

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais
PPGE3M

LAMINAÇÃO DE PRÉ-FORMA PARA FORJAMENTO DE BRAÇO DE LIGAÇÃO DO
SISTEMA DE DIREÇÃO DE CAMINHÕES E ÔNIBUS

Juliano de Souza da Silva
Engenheiro Mecânico

Porto Alegre
2024

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais
PPGE3M

Laminação de Pré-Forma para Forjamento de Braço de Ligação do Sistema de
Direção de Caminhões e Ônibus

Juliano de Souza da Silva
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado na Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2024

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 do Programa de Pós-Graduação.

Orientador (a): Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Dr. Fabrício Dreher Silveira - RENNERT HERRMANN – Gravataí - RS

Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS – Porto Alegre - RS

Dr. Diego Rodolfo Simões de Lima – IFC – Luzerna - SC

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni
Coordenador do PPGE3M

Para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer.

Amyr Klink

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha esposa Aline dos Anjos pela incondicional compreensão e apoio em todos os momentos, e também ao zelo inquestionável a nossa família.

Ao meu filho e parceiro Bernardo Anjos que costuma ler e estudar ao meu lado enquanto escrevo este trabalho.

Ao professor Dr. –Ing. Lirio Schaeffer pela oportunidade, orientação e confiança no desenvolvimento deste trabalho e também no desenvolvimento do mestrado.

À empresa Maxiforja Componentes Automotivos Ltda pela confiança e colaboração no desenvolvimento deste estudo.

Ao Prof. Alisson Duarte e a empresa Sixpro pelo suporte e auxílio no uso do software Q-form.

Aos colegas de trabalho Eng. Diego Gendelski Brum, Eng. Eduardo Gomes Felderckircher, Everton Mendonça Maicá e principalmente MSc. Guilherme Goulart pelo auxílio na pesquisa, simulação e considerações realizadas no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O processo atual de forjamento do Braço de Ligação que é utilizado no sistema de direção de caminhões e ônibus, é composto pelas etapas: Corte da geratriz, Aquecimento da geratriz, Pré-forjamento, Forjamento final e Rebarbação. Este trabalho desenvolveu-se tendo como objetivo a análise para substituir a etapa de Pré-forjamento por uma etapa de Pré-formação utilizando Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada (Cross Wedge Rolling). O estudo desta proposta visa principalmente reduzir a quantidade de matéria prima aplicada ao processo atual de forjamento. Os resultados da simulação numérica computacional mostraram que é possível, substituir a etapa de pré-forjamento, reduzindo em aproximadamente 10% a matéria prima usada, bem como, obter melhor distribuição do material para preenchimento da cavidade da matriz, diminuindo a perda por rebarba no processo. Os testes realizados na prática comprovaram esta redução. Por outro lado, foi observado no ambiente simulado e no ambiente físico um acréscimo de aproximadamente 5% de força empregada na operação final de forjamento do produto em questão.

Palavras-chave: Laminação transversal, forjamento a quente, pré-forma, pré-forja, braço de ligação, DIN 41Cr4.

ABSTRACT

The current forging process of the Link Arm, which is used in the steering system of trucks and buses, comprises the steps: Cutting, Heating, Pre-forging, Final forging and Deburring. This work was developed to replace the Pre-Forging step with a Pre-Forming step, using Cross Wedge Rolling. The objective of this proposal was to reduce the amount of raw material applied to the current forging process. The results of the computational numerical simulation showed that it is possible, by replacing the proposed step, to reduce the applied raw material by up to 10%, as well as to obtain a better distribution of material for filling the cavity, reducing the loss due to flashing in the process. Tests carried out in practice proved this reduction. On the other hand, it was observed in the simulated environment and in the physical environment an increase of up to 5% of force used in the final forging operation of the product in question.

Keywords: Cross wedge rolling, hot forging process, pre-forming, pre-forging, link arm, DIN 41Cr4

SUMÁRIO

PPGE3M	I
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA	12
1.2 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	13
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	13
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 PROJETO DAS ETAPAS DE UM PROCESSO DE FORJAMENTO	15
2.1.1 <i>Considerações iniciais</i>	16
2.1.2 <i>Etapa de Forjamento final</i>	17
2.1.3 <i>Etapa de Pré-forjamento</i>	18
2.1.4 <i>Etapa de Pré-formação</i>	19
2.1.5 <i>Definição da geratriz de forjamento</i>	21
2.1.6 <i>“Método das Secções” para a determinação de pré-forma na etapa de pré-formação por laminação</i>	22
2.2 LAMINAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE PRÉ-FORMA.....	25
2.2.1 <i>Máquinas laminadoras</i>	26
2.2.2 <i>Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada, (CWR - Cross Wedge Rolling)</i>	27
2.2.3 <i>Projeto de Ferramentas de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada</i>	29
2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	34
2.3.1 <i>Geração de malha para simulação numérica computacionais</i>	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 ANÁLISE DO PROCESSO ATUAL DE FORJAMENTO SEM LAMINAÇÃO	37
3.1.1 <i>Cálculo do diâmetro da geratriz baseado no produto</i>	37
3.1.2 <i>Etapas do processo atual de forjamento</i>	39
3.1.3 <i>Corte da geratriz</i>	39
3.1.4 <i>Aquecimento da geratriz</i>	40
3.1.5 <i>Pré-forja</i>	40
3.1.6 <i>Forjamento etapa final</i>	40
3.1.7 <i>Rebarbação da peça</i>	41
3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO TRANSVERSAL POR ROLOS DE CUNHA CRUZADA - CWR	42

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO.....	50
3.3.1 <i>Simulação computacional do processo convencional de forjamento com etapas de Pré-forja e Forja</i>	50
3.3.2 <i>Simulação computacional do processo proposto com etapa de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada</i>	51
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	53
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE FORJAMENTO SEM LAMINAÇÃO	54
4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE FORJAMENTO, SUBSTITUINDO ETAPA DE PRÉ-FORJA POR ETAPA DE PRÉ-FORMA LAMINADA.	58
4.3.1 <i>Geração da malha para simulação computacional do rolamento cruzado</i>	58
4.3.2 <i>Simulação computacional de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzado</i>	60
4.3.3 <i>Testes de simulação computacional com fator de atrito somado a serrilhas</i>	62
4.3.4 <i>Análise da temperatura na simulação numérica</i>	64
4.3.5 <i>Redução da matéria prima</i>	65
4.4 REALIZAÇÃO DE TESTES PRÁTICOS DE LAMINAÇÃO POR ROLOS DE CUNHA CRUZADO	66
4.4.1 <i>Teste de rolamento sem aplicação de serrilhas</i>	66
4.4.2 <i>Teste de rolamento com aplicação de serrilhas</i>	66
4.4.3 <i>Análise da temperatura nos testes físicos</i>	69
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	70
5.1 SIMULAÇÃO VERSUS PROCESSO FÍSICO DE FORJAMENTO ATUAL	70
5.2 SIMULAÇÃO PROCESSO DE FORJAMENTO, SUBSTITUINDO PRÉ-FORJA POR PRÉ-FORMA POR LAMINAÇÃO	71
5.2.1 <i>Redução de malha para simulação</i>	71
5.2.2 <i>Influências do fator de atrito</i>	71
5.2.3 <i>Redução de matéria prima</i>	72
5.3 TESTES PRÁTICOS DA LAMINAÇÃO TRANSVERSAL.....	74
6 CONCLUSÕES	75
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das atividades	14
Figura 2 – Resultante das etapas do processo de forjamento, geratriz (a), pré-forma laminada (b), forja (c) e forja final rebarbada (d) [8]	17
Figura 3 - Pré-forja (a) e forja final (b)	19
Figura 4 – Pré-forma laminada (a) e forja final (b).....	20
Figura 5 – Material aplicado ao forjado sem e com pré-forma laminada[13]	21
Figura 6 - Secções do produto	22
Figura 7 - Modelo 3D do forjado com secções pré definidas	23
Figura 8 - Medição de área em cada secção com auxílio de software CAD	23
Figura 9 - Esboço da pré-forma com raios (r) e distância (l_s)	24
Figura 10 - Modelo da Pré-forma com revolução e raios	24
Figura 11 - Sobreposição pré-forma x forjado	25
Figura 12 - Tipos de laminação para obtenção de pré-forma, transversal (a) e longitudinal (b) [13].....	26
Figura 13 – Laminaora de rolos longitudinais [16].....	27
Figura 14 - Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada (<i>CWR</i>) adapt. de [18]	27
Figura 15 - Máquina Laminadora Transversal UL55 [20]	28
Figura 16 - Zonas e parâmetros de uma ferramenta, adaptado de [26]	30
Figura 17 - Serrilhas.....	32
Figura 18 - Ângulos α e β em relação a δ adaptado de [19].....	33
Figura 19 - Exemplo de Malha computacional de um produto [41]	35
Figura 20 - Preparação do modelo para geração de malha [44]	36
Figura 21 - Braço de ligação sem rebarba	37
Figura 22 – Secção S13 com maior área transversal encontrada.....	38
Figura 23 - Geratriz (a), pré-forja com rebarba (b), forja com rebarba (c), forja acabada (d) e rebarba (e).....	39
Figura 24 - Matriz inferior(a) superior (b), Conjunto (c) de pré-forjamento e forjamento	41
Figura 25 - Peça rebarbada.....	42
Figura 26 - Produto final com rebarba, pré definição das secções.....	42
Figura 27 - Demonstrativo das secções encontradas no produto	43

Figura 28 - Perfil gerado pelas secções encontradas	45
Figura 29 - Pré-forma gerada através das secções	45
Figura 30 – Redução significativa da pré-forma	45
Figura 31 - Pré-forma posicionada na gravura da forja	46
Figura 32 - Redução na secção significativa, e seus respectivos diâmetros.....	47
Figura 33 - Simbologia de referência	48
Figura 34 - Casquilhos projetados.....	50
Figura 35 - Tensão de escoamento x deformação verdadeira, variando a velocidade na temperatura de 1175°C [46]	51
Figura 36 - Geratriz (a), pré-forja (b), forja final (c) e forja + rebarba (d).....	53
Figura 37 - Geratriz (a), pré-forma laminada (b), forjamento final (c) e forja + rebarba (d).....	54
Figura 38 - Ferramenta Inferior de pré-forja e Forja final itens (b) e (c) da Figura 36.....	54
Figura 39 - Início (a) e fim (b) da etapa de pré-forja.....	55
Figura 40 - Força máxima na etapa “b” de pré-forjamento da Figura 36.....	55
Figura 41 - Início (a) e fim (b) do forjamento final.....	56
Figura 42 - Força máxima na etapa “c” forjamento final da Figura 36.....	56
Figura 43 - Comparativo das etapas, Processo atual x Processo proposto	58
Figura 44 - Geometria do rolo sem refino de malha	59
Figura 45 - Geometria do rolo com refino de malha	60
Figura 46 – Geratriz com amassamento	61
Figura 47 - Gráfico de volume de material por tensão efetiva sem serrilhas.....	61
Figura 48 - Ângulos de espalhamento β e ângulo de formação α [48]	62
Figura 49 - Pistas com serrilhas	63
Figura 50 - Laminação Atrito + Serrilhas	63
Figura 51 - Gráfico de volume de material por tensão efetiva com serrilhas.....	64
Figura 52 - Diferença de temperatura durante a laminação	64
Figura 53 - Pré forma com redução de matéria prima	65
Figura 54 - Força máxima aplicada ao forjamento pós laminado	65
Figura 55 - Placas guias da geratriz.....	66
Figura 56 - Marcas das serrilhas na pré-forma laminada	67
Figura 57 - Marcas das serrilhas no produto forjado	68
Figura 58 - Acabamento da pré-forma laminada	68
Figura 59 - Acabamento no produto	69

Figura 60 - Forja final processo atual	73
Figura 61 – Forja final com processo de laminação	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Material x Dilatação Volumétrica [10]	18
Tabela 2 - Composição Química do Aço DIN 41Cr4 [45]	37
Tabela 3 - Área das secções do produto versus raio da secção circular	44
Tabela 4 - Parâmetros de simulação do processo sem laminação	50
Tabela 5 - Parâmetros de simulação para processo de laminação.....	51
Tabela 6 - Dados de força, coletados durante as etapas de pré-forja e forjamento final.....	57
Tabela 7 - Força simulado X Força forjamento físico	70
Tabela 8 - Comparativo entre processos.....	72

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD - Desenho Assistido por Computador - Computer-Aided Design

NBR - Normas Brasileiras de Regulação

CWR - Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzados - Cross Wedge
Rolling

CAE - Engenharia Assistida por Computador - Computer-Aided Engineering

CAM - Manufatura Assistida por Computador - Computer-Aided Manufacturing

FEM - Métodos de Elementos Finitos – Finite Element Method

LISTA DE SÍMBOLOS

a - Incognita de definição do comprimento da zona de corte (l_1)	(mm)
A_g - Área da secção transversal da geratriz	(mm ²)
A_m - Aproveitamento metálico	(%)
A_p - Área da secção transversal do produto	(mm ²)
c - Metade da abertura total da redução significativa	(mm)
C - Parâmetro de cálculo usado para encontrar μ	(-)
d - Diâmetro após laminação	(mm)
d_0 - Diâmetro inicial da geratriz	(mm)
e - Abertura da redução significativa	(mm)
f - Percentual de rebarba	(%)
F - Força de forjamento	(kN)
h - Altura radial da conformação	(mm)
k_f - Tensão de Escoamento	(MPa)
l_0 - Comprimento inicial da geratriz	(mm)
l_1 - Comprimento da zona de corte e guia	(mm)
l_2 - Comprimento da zona de forja	(mm)
l_f - Comprimento da peça após laminação	(mm)
l_s - Distância entre as secções do braço forjado	(mm)
m - Fator de atrito	(-)
M - Massa de um corpo	(kg)
n - Velocidade dos rolos	(rpm)
r - Raio da geratriz	(mm)
t - Tempo	(s)
T - Temperatura	(°C)
v - Velocidade de golpe da prensa	(mm/s)
V_g - Volume da geratriz	(mm ³)
V_p - Volume do produto forjado	(mm ³)
V_{per} - Volume de perdas por oxidação	(mm ³)
V_r - Volume da rebarba	(mm ³)

Símbolos Gregos

α - Ângulo de formação da redução de área	($^{\circ}$)
β - Ângulo de espalhamento da redução de área	($^{\circ}$)
Δr - Deformação radial absoluta	(mm)
Δv - Dilatação volumétrica	(%)
ϵ_a – Redução relativa da área	(%)
δ - Relação de diâmetros	(-)
v - Velocidade de giro dos rolos do laminador	(rpm)
λ - Condutibilidade térmica do material	(W/m.K)
ρ - Densidade do material	(kg/cm ³)
μ - Coeficiente de atrito	(-)
φ - Deformação verdadeira	(-)
φ° - Velocidade de Deformação	(1/s)

1 INTRODUÇÃO

Para determinadas aplicações da indústria agrícola e automotiva, são exigidas dos produtos geometrias complexas e, em alguns casos, propriedades específicas, como resistência e tenacidade. Para atender estas propriedades mecânicas, juntamente com complexidade e de geometria e a velocidade de produção, o forjamento, processos mais antigos de fabricação, continua a se destacar nos dias atuais. No entanto, como todo o processo de fabricação, o forjamento carrega consigo uma série de custos empregados em seu desenvolvimento, entre eles estão, alto investimento em maquinário, energia elétrica e matéria prima. Sendo assim, uma das responsabilidades do engenheiro na indústria de forjamento é criar ou desenvolver técnicas e procedimentos que visem a redução de custos durante a produção, aumentando assim a eficiência dos processos.

A operação de laminação transversal aplicada para a geração de pré-forma no processo de forjamento, pode ser uma solução viável quando se busca melhorar a qualidade de processo com o objetivo na redução de rejeitos. Esta técnica pode apresentar excelentes resultados visto a capacidade de se obter pré-formações com variações de secção transversal ao longo de um comprimento. Desta forma pode-se também reduzir a rebarba durante o processo de forjamento, proporcionando uma redução da quantidade de matéria prima utilizada para obtenção de um determinado produto.

1.1 Definição do Tema

Durante o processo de forjamento à quente é necessário assegurar o fluxo adequado de material dentro da gravura da matriz para seu total preenchimento. No entanto, na maioria das vezes durante o processo, perde-se muito material com formação excessiva de rebarba.

Este trabalho propõe a substituição da etapa de pré-forjamento por etapa de laminação transversal por rolos de cunha cruzados, visando pré-formar o material antes da operação de forjamento final. Realizando melhor preenchimento da gravura devido a correlação de secções entre pré-forma e forja final e por consequência reduzindo os custos com matéria prima aplicada ao produto forjado.

1.2 Delimitações do Trabalho

Este trabalho visa desenvolver uma nova etapa no processo de forjamento que venha a substituir ou ser adicionada as etapas atuais, buscando encontrar uma solução para reduzir o material empregado no forjamento de um produto da linha automotiva. Contudo, é sabido que os custos no desenvolvimento de etapas dentro de um processo de forjamento são elevados. Para evitar custos elevados e desnecessários, este experimento será conduzido inicialmente em âmbito virtual, com a utilização de modelamento em CAD e simulação numérica. Para validar os resultados da simulação numérica serão realizados testes práticos de processo.

1.3 Objetivos

A realização deste trabalho visa aperfeiçoar os conhecimentos na área de projeto de ferramental de forjado, integrando tecnologias de modelamento e simulação computacional com o objetivo de reduzir matéria prima aplicada ao produto em questão.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo é reduzir a quantidade de matéria prima necessária para o processo de forjamento do produto braço de ligação através da substituição da operação de pré-forjamento por operação de laminação transversal.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) estudar métodos de construção de pré-forma por laminação transversal;
- b) analisar métodos encontrados, compilar e desenvolver projeto para pré-forma laminada de braço de ligação;
- c) Simular processo de forjamento atual que consiste em pré-forjar e forjar. E comparar com o novo processo, substituindo a pré-forja por uma pré-forma laminada objetivando redução de matéria prima.

1.4 Justificativa

A análise dos resultados obtidos neste estudo de caso pode ser o pontapé inicial para um investimento maior na aplicação de rolos laminadores transversal para a fabricação de pré-formas, tendo em vista possível retorno financeiro gerado pela redução de matéria prima aplicada aos processos de forjamento.

A Figura 1 mostra o fluxograma do desenvolvimento desta pesquisa iniciando com o surgimento da oportunidade de melhoria aos resultados obtidos.

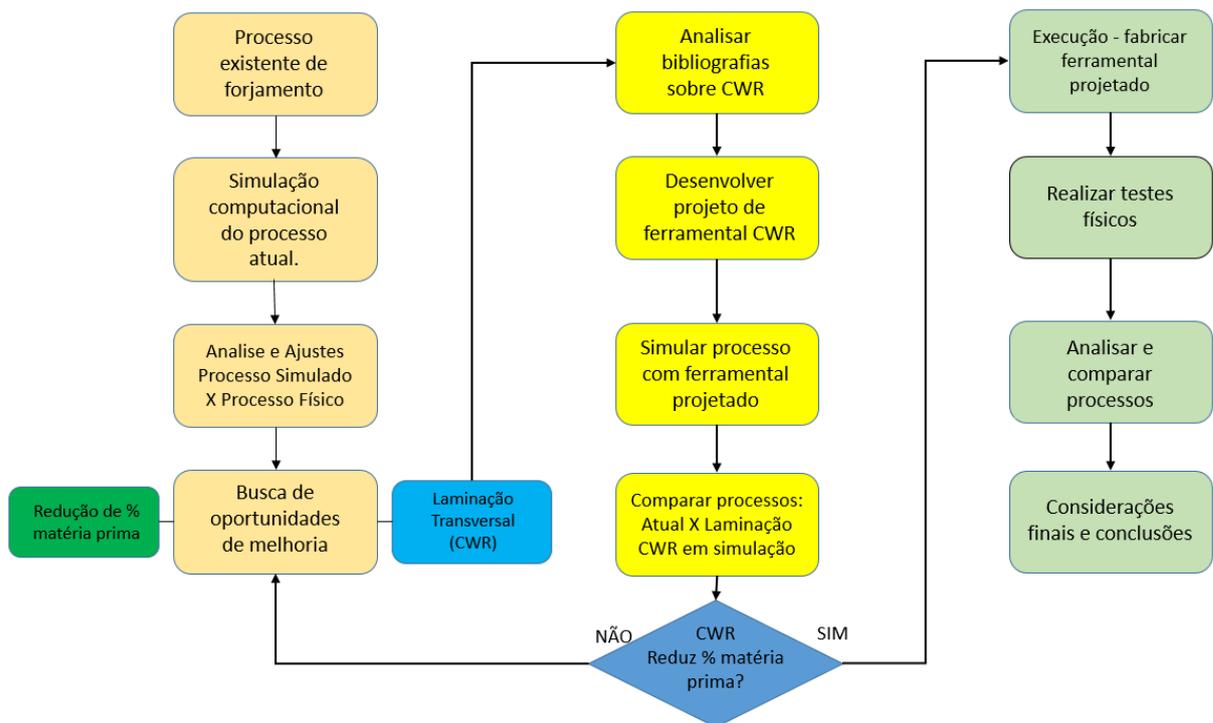


Figura 1 - Fluxograma das atividades

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Projeto das etapas de um processo de forjamento

Durante um longo período os processos de conformação mecânica de metais, apesar de sua extensa aplicação na indústria, foram e muitos ainda são, baseados em técnicas experimentais. O trabalho realizado para otimização dos processos de conformação, consomem tempo e possuem custo elevado, tendo em vista que necessitam de várias intervenções no ferramental e testes práticos para se obter uma evolução do processo. Com o desenvolvimento tecnológico da computação tornou-se viável a otimização dos processos de conformação com a aplicação do Método de Elementos Finitos (FEM) [1].

De maneira prática, cada etapa do processo de conformação está associada a pelo menos uma ferramenta ou equipamento de conformação [2]. O projeto de um ferramental para processos de conformação é uma tarefa altamente especializada, realizada por projetistas experientes, o mesmo deve ter conhecimento amplo na manufatura das ferramentas, montagem dos conjuntos ferramentais e a aplicação dos ferramentais no setor de forjaria. [3]. Atualmente alguns softwares de CAD comerciais possuem pacotes específicos para projeto e desenho de ferramentas, porém, ainda possuem pouca integração direta com softwares de simulação computacional CAE que auxiliem na definição das etapas do processo [4].

Em diversas forjarias é comum encontrar peças com elevado desperdício de material (ex. excesso de rebarba), consumo de energia, além de defeitos como trincas ou falhas de preenchimento, problemas como estes, na maioria das vezes resultam de um projeto de produto ou processo deficiente, sem análise criteriosa de parâmetros e sem qualquer embasamento teórico e científico [5]. O sistema CAD quando integrado a Engenharia Assistida por Computador CAE pode ser usado para solucionar os problemas gerados por desperdícios que elevam os custos do processo de forjamento. Estas técnicas são de menor custo do que realizar testes com matrizes e equipamentos reais. A modelagem fornece muitas informações sobre o processo como força de forjamento e fluxo de material em diferentes estágios permitindo também otimização da bitola da matéria prima e até mesmo redução da espessura de rebarba [6]. Estes sistemas podem ainda, ser integrados a algum tipo de inteligência

artificial visando entre outras coisas, imitar o raciocínio humano na resolução de problemas e tomada de decisão assertiva [7].

2.1.1 Considerações iniciais

Tanto no projeto do ferramental, quanto para o processo de forjamento a quente, as etapas da conformação desde o corte da geratriz até a obtenção do produto final possuem algumas características específicas. Para facilitar a comunicação entre as áreas de projeto, processo e produção na indústria, estas etapas são comumente denominadas de:

- a- Etapa de corte ou cisalhamento da geratriz, onde a resultante desta etapa é a própria geratriz;
- b- Etapa de pré-formação, onde a resultante desta etapa é a pré-forma;
- c- Etapa de pré-forjamento, onde a resultante esta etapa é a pré-forja;
- d- Etapa de forjamento final, onde a resultante desta etapa é a forja;
- e- Etapa de rebarbação, onde a resultante desta etapa é produto final forjado e rebarbado.

No desenvolvimento do ferramental de forjamento a quente, é possível projetar, a partir do modelo do produto forjado, todas as formas resultantes das etapas do processo de forjamento. Algumas resultantes das etapas, como geratriz, pré-forma laminada, forja final rebarbada, estão ilustradas na Figura 2 facilitando assim o desenvolvimento projeto.

É importante observar que o processo de forjamento a quente não necessariamente deve possuir somente as etapas mencionadas anteriormente. Existem processos de forjamento a quente com mais etapas, bem como aqueles com um número menor de etapas. As etapas são definidas de acordo com a máquina que as produz, a geometria e a complexidade de forma do produto final.

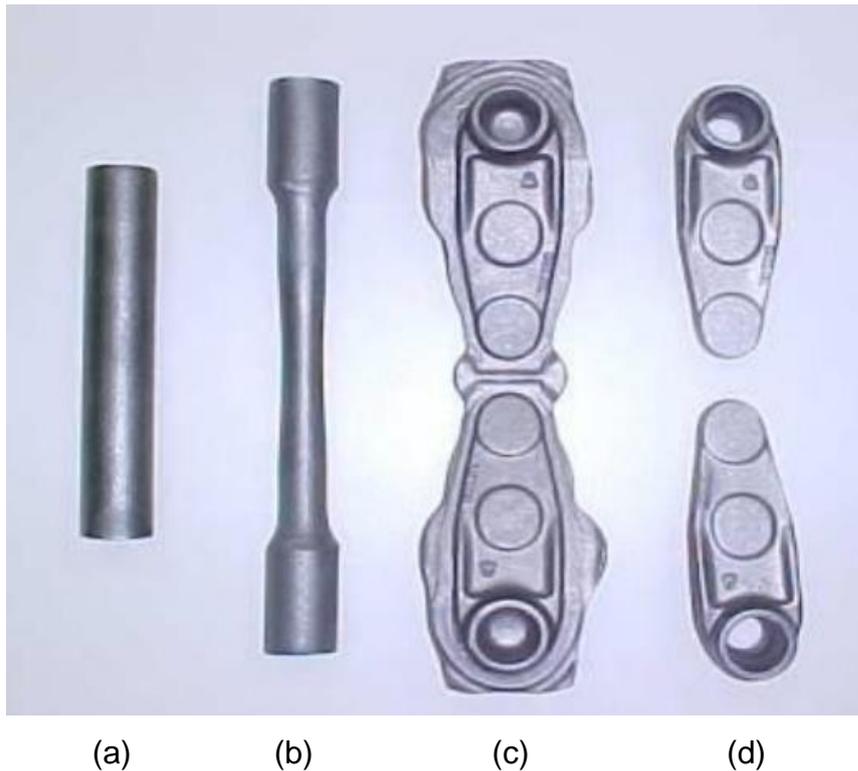


Figura 2 – Resultante das etapas do processo de forjamento, geratriz (a), pré-forma laminada (b), forja (c) e forja final rebarbada (d) [8]

2.1.2 Etapa de Forjamento final

Os forjados são de grande importância na cadeia de produtos automotivos pois as propriedades dos forjados garantem condições ideais para determinados tipos de peças que necessitam de alta resistência e possuem geometrias complexas [9].

Dentro do processo de forjamento a quente, a etapa de forjamento final antecede apenas a etapa de rebarbação. No entanto, do ponto de vista de projeto, esta etapa precede todas as outras. A partir das informações contidas no produto final, é que o projetista consegue definir todas as etapas do processo. Normalmente, é muito difícil obter um produto final forjado acabado em apenas uma etapa do processo de forjamento a quente, pois torna-se inviável projetar um caminho para o fluxo do material na cavidade da matriz, afim de obter uma forma prescrita com propriedades satisfatórias baixo custo [11].

O volume do produto final forjado permite que se calcule o peso da geratriz a ser utilizada, bem como as seções ao longo do produto, podem definir a bitola da matéria prima no processo [2]. Se tratando de um processo de conformação à quente,

para a etapa de forjamento o projetista considera a dilatação volumétrica sofrida pelo material durante o aquecimento do mesmo, a Tabela 1 mostra a dilatação volumétrica de alguns tipos de materiais ao sofrer aquecimento.

Tabela 1 - Material x Dilatação Volumétrica [10]

Material	Dilatação volumétrica Δv (%)
Alumínio	1,5 a 1,8
Cobre	~0,8
Aço ao Carbono	1,2 a 1,5
Aço Liga	1,5 a 2,0
Bronze	~1,6
Ligas de magnésio	1,2 a 1,8
Aço manganês	~2,0
Latão	1,2 a 1,5
Ligas de Níquel	~2,0
Zinco	~1,6

2.1.3 Etapa de Pré-forjamento

Dependendo da complexidade da geometria do produto final forjado, torna-se necessário, uma ou mais etapas que antecedem a etapa de forjamento final dentro de um processo de forjamento a quente. Estas etapas podem ser chamadas de pré-forjamento ou pré-formação, e servem para que o material preencha toda a cavidade da gravura da matriz na etapa final de forjamento do produto. Basicamente a etapa de pré-forjamento tem como objetivo gerar a Pré-forja Figura 3 (a) que se parece com o produto final forjado Figura 3, porém com menor quantidade de detalhes, com espessura e raios maiores e menor largura que o produto forjado. Em contrapartida, deve possuir secções transversais maiores que as secções do produto final forjado e como resultante e um volume maior de material, é sugerido que se utilize secções transversais de 1% a 3% maiores que as secções do produto [2]. Porém este tipo de relação também varia com a complexidade do produto. Há práticas industriais que aconselham utilizar de 5 a 8% nas secções e considerar o volume final da pré-forja de 3 a 6% maior que o volume do produto forjado final forjado.

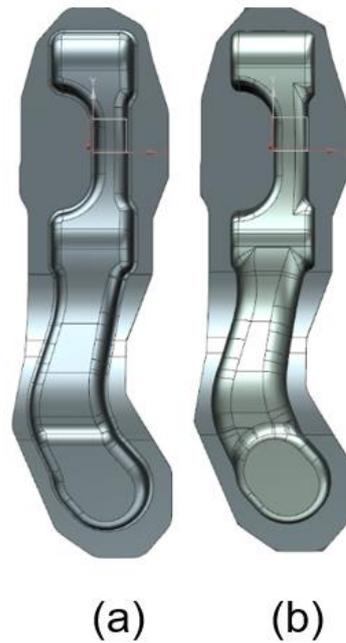


Figura 3 - Pré-forja (a) e forja final (b)

A etapa de pré-forjamento além de facilitar o preenchimento da gravura de forja final aumenta também a vida útil do ferramental como um todo, pois o deslocamento do material a ser forjado é dividido em duas etapas diminuindo o arraste e o atrito em cada uma delas, por consequência o acabamento do produto forjado se mantém uniforme em um lote maior de peças diminuindo também o número de regravações da ferramenta de forja.

A etapa de pré-forjamento nem sempre é exigida nos processos de conformação muitas vezes parte-se diretamente da geratriz, ou seja, material bruto cortado e aquecido para a etapa de forjamento final. E outras vezes utiliza-se somente a etapa de pré-formação antes ou substituindo a etapa de pré-forjamento.

2.1.4 Etapa de Pré-formação

Quando o produto final forjado é relativamente simples pode-se desconsiderar a etapa de pré-forjamento e substituí-la por uma etapa de pré-formação. Ou para casos onde o produto final forjado possui uma geometria de grande complexidade pode-se então adicionar a etapa de pré-formação antes da etapa de pré-forjamento e esta etapa possivelmente pode ser executada em máquina separada [12]. A etapa de pré-formação tem como objetivo gerar a pré-forma, Figura 4 que por sua vez possui a

geometria muitas vezes distante da forja final, mas serve também para dar início a distribuição do material dentro das gravuras subsequentes.



Figura 4 – Pré-forma laminada (a) e forja final (b)

A matéria prima aplicada ao processo de forjamento é responsável por um percentual significativo do custo do produto, por esta razão o projeto de pré-forma ideal é essencial para redução do custo do mesmo. O objetivo da pré-formação, assim como o do pré-forjamento, é alcançar a máxima proximidade da forma final do produto com boa distribuição do material, reduzindo também o fluxo de material na ferramenta final de forjamento, por consequência aumentando a vida útil da ferramenta [13].

Dentro das possíveis maneiras de se obter uma pré-forma ideal a etapa de laminação transversal pode ser uma maneira eficaz de distribuir o material da geratriz de forma facilitar o preenchimento das cavidades nas operações subsequentes. Na Figura 5 é possível verificar o uso da matéria prima aplicada no processo de forjamento sem e com a etapa de pré-formação laminada, que reduz significativamente o consumo de matéria prima.

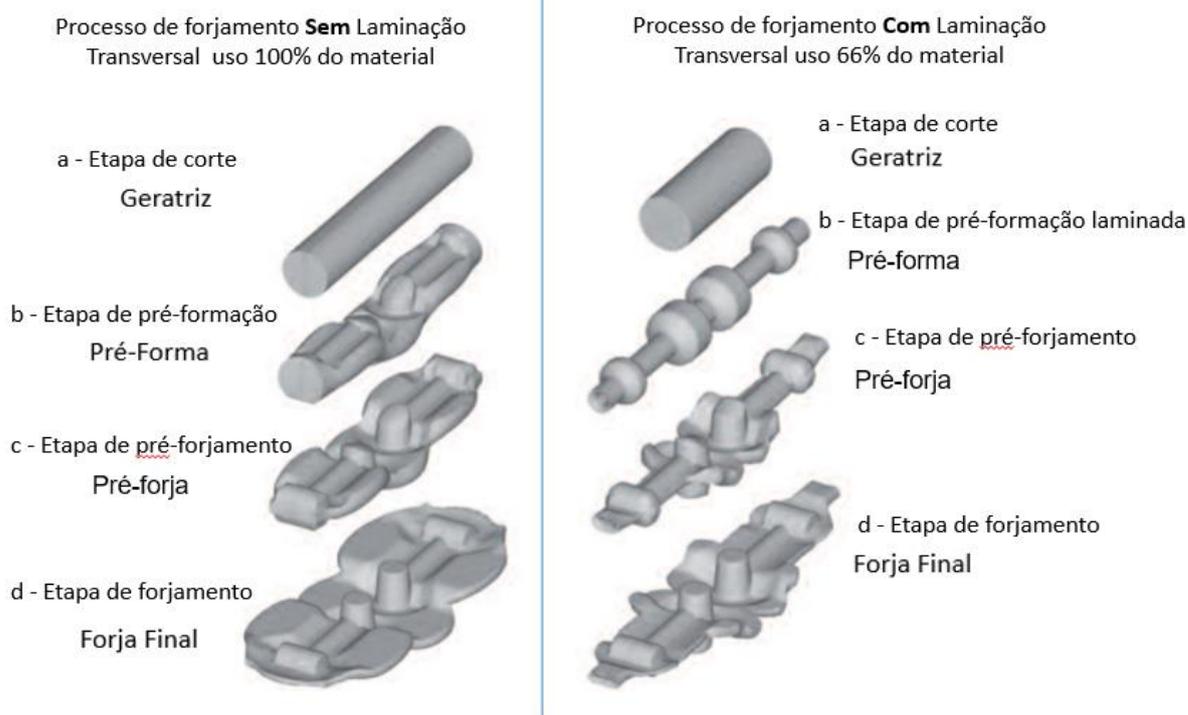


Figura 5 – Material aplicado ao forjado sem e com pré-forma laminada[13]

O projeto da pré-forma é a parte mais crítica do projeto de matrizes para forjamento, sendo que a principal função da mesma é distribuir o material adequadamente dentro da gravura de forja [2].

O projeto de uma pré-forma pode ser realizado através do método de distribuição das secções, que leva a aproximações razoáveis da forma final ou ainda ser auxiliados por testes em sistemas de simulação numérica [12].

2.1.5 Definição da geratriz de forjamento

Para determinar o volume da geratriz (V_g) é necessário conhecer o volume do produto forjado (V_p), adicionar o volume da rebarba (V_r) e em casos de forjamento a quente somar o volume das perdas por oxidação (V_{per}). O volume das perdas por oxidação pode chegar a 5% do volume do produto [5]. A equação 1 mostra como determinar o volume da geratriz (V_g) [5].

$$V_g = V_p + V_r + V_{per} \quad \text{Eq. (1)}$$

Preferencialmente se opta por geratrizes de formas circulares com secção redonda, pois facilitam o encaixe na gravura da matriz reduzindo tensões de atrito no início do forjamento. Para cálculo do diâmetro inicial da geratriz (d_0), são definidas secções transversais ao longo do produto forjado, e extraído destas secções o valor de Área Transversal do Produto (A_p) como mostra o exemplo da Figura 6.

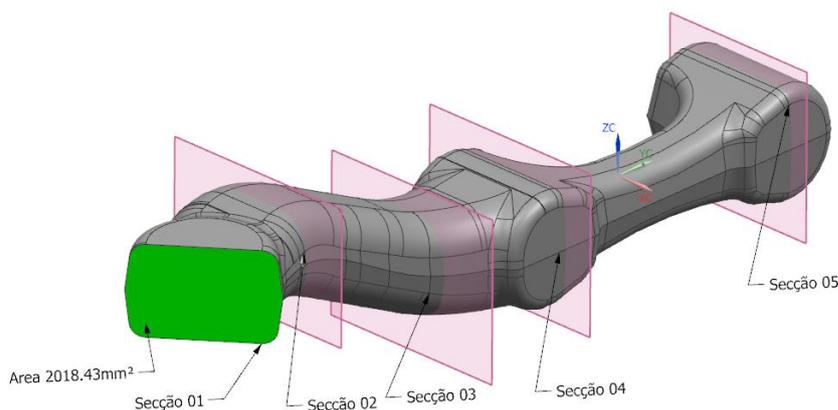


Figura 6 - Secções do produto

Para encontrar o valor do diâmetro inicial da geratriz (d_0), deve-se igualar o maior valor de Área da Secção Transversal do Produto (A_p) encontrado nas secções do produto, com o valor da Área da Secção Transversal da Geratriz (A_g) e com este valor, calcular o diâmetro da mesma.

$$A_p = A_g \quad \text{Eq. (2)}$$

$$A_g = \frac{\pi d_0^2}{4} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$d_0 = \frac{\sqrt{4 \cdot A_g}}{\pi} \quad \text{Eq. (4)}$$

2.1.6 “Método das Secções” para a determinação de pré-forma na etapa de pré-formação por laminação

O método das secções projetadas, pode ser uma das opções para a criação da pré-forma. Para realização deste método utiliza-se o modelo projetado do produto a ser forjado já com um percentual de rebarba pré-definido e fatia-se o mesmo em diversas secções com distâncias definidas, então mede-se a área transversal de cada

secção definida com o valor calcula-se o raio equivalente e transforma-se a mesma em secções circulares [14].

A Figura 7 apresenta o modelo do produto forjado, enquanto a Figura 8 mostra o valor da área transversal encontrada em cada secção. O uso de software de CAD para modelamento matemático auxilia e facilita a criação desta etapa do processo de forjamento.

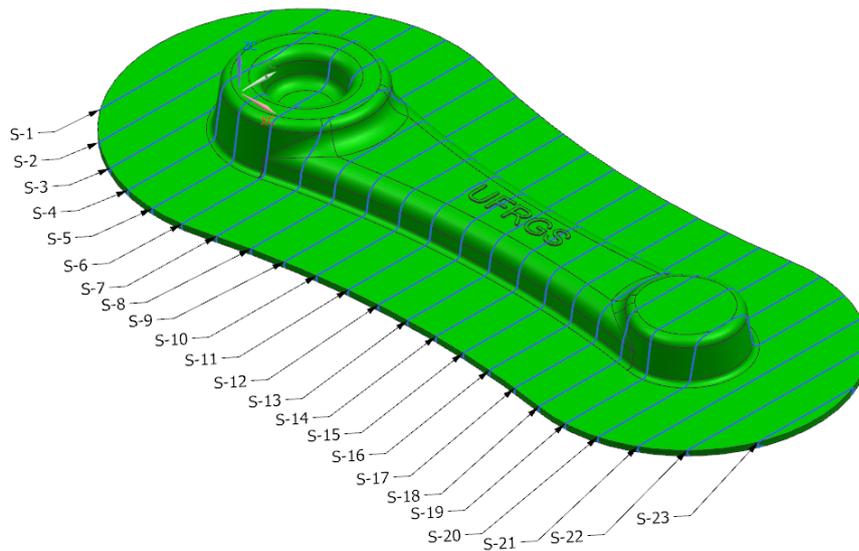


Figura 7 - Modelo 3D do forjado com secções pré definidas

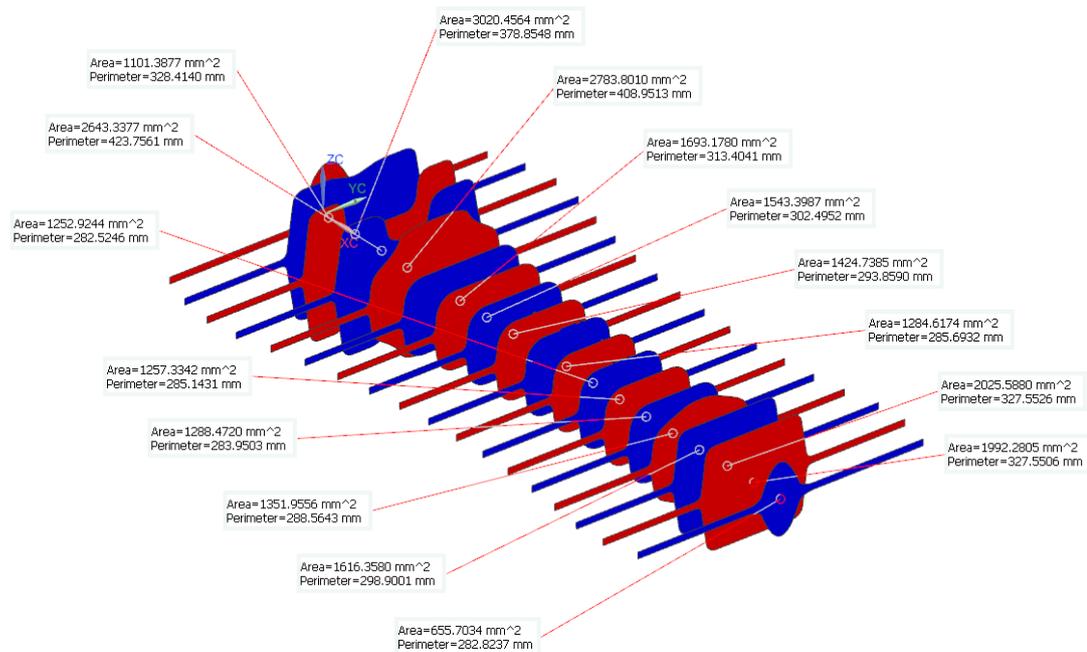


Figura 8 - Medição de área em cada secção com auxílio de software CAD

Usando o valor da área transversal encontrada em cada secção, calcula-se o valor equivalente ao raio (r), de um círculo para transformar a secção encontrada em uma secção circular, com estes valores e a distância (l_s) entre as secções traçadas pode-se traçar a pré-forma equivalente, a Figura 9 mostra o esboço realizado com os valores encontrados de secção e distância no eixo das abscissas.

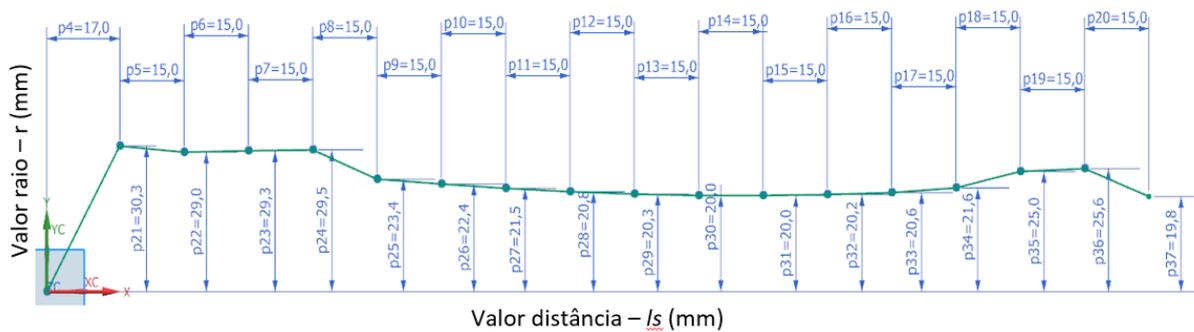


Figura 9 - Esboço da pré-forma com raios (r) e distância (l_s)

A Figura 10 mostra o esboço com revolução em torno do eixo das abscissas. Após pode-se ainda ajustar as seções de maneira a facilitar a fabricação da mesma pelo processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada.

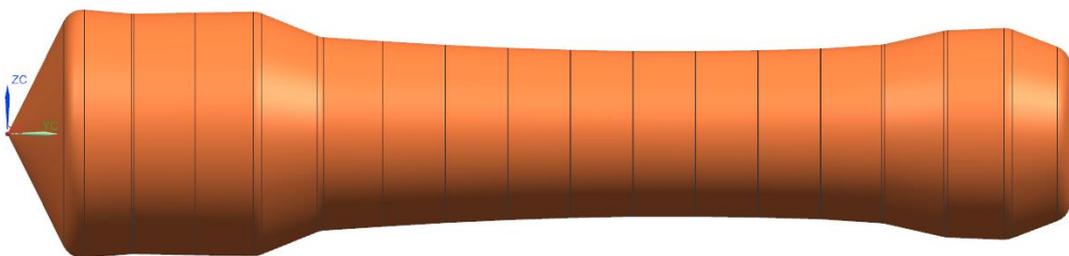


Figura 10 - Modelo da Pré-forma com revolução e raios

A Figura 11 mostra uma sobreposição entre o produto forjado e a pré-forma obtida pelo método das seções projetadas.

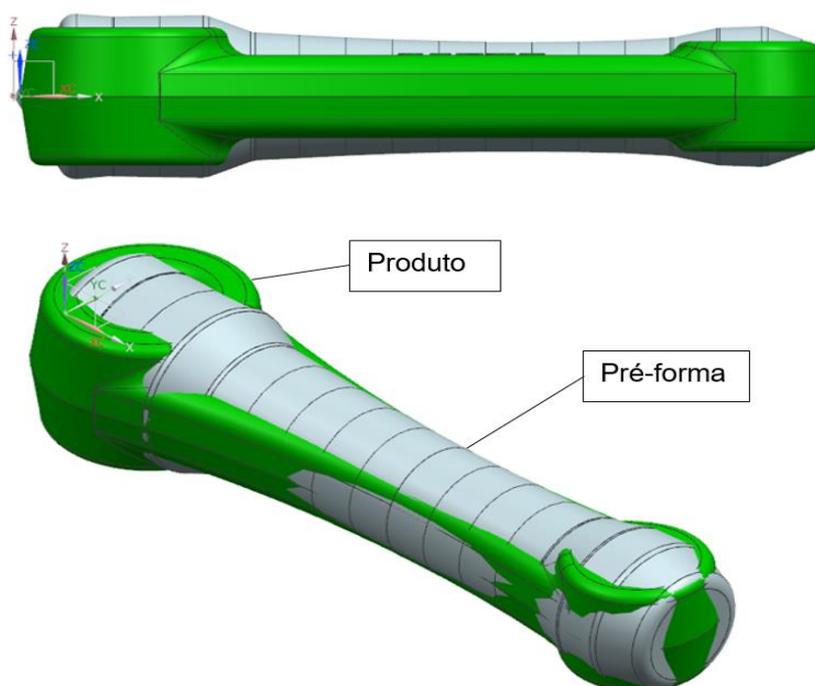


Figura 11 - Sobreposição pré-forma x forjado

2.2 Laminação para obtenção de pré-forma

A laminação por rolos é um dos métodos utilizados dentro dos processos de forjamento para criação de pré-forma e consiste basicamente em forçar o material aquecido a passar por entre rolos e ou cilindros separados entre si por uma distância menor que o diâmetro ou espessura do material a ser laminado. A laminação pode ser realizada de forma transversal ao material a ser laminado Figura 12 (a), neste caso onde os rolos giram no mesmo sentido um ao outro. Bem como no sentido longitudinal da geratriz Figura 12 (b) em que os rolos giram em sentido contrário um ao outro. [15].



Figura 12 - Tipos de laminação para obtenção de pré-forma, transversal (a) e longitudinal (b) [13]

2.2.1 Máquinas laminadoras

Laminadoras são máquinas de construção bastante rígida, pois para o tipo de conformação que se propõe geralmente, atinge-se milhares de toneladas de pressão. Os laminadores são comumente compostos por dois rolos, mancais, estrutura fundida e motor de alta potência para movimentar e conformar os metais. Em laminadoras de rolos longitudinais como apresentados na Figura 13, os rolos giram em sentidos opostos forçando o metal a passar por entre eles diminuindo assim a seção inicial do material e alongando o mesmo no sentido longitudinal.

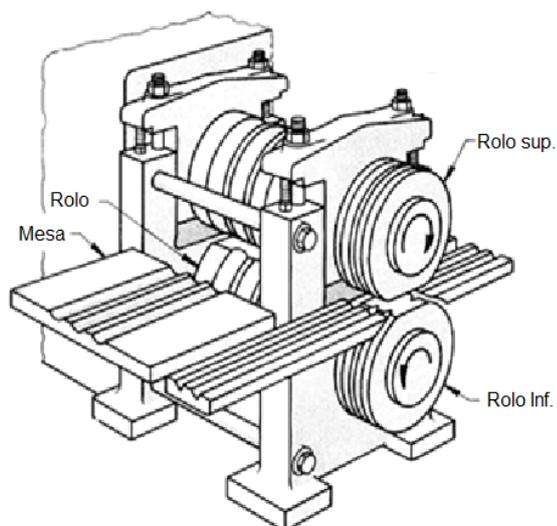


Figura 13 – Laminaadora de rolos longitudinais [16]

2.2.2 Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada, (*CWR - Cross Wedge Rolling*)

A técnica de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada (*CWR*) é um processo de conformação usado na fabricação de pré-formas para forjados no qual o material é deformado por rolos cilíndricos segmentados em formato de cunha cruzada Figura 14. O processo é realizado a temperaturas elevadas para diminuir as forças de deformação do material deformado [17].

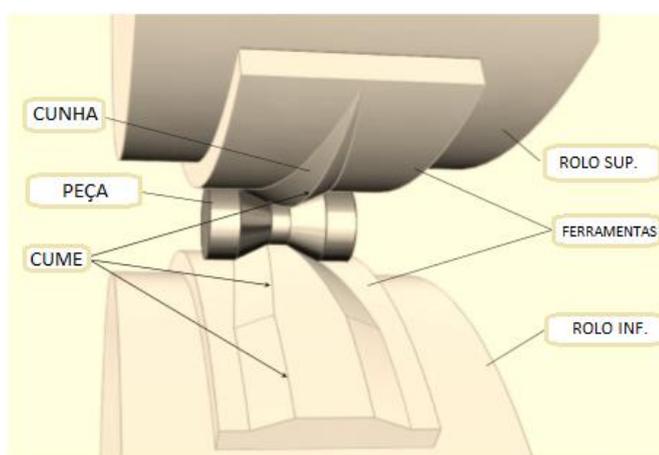


Figura 14 - Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada (*CWR*) adapt. de [18]

A Figura 15 ilustra a máquina laminadora transversal modelo ULS55 Smeral modelo semelhante ao utilizado no desenvolvimento desta pesquisa. As características principais desta máquina são[19]:

- Diâmetro inicial da matéria prima a ser rolada (d_0)	15 - 60mm
- Mínimo comprimento da matéria prima	250mm
- Máximo comprimento após rolamento	400mm
- Máxima redução relativa da área em uma formação ($\epsilon a \text{ máx.}$)	75 a 78%
- Máxima redução relativa da área em duas formações ($\epsilon a \text{ máx.}$)	86%
- Diâmetro dos rolos da máquina	600mm
- Largura dos rolos	400mm
- Velocidade dos rolos (n)	10, 11, 13 e 15rpm
- Distância ajustável entre as superfícies dos rolos	50 a 75mm
- Potência do motor	60/40 kVA



Figura 15 - Máquina Laminadora Transversal UL55 [20]

O processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada para fabricação de pré-forma se destaca pelo baixo consumo de material na aplicação do produto final, geralmente a perda não excede 10% do produto final [21]. Este processo é dividido normalmente em quatro zonas básicas, zona de esfaqueamento, zona de guiamento, zona de alongamento e zona de dimensionamento [22]. Apesar das vantagens apresentadas pelo processo de laminação transversal por rolos de cunha

cruzada o projeto de ferramental ainda é bastante difícil, quando se trata de peças com determinada complexidade, mesmo as equipes mais experientes da área, acabam encontrando soluções finais por meio de sucessivas aproximações e método de tentativa e erro [23]. Com o avanço de tecnologias de simulações virtuais para processos complexos sob um estado tridimensional de tensões tem crescido o interesse pelo estudo no desenvolvimento destes ferramentais.

O processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada é bastante complexo de ser modelado numericamente, devido à complexidade de fatores como interação peça e ferramenta, sensibilidade de variação de ângulos, troca de calor, fator de atrito, velocidade de giro entre outros [23].

Entre os defeitos encontrados no processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada pode-se destacar a formação de uma cavidade central, que se apresenta na forma de uma fissura axial, também conhecida como efeito Mannesmann [24]. Este é um dos defeitos mais comuns, e pode ser atribuído pela alta tensão de cisalhamento existente no centro da peça, tensões de tração acumuladas em um determinado número de revoluções da peça, ou ainda relacionadas as velocidades tangenciais entre os diferentes diâmetros da peça. Além do efeito Mannesmann outro defeito comum encontrado é conhecido como *squaring* que é o achatamento do material devido ao escorregamento da peça em relação as ferramentas. Este escorregamento ocorre quando a força tangencial da ferramenta em relação a peça é superior a força de atrito entre a peça e a ferramenta [25].

2.2.3 Projeto de Ferramentas de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada

A Figura 16 mostra as quatro zonas de um ferramental de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada. Nela também é possível observar os principais parâmetros de um ferramental que são: ângulo de formação α , ângulo de espalhamento β e relação de diâmetros δ [26], [27] e [28].

$$\delta = \frac{d_0}{d}[-] \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde: d_0 =diâmetro inicial da geratriz a ser laminada
 d = diâmetro após laminação

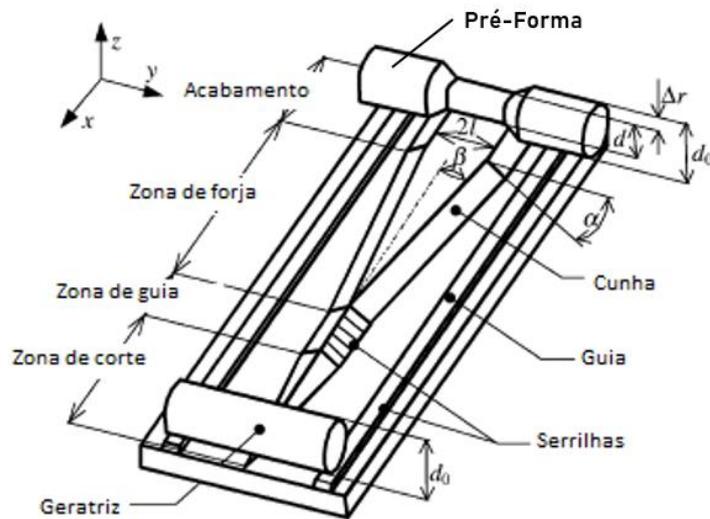


Figura 16 - Zonas e parâmetros de uma ferramenta, adaptado de [26]

Muitos estudos foram realizados para descobrir os melhores valores para os parâmetros α , β e δ . Estes parâmetros, não só influenciam na qualidade final do produto como também potencializam a variação da vida da ferramenta de conformação. Por ser um processo de volume conservativo, maiores valores de Relação de Diâmetros (δ) aumentarão significativamente a deformação plástica no sentido axial e comprimento total da peça, pois aumentam o contato entre peça e ferramenta o que leva a um desgaste maior da ferramenta, acarretando má qualidade da peça [22]. Menores valores de Ângulo de Formação (α) auxiliam a redução do desgaste do ferramental, já a variação do Ângulo de Espalhamento (β) não impõe grande influência ao desgaste do ferramental, mas valores maiores deste ângulo, desgastam mais comparado a valores pequenos [22]. Fu e Dean relacionam o coeficiente de atrito (μ) para auxiliar no cálculo dos ângulos α e β [29].

$$\text{sen}\beta = 0,09 \frac{\mu}{\text{sen}\alpha} [-] \quad \text{Eq. (6)}$$

O coeficiente de atrito (μ) pode variar durante o processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada. Estudos empíricos sugerem valores entre

$\mu=0,3$ e $0,5$ [30], para efeito de cálculos. Lovell assegura que o escorregamento não ocorre durante a rolagem, desde que o coeficiente de atrito μ atenda a equação 7 [31]

$$\mu \geq \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{d_0}{dw}\right)(C^2 + 2C)} \quad [-] \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde dw – Diâmetro do rolo de laminação [mm]

d_0 =diâmetro inicial da geratriz a ser laminada

C - Parâmetro calculado pela equação [-]

$$C = \frac{1}{a} \pi \tan \alpha \tan \beta \kappa e [d + 0,62(d_0 - d)] \quad [-] \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde ($0 < \kappa e < 1$), para fins práticos $\kappa e = 1$ [-]

Coeficiente de atrito (μ) entre a peça e ferramenta podem afetar o comportamento do escoamento do material, bem como a carga de forjamento e o desgaste das ferramentas. Porém em alguns casos o coeficiente gerado entre a ferramenta e a peça é requerido. [32] No caso da laminação, é este coeficiente que auxilia na redução de problemas como *squaring*. O acabamento superficial deixado pela usinagem na ferramenta do rolo laminador e a temperatura do material a ser laminado podem influenciar no Coeficiente de Atrito (μ) durante o processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada, superfícies mais rugosas tendem a coeficientes de atrito mais altos [19]. Um recurso tecnológico utilizado para aumentar o Coeficiente de Atrito (μ) entre peça e ferramenta é a criação de serrilhas nas laterais do rolo de laminação. Serrilhas, são pequenos sulcos realizados ao longo das faces de contato entre o rolo e a peça que auxiliam a aderência do material principalmente no início da rolagem, as mesmas estão ilustradas na Figura 17. Apesar de aumentar o Coeficiente de Atrito (μ) inicial entre o rolo e a peça a ser laminada o sulco do serrilhado auxilia na aceleração da dissipação do calor gerado durante o rolamento, levando a uma temperatura de contato transiente mais baixa no cume da ferramenta aumentando significativamente a durabilidade da mesma [33].

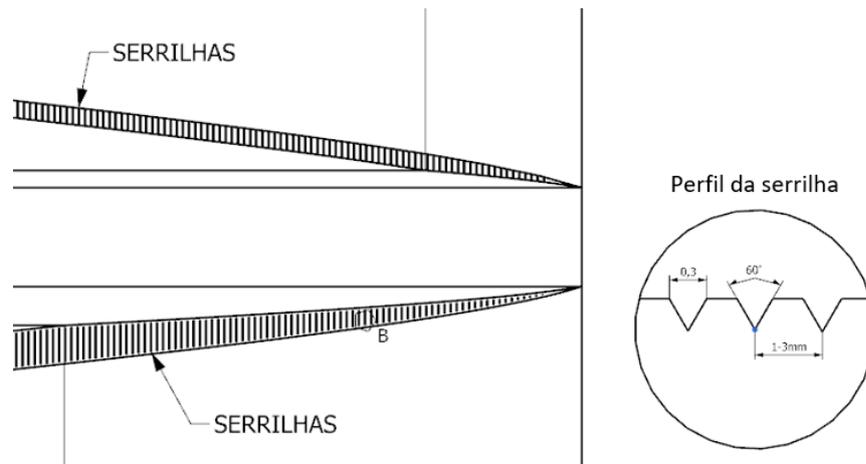


Figura 17 - Serrilhas

Ainda na busca de valores ideais para α e β alguns autores apontam para formulas empiricamente estudadas [34] e [35].

$$\tan\alpha \cdot \tan\beta \leq 0,08 \text{ [-]} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\frac{\sqrt{2\tan\alpha \cdot \tan\beta}}{\pi} \times \left(1 + \sqrt{\frac{1}{\delta}}\right) \times (\delta - 1) \leq 0,2 \text{ [-]} \quad \text{Eq. (10)}$$

De modo geral a definição dos ângulos α e β são determinados de maneira empírica baseados em testes práticos. Os resultados mais aceitos encontrados nestes testes foram compilados e estão esboçados na Figura 18. Sendo que para o ângulo β os valores variam entre 5° e 10°, o ângulo α os valores variam entre 20° e 30° [19].

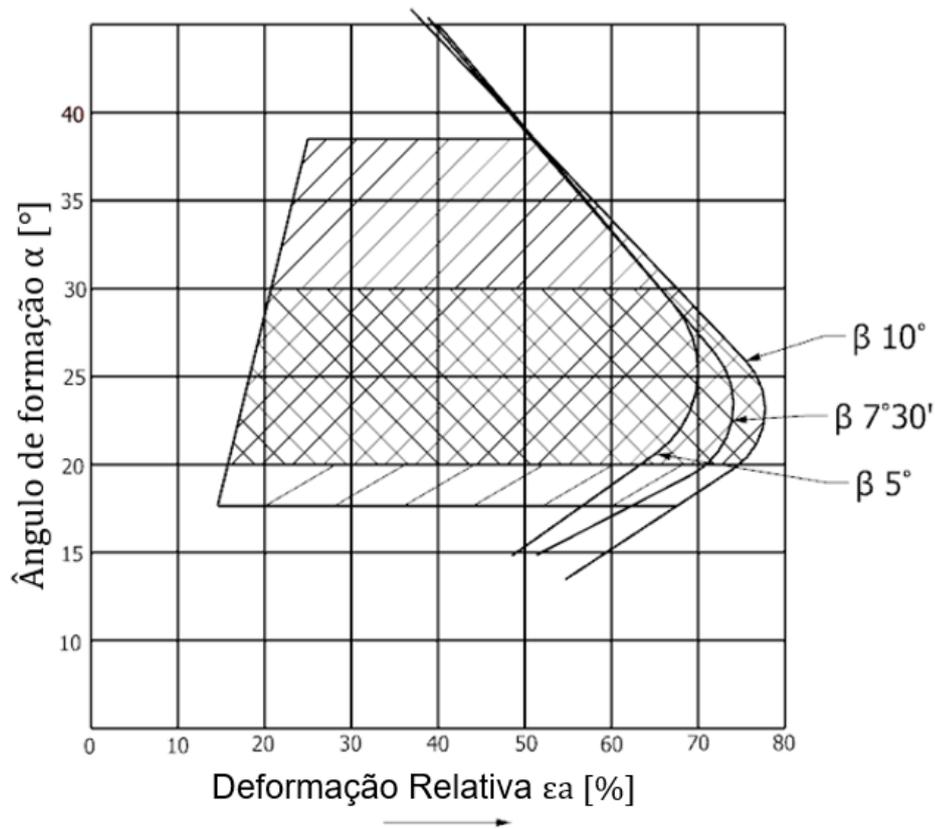


Figura 18 - Ângulos α e β em relação a δ adaptado de [19]

Onde ε_a é a deformação relativa da área na secção;

d_0 - diâmetro inicial da geratriz

d - diâmetro final após laminado

$$\varepsilon_a = \left(\frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} \right) \times 100 = [\%] \quad \text{Eq.(11)}$$

Tendo em vista a ampla variabilidade de opções e combinações possíveis entre os ângulos α e β a simulação computacional numérica pode colaborar muito com o processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada. Pois com esta tecnologia é possível realizar várias iterações a baixo custo, obtendo resultados precisos e fazendo com que se tenha mais assertividade e precisão na fabricação do ferramental.

2.3 Simulação numérica computacional

Em geral os processos de forjamento tendem a ser um sistema complexo de variáveis. Otimizar características como material, geometria, temperatura, lubrificação e refrigeração do ferramental para uma determinada aplicação em um componente é um dos objetivos do engenheiro de processo [36]. As tecnologias de Desenho Assistido por Computador (CAD), Manufatura Assistida por Computador (CAM) e mais recentemente Engenharia Assistida por Computador (CAE) se tornaram grandes aliadas no desenvolvimento e aprimoramento de produtos forjados. A partir da metade dos anos 1990 os softwares de simulação de forjamento conseguiram alcançar um nível de precisão aceitável para encontrar soluções de problemas práticos de forjamento [37].

Projetar o ferramental para processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada é bastante complexo e montar o processo inteiro no âmbito de simulação computacional numérica ainda é um desafio para os engenheiros, porém a realização desta prática, contribui para melhorar a eficiência no desenvolvimento deste processo [19].

O Método de Elementos Finitos (FEM), pode ser utilizado nos processos de conformação mecânica, neste caso, são construídos a partir das equações de derivadas parciais que caracterizam os equilíbrios quase estático ou dinâmicos. A representação destes elementos é feita por meio de esquemas de integração implícitos ou explícitos envolvendo leis de comportamento dos materiais do tipo rígido-plástico, rígido-viscoplástico, elasto-plástico ou elasto-viscoplástico [38]. Dentro do processo de simulação computacional numérica pode-se utilizar alguns modelos para definição de atrito, entre eles Siebel, Levanov e Coulomb. Na série de estudos de simulação numérica realizados em Lublin University of Technology, Zbigniew Pater considerou o fator de atrito entre peça e ferramenta constante, utilizando lei de fricção conforme Levanov, assumiu para todos os casos estudados o fator de atrito $m=1$ [39].

2.3.1 Geração de malha para simulação numérica computacionais

Para conformações onde as ferramentas possuem raios muito pequenos, arestas salientes e ou detalhes minuciosos como as que ocorrem no Processo de

Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada a malha gerada nos modelos matemáticos computacionais influenciam o resultado da simulação. Elementos finitos são conectados entre si por pontos, denominados pontos nodais ou nós. Estes elementos e pontos nodais são chamados de malha (*Mesh*). Os pontos são considerados onde linhas se interceptam e servem de orientação para o cálculo de propriedades físicas baseado num modelo matemático Figura 19 [40]. A precisão do Método de Elementos Finitos (FEM) depende diretamente do tamanho e do tipo de elementos da malha. Quanto menor for o tamanho do elemento e maior o número de elementos maior precisão nos resultados [41].

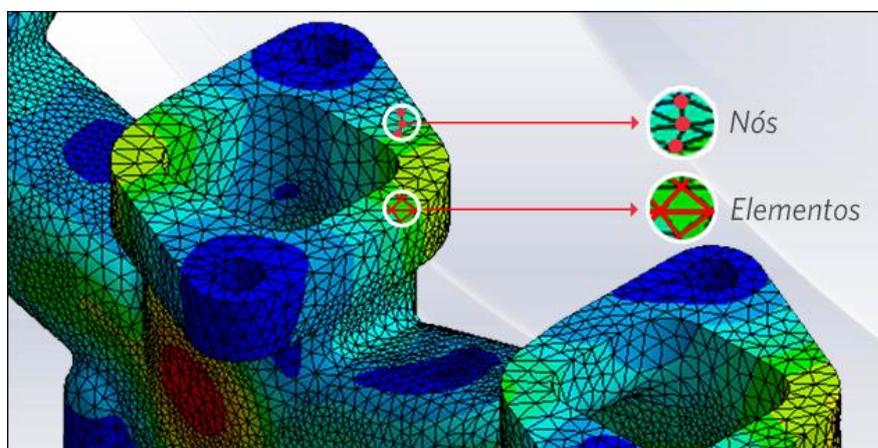


Figura 19 - Exemplo de Malha computacional de um produto [41]

Uma malha computacional nada mais é que uma representação de uma face ou superfície física, ou seja, dividir uma geometria em pequenas partes que o software seja capaz de calcular cada um desses elementos, sabendo-se o que ocorre em cada elemento pode-se saber o que ocorre em um corpo como um todo [42]. Uma malha pode ser estruturada quando cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos ou não estruturada de maneira aleatória [43]. Todo projeto desenvolvido com Engenharia Assistida por Computador (CAE) tem início na etapa de construção de um modelo geométrico executado em Desenho Assistido por Computador (CAD). Para garantir o funcionamento do projeto o modelo geométrico tridimensional criado precisa ser tratado antes de ser submetido ao software de simulação, o objetivo final é gerar uma malha (*mesh*), um modelo discretizado que será utilizado pelo software para resolver equacionamentos da física apropriados ao modelo em questão a Figura 20 ilustra a geração da malha [44].

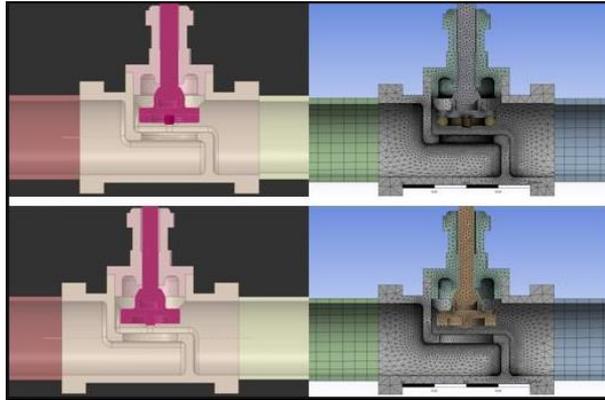


Figura 20 - Preparação do modelo para geração de malha [44]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Análise do processo atual de forjamento sem laminação

Para realização deste estudo, utilizou-se como produto forjado final, um braço de ligação, utilizado no segmento automotivo, de aplicação específica em caminhões e ou ônibus, Figura 21.

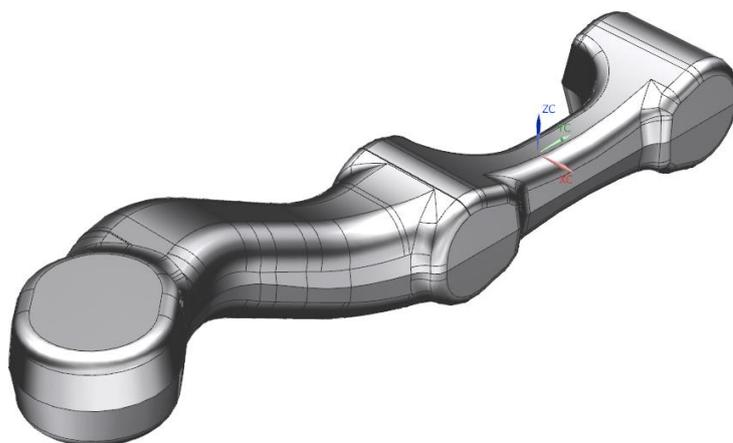


Figura 21 - Braço de ligação sem rebarba

Este componente possui peso 4,130kg após forjado e rebarbado. No processo atual é produzido a partir de uma geratriz com diâmetro de 50,80mm x 349,7mm de comprimento, que resulta na massa de 5,550kg. O Aço utilizado é o DIN 41Cr4, Tabela 2. O aproveitamento metálico considerando a massa final do produto dividido pela massa inicial de geratriz em percentual é de 74,4%, o restante do material 25,6% é destinado a rebarba gerada no processo de forjamento.

Tabela 2 - Composição Química do Aço DIN 41Cr4 [45]

DIN	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Outros
41Cr4	0,38 0,45	0,15 0,40	0,50 0,80	0,035	0,035	---	0,90 1,20	---	---

3.1.1 Cálculo do diâmetro da geratriz baseado no produto

Analisando o produto final em questão e considerando os cálculos desenvolvidos no item 2.1.6 deste trabalho. Verifica-se que a secção S13 da Figura

22 possui a maior área transversal do produto (A_p) encontrada, corresponde ao valor de 2701 mm². Com o valor encontrado, e igualando as áreas do produto (A_p) e da área da secção transversal da geratriz (A_g) pode-se calcular o valor do diâmetro equivalente da geratriz.

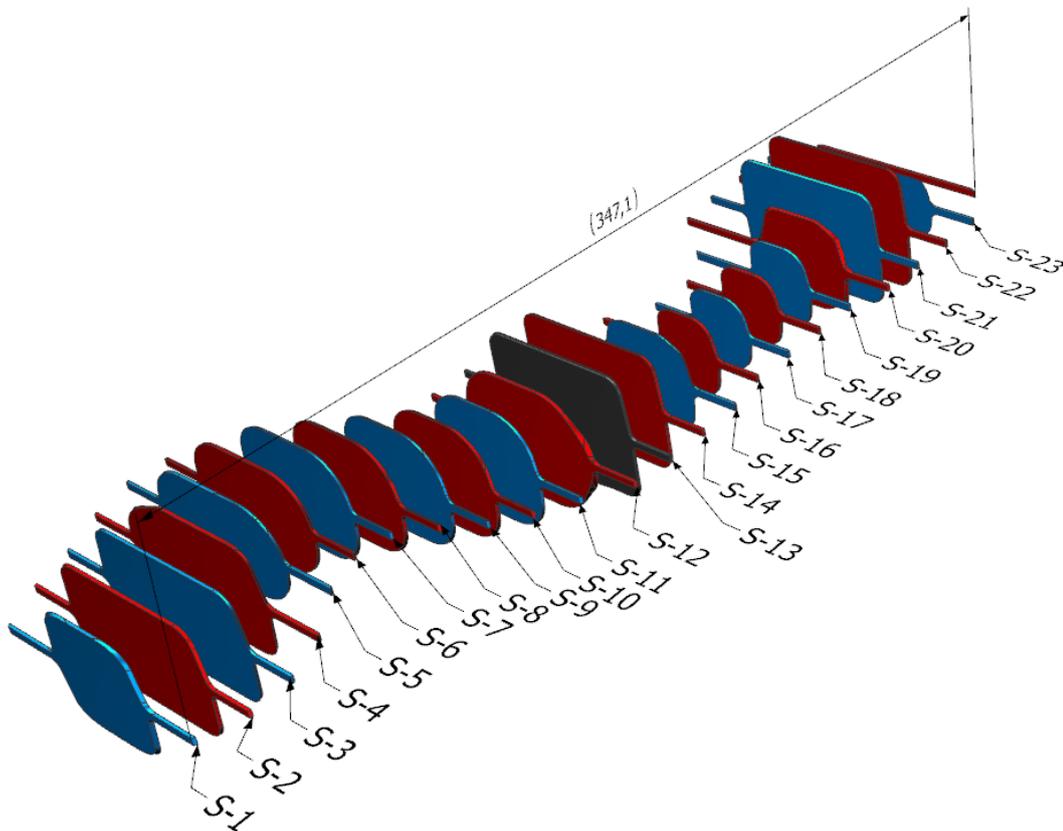


Figura 22 – Secção S13 com maior área transversal encontrada

Onde d_0 é o diâmetro inicial da geratriz

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \times 2701 \text{ mm}^2}{\pi}} \quad d_0 = 58,64 \text{ mm} \quad \text{Eq.(4)}$$

O diâmetro inicial ideal da geratriz (d_0), para este forjamento, conforme cálculo seria Ø58,64mm. Porém, considerando os valores de bitola de matéria prima mais comuns no mercado, o volume de peças a serem produzidas anualmente, o comprimento da geratriz em relação ao comprimento total da peça forjada e a análise

das demais secções da peça, verificou-se que é possível a utilização da geratriz com $\varnothing 50,80\text{mm} \times 349,7\text{mm}$ de comprimento.

3.1.2 Etapas do processo atual de forjamento

A sequência de etapas do processo atual de forjamento deste braço consiste em: Corte da matéria prima, Geratriz Figura 23(a), aquecimento da geratriz cortada, pré-forjamento da geratriz aquecida, Pré-forja Figura 23(b), forjamento final Forja Figura 23(c) e rebarbação à quente separando a peça Forja rebarbada Figura 23(d), da Rebarba Figura 23(e). Para as etapas de pré-forjamento e forjamento foram realizadas simulações numéricas computacionais para efeito comparativo do valor de força F , obtido no forjamento físico e força F , de forjamento calculado na simulação numérica computacional.

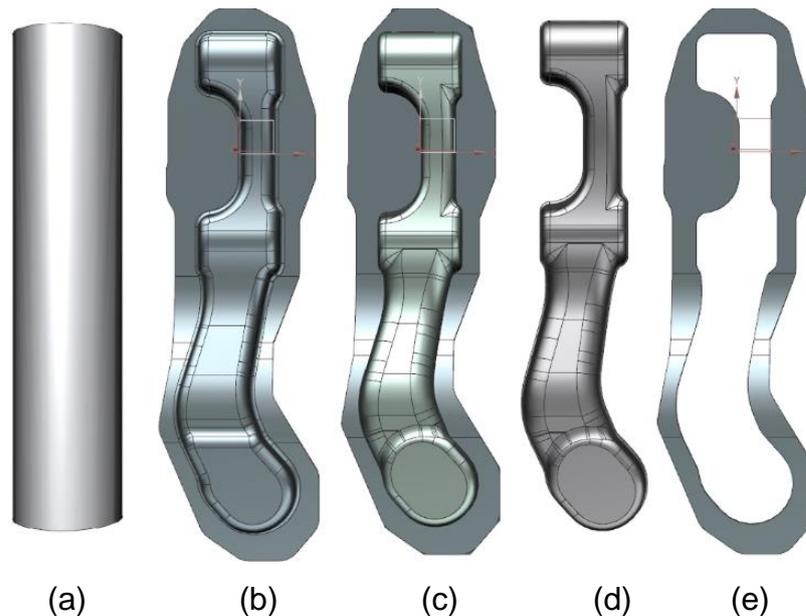


Figura 23 - Geratriz (a), pré-forja com rebarba (b), forja com rebarba (c), forja acabada (d) e rebarba (e)

3.1.3 Corte da geratriz

O corte da geratriz é realizado em serra disco e o controle dimensional é realizado através da massa do material cortado.

3.1.4 Aquecimento da geratriz

O aquecimento da geratriz é realizado em forno de aquecimento indutivo com potência de 860kW, o controle de temperatura da geratriz é realizado através de pirômetro óptico com sistema de descarte automatizado, caso a geratriz não esteja dentro da faixa de temperatura estipulada. A geratriz é aquecida a uma temperatura T , média de $1175^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$.

3.1.5 Pré-forja

A pré-forja, etapa (b) da Figura 23, é realizado com batida única em prensa mecânica rápida com capacidade máxima 16000 kN. A temperatura T da geratriz nesta operação é de 1175°C e o lubrificante utilizado é Lubrodalt AT 2060. Para esta etapa do processo a espessura de rebarba projetada é de 2,0mm, tal operação utiliza em média uma força F , aplicada de 10160 kN este valor é obtido através de uma célula de carga instalada na prensa mecânica. No item 4.1 deste trabalho foi realizado a simulação numérica computacional desta etapa do forjamento para efeito comparativo com o processo físico realizado.

3.1.6 Forjamento etapa final

O forjamento final, etapa (c) da Figura 23, é também realizado com uma única batida na mesma prensa mecânica rápida de 16000 kN, com as mesmas condições de temperatura e lubrificação, a espessura de rebarba nesta operação é de 2,0mm, a célula de carga mostra que utiliza-se em média uma força F aplicada de 12240 kN para esta etapa. Assim como na etapa anterior no item 4.1 deste trabalho foi realizado a simulação numérica computacional desta etapa de forjamento para efeito comparativo com o processo físico.

O conjunto de ferramentas de pré-forjamento e forjamento está ilustrada na Figura 24 com as gravuras de pré-forja e forja, sendo que o dimensional dos blocos de cada matriz é de 550mm de comprimento x 370mm de largura e altura variando entre 125 a 180mm, o peso fica próximo de 240kg para cada ferramenta.

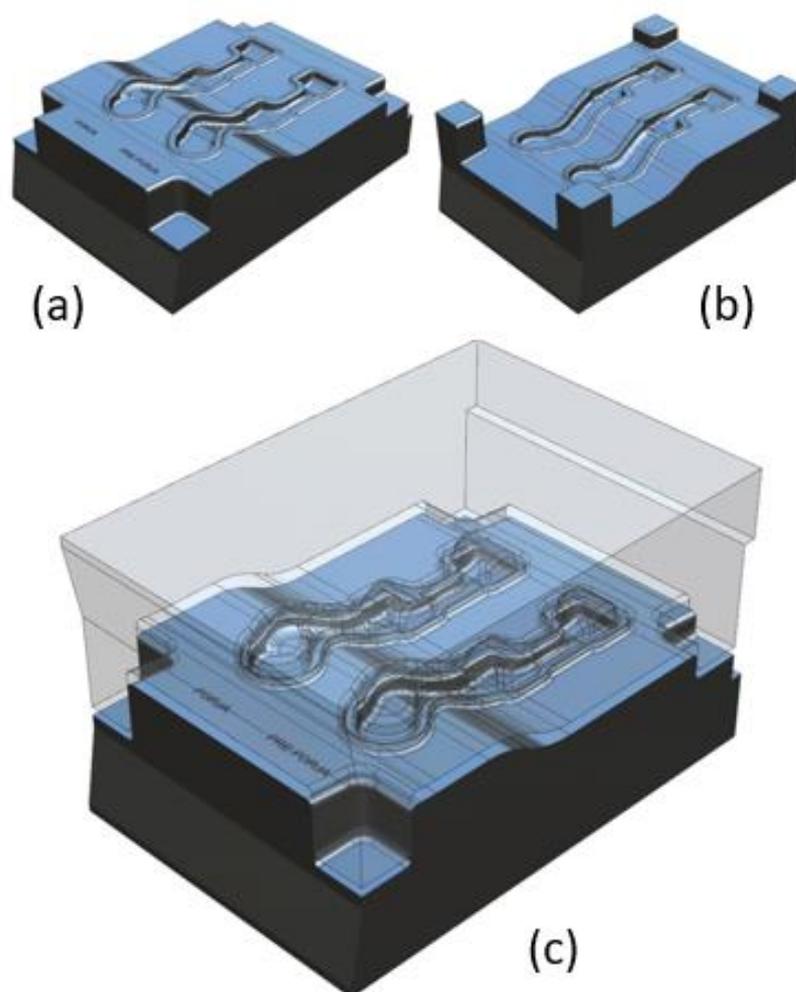


Figura 24 - Matriz inferior(a) superior (b), Conjunto (c) de pré-forjamento e forjamento

3.1.7 Rebarbação da peça

A rebarbação da peça é realizada em prensa excêntrica com capacidade de 3000 kN, no entanto a força F , apresentada pela célula de carga da prensa nesta etapa para o cisalhamento da rebarba foi de 1150 kN. A temperatura T medida com pirômetro óptico da peça registrada no momento do cisalhamento foi de 900°C, após o corte da rebarba, a mesma apresenta aspecto semelhante ao representado na Figura 25.



Figura 25 - Peça rebarbada

3.2 Desenvolvimento do processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada - CWR

Prevendo uma possível posterior aplicação prática deste estudo, estipulou-se usar o mesmo aço e mesmo diâmetro da matéria prima do processo atual, tendo em vista a disponibilidade deste material no estoque da fábrica. Então para este estudo utilizou-se aço DIN 41Cr4 com diâmetro 50,80. Seguindo o procedimento escrito no item 2.1.6 foram pré-definidas secções distante uma da outra (l_s) em 15mm ao longo do produto considerando o percentual de rebarba do processo atual como mostra a Figura 26.

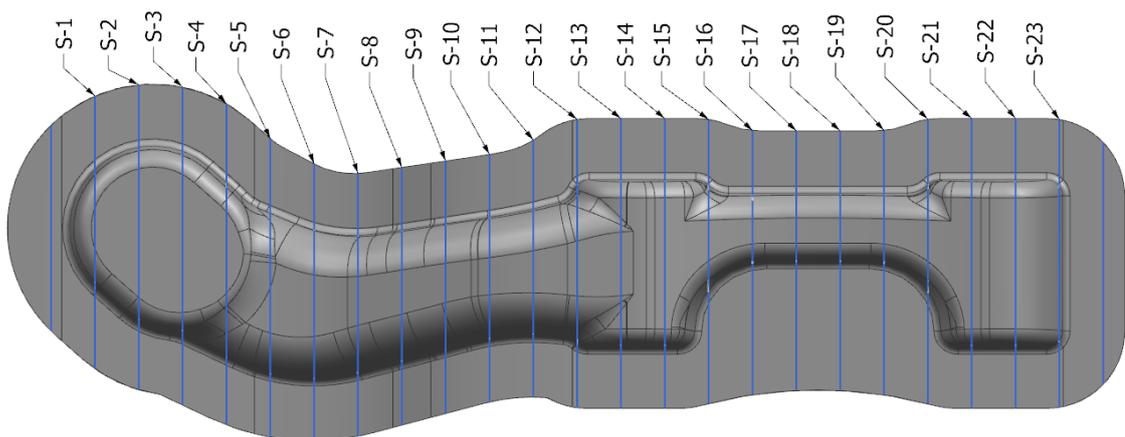


Figura 26 - Produto final com rebarba, pré definição das secções

Em seguida analisou-se a medida área transversal de cada e secção da Figura 27. Com este valor obter-se o valor do diâmetro equivalente em cada secção.

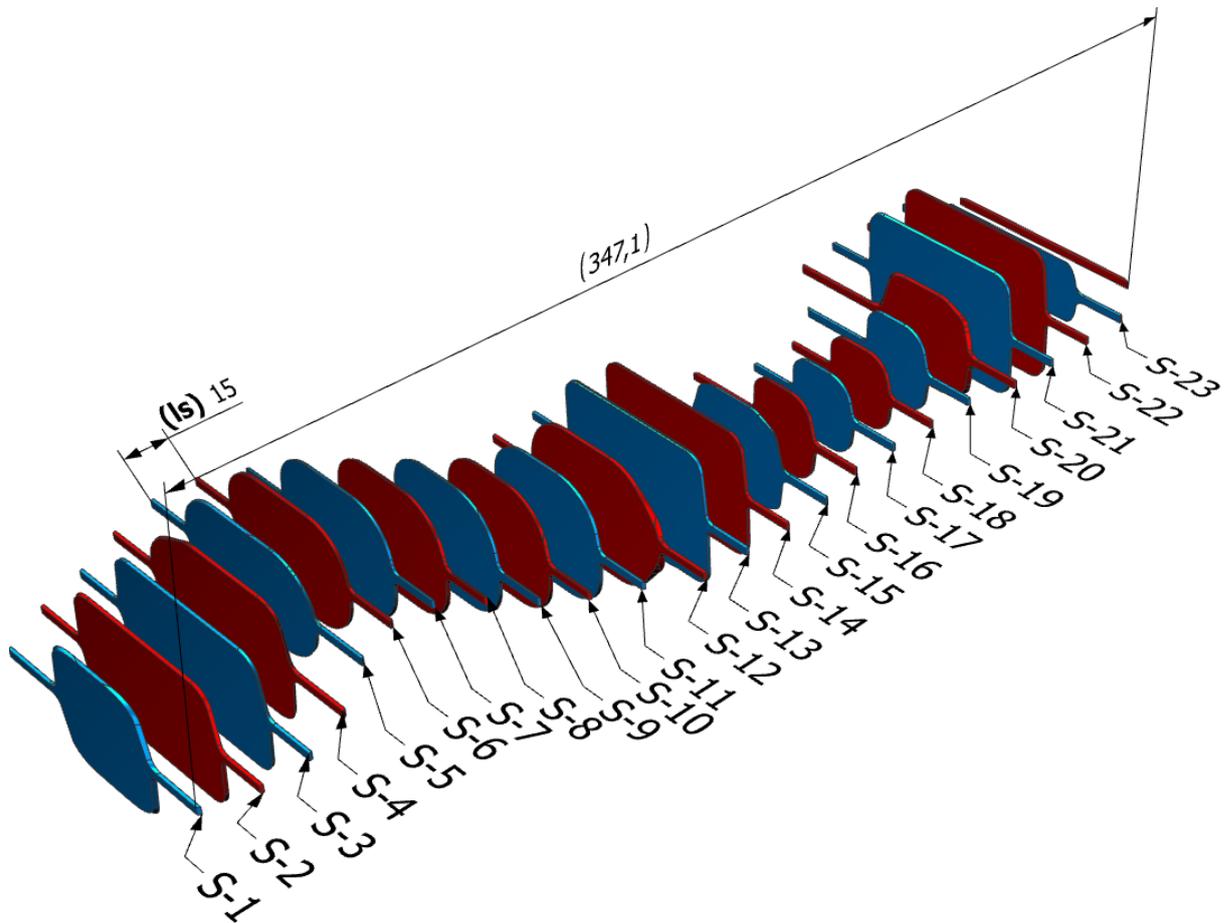


Figura 27 - Demonstrativo das seções encontradas no produto

Na sequência foram distribuídos os valores das áreas transversais nas seções encontradas correlacionadas a uma distância no eixo longitudinal da peça. Então, calculado o valor da área de cada seção a um raio correspondente a uma área de seção circular. A Tabela 3 mostra os valores das áreas encontrados nas seções mostradas na Figura 27 e o valor do raio correspondente calculado para seção circular.

Tabela 3 - Área das secções do produto versus raio da secção circular

Área das secções transversais			
Produto:		Braço	
Secção de corte	Distância (l_s) [mm]	Área da Secção (A_p) [mm ²]	Raio da secção circular (r) [mm]
S0	0	0	0
S1	15	1582	22,4
S2	30	2339	27,3
S3	45	2433	27,8
S4	60	2155	26,2
S5	75	1753	23,6
S6	90	1769	23,7
S7	105	1754	23,6
S8	120	1709	23,3
S9	135	1653	22,9
S10	150	1617	22,7
S11	165	1731	23,5
S12	180	2146	26,1
S13	195	2701	29,3
S14	210	2486	28,1
S15	225	1221	19,7
S16	240	801	16,0
S17	255	737	15,3
S18	270	739	15,3
S19	285	811	16,1
S20	300	1296	20,3
S21	315	2521	28,3
S22	330	2665	29,1
S23	345	945	17,3

Com o valor dos raios (r) encontrados através das secções e a distância entre as secções do braço (l_s), traçou-se o perfil da pré-forma desejada é o que mostra a Figura 28. Não necessariamente a pré-forma traçada será a pré-forma utilizada para o projeto, pois o método das secções não leva em consideração a fabricação do ferramental que será utilizado para a geração da mesma, então a experiência do projetista deve ser considerada.

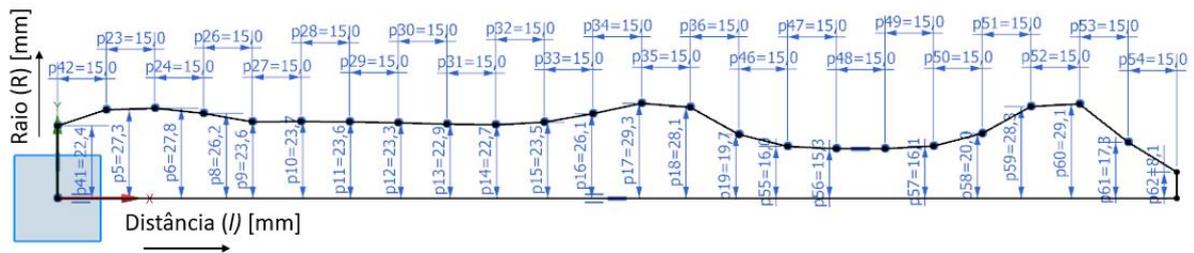


Figura 28 - Perfil gerado pelas seções encontradas

Com a revolução e sem considerar raios de concordância a pré-forma ficaria como ilustra a Figura 29.

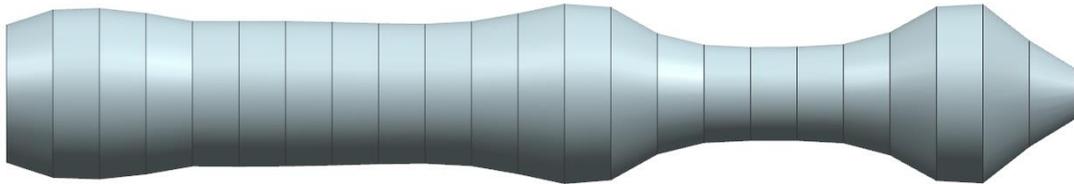


Figura 29 - Pré-forma gerada através das seções

Para facilitar a execução do projeto o projetista utiliza sua experiência para ajustar a pré-forma considerando as seções encontradas, em relação ao diâmetro da matéria prima inicial (d_0) 50,8mm, neste caso, desconsiderando as reduções das extremidades e compilando as variações diametrais ao longo da pré-forma, apenas uma redução é realmente significativa para posterior preenchimento da gravura no forjamento, esta redução é ilustrada na Figura 30.



Figura 30 – Redução significativa da pré-forma

Tendo em mãos o modelamento tridimensional da pré-forma, ainda considerando o peso de 5,550kg utilizado no forjamento sem o processo de laminação, o projetista posiciona a mesma na gravura da forja da ferramenta validando assim o trabalho realizado Figura 31, nesta etapa já é possível identificar que as pontas da pré-forma extrapolam a gravura do produto forjado, pois após a laminação o comprimento total da geratriz fica 382mm, com isto, significa que deve-se diminuir o peso da matéria prima aplicado ao processo de forjamento com a etapa de laminação.

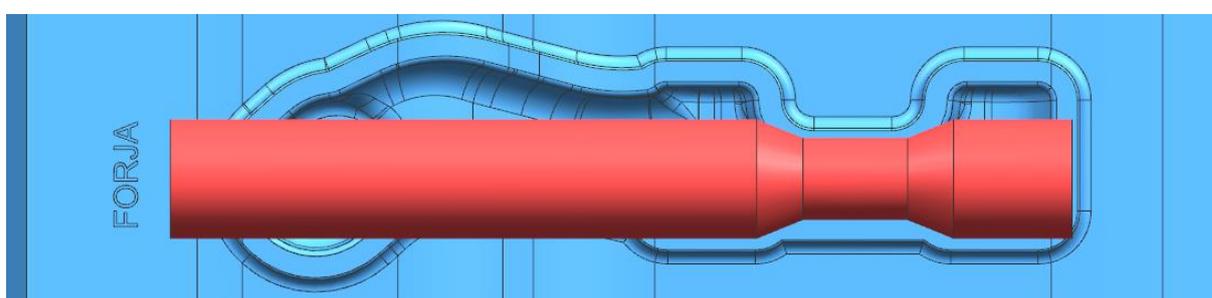


Figura 31 - Pré-forma posicionada na gravura da forja

Para iniciar o projeto do ferramental de laminação inicialmente deve-se considerar qual o tipo de máquina de rolamento que será utilizado, pois estas informações são necessárias para definir o escopo do ferramental. Para este caso a máquina utilizada é um rolo de laminação transversal modelo Smeral ULS 55, segundo manual da máquina algumas dimensões são dadas no item 2.2.2.

A primeira etapa para modelar as ferramentas dos rolos laminadores, é verificar se a redução relativa da área (εa) da pré-forma na secção apresentada na Figura 32 está dentro ou não, do padrão estipulado pelo fabricante da máquina [19].

O cálculo de redução relativa da área (εa) é expresso por:

$$\varepsilon a = \left(\frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} \right) \times 100 = [\%] \quad \text{Eq. (11)}$$

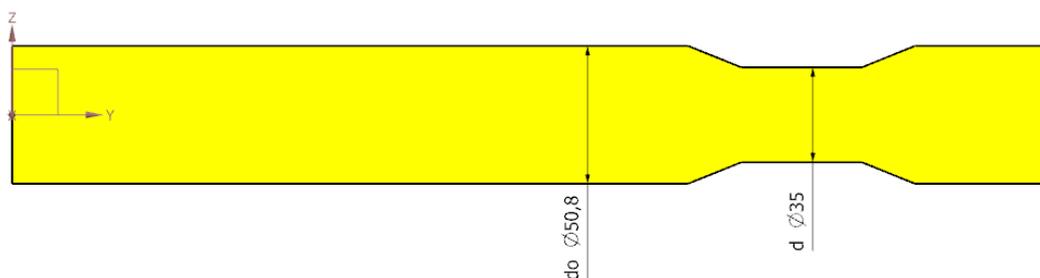


Figura 32 - Redução na secção significativa, e seus respectivos diâmetros

O cálculo da Relação dos diâmetros (δ) e a Redução Relativa da Área (ϵa), parte do diâmetro inicial (d_0) de 50,8mm para o diâmetro (d) de 35mm como mostra a Figura 32.

Então tem-se:

$$\delta = \frac{50,8}{35} = 1,45 \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\epsilon a = \left(\frac{50,80^2 - 35^2}{50,80^2} \right) \times 100 = 52,53\% \quad \text{Eq. (11)}$$

Neste caso o valor de Redução Relativa da Área (ϵa) ficou consideravelmente baixo, tendo em vista o valor de redução relativa estipulado pelo manual do fabricante da máquina 75 a 78%. Portanto não houve necessidade de usar um segundo estágio para o rolamento para redução da secção definida.

A segunda etapa é encontrar as melhores combinações entre os ângulos (α) e (β) para realizar a conformação. Para esta etapa utilizou-se as indicações dadas pelo manual do fabricante somadas a uma serie de experimentos com a variação dos ângulos em relação aos demais cálculos que serão apresentados abaixo. Agregou-se a isso a expertise do projetista do ferramental, visando otimizar o processo de rolamento da pré-forma. Dentre as quais as melhores condições encontradas considerando a Redução Relativa da Área foram: Ângulo de Espalhamento (β) igual a 6,0° e Ângulo de Formação (α) igual a 22°.

Os valores encontrados neste experimento estão conforme especificações empíricas do fabricante evidenciadas na Figura 18, e estão também dentro das especificações de acordo com os cálculos especificados no item 2.2.3 equações 9 e 10.

$$\tan 22^\circ \cdot \tan 6^\circ = 0,0424 \leq 0,08 \quad \text{Eq.(9)}$$

$$\frac{\sqrt{2 \tan 22^\circ \cdot \tan 6^\circ}}{\pi} \times \left(1 + \sqrt{\frac{1}{1,45}}\right) \times (1,45 - 1) = 0,13 \leq 0,2 \quad \text{Eq.(10)}$$

Para dar segmento, deve-se calcular os comprimentos de avanço inicial ($l1$) e comprimento de abertura da redução ($l2$) como ilustra a Figura 33.

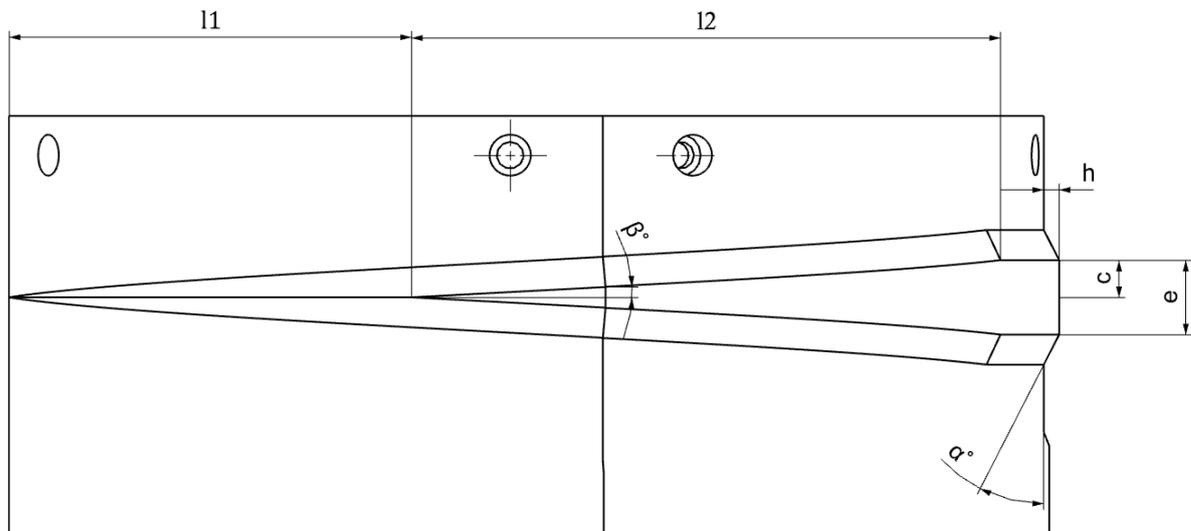


Figura 33 - Simbologia de referência

Para o comprimento de avanço inicial ($l1$) tem-se [19]:

$$l1 = \frac{a}{\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta} \text{ [mm]} \quad \text{Eq. (11)}$$

Para encontrar-se a variável (a) citada na equação 11 [19].

$$a = h + (1,5 \text{ até } 2) \text{ [mm]} \quad \text{Eq. (12)}$$

Para encontrar-se a altura radial da conformação (h) citada na equação 12 [19]

$$h = \frac{d_0 - d}{2} \text{ [mm]} \quad \text{Eq. (13)}$$

Para comprimento da zona de forja ($l2$) tem-se [19]:

$$l2 = \frac{c}{\text{tg} \beta} \text{ [mm]} \quad \text{Eq. (14)}$$

$$c = \frac{e}{2} [\text{mm}] \quad \text{Eq. (15)}$$

Onde (c) é a metade da abertura total da redução significativa (e) abertura da redução significativa “região conformada”, ilustrado na Figura 33

Para a redução significativa ilustrada na Figura 32 com diâmetro inicial (d_0) de 50,8mm para diâmetro final (d) após laminação de 35mm aplicando as equações acima mencionadas tem-se os valores:

$$h = \frac{50,8-35}{2} = 7,9\text{mm} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$a = 7,9 + (1,75) = 9,65\text{mm} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$l1 = \frac{9,65}{\text{tg}22,0^\circ \cdot \text{tg} 6,0^\circ} = 227,25\text{mm} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$l2 = \frac{22,45}{\text{tg} 6,0^\circ} = 213,59\text{mm} \quad \text{Eq. (14)}$$

Após calculado os valores modelou-se os rolos em software da CAD. Os rolos de conformação geralmente são formados por quatro casquilhos que juntos formam 360° para o caso estudado, considerando os comprimentos encontrados nos cálculos anteriores, foi necessário montar apenas dois casquilhos para cobrir a formação da laminação da pré-forma definida Figura 34 .

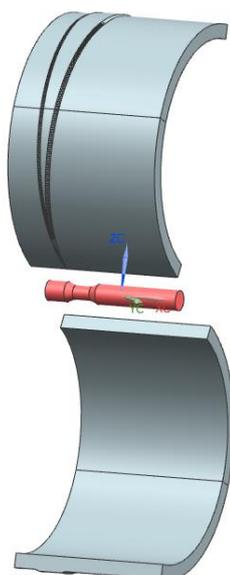


Figura 34 - Casquilhos projetados

3.3 Simulação computacional do processo

Após ter finalizado o projeto das ferramentas do processo convencional com as etapas de Pré-forja e Forja, bem como o projeto das ferramentas do processo proposto com as etapas de Laminação Transversal de Cunha Cruzada e Forja, partiu-se para a realização das simulações numéricas computadorizadas e, utilizou-se para este estudo o Software Q-Form3D.

3.3.1 Simulação computacional do processo convencional de forjamento com etapas de Pré-forja e Forja

Para esta simulação, os parâmetros utilizados foram:

Tabela 4 - Parâmetros de simulação do processo sem laminação

Dados da simulação	Geratriz	Ferramentas
Material	DIN 41Cr4	AISI H13
Densidade (ρ)	7,85kg/cm ² [46]	7,87kg/cm ² [46]
Condutibilidade térmica (λ)	46,6W/m.K [46]	29,1W/m.K [46]
Calor específico (Cp)	486J/kg.K [46]	486J/kg.K [46]
Temperatura no Início do forjamento (T)	1175°C	170°C
Coeficiente de atrito (μ)	0,35	
Força máxima da prensa (F)	16000kN	
Velocidade da prensa (v)	382,5 mm/s	

A Curva de Escoamento para o aço DIN 41Cr4 é apresentada na Figura 35 considerando Velocidade de deformação ($\dot{\varphi}^\circ$) [1/s] e interpolada na temperatura (T) de forjamento 1175°C [46].

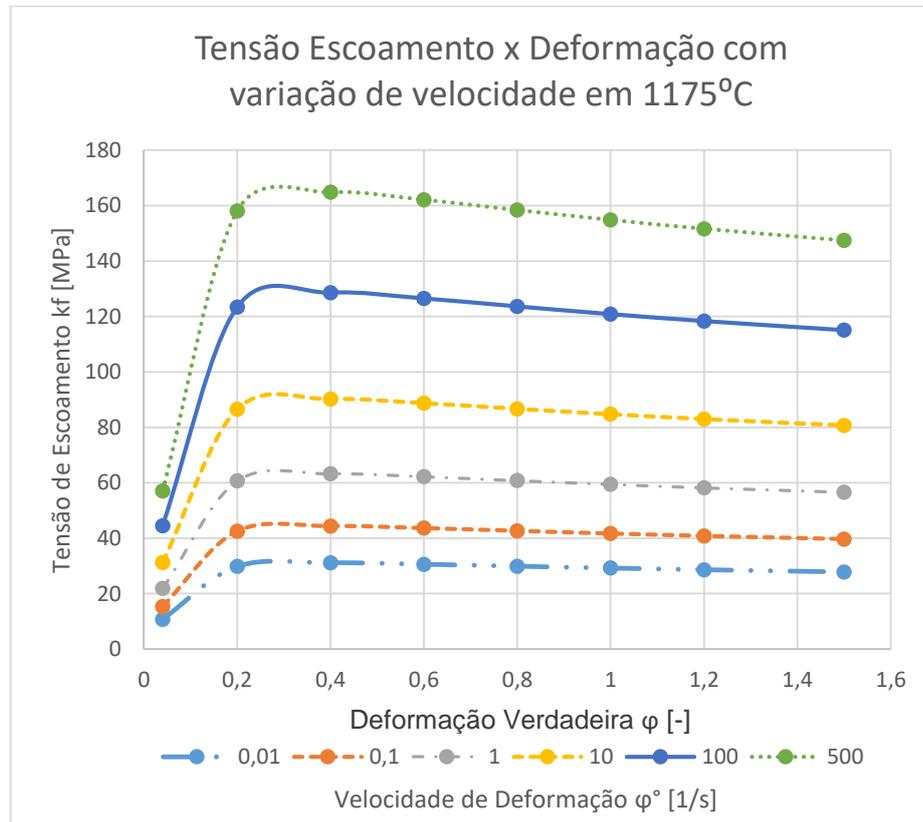


Figura 35 - Tensão de escoamento x deformação verdadeira, variando a velocidade na temperatura de 1175°C [46]

3.3.2 Simulação computacional do processo proposto com etapa de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada

Tabela 5 - Parâmetros de simulação para processo de laminação

Dados da simulação	Geratriz	Ferramentas
Material	DIN 41Cr4	AISI H13
Densidade (ρ)	7,85kg/cm ³ [46]	7,87kg/cm ³ [46]
Condutibilidade térmica (λ)	46,6W/m.K [46]	29,1W/m.K [46]
Calor específico (Cp)	486J/kg.K [46]	486J/kg.K [46]
Temperatura no Início do forjamento (T)	1175°C	100°C
Fator de atrito (m)	1,0	
Velocidade de giro dos rolos (v)	15 rpm	

Observações sobre os parâmetros utilizados na simulação

- Fator de atrito (μ) no rolamento - Elemento de grande importância para a realização da simulação do processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada, sabe-se que na prática o mesmo oscila nas interações entre a peça e o rolo durante o processo. Para simplificar o processo de simulação numérica normalmente assume-se a lei de fricção de Levanov e um valor constante de fator de atrito (μ) durante todo o processo, o fator indicado na literatura normalmente é igual a 1,0 [18], [21], [22], [23] e [47].
- Serrilhas - Muito comumente na simulação numérica computadorizada, bem como na prática, são utilizado serrilhas para que a força de atrito seja superior a força tangencial entre a peça e a ferramenta, fazendo assim com que a peça gire e não escorregue entre os rolos.
- Fator de malha - Para o Processo de Laminação transversal por rolos de cunha cruzada onde se tem pequenas arestas ao longo de grandes comprimentos e detalhes importantes como as serrilhas. A malha gerada para a realização da simulação numérica computadorizada, influencia diretamente os resultados da simulação. Alguns exemplos referentes a esta característica poderão ser vistos no item 4.2 deste trabalho.
- Temperatura - Deve ser observado durante o processo de simulação os impactos causados pela diferença de temperatura entre peça e ferramental, esta troca térmica pode causar impactos sobre o produto ou sobre o ferramental.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Considerações Iniciais

Para a realização da análise experimental foram simulados de maneira computacional ambos os processos de forjamento com suas etapas:

Processo atual de forjamento, onde as etapas são: Corte da matéria prima e aquecimento da geratriz (a), pré-forjamento (b), forjamento final (c) e rebarbação (d) nesta última etapa, separa-se a peça da rebarba Figura 36.

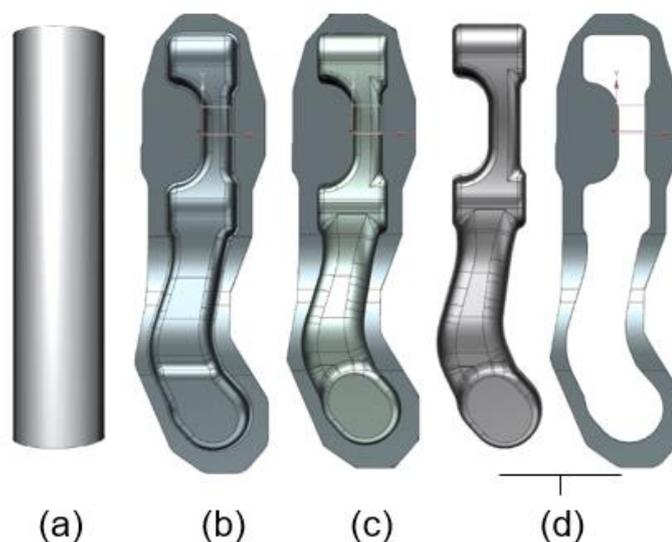


Figura 36 - Geratriz (a), pré-forja (b), forja final (c) e forja + rebarba (d)

O processo proposto de Forjamento com Laminação Transversal substitui a etapa de pré-forja por etapa de pré-forma laminada. Com este processo as etapas são: Corte da matéria prima e aquecimento da geratriz (a), pré-formação por laminação (b), forjamento final (c) e rebarbação (d) nesta última etapa, separa-se a peça da rebarba Figura 37.

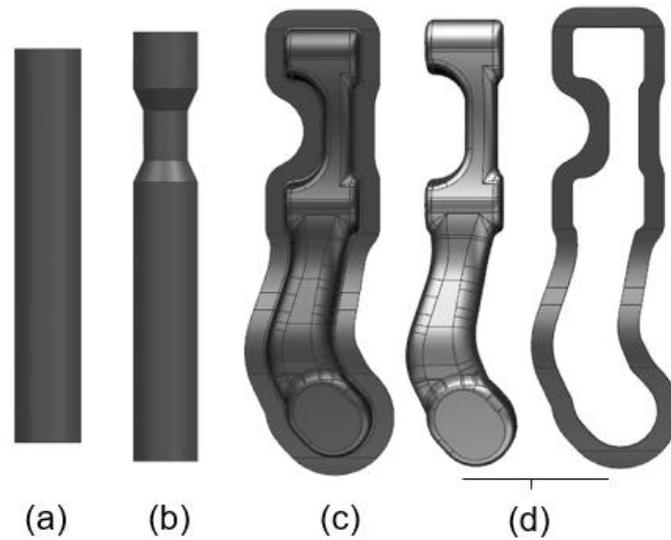


Figura 37 - Geratriz (a), pré-forma laminada (b), forjamento final (c) e forja + rebarba (d)

4.2 Simulação computacional do processo de Forjamento Sem Laminação

Dados de entrada para a simulação computacional do processo atual de forjamento sem laminação, conforme Tabela 4 do item 3.3

Foram simulados as etapas de pré-forjamento e forjamento final etapas “b” e “c” representadas na Figura 36. Estas etapas, pré-forjamento e forjamento são realizadas em duas batidas da prensa, porém, em uma única ferramenta ilustrada na Figura 38 com duas gravuras, pré-forja e forja final .

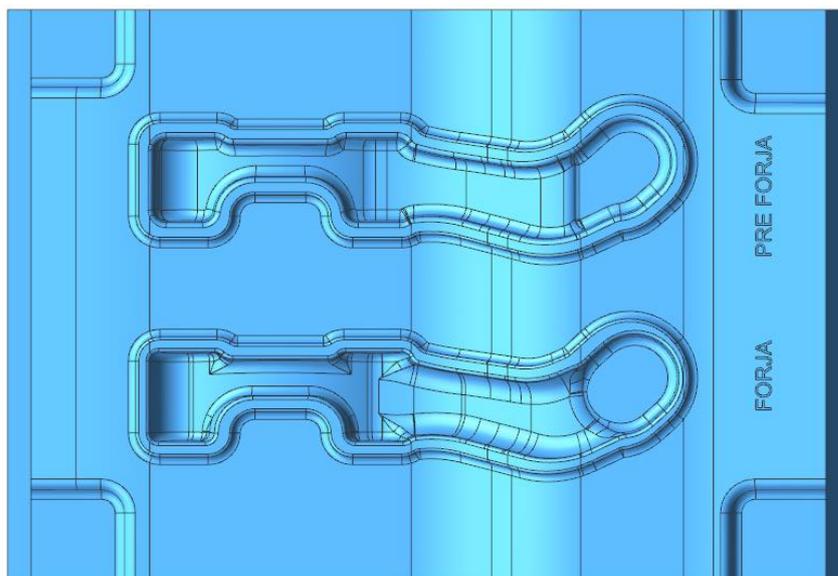


Figura 38 - Ferramenta Inferior de pré-forja e Forja final itens (b) e (c) da Figura 36

Na etapa de pré-forjamento “b” da Figura 36, a geratriz é posicionada sobre a gravura da pré-forja e submetida a compressão gerada pela prensa. A Figura 39(a) ilustra a posição inicial da geratriz e a Figura 39(b) mostra a resultante do processo realizado.

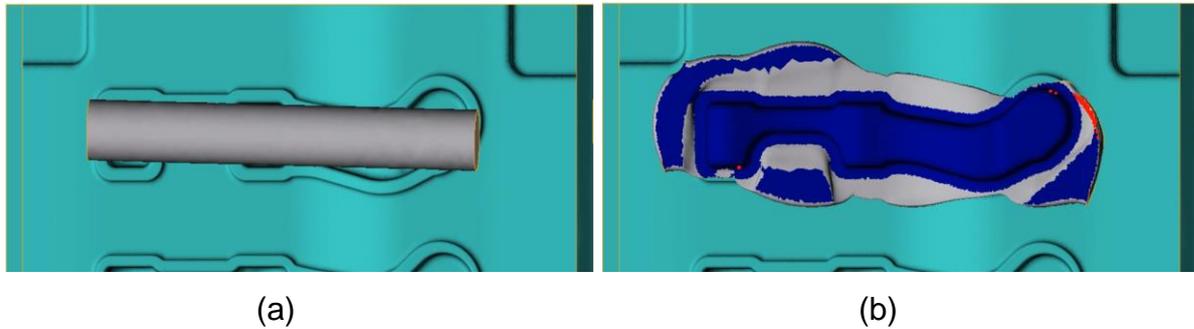


Figura 39 - Início (a) e fim (b) da etapa de pré-forja

A Figura 40 mostra a relação entre o tempo e a força aplicada, extraído do software Q-form3D, exibindo a força máxima atingida pela prensa na etapa de pré-forjamento. O valor encontrado é de 9770 kN.

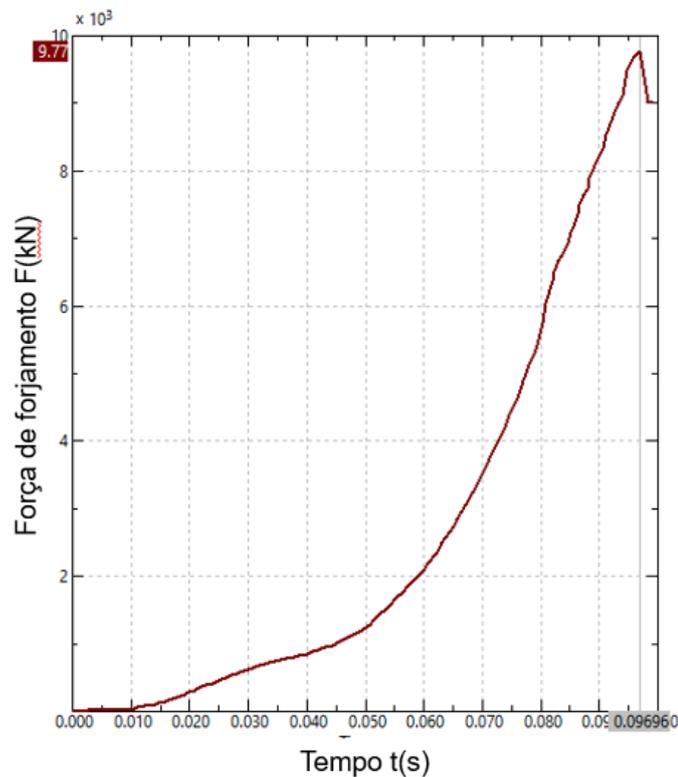


Figura 40 - Força máxima na etapa “b” de pré-forjamento da Figura 36.

Após a etapa de pré-forjamento, posiciona-se a pré-forja resultante na gravura da forja como mostra a Figura 41 (a) e submete-se novamente a compressão gerada pela prensa, obtém-se então, a forja final Figura 41 (b).

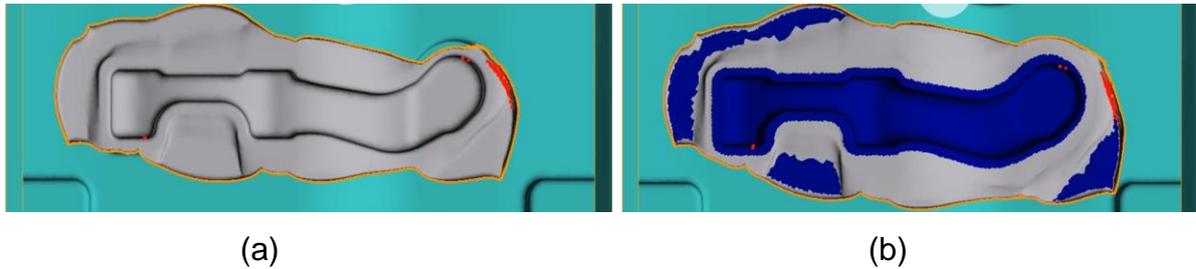


Figura 41 - Início (a) e fim (b) do forjamento final

A Figura 42 mostra a relação entre o tempo e a força aplicada, extraído do software Q-form3D, para etapa de forjamento final exibindo o valor máximo atingido pela prensa que é de 11820 kN.

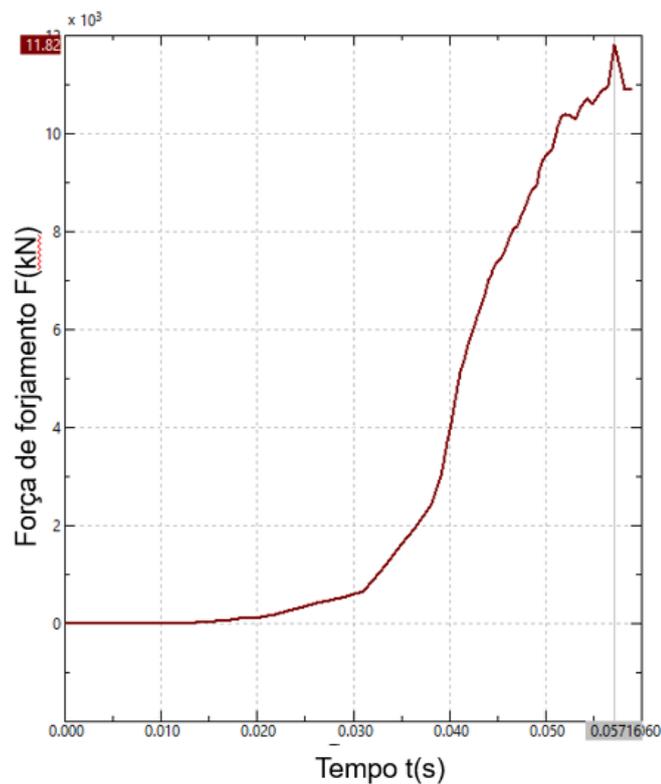


Figura 42 - Força máxima na etapa “c” forjamento final da Figura 36

Para a realização de um comparativo com as simulações realizadas, foram extraídos do processo físico de forjamento valores de força aplicada pela prensa. A Tabela 6 mostra o valor da força exercida pela prensa, nas etapas de pré-forja e forjamento final, durante a fabricação de 15 peças produzidas no processo físico atual. Estes valores foram coletados da através da célula de carga embarcada na prensa de forjamento. Esta célula de carga possui um conjunto de extensômetros que estão fixados nas colunas da prensa de forjamento e medem a deformação das mesmas durante o golpe de forjamento e convertem esta deformação em força exercida.

Tabela 6 - Dados de força, coletados durante as etapas de pré-forja e forjamento final

Peça	Pré Forjamento	Forjamento Final
	(kN)	(kN)
1	10117	12102
2	10302	12283
3	10123	12120
4	10106	12300
5	10208	12312
6	10170	12214
7	10108	12290
8	10117	12400
9	10103	12320
10	10123	12302
11	10213	12280
12	10107	12123
13	10132	12200
14	10306	11998
15	10207	12320
Mínimo	10103	11998
Média	10162,8	12237,6
Máximo	10306	12400

4.3 Simulação computacional do processo de forjamento, substituindo etapa de pré-forja por etapa de pré-forma laminada.

A Figura 43 mostra o comparativo entre as etapas do processo atualmente utilizado no forjamento do braço de ligação, com as etapas do processo de forjamento proposto, onde será substituída a etapa de pré-forjamento, por etapa de pré-formação laminada para que seja possível reduzir a quantidade de matéria prima aplicada ao produto forjado.

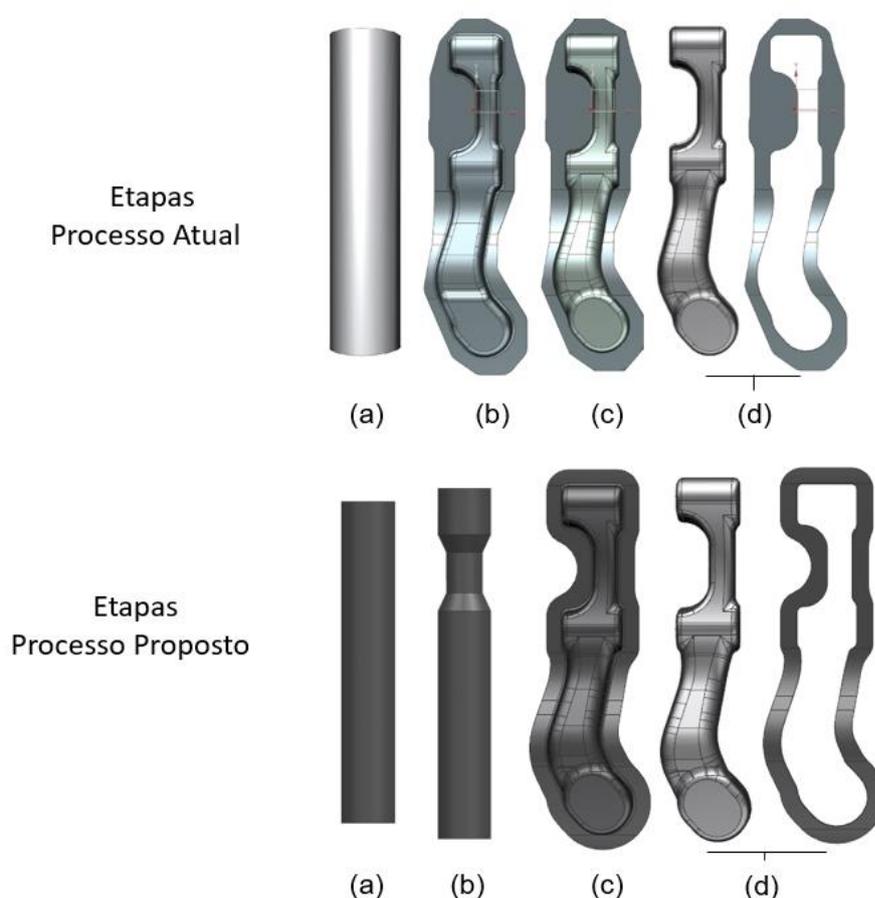


Figura 43 - Comparativo das etapas, Processo atual x Processo proposto

4.3.1 Geração da malha para simulação computacional do rolamento cruzado

Após a realização de algumas simulações do processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada, observou-se a necessidade de refinar a malha utilizada no modelamento das ferramentas de rolamento. A Figura 44(a) mostra o modelo matemático gerado pelo software de simulação numérica. Já a Figura 44(b)

mostra como fica a distribuição da malha no mesmo modelo. Para este caso a distribuição ficou da seguinte maneira.

- Número de nós na superfície = 25702
- Número de elementos na superfície = 12850

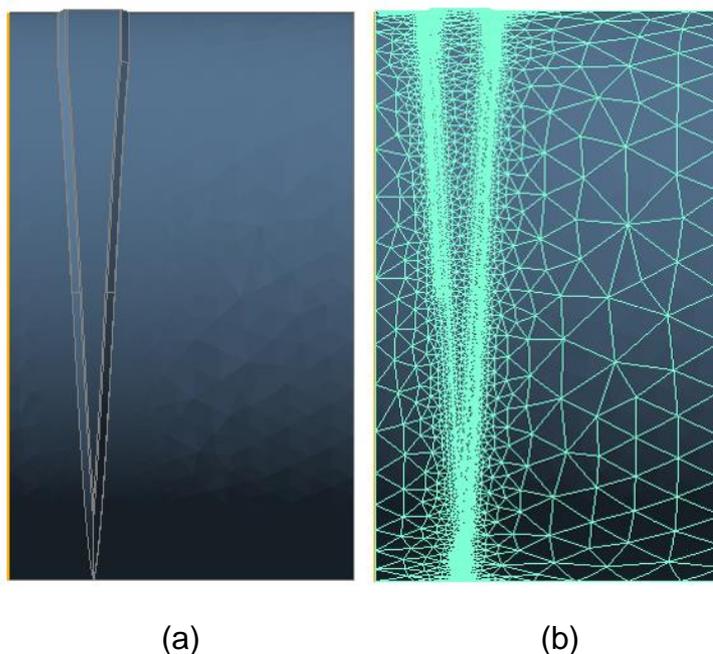


Figura 44 - Geometria do rolo sem refino de malha

A Figura 45(a) mostra a imagem gerada pelo software após um refino de malha. Já a Figura 45(b) mostra a distribuição da malha no modelamento do rolo de laminação, este ajuste também se fez necessário porque as simulações computacionais não apresentavam resultados satisfatórios, e em alguns casos, apresentavam erros à medida que avançavam em determinados pontos do rolo de laminação. Por outro lado, este refino da malha gerou uma necessidade maior de processamento durante a simulação, aumentando significativamente o tempo para obtenção de resultados. Para o caso da malha refinada a distribuição ficou:

- Número de nós na superfície = 49774
- Número de elementos na superfície = 24886

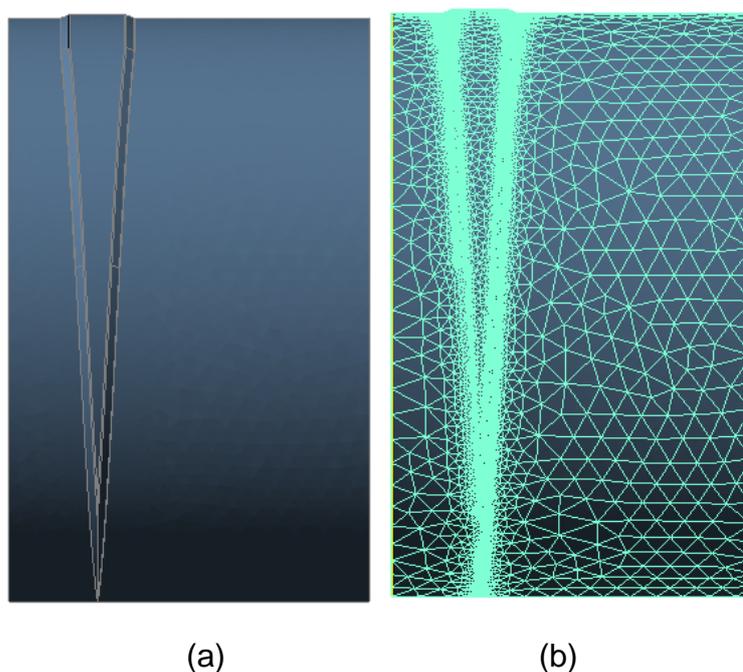


Figura 45 - Geometria do rolo com refino de malha

4.3.2 Simulação computacional de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzado

Dados de entrada para simulação computacional do processo proposto com a etapa de laminação transversal conforme Tabela 5 do item 3.3.

Considerando os dados fornecidos foi realizado a simulação numérica computacional do processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada, porém a mesma não apresentou resultados satisfatórios a geratriz não percorreu todo o perímetro do rolo. As forças de atrito não foram suficientes para vencer as forças tangencias de deformação gerando amassamento ao invés de rolamento da geratriz Figura 46. Para esta simulação foi utilizada a lei de fricção conforme Levanov considerando o fator de atrito constante (m) igual a 1,0 [18], [21], [22], [23] e [47].

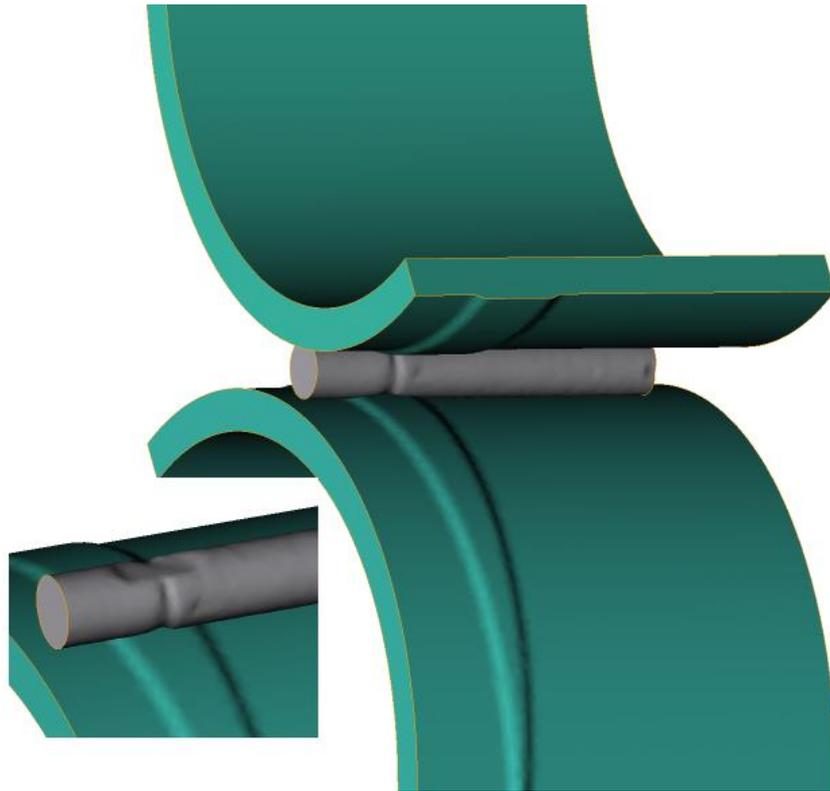


Figura 46 – Geratriz com amassamento

A Figura 47 apresenta o gráfico extraído do software de simulação numérica Q-Form e nos mostra o volume de material conformado pela tensão efetiva na conformação, o mesmo apresenta também a mínima tensão 3,57MPa a máxima tensão 108,49MPa e a tensão média 11,48MPa ocorrida na peça.

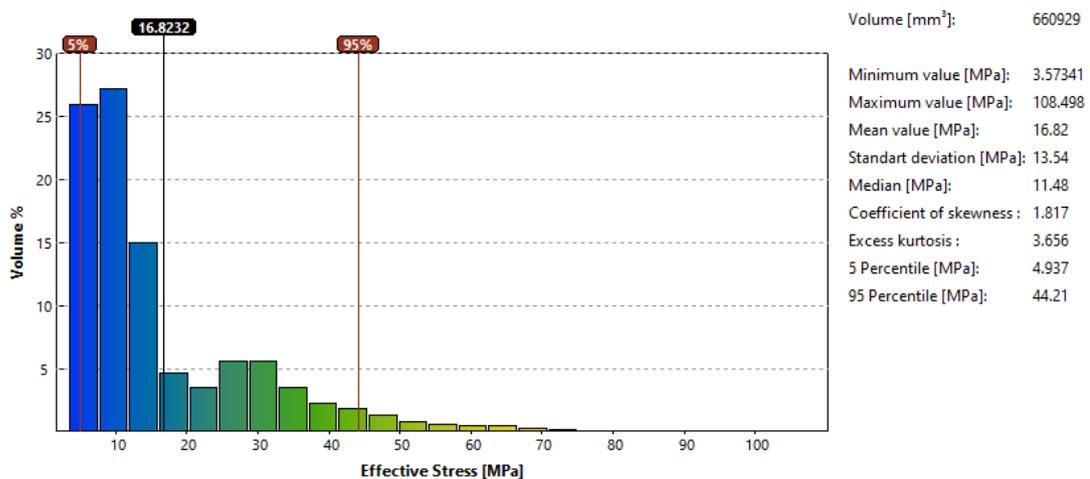


Figura 47 - Gráfico de volume de material por tensão efetiva sem serrilhas

Na expectativa de melhorar a condição de rolamento, experimentos foram realizados alterando ângulos de espalhamento β entre 5° a 10° e formação α entre 20° a 30° , Figura 48 respeitando os valores estipulados pelo fabricante da máquina [19]. Porém, após realizado diversas simulações, não se obteve resultados satisfatórios.

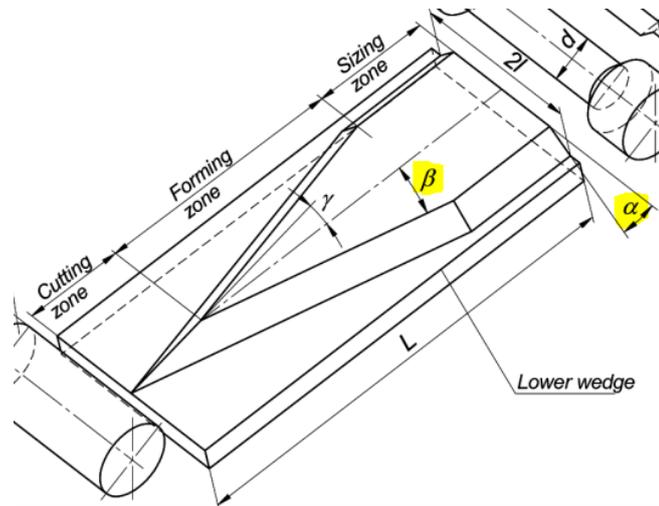


Figura 48 - Ângulos de espalhamento β e ângulo de formação α [48]

4.3.3 Testes de simulação computacional com fator de atrito somado a serrilhas

Analisando as condições expostas acima à respeito do fator de atrito comparando estes resultados aos resultados expostos na literatura optou-se por realizar as simulações utilizando a inserção de serrilhas ao longo das pistas de rolagem externas dos rolos como mostra a Figura 49. As serrilhas são pequenos sulcos que na prática geralmente são feitas por ferramenteiros utilizando ferramentas rotativas manuais, e servem para aumentar a aderência entre o rolo e a geratriz durante o processo de rolamento.

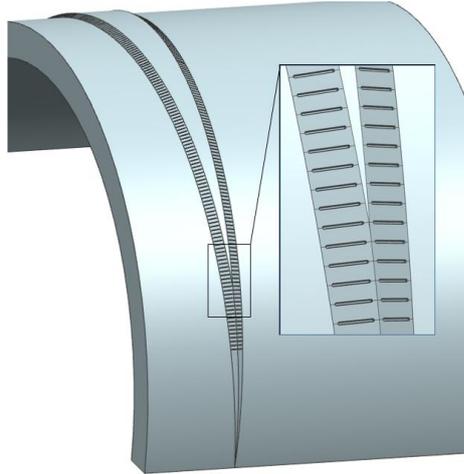


Figura 49 - Pistas com serrilhas

Com as condições mencionadas obteve-se resultados satisfatórios da simulação numérica. A geratriz obteve o rolamento esperado realizando assim, a redução na região que futuramente ficara entre os munhões da peça final forjada Figura 50.

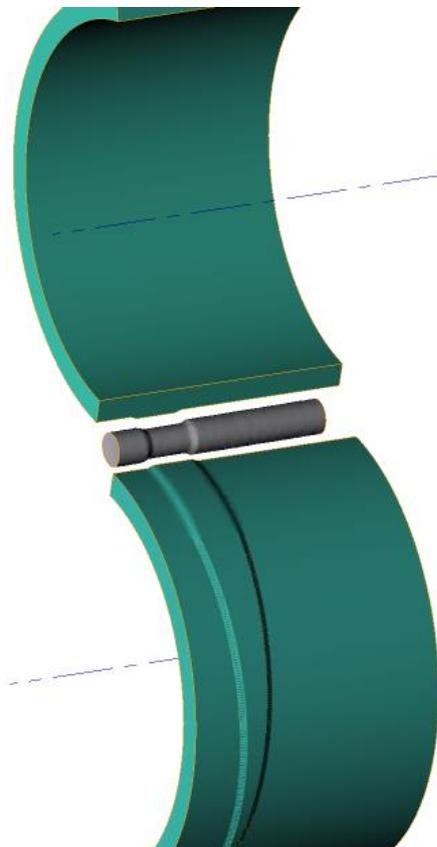


Figura 50 - Laminação Atrito + Serrilhas

A Figura 51 apresenta o gráfico extraído do software de simulação numérica Q-Form e nos mostra o volume de material conformado pela tensão efetiva na conformação, o mesmo apresenta também a mínima tensão 16,44MPa, a máxima tensão 184,70MPa e a tensão média 47,32MPa ocorrida na peça. Números relativamente maiores que os encontrados no mesmo gráfico com o processo sem serrilhas.

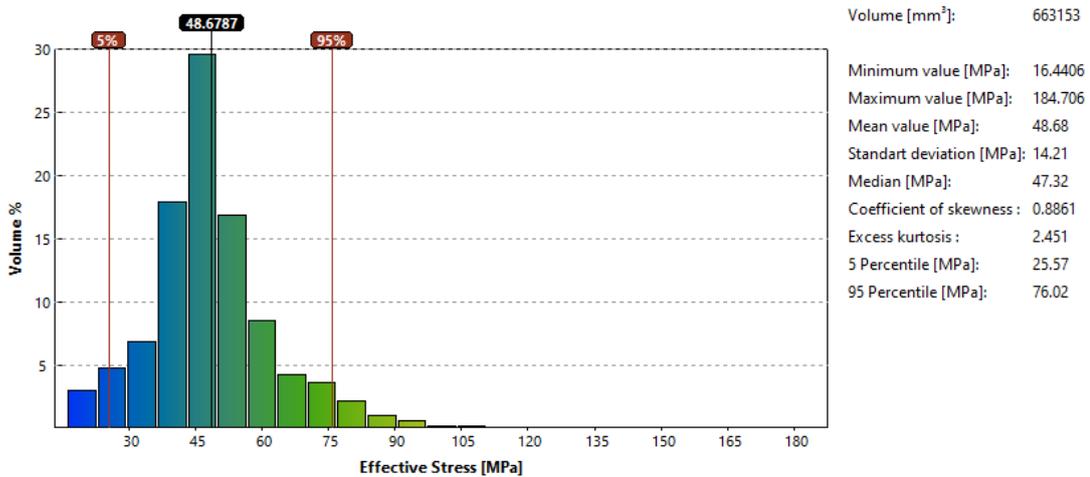


Figura 51 - Gráfico de volume de material por tensão efetiva com serrilhas

4.3.4 Análise da temperatura na simulação numérica

A diferença de temperatura na peça mostrada na Figura 52, máxima 1167°C e mínima 966°C evidencia que há troca térmica entre peça e ferramental durante a etapa de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada, porém, não se obteve dados significativos que esta troca representasse impactos para o processo durante o desenvolvimento em âmbito de simulação numérica computacional.

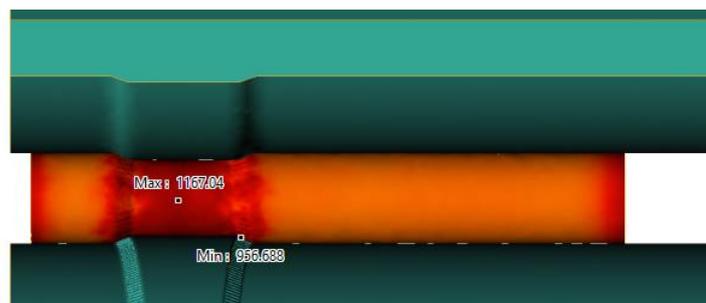
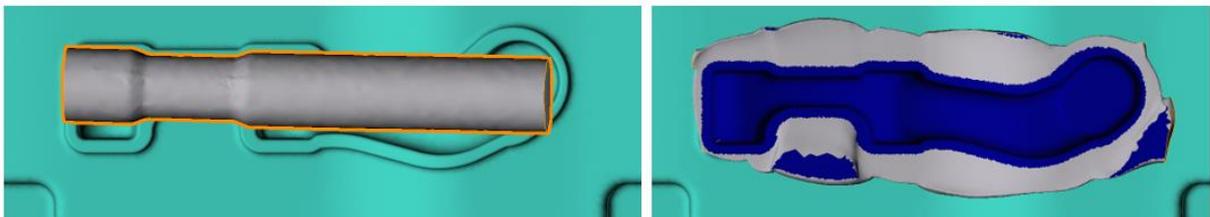


Figura 52 - Diferença de temperatura durante a laminação

4.3.5 Redução da matéria prima

Com a realização dos cálculos pelo método das secções, e após algumas simulações, pode-se reduzir o peso da matéria prima aplicada ao forjamento em 10% comparado ao processo atual produzido. A Figura 53(a) mostra a pré-forma laminada posicionada diretamente na gravura da forja, já a Figura 53(b) mostra a resultante da simulação do forjamento. A Figura 54 mostra a relação entre o tempo e a força aplicada, extraído do software Q-form3D para a etapa de forjamento destacando a força máxima encontrada de 11980kN.



(a)

(b)

Figura 53 - Pré forma com redução de matéria prima

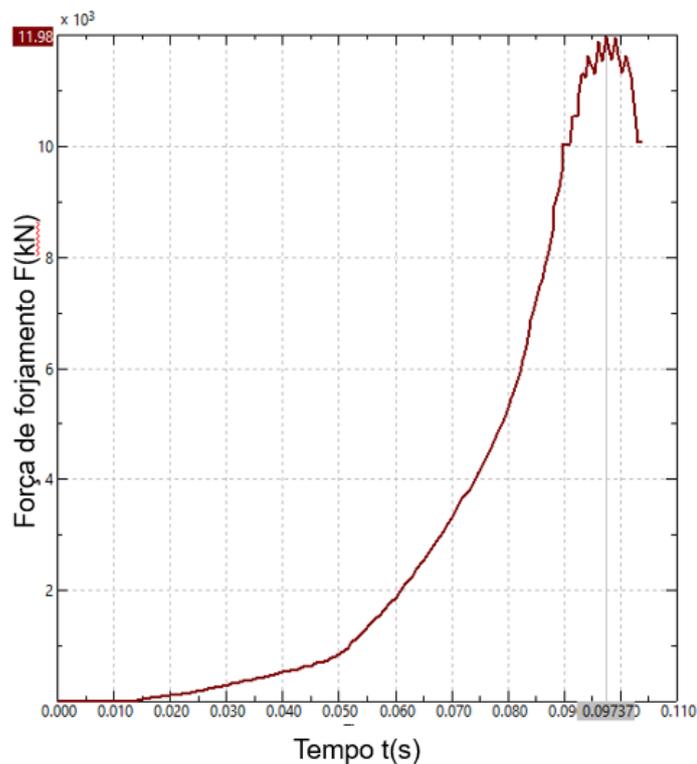


Figura 54 - Força máxima aplicada ao forjamento pós laminado

4.4 Realização de testes práticos de laminação por rolos de cunha cruzado

Para que se pudesse verificar e validar as condições realizadas na simulação computacional, realizou-se alguns testes físicos de laminação por rolos de cunha cruzada.

4.4.1 Teste de rolamento sem aplicação de serrilhas

No teste inicial sem aplicação de serrilhas, o processo teve seu comportamento semelhante ao o processo computacional simulado considerando o fator de atrito (μ) igual a 1. A geratriz deslizou antes mesmo de chegar a conformar, a mesma saiu por entre os rolos o que acabou danificando uma das placas guias da máquina Figura 55.



Figura 55 - Placas guias da geratriz

4.4.2 Teste de rolamento com aplicação de serrilhas

Tendo em vista o teste realizado anteriormente ficou evidenciado que a simulação apresentava resultados confiáveis sobre o processo, então empregou-se

nas ferramentas as serrilhas Figura 56 conforme descrito no item 2.2.3 deste trabalho, e foram realizados novos de testes de laminação.



Figura 56 – Serrilhas na superfície do Rolo Laminador

O processo de rolamento ocorreu de maneira satisfatória, sem deslizamento ou atravessamento da geratriz por entre os rolos de laminação. Porém, o impacto das serrilhas na pré-forma laminada gerada foi de péssimo acabamento superficial Figura 57 sendo que este mal acabamento, gerou impactos negativos como dobras além de um aspecto visual ruim após o forjamento final do produto Figura 58.



Figura 57 - Marcas das serrilhas na pré-forma laminada



Figura 58 - Marcas das serrilhas no produto forjado

Foram necessários alguns ajustes no ferramental de laminação para que se pudesse reduzir os impactos das serrilhas, entre estes ajustes foi diminuído a profundidade dos sulcos das serrilhas próximas a região de calibração e retirado de maneira total as serrilhas na região de calibração dos rolos, sem que comprometesse o processo de laminação transversal por rolos de cunha cruzada. Após muitas intervenções do setor de ferramentaria, se conseguiu produzir resultados aceitáveis de processo e acabamento superficial Figura 59 e Figura 60.



Figura 59 - Acabamento da pré-forma laminada



Figura 60 - Acabamento no produto

4.4.3 Análise da temperatura nos testes físicos

Devido a produção de um lote muito pequeno de peças para teste, não foi possível perceber algum tipo de influência da troca térmica que ocorre entre peça e ferramenta durante o processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada. É possível que em lotes produtivos de maior escala este fator pode impactar de alguma maneira tanto o produto, mas principalmente o ferramental. Pois é sabido que a troca térmica intermitente, associada a grandes esforços mecânicos de compressão contribuem para menor vida útil de ferramentais de conformação.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Simulação versus processo físico de forjamento atual

Diante das simulações realizadas, é notório que quanto mais assertivos e detalhados forem os dados de entrada para a simulação, melhores e mais fidedignos à realidade serão os resultados obtidos por ela.

Quando analisado os resultados obtidos pela simulação numérica computacional das etapas de pré-forja e forjamento final, em comparação à média das forças obtidas pela célula de carga embarcada a prensa de forjamento no processo físico pode-se dizer que os resultados simulados são confiáveis. É o que nos mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Força simulado X Força forjamento físico

	Pré-forja	Forjamento final
Simulação Computacional	9770 kN	11820 kN
Processo Físico (média)	10162,8 kN	12237,6 kN
Diferença - Percentual	4%	3,5%

As diferenças encontradas nos valores simulados e os valores médios da prática, podem ser atribuídas a questões específicas como, desgaste das gravuras, alterações no fator de atrito que está relacionado com a aplicação do lubrificante, e ou variações no aquecimento da geratriz e das ferramentas e até mesmo no posicionamento inicial da geratriz na gravura que é realizado manualmente pelo operador. Estas condições não são variáveis no âmbito da simulação numérica. A lubrificação dos ferramentais e a alimentação do geratriz na gravura de forja realizadas de maneira automática podem contribuir para aumentar ainda mais assertividade em processos de simulação.

5.2 Simulação processo de forjamento, substituindo pré-forja por pré-forma por laminação

5.2.1 Redução de malha para simulação

Ao executar as primeiras simulações numéricas computacionais da etapa de Laminação Transversal Cruzada percebeu-se que diferente da simulação das etapas de pré-forjamento e forjamento final, os modelos matemáticos gerados pelo software de simulação apresentavam distorções geométricas. Após algumas análises e estudos realizados, percebeu-se o impacto do refino de malha utilizado para este ferramental em específico. Na pesquisa bibliográfica realizada para este estudo não se encontrou relatos específicos sobre o fator de malha e seus impactos utilizados nas simulações de Laminação Transversal Cruzada. Mas foi necessário reduzir a malha gerada no ambiente de simulação numérica computacional para que se obtivesse resultados conclusivos.

5.2.2 Influências do fator de atrito

O fator de atrito durante o rolamento no processo de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada é influenciado por um grande número de variáveis, tais como pressão de contato, temperatura da ferramenta e da geratriz, velocidade dos rolos, entre outros. Portanto na simulação numérica computadorizada assumiu-se o valor constante conforme sugerido em na literatura. Contudo, ao compararmos, os testes físicos em relação a simulação numérica computadorizada, se obteve resultados semelhantes, pois, tanto no processo de simulação numérica computadorizada, quanto no processo físico de Laminação Transversal por Rolos de Cunha Cruzada, foi necessário utilizar a aplicação de serrilhas na ferramenta, para que fosse possível finalizar o rolamento sem apresentar defeitos de amassamento na geratriz.

5.2.3 Redução de matéria prima

Dentro dos objetivos deste trabalho, o principal deles é reduzir a matéria prima utilizada no forjamento do braço de ligação, pois reduz custos de fabricação tornando o processo mais competitivo. A Tabela 8 mostra o dimensional da geratriz utilizada no processo de forjamento atual (sem laminação), em comparação ao processo de forjamento proposto com a substituição da etapa de pré-forja por etapa de pré-forma por Laminação Transversal Cruzada.

Tabela 8 - Comparativo entre processos

Processo	Geratriz			Produto		
	Diâmetro (d_0) (mm)	Comprimento (l_0) (mm)	Massa (M) (kg)	Massa (M) (kg)	Aproveit. metálico (A_m) (%)	Rebarba (f) (%)
Atual (sem Laminação)	50,8mm	349,7mm	5,55kg	4,13	74,41%	25,59%
Com Laminação	50,8mm	315,2mm	5,00kg	4,13	82,60%	17,40%

Quando observado o resultado da simulação do processo atual de forjamento, nota-se que há um excesso de rebarba na operação de forjamento final Figura 61, a rebarba é desigual, há excesso de material nas regiões 1, 2 e 4, já na região 3 o material pode ser considerado ideal. Evidencia-se também alguns pontos destacados na bossa e no munhão da peça, estes pontos caracterizam regiões com grande probabilidade para o surgimento de dobras que podem ser causadas por diversos fatores, entre eles estão a não homogeneização da temperatura da geratriz durante o aquecimento, o posicionamento da geratriz na operação de pré-forja, velocidade de escoamento do material no preenchimento da cavidade, encontro de duas frentes do material dentro da cavidade, entre outros.

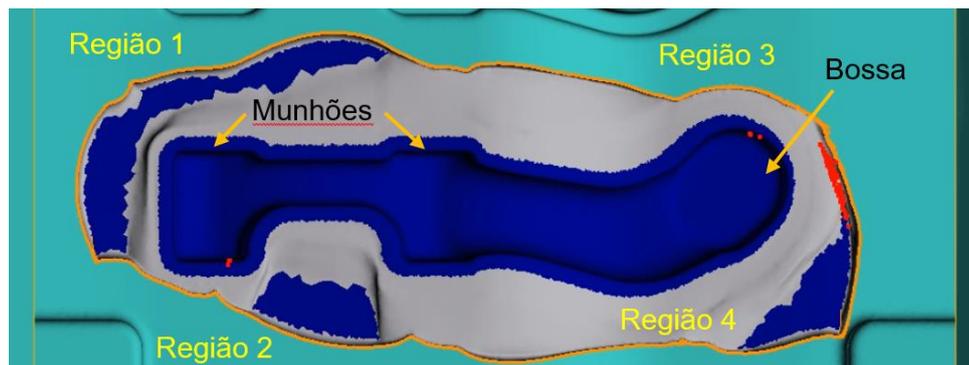


Figura 61 - Forja final processo atual

Já no processo de forjamento após a laminação transversal nota-se que a rebarba se comporta de maneira mais homogênea Figura 62, a região 1 não apresenta uma região com grande amassamento de material, a região 2 apresenta menor quantidade material acumulado, as regiões 3 e 4 tem redução menos significativa. Esta resultante deve-se a uma melhor distribuição das secções gerado pelo processo de pré-forma por laminação, evitando desperdício de material em secções menores da peça, bem como possibilitando melhor posicionamento da geratriz dentro da gravura da forja final, sendo assim pode-se evitar também prováveis dobras, de maneira a garantir maior qualidade a peça que se está produzindo.

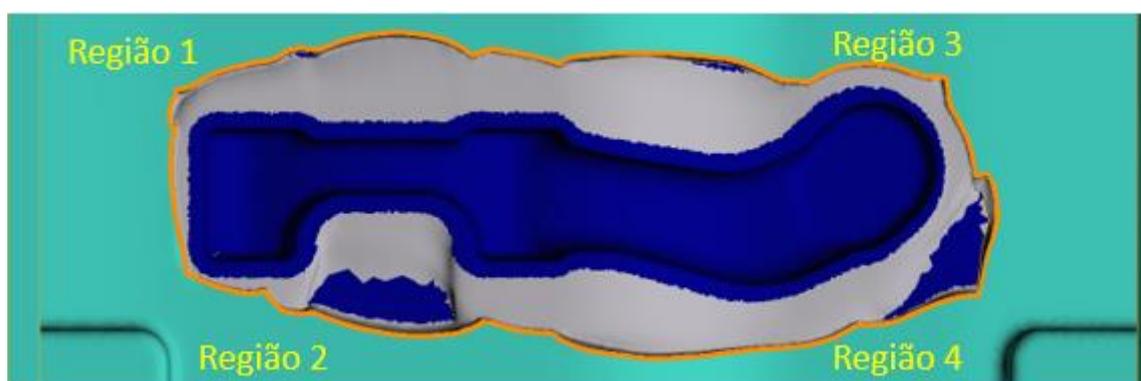


Figura 62 – Forja final com processo de laminação

Quando comparado as forças da etapa de forjamento final em ambos os processos, com pré-forja e com pré-forma por laminação cruzada pode-se perceber um pequeno acréscimo que varia de 2% a 5% na força da operação de forjamento final com a laminação cruzada, fato que se torna compreensível tendo em vista que

se eliminou do novo processo a operação de pré-forja, realizando-se assim toda a conformação em uma única batida da prensa de forjamento.

5.3 Testes práticos da laminação transversal

Com os testes realizados de forma física pode-se evidenciar e comprovar alguns aspectos que a simulação numérica computacional nos mostrava. Tais como baixo fator de atrito gera escorregamento da geratriz e a aplicação de serrilhas melhoram a condição de atrito entre a ferramenta e a peça. Porém há detalhes que a simulação não consegue nos mostrar como o caso das marcas das serrilhas deixada na peça. A literatura consultada não especifica exatamente em que regiões do rolo de laminação deve-se aplicar ou não as serrilhas. Na pratica pode-se observar que não é aconselhável ter serrilhas em todo o decorrer do rolo de laminação, a região de calibração da ferramenta não deve possuir serrilhas, pois, esta região final da ferramenta afeta diretamente o acabamento deixado na peça, e não afeta o processo de rolamento, portanto, deve ser isento de serrilhas.

6 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho demonstra a importância do processo de simulação numérica integrado ao sistema CAD no ambiente de engenharia de forjamento. O conhecimento prático das etapas do processo de forjamento acoplado ao poder atual dos softwares de simulação computacional numérica podem render excelentes resultados para tomada de decisões estratégicas de uma fábrica.

O estudo dos métodos das secções projetadas para definição do projeto de pré-forma laminada assegura a melhor distribuição do material dentro da gravura de forjamento final melhorando e facilitando o preenchimento da cavidade.

A análise do processo atual que consiste em pré-forja e forjamento final (sem laminação) em comparação ao processo proposto que consiste em pré-forma com laminação transversal e forjamento final no âmbito de simulação numérica computadorizada, apresentou uma redução significativa na matéria prima aplicada no forjamento do braço de ligação de 0,550 quilogramas por peça. Isso equivale a 11% do peso atual utilizado. Os testes práticos evidenciaram que tal alteração das etapas do processo de forjamento foram eficazes na redução da matéria prima aplicada ao forjamento do Braço de Ligação.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar o desgaste gerado na gravura final de forjamento tendo em vista a geometria da pré-forma ter menor adaptação a gravura final de forja quando comparada a geometria da pré-forja.

Analisar a viabilidade financeira do investimento do ferramental para laminação em relação ao ganho da matéria prima no produto forjado.

Estudar a possibilidade de utilizar um único ferramental de laminação para produção de diversos braços de ligação, que possuem geometrias semelhantes. Visando o rateio do investimento do ferramental de laminação.

Aumentar a redução dos diâmetros da geratriz laminada, buscando a máxima redução de material permissível para forjamento do braço em âmbito virtual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – MORENO, M. **Desenvolvimento e implementação de metodologia de otimização da geometria do blank em processos de conformação de chapas metálicas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2000.
- [2] – ALTAN, T.; SOO-IK OH; HAROLD, G.L. **Conformação de metais**. Fundamentos e aplicações. Tradução de Reginaldo Teixeira Coelho. EESC/USP, 1999.
- [3] – THOMAS, A. **Projeto de matrizes**. Tradução de “Forging Handbook – Die design” por Luis Paulo R. Segalla e Ronald L. Plaut. ABM São Paulo-SP, 1986
- [4] – SITARAMAN, K; KINZEL, L; ALTAN, T. **A knowledge based system for process-sequence design in axisymmetric sheet-metal forming**. Journal of Materials Processing Technology, v. 25, n. 3, p. 247- 271, 1991.
- [5] – BRITES, F. **Desenvolvimento integrado de produto para forjamento**. Dissertação de Mestrado. PROMEC - UFRGS, 2009.
- [6] – SATISH, G. D.; SINGH, N. K.; OHDAR, R. K. **Preform optimization of pad section of front axle beam using**. Journal of Materials Processing Technology, v. 203, n. 1-3, p. 102-106, 2008.
- [7] – NARANJE, V; KUMAR, S. **A knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts**. Expert Systems with Applications, v. 41, n. 4, p. 1419-1431, 2014.
- [8] - SCHAEFFER L. **Possibilidades para aumentar produtividade**. Apostila de Treinamento em Forjamento. UFRGS, Rio Grande do Sul, 2013
- [9] – BORDER, C. **Análise no coeficiente de atrito no ensaio de anel para forjamento a quente**. Tese de Doutorado Universidade. Escola Politécnica - São Paulo. 2006.
- [10] – SCHAEFFER, L. **Forjamento: Introdução ao processo**. Editora Imprensa Livre, 2006.
- [11] – FOURMENT, L.; BALAN, T.; CHENOT, J. L. **Manufacturing Systems Processes**. Editora Cornelius Leondes, Vol. VI, 2001.
- [12] – BRITO, A.M.G. et al. **Processo de obtenção de pré-formas na produção de forjados em matriz**. Revista Ferramental, jan.-fev., p. 15-21, 2009.
- [13]–LASCO UMFORMTECHNIK. 2012. Disponível em: <https://www.lasco.de/umformtechnik/media/archive2/technische_informationen/Que_rkeilundReckwalzen_2012_E.pdf>. Acesso em 22 jul. 2019
- [14] – PACHECO, J. L.; BESKOW A. B. **Processo de Conformação**. Apostila Universidade Federal do Rio grande do Sul (UFRGS), c.3, p.23, c.7, p.74–80, 2012

- [15] – OLIVEIRA, F. A. M.; BIDÁ G. A. **Engenharia de Forjamento**. Apostila de Treinamento ABM, p 53, 2013.
- [16] – SEMIANTIN, S.L. et al. ASM Handbook Volume 14. **Forming and Forging**. 1998
- [17] – PATER, Z. **A study of cross wedge rolling process**. Journal of materials processing technology, v. 80, p. 370-375, 1998.
- [18] – HUANG, H. et al. **Initial billet temperature influence and location investigation on tool wear in cross wedge rolling**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology v. 79, n.9-12, p. 1545-1556, 2015.
- [19] – VÁCLAV HLADKÝ. **Wedge Cross Rolling Process In practice**. Manual Smeral Works, 1973.
- [20] – Betamachine - Máquinas Operatrizes e Ferramentas
[https://www.betamaq.com.br/equipamento/forjaria/rolo-de-forjamento-para-pecas-cilindricas-ul-45a-cross-wedge-rolling-machine-smeral#prettyPhoto\[images\]/0/](https://www.betamaq.com.br/equipamento/forjaria/rolo-de-forjamento-para-pecas-cilindricas-ul-45a-cross-wedge-rolling-machine-smeral#prettyPhoto[images]/0/)
acesso em 22 Jul. 2021
- [21] – PATER, Z.; TOMCZAK, J.; BULZAK, T. **New Forming possibilities in cross wedge rolling processes**. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v.18, n.1, p.149-161, 2018.
- [22] – ZHOU, J. et al. **Influence of tool parameters on tool wear in two roll cross wedge rolling**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 65, n. 5-8, p. 745-753, 2013.
- [23] – PATER, Z. et al. **Numerical analysis of the cross wedge rolling process (CWR) for a stepeped shaft**. Metalurgia, v.54 n.1, p. 177-180, 2015.
- [24] - REGONE, Wiliam; DA SILVA, Mário Luiz Nunes; BUTTON, Sérgio Tonini. **Estudo Microestrutural de Produtos Obtidos no Processo “Cross Wedge Rolling”**. Unicamp, Campinas - SP
- [25] - BUTTON, Sérgio Tonini; GENTILE, Fernando Cesar. **Estudo do processo de Cross-Wedge Rolling para a produção de eixos escalonados com aços microligados**. Trabalho apresentado no XXI Senafor, Gramado, RS. 23 e 24/10/2001,
- [26] – PATER, Z. **Tools optimisation in cross wedge rolling**. Journal of Materials Processing Technology, v. 138, n. 1-3, p. 176-182, 2003.
- [27] - SILVA, M. L. N.; PIRES, G. H.; BUTTON, S. T. **Damage evolution during cross wedge rolling of steel DIN 38MnSiVS5**. Procedia Engineering, v. 10, p. 752-757, 2011.
- [28] - PATER, Zbigniew; TOMCZAK, Janusz; BULZAK, Tomasz. **Rapid estimation of ductile crack formation in cross-wedge rolling**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 6, p. 14360-14371, 2020.

- [29] – FU, X. P.; DEAN, T. A. **Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 33, n. 3, p. 367-400, 1993.
- [30] – HAYAMA, Masujiro. **Optimum working conditions in the cross rolling of stepped shaft**. Journal of Mechanical Working Technology, v. 3, n. 1, p. 31-46, 1979.
- [31] - LOVELL, Michael R. **Evaluation of critical interfacial friction in cross wedge rolling**. J. Trib., v. 123, n. 2, p. 424-429, 2001.
- [32] – SOFUOGLO, H. RASTY, J. **On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test**. Tribology International, v. 32, n. 6, p. 327-335, 1999.
- [33] - HUANG, Haibo et al. **Wear resistance behavior of striated tool for cross wedge rolling**. Industrial Lubrication and Tribology, 2018.
- [34] – FU, X. P.; DEAN, T. A. **A study of defects in cross wedge rolling**. In: Technical Report 4. School of Manufact. and Mech. Engng, Univ. Birmingham UK, 1991.
- [35] – TSUKAMOTO, H., et al. **Application Study on Cross-Roll Method for Axisymmetrical Stepped Shaft**. Advanced Technology of Plasticity, 2, 936-941, 1984
- [36] – JOLGAF, M. **Development of a CAD/CAM system for the closed-die forging process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 138, n. 1-3, p. 436-442, 2003.
- [37] - BIBA, Nikolai; STEBOUNOV, Sergei; LISHINY, Andrei. **Cost effective implementation of forging simulation**. Journal of Materials Processing Technology, v. 113, n. 1-3, p. 34-39, 2001.
- [38] – BALANCIM, Oscar. **Simulação Física do Processamento Termomecânico Industrial**. Universidade Federal de São Carlos 2015. Disponível em: <http://www.dema.ufscar.br/termomec/index.php/simulacao-numerica/fundamentos-de-simulacao-numerica>. Acesso em 18 fev. 2020
- [39] – PATER, Z. **Cross-Wedge Rolling**. Comprehensive Materials Processing, v. 3, p. 211-279, 2014
- [40] - GIL, Felipe. **Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação de caso real de viga biapoiada**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [41] – ALMEIDA, Caio Augusto Rabite; LIMA, Fernando Tadeu de Araujo; BORGES, Marcos Martins. **Tectônicas Digitais: a (in) tangibilidade no processo de projeto em arquitetura**. Design e Tecnologia, v. 9, n. 18, p. 01-21, 2019.
- [42] – ENGREAR, Jr - <https://engrenarjr.com.br/blog/o-que-e-analise-por-elementos-finitos-5-motivos-para-ficar-de-olho-nessa-tecnologia> acesso em 17 Mar. 2024

[43] – DEL FRARI, R. V.; PEDROSO. **Malhas computacionais para simulação numérica de escoamentos de fluídos entre cilindros com excentricidade.** X Encontro Gaúcho de Educação Matemática, Ijuí-RS, 2009.

[44] – AMARAL, Luiz. **Preparação de Modelos para geração de malhas.** <https://www.esss.co/blog/preparacao-de-modelos-para-geracao-de-malhas>. Acesso em 06 abr. 2024

[45] – INFOMET. Composição química de aços conforme norma alemã DIN Disponível em <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=261> acesso em 04 fev. 2024.

[46] – SOFTWARE Q-FORM

[47] - PATER, Zbigniew. **Cross-wedge rolling of shafts with an eccentric step.** Journal of Iron and Steel Research International, v. 18, n. 6, p. 26-30, 2011.

[48] - PATER, Z.; TOMCZAK, J. **Experimental tests for cross wedge rolling of forgings made from non-ferrous metal alloys.** Archives of Metallurgy and Materials, v. 57, p. 919-928, 2012.