [LUO, 1999]. Estes estudos revelam que o processo de puncionamento, cujas folgas usadas entre as ferramentas, punções e matrizes, eram mínimas, possuem comportamento deslizante estendidos até o final do processo de perfuração por cisalhamento convexo, ou seja, rompimento do material cisalhado.

O processo de puncionamento apresenta praticamente três zonas bem características para uma folga de 5% entre o diâmetro de corte do punção e o diâmetro de corte do inserto (matriz inferior onde ocorre o cisalhamento):

1. Zona de Arredondamento;
2. Zona de Cisalhamento;
3. Zona de Fratura.

Sendo observadas na Figura 17 as zonas de arredondamento, fratura e rompimento do material com formação de rebarbas de saída [GIORDANI, 2011].

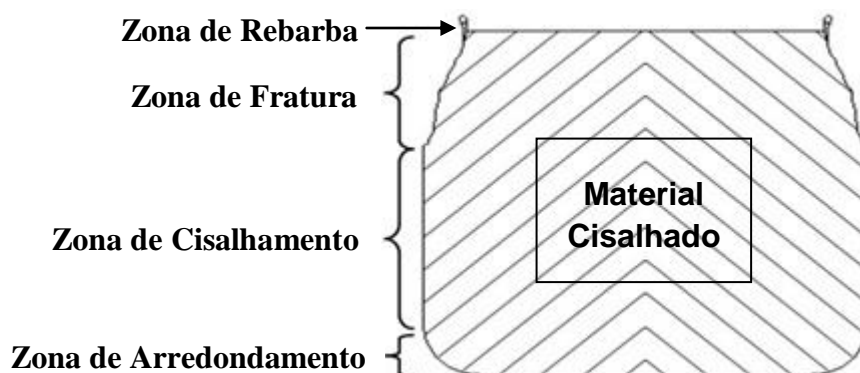


Figura 17: Ilustração das Zonas de Puncionamento [Adaptado de GIORDANI, 2011]

Na busca por trabalhos que fizessem a relação do efeito da temperatura no desempenho do processo de puncionamento, o trabalho de [MORI *et al*, 2008] realizou a comparação das temperaturas de 25°C, 650°C, 700°C, 830°C, 970° e 1070°C.

A influência variação da temperatura sobre as fases de arredondamento, cisalhamento e ruptura demonstra um aumento considerável na fase cisalhada e, conseqüentemente, uma redução significativa da fase de ruptura, como ilustra a Figura 18 - (a); (b); (c) e (d) com respectvias temperaturas a 25 °C, 650 °C, 830 °C e 1070 °C. É visível a

redução da região fraturada do corpo de prova ao passo que se eleva a temperatura do material a ser puncionado e, conseqüentemente o aumento da região de cisalhamento.

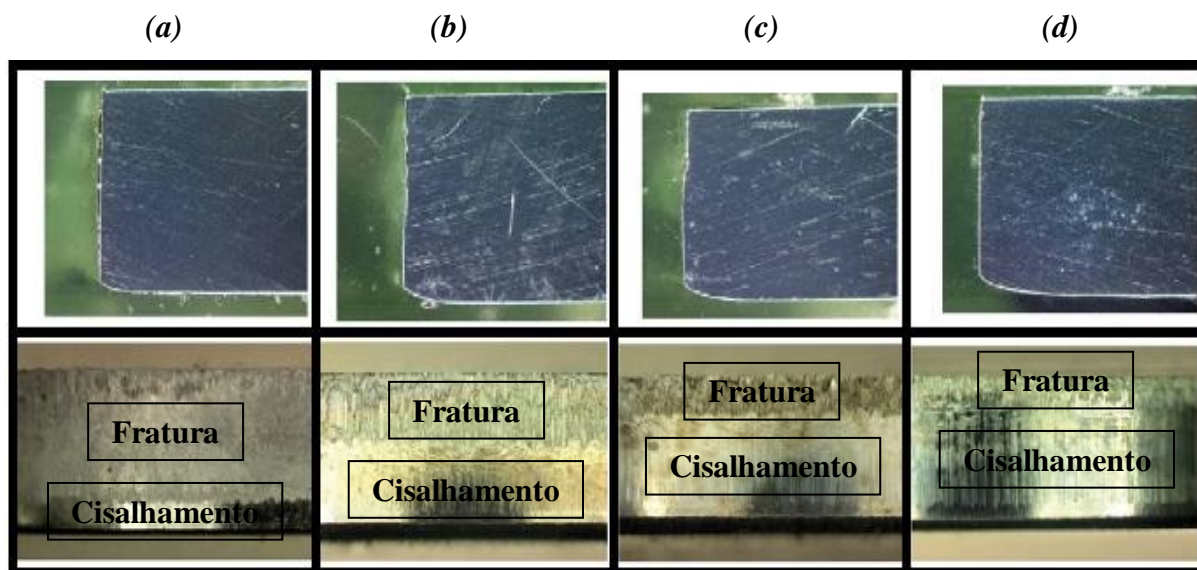


Figura 18: Comparação – Zona de Cisalhamento x Zona de Ruptura [MORI *et al*, 2008].

A formação de rebarba após o rompimento do material também está diretamente ligado com a elevação da temperatura. Da mesma forma, o comprimento de rebarba, além de estar correlacionada com a espessura do material perfurado, apresenta um aumento exponencial para temperaturas maiores que 800°C.

A interferência da folga entre as ferramentas de perfuração, ou seja, punção e inserto, também foram analisadas para 5%, 10% e 15%. Estes valores foram selecionados por estarem diretamente ligados aos processos industriais mais comuns, existentes para a perfuração por puncionamento a frio. O parâmetro rugosidade também foi avaliado pelo estudo de [MORI *et al*, 2008], onde o valor deste, praticamente dobrou para temperaturas superiores a 700°C quando comparadas à temperatura ambiente. Não obstante, a zona cisalhada não apresentou variação significativa da rugosidade independentemente da variação de temperatura no trabalho estudado.

Com a pesquisa de [MORI *et al*, 2008] foi possível validar a utilização de temperaturas elevadas, pois segundo ela, favoreceram o processo de puncionamento de uma forma geral. A presença de uma região cisalhada maior perante as outras favorece um orifício uniforme, ou seja, com pouca variação de diâmetro. Logo o esforço para o rompimento do material é menor, sem mencionar outras vantagens como [MORI *et al*, 2008]:

- Reduzir o desgaste das ferramentas evitando trabalhos de acabamentos;
- Ajustar o diâmetro interno do orifício puncionado.

2.6 Cálculo Analítico da Força de Perfuração por Cisalhamento

O cálculo da força de perfuração “ F ”, durante o processo de puncionamento, pode ser calculado como demonstrado na Equação 14 [SPUR e STÖRFERLE, 1983]:

$$F = A_s \cdot P \quad \text{Eq. 14}$$

A equação para definição da pressão “ P ” leva-se em consideração a relação entre o diâmetro “ D_p ” do material a ser puncionado e a sua respectiva altura “ h ”, como pode ser observado pela Figura 19.

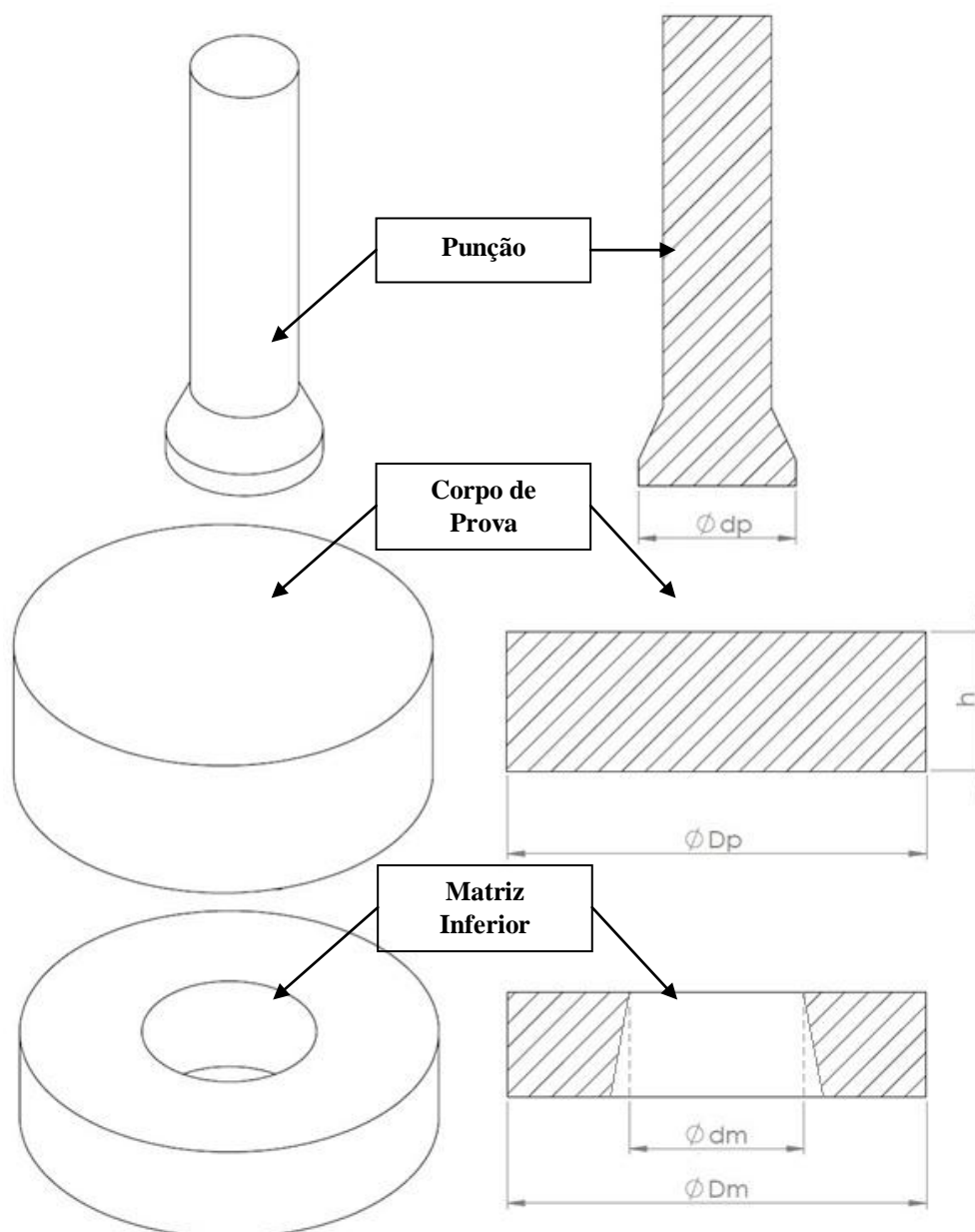


Figura 19: Relação de Punção x Corpo de Prova para Cálculo Empírico da Força para Puncionamento.

Onde “ A_s ” é definida como a área superficial do punção como mostra a Equação 14, correspondente à área de contato entre o punção e o material a ser cisalhado. Portanto, para o

caso de um punção com ponteira cilíndrica, utiliza-se o cálculo de contato do perímetro circular, dado um punção com ângulo reto como observado pela Equação 17:

$$A_s = \pi \cdot d_p \cdot h \quad \text{Eq. 15}$$

Para a análise da relação onde a razão entre o diâmetro “ D_p ” da peça e sua altura “ h ” for maior que 6, usa-se a Equação 16. Caso esta razão seja menor ou igual a 6, usa-se da Equação 17.

$$P = k_f \left[1 + 1,1 \cdot \ln \left(\frac{D_p}{d_p} \right) + \frac{1}{6} \cdot \frac{d_m}{h} \right]; \quad \text{para } \frac{D_p}{h} > 6. \quad \text{Eq. 16}$$

$$P = k_f \left[2 + 1,1 \cdot \ln \left(\frac{D_p}{d_p} \right) \right]; \quad \text{para } \frac{D_p}{h} \leq 6. \quad \text{Eq. 17}$$

Outra forma para o cálculo analítico da força de perfuração “ F ”, durante o processo de puncionamento, pode ser calculada como demonstrado na Equação 18 [SCHAEFFER e ROCHA, 2007].

$$F = A_s \cdot \tau_c \quad \text{Eq. 18}$$

Para o cálculo demonstrado pela Equação 18, a área superficial calculada é a mesma denotada pela Equação 15 e a tensão de cisalhamento “ τ_c ” corresponde à metade da tensão de escoamento do material “ k_f ”. Portanto o cálculo analítico da força de perfuração por cisalhamento é correspondente a:

$$F = A_s \cdot \frac{k_f}{2} \quad \text{Eq. 19}$$

Os cálculos analíticos apresentados neste Capítulo e suas respectivas análises dos resultados encontram-se no Capítulo 4 - Resultados e Discussões e Subcapítulo 4.4 - Cálculo Analítico da Força de Puncionamento.

2.7 Características do Aço AISI4140

O material utilizado para fabricação do eixo vazado para aplicação em aerogeradores é o aço AISI4140, considerado um aço com médio teor de carbono, também conhecido no meio industrial de aço meio doce. Este material possui, em sua composição, além do carbono (C), o Cromo (Cr) e o Molibdênio (Mo) e outros elementos de acordo com suas respectivas proporções como pode ser observado pela Tabela 2:

Tabela 2: Elementos que compõe a liga de Aço SAE 4140

Fe-%	C-%	Mn-%	P-%	S-%	Si-%	Cr-%	Mo-%
96,8 - 97,7	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,035	0,040	0,15 - 0,25	0,8 - 1,10	0,15 - 0,35

Fonte: ASM *International* (1990).

E sua estrutura é considerada de média a alta temperabilidade, processo este que melhora suas propriedades físicas e mecânicas. Esta liga é amplamente utilizada na fabricação de eixos, engrenagens, bielas, virabrequins entre outros componentes forjados. Outras vantagens desse material são as suas resistências mecânicas, resistência à fadiga e sua dureza apresenta valores entre 30 a 35 HRC [FAVORIT, 2013] e [GERDAU, 2013].

Para considerar um processo de conformação à quente do aço AISI4140, sua temperatura deve estar normalmente entre 900°C e 1200°C. Este material pode ser encontrado em barras laminadas à quente com as mais variadas geometrias: circulares, quadradas, sextavadas ou retangulares [ASM *International*, 1990].

2.8 Simulação Numérica - Modelo Matemático

A produção em escala industrial pelo processo de conformação mecânica necessita da conclusão mais ágil dos projetos de produção de peças e componentes metálicos, não deixando de lado a eficiência e a qualidade dos mesmos. Por essa razão, métodos como tentativa e erro são substituídos por “*softwares*” cada vez mais avançados em simulação numérica. Este progresso reduz os custos de produção, como por exemplo, mão de obra e matéria-prima, por exemplo. Os tempos de desenvolvimento de novos projetos também apresentam redução considerável [IM, 2004].

A determinação da curva de escoamento dos materiais é fundamental para que se possam realizar simulações confiáveis na conformação, dentre eles o puncionamento. Esta curva depende diretamente de características próprias de cada material, dentre elas estão à temperatura, velocidade de deformação. No caso da deformação a quente é necessário ainda a relação da troca de calor entre a matriz e o componente, bem como a matriz e o meio e por fim entre o componente e o meio. Na conformação a frio, conhecer estas características também é importante para o caso da simulação numérica. Quanto mais preciso e confiáveis são os valores alimentados no “*software*” de modelagem matemática, maior é a confiabilidade dos resultados gerados na simulação [KOBAYASHI, 1989].

2.8.1 Método dos Elementos Finitos - FEM

O método dos elementos finitos, ou na sigla de origem inglesa “*Finite Elements Method*” – FEM envolve cada uma das pequenas malhas na simulação numérica. O objetivo principal deste método é avaliar equações diferenciais parciais como equações algébricas, muito próximo do método das diferenças finitas pelos valores resultados na simulação da peça.

O estudo para problemas de conformação mecânica teve início com o estudo de técnicas para análises estruturais para a deformação plástica. As matrizes de tensão-deformação são as primeiras aplicações deste método. A partir deste estudo inicial comprovou-se a importância do aprimoramento do processo de simulação computacional. O maior avanço no desenvolvimento dos “*softwares*” de modelagem são as inclusões de parâmetros fundamentais para o processo de forjamento. Dentre eles encontra-se propriedades da matéria-prima a ser deformada, velocidade de deformação da prensa e temperatura. Posteriormente o avanço tecnológico possibilitou simular processos de punção a frio e a quente.

O sucesso para obtenção de resultados confiáveis do projeto do processo de conformação mecânica, em especial o punção, é compreender o fluxo do material sob controle. Desta forma é possível prever o fluxo de material, propriedades mecânicas, inclusive a possível formação de defeitos nas peças.

As características térmicas do material necessário para uma boa simulação computacional dos processos de conformação mecânica são classificadas, basicamente, em dois grupos: propriedades dos materiais e características do processo [GEIER, 2004]. Para propriedades dos materiais define-se como importante o conhecimento do calor específico, densidade e a condução térmica do material. Nos parâmetros relacionados ao processo tem-se a troca de calor entre a matriz, a peça forjada e o ambiente.

As modelagens numéricas, por meio do modelamento de elementos finitos, necessitam de uma equação que auxilie na simulação. Esta deve descrever da melhor forma possível a curva de escoamento do material em estudo.

2.8.2 Trabalhos Realizados no LdTM com Simulação Numérica pelo FEM

Para estudos em conformação mecânica em matriz aberta suportados pelo Método de Elementos Finitos (“*Finite Elements Methods*”- FEM), para fabricação de um eixo vazado, [MEDEIROS, 2012 e COLOMBO, 2012] buscaram por meio do “*software*” PEP Lastran, utilizar a simulação numérica pelo método dos elementos finitos. O objetivo principal destes estudos foi verificar qual o melhor método para conformação do referido eixo em matriz aberta, em consequência aperfeiçoar as características físicas e mecânicas do material.

De acordo com os trabalhos de pesquisa realizados, foi definido que, computacionalmente, a utilização de ferramental (matrizes) de geometrias superior plana e inferior em “V” apresentou três pontos de esforços no material a ser conformado, ao contrário

de matrizes superiores e inferiores planas. Assim pôde-se perceber que os esforços de conformação foram melhores distribuídos resultando em uma deformação mais uniforme. Como resultado da força de compressão mais bem distribuída, o eixo vazado apresentou um maior alongamento com menor número de passes e maiores deformações ao longo do seu comprimento [MEDEIROS, 2012].

A combinação de diferentes geometrias de matrizes, para a escolha da melhor metodologia no processo de forjamento, foram projetadas e simuladas com o “*software*” PEP Lastram. Nestas simulações as conclusões do melhor ferramental a ser empregado foram de matrizes côncavas, que resultaram em um eixo vazado com microestrutura mais homogênea, ou seja, com seus grãos melhores distribuídos ao longo do eixo vazado. E um eixo que apresenta maior alongamento, cujos grãos estão melhores distribuídos pode ser considerado um produto de melhor qualidade quando comparado, por exemplo, com um eixo maciço ou outro processo de fabricação [COLOMBO, 2012].

Os ensaios de compressão do anel são muito comuns quando se pretende identificar o coeficiente de atrito do material, como também a definição de qual o melhor lubrificante para se utilizar nos processos de conformação mecânica. E neste sentido, foram feitas curvas de calibração de atrito a partir do “*software*” de simulação numérica pelo Método de Elementos Finitos – FEM para testes de compressão do anel da liga de aço DIN 16MnCr5 e da liga de alumínio AA6351 para os mais diferentes estados da matéria.

Na comparação entre as ligas já citadas, o alumínio apresentou um coeficiente de atrito maior que do aço. Porém, na questão de comparação entre os estados da matéria, os materiais encruados apresentaram coeficiente de atrito maior que os materiais recozidos [GEIER, 2007].

Em outro trabalho de pesquisa, foi realizado o estudo para avaliar qual o esforço necessário para forjar a flange de uma liga de alumínio (Ti-6Al-4V) por meio de duas técnicas:

1. Teoria Elementar da Plasticidade - TEP;
2. Método dos Elementos Finitos - FEM.

A diferença de força máxima encontrada entre estas duas técnicas quando comparadas ao procedimento experimental foi de 16,5% maior para a TEP e 15% maior para o FEM [MORAES, 2007].

O desenvolvimento da Teoria Elementar da Plasticidade, para aplicação no processo de forjamento em matriz aberta, chega a valores entre 5% a 15% quando comparados com valores de simulação numérica computacional. Com isso é fácil demonstrar que o uso do modelo matemático aplicado com o uso da TEP é relativamente confiável de acordo com a metodologia do processo que se quer estudar. Outra vantagem deste método é o baixo custo de investimento quando comparado à compra, instalação, manutenção de “*softwares*” de simulação, bem como custos que envolvam o treinamento de pessoal para o uso destes programas de computador [CORREA, 2013].

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão descritos os procedimentos e os métodos adotados para a execução dos experimentos, modelamento matemático computacional. Os parâmetros característicos em observação serão os erros apresentados em correlação com as simulações executadas e com o puncionamento em si. Em ambos os estudos foram determinadas as características principais do aço AISI4140, este material será o mesmo empregado para fabricação de eixos vazados de aerogeradores.

3.2 Determinação da Curva de Escoamento

Para o presente estudo, se fez o uso do ensaio de compressão para determinar a curva de escoamento do aço AISI4140. Para obtenção da força “ F ” e deslocamento “ Δh ” do sistema foi necessário a montagem de uma célula de carga com extensores de força e um transdutor potenciométrico (LVDT) representados pela Figura 20, respectivamente conectados a um computador ilustrados na imagem da Figura 21. Por meio do “*software*” de aquisição de dados CATMAN 4.0, onde todos os registros necessários foram arquivados para construção das curvas de tensão x deformação para o aço AISI4140.



(a)

(b)

Figura 20: (a) Célula de Carga e (b) Transdutor Potenciométrico - LVDT.

O experimento descrito está ilustrado pela Figura 21, onde o referido experimento ilustra como foi a montagem do sistema de aquisição de dados. Este dispositivo capta as informações fornecidas pela célula de carga e pelo transdutor potenciométrico (LVDT). Em seguida o equipamento de aquisição de dados “*Spider*” transfere os dados para o “*software*” CATMAN 4.0.

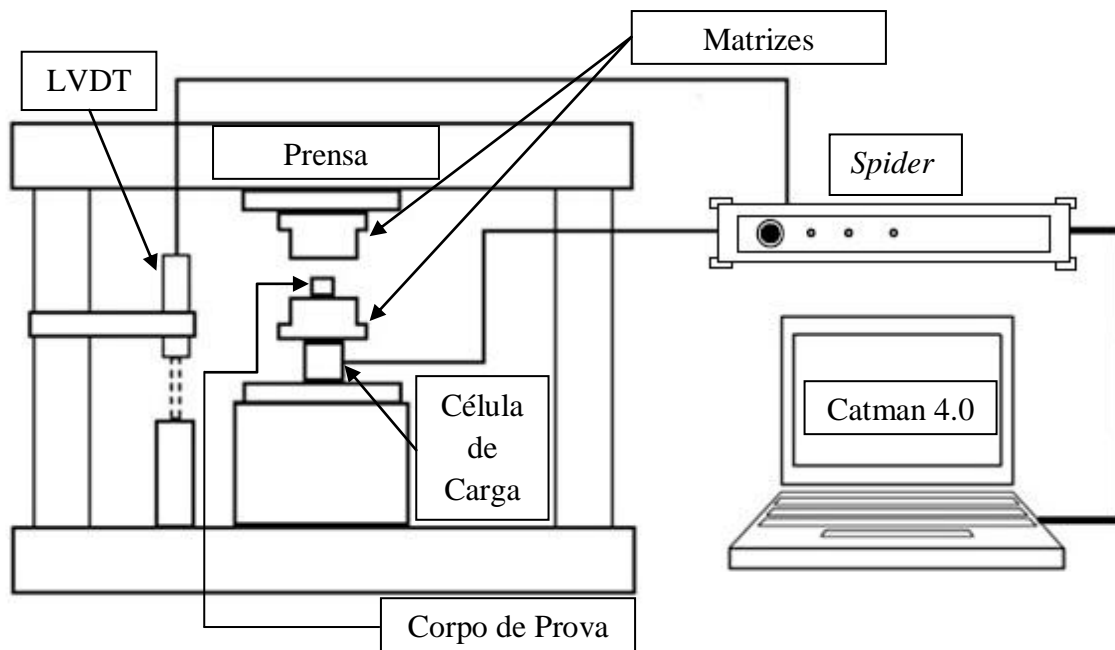


Figura 21: Experimento Determinação Curva de Escoamento - AISI4140

Para realização do ensaio de compressão, foram utilizadas matrizes fabricadas com material H13 temperado e, para garantir que as reduções finais de cada corpo de prova fossem 20%, 40% e 60% da altura inicial, foram utilizados, respectivamente, batentes de 24mm, 18mm e 12mm, cujo material também é o aço H13 temperado. Na Figura 22 estão ilustradas a Matriz Superior e Inferior do experimento.



Figura 22: Matrizes para Ensaio de Compressão

Para o referido ensaio, foram confeccionados corpos de prova em formatos cilíndricos maciços com dimensões pré-estabelecidas para o referido ensaio, ou seja, com

diâmetro de 20 mm e altura de 30 mm, respeitadas as proporções constantes para o referido experimento como observado na Figura 23.

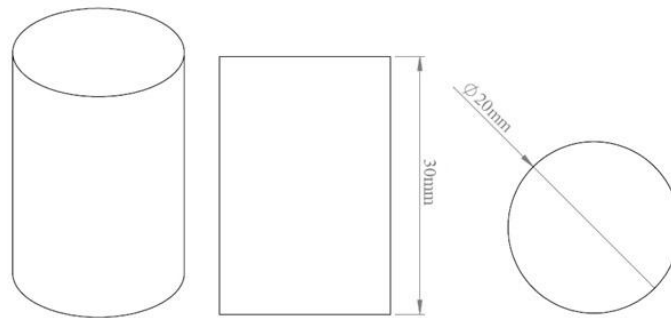


Figura 23: Corpos de Prova - Ensaio de Compressão

Logo após os experimentos, o “software” de aquisição de dados fornece apenas os registros de força “ F ” x deslocamento “ h ”, desta forma se faz necessário o uso das Equações 1 e 6 apresentada no capítulo 2.5.2, para construção da curva de escoamento “ k_f x φ ”:

$$k_f = \frac{F}{A_i} \quad \text{e} \quad \varphi = \ln \frac{h_i}{h_0}$$

Como se pode observar na Tabela 3, os parâmetros utilizados para obtenção da curva de escoamento do material em estudo. Para tais considerações, foram utilizadas as mesmas condições experimentais para o processo de puncionamento por cisalhamento:

Tabela 3: Parâmetros para Obtenção da Curva de Escoamento - AISI4140

	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura das Matrizes Superior e Inferior	ϑ_m	30	°C
Temperatura dos Corpos de Prova	ϑ_p	1100	°C
Diâmetro dos Corpos de Prova	ϕ	20	mm
Altura Inicial dos Corpos de Prova	h_0	30	mm
Altura Final dos Corpos de Prova	h_f	12	mm
Velocidade da Prensa	v	3,7	mm/s

Os ensaios de compressão foram realizados com uma velocidade média de deformação “ $\dot{\varphi}_m$ ” aproximadamente igual a $0,215 \text{ s}^{-1}$ conforme cálculos da Equação 9:

$$\dot{\varphi}_0 = \frac{v}{h_0} = \frac{3,7}{30} \cong 0,12 \text{ s}^{-1};$$

$$\dot{\varphi}_f = \frac{v}{h_f} = \frac{3,7}{12} \cong 0,31 \text{ s}^{-1};$$

$$\dot{\varphi}_m = \frac{\dot{\varphi}_0 + \dot{\varphi}_f}{2} = \frac{0,12 + 0,31}{2} \cong 0,215 \text{ s}^{-1}$$

Os resultados e as devidas considerações destes experimentos estão descritos e discutidos no Capítulo 4 Resultados e Discussões; e Subcapítulo 4.2 Determinação Experimental da Curva de Escoamento do Aço AISI4140.

3.3 Parâmetros e Cálculo Analítico da Força de Puncionamento

Os cálculos utilizados para o esforço teórico levou em consideração alguns dados preliminares identificados pela Tabela 4:

Tabela 4: Dados para Cálculo da Força Empírica de Puncionamento

	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de Escoamento do Material	k_f	100	MPa
Tensão de Cisalhamento do Material	τ_c	50	MPa
Diâmetro dos Corpos de Prova	D_p	67,5	mm
Diâmetro das Pontas dos Punções	d_p	20	mm
Diâmetro de Cisalhamento da Matriz Inferior	d_m	23,3	mm
Altura dos Corpos de Prova	h	40,5	mm
Razão entre Diâmetro e Altura - Corpos de Prova	D_p/h	1,67	-

O valor da razão entre o diâmetro e a altura dos corpos de prova é menor que 6, portanto justifica-se o uso da Equação 17. A referida equação denotada por [SPUR e STÖRFERLE, 1983], nos fornece o valor de pressão, cujo ferramental, neste caso o punção, está submetido ao exercer o deslocamento para perfuração.

$$P = k_f \left[2 + 1,1 \cdot \ln \left(\frac{D_p}{d_p} \right) \right]$$

$$P = 100 \left[2 + 1,1 \cdot \ln \left(\frac{67,5}{20} \right) \right]$$

$$P = 100[2 + 1,1 \cdot \ln(3,375)]$$

$$P = 100[2 + 1,1 \cdot 1,216]$$

$$P = 100[2 + 1,338]$$

$$P = 100[3,338]$$

$$P \cong 333,80[MPa]$$

Ainda se faz necessário o cálculo da área superficial “ A_s ” de contato entre a superfície do punção para realização do cálculo da força “F” analítica de perfuração por puncionamento – Equação 15. Considera-se, para este caso em especial, uma geometria plana,

pois os cálculos para punções que dispõem de diferentes geometrias e ângulos não apresentaram variações significativas no valor de referência para a área superficial.

$$A_s = \pi \cdot d_p \cdot h$$

$$A_s = \pi \cdot 20 \cdot 40,5$$

$$A_s \cong 2544,69 [mm^2]$$

Portanto a força “F” total necessária para o Puncionamento do material, nessas dimensões é correspondente ao cálculo denotado pela Equação 15:

$$F = A_s \cdot P$$

$$F = 2544,69 [mm^2] \cdot 333,80 [MPa]$$

$$F = 2544,69 [mm^2] \cdot 333,80 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$F \cong 850 \text{ kN}$$

Utilizando o cálculo da força de cisalhamento demonstrado por [SCHAEFFER e ROCHA, 2007] - Equação 17 pode-se realizar o cálculo da Força de Puncionamento:

$$F = A_s \cdot \tau_c$$

$$F = A_s \cdot \frac{k_f}{2}$$

$$F = 2544,69 [mm^2] \cdot \frac{100}{2} [MPa]$$

$$F = 2544,69 [mm^2] \cdot 50 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$F \cong 127,25 \text{ kN}$$

3.4 Parâmetros de Simulação Computacional do Processo de Puncionamento

A utilização dos Métodos de Elementos Finitos (“*Finite Element Methods*” - FEM) para simulação numérica com auxílio computacional é uma das mais comuns para avaliação das distribuições de tensões, deformações e o máximo esforço necessário para a conformação mecânica de diversos materiais. Neste cenário, para simulação do processo de puncionamento, foi adotado o “*software Simufact.Forming 12.0*”. Os valores dos parâmetros de entrada estão demonstrados com suas respectivas unidades na Tabela 5. Alguns destes dados, como os térmicos, por exemplo, foram usados pelo próprio programa de simulação e,

para efeitos de simulação numérica, mantidos. Porém em outros casos houve a necessidade de alteração, como por exemplo, a emissividade devido, dentre outras características, à porosidade existente na peça de trabalho durante a deformação mecânica à quente, levando em consideração a formação de óxidos [KREITH; BOHN, 2003].

Tabela 5: Parâmetros de Simulação Numérica

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção	k	50	W/m ² .K
Coefficiente de Transferência de Calor por Irradiação	I	20000	W/m ² .K
Emissividade por Radiação Térmica ao Meio Ambiente	ε	0,9	-
Atrito Interfacial entre Corpos de Prova e Ferramental	μ	0,4	-
Temperatura dos Punções e Matriz Inferior	g_m	30	°C
Temperatura dos Corpos de Prova	g_p	1100	°C
Material dos Punções e Matriz	-	H13	-
Material dos Corpos de Prova	-	4140	-
Altura dos Corpos de Prova	h	40,5	mm
Diâmetro dos Corpos de Prova	D_p	67,5	mm
Diâmetro das Pontas de Corte dos Punções	d_p	20	mm
Diâmetro de Cisalhamento da Matriz Inferior	d_m	23,3	mm
Velocidade da Prensa	v	3,7	mm/s

O material definido para os corpos de prova foi o aço AISI4140 e o material dos punções, insertos e matrizes foram o aço ferramenta H13 ambos encontrados na biblioteca do “*software*” de simulação. A temperatura do tarugo cilíndrico virtual inserido na simulação foi de 1100 °C e, para os punções e insertos, considerou-se uma temperatura ambiente de 30 °C.

Para o coeficiente de atrito entre os corpos de prova e os ferramentais estabelecidos na simulação, foi utilizado, para este caso, na conformação à quente de ligas metálicas, o valor de 0,4. Sendo este valor consideravelmente elevado pelas próprias características deste processo de conformação, pois no experimento prático há a formação de carepas deixando este coeficiente de atrito alto em comparação com os usualmente aplicados.

Todas as peças empregadas na simulação numérica foram modeladas com o auxílio do “*Software Solidworks 2013*” e, posteriormente salvos em uma extensão específica para que os modelos pudessem ser manipulados, posicionados, definidos suas propriedades físicas no “*software Simufact.Forming 12.0*”. Neste último caso, o próprio “*software*” gerou o modelo do corpo de prova com 4955 elementos finitos e, cada um destes elementos infinitesimais

formaram uma malha de 2 mm de largura como ilustrado na Figura 24. Nesta simulação foi aplicada malha tetraédrica por ser a melhor para este tipo de simulação [COLOMBO, 2012].

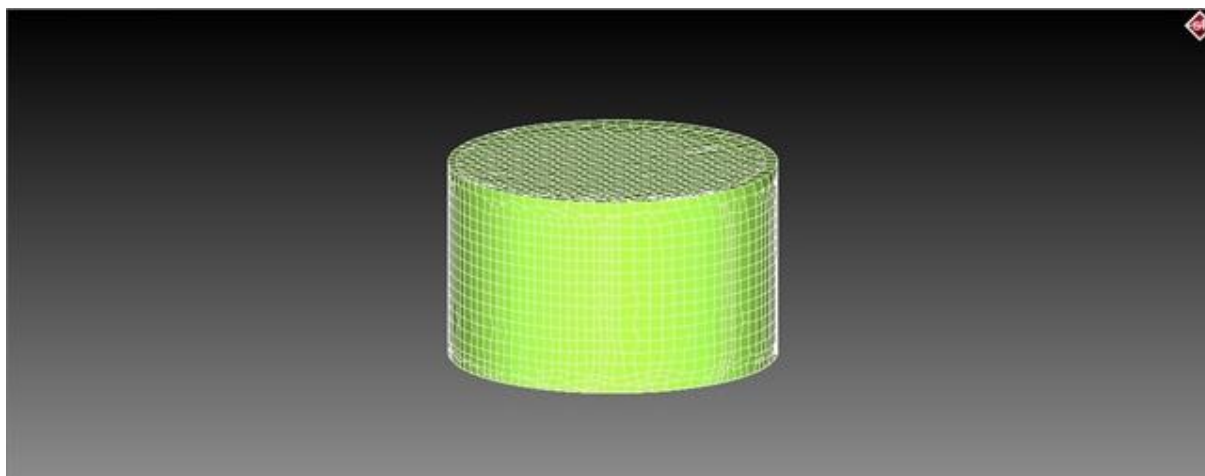


Figura 24: Corpo de Prova Modelado - Simufact Forming 12.0

Foram simulados punções com diferentes formatos de pontas (ângulos distintos), que aqui são nomeados como: punção estreito, punção inclinado e punção pontudo. Para cada uma destas geometrias foram aplicados cinco diferentes ângulos para as pontas com 05°, 10°, 15°, 20° e 25°; onde esta variação angular “ $\Delta\theta$ ” pode ser melhor observada no “croqui” da Figura 33 na página 61. Os processos de puncionamento foram simulados para estes diferentes tipos de geometrias e ângulos das pontas dos punções. Na Figura 25 são apresentados os punções de geometria estreita, com os respectivos ângulos de 05°, 10°, 15°, 20° e 25°.

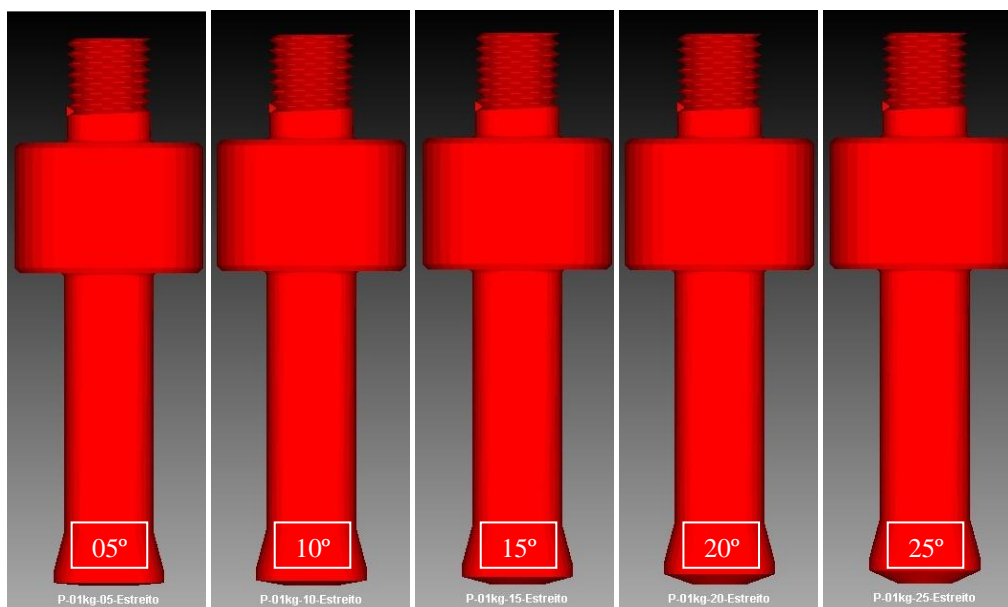


Figura 25: Punções com Geometria Estreita e Diferentes Ângulos

Os punções de geometria inclinada como ilustrados na Figura 26, possuem a mesma variação de ângulos dos punções estreitos como já descrito anteriormente, porém nas suas

extremidades, o raio angular resultante das suas pontas é maior quando comparados com os de geometria estreita, outra diferença é a espessura do gume cisalhante ser maior.

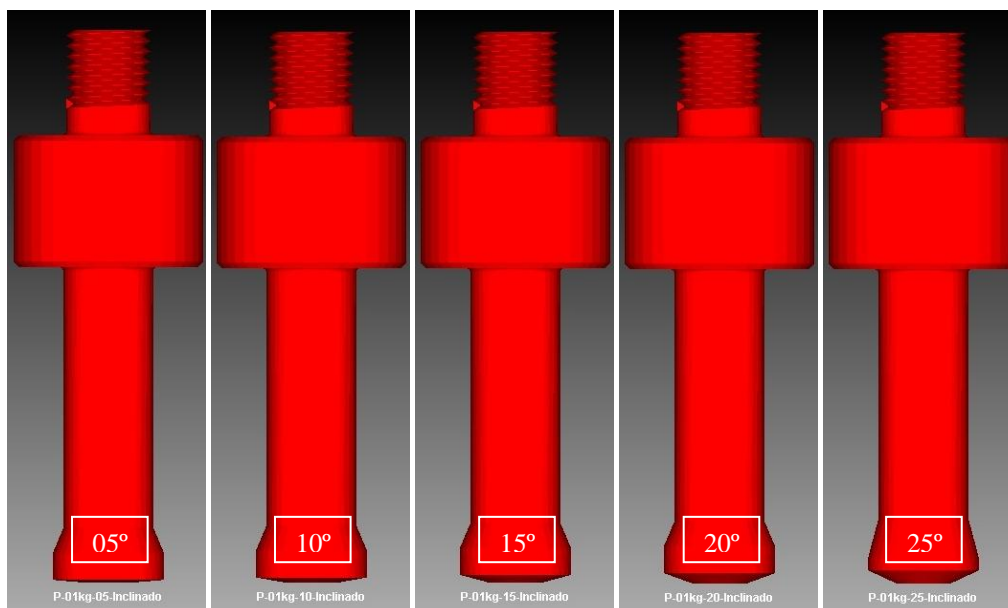


Figura 26: Punções com Geometria Inclinada e Diferentes Ângulos

De forma análoga, também foram desenhados e modelados punções com geometria pontuda, neste caso, a extremidade destes punções são e formato cônico como pode ser observado o modelo da Figura 27, de forma a avaliar qual das formas geométricas apresenta o resultado mais eficaz.

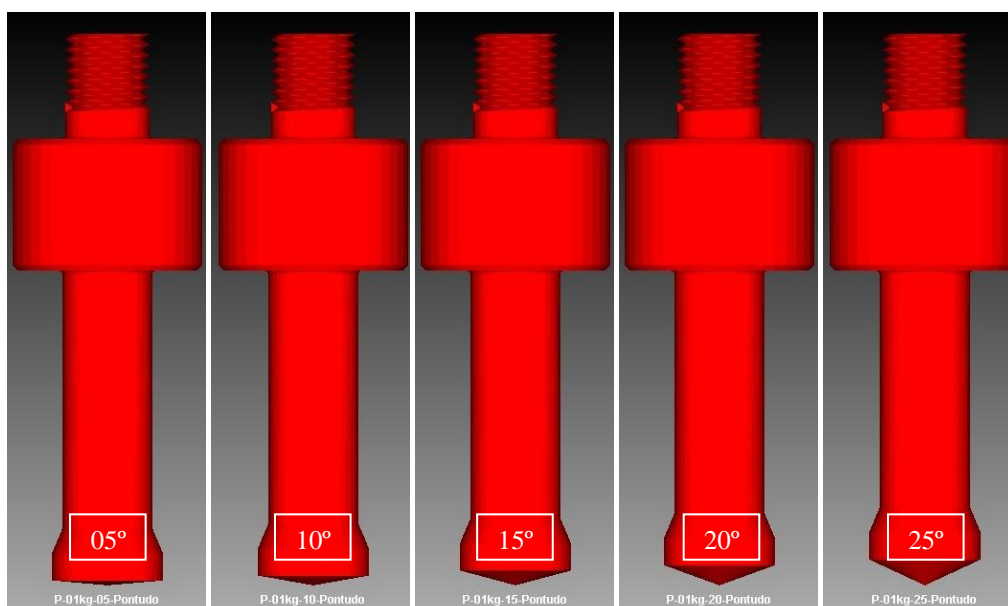


Figura 27: Punções com Geometria Pontuda e Diferentes Ângulos

É importante ressaltar que o ângulo de saída do inserto alocado no centro da matriz inferior, responsável pelo cisalhamento do corpo de prova, também foram simulados para

diferentes valores em outro trabalho. Os valores destes ângulos foram de 2,5°; 5,0° e 10,0°, cujo valor que demonstrou melhor aplicação para o presente estudo, foi o ângulo de 10° conforme ilustrado na Figura 28 [CORREA, 2013]. Isto se deve ao fato do maior ângulo de saída aliviar as tensões resultando em uma maior facilidade de escoamento do material.

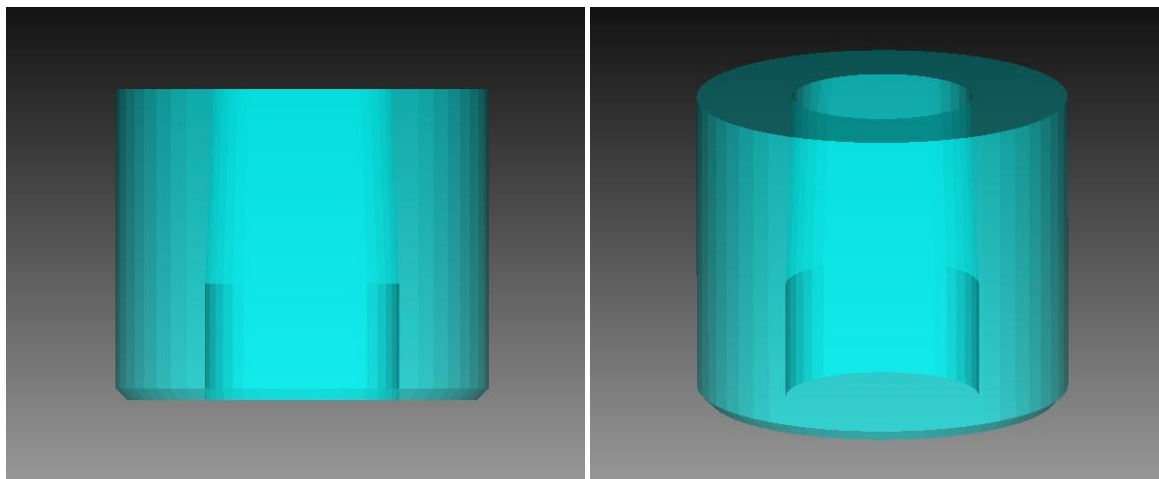


Figura 28: Matriz Inferior

O fixador da matriz possui importante função, pois é nela onde a matriz inferior é posicionada. Existe uma cavidade central onde a matriz inferior não seja movida ao longo do avanço dos punções como pode ser observada na Figura 29. Além do posicionamento central do inserto, necessita-se a existência de uma região vazada abaixo do inserto, de forma que o excesso de material, expurgado pelo punção, tenha uma câmara de escape.

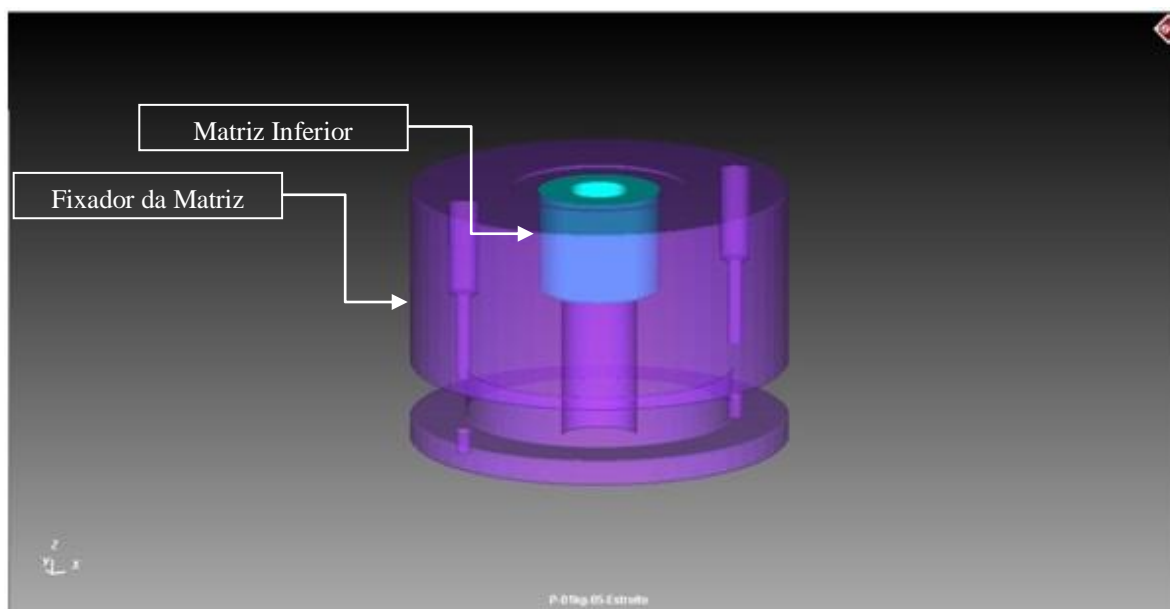


Figura 29: Fixador da Matriz Inferior e Matriz Inferior Posicionada

Portanto, para fins de simulação e modelagem numérica, realizaram-se ao todo, 15 simulações para os diferentes tipos de ângulos e geometrias das ferramentas empregadas no processo, e a montagem do que seria o experimento prático é ilustrado na Figura 30.

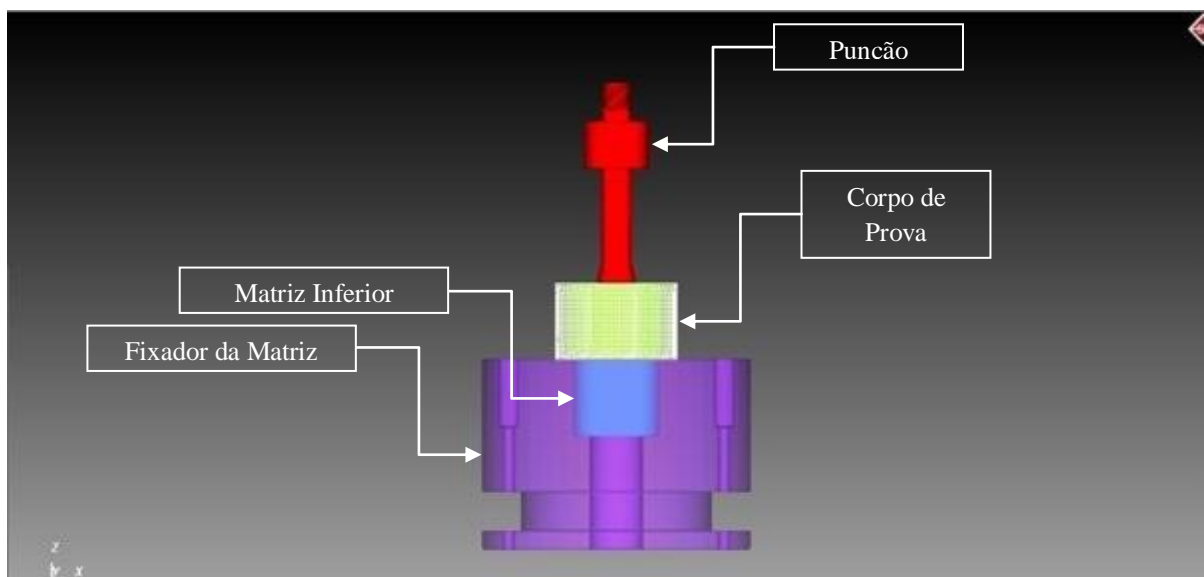


Figura 30: Montagem do Processo para Simulação Computacional

Nestas simulações, a parte inferior do ferramental (matriz inferior (inserto), fixador da matriz e corpo de prova) permanece fixa e centralizada pelo eixo das cotas, ou seja, pelo eixo vertical “z”. A única parte móvel da simulação é a parte superior do ferramental, logo o punção, que além de estar centralizado para avançar e perfurar o corpo de prova lhe foi atribuído uma velocidade de avanço aproximada de 3,7 mm/s, de acordo com o cálculo das médias das velocidades da prensa em que foi realizado o experimento prático.

Os demais dispositivos apresentados no experimento prático não foram modelados computacionalmente para simulação numérica, pois não influenciam diretamente para o resultado do cálculo da força de punção.

3.5 Experimento Prático de Perfuração por Punção

Para efeitos experimentais, o processo de punção foi modelado de forma a representar o mais fiel possível a situação real, dentro das limitações e variáveis que puderam ser atribuídas dentro do “software” de simulação numérica. A Figura 31 ilustra o corpo de prova com uma geometria cilíndrica modelada para a simulação do processo de perfuração por punção, as imagens subsequentes seguem apresentando todo ferramental utilizado (como já descrito) e sua respectiva montagem como forma de representar o experimento prático realizado o mais próximo possível com a realidade prática.

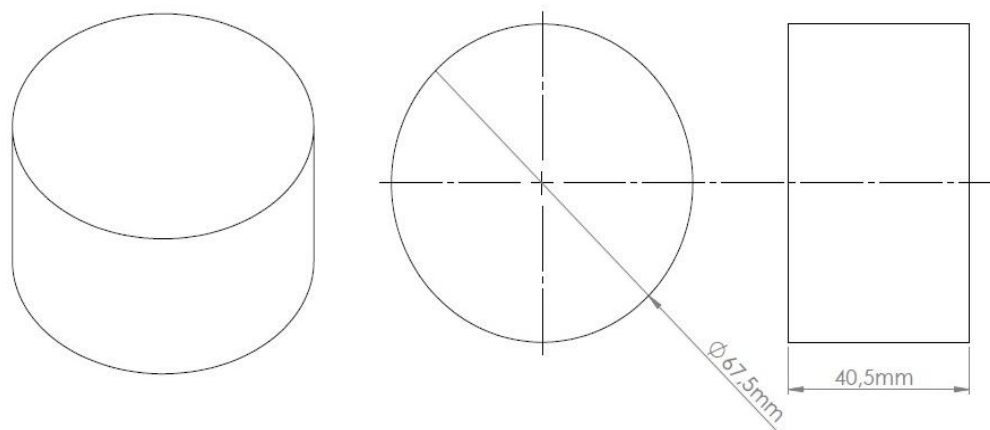


Figura 31: Corpo de Prova para Experimento de Puncionamento

A matriz inferior (inserto) está ilustrada na Figura 32 confecciona é fixada no suporte inferior cujo papel é o de cisalhar o material puncionado com suas respectivas dimensões.

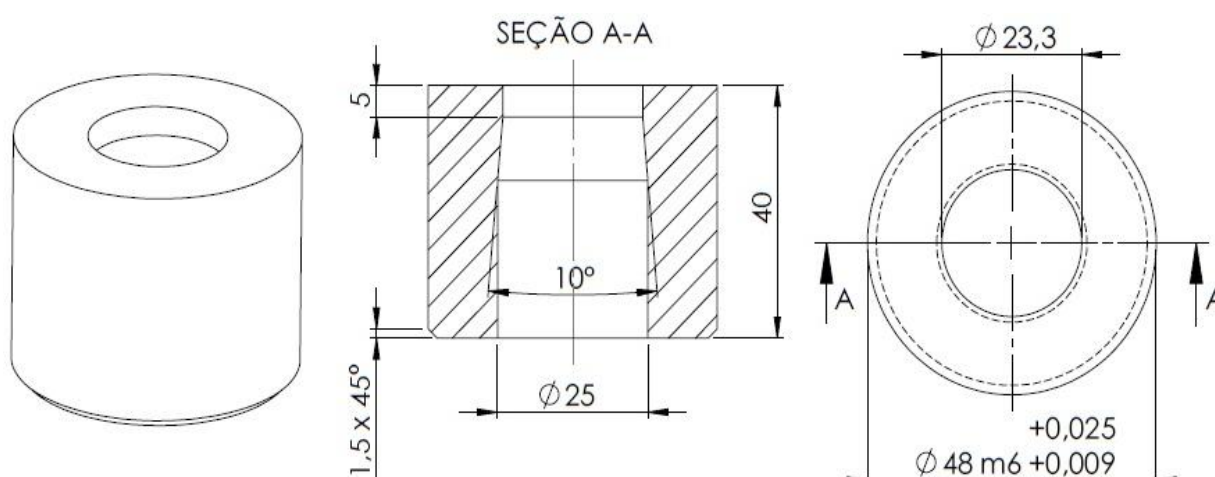


Figura 32: Matriz Inferior (Inserto) - Experimento Prático de Puncionamento

Os punções utilizados para o experimento para análise das melhores geometrias empregadas neste processo são os que apresentam características similares, porém com a variação dos ângulos de suas pontas, denotado por “ $\Delta\theta$ ”, em destaque na Figura 33.

Os punções foram confeccionados com material H13, por ser muito comum em indústrias metalúrgicas. A diferença entre o material perfurante do restante das matrizes é que apenas os punções e inserto passaram por um processo de têmpera visando garantir uma maior dureza e resistência destes materiais para o processo industrial.

É importante ressaltar que todos os punções confeccionados possuem as mesmas medidas e características, sendo sua única variável que difere uns dos outros, o ângulo “ θ ” de suas pontas. As variações dos ângulos de inclinação das pontas dos punções “ $\Delta\theta$ ”, possuem medidas de 05°, 10°, 15°, 20° e 25°.

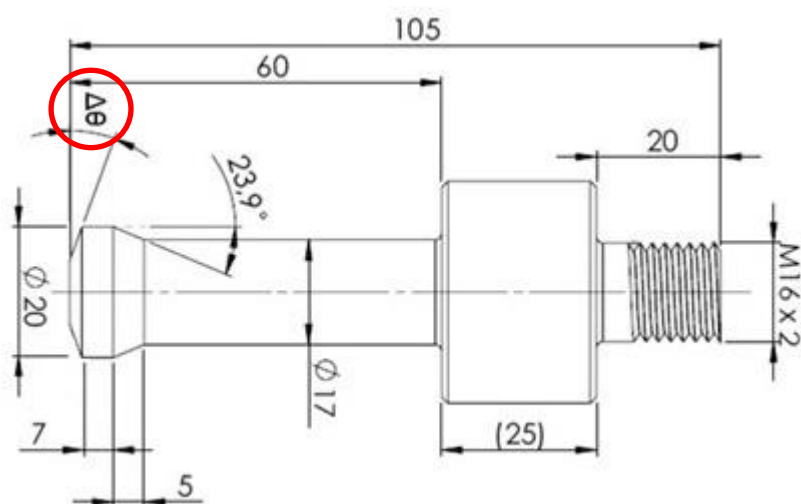


Figura 33: Punção Estreito - Experimento Prático de Puncionamento

Para o experimento, foi elaborado um procedimento com o auxílio de uma placa extratora e seis molas fixadas e posicionadas junto à matriz superior com o auxílio de seis parafusos corretamente dimensionados.

O principal objetivo deste mecanismo é a remoção do punção do centro do corpo de prova e, caso seja necessário, um esforço realizado pelas molas posicionadas para remoção do punção pela própria placa extratora como mostra a Figura 34.

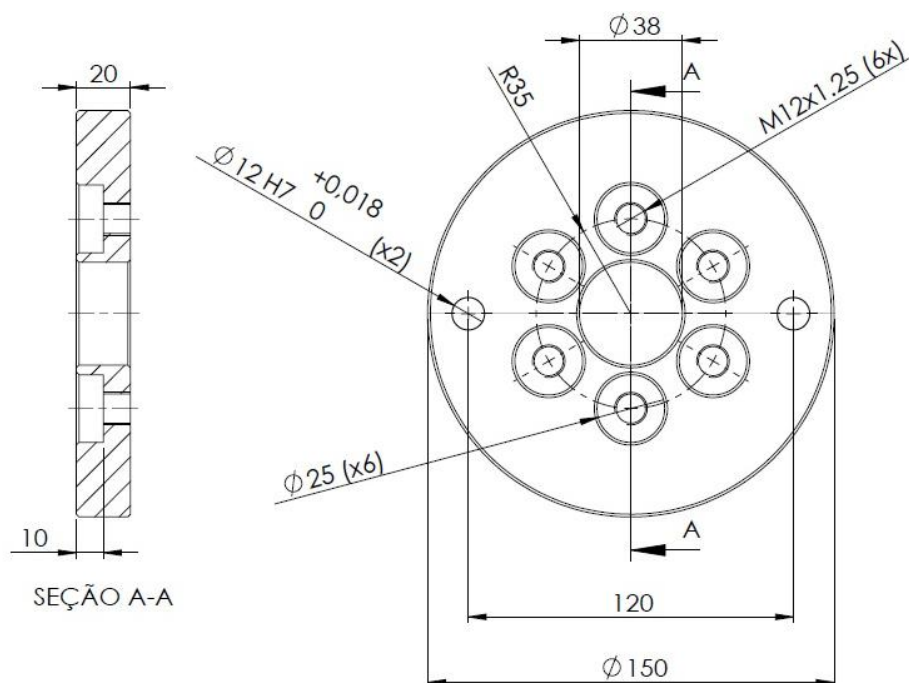


Figura 34: Placa Extratora - Experimento Prático

O pino guia tem como finalidade alinhar e manter o curso das matrizes superior e inferior e, conseqüentemente, o curso linear do punção. A cada troca dos punções, o

ferramental é movimentado livremente, para verificar a centralidade das matrizes superior e inferior cuja função é desempenhada pelo pino guia - Figura 35.

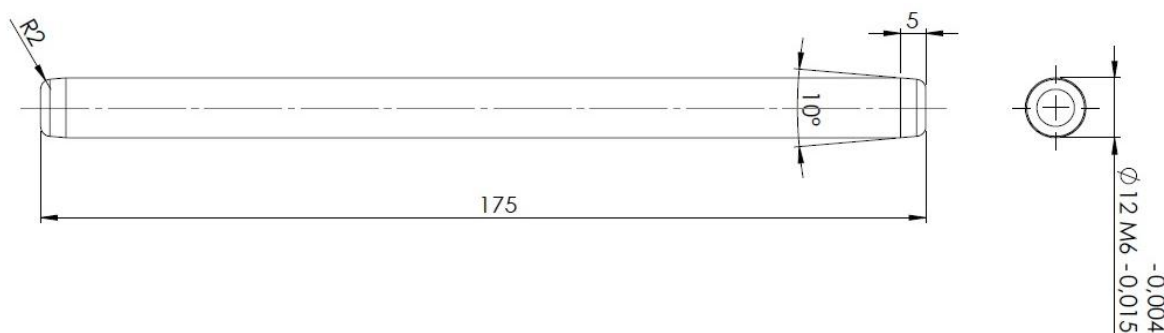


Figura 35: Pino Guia de Alinhamento das Matrizes

As seis molas que exerceram a força de expulsão do punção pela placa extratora, foram adquiridas de acordo com as características dimensionadas pelo processo prático no meio industrial conhecida como mola carga extrapesada, série G25-076 encontrado no catálogo de molas da fabricante polimold S/A ilustrado na Figura 36.

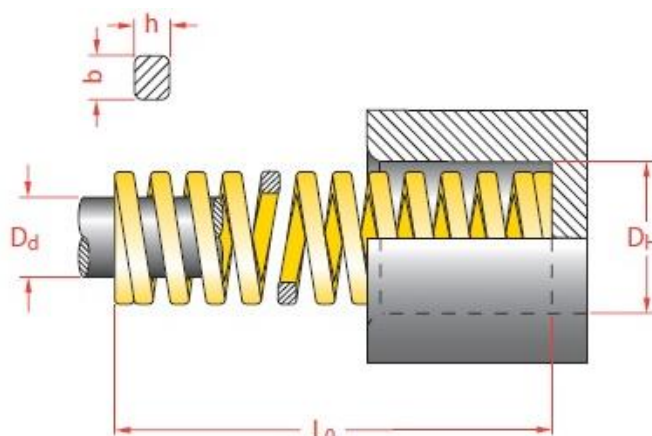


Figura 36: Mola Carga Extra Pesada - Modelo G25-076 - cortesia polimold S/A

As características das molas aplicadas e ilustradas na Figura 36 são [polimold S/A]:

$$D_H = 25,0\text{mm}$$

$$D_d = 12,5\text{mm}$$

$$L_0 = 76,0\text{mm}$$

$$b = 5,40\text{mm}$$

$$h = 4,60\text{mm}$$

Toda montagem do ferramental proposto para realização desta etapa, além dos punções, inserto, placa extratora, pinos guias, molas e o restante dos componentes pode ser

visualizado pela Figura 37 e, com isso, pretende-se dar uma noção geral do processo experimental.

Na vista explodida, representada pela Figura 37, é possível observar onde cada componente será posicionado. Nota-se que as matrizes são transpassadas por dois pinos guia que tem por objetivo manter o alinhamento do ferramental, evitando assim, possíveis deslocamentos horizontais indesejados. O punção, por exemplo, será fixado na matriz superior pela rosca. Isto se deve ao fato de facilitar a troca de um punção por outro durante o processo experimental.

Os corpos de prova foram acondicionados em uma caixa com a solução de grafite já preparada com antecedência, só então este recipiente foi aquecido a 1100 °C no interior de um forno resistivo convencional, modelo Linn Elektro Therm, cuja potência máxima chega a 3,3 kW. O restante do ferramental foi instalado em uma prensa EKA com capacidade máxima de 40 tonf e velocidade média de 3,7 mm/s. Na fixação superior, foi acoplada uma célula de carga no centro de esforço entre a base da mesa superior da prensa e a matriz superior onde os punções são fixados, para que o sistema HBM pudesse registrar os dados de esforços provenientes do puncionamento.

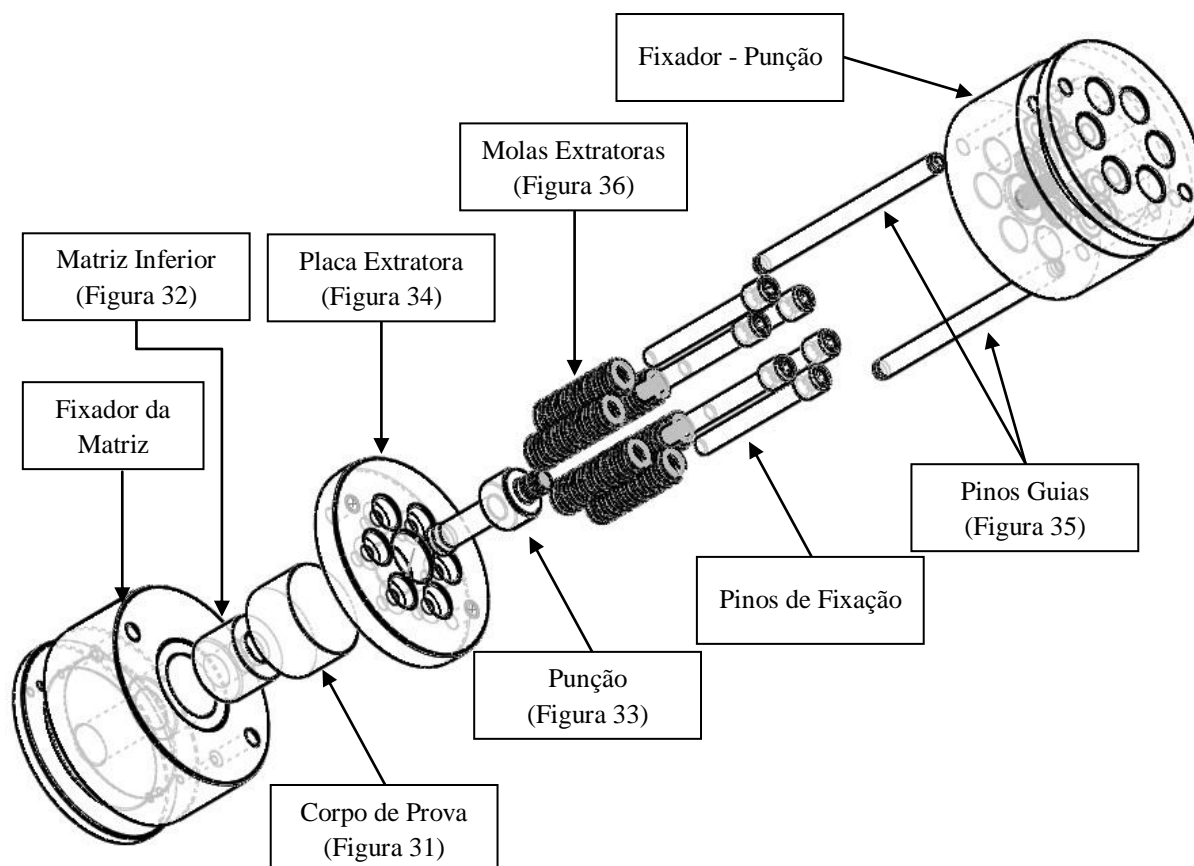


Figura 37: Vista Explodida do Experimento Prático de Perfuração por Puncionamento

O inserto será apenas posicionado no centro da matriz inferior, cuja função é apenas de mantê-lo imóvel ao longo do processo de perfuração, não sendo necessário qualquer tipo de fixação extra.

Além da célula de carga, também foi posicionado um dispositivo para medir o deslocamento da mesa superior da prensa, cuja nomenclatura é conhecida como LVDT. Este componente consiste em uma haste que se desloca no interior de um dispositivo com o objetivo de registrar o deslocamento do ferramental. Em ambos os casos, tanto a célula de carga, como o sistema de medição de deslocamento, foram configurados e conectados a um sistema de registro de dados e capturados pelo sistema de aquisição de dados conhecido como CATMAN 4.0 ilustrados na Figura 38.

O procedimento consiste em fixar um punção na matriz superior por meio de uma rosca em sua base e, logo a seguir, posicionar o corpo de prova aquecido a 1100 °C, retirado do forno e acionar a prensa até a ruptura do material. Assim, obtêm-se o orifício desejado pelo processo de puncionamento. Em seguida o punção é removido para que se possa alocar outro em seu lugar, repetindo-se o processo de perfuração até que se tenham adquiridos os dados de esforços de todos os punções.



Figura 38: Esquema da Montagem Experimental para Processo de Puncionamento

A Tabela 6 ilustra os parâmetros do procedimento experimental para o processo de perfuração por puncionamento.

Tabela 6: Parâmetros do Procedimento Experimental

	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura dos Punções e Matriz	ϑ_m	30	°C
Temperatura dos Corpos de Prova	ϑ_p	1100	°C
Diâmetro dos Corpos de Prova	ϕ	68,5	mm
Altura dos Corpos de Prova	h	40,5	mm
Material dos Punções e Matriz	-	H13	-
Material dos Corpos de Prova	-	4140	-
Velocidade da Prensa	v	3,7	mm/s
Coefficiente de Atrito	μ	0,4	-

3.6 Determinação Teórica e Prática da Perda Térmica no Puncionamento

Para cálculo da perda térmica dentro do experimento do processo de puncionamento foi necessário conhecer alguns parâmetros importantes, como por exemplo, a constante de “Stefen-Boltzman”, a emissividade e a temperatura do corpo de prova retirado do forno. Com essas, e outras variáveis importantes foi possível calcular a perda térmica do corpo de prova ao longo do experimento prático de puncionamento.

A Tabela 7 identifica os parâmetros utilizados na equação que calcula a perda térmica total durante o processo de experimento prático, onde os valores de perda térmica e variação de temperatura não encontram-se preenchidos porque estes foram determinados a partir das variáveis identificadas e das equações subsequentes.

Tabela 7: Parâmetros - Cálculo de Perda Térmica

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Constante de Irradiação	δ	$5,67 \times 10^{-8}$	$\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
Área Superficial de Contato	A_s	12166,8	mm^2
Emissividade	ε	1,0	-
Temperatura Absoluta do Corpo	ϑ	1100+273	K
Perda Térmica por Unidade de Tempo	Q_s	-	kJ/s
Volume do Corpo de Prova	V	144928	mm^3
Densidade Específica do Aço	ρ	7860	kg/m^3
Calor Específico	c_p	486	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{°C}$
Varição da Temperatura	$\Delta\vartheta$	-	°C

Com base nos parâmetros mencionados, aplicam-se as variáveis nas equações com objetivo de se determinar qual a perda térmica total do processo de puncionamento:

$$Q_s = \delta \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \vartheta^4$$

$$Q_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{kJ}{s \cdot m^2 \cdot K^4} \right] \cdot 0,0121668 [m^2] \cdot 1 \cdot [(1100 + 273)^4 - (303)^4] [K^4]$$

$$Q_s \cong 2445 \left[\frac{kJ}{s} \right]$$

É importante notar que, alguns valores informados pela tabela 5, como é o caso da área superficial de contato e do volume do corpo de prova, tiveram que ser convertidos para suas respectivas unidades internacionais, ou seja, para o SI. E assim obter os valores corretos fornecidos pela equação do cálculo de perda térmica e variação da temperatura.

$$\Delta\vartheta = \frac{Q_s}{V \cdot \rho \cdot c_p}$$

$$\Delta\vartheta \cong \frac{2445 \left[\frac{kJ}{s} \right]}{0,000144928 [m^3] \cdot 7860 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 486 \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right]}$$

$$\Delta\vartheta \cong 4,2 \left[\frac{^\circ C}{s} \right]$$

Com base nas equações e parâmetros previamente definidos, foi possível estimar uma perda térmica aproximada de 4,5°C/s. O tempo cronometrado a partir da retirada do corpo de prova do forno, colocação na posição correta para o puncionamento, até o final do curso do punção e, conseqüentemente, perfuração propriamente dita foi, em média, de 20 segundos. Portanto, a temperatura final do blank, após o processo experimental foi estimado de acordo com a equação analítica:

$$\Delta\vartheta \cong 1100 [^\circ C] - 20 [s] \cdot 4,2 \left[\frac{^\circ C}{s} \right]$$

$$\Delta\vartheta \cong 1100 [^\circ C] - 84,565 [^\circ C]$$

$$\Delta\vartheta \cong 1015,435 [^\circ C]$$

A variação da temperatura do corpo de prova, a partir das equações e cálculos demonstrados são visíveis no gráfico da Figura 39. Este gráfico apresenta um comportamento linear, ou seja, a relação de perda térmica “versus” tempo pode ser calculada com o uso da seguinte equação:

$$\vartheta_f = -4,2 \left[\frac{^\circ C}{s} \right] \cdot t [s] + 1100 [^\circ C]$$

Eq. 20

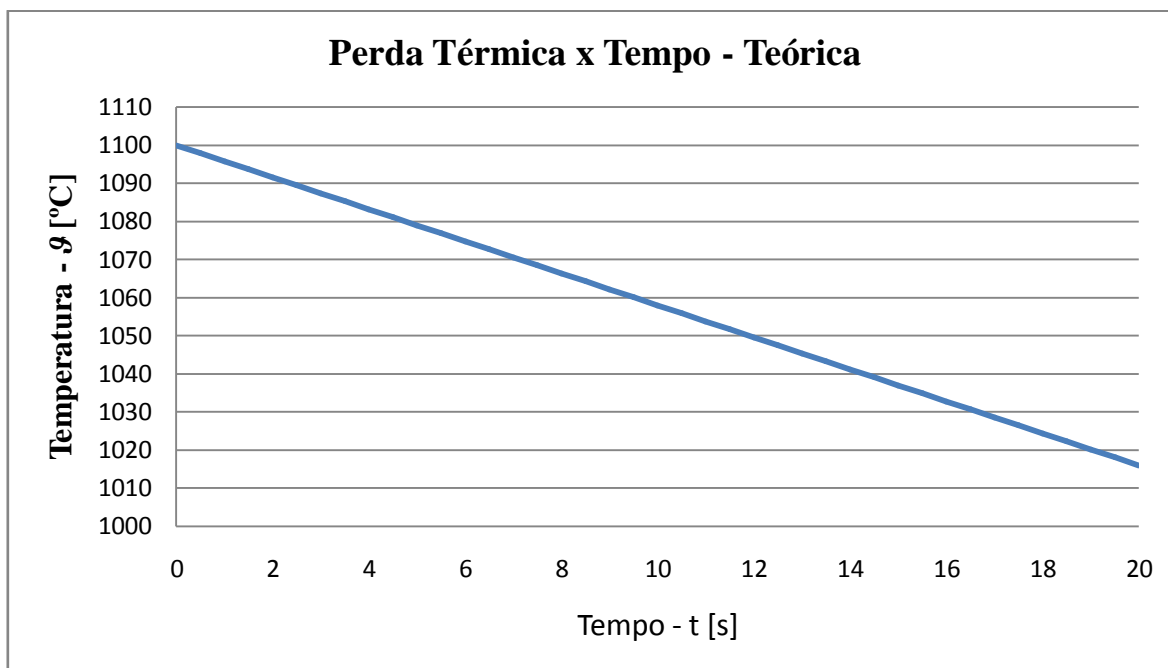


Figura 39: Gráfico da Temperatura pela Equação de Perda Térmica - Teórica

Para confirmar esta estimativa, dentro do processo experimental se fez o uso de termopares aplicados diretamente ao corpo de prova cujos dados foram adquiridos pelo sistema “Spider”. Os dados de perda térmica de calor podem ser observados no gráfico da Figura 40 que, da mesma forma, obedecem, uma curva linear cuja equação da perda térmica experimental é representada por:

$$\theta_f = -4,35 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} \right] \cdot t[\text{s}] + 1100[^{\circ}\text{C}] \quad \text{Eq. 21}$$

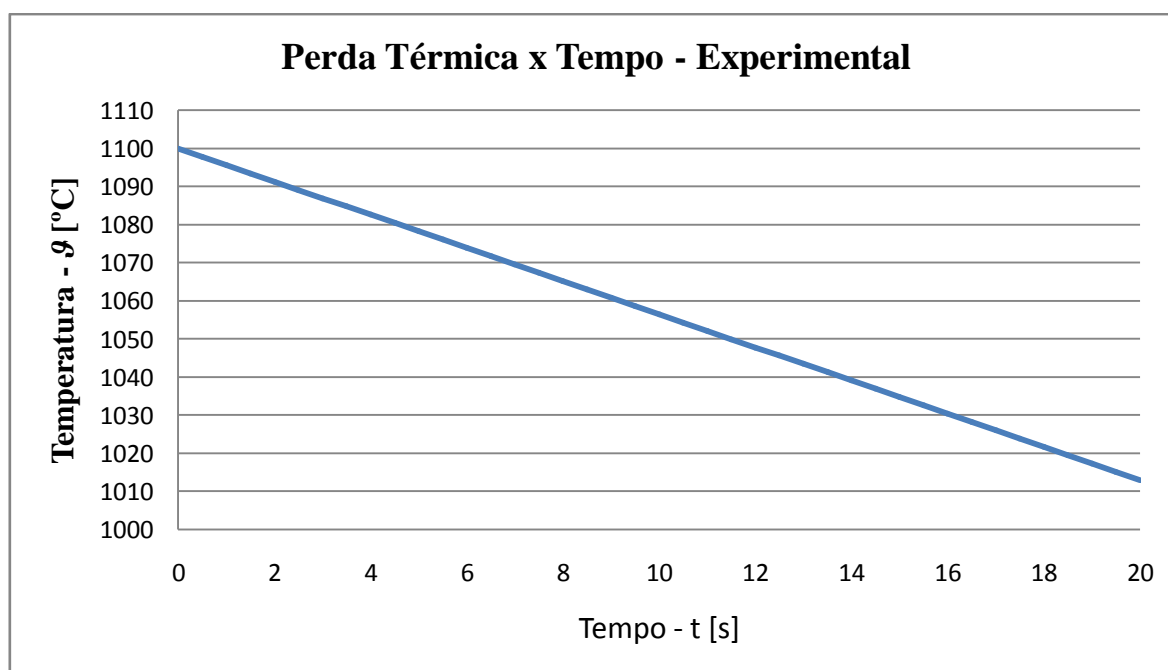


Figura 40: Gráfico da Temperatura pela Medida com Termopares - Experimental

Concomitantemente, foi utilizado um termômetro digital por infravermelho onde o principal objetivo do seu uso, foi monitorar o decaimento de temperatura do corpo de prova ao longo do processo experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos e dos métodos adotados para a execução dos experimentos mencionados no capítulo anterior. Os resultados aqui apresentados foram obtidos seguindo rigorosamente os procedimentos com o objetivo de validar as comparações entre simulação computacional e os experimentos físicos.

4.2 Determinação Experimental da Curva de Escoamento do Aço AISI4140

Para determinação da curva de escoamento “ $k_f \times \varphi$ ”, foram realizados experimentos práticos de ensaio de compressão para o aço em estudo (AISI4140). A partir da descrição do experimento no capítulo anterior os dados foram obtidos, com auxílio de um sistema de captação de dados, transdutor potenciométrico (LVDT) e uma célula de carga. Os dados referentes à medida do deslocamento da altura instantânea “ h_i ”, área instantânea “ A_i ” e a força “ F ” aplicada são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dados da Altura Instantânea “ h_i ” Área Instantânea “ A_i ” e da Força “ F ” Aplicada

Peça 1			Peça 2			Peça 3			Peça 4			Peça 5		
h_i [mm]	A_i [mm ²]	F [kN]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	F [kN]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	F [kN]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	F [kN]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	F [kN]
29,26	322,13	27,32	29,22	322,57	27,61	29,70	317,35	26,86	29,73	317,03	26,71	29,47	319,76	27,12
28,24	333,69	29,01	28,32	332,82	29,21	29,03	324,70	28,47	29,10	323,92	28,26	28,67	328,75	29,15
26,88	350,62	31,68	27,01	348,99	30,94	27,88	338,07	30,61	27,96	337,03	29,50	27,43	343,62	31,96
25,44	370,44	33,71	25,57	368,59	33,07	26,47	356,11	32,93	26,57	354,69	31,62	26,01	362,39	34,28
23,99	392,86	36,00	24,11	390,87	35,42	25,01	376,87	35,02	25,13	375,10	33,79	24,55	383,84	36,59
22,56	417,76	38,55	22,68	415,52	37,97	23,55	400,13	37,46	23,68	397,94	36,28	23,11	407,74	39,19
21,14	445,78	41,33	21,26	443,23	40,75	22,13	425,92	40,20	22,26	423,36	38,96	21,69	434,46	42,04
19,75	477,11	44,32	19,87	474,27	43,70	20,71	455,00	43,19	20,85	451,94	41,86	20,29	464,44	45,12
18,39	512,61	47,71	18,50	509,45	47,05	19,33	487,57	46,44	19,47	484,12	45,00	18,91	498,27	48,53
17,04	553,16	51,70	17,15	549,61	50,89	17,96	524,82	50,03	18,10	520,71	48,49	17,55	536,88	52,41
15,72	599,62	56,49	15,83	595,30	55,49	16,61	567,28	54,35	16,76	562,47	52,58	16,22	580,93	57,03
14,45	652,14	62,15	14,55	647,57	60,91	15,30	616,08	59,47	15,44	610,33	57,48	14,93	631,26	65,51
13,24	711,95	68,62	13,32	707,35	67,11	14,03	671,66	65,38	14,17	665,31	63,14	13,68	688,76	68,79
12,07	780,58	76,25	12,14	776,21	74,42	12,82	735,28	72,19	12,94	728,34	69,60	12,49	754,74	76,10
12,02	784,39	77,74	12,00	785,40	76,13	12,00	785,40	77,84	12,00	785,40	75,67	11,96	787,90	80,27

Para o cálculo da área instantânea “ A_i ” foi aplicada a Lei da Constância de Volumes:

$$A_0 \cdot h_0 = A_i \cdot h_i \quad \text{Eq. 22}$$

De acordo com os procedimentos do ensaio de compressão, como descritos anteriormente. Com a aplicação da Equação 6, foram calculadas as deformações verdadeiras “ φ ”, onde para “ h_0 ” considera-se o valor inicial da altura do corpo de prova, ou seja, 30 mm.

Observa-se que ao realizar o cálculo da deformação verdadeira os resultados apresentados são negativos, haja visto que, por convenção, é o sentido do processo de compressão.

Para a determinação da tensão de escoamento do material “ k_f ”, foi realizada a aplicação da Equação 1, onde a tensão de escoamento do material é calculada pela razão da força “ F ” aplicada e da área instantânea “ A_i ” da seção onde esta mesma força é aplicada.

O cálculo desta área, leva em consideração o diâmetro inicial dos corpos de prova para o ensaio de compressão, ($\varnothing = 20$ mm), pois o mesmo apresenta geometria cilíndrica. Logo a área superficial onde a força “ F ” aplicada é calculada pela equação que determina a área de um círculo qualquer. A partir dos dados adquiridos e apresentados pela Tabela 8 e, ao aplicar as equações para determinação da deformação verdadeira “ φ ” e da tensão de escoamento do material “ k_f ”, foi possível calcular e obter os respectivos dados apresentados pela Tabela 9:

Tabela 9: Dados para Construção da Curva de Escoamento do Aço AISI4140

Peça 1		Peça 2		Peça 3		Peça 4		Peça 5	
$\left[\ln \left(\frac{h_i}{h_0} \right) \right]$	$k_f = \frac{F}{A_i}$	$\left[\ln \left(\frac{h_i}{h_0} \right) \right]$	$k_f = \frac{F}{A_i}$	$\left[\ln \left(\frac{h_i}{h_0} \right) \right]$	$k_f = \frac{F}{A_i}$	$\left[\ln \left(\frac{h_i}{h_0} \right) \right]$	$k_f = \frac{F}{A_i}$	$\left[\ln \left(\frac{h_i}{h_0} \right) \right]$	$k_f = \frac{F}{A_i}$
φ [-]	k_f [MPa]	φ [-]	k_f [MPa]	φ [-]	k_f [MPa]	φ [-]	k_f [MPa]	φ [-]	k_f [MPa]
0,03	85	0,03	86	0,01	85	0,01	84	0,02	85
0,06	87	0,06	88	0,03	88	0,03	87	0,05	89
0,11	90	0,11	89	0,07	91	0,07	87	0,09	93
0,16	91	0,16	90	0,13	92	0,12	89	0,14	95
0,22	92	0,22	91	0,18	93	0,18	90	0,20	95
0,29	92	0,28	91	0,24	94	0,24	91	0,26	96
0,35	93	0,34	92	0,30	94	0,30	92	0,32	97
0,42	93	0,41	92	0,37	95	0,36	93	0,39	97
0,49	93	0,48	92	0,44	95	0,43	93	0,46	97
0,57	93	0,56	93	0,51	95	0,51	93	0,54	98
0,65	94	0,64	93	0,59	96	0,58	93	0,61	98
0,73	95	0,72	94	0,67	97	0,66	94	0,70	99
0,82	96	0,81	95	0,76	97	0,75	95	0,78	100
0,91	98	0,90	96	0,85	98	0,84	96	0,88	101
0,97	99	0,92	97	0,92	99	0,92	96	0,93	102

A partir dos dados obtidos na Tabela 8, foram construídas as curvas de escoamento para o aço AISI4140 como podem ser vistas no gráfico da Figura 41. Para efeitos experimentais, o processo de ensaio de compressão foi realizado a partir de 20 corpos de prova confeccionados com material em estudo (AISI4140), porém para ilustrar o gráfico de

tensão de escoamento em função da deformação foram demonstrados apenas 5 curvas de escoamento. Estas são referentes aos dados das 5 peças como visto na Tabela 9, pois as demais curvas apenas se sobrepõem às demonstradas.

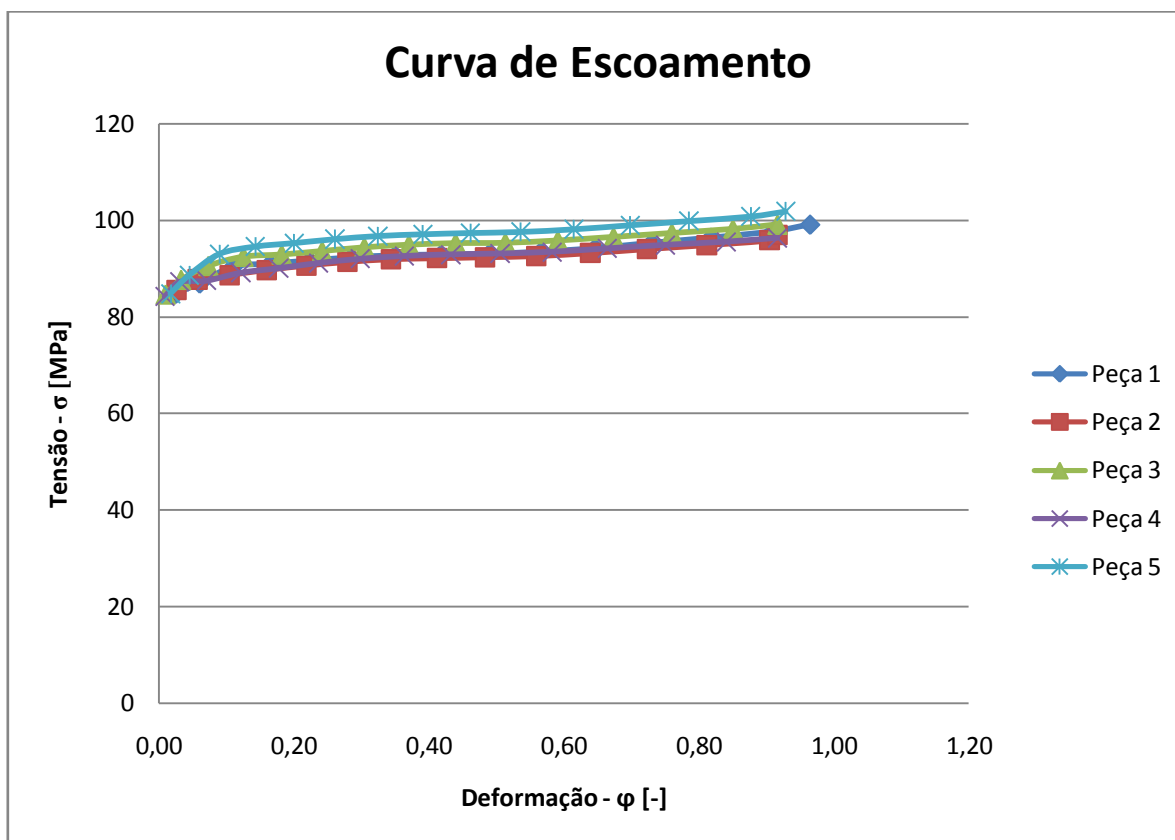


Figura 41: Curva de Escoamento – Tensão de Escoamento x Deformação Verdadeira - Aço AISI4140

Nota-se que as curvas de escoamento do referido material demonstraram forte concordância com o que foi pesquisado na literatura científica, conforme ilustradas por [HENSEL e SPIETEL, 1984] e com as curvas encontradas na biblioteca do “*Software Simufact Forming 12.0*”. A velocidade de deformação aplicada para obtenção das curvas de escoamento foi de, aproximadamente, $\dot{\phi} = \dot{\phi}_m \cong 0,20s^{-1}$ de acordo com o seu respectivo cálculo demonstrado no capítulo anterior.

4.3 Simulação Numérica para o Processo de Puncionamento

As máximas forças, demonstradas pela Tabela 10, foram obtidos a partir dos resultados fornecidos pelo “*software*” de simulação numérica, de acordo com os parâmetros previamente definidos e inseridos para realização destes cálculos. Conforme descrito anteriormente, os tipos diferentes de punções são denominados como: Estreito, Inclinado e Pontudo.

Tabela 10: Forças Máximas – Geometrias e Ângulos dos Punções

Geometria	Ângulo	F [kN]	Geometria	Ângulo	F [kN]	Geometria	Ângulo	F [kN]
Estreito	05°	210	Inclinado	05°	212	Pontudo	05°	220
	10°	210		10°	215		10°	217
	15°	212		15°	215		15°	217
	20°	212		20°	217		20°	220
	25°	220		25°	222		25°	225

A Figura 42 ilustra as máximas forças dos punções com suas respectivas geometrias e ângulos obtidas pelo “software” de simulação numérica. Dentro das simulações realizadas, nota-se que a geometria que apresenta a menor força dentre as geometrias e ângulos modelados são os punções de geometria estreita.

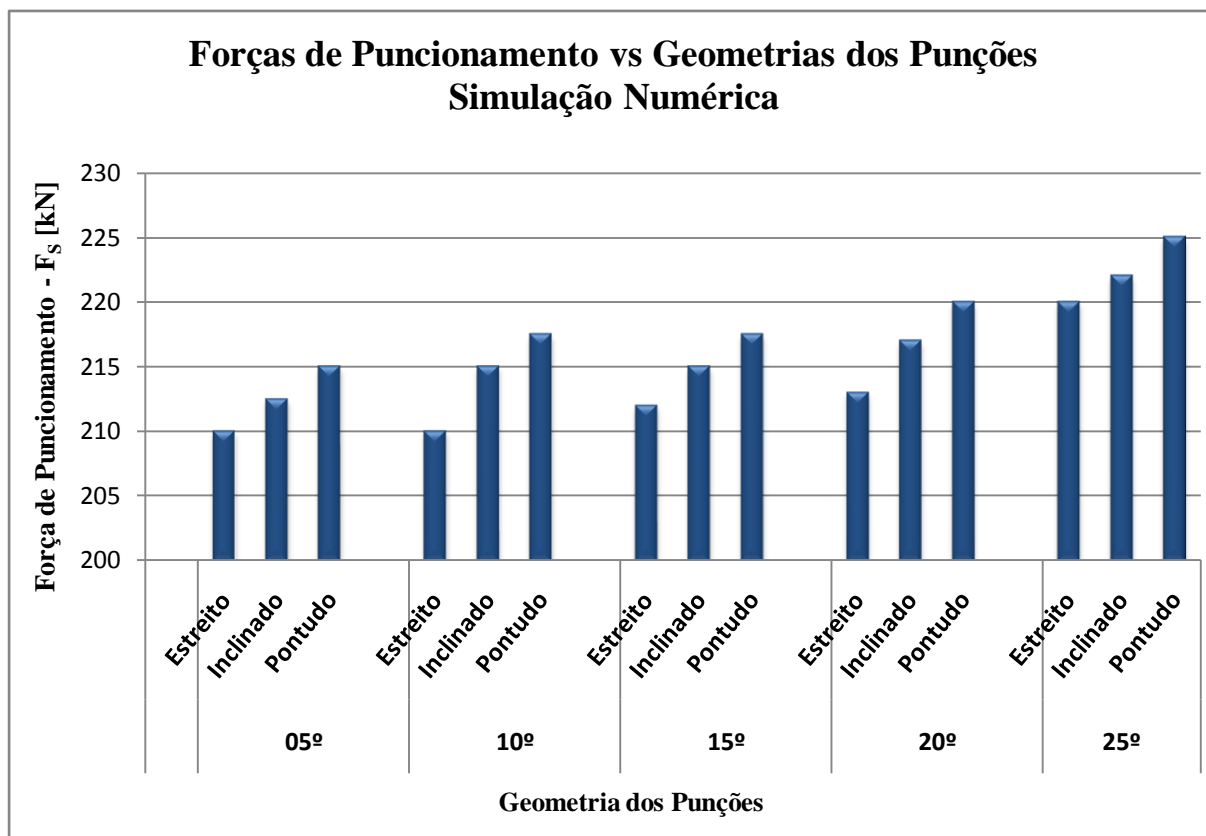


Figura 42: Forças Máximas de Perfuração “versus” Geometrias dos Punções

Estas forças máximas “ F ”, aos quais os punções foram submetidos ao longo da simulação computacional, obtiveram seus valores em unidades do sistema internacional - SI, ou seja, em Newtons [N].

Com base nos resultados desta modelagem foram realizadas a construção das curvas de força x deslocamento dos punções com as referidas geometrias e ângulos. Em cada caso observa-se o aumento da força “ F ” conforme o deslocamento da altura “ h ” do punção até a

ruptura do material, originando assim o orifício desejado dentro do processo de puncionamento.

Observa-se que nos gráficos apresentados existe um acréscimo de força até o ponto máximo de ruptura do material e, posteriormente, a mesma curva decresce até o ponto posterior ao da espessura do corpo de prova simulado. Esta diferença deve-se a um possível erro de dimensionamento onde o miolo cisalhado sofre certa força contrária de avanço proveniente da saída da matriz inferior. Porém esta observação não distorce os valores obtidos em relação ao deslocamento dos punções e suas respectivas forças de puncionamento.

Para a estimativa das Forças “ F ”, o “*Software Simufact Forming 12.0*” gerou, a partir das condições iniciais, os gráficos de Força - F [kN] versus Deslocamento - h [mm] para cada um dos casos em estudo. Como ilustra o gráfico da Figura 43 para os punções estreitos. Neste gráfico é possível observar uma menor variação de picos, ou seja, sinuosidade mais curvilínea dos esforços aplicados pelo ferramental proposto.

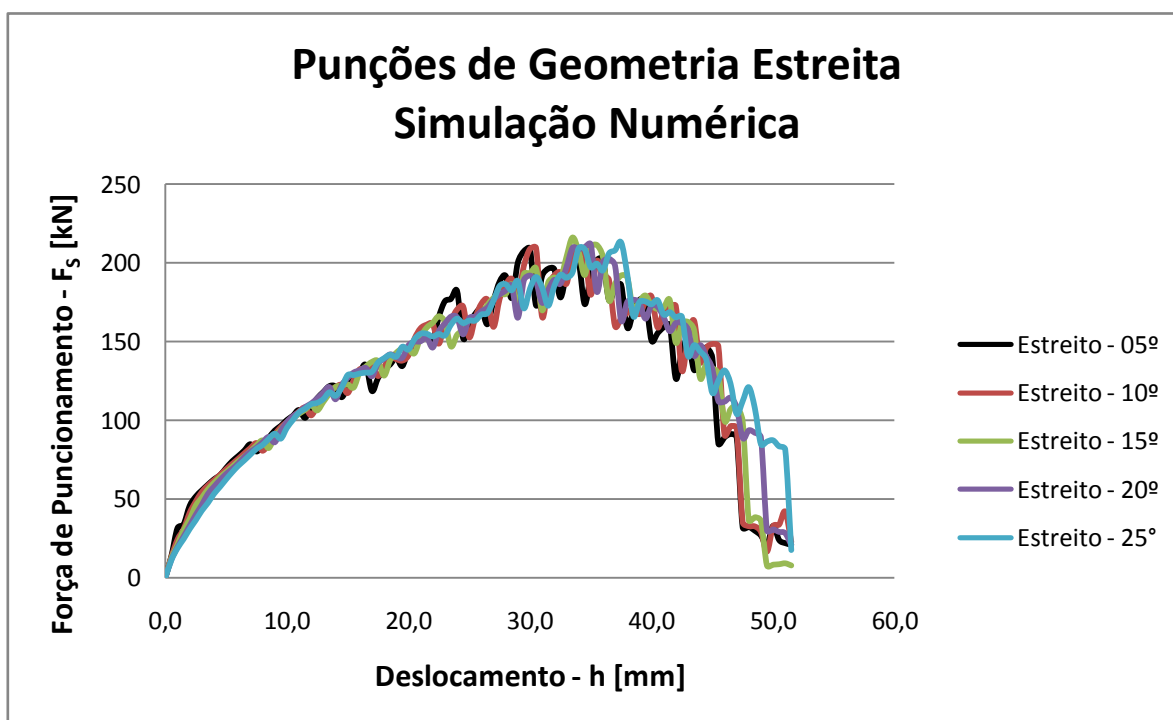


Figura 43: Força x Deslocamento - Punção Estreito - Simulação Computacional

Os equipamentos submetidos aos maiores esforços são o punção e inserto de modo que a matriz inferior apenas evita o movimento indesejado do inserto. A Figura 44 demonstra os esforços para o punção cuja geometria é a inclinada. Com o avanço das simulações numéricas, foi possível obter os gráficos para as geometrias, estreita, inclinada e pontuda, com as respectivas variações nas pontas dos punções. Os gráficos representam a evolução da curva da força ao longo do deslocamento dos punções de geometria estreita, inclinada e pontuda.

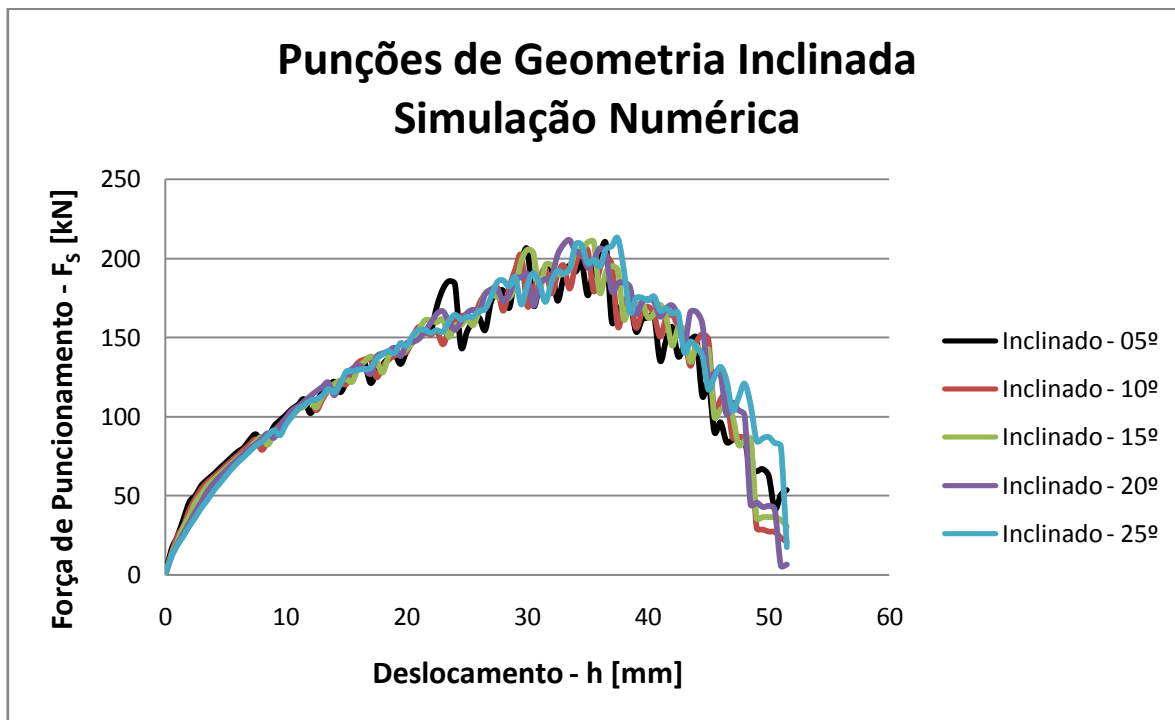


Figura 44: Força x Deslocamento - Punção Inclinado - Simulação Computacional

Na Figura 45 segue a comparação proposto na simulação numérica sendo agora a diferença, novamente, na geometria do punção utilizado - pontudo - porém o ângulo de penetração dos punções varia de 05° até 25°:

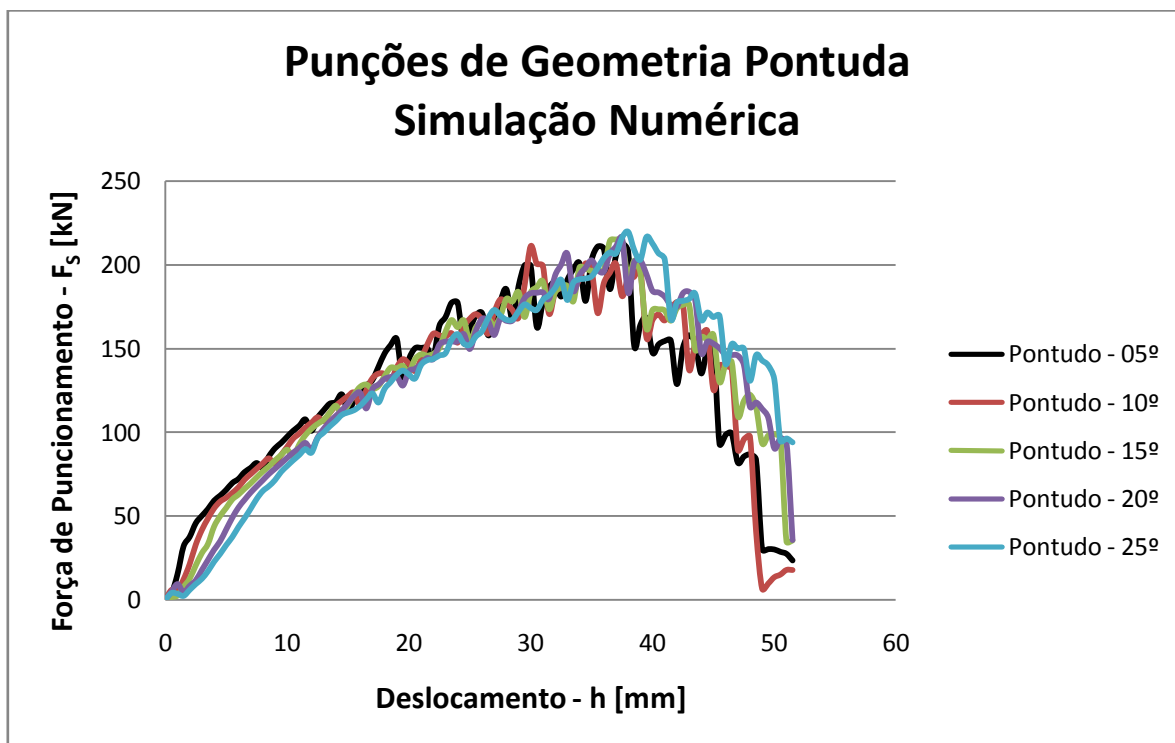


Figura 45: Força x Deslocamento – Punção Pontudo - Simulação Computacional

A Figura 46 apresenta as regiões de maiores deformações (Deformação Equivalente) dos corpos de prova perfurados pelos punções com ângulo de 05° de ataque, respectivamente com as geometrias, **(a)** estreito, **(b)** inclinado e **(c)** pontudo.

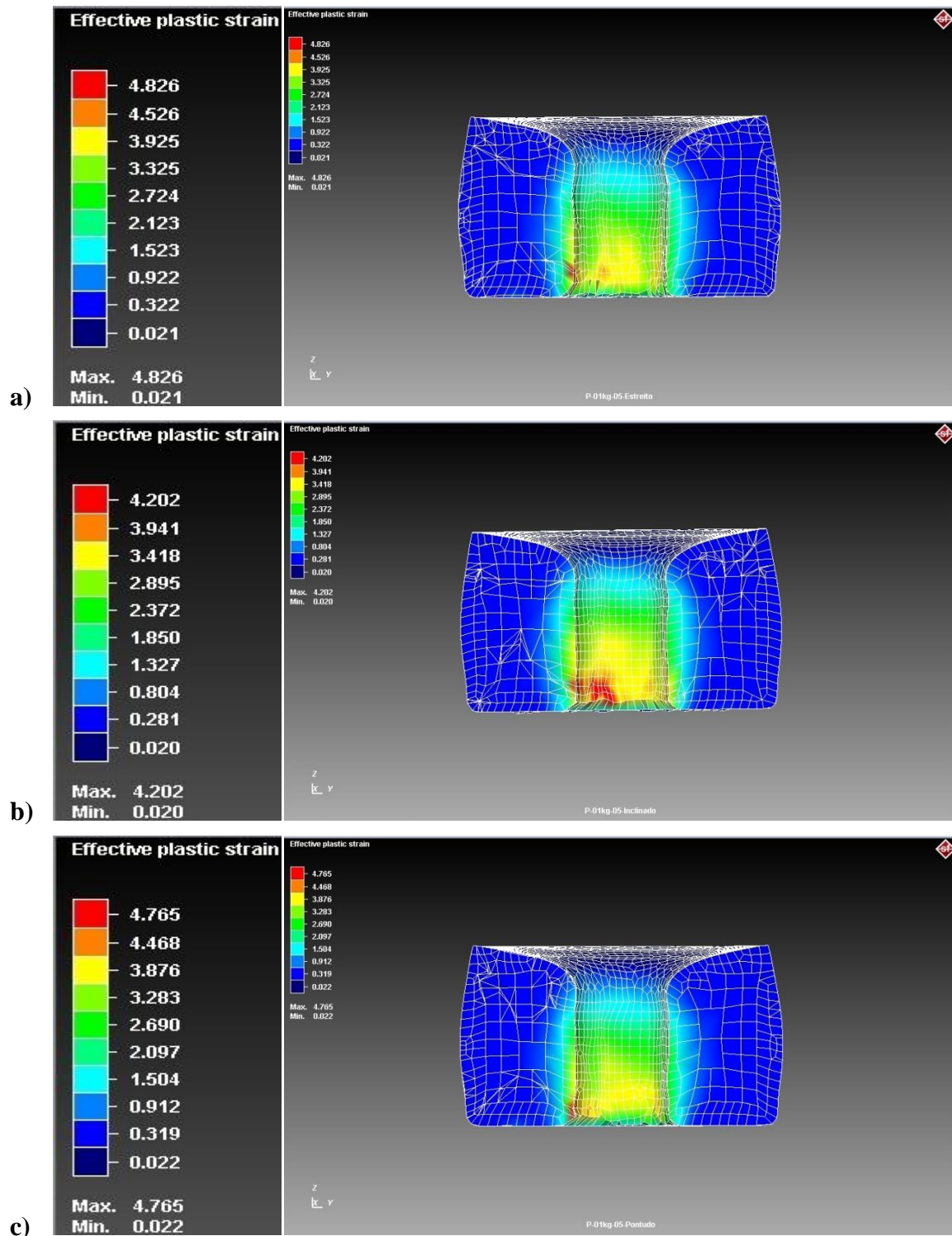


Figura 46: Deformação Equivalente - Ângulo de 05°

Na Figura 47, também são ilustradas as regiões de maiores deformações para as respectivas geometrias **(a)** estreito, **(b)** inclinado e **(c)** pontudo, porém o ângulo de ataque destes punções é de 10° , diferente da figura anterior.

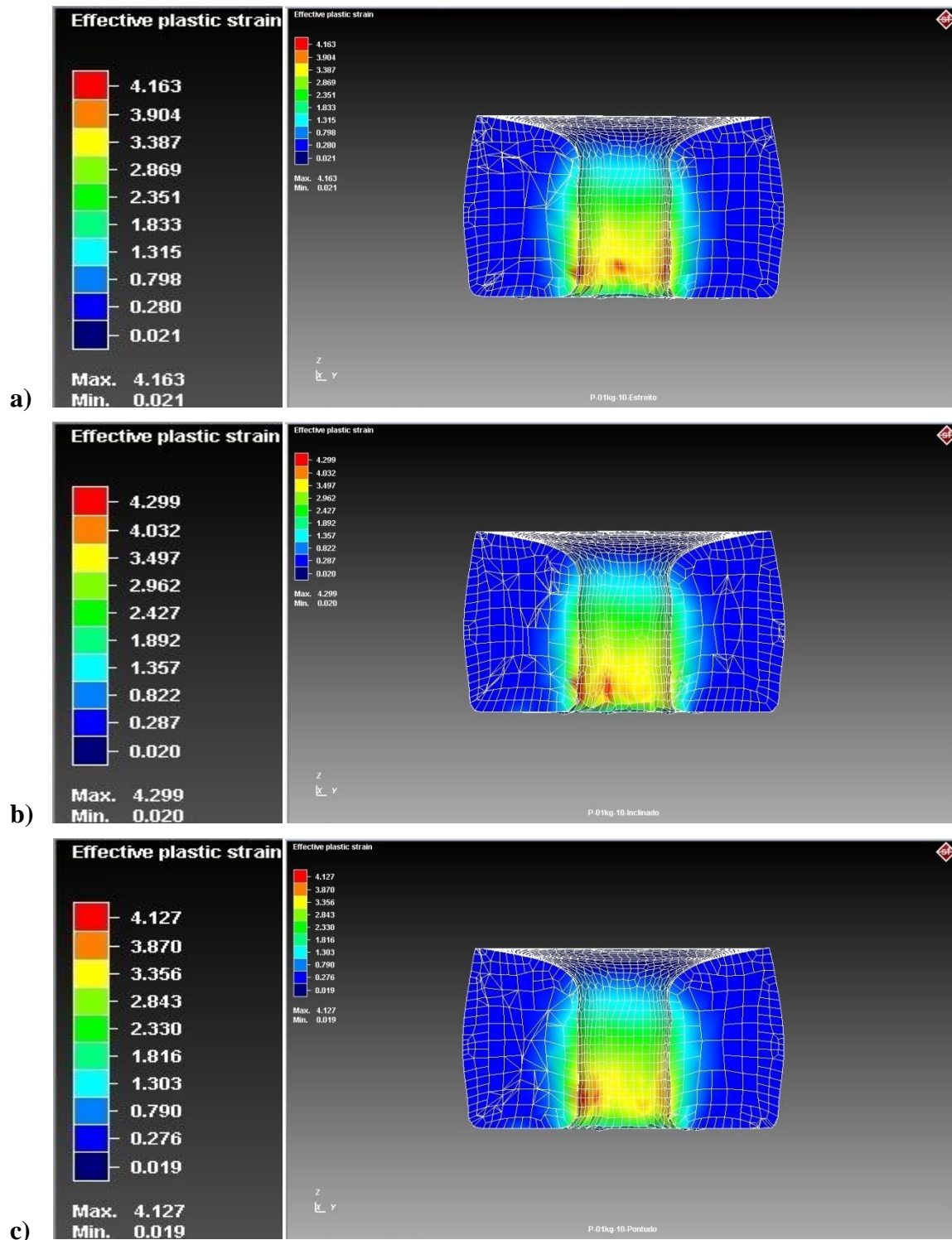


Figura 47: Deformação Equivalente - Ângulo de 10°

As próximas imagens geradas pelo “software” de simulação numérica, representadas pela Figura 48, para esta situação, o ângulo de avanço é de 15° e, as geometrias dos punções são aplicadas para estas simulações são, respectivamente (a) estreito, (b) inclinado e (c) pontudo.

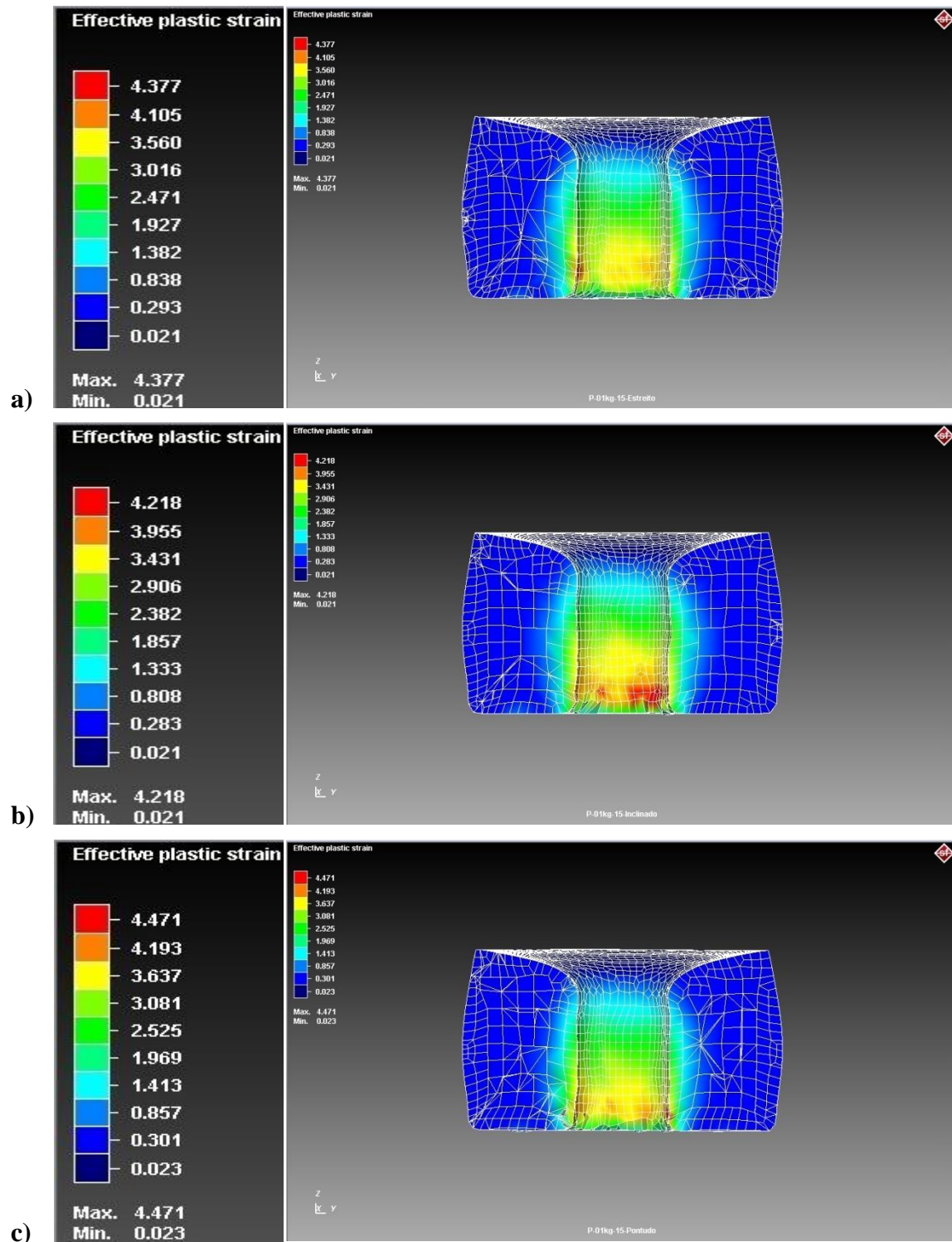


Figura 48: Deformação Equivalente - Ângulo de 15°

Na Figura 49, são representadas as regiões de máximas deformações, geradas a partir do avanço dos punções, cujas geometrias aplicadas são as mesmas anteriores (a) estreito, (b) inclinado e (c) pontudo, porém o ângulo de ataque aqui ilustrado é de 20° .

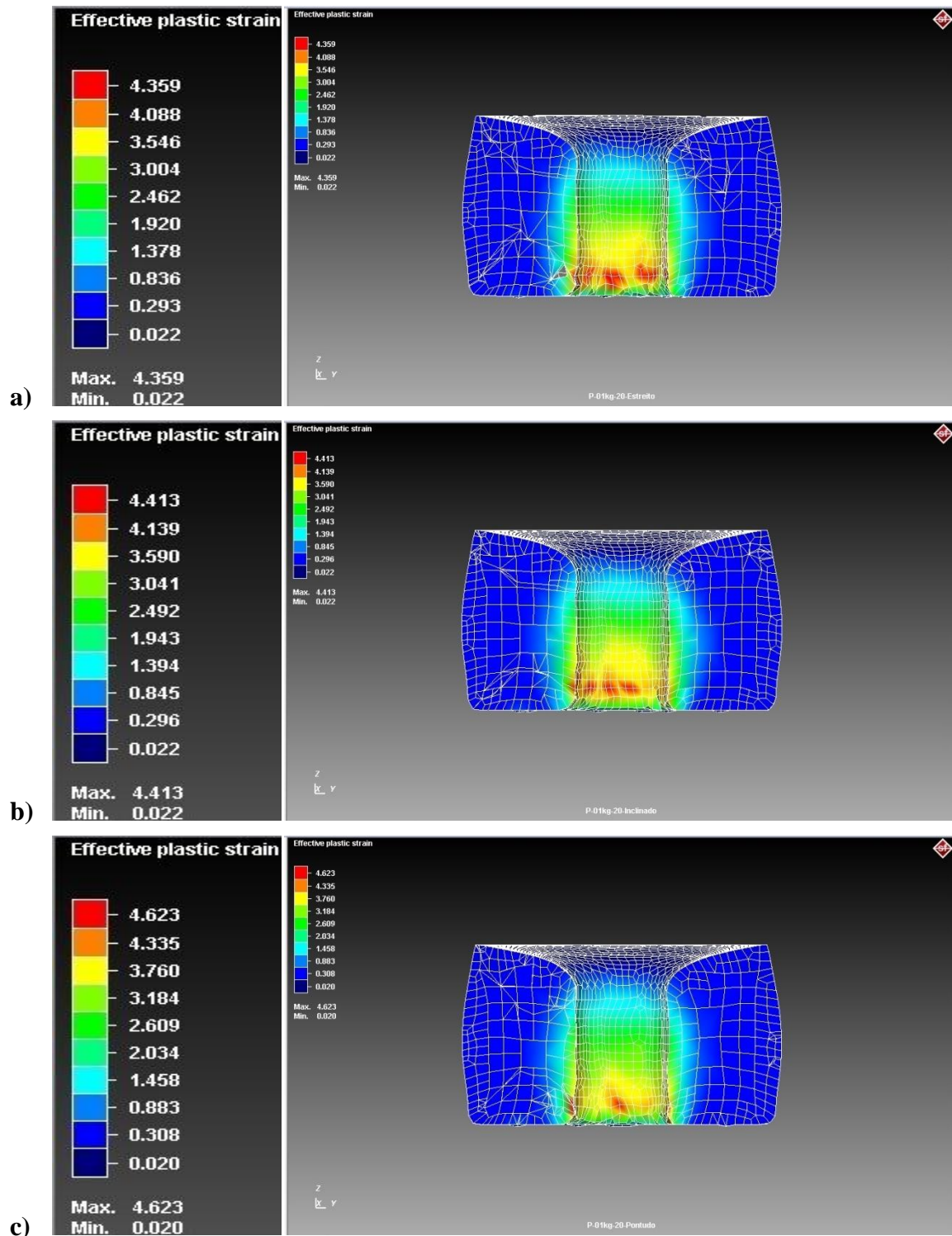


Figura 49: Deformação Equivalente - Ângulo de 20°

As regiões de deformação sofridas pelos corpos de prova, ilustrados na Figura 50, onde os punções aplicados, neste caso, também possuem geometria, (a) estreita, (b) inclinada e (c) pontuda e, possuem seus respectivos ângulos de ataque de 25° .

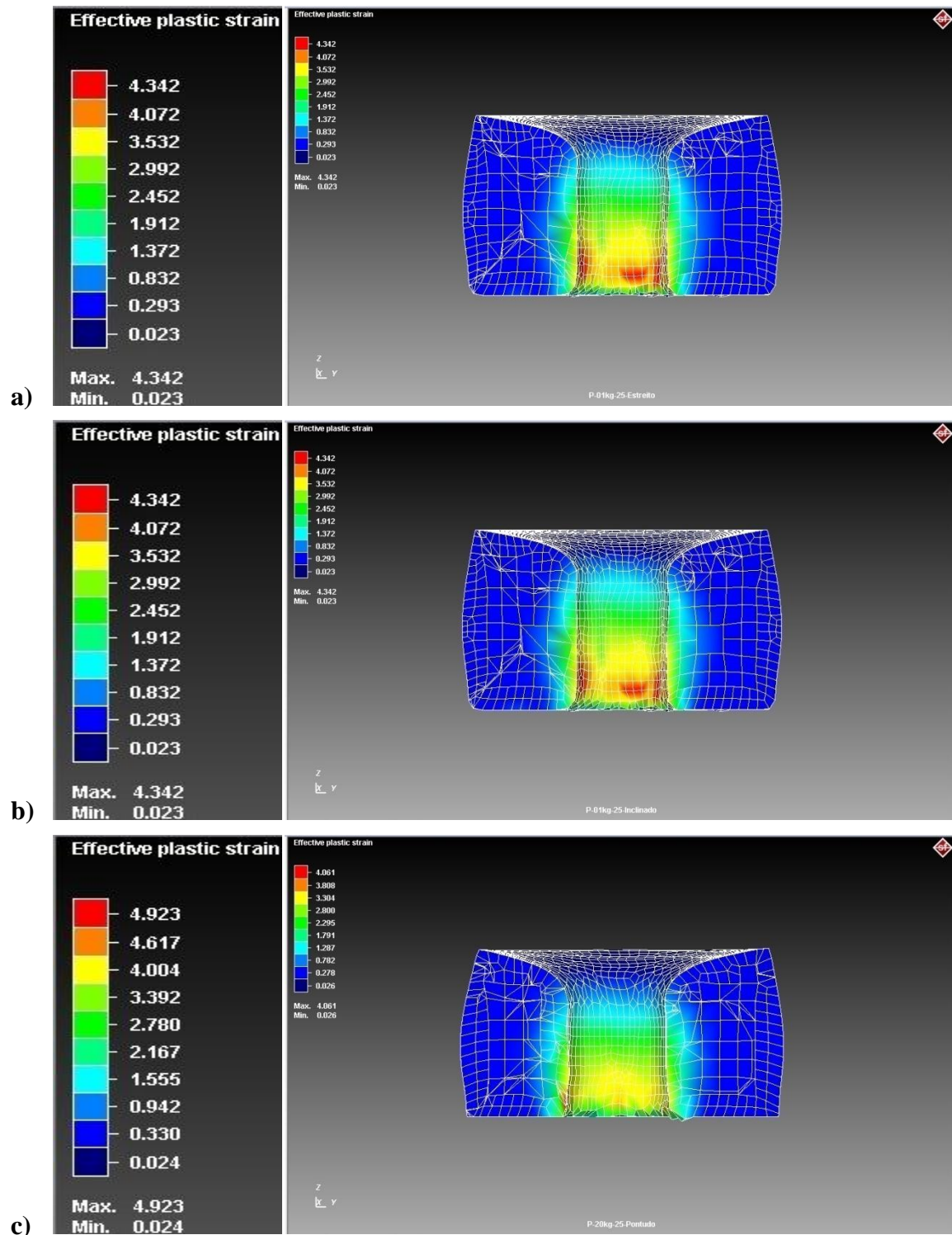


Figura 50: Deformação Equivalente - Ângulo de 25°

O “*software*” de simulação forneceu a distribuição de deformações equivalentes e as tensões na direção de deslocamento do material. E para todas as simulações as quais os corpos de prova foram submetidos, é possível visualizar as regiões com as maiores e menores valores de deformação equivalente.

Observa-se a partir das imagens das Figuras 46 a 50 referentes às geometrias e ângulos dos punções a pouca variação das regiões de máximos esforços plásticos cujos corpos de prova foram submetidos. Outro dado importante das simulações são os gráficos de esforços.

Nota-se que a região de maior distribuição de esforços plásticos do corpo de prova é a região que sofre a deformação e, posteriormente, rompimento do material provocado pelo avanço do punção e pela região cisalhante do inserto (região de coloração vermelha). Para melhor compreensão destas Figuras, quanto mais próximo da cor vermelha for à coloração da região, maior será a deformação sofrida pelo corpo de prova. E as regiões de colorações mais azuis escuras, sofrem menos deformações.

Os copos de prova aplicados nestas simulações apresentam sempre as mesmas condições iniciais apresentadas anteriormente, com o intuito de se analisar apenas a influência de deformação provocada pela mudança de geometria angular das pontas dos punções.

4.4 Cálculo Analítico da Força de Puncionamento

Com a aplicação da respectiva Equação 17, e a determinação da área superficial “ A_s ” - Equação 15, foi possível calcular a força total de puncionamento, cujo valor foi, aproximadamente, igual a 850 kN [SPÜR e STÖRFERLE, 1983]. Este valor está superdimensionados, dado a falta de outros componentes não presentes nas equações, como por exemplo, coeficiente de atrito, troca de calor entre ferramental e corpos de prova, velocidade de deformação, etc. Entretanto é notável a diferença entre a força analítica “ F_A ” e quando comparada a força experimental “ F_E ” de perfuração por puncionamento.

O valor da força de perfuração por cisalhamento obtida pelo cálculo aplicado dado por [SCHAEFFER e ROCHA, 2007] representou um valor aproximado de 127,25 kN - Equação 18. Esse valor, ao contrário do obtido por [SPÜR e STÖRFERLE, 1983], encontra-se subdimensionado dado que sua aplicação está mais voltada à chapas, ou seja, para materiais que apresentem uma espessura mais fina que a do corpo de prova estudado nesta tese. Outra possível explicação para esse valor da força estar tão abaixo do valor simulado e do valor experimental, seria o uso da tensão de escoamento do material a uma temperatura de 1100° C,

haja vista que este cálculo de puncionamento por cisalhamento em chapas se dá em temperatura ambiente. Logo, neste caso, seria usado um valor de tensão de escoamento maior que o utilizado para estimar a força de puncionamento neste cálculo.

Para as devidas análises e comparações entre o cálculo analítico com o valor experimental de puncionamento propriamente dito, considera-se o valor obtido por [SPÜR e STÖRFERLE, 1983] - Equação 17, ou seja, 850 kN como parâmetro de referência analítica e, conseqüentemente, parâmetro para as devidas considerações e conclusões deste trabalho.

4.5 Experimento Prático de Perfuração por Puncionamento

De forma experimental, foi possível medir e comparar as forças pelos experimentos práticos com os resultados provenientes da simulação numérica. Os registros de esforços x deslocamento podem ser visualizados pela Figura 51;

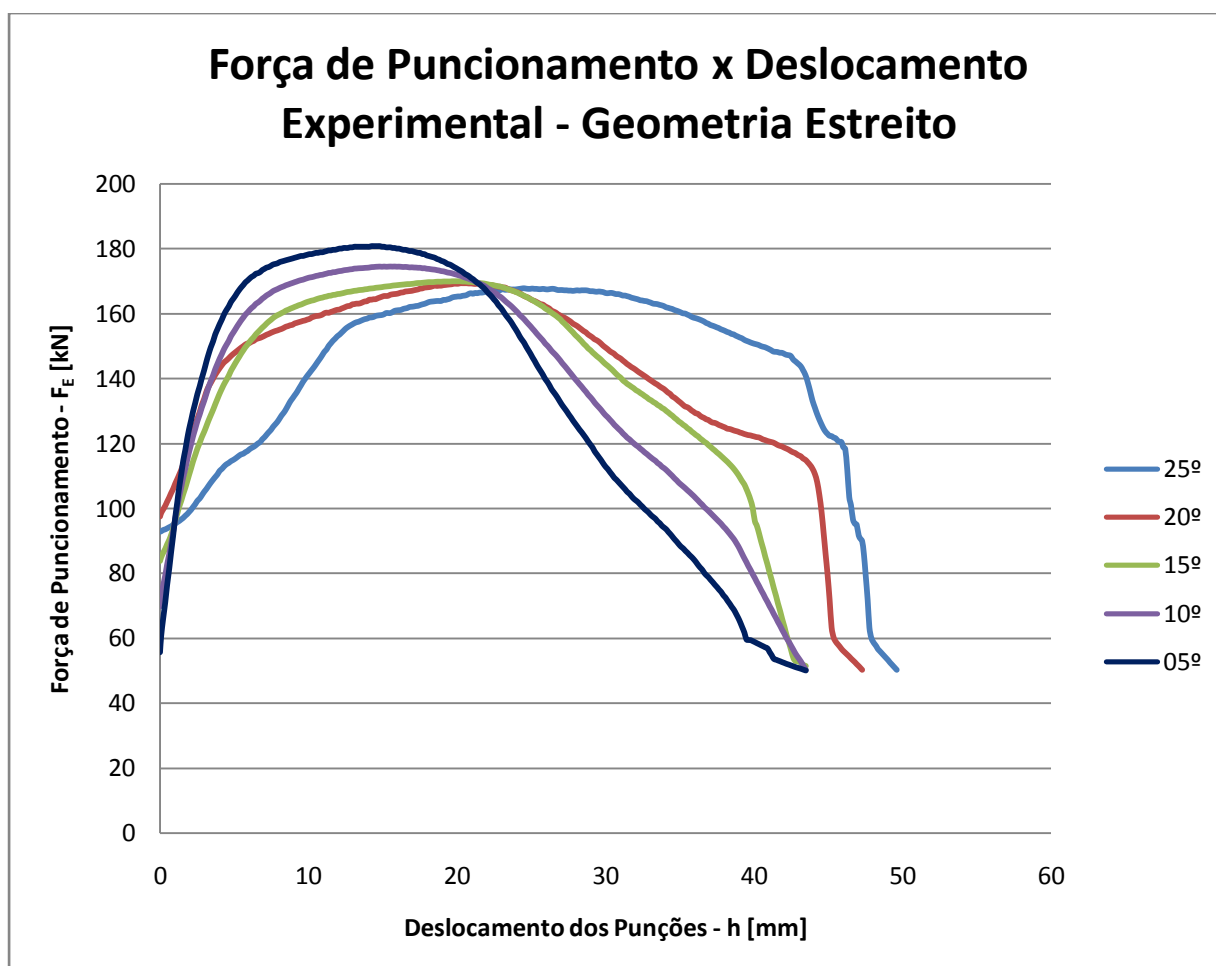


Figura 51: Gráfico de Força x Deslocamento - Experimental - Geometria Estreita

Com dados adquiridos pelos sistemas de aquisição de dados computacionais demonstram o comportamento como ilustrado pela Figura 12, ou seja, as fases de puncionamento para cada uma das geometrias a partir dos estudos anteriormente realizados.

Nestes mesmos gráficos, os comportamentos das forças de puncionamento relacionam o crescimento da força exercida pelo punção no corpo de prova, de acordo com o deslocamento do mesmo até a ruptura do material e, conseqüentemente, uma queda abrupta na força aplicada pelos punções.

Observam-se pela Figura 63 algumas diferenças significativas entre os esforços aplicados por conta dos ângulos das ponteiros, pois, como a simulação também demonstra a melhor geometria aplicada ao experimento é o de geometria estreita e, dentro desta geometria o ângulo com maior esforço apresentado foi o de 05° e o valor foi decaindo até 25°. Esta variação de comportamento das curvas e das diferenças nos valores das forças deve-se às diferenças dos ângulos dos punções.

A Tabela 11 apresenta os valores máximos capturados de acordo com o experimento descrito para obtenção do orifício dos corpos de prova.

Tabela 11: Forças Máximas - Puncionamento Experimental

Geometria	Ângulos dos Punções	Força - F [kN]
Estreito	05°	180
	10°	175
	15°	170
	20°	169
	25°	168

Após procedimento experimental descrito, foi possível visualizar as regiões de maiores esforços e suas respectivas zonas de fratura e cisalhamento. Como demonstrado na literatura pesquisada, à temperatura acima dos 1000 °C reduz a região da fratura facilitando o corte do material por cisalhamento (miolo expurgado pelo punção) como ilustra as imagens da Figura 52, onde, respectivamente, estão representados os ângulos de 05°, 10°, 15°, 20° e 25° nos índices “a”, “b”, “c”, “d” e “e”.



Figura 52: Miolo Expurgado - Zonas de Fratura e Cisalhamento

O formato dos corpos de prova, após processo de puncionamento, representado na Figura 64, ilustra uma similaridade com a forma resultante dos corpos de prova obtidos pelo “software” de simulação e, suas respectivas regiões de Fratura x Cisalhamento. Os corpos de prova, após procedimento experimental, estão ilustrados na Figura 53. Nota-se a impossibilidade de visualiação das zonas de maiores deformações como é possível observar nas imagens fornecidas pelo “software” de simulação computacional



Figura 53: Corpos de Prova após Experimento Prático

4.6 Comparações das Forças Máximas de Perfuração por Puncionamento

O procedimento experimental realizado para determinar a força máxima ao qual o ferramental é submetido, de acordo com a melhor geometria dos punções, definida pelo método computacional, foram comparados com os resultados de deformação estimados pelo “software” de simulação numérica “Simufact Forming 12.0”. A Tabela 12 demonstra os valores máximos de força de perfuração por puncionamento referente à geometria de melhor desempenho (Estreito) com os respectivos ângulos de aplicação.

Tabela 12: Diferenças entre Forças de Puncionamento - Analítica x Simulada x Prática

Geometria	Ângulos	Cálculo Analítico	Simulação Numérica	Experimento Prático	$\Delta F = \frac{F_A - F_E}{F_A} * 100$	$\Delta F = \frac{F_S - F_E}{F_S} * 100$
		Força Analítica F_A - [kN]	Força de Simulação F_S - [kN]	Força Experimental F_E - [kN]	ΔF - [%] (F_A) x (F_E)	ΔF - [%] (F_S) x (F_E)
Estreito	05°	850	210	180	79	14
	10°	850	210	175	79	16
	15°	850	212	170	80	19
	20°	850	212	169	80	20
	25°	850	220	168	80	23

As forças máximas de simulação comparados com as forças experimentais práticas demonstraram um erro aproximado entre 14% e 23%, ou seja, a diferença da força para puncionar o corpo de prova pelo o experimento prático é menor que a estimada pela simulação numérica. Esta diferença pode ser explicada por diversos fatores que não puderam

ser previstos ou mensurados dentro da modelagem computacional, como por exemplo, propriedades metalúrgicas e coeficiente de temperatura do material, o próprio atrito interfacial entre a peça e as matrizes, perda térmica não prevista entre o material aquecido e o manipulador, calibração do sistema “*Spider*” e/ou da célula de carga para aquisição de dados, dentre outros diversos fatores.

Os valores experimentais quando comparados com os cálculos empíricos demonstram uma diferença de 80%. Esta diferença apresentada pelos cálculos pode ser explicada por diversas variáveis não consideradas pela equação empírica, ou seja, não foi possível identificar qual a implicação do valor do coeficiente de atrito entre ferramental e os corpos de prova na equação empírica, bem como a influência da troca de calor entre os mesmos. Ainda dentro da equação empírica, não foi considerado o valor da velocidade de deformação do ferramental, variável esta que influencia diretamente na força de punção.

A Tabela 12 mostrou apenas os valores máximos obtidos, porque as forças de punção seguem aumentando até atingirem estes valores com a consequente ruptura do material utilizado no corpo de prova, portanto o uso de uma média destes valores não seria ideal para ser considerado na análise deste estudo.

5 CONCLUSÕES

A aplicação do processo de perfuração por puncionamento em processos metalúrgicos visando à aplicabilidade em aerogeradores de energia é uma alternativa mais simples e apresenta menor complexidade em relação aos outros processos mais elaborados, como por exemplo, eletroerosão, usinagem, corte a laser, etc. Além disso, a peça perfurada pode sair diretamente do puncionamento e seguir diretamente para um processo de forjamento em matriz aberta.

Não menos importante a se destacar é a comparação entre as curvas de escoamento do material aplicado. A curva de escoamento experimental obtida com os ensaios de compressão apresentou similaridade com as curvas encontradas na bibliografia pesquisada, bem como com as curvas encontradas na biblioteca do “*software*” de simulação computacional.

Não obstante, foi necessário medir a perda de calor da peça forjada tanto para o meio quanto para as matrizes empregadas no experimento. E, da mesma forma, foi realizado uma estimativa com o auxílio da equação da perda de calor confirmada com a aplicação de termopares nos referidos experimentos.

No “*software*” de simulação numérica, fica claro observar as regiões onde se apresentam as maiores concentrações de tensão, porém no experimento prático não é tão trivial observar estas mesmas regiões. No entanto, ao monitorar o processo de puncionamento na prática e, visualizar mesmo de forma superficial, a deformação do corpo de prova, nota-se regiões de esforços de tensões nas mesmas regiões representadas pelo modelo computacional.

As informações encontradas na literatura sobre o cálculo analítico da força de puncionamento mostraram não serem precisas para as dimensões e geometrias avaliadas neste trabalho. Logo os puncionamentos para perfurar corpos de prova mais espessos, como é o caso do presente estudo, não possui uma bibliografia tão ampla quando comparados com outros processos de perfuração. Entretanto este processo de perfuração, para que possa ser de tal forma aplicável na indústria, deve obedecer a certos parâmetros e variáveis características a cada tipo de material como, por exemplo, os próprios aços e ligas.

O processo de puncionamento pode apresentar, dentre outras vantagens, o uso do próprio punção como mandril para, posteriormente, ser aplicado na manufatura dos eixos vazados no processo de forjamento em matriz aberta, obedecendo a uma geometria axial

uniforme de seu diâmetro. Desta forma o procedimento de puncionamento seria agregado com o processo de conformação mecânica e assim aprimorando a manufatura de eixos vazados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo de perfuração por puncionamento é uma contribuição para melhoria do processo de fabricação de eixos vazados agregando os conhecimentos de puncionamento do presente estudo com o processo de conformação em matriz aberta.

Uma sugestão interessante seria refinar o número de elementos finitos dentro do “*software*” de simulação computacional, no entanto este procedimento, apesar de apresentar resultados mais precisos, leva um maior tempo de processamento pela simulação e requer uma maior capacidade de processamento da máquina em que será realizada a simulação.

Para este estudo se fez uso do procedimento de simulação numérica e procedimento prático para peças de apenas 1 kg de massa. Porém, como forma de contribuição para o processo em escala real, seria interessante realizar simulações numéricas para corpos de prova com 20 kg de massa, ou seja, maior que as amostras do presente estudo e mais próximo do tamanho real de um eixo vazado aplicado em aerogeradores de energia, com cerca de 230 kg.

A aplicação prática para o puncionamento de peças de 20 kg dar-se-á necessidade de projetar, além de todo ferramental aqui usado, um manipulador para retirada dos corpos de prova do forno, a 1100 °C, e posicioná-lo no centro da matriz de perfuração e punções com as respectivas escalas de tamanho e forma.

Outra sugestão interessante seria aplicar punções com diâmetros do seu corpo igual ao diâmetro da sua extremidade. Ou seja, com um diâmetro uniforme até o gume cisalhante, desta forma o próprio punção pode ser utilizado como mandril para o forjamento em matriz aberta.

7 BIBLIOGRAFIA

- [ALTAN, 1999] ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de metais: Fundamentos e aplicações**, São Carlos: EESC-USP, 1999.
- [ANTUNES, 2008] ANTUNES, J.; **Sistemas de Produção**. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2008.
- [ASM HANDBOOK 14] ASM HANDBOOK: Forming and forging. Materials Park, Ohio: ASM International, v. 14, 1993.
- [AVITZUR, 1995] AVITZUR, B. Friction During Metal Forming. In: BLAU, J., P. **ASM Handbook**. 2ª ed., 1995. p 59-61
- [BIANCO, 2003] BIANCO, D.L.D.; Desgaste de Ferramentas de Puncionamento. Tese (Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2003.
- [BRITO, 1998] BRITO, A.M.G.; PREDIGER, S.A. Aspectos do levantamento de curvas de escoamento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO, 18., 1998, Porto Alegre. **II Conferência internacional de forjamento/Brasil**, n 9, Porto Alegre, 1998, p. 189-210.
- [BRITO, 2004] BRITO, O.; **Estampos de Corte**. São Paulo, Ed. Hemus, 2004.
- [BUDYNAS, 2006]. BUDYNAS, R.G.; NISBETT, J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design. 8ª Edição. Columbus: McGraw-Hill, 2006.
- [COLOMBO, 2012] COLOMBO, T.C.; Análise Numérica do Forjamento em Matriz Aberta para a Produção de Eixos Vazados. 70f. Tese (Dissertação em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2012.
- [CORREA, 2013]. CORREA, F.J. Estudo do Processo de Puncionamento por Punção com Ângulo Convexo Assistido por Simulação Numérica. Tecnologia Metalúrgica, de Materiais e Mineração, São Paulo, v. 10, p205-213, jul.-set. 2013.
- [CORREA, 2013]. CORREA, F.J.; Desenvolvimento da Teoria Elementar da Plasticidade para o Forjamento em Matriz Aberta de Eixos Vazados para Aero geradores. 70f. Tese (Dissertação em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2012.
- [DIETER, 1981] DIETER, G.E., **Metalúrgica Mecânica**, 2ª ed. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois, 1981.
- [EARLY e REED, 1974] EARLY, D. F., REED, E. A. **Techniques of pressworking sheet metal theory of cutting sheet**. 2 ed. New Jersey, 1974.
- [FARIA, 2007] FARIA, M.A., **Análise da vida útil e da geometria da ponta do punção de aço AISI D2 utilizado na furação de chapas de aço LNE600**. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba, 2007.
- [FAVORIT, 2013] FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. Aços para Construção Mecânica. Aço SAE 4140. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/categorias/acos-construcao-mecanica/aco-sae-4140>> Acesso em 31 de Janeiro de 2014.
- [FIA, 2007]. Forging Solutions: Design Engineering Information from FIA. **Forging Industry Association**. Reportagem técnica, 2007.

[GEIER, 2007]. Consideração sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio Através do Ensaio de Compressão do Anel. Tese (Dissertação em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2007.

[GERDAU, 2013] COMERCIAL GERDAU. Aços para Beneficiamento. Disponível em: <http://www.comercialgerdau.com.br/produtos/acos_especiais_beneficiamento.asp> Acesso em 31 de Janeiro de 2014.

[GARCIA *et al.*, 2000] GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaio dos materiais**. 1ª Ed. São Paulo, LTC Editora, 2000.

[GARCIA *et al.*, 2012] GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaio dos materiais**. 2ª Ed. Campinas: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2002.

[GEIER, 2004] GEIER, M.; BRITO, A.M.G.; SCHAEFFER, L. Otimização de um processo de forjamento pelo método de volumes finitos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO, 24. 2004, Porto Alegre. **Anais 24º Senafor**. Porto Alegre: Brasul Ltda, p. 85-102, 2004.

[GIORDANI, 2011] GIORDANI, G.; Análise do Processo Puncionado de Furação de Chapas Espessas a Altas Temperaturas. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2011.

[GONÇALVES, 2002] GONÇALVES Jr., A. A., “**Metrologia**”, Apostila LABMETRO – UFSC, Florianópolis – SC, 2002.

[GRANT, 1996] GRANT, E. L. e LEAVENWORTH, R. S., “**Statistical quality control**”, McGraw-Hill, 7 Edition, 1996.

[GROSS *et al.*, 2004] GROSS, M., BLACK, I., MÜLLER, H.; Determination of the Lower Complexity Limit for Laser Cut Quality Modelling. **Institute of Physics**. Houston, 2004.

[HANSEN, 2012] HANSEN, L.H. *et. al.*. **Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines**. Riso Nacional Laboratory, Roskilde, Dezembro 2001.

[HAU, 2006]. HAU, Erich. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2º Edição. Berlim: Springer-Verlag, 2006.

[IM, 2004] IM, Y.T.; KANG, S.H.; CHEON, J.S.; et al. Finite element simulation of tip test on aluminum alloy. **Journal of materials processing technology**, n. 157-158, 2004, p. 171-176.

[KOBAYASHI, 1989] KOBAYASHI, S. **Metal forming and the finite-element method**. New York: Oxford University Press, 1989.

[LANGE, 1997] LANGE, K.; Modern metal forming technology for industrial production. **Journal of materials processing technology**. n. 71, 1997, p. 02-13.

[LUO, 1999] LUO, S.Y.; **Effect of the Geometry and the Surface Treatment of Punching Tool on the Tool Life and Wear Conditions in the Piercing of Thick Steel Plate**. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 88, Edições 1-3, 15 Abril 1999, Pg 122-133.

[MANWELL, 2002]. MANWELL, J.F.; McGOWAN, J.G.; ROGERS, A.L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2002.

[MARTELLO, 2007] MARTELLO, L. de: **Desenvolvimento de processo de forjamento da liga de alumínio AA6351 com auxílio de computação numérica**. Dissertação de Mestrado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

- [MARTINS e SCHAEFFER, 2009] MARTINS, V. e SCHAEFFER, L., 2009. Avaliação do lubrificante através do ensaio do anel da liga de alumínio AA6051 e o aço SAE 8640, *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS*, 64, Belo Horizonte-MG, 2009. Anais p. 44-63.
- [MEDEIROS, 2012] MEDEIROS, G.A., Uma Contribuição ao Forjamento em Matriz Aberta de Eixos Vazados. 70f. Tese (Dissertação em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2012.
- [MORAES, 2007]. MORAES, S. A.; **Análise Analítica, Numérica e Experimental do Forjamento a Quente da Liga Ti-6Al-4V**. Dissertação de Mestrado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- [MORAES, 2010] MORAES, S. A. de: **Estudo teórico-experimental da calibração de barras redondas laminadas a quente**. Dissertação de Mestrado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [MORI *et al.*, 2008]. MORI, K.; SAITO, S.; MAKI, S.; **Warm and hot punching of ultra high strength steel sheet**. CIRP annals – manufacturing technology, 2008.
- [OLIVEIRA *et al.*, 2003] OLIVEIRA, R.A.; KOLLER, L.A.; SCHAEFFER, L. Evaluation of two commercially-available lubricants by means of ring test to AA6061F aluminum alloys. *Material Research*, **6**:591-597, 2003.
- [PALADINI, 1990] PALADINI, E. P., “**Controle de qualidade**”, Atlas 2ª Ed., Rio de Janeiro – RJ, 1990.
- [PETERSEN, 1998] PETERSEN, S.B.; MARTINS, P.A.F.; BAY, N. An alternative ring-test geometry for the evaluation of friction under low normal pressure. **Journal of materials processing technology**, n. 79, 1998, p. 14-24.
- [RANDON, 2005] RANDON, V., NETO, V. P., Ligas avançadas utilizadas no desenvolvimento de peças para a indústria aeronáutica empregam processos sofisticados. **Revista Metalurgia e Materiais**, Caderno Técnico, Out, pg 591-593, 2005.
- [RUSINOFF, 1952] RUSINOFF, S.E.; **Forging and forming metals**. Chicago: American technical society, 1952.
- [SAIKI, 2006] SAIKI, H.; ZHAN, Z.H.; MARUMO, Y.; et al. Evaluation of contact conditions in hot forging of pure aluminum using examination. **Journal of materials processing technology**, n. 177, 2006, p. 243-246.
- [SCHAEFFER, 1986] SCHAEFFER, L.; RIBEIRO, J.D. Avaliação do atrito no forjamento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO, 6 e 7, 1986, Porto Alegre. **Aspectos gerais sobre forjamento**, n. 3, Porto Alegre. NBS, 1986.
- [SCHAEFFER, 1995] SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais**. Porto Alegre, Ed. Rígel, 1995.
- [SCHAEFFER, 1997] SCHAEFFER, L. Curvas de escoamento como parâmetro fundamental para a simulação do processo de forjamento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO, 7, [1997], Porto Alegre. **XII Conferência internacional de forjamento/Brasil**, n. 13, Porto Alegre, p. 167- 176.
- [SCHAEFFER e ROCHA, 2007] SCHAEFFER L.; ROCHA, A. S.; **Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação**. Porto Alegre - RS, Imprensa Livre, 2007.

- [SCHNEIDER, 2000] SCHNEIDER, P., “**Incerteza de medição e ajuste de dados**”, Apostila técnica, UFRGS, Porto Alegre - RS, 2000.
- [SHAN, 2004] SHAN, D. B., XU, W. C., LU, Y.; Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging. **Journal of materials processing technology**, 151, 289-293, 2004.
- [SOFUOGLU, 1999] SOFUOGLU, H., RASTY, J. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. **Tribology international**. n. 32, 1999, p. 327-335.
- [SPUR e STÖRFERLE, 1983] SPUR G.; STÖRFERLE Handbuch der Fertigungstechnik. Munchen, Band 1. Berlin, 1983.
- [STEMMER, 1993] STEMMER, C. E., **Ferramentas de Corte I**, 3ª ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1993.
- [STEMMER, 1995] STEMMER, C. E., **Ferramentas de Corte II**, 2ª ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1995.
- [TOBIAS, 1984] TOBIAS, S.A.; The state of the art of high energy rate bulk forming. *Journal of Mechanical Working Technology*, p237-277, jul.-set., 1984.
- [TONG, 2010] TONG, W., **Wind power generation and wind turbine design**. Southampton: WIT Press, 2010.
- [WEY, 1994] WEY, C.H.; et al. Simulação de testes de anel via elementos finitos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO, 14., 1994, Porto Alegre. XIV **Seminário nacional de forjamento**. n. 14, Porto Alegre: NBS p. 178-188, 1994.