

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

Simulação por Elementos Finitos da Etapa de Desbaste
na Laminação de Longos

Autor: Isaac Rosa Soares
Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Julho/2010

Isaac Rosa Soares

Simulação por Elementos Finitos da Etapa de Desbaste na Laminação de Longos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação.

Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2010

Dedico a Camile, minha amada esposa e
companheira, que com muita sabedoria
sempre me incentiva e apóia em todos os
momentos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 – Processo de laminação	4
3.1.1 – Deformações na laminação	9
3.1.2 – Aspectos Gerais na Calibração de Longos	11
3.1.3 – Seqüências de calibração na laminação de longos	18
3.1.4 – Tensão entre passes	24
3.2 – Defeitos em laminação de longos.....	26
3.3 – O Método dos Elementos Finitos.....	31
3.3.1 – O método dos elementos finitos aplicado à conformação de metais.....	33
3.3.1.1 – Formulação Rígido-Plástica ou Rígido-Viscoplástica.....	33
3.3.1.2 – Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Estática Implícita	34
3.3.1.3 – Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Estática Explícita	34
3.3.1.4 – Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Dinâmica Explícita.....	34
3.3.1.5 – Aplicabilidade e uso da abordagem de elementos finitos para melhoria do processo de laminação.	34
4 – METODOLOGIA.....	40
4.1 – Desenvolvimento do trabalho	40
4.2 – Parâmetros para simulação numérica do processo de laminação	42
4.2.1 – Geometrias utilizadas na simulação numérica.....	42
4.2.1.1 – Tarugo.....	43
4.2.1.2 – Cilindro de laminação	44
4.2.2 – Projeto de calibração.....	48
4.2.2.1 - Caso 1: Padrão	48
4.2.2.2 – Caso 2: Efeito da variação da luz entre canais	49
4.2.2.3 - Caso 3: Efeito do coeficiente de atrito	50
4.2.2.4 - Caso 4: Efeito do raio dos cilindros	50
4.2.2.5 - Caso 5: Efeito da tensão entre passes, laminação multi-passe.....	51
4.2.3 – Análise de resultados	51

5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
5.1 – Resultados dimensionais	52
5.2 – Avaliação da deformação efetiva, redução em altura e alargamento em cada passe	64
5.3 – Avaliação do efeito das tensões entre passes na simulação numérica multi- passe.	74
6 – CONCLUSÃO	82
6– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 – Figura esquemática do processo de laminação, sendo h_i e h_f as alturas de entrada e saída do material respectivamente.....	4
Figura 3.2 – Exemplo de canais de um laminador reversível para produção de barras (NORDÉN, 2007).....	5
Figura 3.3 – Foto de um laminador contínuo de fio-máquina.....	5
Figura 3.4 – Fluxograma de produção em laminação de longos.....	7
Figura 3.5 – Detector de defeitos superficiais automático por corrente parasita “Eddy Current”.....	8
Figura 3.6 – Máquina de ensaio “upset” à esquerda e de partículas magnéticas à direita para identificação de defeitos superficiais.	8
Figura 3.7 – Relações geométricas na laminação (CETLIN e HELMAN, 2005).....	9
Figura 3.8 – Deformação em laminação (DIETER, 1981).....	11
Figura 3.9 – Principais deformações em laminação, redução em altura, alongamento e alargamento (CODA, 2008).	12
Figura 3.10 – (a) luz entre dois cilindros de laminação e b) friso formado devido ao alargamento indevido na região de luz entre canais (CODA, 2008).....	15
Figura 3.11 – Influência da redução em altura sobre o alargamento (CODA, 2008). ...	16
Figura 3.12 – Influência do diâmetro dos cilindros sobre o alargamento (CODA, 2008).	16
Figura 3.13 – Influência da temperatura de laminação assim como tipo de material dos cilindros sobre o alargamento (CODA, 2008).....	17
Figura 3.14 – Influência da largura inicial sobre o alargamento (CODA, 2008).....	18
Figura 3.15 – Vista superior esquemático do arranjo das cadeiras de laminação contínua. (a) arranjo contínuo horizontal: opera com torções do material laminado e (b) arranjo horizontal/vertical: opera sem torção do material laminado.....	19
Figura 3.16 – Dimensões do canal quadrado (CODA, 2008).....	21
Figura 3.17 – Diferentes tipos de configuração para o canal oval (CODA, 2008).	22
Figura 3.18 – Dimensões do canal falso redondo ou redondo (CODA, 2008).....	24
Figura 3.19 – Canal caixa com fundo abaulado (CODA, 2008).	24
Figura 3.20 – Relação de vazão de material entre passes simultâneos na laminação contínua (CODA, 2008).	25

Figura 3.21 – Controle do laço entre passes durante operação na laminação contínua.	26
Figura 3.22 – Molas de alta qualidade para aplicação automotiva (SHINOHARA, 2005).	27
Figura 3.23 – Defeitos encontrados em laminação de fio-máquina ou barras. (a) trincas, (b) dobras, (c) rugosidade, (d) carepa, (e) incrustação, e (f) riscos (SON, 2007).	27
Figura 3.24 – Rugosidade identificadas após laminação de fio-máquina (a) através de ensaio “upset” e por microscopia ótica (LIM, 2000).	28
Figura 3.25 – Fatores que afetam a ocorrência de rugosidade na laminação de fio-máquina de acordo com LIM (2000).	28
Figura 3.26 – Aspecto do defeito de desalinhamento da seção transversal [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].	29
Figura 3.27 – Aspecto do defeito de dobras em fio-máquina [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].	30
Figura 3.28 – Aspecto do defeito bigode em fio-máquina [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].	30
Figura 3.29 – Aspecto de riscos em fio-máquina [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].	31
Figura 3.30 – Fontes de perda na produção durante a laminação relacionadas ao tempo de produção planejado.	35
Figura 3.31 – Alteração na profundidade de defeitos superficiais na laminação de quatro passes. (a) caso 1 e (b) caso 2 (SON, 2007).	36
Figura 3.32– Definição da forma e posição dos defeitos superficiais no trabalho de SON (2007).	36
Figura 3.33 – Seções transversais das barras laminadas após cada passe (a-d) em uma seqüência oval-redondo. As linhas inseridas ilustram a contração uniforme da cavidade central pela proporção geométrica (FILIPOVIC 2007).	37
Figura 3.34 – Perfil dimensional comparativo entre a evolução da cavidade experimental (linha escura) e simulação numérica (linha vermelha) após cada passe (FILIPOVIC 2007).	38
Figura 3.35 – (a) Modelo numérico proposto para laminação do tarugo com defeito dos passes oval-redondo e (b) forma e posição do defeito.	39
Figura 3.36 – Evolução da forma do defeito durante a laminação.	39

Figura 3.37 – (a) Comparação dos resultados de variação da profundidade dos riscos experimentais e simulação numérica. (b) Variação da profundidade do defeito durante a laminação.	39
Figura 4.1 – Seqüência de calibração na etapa de desbaste utilizada para simulação por elementos finitos para obtenção de esboço final redondo.....	41
Figura 4.2 – Dimensional característico do projeto de simulação numérica elaborado considerando ¼ do perfil de cada item como destacado pelo contorno.	43
Figura 4.3 – Perfil da malha de nós do tarugo.	44
Figura 4.4 – Geometrias primitivas presentes na biblioteca do DEFORM 3D® versão 10.0.	45
Figura 4.5 – Cilindro de laminação gerado com número de “layers” de: (a) 36, (b) 72 e (c) 108.	46
Figura 4.6 – Efeito do número de “layers” na simulação numérica para (a) 36 “layers” e (b) 108 “layers”.	47
Figura 4.7 – Vista superior esquemática do arranjo contínuo das cadeiras utilizado na simulação da etapa de desbaste.....	48
Figura 5.1 – Comparativo da largura (B) obtida na simulação numérica com as medidas da amostra industrial retirada durante o processo de laminação real.	53
Figura 5.2 – Comparativo da altura (H) obtida na simulação numérica com as medidas da amostra industrial retirada durante o processo de laminação real.....	54
Figura 5.3 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço obtido no passe 1 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.....	57
Figura 5.4 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual de amostra industrial do esboço no passe 2 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.	58
Figura 5.5 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço no passe 3 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.	59
Figura 5.6 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço no passe 4 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b)	

Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.	60
Figura 5.7 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço no passe 5 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.	61
Figura 5.8 – Resultados comparativo dimensional (mm) da amostra industrial do esboço após passe 6 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.	62
Figura 5.9 – Resultados comparativo dimensional em mm da amostra industrial do esboço no passe 7 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito;(e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.	63
Figura 5.10 – Início da laminação multi-passe entre os passes 4 e 5.	64
Figura 5.11 – Deformação efetiva média de cada passe obtida na simulação numérica para os estudos de Caso propostos.	65
Figura 5.12 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 1 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.	66
Figura 5.13 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 2 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.	67
Figura 5.14– Deformação efetiva na seção transversal do passe 3 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.	68
Figura 5.15 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 3 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.	69
Figura 5.16 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 5 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.	70
Figura 5.17 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 6 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.	71

Figura 5.18 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 7 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito;(d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.....	72
Figura 5.19 – Variação da redução em altura durante a laminação.....	73
Figura 5.20 – Variação do alargamento durante a laminação.....	74
Figura 5.21 – Tensão na direção do eixo X ocorrida entre os passes: (a) 4 e 5; (b) 5 e 6 e (c) 6 e 7.	75
Figura 5.22 – (a) Detalhe do bigode formado entre os passes 6 e 7. (b) Amostra da seção transversal do esboço na região do bigode indicado pela seta.....	76
Figura 5.23 – Aparecimento do defeito bigode entre os passes 5 e 6.	77
Figura 5.24 – (a) Esboço com bigode antes de entrar no passe 7 e (b) bigode sendo eliminado durante laminação simultânea dos passes 6 e 7.....	78
Figura 5.25 – Eliminação do primeiro bigode formado entre os passes 5 e 6.....	79
Figura 5.26 – Detalhe do bigode formado no esboço final após o passe 7. As setas indicam a seção de corte na peça cujas medidas estão descritas na Figura 5.27.	80
Figura 5.27 – Variação dimensional em milímetros no esboço final observado através de corte da seção transversal das regiões indicadas pelas setas na Figura 5.26 de acordo com: (a) seta 1; (b) seta 2 e (c) seta 3.....	81

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela III.1 – Reduções médias para algumas seqüências de passes.....	21
Tabela IV.1 – Composição química do aço DIN C-15 de acordo com a norma DIN17210.	40
Tabela IV.2 – Reduções e dimensões da seção transversal esperada para cada passe de acordo com modelo teórico do produtor.....	41
Tabela IV.3 – Principais relações geométricas de cada passe utilizadas na simulação numérica para o Caso 1.....	49
Tabela IV.4 – Principais relações geométricas de cada passe utilizadas na simulação numérica para o Caso 2.....	50
Tabela IV.5 – Resumo das variáveis a serem estudadas através de simulação numérica.	52
Tabela V.1 – Comparativo dos resultados dimensionais de largura (mm) obtida por cada simulação com os as medidas da amostra e do modelo teórico.....	53
Tabela V.2 – Comparativo dos resultados dimensionais de altura (mm) obtida por cada simulação com os as medidas da amostra industrial e do modelo teórico.	54
Tabela V.3 – Diferença numérica (mm) entre os resultados de largura (B) obtidos pela simulação numérica para os resultados das medidas das amostras industriais	55
Tabela V.4 – Diferença numérica (mm) entre os resultados de altura (H) obtidos pela simulação numérica para os resultados das medidas das amostras industriais	56

RESUMO

Investimentos tecnológicos no sentido de aumentar a produtividade e a qualidade de produtos longos tem sido alvo de estudos pelas empresas dado a alta competitividade.

Alta qualidade superficial e interna para o fio-máquina e barras é essencial para a produção de produtos longos que serão submetidos à posterior deformação a frio. Produtos que serão submetidos à estampagem ou conformação a frio para aplicação automotiva, por exemplo, são produtos de alta responsabilidade e pequenos defeitos superficiais podem levar a ruptura do produto final prematuramente. O controle e o entendimento das variáveis de laminação podem favorecer a estabilidade do processo e evitar a ocorrência de defeitos de laminação no produto final. O objetivo do trabalho foi estudar o efeito de determinadas variáveis de laminação como atrito, luz entre canais, tensões entre passes, diâmetro dos cilindros de laminação e canal de calibração através de modelo numérico proposta na etapa de desbaste de laminação de barras redondas. Os resultados dimensionais obtidos do modelo em cada passe obtiveram aproximação aceitável comparados com as amostras fornecidas por um produtor de barras comercial.

ABSTRACT

Technology investments to increase productivity and product quality has long been the focus of studies by companies given the high competitiveness. High surface and internal quality to the wire rods and bars is essential for the production of long products that will undergo subsequent cold deformation. Products that will be submitted to cold forming for automotive application, for example, are products of high responsibility and small defects can lead to premature rupture of the final product. The control and understanding of the variables could contribute to the hot rolling process stability and prevent the occurrence of defects in the final product. The aim is to study the effect of some rolling variables such as friction, gap, interstand tensions, roll diameter and shape of caliper through numerical model in the roughing mill of round bars mill. The dimensional results obtained of the model in each pass reach acceptable approach in comparison with the samples supplied by a producer of commercial bars.

1 – INTRODUÇÃO

A prática de produção de produtos longos como fio-máquina e barras tem sido desenvolvida por centenas de anos e o maior passo operacional em tecnologia ocorreu com o aumento da velocidade de laminação para até 140 m/s (ERIKSSON, 2004). Essas mudanças ocorreram devido à ação de duas principais forças motrizes, o “puxão” dado pelos clientes com o aumento de demanda por produtos de alta qualidade, e o “empurrão” dos produtores pelo ganho na eficiência de seus equipamentos. Baseado nesse fato, investimentos tecnológicos no sentido de aumentar a produtividade e a qualidade de produtos longos tem sido alvo de estudos pelas empresas dado a alta competitividade. Com o objetivo de se atingir posição superior na severa competição por preço, as empresas tem buscado operar com máximo de redução de custos reduzindo as perdas por sucateamento, paradas de equipamento, troca prematura de cilindros de laminação e ainda outros fatores que perturbem uma operação estável. Nessa busca, o entendimento das variáveis de laminação é essencial para produção estável com alto desempenho e qualidade.

Segundo BICKFORD (1994), dois dos principais objetivos da análise em engenharia são: determinar os princípios básicos que governam o comportamento de um fenômeno e transferir estes princípios para um modelo matemático envolvendo uma equação ou equações que possam prever soluções qualitativas e/ou quantitativas do comportamento deste fenômeno. Uma ferramenta que tem sido amplamente utilizada e desenvolvida desde 1950 com esse objetivo é o Método de Elementos Finitos (FEM – *finite element method*). Segundo OLIVEIRA (2009) o Método de Elementos Finitos é uma ferramenta para equacionamento de fenômenos através do modelamento físico e matemático, utilizando os recursos de informática para processamento de inúmeras matrizes de equações, sendo difundido mais amplamente no último quarto do século passado. A amplitude de aplicação desta ferramenta, devido ao poderio dos modelamentos físicos e matemáticos, além do avanço tecnológico das ferramentas computacionais abrange às mais distintas áreas, como: mecânica dos sólidos e fluidos, transferência de calor, vibrações, potencial elétrico, campos magnéticos, comportamentos de materiais em processos de conformação, etc.

Um dos exemplos de aplicação do entendimento das variáveis de laminação é o estudo do seu efeito sobre a qualidade superficial. De acordo LIM (2000) a qualidade

superficial é um dos mais importantes fatores na produção de produtos longos de alta qualidade. Variáveis como a condição superficial e da seção transversal do tarugo, temperatura de laminação, luz entre canais, tensão entre passes, carepa e forma de canal de laminação podem afetar a qualidade superficial do fio-máquina.

A motivação do trabalho é o de prever resultados numéricos através do Método de Elementos Finitos para avaliação de determinadas variáveis de laminação como atrito, luz entre canais, tensão entre passes, diâmetro dos cilindros de laminação e canal de calibração. A vantagem da utilização do método de elementos finitos para avaliação das variáveis de laminação é a não necessidade de paradas e testes em operação que são em geral de alto custo dado a parada do equipamento e os riscos operacionais dessas mudanças. O controle e o entendimento das variáveis de laminação podem favorecer a estabilidade do processo o que levaria aumento da produtividade do equipamento e a possível redução de ocorrências de defeitos de laminação.

2 – OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito de determinadas variáveis de laminação na deformação de barras redondas. Entender a relação entre o projeto de calibração dos passes de desbastes na qualidade do material laminado utilizando o Método de Elementos Finitos e comparar com resultados industriais.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentada basicamente uma visão geral do processo de laminação de produtos longos assim como suas principais variáveis e os tipos de canais mais utilizados. Os principais defeitos de laminação serão apresentados com o objetivo de relacionar as suas ocorrências com as variáveis de laminação. Também serão discutidos os métodos de análise de deformação mecânica, em especial a simulação numérica pela técnica do método dos elementos finitos.

3.1 – Processo de laminação

Segundo CETLIN e HELMAN (2005) a laminação consiste na passagem de uma peça entre dois cilindros que giram de forma a reduzir a área de uma seção transversal (Figura 3.1).

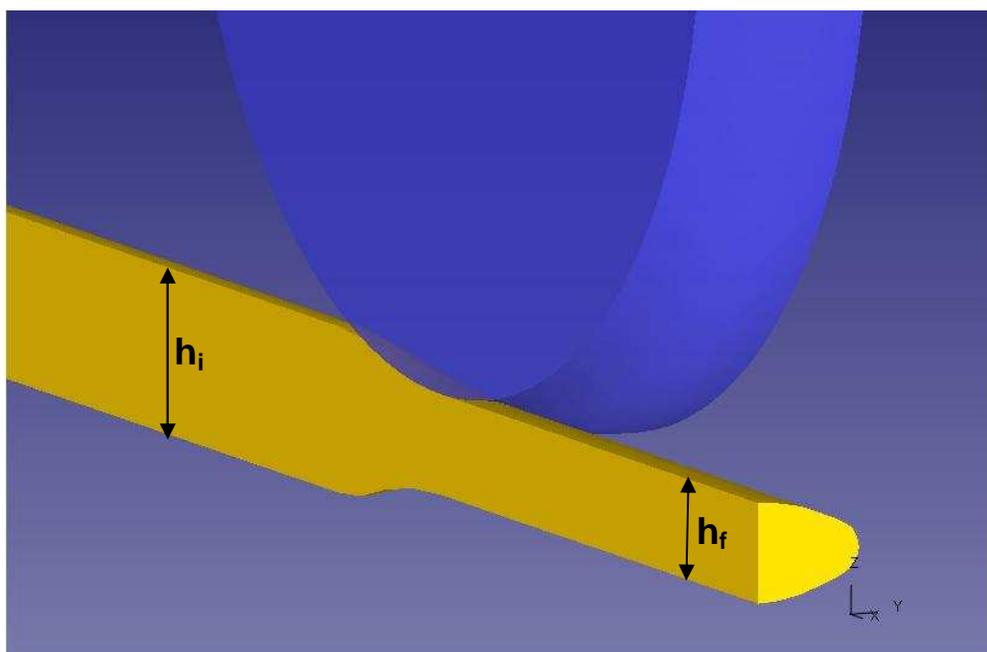


Figura 3.1 – Figura esquemática do processo de laminação, sendo h_i e h_f as alturas de entrada e saída do material respectivamente.

Durante a laminação, raramente passa-se o material somente uma vez entre os cilindros de laminação, pois a redução da área almejada normalmente não pode ser conseguida em um só passe. Assim, o equipamento de laminação deve ser capaz de submeter o material a uma seqüência de passes. Considerando um conjunto de cilindros único, essa seqüência pode ser realizada de duas formas: ajustando a

abertura entre os cilindros durante a operação ou mantendo a abertura fixa durante a operação e modificando o diâmetro do cilindro ao longo do seu comprimento. No último caso, a peça a ser laminada deve ser deslocada ao longo do cilindro para cada passe sucessivo (Figura 3.2). Outra possibilidade seria a colocação de laminadores que trabalhem o material sucessiva e simultaneamente chamado de laminador contínuo (Figura 3.3).

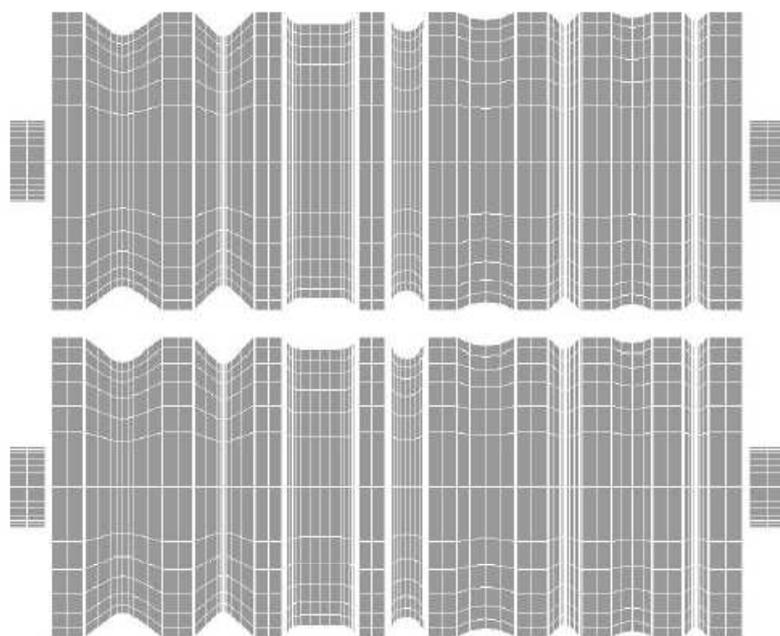


Figura 3.2 – Exemplo de canais de um laminador reversível para produção de barras (NORDÉN, 2007)



Figura 3.3 – Foto de um laminador contínuo de fio-máquina.

O fluxo de produção na laminação de barras ou fio-máquina segue em geral a seguinte Figura 3.4. A matéria-prima são tarugos que são obtidos por solidificação em máquinas de lingotamento contínuo ou através de laminação de seções maiores, blocos ou lingotes, numa operação que se dá em um laminador desbastador (*bloom*ing mill). Os tarugos são seções quadradas de dimensão de 100 a 180mm contendo raio de canto que em geral pode variar de 4 a 30mm. Em geral, os raios de canto são na faixa de 4 a 15mm para tarugos de lingotamento contínuo, dependendo do raio nominal do molde de solidificação, e na faixa de 10 a 30mm para os tarugos laminados. O reaquecimento dos tarugos se dá em fornos na qual as peças devem ser reaquecidas ao longo de seu comprimento até atingir temperatura de início de laminação que em geral ocorre entre 1100 e 1200°C. A laminação é dividida em etapas que consistem nas seqüências: 1) desbaste, 2) intermediária e 3) acabadora na qual os tarugos são deformados até atingir a dimensão final objetivada. Os laminadores atuais para produção de barras ou fio-máquina são capazes de produzir grande volume de material devido às altas velocidades de laminação podendo alcançar até 140m/s no final do processo. Estas 3 etapas devem estar bem projetadas e bem controladas para evitar grande volume de perdas de material por qualidade ou com consumo e custos expressivos e não necessários. O objetivo do trabalho será estudar a etapa de desbaste por simulação numérica através de elementos finitos. Para finalizar o processo, o material laminado é resfriado em leitos e podendo passar por etapas de corte a frio, bobinamento ou endireitamento das barras, enfeixamento ou amarração e identificados.

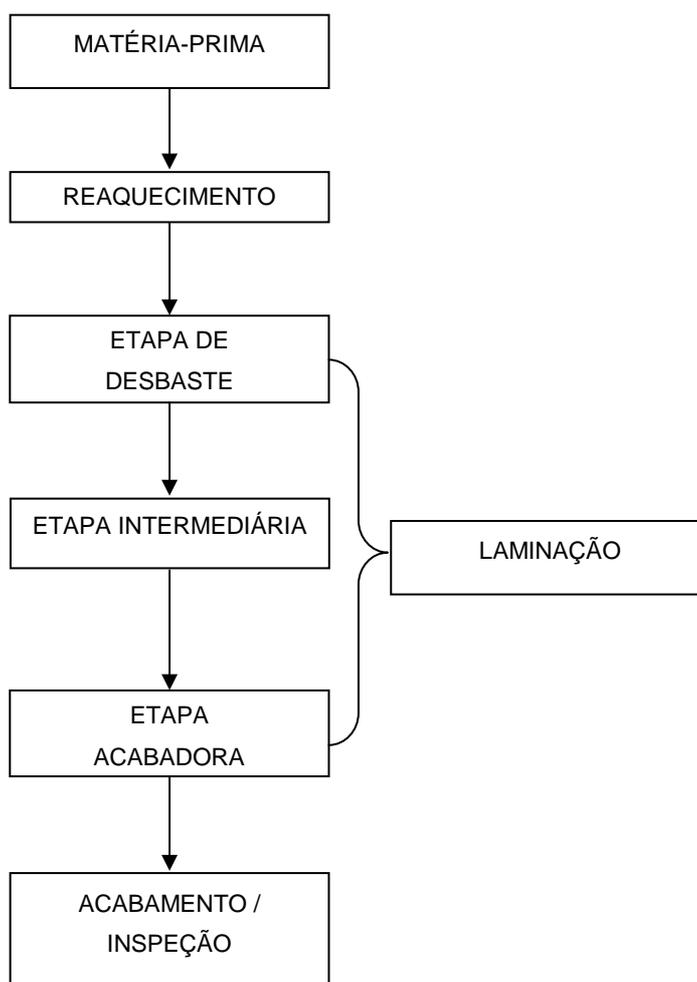


Figura 3.4 – Fluxograma de produção em laminação de longos.

O material final poderá ser inspecionado tanto em linha através de equipamentos de inspeção automáticas como correntes parasitas (Figura 3.5) quanto através de inspeção visual no final do processo, através de ensaio de “*upset*” e por partículas magnéticas (Figura 3.6).

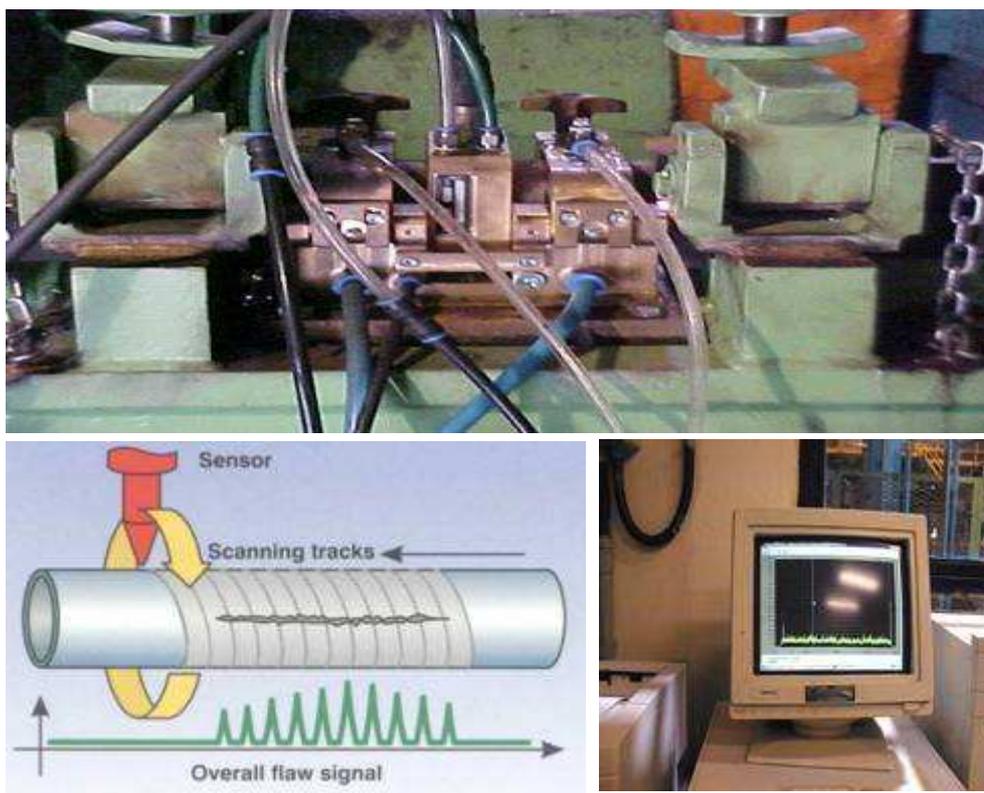


Figura 3.5 – Detector de defeitos superficiais automático por corrente parasita “Eddy Current”.



Figura 3.6 – Máquina de ensaio “upset” à esquerda e de partículas magnéticas à direita para identificação de defeitos superficiais.

3.1.1 – Deformações na laminação

A Figura 3.7 a seguir demonstra as relações geométricas em laminação segundo Cetlin e Helman (2005).

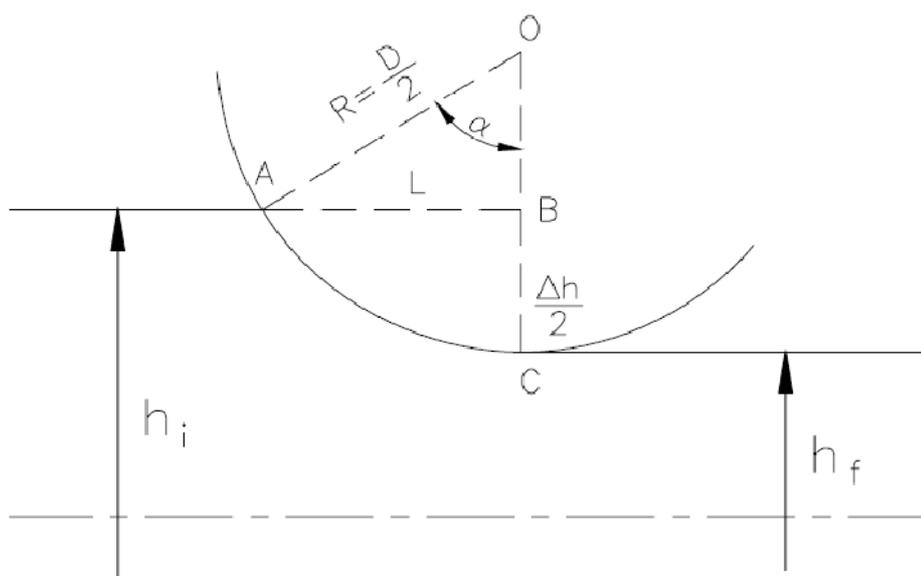


Figura 3.7 – Relações geométricas na laminação (CETLIN e HELMAN, 2005)

A seguir são apresentados os seguintes pontos e características geométricas da Figura 3.7.

h_i – Altura inicial do material na entrada do cilindro de laminação;

h_f – Altura final do material na saída do cilindro de laminação;

D – Diâmetro do cilindro de laminação;

R – Raio do cilindro de laminação;

A – Ponto de entrada: ponto onde o material inicia o contato com o cilindro de laminação na entrada do processo;

C – Ponto de saída: ponto onde o material termina o contato com o cilindro de laminação na saída do processo;

α – Ângulo de contato: ângulo definido pelo raio do cilindro de laminação sobre os segmentos de reta OC e AO (correspondente ao arco de contato);

AC – Arco de contato: arco medido sobre o cilindro de laminação desde o ponto de entrada até o ponto de saída;

L – Comprimento aproximado do arco de contato.

Considerando que o raio do cilindro de laminação (R) é muito maior que a altura inicial do material na entrada do cilindro (h_i), é razoável aproximar o arco AC pela projeção horizontal $\overline{AB} = L$. Sendo Assim observando o triângulo $A\hat{O}B$ é possível estabelecer a seguinte relação:

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (3.1)$$

Pelas considerações anteriormente indicadas, é aceitável:

$$R \cdot \Delta h \gg \frac{\Delta h^2}{4}$$

Sendo assim a Equação 3.1 resulta em:

$$L = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (3.2)$$

Portanto o ângulo de contato (α) pode ser definido como:

$$\text{sen } \alpha = \frac{L}{R} = \frac{\sqrt{R \cdot \Delta h}}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (3.3)$$

Para ângulos pequenos é possível admitir $\text{sen } \alpha \simeq \alpha$ e então a Equação (3.3) pode ser expressa por:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (3.4)$$

Durante a laminação, nos pontos compreendidos dentro do arco de contato, conforme DIETER (1981), pode-se representar os esforços de compressão (Pr), ou carga de laminação, e a força de atrito (F), conforme demonstrado no ponto X da Figura 3.8. A carga de laminação é a força que o rolo de laminação comprime o metal, e por reação, a força que o metal tende a afastar estes, sendo também conhecida como força de separação.

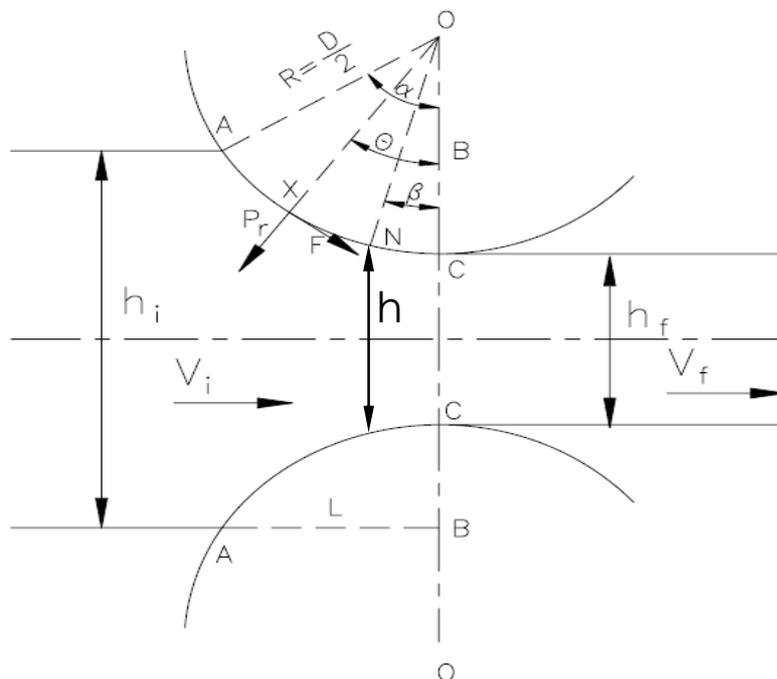


Figura 3.8 – Deformação em laminação (DIETER, 1981).

3.1.2 – Aspectos Gerais na Calibração de Longos

Observando a Figura 3.8, a deformação convencional de um ponto genérico pertencente ao arco de contato, devido ao esforço de compressão, representado pelo ponto N, admitindo-se deformação homogênea na espessura, é obtido por:

$$e = \frac{h_i - h}{h_i} = 1 - \frac{h}{h_i} \quad (3.5)$$

E a deformação logarítmica ou deformação verdadeira é expressa por:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_i}{h} = \ln \left(\frac{1}{1-e} \right) \quad (3.6)$$

O cálculo da espessura do material no ponto genérico N pode ser expresso por:

$$h = h_f + D(1 - \cos \beta) \quad (3.7)$$

Substituindo a Equação 3.7 na expressão para deformação convencional,

$$e = \frac{h_f}{h_i} - \frac{D(1 - \cos \beta)}{h_i} \quad (3.8)$$

e, para deformação verdadeira,

$$\varepsilon = \ln \left[\frac{h_i}{h_f + D(1 - \cos \beta)} \right] \quad (3.9)$$

Através da Equação 3.9 pode-se obter o valor do ângulo de contato (β) em função da deformação logarítmica de acordo com a seguinte relação.

$$\beta = \arccos \left[1 - \frac{1}{D} \left(\frac{h_i}{\exp(\varepsilon)} - h_f \right) \right] \quad (3.10)$$

Outras relações importantes em laminação demonstrada por CETLIN e HELMAN (2005) são as que relacionam a deformação convencional média (e_m), obtida através da Equação 3.11 e a deformação total (e_T), obtida através da Equação 3.12:

$$e_m = \frac{R(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)}{h_i \sin \alpha} \quad (3.11)$$

$$e_T = \frac{2R(1 - \cos \alpha)}{h_i} \quad (3.12)$$

Na laminação de longos pode se observar três principais deformações lineares de acordo com CODA (2008) (Figura 3.9): redução em altura (h), alongamento (L) e alargamento (b).

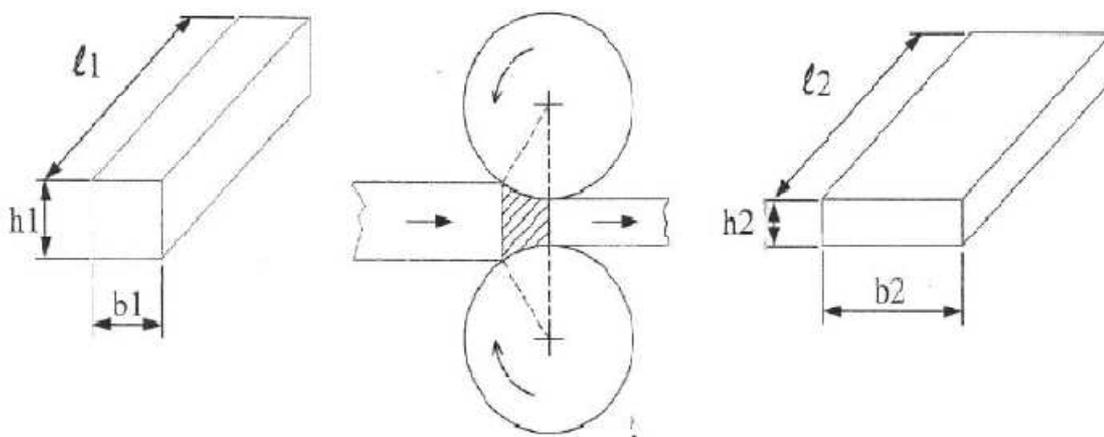


Figura 3.9 – Principais deformações em laminação, redução em altura, alongamento e alargamento (CODA, 2008).

- Redução em altura: é também conhecida como pressão. A redução em altura é definida pelo canal, regulagem de luz, cedagem da gaiola e desgaste do canal.

Pode ser expressa pelas seguintes relações:

$$\text{Pressão absoluta} = h_1 - h_2 \quad (3.13)$$

$$\text{Pressão relativa} = \frac{h_1 - h_2}{h_2} \times 100 \quad (3.14)$$

$$\text{Coeficiente de pressão: } \gamma = \frac{h_2}{h_1} \quad (\gamma < 1) \quad (3.15)$$

- Alongamento: corresponde ao aumento de comprimento do material durante a laminação e pode ser expressa por:

$$\text{Coeficiente de alongamento: } \lambda = \frac{l_2}{l_1} \quad (\lambda > 1) \quad (3.16)$$

- Alargamento: corresponde ao aumento de largura do material durante a laminação e pode ser expresso pelas seguintes relações:

$$\text{Alargamento absoluto} = b_2 - b_1 \quad (3.17)$$

$$\text{Alargamento relativo} = \frac{b_2 - b_1}{b_1} \times 100 \quad (3.18)$$

$$\text{Coeficiente de alargamento: } \beta = \frac{b_2}{b_1} \quad (\beta > 1) \quad (3.19)$$

$$\text{Alargamento proporcional} = \frac{b_2 - b_1}{h_2 - h_1} \quad (3.20)$$

$$\text{Largura média: } b_m = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (3.21)$$

Segundo KOSAK (1976), conhecer o alargamento durante o processo de laminação é um fator de importância decisiva, porque o projeto de calibração deve estar em conformidade com este parâmetro. O alargamento é influenciado por determinados fatores tais como o tipo de aço, diâmetro do cilindro de laminação, tipo de material na qual o cilindro foi produzido, redução em altura, temperatura, coeficiente de atrito e velocidade de laminação. No caso da velocidade, observa-se que para valores de até 10 m/s não há variação observada no alargamento assim como para velocidade acima desta ocorre somente pequenas reduções no alargamento de fato que pode ser omitido o efeito da velocidade no cálculo do alargamento. Esses fatores foram relacionados em literatura e é possível encontrar equações empíricas como a proposta por Ekelund (Equação 3.22) e por Wusatowski (Equação 3.26) e que são amplamente utilizadas para o cálculo do alargamento (CODA, 2008).

Equação de Ekelund:

$$\frac{b_2^2 - b_1^2}{2} = 4. m. (\sqrt{r. \Delta h}). \Delta h - 2. m. (h_2 + h_1). (\sqrt{r. \Delta h}). \ln \frac{b_2}{b_1} \quad (3.22)$$

$$m = \frac{1,6. \mu (\sqrt{r. \Delta h}) - 1,2. \Delta h}{h_2 + h_1} \quad (3.23)$$

$$\mu = 1,05 - 0,0005. T \text{ (para cilindros de laminação de aço)} \quad (3.24)$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005. T) \text{ (para cilindros de ferro fundido)} \quad (3.25)$$

sendo:

b_1 – largura do material anterior a entrada no passe; [mm]

b_2 – largura do material após o passe; [mm]

h_1 – altura do material após o passe; [mm]

h_2 – altura do material após o passe; [mm]

r – raio de trabalho do cilindro; [mm]

μ – fator de coeficiente de atrito;

T – temperatura do material. [°C]

Equação de Wusatowski:

$$b_2 = \beta. b_1 \quad (3.26)$$

$$\beta = \gamma^{-W} \quad (3.27)$$

$$w = 10^{-1,269. \varepsilon_w^{0,556}. \delta_w} \quad (3.28)$$

sendo:

γ – coeficiente de pressão (Equação 3.15)

$$\varepsilon_w = \frac{h_1}{D} \text{ (fator de redução, onde D é o diâmetro do cilindro de trabalho)} \quad (3.29)$$

$$\delta_w = \frac{b_1}{h_1} \text{ (fator de forma)} \quad (3.30)$$

A Equação 3.26 é mais aplicada para laminação de barras retangulares ou quadradas laminadas entre cilindros planos (WUSATOWSKI, 1969).

O alargamento deve ser controlado, pois uma vez que existe luz entre canais, como representado na Figura 3.10 (a), não se deseja encher totalmente os mesmos, pois podem provocar defeitos como frisos entre os canais que é também conhecido como bigode (Figura 3.10 - b).

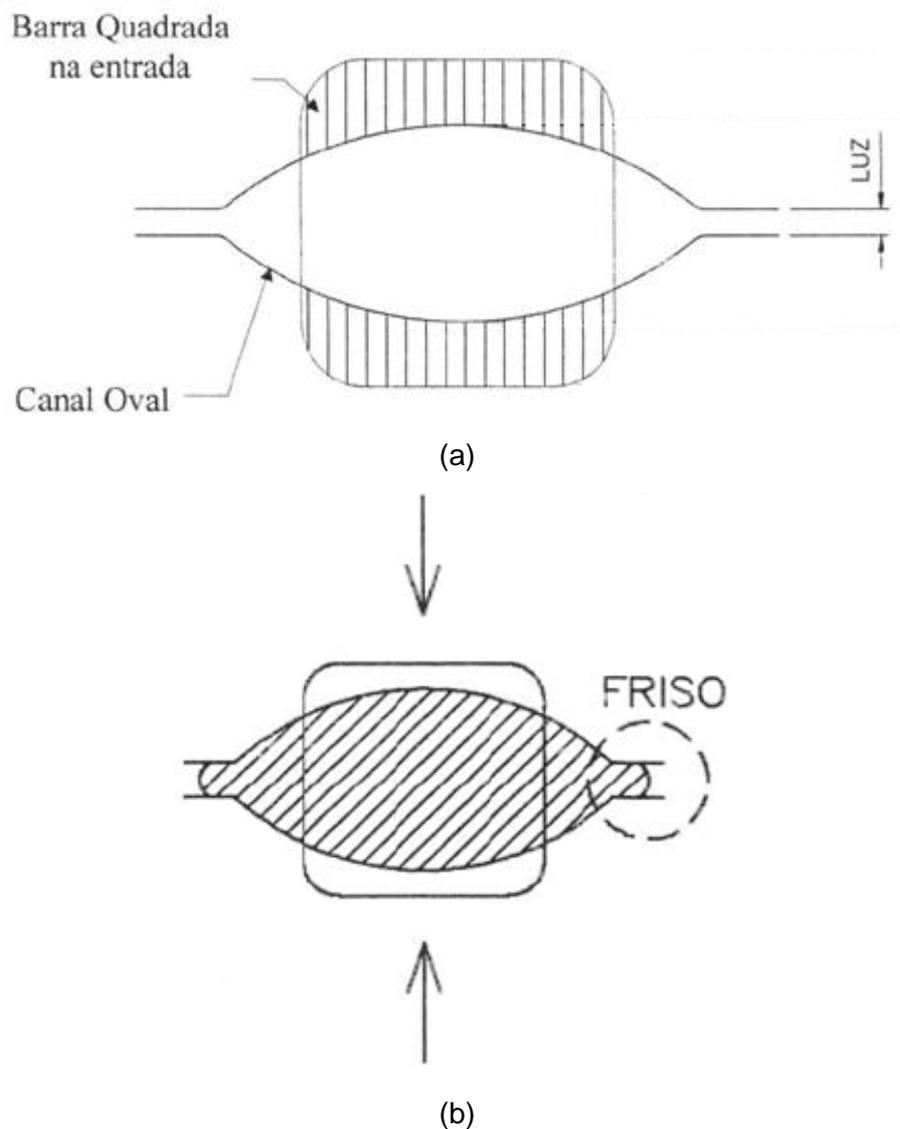


Figura 3.10 – (a) luz entre dois cilindros de laminação e b) friso formado devido ao alargamento indevido na região de luz entre canais (CODA, 2008).

De acordo com KOSAK (1976) a relação entre os principais fatores que influenciam no alargamento pode ser estabelecida como segue:

- Influência da redução em altura

Quanto maior é a redução em altura, maior deverá ser o alargamento por causa da força de pressão exercida sobre o material e que será somente contida pelas paredes laterais dos canais. O material irá buscar compensar essa pressão através do alargamento. A Figura 3.11 mostra o significativo aumento do alargamento com o aumento da redução em altura.

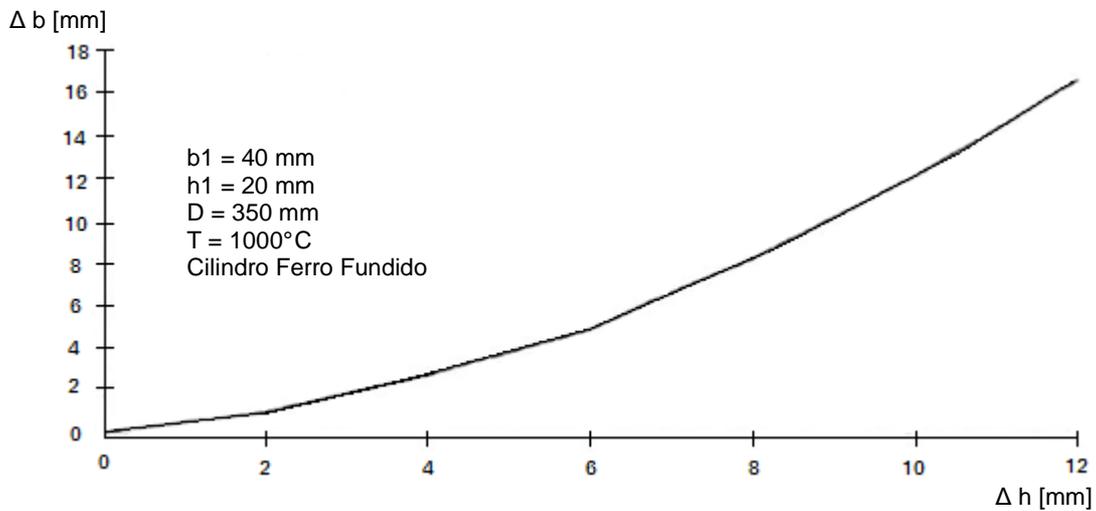


Figura 3.11 – Influência da redução em altura sobre o alargamento (CODA, 2008).

- Influência do diâmetro dos cilindros

A influência do diâmetro dos cilindros de laminação pode ser observada através da Figura 3.12. O aumento do alargamento com o aumento do diâmetro do cilindro é devido ao aumento da resistência ao escoamento de material na região de luz entre os canais. Como resultado ocorre aumento do fluxo de material na direção do alargamento.

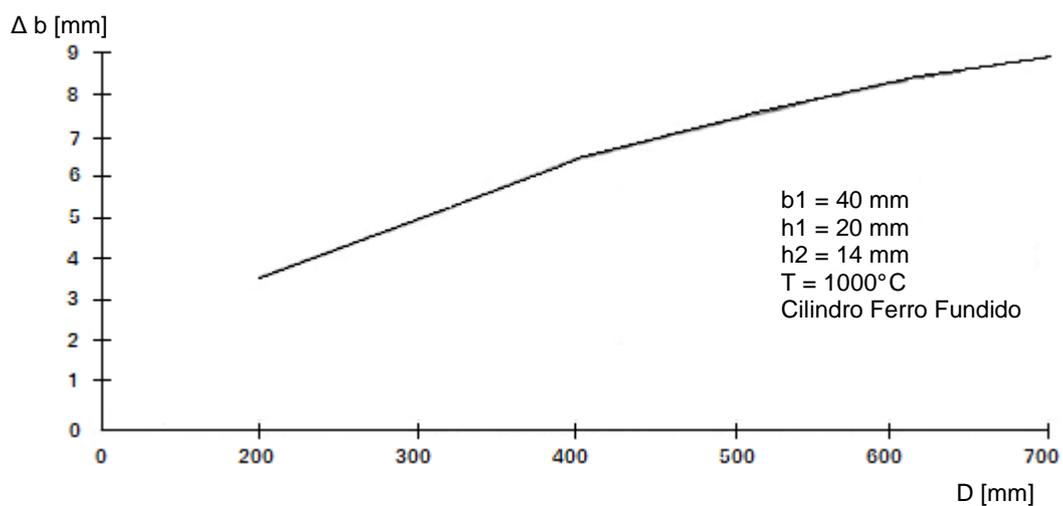


Figura 3.12 – Influência do diâmetro dos cilindros sobre o alargamento (CODA, 2008).

- Influência da temperatura de laminação

Como a redução de temperatura reduz as forças na luz entre canais e o atrito entre os cilindros e o material a consequência será o aumento do alargamento. A Figura 3.13 demonstra essa influência em concordância com resultados obtidos através da equação de alargamento de Ekelund.

- Influência do atrito entre o cilindro de laminação e o material

A equação de Ekelund para o cálculo do coeficiente de atrito na laminação a quente (Equação 3.24 e 3.25) indica que o atrito aumenta com a redução de temperatura. Sendo assim, há um aumento do alargamento para maiores atritos, então o alargamento será maior empregando cilindros de aço do que para cilindros de ferro fundido na laminação (Figura 3.13).

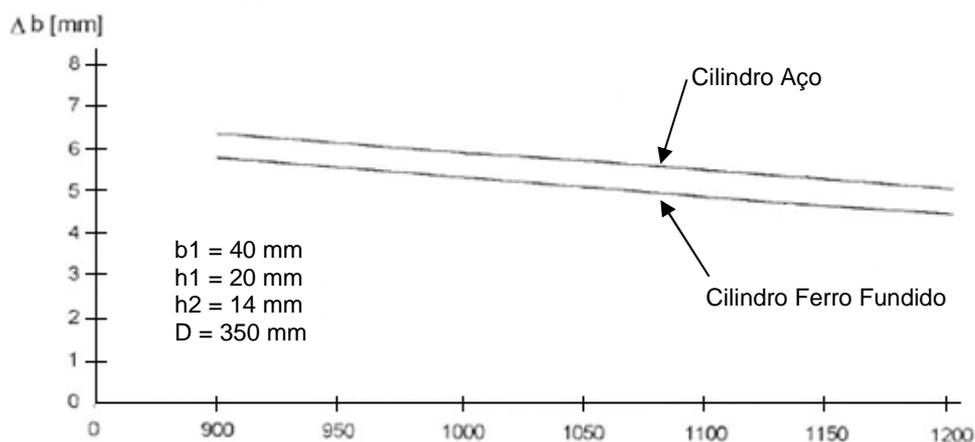


Figura 3.13 – Influência da temperatura de laminação assim como tipo de material dos cilindros sobre o alargamento (CODA, 2008).

- Influência da largura inicial do material

Dado que a resistência ao escoamento do material no sentido transversal é muito alta para esboços cuja largura inicial seja significativamente maior que a altura inicial, o alargamento pode ser reduzido quanto maior for à largura inicial do material. Tal relação pode ser muito bem evidenciada pela prática de laminação chapa ou tiras na qual não se observa alargamento significativo durante o processamento. A Figura 3.14 a seguir demonstra essa relação.

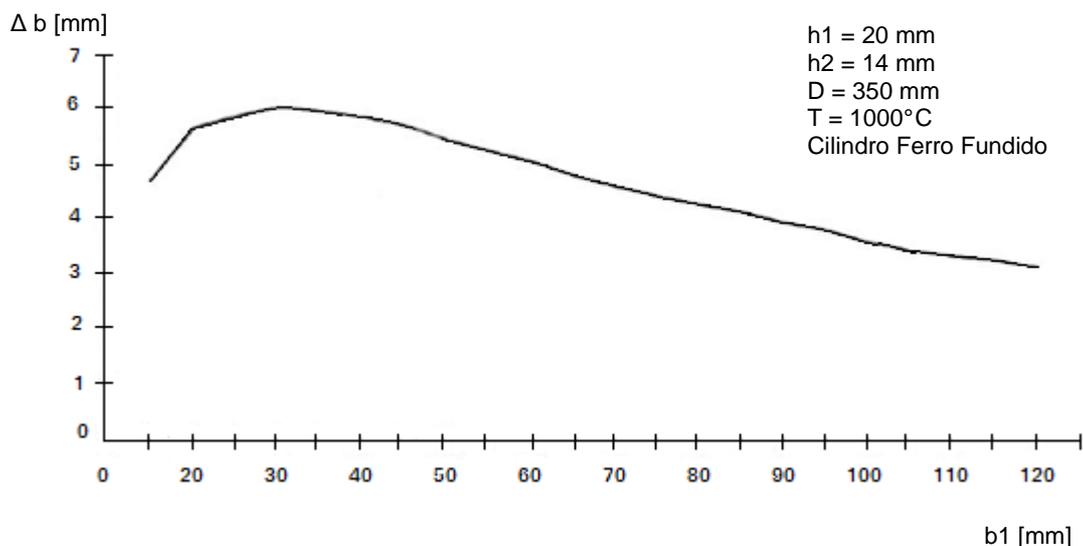


Figura 3.14 – Influência da largura inicial sobre o alargamento (CODA, 2008).

- Influência da composição química do aço

O grau de alargamento do material também depende da sua composição química. Constituintes individuais da liga possuem influência de diferente magnitude sobre o alargamento. As seguintes propriedades podem ser esperadas na determinação do alargamento citadas individualmente pelo constituinte de liga.

- Carbono: seu aumento resulta no aumento do alargamento para materiais não ligados.
- Cromo: ao lado dos aços ligados ao manganês, os aços ao cromo ferríticos exibem maior tendência ao alargamento. Para uma mesma composição de carbono, quanto maior o teor de cromo, maior será o alargamento.
- Manganês: aumento no teor provoca aumento significativo no alargamento.
- Níquel: produz efeito de reduzir o alargamento quando aumentado seu teor. Aços ao cromo-níquel têm o forte efeito do cromo sobre o alargamento reduzido pelo efeito do níquel.

3.1.3 – Seqüências de calibração na laminação de longos

De acordo com CODA (2008) a calibração consiste na distribuição da deformação total desejada em um conjunto de deformações intermediárias. Estas deformações intermediárias são denominadas passes de laminação, e os diferentes conjuntos de passes são denominados de seqüência de calibração.

Considera-se um bom projeto de calibração aquele capaz de garantir processamento estável em termos operacionais e de qualidade do produto final. A meta dos que trabalham com calibração é garantir a produção da dimensão desejada atendendo as tolerâncias dimensionais especificadas, qualidade interna e superficial sem defeitos e de menor custo possível. De acordo com ERIKSSON (2004) a função dos canais de laminação é reduzir área da seção transversal e alongar a barra eficientemente com quantidade controlada de alargamento.

Em produção, defini-se uma seqüência de passes pela disposição de dois ou mais canais ou cadeiras de laminação. Em geral, na laminação de barras com arranjo contínuo, podem-se observar as cadeiras de laminação dispostas de duas maneiras diferentes (Figura 3.15): todas as cadeiras dispostas na posição horizontal ou as cadeiras dispostas horizontalmente e verticalmente um passe após o outro. No primeiro caso, para que ocorra a laminação da superfície livre de material, superfície não laminada na região da luz entre canais, e boa distribuição de temperatura na seção transversal do laminado, o material é torcido antes de entrar no passe seguinte.

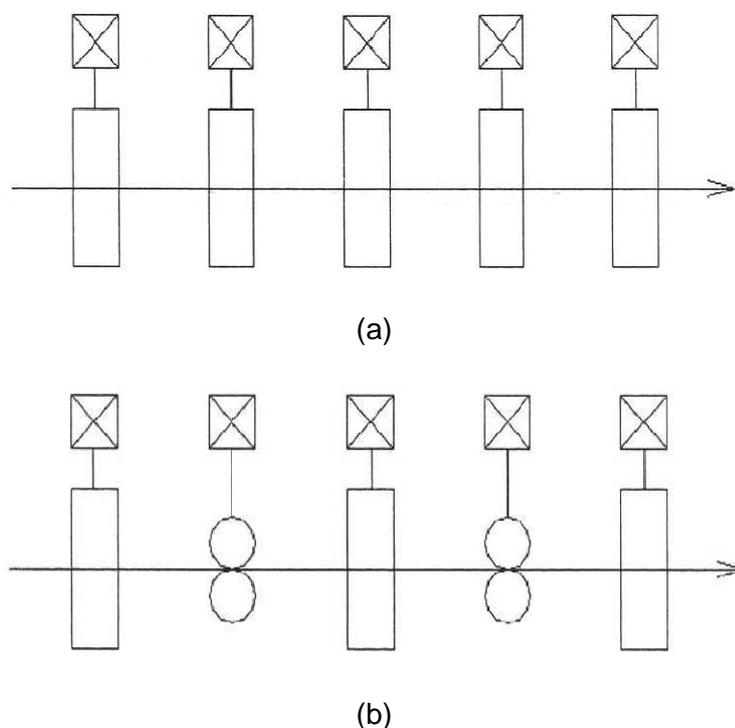


Figura 3.15 – Vista superior esquemático do arranjo das cadeiras de laminação contínua. (a) arranjo contínuo horizontal: opera com torções do material laminado e (b) arranjo horizontal/vertical: opera sem torção do material laminado.

Seqüências comuns de calibração utilizadas na laminação de longos são classificadas como desbaste, intermediária e acabador e em geral, a título de exemplo, seguem como abaixo (CODA, 2008).

- Desbaste:

Caixa-caixa;

Diamante-diamante;

Quadrado-oval sueco-quadrado;

Quadrado-diamante-quadrado;

Redondo-oval-redondo (em laminadores contínuos e com alguns cuidados especiais);

Quadrado-oval-quadrado (com cuidados especiais);

Caixa-oval-quadrado ou redondo;

Duplo oval-oval.

- Intermediário:

Quadrado-oval-quadrado;

Quadrado-diamante-quadrado;

Redondo-oval-redondo;

Falso redondo-oval-falso redondo;

Oval-oval.

- Acabadora:

Redondo-oval-redondo (produção de vergalhão);

Redondo-oval-redondo (barras lisas);

Quadrado-diamante-quadrado;

Chato-chato;

Chate-Passe canteador-chato;

Cantoneiras (sistema borboleta);

Cantoneiras (sistema abas retas);

Perfil T;

Perfil U.

Reduções médias para algumas seqüências utilizadas industrialmente foram apresentadas por ERIKSSON (2004) de acordo com a Tabela III.1.

Tabela III.1 – Reduções médias para algumas seqüências de passes.

Seqüência de passe	Redução média (%)
Quadrada-oval	25
Falsa redonda-oval	17
Redonda-oval	20
Diamante-quadrada	24

A seguir serão apresentadas principais características das seqüências de passes mais comuns em laminação de barras ou fio-máquina de acordo com KOSAC (1976).

- Seqüência quadrada-oval

Essa seqüência é utilizada para seções quadradas (Figura 3.16) menores que 100 mm e geralmente utilizada para seções quadradas de 55 a 60 mm. Diferentes configurações de ovais (Figura 3.17) são utilizadas nesse tipo de seqüência e a mais comum é a oval de raio simples. Deve-se tomar o máximo de cuidado no dimensionamento do projeto para a seqüência oval-quadrado, pois altas reduções tendem a formar frisos na luz (bigode) devido ao alargamento demasiado (Figura 3.10) (CODA, 2008).

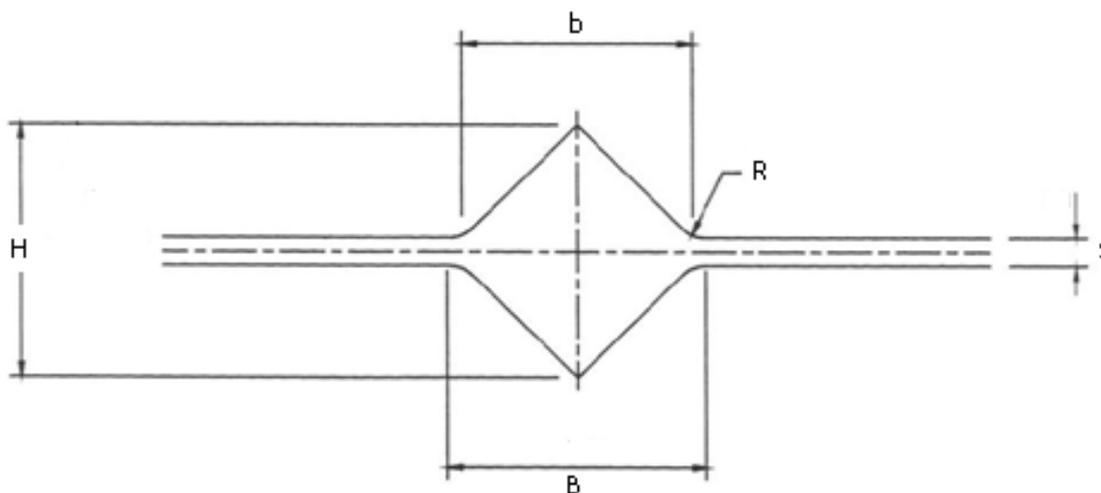


Figura 3.16 – Dimensões do canal quadrado (CODA, 2008).

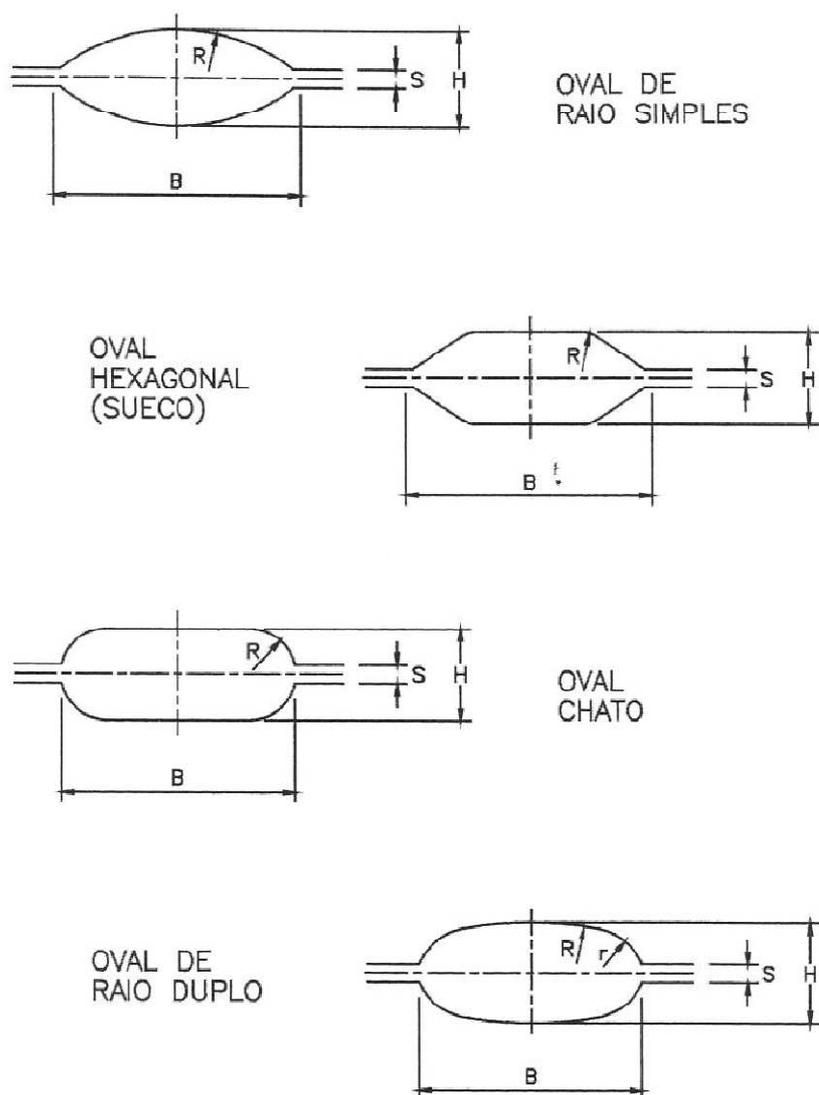


Figura 3.17 – Diferentes tipos de configuração para o canal oval (CODA, 2008).

Nessa seqüência o esboço laminado após o passe de seção quadrada é girado em 45° antes de entrar no passe seguinte oval para melhor estabilidade da peça laminada. Após redução, o esboço de seção oval é girado em 90° antes de entrar no passe seguinte quadrado. De acordo com trabalho de FILIPOVIC (2006) essa seqüência não é recomendada para laminação de seções pesadas, mas é muito utilizada na etapa de laminação intermediária. Guias de laminação são normalmente utilizadas para estabilizar as barras ovais antes de entrar no canal quadrado.

As vantagens oferecidas pela seqüência quadrado-oval são como seguem: esse tipo de seqüência é muito utilizado quando se deseja maiores reduções, a fim de obter alta produtividade de material acabado com exigência de poucos passes, vasta amplitude

de aplicação, comparativamente uniforme distribuição de temperatura da seção quadrada para a oval devido ao giro do material laminado após cada passe, boa descarepação devida a intensa redução em cada passe e produto final com tensão interna moderada.

Por outro lado as desvantagens são: pouca flexibilidade para o canal quadrado, maior tendência a formação de dobras e trincas, medidas não uniforme do produto, desgaste irregular dos cilindros e especialmente no caso da seção oval entrando no canal quadrado, devido a pobre condição de mordida.

- **Seqüência falso redondo-oval ou redondo-oval**

Compreende a faixa de material com área menor que 3000 mm². Essa seqüência é mais comumente utilizada em extensão da série quadrado-oval e então normalmente adotada para a etapa intermediária e também para trens acabadores. Era mais utilizada no passado para laminação de aços ligados devido às preocupações não estarem ligadas ao alongamento, mas a boa distribuição de temperatura para evitar trincas e a uniforme redução entre passes para minimizar tensões internas no material final. Atualmente tem se usado essa seqüência principalmente quando as tolerâncias dimensionais desejadas no produto final são bastante restritas.

Várias configurações de seqüência falso redondo-oval são utilizadas e os canais ovais mais freqüentemente adotados são oval de raio duplo, oval de raio simples e oval chato (Figura 3.17). De acordo com FILIPOVIC (2006) a capacidade de redução é normalmente em torno de 17% por passe, mas pode ser consideravelmente maior quando usado o canal oval chato. Nessa seqüência pode ser utilizado o arranjo de cadeiras na posição horizontal havendo necessidade de girar ou torcer a barra para entrada do passe seguinte (Figura 3.15-a). Mas normalmente é utilizado o arranjo de cadeiras na posição horizontal/vertical (Figura 3.15-b) na qual não há a necessidade de girar a barra. Rolos guias são utilizados para estabilizar a entrada da barra oval no canal falso redondo. De acordo com KOSAK (1976), o alongamento total para a seqüência falso redondo-oval e/ou redondo-oval, em ambos com o oval como intermediário, é aproximadamente 22% para bitolas menores (equivalente a redondo de 7,5 mm) e 38% para bitolas maiores (em torno de 55 mm para laminadores de barras comerciais).

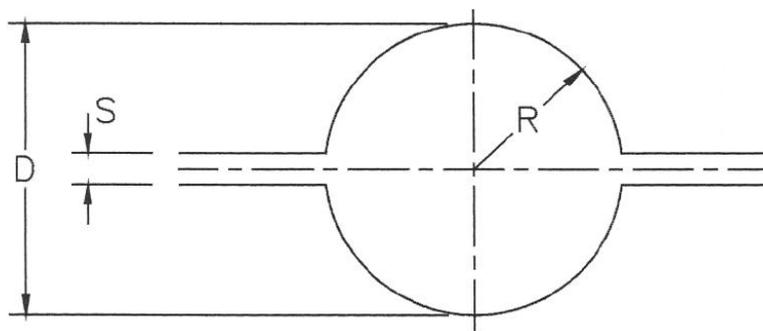


Figura 3.18 – Dimensões do canal falso redondo ou redondo (CODA, 2008).

- **Seqüência caixa-caixa**

Normalmente utilizado em desbaste de baixa velocidade (1,5 a 2,5 m/s). Esse tipo de seqüência é indicado para médias reduções em seções pesadas. Podem ser utilizadas para seções quadradas de lado 130 a 60 mm. Suas vantagens são boa remoção da carepa, boa condição de agarre e quando usado canais com fundo abaulado (Figura 3.19) permite um agarre progressivo.

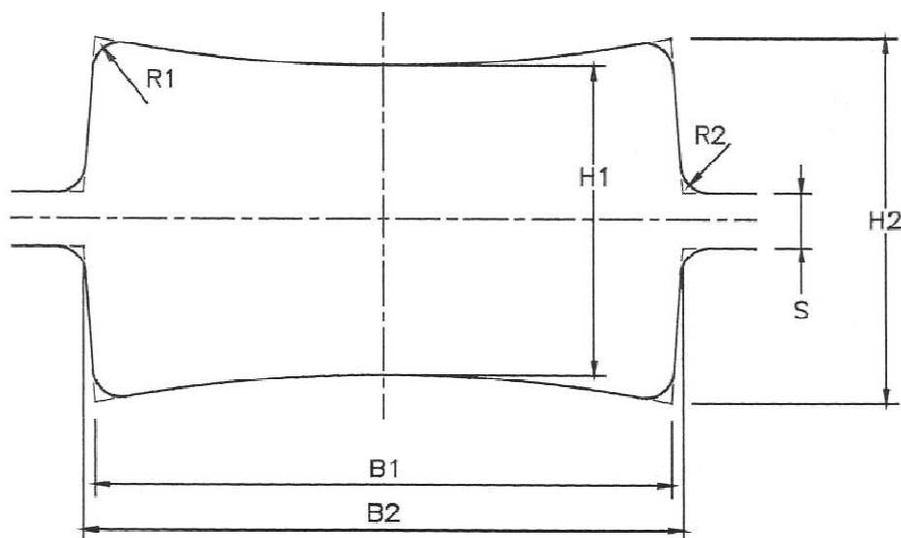


Figura 3.19 – Canal caixa com fundo abaulado (CODA, 2008).

3.1.4 – Tensão entre passes

Um fator importante para a laminação de longos é a tensão entre passes existente nas laminações do tipo contínua, ou seja, quando há laminação de passes em simultaneidade. Em geral essa tensão é evitada o tanto quanto possível devido à tendência a formação de defeitos como a variação dimensional provocada pelo fato de

que as regiões da barra de início e fim de laminação não serem laminadas sobre tensão. O controle inadequado da tensão entre passes pode encher indevidamente os canais provocando defeitos como bigode e dobras (ERIKSSON, 2004).

A operação do laminador contínuo exige controle da vazão de material nos passes de acordo com a Figura 3.20.

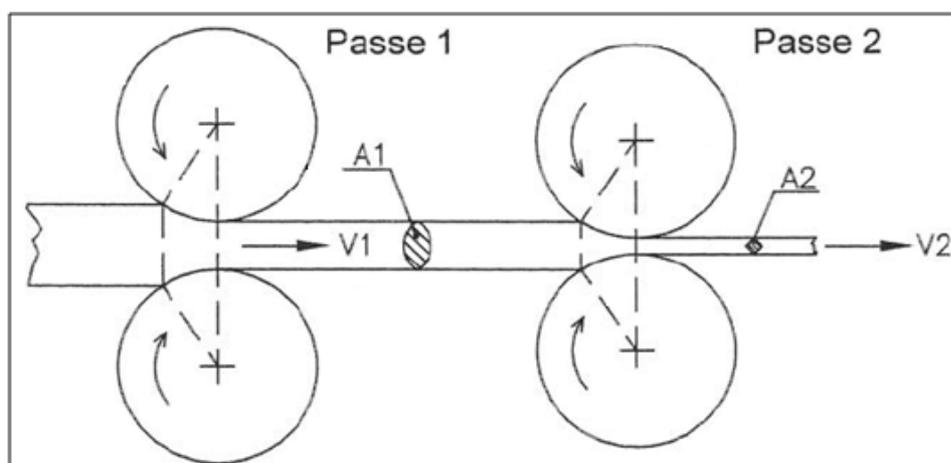


Figura 3.20 – Relação de vazão de material entre passes simultâneos na laminação contínua (CODA, 2008).

A relação de vazão de material (Q_1 e Q_2) entre passes na laminação contínua pode ser expressa, com base na Figura 3.20, como segue:

$$\text{Vazão do passe 1: } Q_1 = A_1 \times V_1; \quad (3.31)$$

$$\text{Vazão do passe 2: } Q_2 = A_2 \times V_2; \quad (3.32)$$

Sendo:

A1: área da seção transversal do material laminado após passe 1;

V1: velocidade de laminação após passe 1;

A2: área da seção transversal do material laminado após passe 2;

V2: velocidade de laminação após passe 2.

Através da vazão de material pode se observar as seguintes situações de acordo com CODA (2008):

- $Q_2 > Q_1$ – Tração entre passes 1 e 2;
- $Q_2 < Q_1$ – Laço entre passes 1 e 2;
- $Q_2 = Q_1$ – Ideal

As máquinas de laminação em operação contínua trabalham com controle do laço de acordo com a Figura 3.21. O sensor de foto-célula fica constantemente medindo a altura real do laço e informando para o sistema de controle que compara com *setpoint* de referência para altura do laço. Quando a altura real do laço tende a sair da faixa de referência, o sistema de controle atua na velocidade de laminação corrigindo a velocidade do motor através do sistema drive.

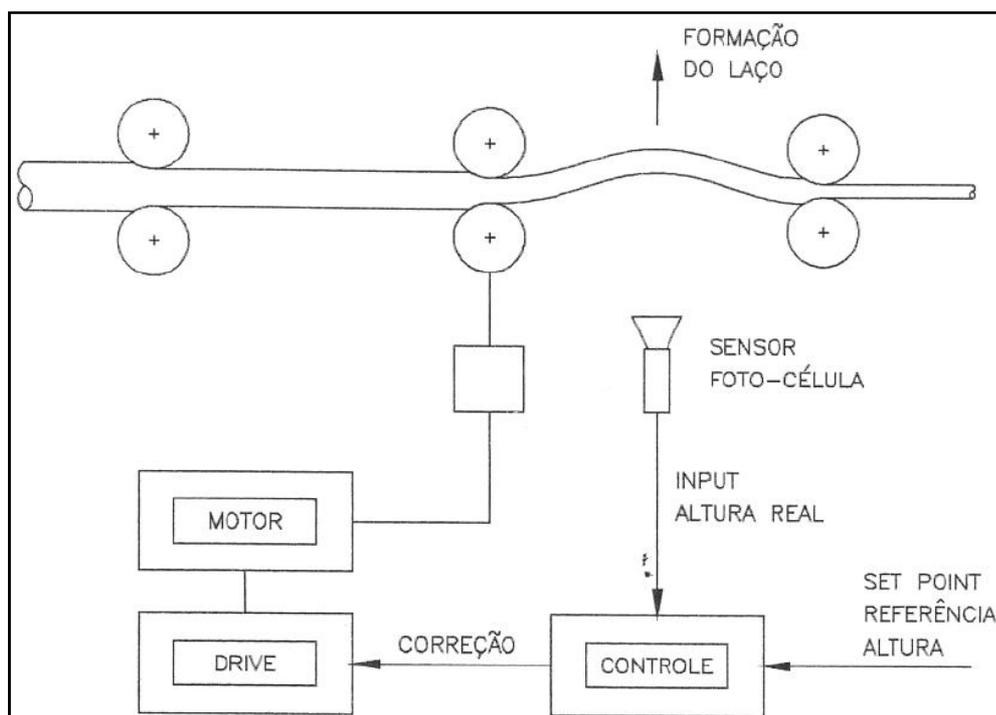


Figura 3.21 – Controle do laço entre passes durante operação na laminação contínua.

3.2 – Defeitos em laminação de longos

Atualmente, a exigência de produtos longos sem defeitos tem aumentado significativamente, dada a competitividade e necessidade de produtos com alto grau de confiabilidade. Produtos que serão posteriormente processados para produção de partes mecânicas (Figura 3.22), principalmente por estampagem ou trefilação devem estar livres de defeitos superficiais, pois podem iniciar trincas no processamento ou falhar prematuramente durante o uso.

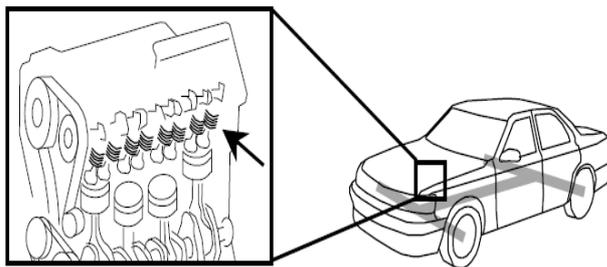


Figura 3.22 – Molas de alta qualidade para aplicação automotiva (SHINOHARA, 2005).

A identificação da origem dos defeitos nem sempre é uma investigação trivial. Muitos defeitos podem ter sido evoluídos na etapa de laminação, mas nem sempre sua origem está associada a essa etapa. Existem diversas fontes de defeitos tais como os formados durante o lingotamento convencional por não ter sido lingotado apropriadamente ou em temperatura correta. No lingotamento contínuo tem se observado que a razão primária para formação de trincas de quina é o resfriamento não uniforme da seção do tarugo sendo solidificada, levando a concentrações de tensões nessa região (FILIPOVIC, 2006). Durante a laminação têm-se observado defeitos causados por canais com enchimento irregular, conhecidos como dobras ou bigodes, que podem ter sido resultado de reduções muito altas ou impróprio ajuste dos canais. Quando defeitos superficiais ocorrem durante a etapa de laminação podem ser identificados na etapa de inspeção através de testes como o ensaio de “upset”. A Figura 3.23 apresenta alguns defeitos típicos encontrados em laminação.

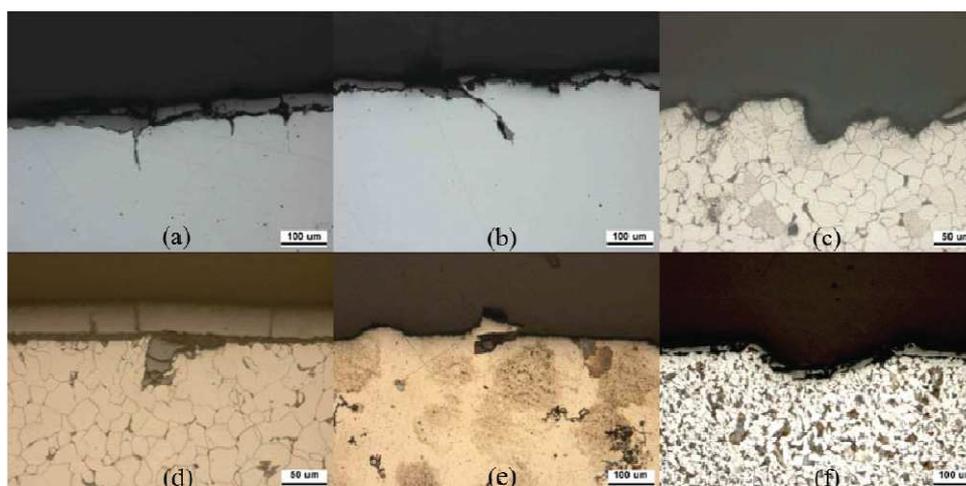


Figura 3.23 – Defeitos encontrados em laminação de fio-máquina ou barras. (a) trincas, (b) dobras, (c) rugosidade, (d) carepa, (e) incrustação, e (f) riscos (SON, 2007).

Uma vez que os defeitos podem ser identificados durante a etapa de inspeção como anteriormente citado, é essencial a correta classificação e identificação da origem do defeito para tomada de decisão durante o processo de laminação. Uma vez identificado que os defeitos são oriundos de operação ou ajuste inadequado na laminação, paradas para correção do defeito serão necessárias e podem aumentar o custo de produção do material. Várias empresas têm buscado aumentar a eficiência da operação através da melhoria na prática de operação e também buscando melhorias na qualidade superficial do material. De acordo com o trabalho de LIM (2000), a ocorrência de defeitos como rugosidade excessiva (Figura 3.24) pode ser evitadas atuando tanto sobre a qualidade da matéria-prima através da forma da seção transversal (tamanho do raio de canto do tarugo) quanto através de variáveis do processo de laminação como temperatura de laminação, forma dos canais do cilindro, tensão na laminação, luz entre canais e outras de acordo com a Figura 3.25.

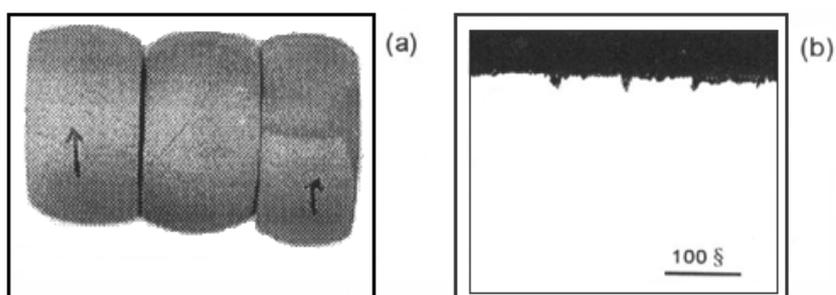


Figura 3.24 – Rugosidade identificadas após laminação de fio-máquina (a) através de ensaio “upset” e por microscopia ótica (LIM, 2000).

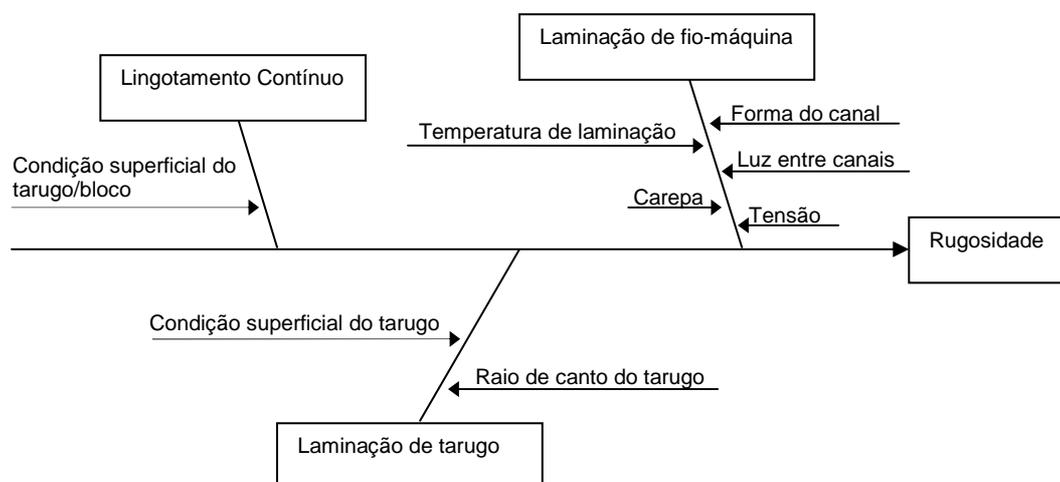


Figura 3.25 – Fatores que afetam a ocorrência de rugosidade na laminação de fio-máquina de acordo com LIM (2000).

3.2.1 – Principais tipos de defeitos em laminação de barras ou fio-máquina

O defeito de desalinhamento da seção transversal (Figura 3.26) da barra ou fio-máquina ocorre devido ao desajuste axial dos rolos de laminação. Pode gerar dobras durante a laminação.

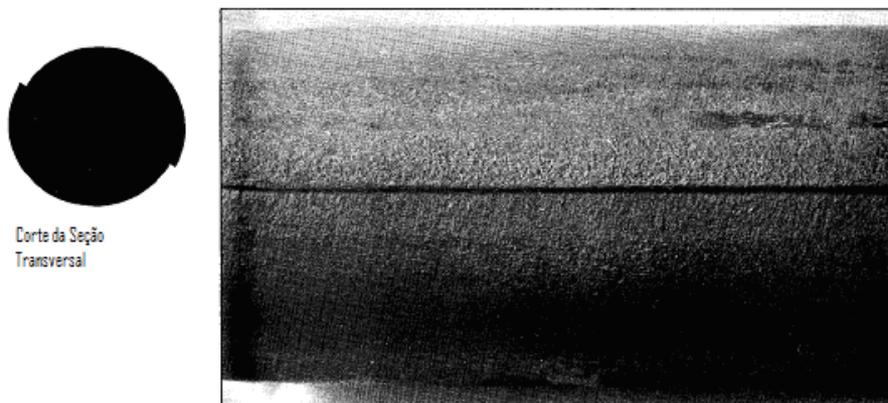


Figura 3.26 – Aspecto do defeito de desalinhamento da seção transversal [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].

Dobras são defeitos que apresentam inclinação de aproximadamente 30° a partir da superfície visualizado pela seção transversal da Figura 3.27. Formado pelo dobramento de material sobre a superfície da barra ou fio-máquina, mas sem ocorrência de caldeamento das superfícies. Geralmente as dobras ocorrem a partir de discontinuidades presentes no tarugo que irão desenvolver durante o processo de laminação. Podem ocorrer em uma posição, ou em duas dobras separadas por 180° ou até por duas linhas de dobras adjacentes. Podem ser detectadas por ensaio de “*upset*” ou através de ensaio de torção podendo aflorar a superfície do material testado com poucas voltas.

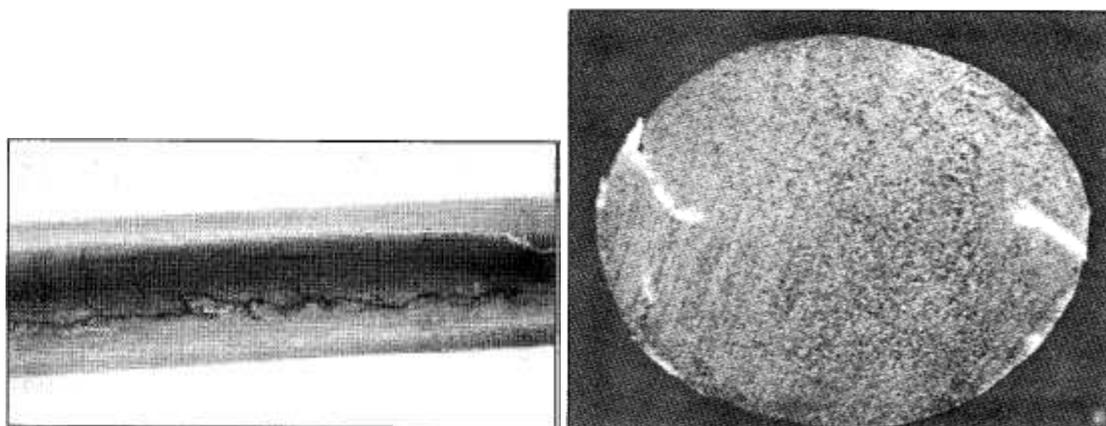


Figura 3.27 – Aspecto do defeito de dobras em fio-máquina [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].

Bigodes são protuberâncias que podem ocorrer de um ou dos dois lados da barra ou fio-máquina causados pelo fato de que a seção a ser laminada seja muito larga para o passe. Geralmente ocorre devido ao desalinhamento dos rolos, alargamento excessivo nos canais, tensão entre passes ou pelo inadequado alinhamento da barra aos canais.



Figura 3.28 – Aspecto do defeito bigode em fio-máquina [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].

Riscos (Figura 3.29) são endentações longitudinais causadas por atrito mecânico da barra com alguma protuberância durante o processo de laminação. É comum a ocorrência desse defeito em etapas posteriores ao de laminação como no transporte do material dentro da fabrica ou mesmo durante a entrega para o cliente.

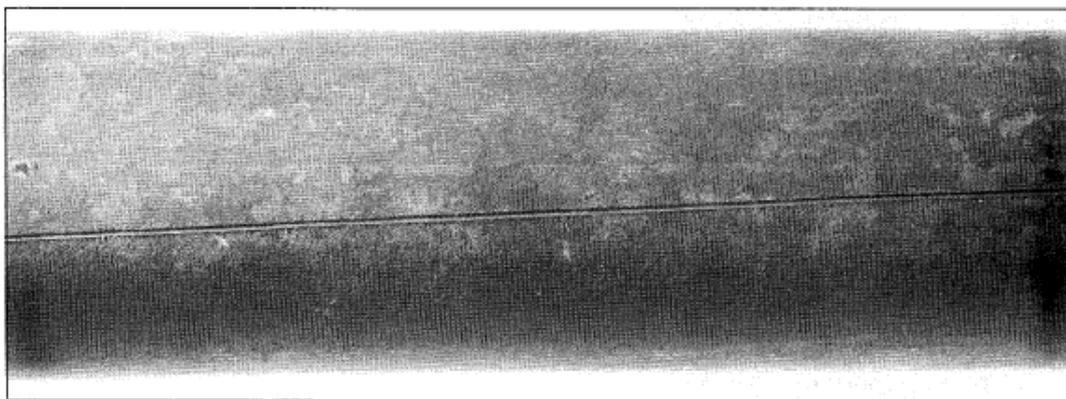


Figura 3.29 – Aspecto de riscos em fio-máquina [manual de defeitos da A.I.S.I – Technical Committee on Rod and Bar Mills].

3.3 – O Método dos Elementos Finitos

Durante as últimas décadas, o desenvolvimento de tecnologia vem se tornando um fator preponderante para competitividade entre as indústrias do setor metal-mecânico. Devido à acirrada disputa pelo mercado mundial, busca-se cada vez mais produzir componentes com menor custo, melhor qualidade final e com maior valor agregado em cada etapa de produção. No caso da laminação, a obtenção de seqüência de produção ideal é complicada e muitas vezes obtida por métodos empíricos, ou seja, através de experiências realizadas anteriormente (KOSAK, 1976). Isso leva à realização de muitos testes e ajustes, que tornam o projeto caro e dependente dos recursos humanos muitas vezes não disponíveis.

Através de análise via simulação numérica é possível reduzir o tempo de projeto, além de eliminar o dispendioso método de “tentativa e erro”, sendo possível analisar o enchimento dos canais durante os passes de laminação, evolução de defeitos no material laminado, distribuição de temperatura ao longo do material, tensões e grau de deformação.

Dentre das técnicas de simulação numérica mais utilizadas, destaca-se o método dos elementos finitos que, segundo BICKFORD (1994), consiste na subdivisão de um corpo contínuo em determinado número finito de elementos. A esta subdivisão dá-se o nome discretização geométrica ou espacial em que os elementos individuais são conectados entre si através de nós. Este conjunto de elementos denomina-se malha.

A amplitude de aplicação desta ferramenta, devido ao poderio dos modelamentos físicos e matemáticos, além do avanço tecnológico das ferramentas computacionais abrange às mais distintas áreas, como: mecânica dos sólidos e fluídos, transferência de calor, vibrações, potencial elétrico, campos magnéticos, comportamentos de materiais em processos de conformação, etc (OLIVEIRA, 2009).

Para uso desta ferramenta, são necessários cuidados nos seguintes pontos (OLIVEIRA, 2009):

- a) Identificação dos princípios físicos básicos que serão adotados como governantes do fenômeno em estudo;
- b) Aplicação dos princípios físicos no desenvolvimento das equações governantes e do modelamento matemático;
- c) Seleção da ferramenta apropriada para análise das equações governantes e do modelamento matemático;
- d) Solução das equações governantes;
- e) Interpretação dos resultados.

Na prática, a análise por elementos finitos consiste em três passos (ZIENKIEWICZ, 1989):

1) Pré-processamento

Esta etapa compreende o modelamento do problema a ser resolvido. Na construção do modelo é realizada a subdivisão da geometria em malhas. Aos nós são aplicadas as condições de contorno, como esforços aplicados e graus de liberdade do elemento. Segundo ZIENKIEWICZ (1989), a escolha do formato e número de elementos da malha é um fator de extrema atenção e demanda a maior parte do tempo na elaboração do trabalho.

2) Análise

Nesta etapa, a ferramenta adequada para processamento dos dados preparados na etapa anterior é selecionada. Os dados são utilizados para alimentar o software escolhido para o processamento e fornecimento da solução matemática das

equações. Normalmente, são utilizados softwares comerciais, mas algoritmos específicos também podem ser desenvolvidos para solução de sistemas.

3) Pós-processamento

Esta etapa consiste na análise, interpretação e verificação dos resultados gerados pelo aplicativo numérico. Utilizando recursos gráficos pode-se visualizar tensões, deformações, distribuição de temperaturas, fluxo de material, força de laminação, torque, taxa de deformação, evolução microestrutural, entre outros.

Nesta fase, devido à precisão requerida na solução das equações, é importante verificar a validade e coerência dos resultados apresentados, analisando a necessidade de um reprocessamento do fenômeno em estudo, alterando, por exemplo, a malha, as condições de contorno e equações governantes caso necessário.

3.3.1 – O método dos elementos finitos aplicado à conformação de metais

Será apresentada a seguir breve descrição das principais formulações para solução das equações que descrevem o processo em estudo segundo trabalho desenvolvido por MAKINOCHI (1996).

3.3.1.1 – Formulação Rígido-Plástica ou Rígido-Viscoplástica

Considerando-se o material rígido-plástico ou rígido-viscoplástico, assume-se que a tensão de escoamento é função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura, desprezando-se a resposta elástica do material quando submetido à deformação plástica.

A utilização da formulação rígido-viscoplástico apresenta vantagens práticas significativas: reduz o tempo e o processamento computacional para a simulação do escoamento do material, além de estimar tensões, deformações, velocidades e temperatura com boa precisão para propósitos industriais (MAGALHÃES, 2008).

3.3.1.2 – Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Estática Implícita

Para análise através deste método, assume-se para o processo uma condição de equilíbrio quase estático, pois se considera que o processamento do material ocorre livre de impacto. O esquema estático implícito de integração no tempo atende a este requisito, mas as condições de equilíbrio devem ser mantidas a cada passo de integração. Este tipo de abordagem apresenta problemas de convergência em função da contínua variação do atrito entre a ferramenta e peça considerados na simulação.

3.3.1.3 – Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Estática Explícita

Com o objetivo de solucionar os problemas de convergência dos resultados, as equações da matriz de rigidez são resolvidas sem interações a cada passo de integração no tempo, limitando-se o tamanho de cada passo, tornando-o muito pequeno. Com isto, grande número de passos torna-se necessário para completar todo o processo de conformação sem acúmulo de erros em função da pequena contribuição dos termos de alta ordem na integração no tempo.

3.3.1.4 – Formulação Elasto-Plástica - Abordagem Dinâmica Explícita

As equações de equilíbrio dinâmico são a base desta formulação. Nesta abordagem, obtém-se solução para determinado passo mais rapidamente que em abordagens estáticas uma vez que a matriz rigidez não necessita ser construída e resolvida, sendo esta a principal vantagem deste método. Com o objetivo de obter a solução, limita-se o incremento de tempo de modo que a amplitude da onda de dilatação não ultrapasse nenhum elemento. Nesta formulação, o tempo de cálculo pode ser reduzido aumentando-se a velocidade do ferramental em até 100 vezes a velocidade real, o que pode levar a erros.

3.3.1.5 – Aplicabilidade e uso da abordagem de elementos finitos para melhoria do processo de laminação.

A capacidade de produção teórica numa laminação é obtida considerando nenhuma perda ou 100% de utilização, 100% de eficiência e 100% de rendimento. Essa capacidade pode ser expressa pela Equação 3.33.

$$C_p = \text{Utilização} \times \text{Eficiência} \times \text{Rendimento} [\%] \quad (3.33)$$

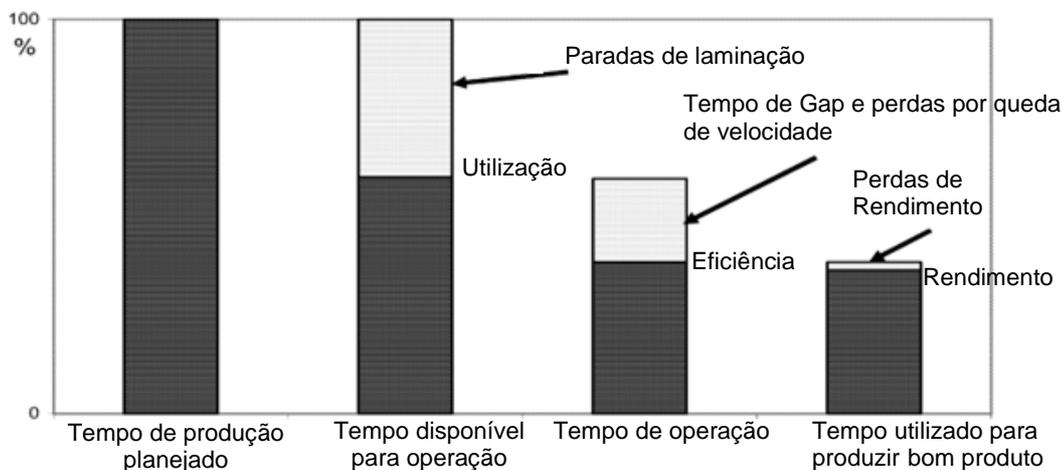


Figura 3.30 – Fontes de perda na produção durante a laminação relacionadas ao tempo de produção planejado.

O primeiro fator é a utilização da laminação ou tempo de operação disponível relacionado ao tempo de produção planejado. O segundo fator mede a eficiência da laminação, que é o tempo de operação relacionado com o tempo disponível para operação. E o terceiro fator, mede o rendimento da planta que é o tempo utilizado para produzir produto de qualidade disponível ao mercado relacionado com o tempo de operação.

$$\text{Utilização} = \frac{\text{Tempo disponível para operação}}{\text{Tempo de produção planejado}} [\%] \quad (3.34)$$

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Tempo de operação}}{\text{Tempo disponível para operação}} [\%] \quad (3.35)$$

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Peso de bobinas aceitáveis}}{\text{Peso de tarugo}} [\%] \quad (3.36)$$

Nas modernas plantas de produtos longos, os principais focos são a produtividade e a qualidade. Alta utilização, eficiência e rendimento resultam em alta produtividade. O método de elementos finitos tem sido utilizado em algumas plantas para melhoria no processo de laminação com o objetivo de melhorar qualidade e competitividade no mercado globalizado.

O trabalho desenvolvido no Laboratório de Pesquisa da Posco por SON (2007) mostra através de simulação numérica, a efetividade da seqüência oval-redonda na laminação de fio-máquina, para redução da profundidade de defeitos superficiais, embora não sendo possível a total eliminação (Figura 3.31). Foi considerada a laminação de um tarugo redondo de 28mm em quatro passes numa seqüência oval-redonda até 19mm no esboço final. A forma, localização, profundidade (d) e abertura (θ) dos defeitos estão descritos na Figura 3.32. Foram estudados dois casos com mesma profundidade inicial $d = 1\text{mm}$ e aberturas de $\theta = 30^\circ$ (caso 1) e 60° (caso 2).

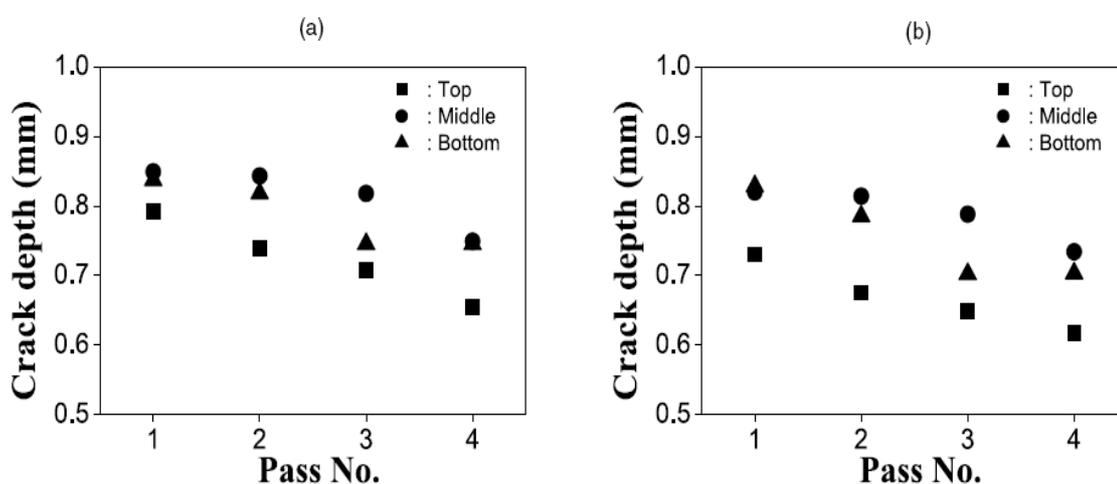


Figura 3.31 – Alteração na profundidade de defeitos superficiais na laminação de quatro passes. (a) caso 1 e (b) caso 2 (SON, 2007).

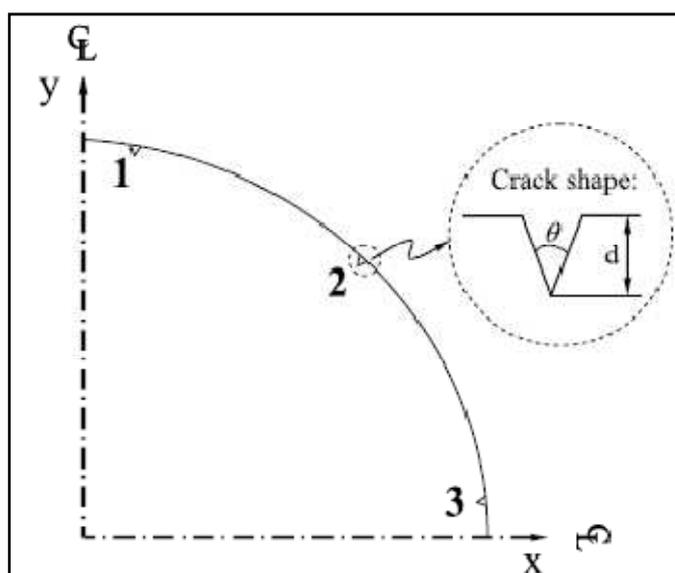


Figura 3.32– Definição da forma e posição dos defeitos superficiais no trabalho de SON (2007).

FILIPOVIC (2007) avaliou a evolução de defeitos artificiais durante a laminação de barras. Os estudos experimentais para o aço AISI 304L foram conduzidos através da laminação de uma barra de 12,5 mm de diâmetro, com defeitos internos de 4 mm de diâmetro, usinado artificialmente. A evolução dos defeitos durante a laminação de uma seqüência oval-redonda de quatro passes (Figura 3.33) foi caracterizada e comparada por simulação numérica. Os resultados numéricos obtidos mostraram boa concordância com os resultados experimentais de acordo com a Figura 3.34.

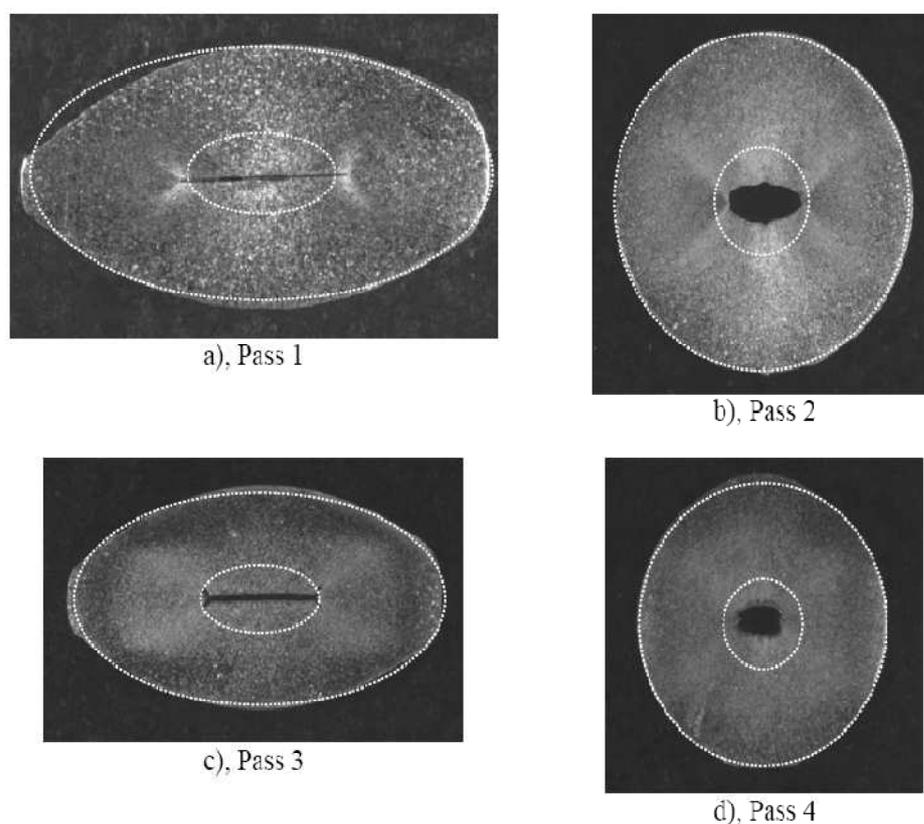


Figura 3.33 – Seções transversais das barras laminadas após cada passe (a-d) em uma seqüência oval-redondo. As linhas inseridas ilustram a contração uniforme da cavidade central pela proporção geométrica (FILIPOVIC 2007).

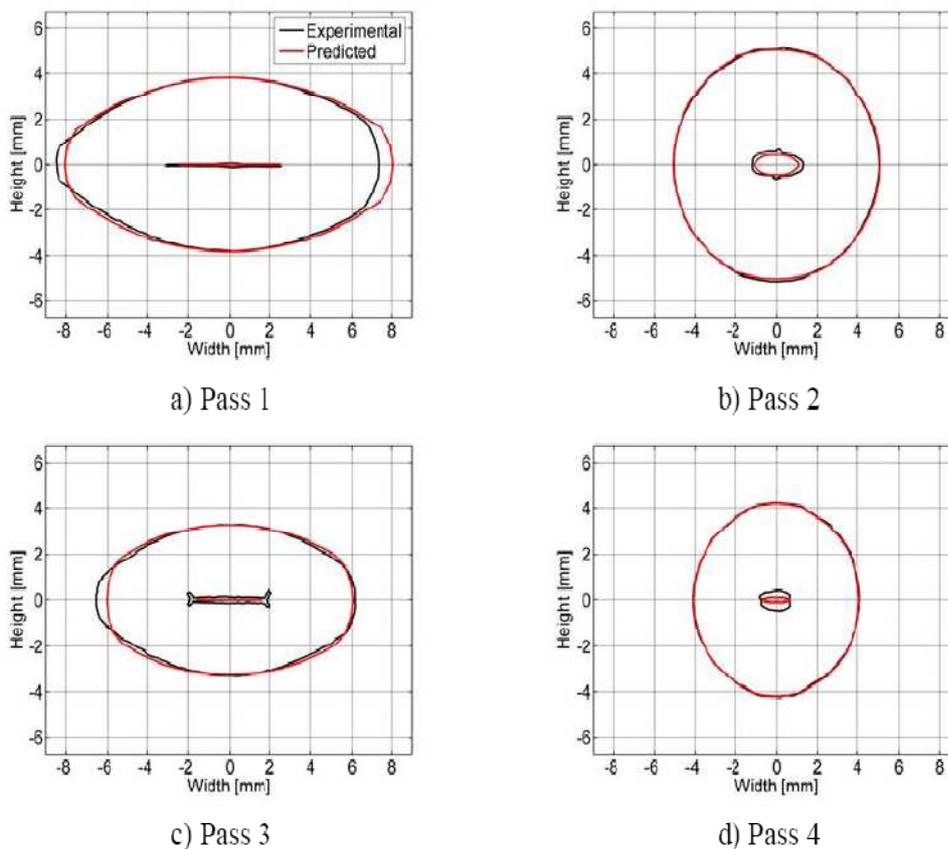


Figura 3.34 – Perfil dimensional comparativo entre a evolução da cavidade experimental (linha escura) e simulação numérica (linha vermelha) após cada passe (FILIPOVIC 2007).

SHINORARA (2005) comparou a evolução de defeitos superficiais na laminação de tarugo quadrado de 160x160mm em dois passes sendo o primeiro oval e o segundo redondo. Foi utilizado pacote comercial 3D do programa de elementos finitos da MSC Software Co. Os resultados da simulação numérica foram comparados com resultados experimentais da laminação de tarugos com riscos em formato de V criados artificialmente. Os defeitos foram criados em três posições da seção transversal de acordo a Figura 3.35 (b) sendo que $a = 40\text{mm}$, $h_r = 4,8\text{mm}$ e $\theta = 30^\circ$. Os resultados obtidos pela simulação estão de acordo com os resultados obtidos experimentalmente como observado na Figura 3.37. A maioria dos riscos em forma de V desenvolveu-se em dobras após laminação. Os riscos que foram laminados na superfície livre, onde não estiveram em contato com os rolos, aumentaram, enquanto os riscos que estiveram em contato foram reduzidos de profundidade e foram sujeitos a tensões de compressão.

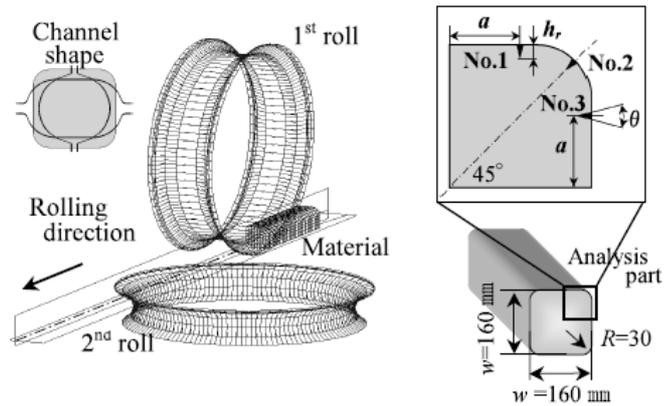


Figura 3.35 – (a) Modelo numérico proposto para laminação do tarugo com defeito dos passes oval-redondo e (b) forma e posição do defeito.

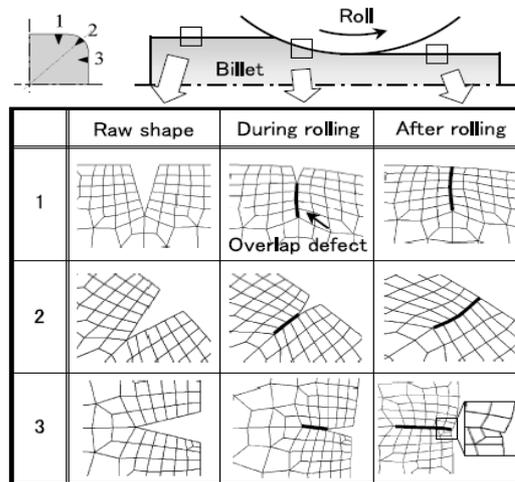


Figura 3.36 – Evolução da forma do defeito durante a laminação.

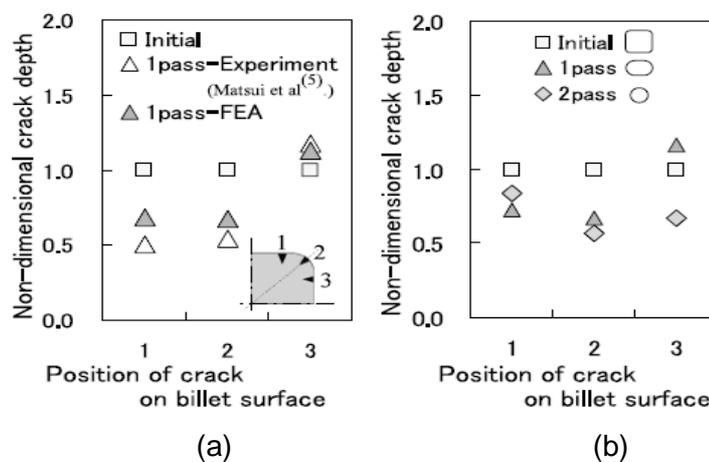


Figura 3.37 – (a) Comparação dos resultados de variação da profundidade dos riscos experimentais e simulação numérica. (b) Variação da profundidade do defeito durante a laminação.

4 – METODOLOGIA

4.1 – Desenvolvimento do trabalho

Pretende-se neste trabalho avaliar a aplicabilidade do método de elementos finitos para estudo de certos parâmetros da etapa de desbaste na laminação de barras redondas como luz entre os canais, atrito, diâmetro dos cilindros de laminação, tensão entre passes e canal de calibração. Todo o estudo de simulação de laminação foi realizado utilizando o software de simulação numérica DEFORM 3D versão 10.0 do fabricante SFTC instalado no laboratório de Engenharia de Produtos da Escola de Engenharia da UFMG. Os resultados dimensionais obtidos pela simulação numérica serão comparados com amostras industriais retiradas em cada passe na etapa de desbaste. Essas amostras foram retiradas durante processamento de um laminador de barras redondas por produtor industrial de barra mecânica comercial que não será identificado. Serão estudados na simulação numérica dois modos de laminação, sendo um pela laminação do material em cada passe individual e o outro pela laminação contínua através do módulo de multi-passe presente no Deform 3D versão 10.0. O material a ser laminado será aço carbono DIN C-15 no qual os dados de comportamento mecânico para simulação numérica se encontram na biblioteca do software DEFORM 3D®. A composição química desse aço, de acordo com a designação DIN17210, está descrita na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Composição química do aço DIN C-15 de acordo com a norma DIN17210.

<i>Elemento</i>	<i>Peso %</i>
C	0.12-0.18
Mn	0.30-0.60
Si	0.15-0.35
P	0.045 (max)
S	0.045 (max)

Fonte: www.acosvic.com.br/tabelas/tabela_02.pdf

A seqüência da etapa de desbaste a ser estudada está de acordo com a Figura 4.1. Essa seqüência tem como objetivo a produção de barras redondas com a etapa de desbaste dividida em sete passes sendo que: a matéria-prima é o tarugo de dimensão

quadrada de seção transversal 130,00x130,00 mm e o esboço redondo final após o passe sete possui diâmetro final em torno de 60,77x60,00 mm. Os dados dimensionais e as disposições das cadeiras, horizontal (H) e vertical (V), de cada passe serão os mesmos do laminador de barras redondas cujas amostras para comparação do modelo numérico foram retiradas. As reduções e as dimensões das seções transversais esperadas de cada passe estão descritas na Tabela IV.2 e foram fornecidas pelo produtor de acordo com modelo teórico utilizado pelo mesmo. Os detalhes do modelo de calibração utilizado pelo produtor não foram fornecidos.

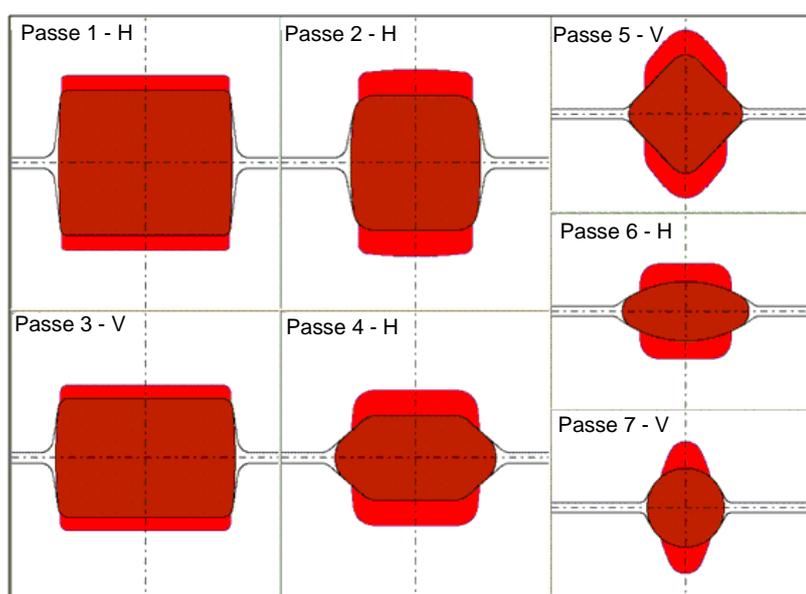


Figura 4.1 – Seqüência de calibração na etapa de desbaste utilizada para simulação por elementos finitos para obtenção de esboço final redondo.

Tabela IV.2 – Reduções e dimensões da seção transversal esperada para cada passe de acordo com modelo teórico do produtor.

<i>Passe</i>	<i>Redução (%)</i>	<i>Dimensão Esperada (mm)</i>
1	14,28	136,43x110,00
2	15,84	141,35x90,00
3	20,12	102,41x102,00
4	31,23	126,92x64,00
5	28,09	89,30x89,52
6	29,26	99,77x45,00
7	17,75	60,77x60,00

4.2 – Parâmetros para simulação numérica do processo de laminação

Visando estabelecer um conjunto de parâmetros para se realizar as simulações numéricas propostas neste trabalho, define-se na etapa de pré-processamento a configuração do software DEFORM 3D[®] atendendo-se todos os pontos necessários à realização de uma simulação que retrate um ambiente real.

Os parâmetros de simulação no pré-processador do DEFORM 3D[®] foram ajustados com as seguintes condições de contorno: formulação rígido-plástica, laminação com deformação plástica incremental (formulação Lagrangiana) e processo com cálculo de temperatura na peça (não-isotérmico) com temperatura inicial de laminação de 1200°C. A temperatura ambiente foi definida como 20 °C. Os cilindros de laminação e o empurrador foram considerados materiais rígidos, uma vez que o foco do estudo não estava no acompanhamento dos fenômenos que ocorrem nestas peças. A temperatura dos cilindros de laminação foi definida como 55°C e do empurrador como 20°C. O tarugo foi definido como um material rígido-plástico.

4.2.1 – Geometrias utilizadas na simulação numérica

A geometria do material a ser laminado (tarugo com dimensional de 130 x 130 x 500mm de comprimento), o cilindro de laminação de cada passe e o empurrador (com dimensional de 140x140mm) foi elaborada no “software” utilizando o módulo “Shape Rolling”. Devido à simetria dos perfis, o material base (tarugo de aço) os cilindros e o empurrador foram desenhados considerando $\frac{1}{4}$ do perfil original de cada item, conforme Figura 4.2.

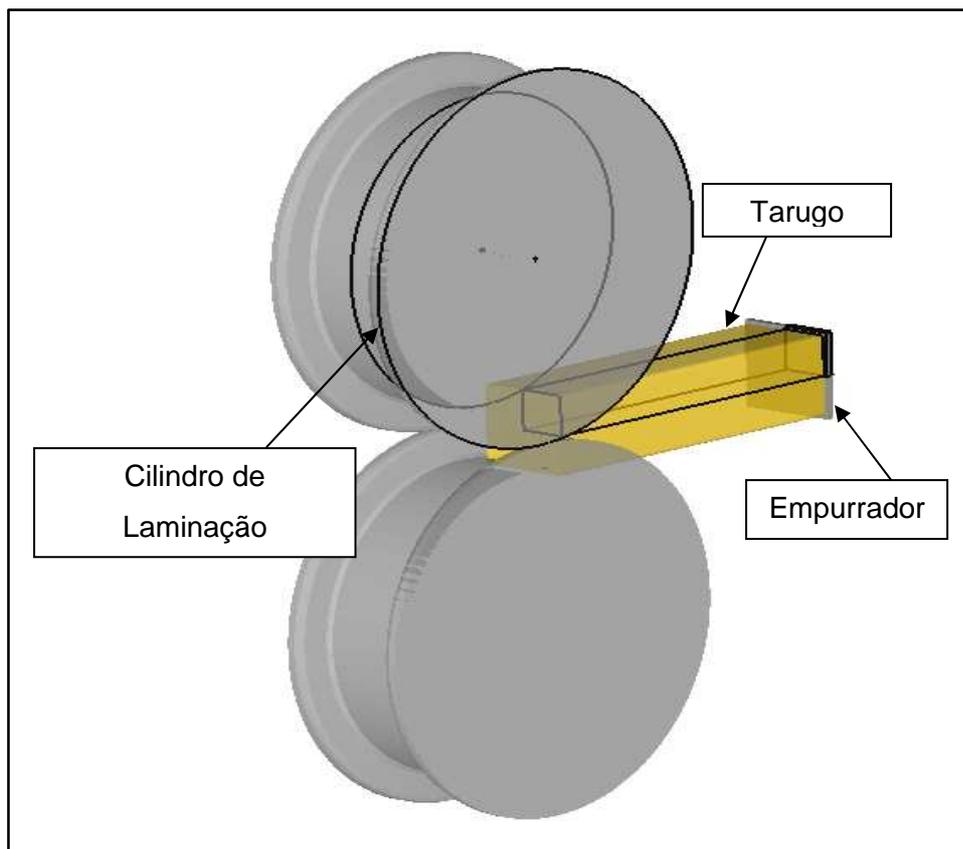


Figura 4.2 – Dimensional característico do projeto de simulação numérica elaborado considerando $\frac{1}{4}$ do perfil de cada item como destacado pelo contorno.

4.2.1.1 – Tarugo

As simulações foram realizadas considerando o aço DIN C-15 presente na biblioteca de materiais do DEFORM 3D[®] na qual os dados de comportamento mecânico já estão definidos no mesmo. Esse material foi definido como rígido-plástico.

O módulo “Shape Rolling” do software permite a criação das geometria 2-D e 3-D do tarugo através de sua biblioteca de geometria primitiva. Foi dimensionado para altura e largura como 65mm ($\frac{1}{4}$ do perfil) e 5 mm de raio de canto. O comprimento total do tarugo foi de 500 mm.

Uma das configurações importantes em simulação por elementos finitos é a discretização da geometria da peça de trabalho. É realizada através da divisão da peça sólida em vários elementos. Quanto maior o número de elementos e menor a dimensão desses, mais precisos serão os resultados da simulação. Contudo, maior

será o tempo necessário para realizar a simulação, pois o volume de elementos a serem resolvidos computacionalmente aumenta consideravelmente. Objetivou-se neste ponto a obtenção de elementos de dimensões aproximadas em todas as faces do material e o melhor perfil de contorno dos elementos na seção do mesmo. A discretização utilizada para o tarugo pode ser visualizada na Figura 4.3. Utilizou-se a criação de 100 elementos na seção 2-D (face transversal). A peça 3D foi gerada pelo software utilizando um número de 72 “layers” distribuídos uniformemente ao longo do comprimento total do tarugo. Dessa forma o tarugo foi criado com cerca de 7.060 elementos e 8.687 nós.

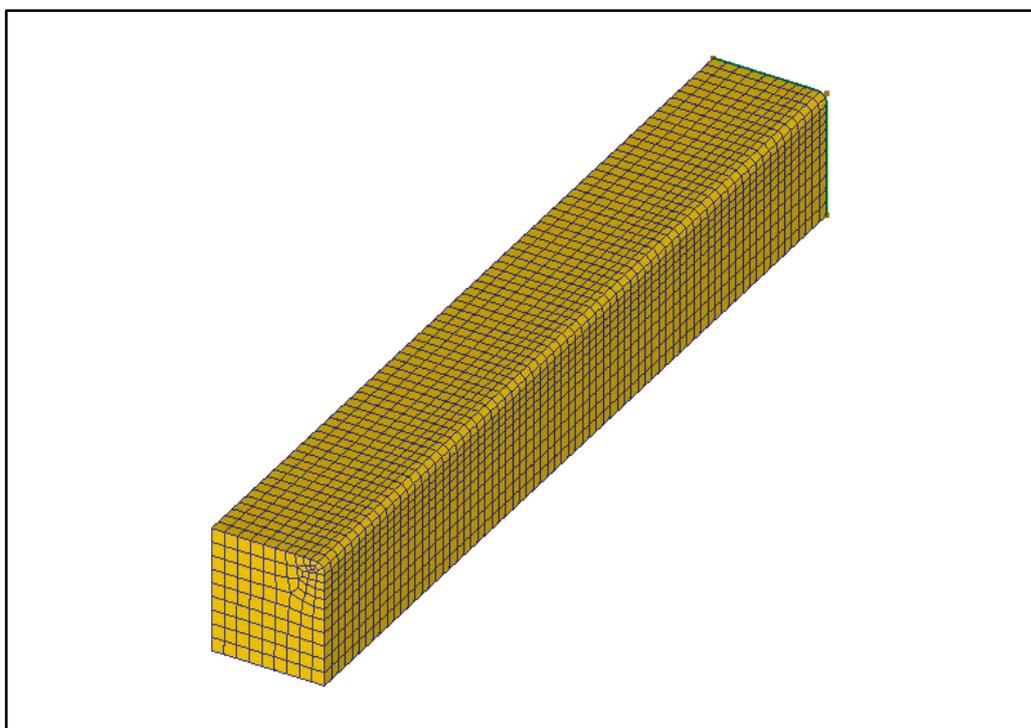


Figura 4.3 – Perfil da malha de nós do tarugo.

4.2.1.2 – Cilindro de laminação

A geometria dos cilindros de laminação da seqüência de desbaste em estudo foi criada a partir das geometrias primitivas presentes na biblioteca do software como mostrado na Figura 4.4. A única exceção foi o passe cinco, canal quadrado, não disponível na biblioteca, cuja seção 2D foi criada utilizando o software SOLID WORKS® e exportada para o DEFORM 3D®.

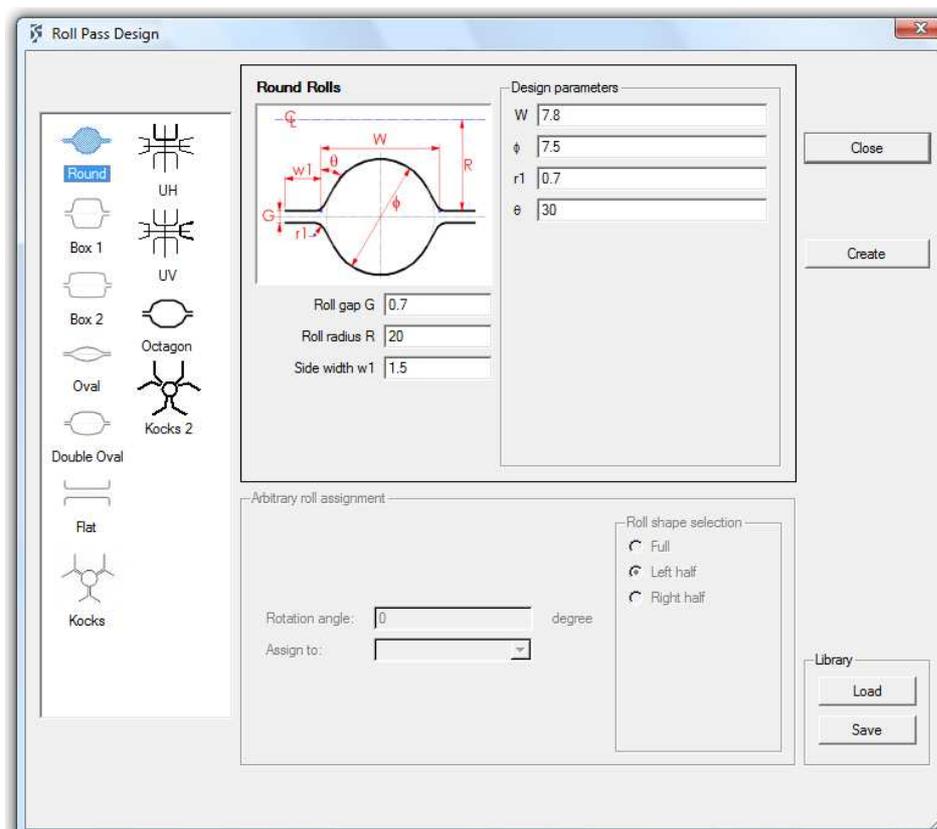


Figura 4.4 – Geometrias primitivas presentes na biblioteca do DEFORM 3D® versão 10.0.

Para criação dos cilindros em 3-D, o número de “layers” tem grande importância. Testes de simulações com número de “layers” de 36, 72 não apresentaram resultados satisfatórios. Nesses dois casos citados, o número de “layers” não foi suficiente para criar uma superfície regular para os cilindros. Nessas simulações teste, o esboço após laminado teve a superfície marcada pelas imperfeições do cilindro (Figura 4.6 (a)). Todo o estudo foi desenvolvido utilizando 108 “layers” para geração dos cilindros em 3-D. A Figura 4.5 mostra os cilindros criados com 36, 72 e 108 layers e a Figura 4.6 mostra o efeito do número de “layers” na simulação numérica para 36 e 108. Observa-se que a simulação com 108 “layers” apresenta melhor qualidade superficial do material laminado o que seria um resultado mais condizente para comparação com dados de laminação real.

No processo de simulação foi adotada a temperatura constante dos cilindros 55°C e velocidade angular constante de 50 rpm (equivalente à 1,57 m/s) para todos os passes. Esses dados são usuais para etapa de desbaste em laminadores de barras industriais.

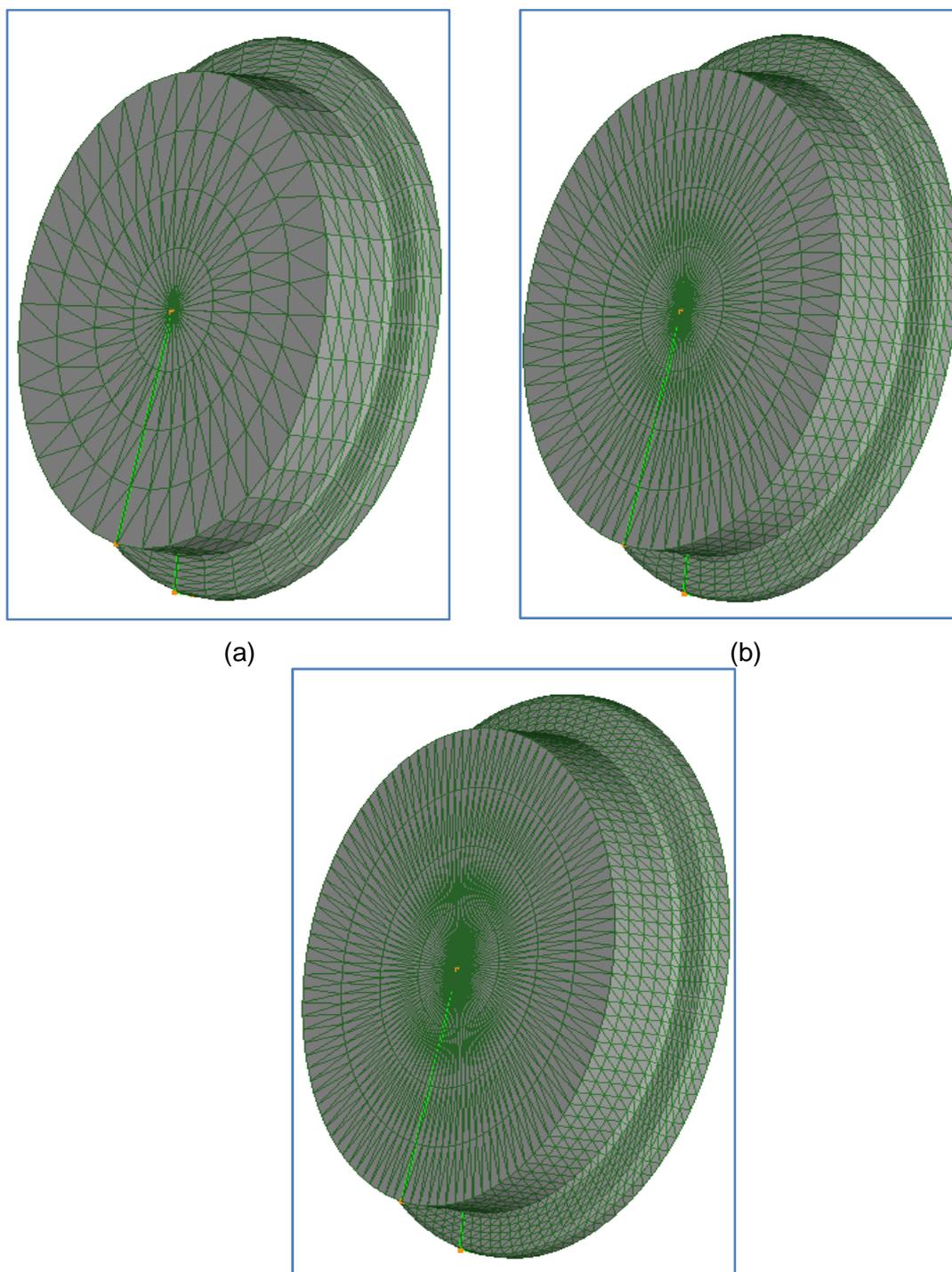
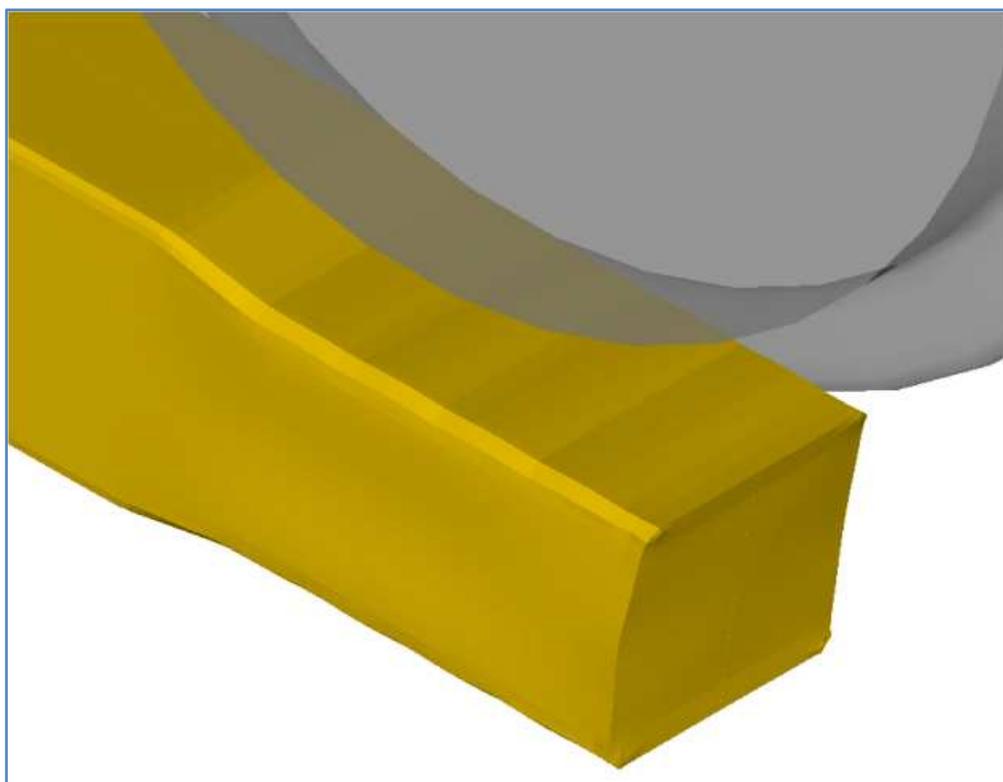
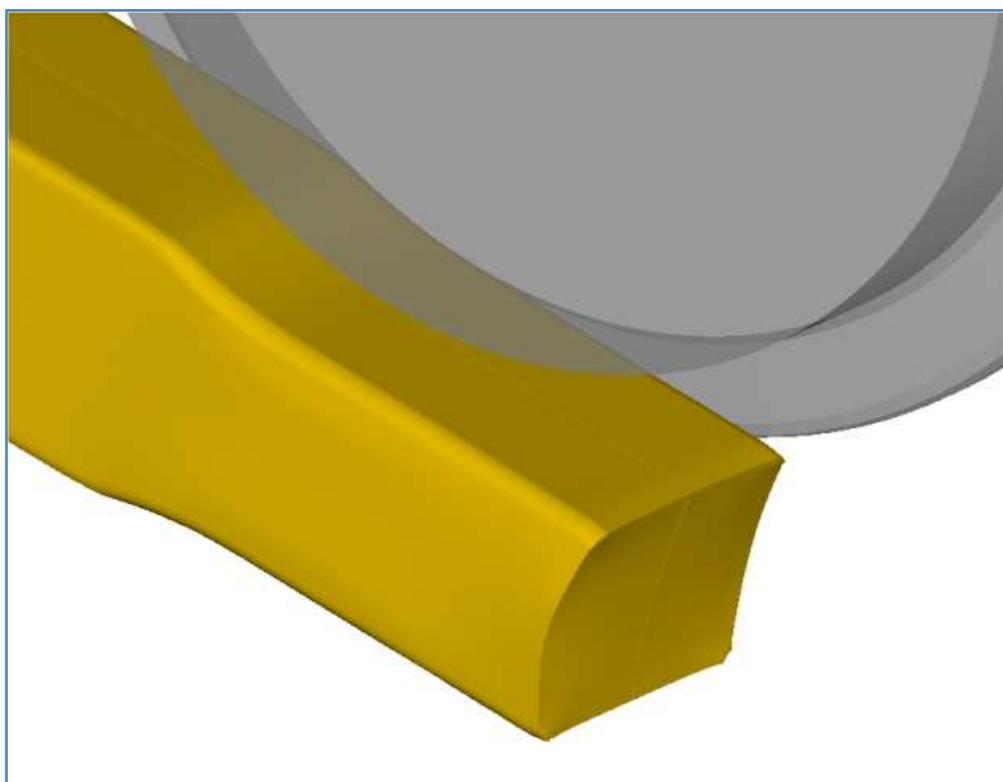


Figura 4.5 – Cilindro de laminação gerado com número de “layers” de: (a) 36, (b) 72 e (c) 108.



(a)



(b)

Figura 4.6 – Efeito do número de “layers” na simulação numérica para (a) 36 “layers” e (b) 108 “layers”.

4.2.2 – Projeto de calibração

Nesse estudo as simulações serão conduzidas com as cadeiras dos passes 1, 2, 4, 6 na posição horizontal e nos passes 3, 5 e 7 na posição vertical girando estas cadeiras em 90° (Figura 4.7). Essa configuração das cadeiras é a mesma do laminador de barras industrial como citado no item 4.1 deste capítulo.

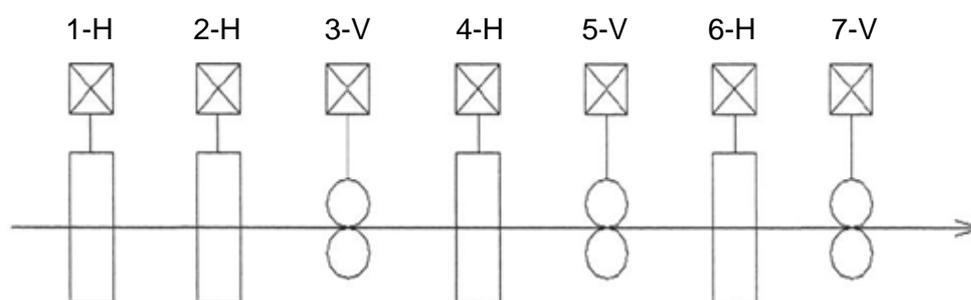


Figura 4.7 – Vista superior esquemática do arranjo contínuo das cadeiras utilizado na simulação da etapa de desbaste.

As simulações numéricas foram divididas em cinco principais estudos de caso na qual os parâmetros do projeto de calibração para a simulação estão descritos nos tópicos a seguir.

4.2.2.1 - Caso 1: Padrão

Nesse estudo considerou-se a simulação numérica de cada passe de laminação individualmente, ou seja, o material é laminado em cada passe não levando em conta efeitos de tensão entre passes presente na laminação contínua.

A Tabela IV.3 a seguir, apresenta as principais relações dimensionais de cada canal da etapa de laminação de desbaste e que serão utilizadas na simulação numérica. As relações dimensionais definidas nesse caso e o raio de cilindro de 300 mm em todos os passes foram baseados na calibração do laminador de barras industrial em estudo cujas amostras de cada passe foram fornecidas para comparação da simulação numérica.

Definiu-se coeficiente de atrito do tipo Coulomb constante de 0,5 em todos os passes para as condições de contato entre o laminador com cilindros de aço e o tarugo durante a laminação. Esse valor de atrito é uma aproximação do valor que as equações de Ekelund (Equação 3.24 e 3.25) definem para o coeficiente de atrito na laminação a quente.

Tabela IV.3 – Principais relações geométricas de cada passe utilizadas na simulação numérica para o Caso 1.

<i>Passe</i>	<i>Canal</i>	<i>Largura</i>	<i>Altura</i>	<i>Largura de Lado</i>	<i>Raio de fundo do canal</i>	<i>Luz entre canais</i>
		<i>W [mm]</i>	<i>H [mm]</i>	<i>W1 [mm]</i>	<i>R1 [mm]</i>	<i>G [mm]</i>
1-H	Caixa	145,00	110,00	20,00	6,00	8,00
2-H	Caixa	148,00	90,00	20,00	8,00	8,00
3-V	Caixa	112,00	100,00	20,00	16,00	8,00
4-H	Oval sueco	140,5	66,00	20,00	15,00	8,00
5-V	Quadrado	93,10	89,6	20,00	14,00	8,00
6-H	Oval	110,60	47,00	20,00	88,1	8,00
7-V	Redondo	65,80	62,00	20,00	--	8,00

4.2.2.2 – Caso 2: Efeito da variação da luz entre canais

Nesse estudo, o objetivo foi estudar o efeito da variação da luz entre canais nos passes 1, 3, 5 e 7 de acordo com a Tabela IV.4 a seguir. Mantiveram-se as mesmas relações geométricas de cada canal, o diâmetro dos cilindros, a condição de laminação passe a passe e coeficiente de atrito Coulomb de 0,5 como descrito no Caso 1.

Tabela IV.4 – Principais relações geométricas de cada passe utilizadas na simulação numérica para o Caso 2.

<i>Passe</i>	<i>Canal</i>	<i>Largura</i>	<i>Altura</i>	<i>Largura de Lado</i>	<i>Raio de fundo do canal</i>	<i>Luz entre canais</i>
		<i>W [mm]</i>	<i>H [mm]</i>	<i>W1 [mm]</i>	<i>R1 [mm]</i>	<i>S [mm]</i>
1-H	Caixa	145,00	110,00	20,00	6,00	7,00
2-H	Caixa	148,00	90,00	20,00	8,00	8,00
3-V	Caixa	112,00	100,00	20,00	16,00	7,00
4-H	Oval sueco	140,5	66,00	20,00	15,00	8,00
5-V	Quadrado	93,10	89,6	20,00	14,00	7,00
6-H	Oval	110,60	47,00	20,00	88.1	8,00
7-V	Redondo	65,80	62,00	20,00	--	7,00

4.2.2.3 - Caso 3: Efeito do coeficiente de atrito

Nesse estudo, o objetivo foi estudar o efeito do coeficiente de atrito Coulomb dado seu efeito sobre o alargamento, modificando esse parâmetro para o valor constante de 0,7 para todos os passes.

Todas as outras considerações como as relações geométricas dos cilindros (Tabela IV.3) e condição de laminação passe a passe foram mantidas de acordo com Caso 1.

4.2.2.4 - Caso 4: Efeito do raio dos cilindros

Dado o efeito de aumento do alargamento com o aumento do diâmetro do cilindro, avaliou-se o efeito dessa variável nos resultados da simulação numérica. O diâmetro dos cilindros em todos os passes foi alterado para 500 mm.

Todas as outras considerações como as relações geométricas dos cilindros (Tabela IV.3), coeficiente de atrito e condição de laminação passe a passe foram mantidas de acordo com Caso 1.

4.2.2.5 - Caso 5: Efeito da tensão entre passes, laminação multi-passe.

Avaliou-se o efeito da tensão entre passes com a simulação numérica utilizando o módulo de multi-passe do DEFORM 3D. Nesse modo de laminação, o material será processado continuamente, resultando na ocorrência de tensão entre os passes quando laminado simultaneamente entre dois passes. Manteve-se a mesma velocidade em todas as cadeiras como definido anteriormente de 50 rpm. Também foi mantida distância igual entre as cadeiras. Como o passe seguinte possui menor área que o anterior, considerando a mesma velocidade entre os passes, a vazão do passe seguinte (Q2) será menor que a do anterior (Q1) como estabelecido pelas Equações 3.31 e 3.32. Sendo assim, de acordo com as relações propostas por CODA (2008) é esperado a formação de laço entre passes.

Todas as outras considerações como as relações geométricas dos cilindros (Tabela IV.3), coeficiente de atrito e diâmetro dos cilindros foram mantidas de acordo com Caso 1.

4.2.3 – Análise de resultados

Obteve-se amostra de cada passe da etapa de desbaste retirada durante uma operação industrial real de laminação para comparação dos resultados dimensionais, redução em altura e de alargamento com os resultados obtidos em cada passe pela simulação numérica de todos os casos propostos.

Através das simulações numéricas propostas e sumarizadas na Tabela IV.5 será avaliado o efeito das variáveis luz entre canais, coeficiente de atrito, raio do cilindro e tipo de laminação em comparação com a simulação do Caso 1 considerada padrão. As comparações serão a partir dos resultados dimensionais, deformação efetiva, redução em altura e alargamento.

Tabela IV.5 – Resumo das variáveis a serem estudadas através de simulação numérica.

Simulação numérica	Relações geométricas dos cilindros	Coefficiente de atrito Coulomb	Raio dos cilindros	Tipo de laminação
	Tabela	μ	R [mm]	
Caso 1 – Padrão	IV.3	0,5	300,00	Passes individuais
Caso 2 – Luz entre canais	IV.4	0,5	300,00	Passes individuais
Caso 3 - Atrito	IV.3	0,7	300,00	Passes individuais
Caso 4 – Raio dos cilindros	IV.3	0,5	500,00	Passes individuais
Caso 5 – Multi-passes	IV.3	0,5	300,00	Multi-passe

5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – Resultados dimensionais

Nesse tópico serão apresentados os resultados dimensionais obtidos na simulação numérica (Caso 1, 2, 3, 4 e 5) em comparação com as amostras industriais e do modelo teórico de calibração utilizado pelo produtor para os 7 passes da etapa de desbaste.

Observa-se que os resultados dimensionais apresentados na Figura 5.1 e Tabela V.1 para a largura (B), obtidos pela simulação numérica através do DEFORM 3D[®] estão de acordo com os valores apresentados pela amostra industrial retirada do esboço durante a laminação pelo produtor de barras. As maiores variações foram encontradas para o esboço obtido no passe seis na qual todos os Casos estudados apresentaram largura superior à medida da amostra. Também nota-se a partir do passe 4, que a

largura (B) dos Casos 1, 2 e 3 foram menores que dos Casos 4 e 5. Além disso, percebe-se que para os Casos 1, 2 e 3 a largura (B) foi significativamente inferior ao da amostra industrial a partir do passe 4 com exceção do passe 6. O Caso 5, laminação multi-passe, apresentou boa concordância para o esboço redondo final obtido no passe 7 para a medida de largura (B) em comparação com a amostra industrial. Os outros casos estudados obtiveram largura (B) em torno de 51 a 53mm para o passe 7 final, sendo menor que o esperado que é em torno de 60mm de acordo com o modelo teórico e a amostra industrial para o esboço redondo final da etapa de desbaste (Tabela V.1).

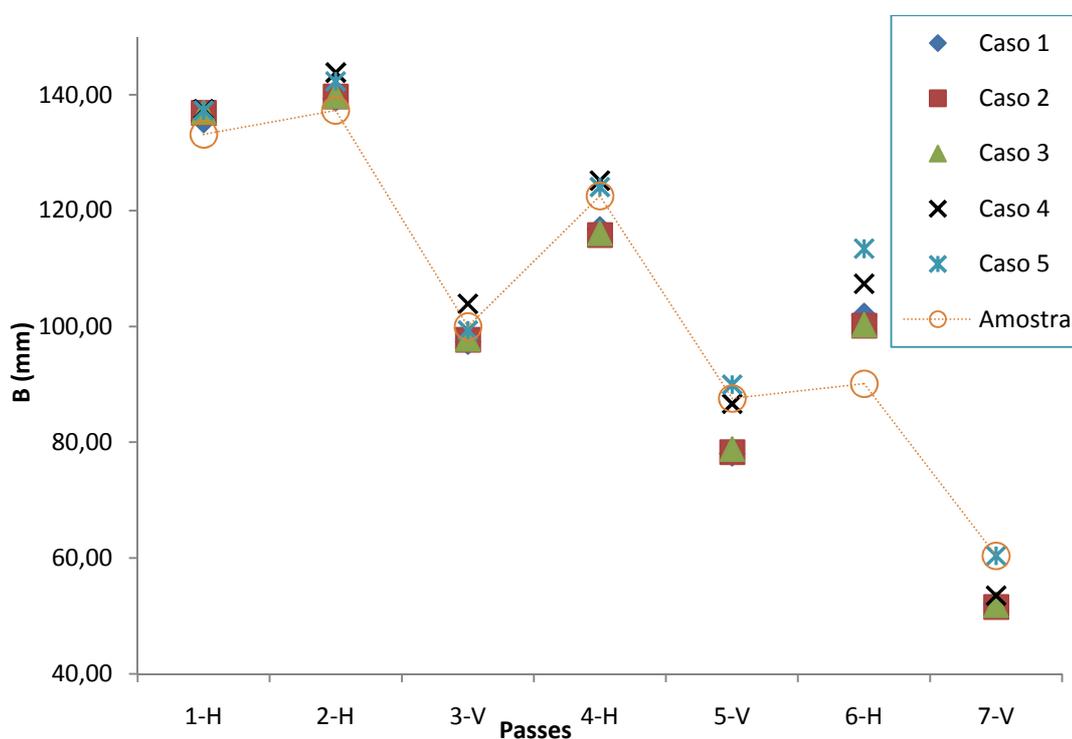


Figura 5.1 – Comparativo da largura (B) obtida na simulação numérica com as medidas da amostra industrial retirada durante o processo de laminação real.

Tabela V.1 – Comparativo dos resultados dimensionais de largura (mm) obtida por cada simulação com os as medidas da amostra e do modelo teórico para cada passe.

	1-H	2-H	3-V	4-H	5-V	6-H	7-V
◆ Caso 1	135,56	139,35	97,32	116,77	78,05	101,83	51,94
■ Caso 2	136,93	139,74	97,70	115,80	78,29	100,15	51,60
▲ Caso 3	136,95	139,80	97,83	116,04	78,82	100,24	51,83
✕ Caso 4	137,49	143,83	103,87	125,16	86,65	107,35	53,52
✕ Caso 5	137,31	142,33	99,34	124,08	89,94	113,40	60,40
○ Amostra	133,16	137,28	99,96	122,50	87,58	90,13	60,41
+ Modelo	136,43	141,35	102,41	126,92	99,3	99,77	60,77

Através da Figura 5.2 e da tabela V.2 é possível observar que os resultados da simulação numérica para a altura (H) durante a laminação foram bastante semelhantes aos obtidos pela amostra até no sexto passe. O resultado do esboço final para o Caso 5, obtido no passe 7 assim como para a largura (B), foi o que obteve melhor concordância de resultado em comparação com a amostra industrial. Os outros Casos no esboço redondo final (passe 7), obtiveram altura (H) em torno de 69 a 70mm para um valor esperado de em torno de 60 a 62mm (Tabela V.2).

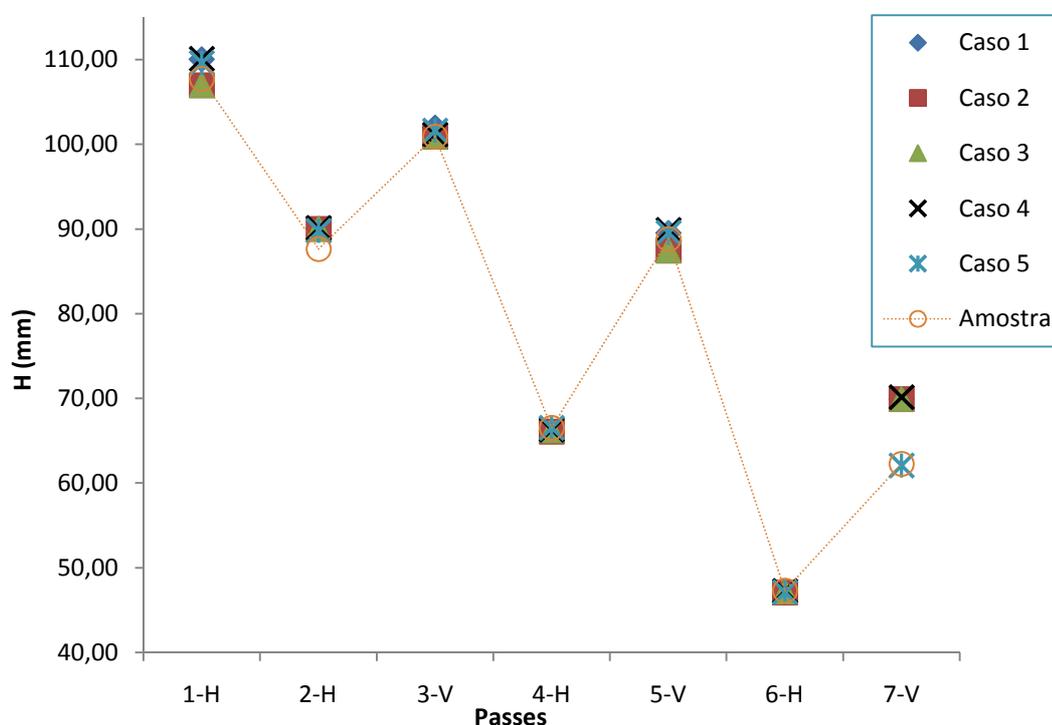


Figura 5.2 – Comparativo da altura (H) obtida na simulação numérica com as medidas da amostra industrial retirada durante o processo de laminação real.

Tabela V.2 – Comparativo dos resultados dimensionais de altura (mm) obtida por cada simulação com os as medidas da amostra industrial e do modelo teórico.

	1-H	2-H	3-V	4-H	5-V	6-H	7-V
◆ Caso 1	110,03	89,98	101,95	66,15	89,52	47,14	69,93
■ Caso 2	106,96	90,03	100,91	66,09	87,45	47,10	69,94
▲ Caso 3	106,98	90,01	100,90	66,22	87,46	47,16	69,92
× Caso 4	110,11	90,15	101,16	66,31	89,91	47,30	70,17
✱ Caso 5	109,61	89,81	101,63	66,53	89,57	47,12	62,08
○ Amostra	107,72	87,63	100,89	66,53	88,82	47,32	62,30
+ Modelo	110,00	90,00	102,00	64,00	89,52	45,00	60,00

As Tabelas V.3 e V.4 demonstram a diferença numérica entre os resultados de largura (B) e altura (H) respectivamente para essas dimensões em relação à amostra obtida em operação de laminação industrial.

Observa-se que para largura (B), Tabela V.3, as simulações dos Casos 1, 2 e 3 seguiram o mesmo padrão de diferença para a amostra real; passes 1-H e 2-H e 6-H tiveram resultados de largura maiores que o da amostra enquanto os passes 3-V, 4-H, 5-V e 7-V os resultados foram menores. O Caso 4 obteve maior largura que as amostras para os passes 1-H, 2-H, 3-V, 4H e menor para o passe 7-V. O passe 5-V do Caso 4 teve boa concordância de resultados de largura comparando com a amostra industrial. Para o Caso 5, os passes 1-H, 2-H, 4-H, 5-V e 6-H obtiveram largura maior que da amostra. Os resultados da simulação numérica para os passes 3-V e para o passe 7-V do Caso 5 obtiveram excelente concordância com as medidas das amostras industriais desses passes como já constatado anteriormente pelo Figura 5.1. Para os outros Casos de 1 a 4 em estudo, o resultado do esboço final da etapa de desbaste, passe 7-V, não obteve alargamento esperado ficando com a largura menor que da amostra industrial.

Tabela V.3 – Diferença numérica (mm) entre os resultados de largura (B) obtidos pela simulação numérica para os resultados das medidas das amostras industriais

$B_{\text{simulação}} - B_{\text{amostra}}$ (mm)	Passe 1 (H)	Passe 2 (H)	Passe 3 (V)	Passe 4 (H)	Passe 5 (V)	Passe 6 (H)	Passe 7 (V)
Caso 1	2,40	2,07	-2,64	-5,73	-9,53	11,70	-8,47
Caso 2	3,77	2,46	-2,26	-6,70	-9,29	10,02	-8,81
Caso 3	3,79	2,52	-2,13	-6,46	-8,76	10,11	-8,58
Caso 4	4,33	6,55	3,91	2,66	-0,93	17,22	-6,89
Caso 5	4,15	5,05	-0,62	1,58	2,36	23,27	-0,01

Para a altura (H), Tabela V.4, observa-se boa concordância de resultados dimensionais em comparação com as amostras industriais até o passe 6-H em todos os Casos, dado a diferença entre os resultados da simulação numérica e da amostra de até aproximadamente 2 mm. De acordo com CODA (2008), a redução em altura depende do projeto do canal, regulagem de luz, cedagem da gaiola e desgaste do canal. Tais resultados confirmam que até o sexto passe, o projeto de canal proposto na simulação numérica está em concordância com o projeto do laminador industrial

utilizado para comparação. Observa-se para o esboço redondo final da etapa de desbaste, passe 7-V, a diferença entre os resultados de altura (H) entre a simulação numérica e a amostra industrial foram bem superiores para os Casos 1, 2, 3 e 4 (Tabela V.4). Esse resultado demonstra que o projeto do canal 7 para esses Casos apresentou redução em altura inferior ao esperado para esse passe. Como a largura (B) também é influenciado pela redução em altura, tal resultado pode explicar o resultado inferior de largura (B) no esboço redondo final encontrado para os Casos 1, 2, 3 e 4 (Tabela V.3). O Caso 5, da mesma forma que para o resultado de largura (B), obteve excelente concordância de resultado de altura (H) do esboço redondo final da etapa de desbaste, passe 7-V, comparado com a amostra industrial. Sendo assim, acredita-se que a laminação multi-passe, Caso 5, pode ter sido capaz de compensar os efeitos do último passe da etapa de desbaste, passe 7-V, sobre a largura (B) e altura (H) observadas nos outros Casos 1, 2, 3 e 4.

Tabela V.4 – Diferença numérica (mm) entre os resultados de altura (H) obtidos pela simulação numérica para os resultados das medidas das amostras industriais

$H_{\text{simulacao}} - H_{\text{amostra}}$ (mm)	Passe 1 (H)	Passe 2 (H)	Passe 3 (V)	Passe 4 (H)	Passe 5 (V)	Passe 6 (H)	Passe 7 (V)
Caso 1	2,31	2,35	1,06	-0,38	0,70	-0,18	7,63
Caso 2	-0,76	2,40	0,02	-0,44	-1,38	-0,22	7,64
Caso 3	-0,74	2,38	0,01	-0,31	-1,36	-0,16	7,62
Caso 4	2,39	2,52	0,27	-0,22	1,09	0,22	7,87
Caso 5	1,89	2,18	0,74	0,00	0,75	-0,20	-0,22

Através das Figuras 5.3 a 5.9 de amostras retiradas após cada passe é possível comparar a qualidade visual da simulação numérica com a amostra. Até no terceiro passe (3-V) observa-se boa concordância de resultados dimensionais para todos os Casos em relação à amostra industrial. Como exposto anteriormente, observa-se nos passes 4-H (Figuras 5.6), 5-V (Figura 5.7) e 7-V (Figura 5.9), uma diminuição significativa da largura (B) para os Casos 1, 2 e 3 em relação a amostra industrial. Para o Caso 4, essa diminuição ocorreu somente para o passe 7-V (Figura 5.9). Observa-se boa semelhança de forma entre a simulação numérica e a amostra industrial em todos os Casos.

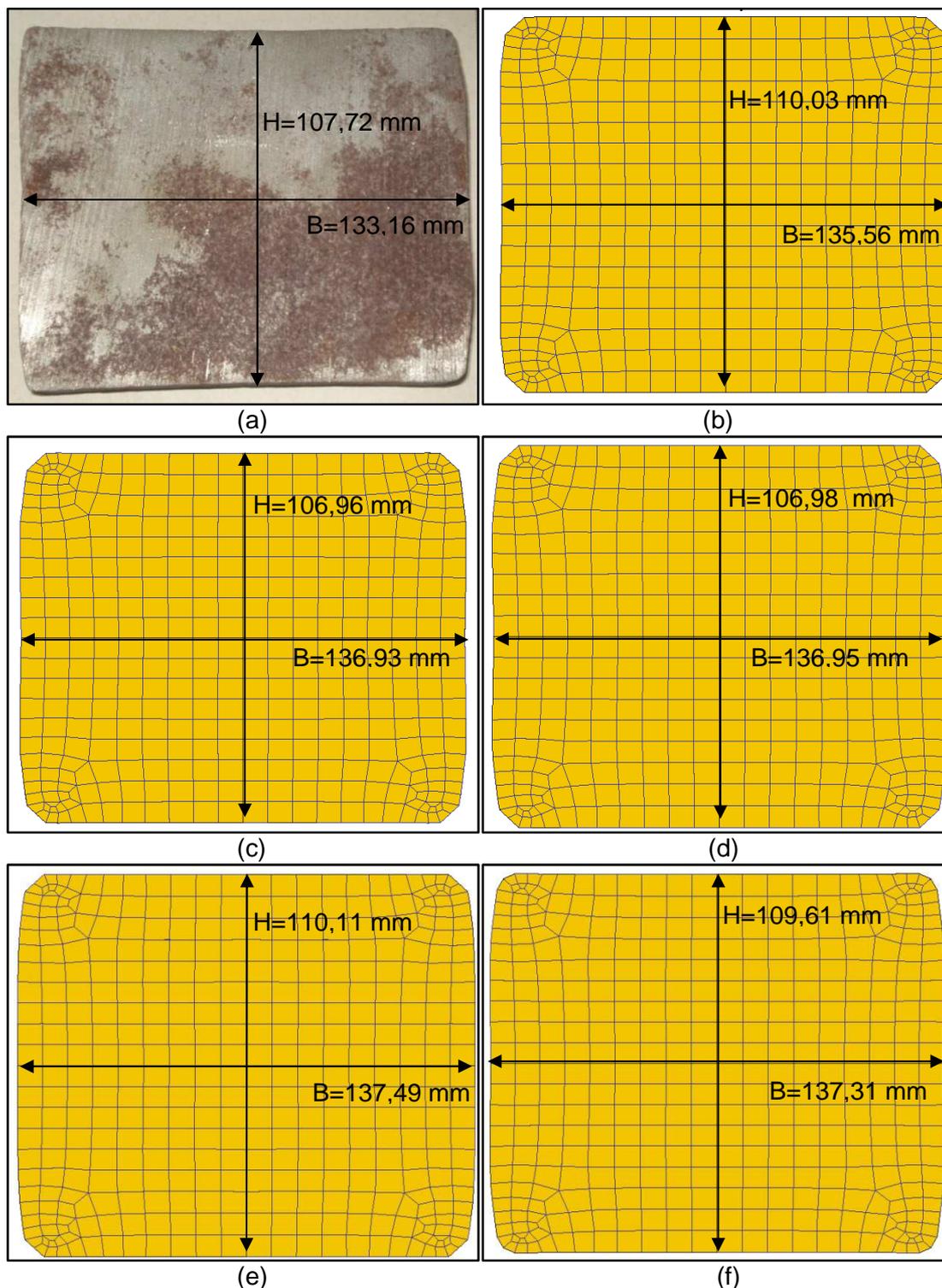
Passo 1 – Horizontal

Figura 5.3 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço obtido no passo 1 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 2 – Horizontal

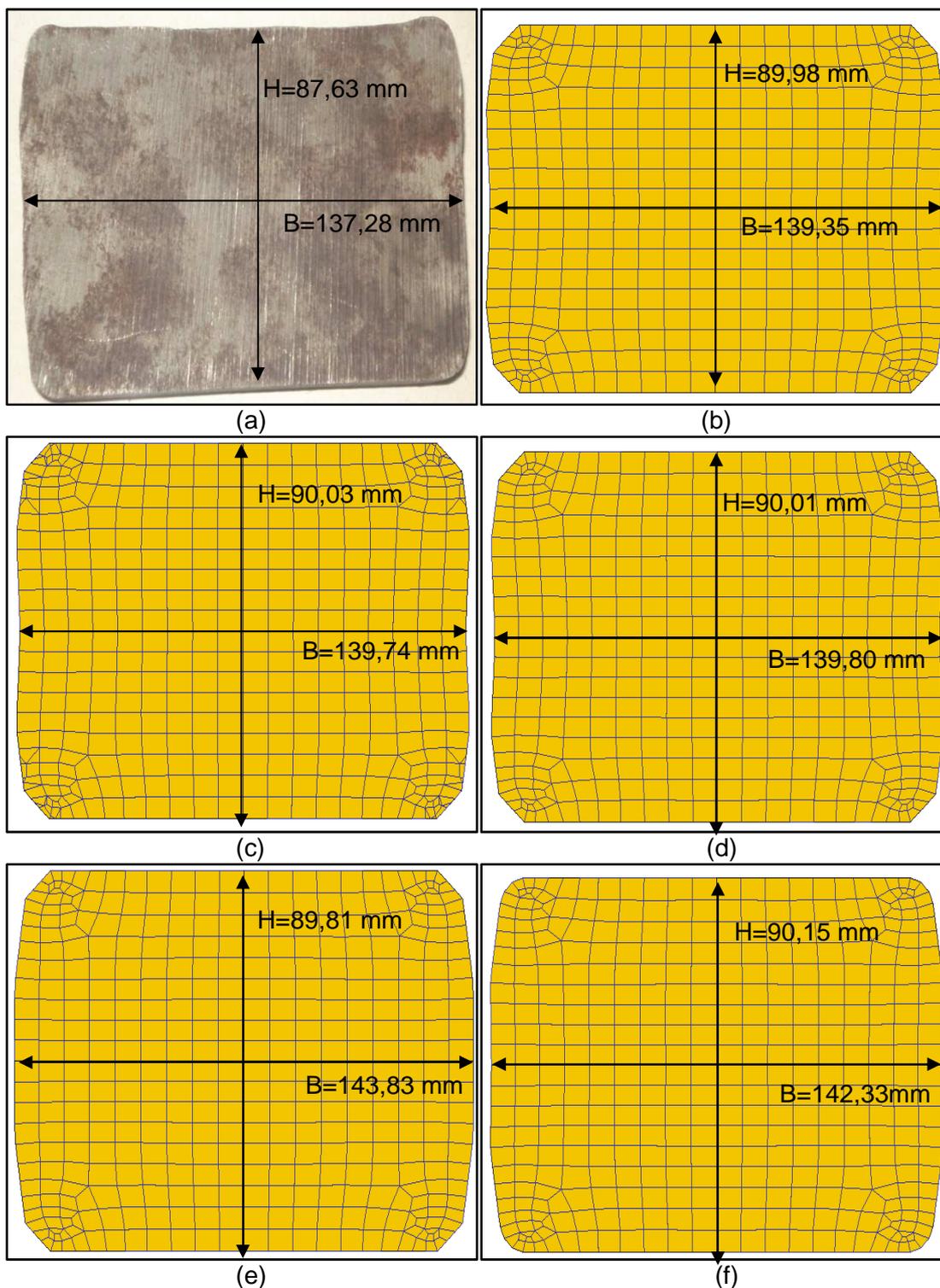


Figura 5.4 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual de amostra industrial do esboço no passe 2 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 3 – Vertical

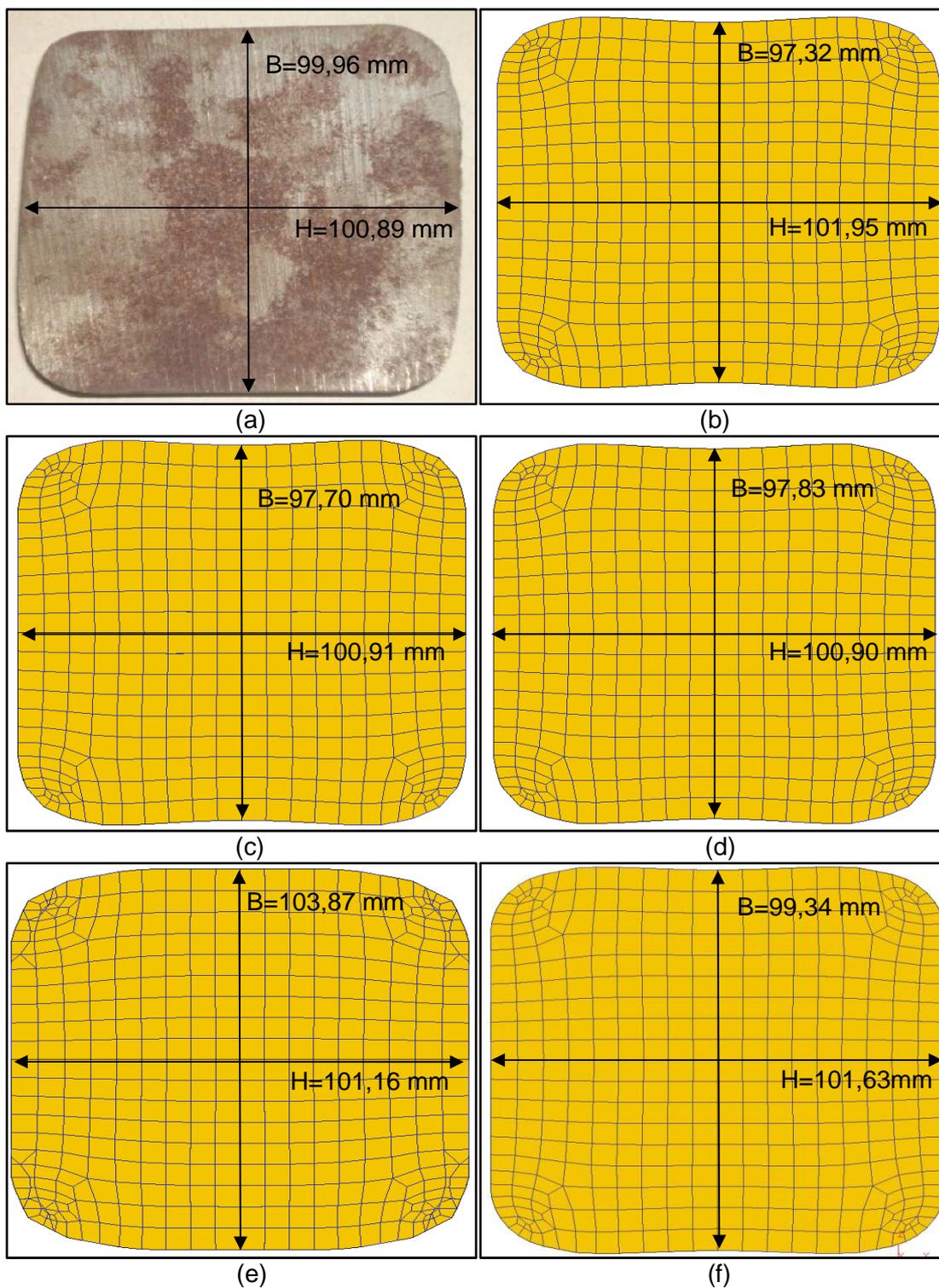


Figura 5.5 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço no passe 3 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 4 – Horizontal

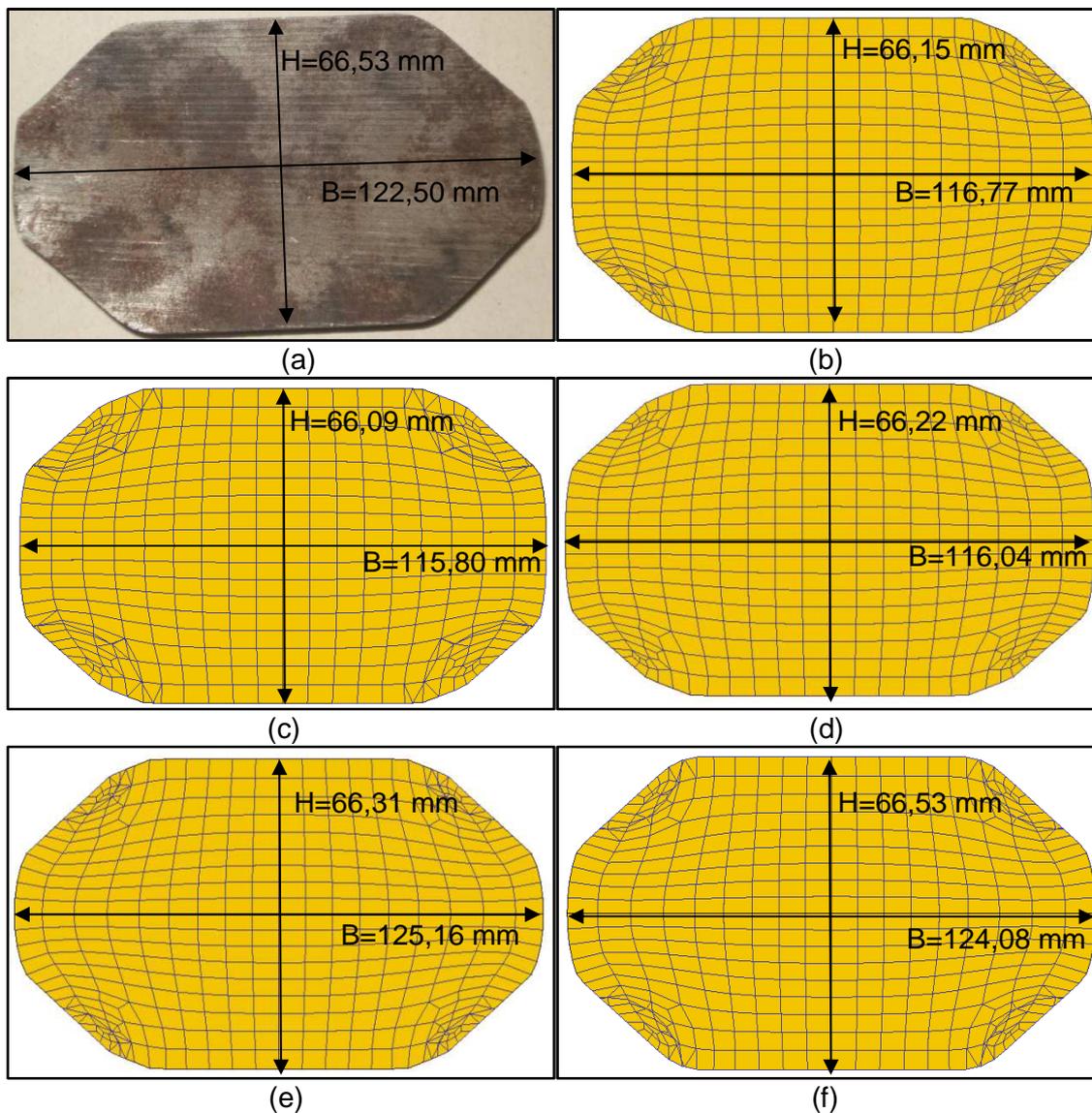


Figura 5.6 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço no passe 4 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 5 – Vertical

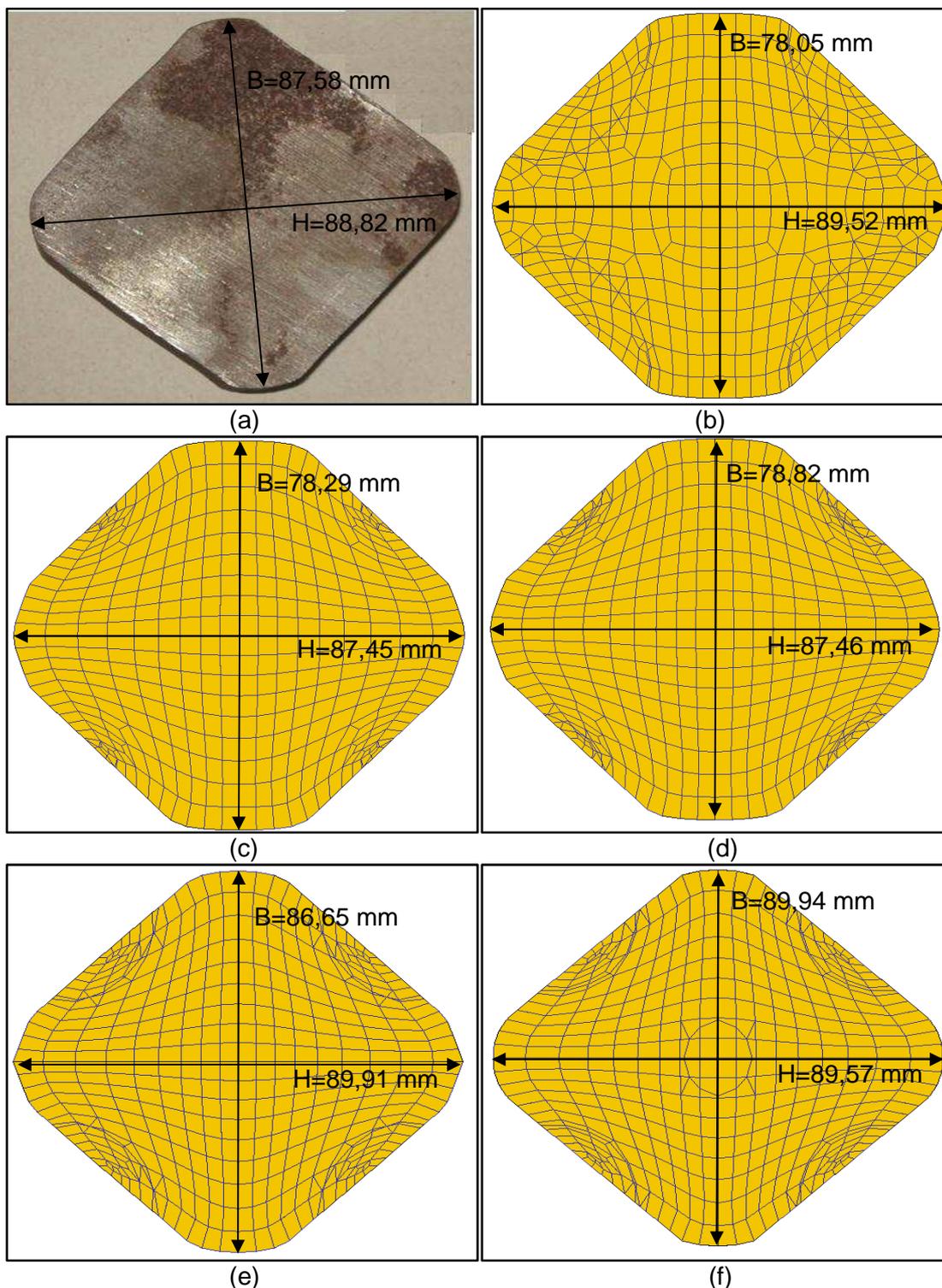


Figura 5.7 – Resultados comparativo dimensional (mm) e visual da amostra industrial do esboço no passe 5 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

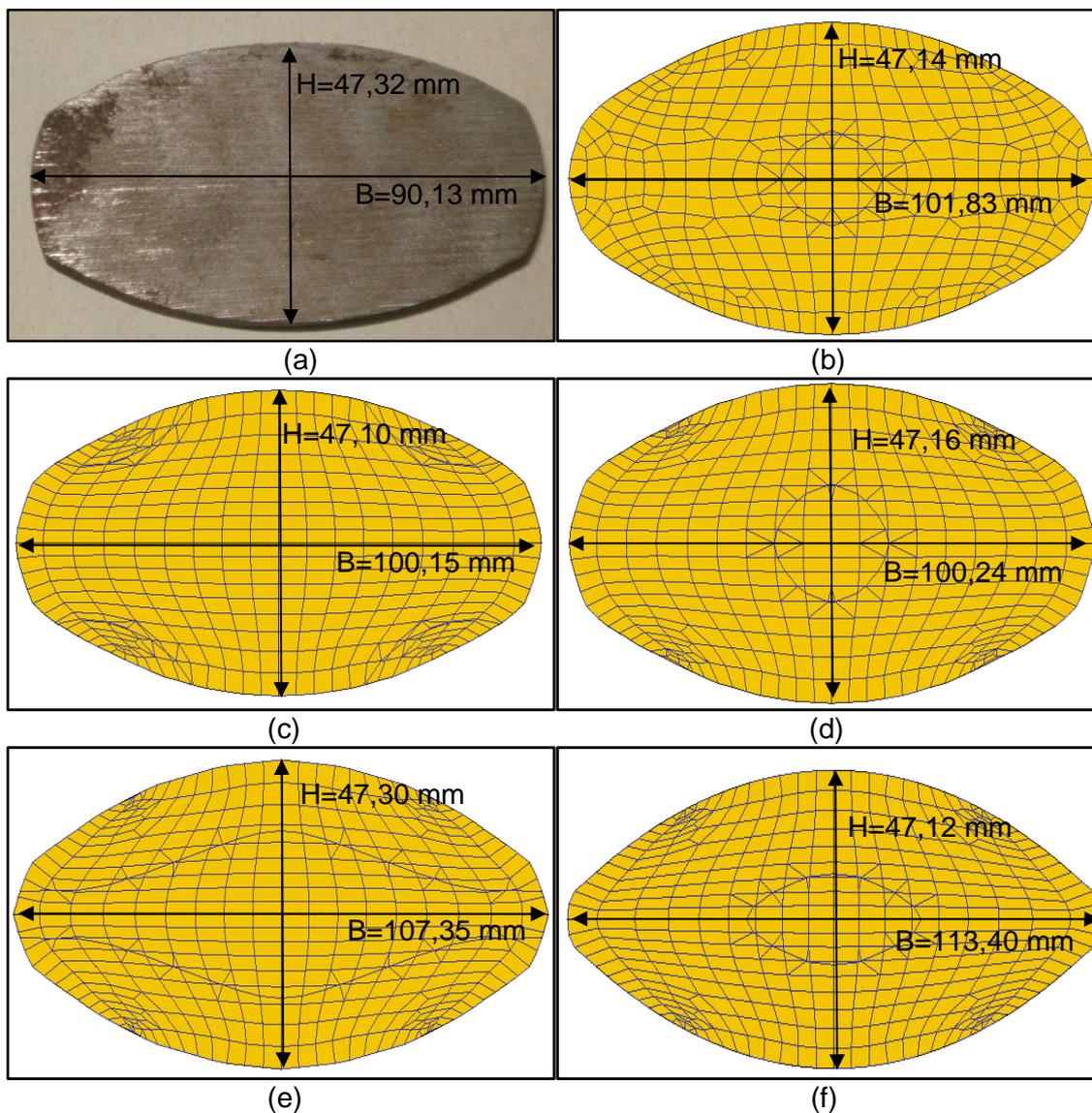
Passe 6 – Horizontal

Figura 5.8 – Resultados comparativo dimensional (mm) da amostra industrial do esboço após passe 6 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 7 – Vertical

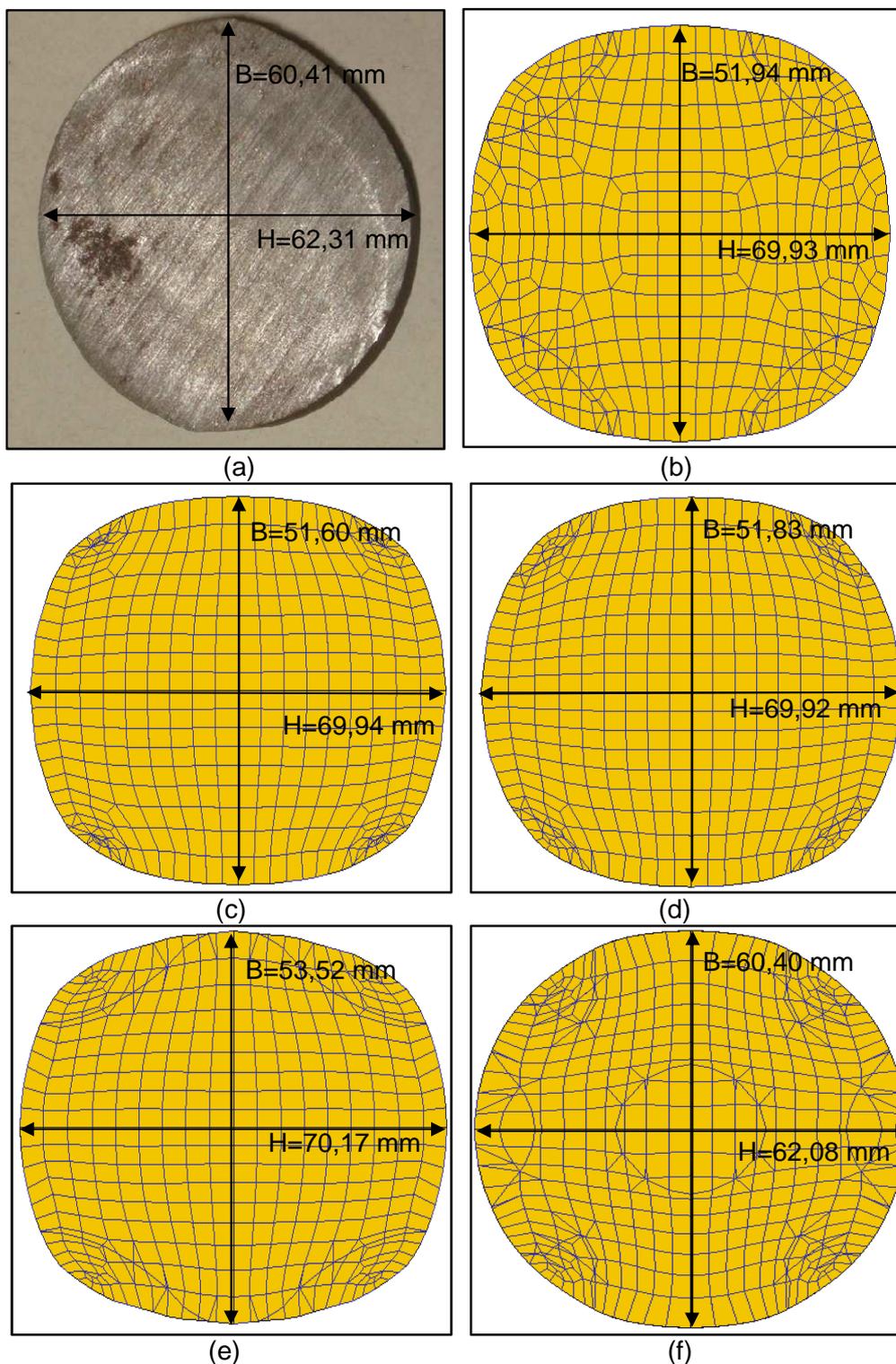


Figura 5.9 – Resultados comparativo dimensional em mm da amostra industrial do esboço no passe 7 para as simulações numéricas: (a) amostra do produtor; (b) Caso 1 – Padrão; (c) Caso 2 – Luz entre canais; (d) Caso 3 – Atrito; (e) Caso 4 – Raio dos cilindros; (f) Caso 5 – Multi-passe.

5.2 – Avaliação da deformação efetiva, redução em altura e alargamento em cada passe

A Figura 5.11 mostra a variação da deformação efetiva média de cada passe para as simulações numéricas propostas. As Figuras 5.12 a 5.18 a seguir demonstram o perfil de deformação efetiva na seção transversal de cada passe.

Observa-se um perfil semelhante de deformação efetiva média até o terceiro passe em todos os Casos estudados (Figuras 5.11 a 5.14). A partir do passe 4, observa-se alteração significativa para todos os Casos. Para o Caso 5 (laminação multi-passe) ocorre aumento significativo na deformação efetiva média em relação aos outros Casos (Figura 5.11). Tal fato é explicado pelo início de laminação multi-passe a partir do passe 4. Até o terceiro passe o material estava sendo laminado passe a passe como nos Casos de 1 a 4 devido a distância entre passes ser maior que o comprimento do material. A partir do final do passe 4 o material passou a ser laminado simultaneamente entre duas cadeiras (Figura 5.10) aumentando a deformação efetiva média nesse momento em diante.

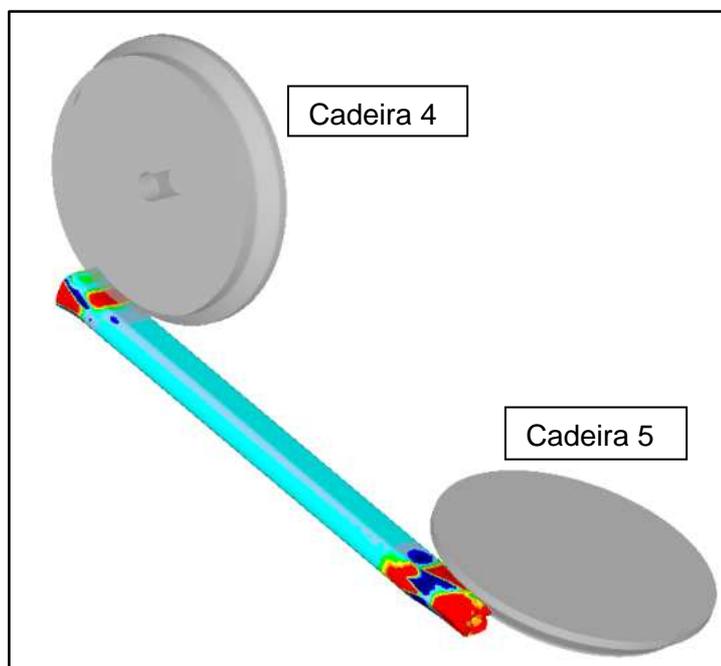


Figura 5.10 – Início da laminação multi-passe entre os passes 4 e 5.

Para os outros Casos, observa-se que a partir do passe 4, o Caso 1, padrão, possui menor deformação efetiva média (Figura 5.11). Sendo assim as alterações propostas

como luz entre canais (Caso 2), atrito (Caso 3) e raio dos cilindros (Caso 4) também resultaram no aumento da deformação efetiva média dos passes 4, 5 e 6 em proporção bem inferior ao aumento provocado pela laminação multi-passe. Ainda considerando os Casos de simulações numéricas passo a passo, Casos 1, 2, 3 e 4, a alteração do raio do cilindro, Caso 4, foi à variável mais significativa para o aumento da deformação efetiva média a partir do passe 4 (Figura 5.11). Tal fato pode também ser observado pelas Figuras 5.15 a 5.18 visto que a região central do material está com nível de deformação efetiva maior que para os Casos 1, 2 e 3. Através da Figura 5.18, por exemplo, observa-se para o passe 7 que a deformação efetiva total no centro do material para o Caso 4 é da ordem de 3,07 a 3,32 mm/mm. Para os Casos 1 e 2 é da ordem de 2,56 a 2,81 mm/mm e para o Caso 3 a deformação efetiva no centro do material está na ordem de 2,81 a 3,07 mm/mm.

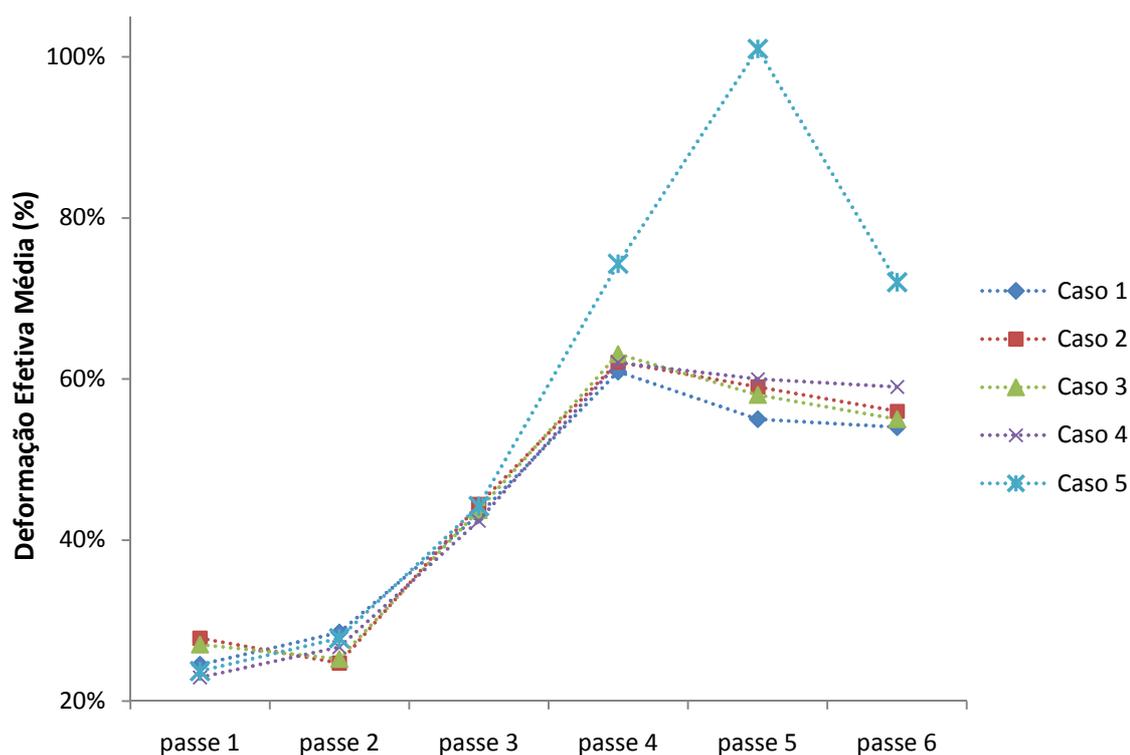


Figura 5.11 – Deformação efetiva média de cada passe obtida na simulação numérica para os estudos de Caso propostos.

Passo 1 – Horizontal

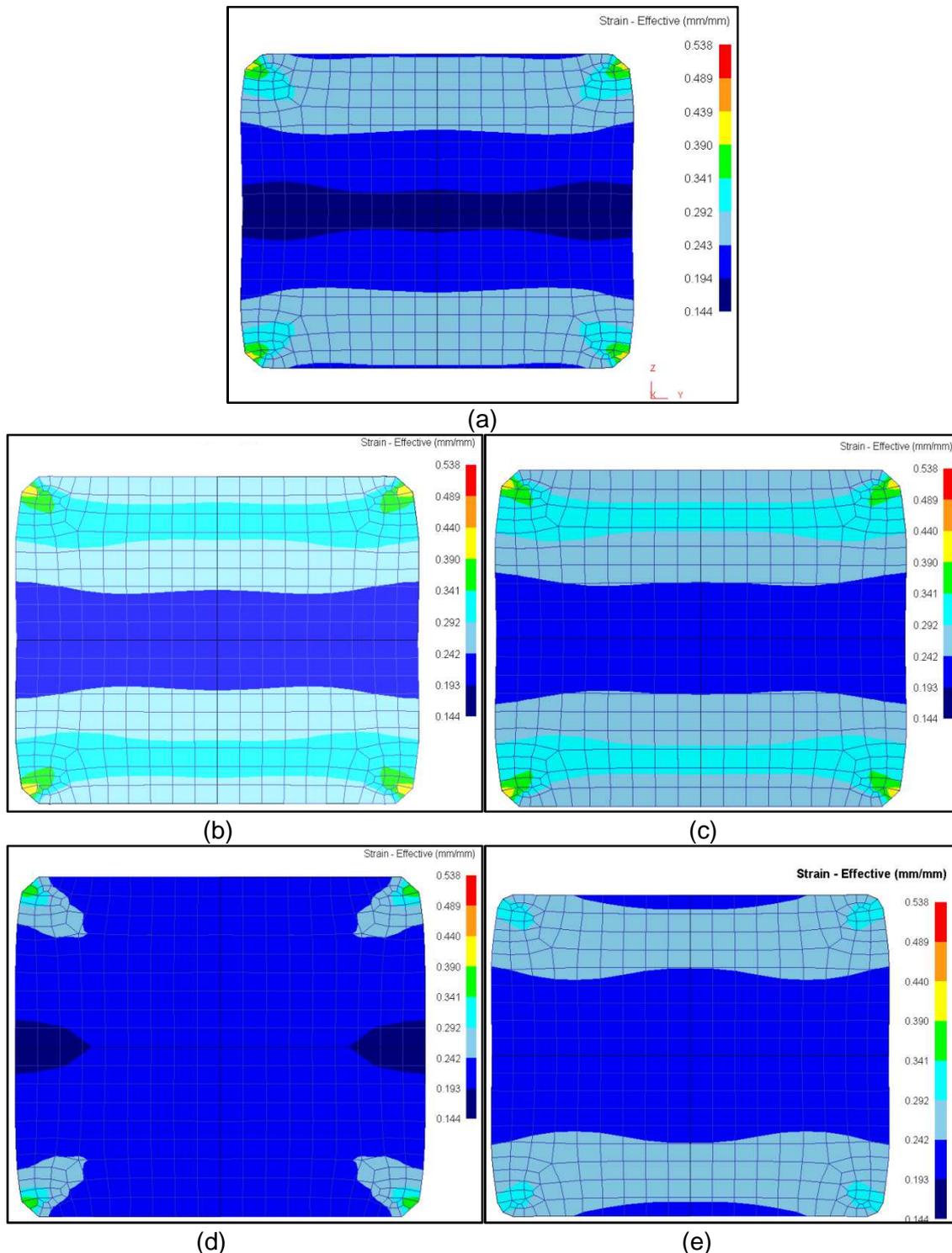


Figura 5.12 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 1 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 2 – Horizontal

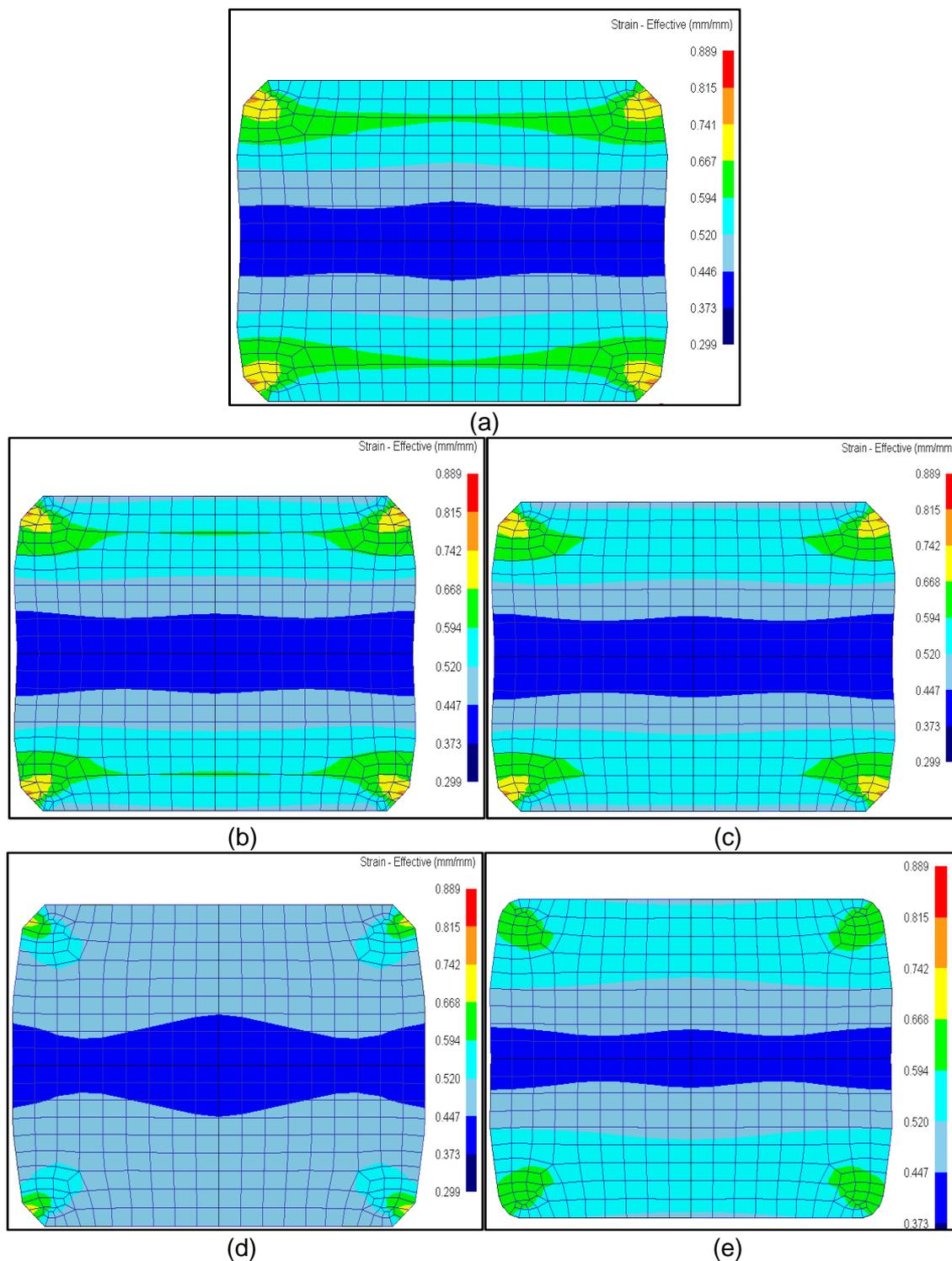


Figura 5.13 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 2 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 3 – Vertical

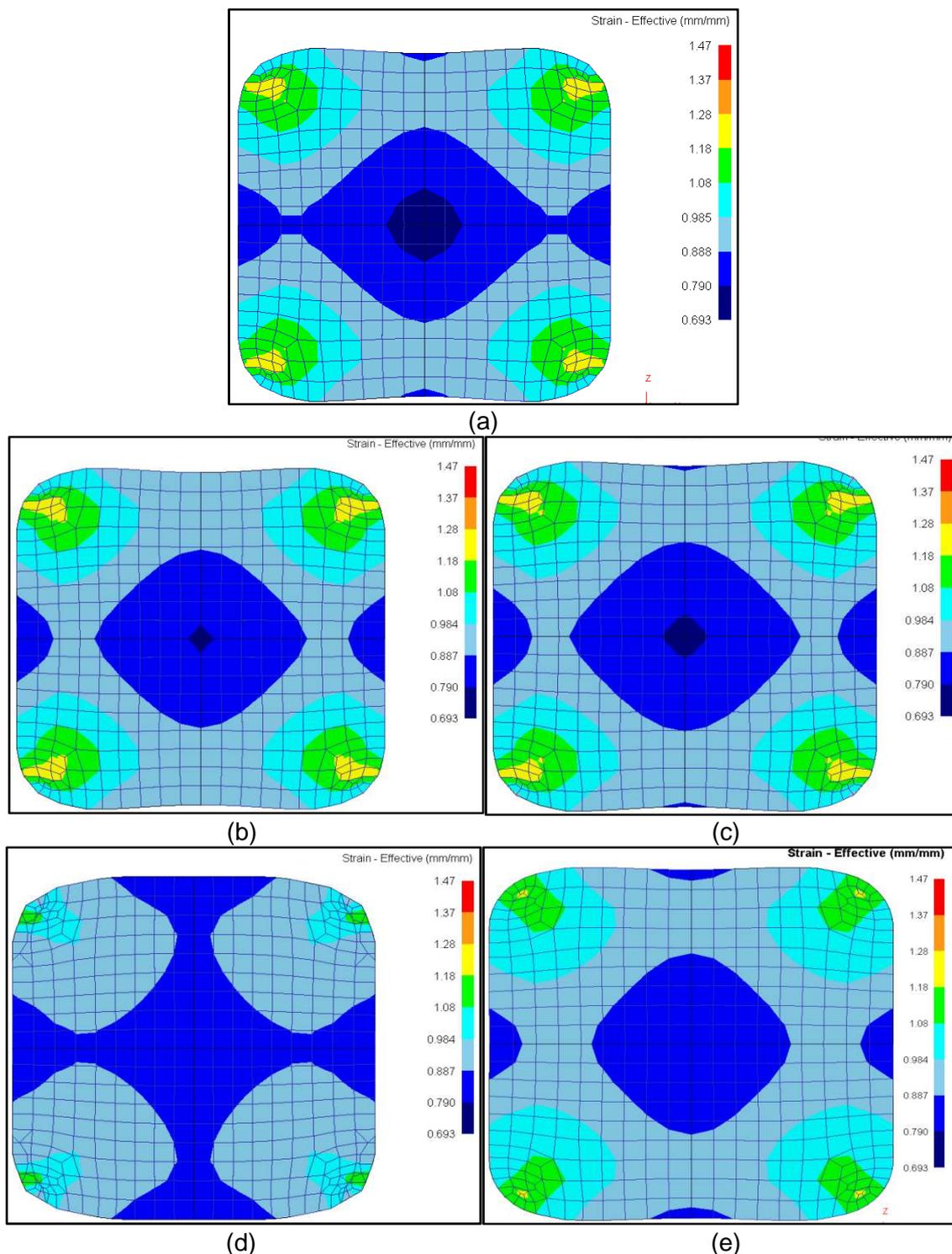


Figura 5.14– Deformação efetiva na seção transversal do passe 3 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 4 – Horizontal

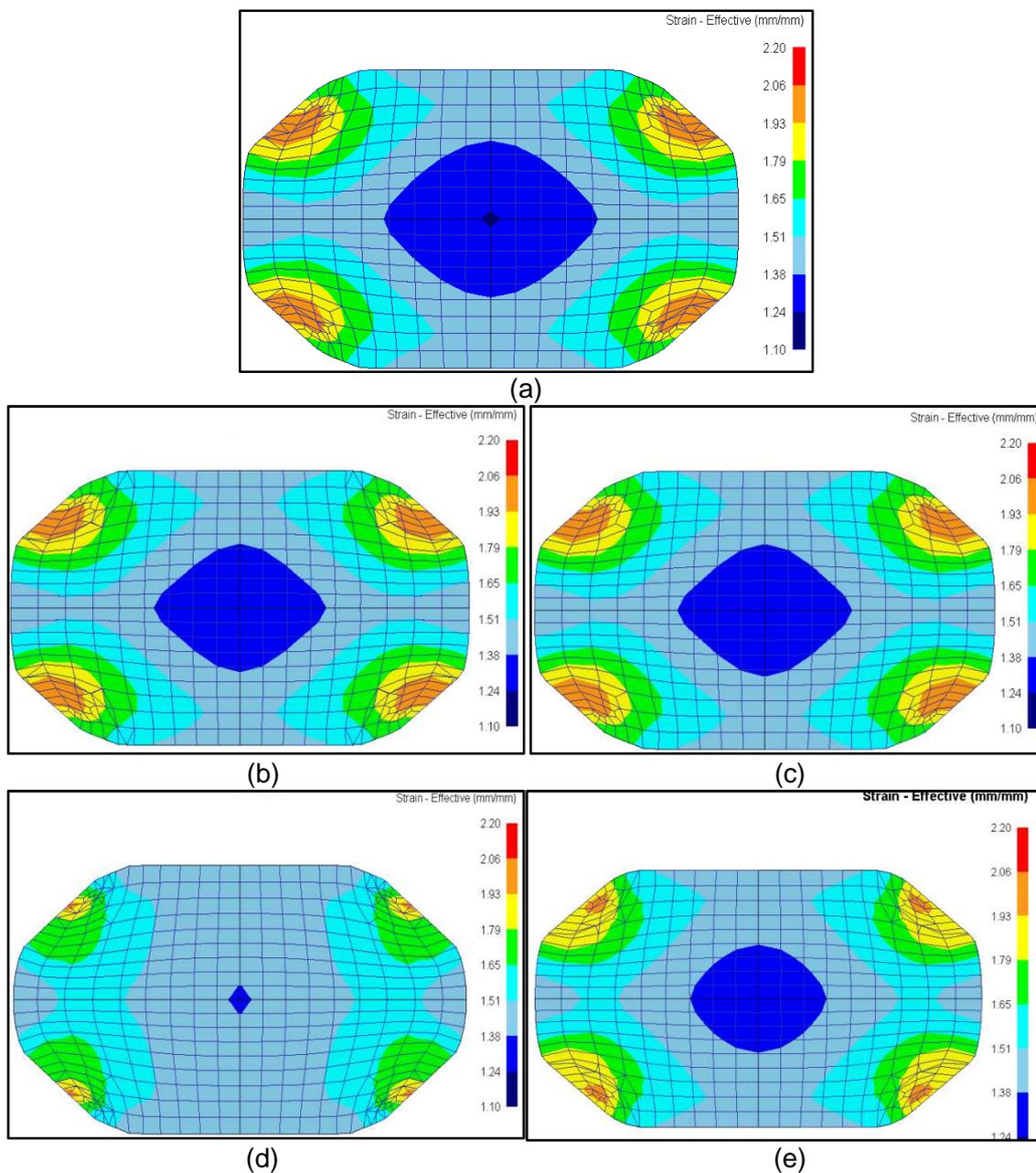


Figura 5.15 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 3 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 5 – Vertical

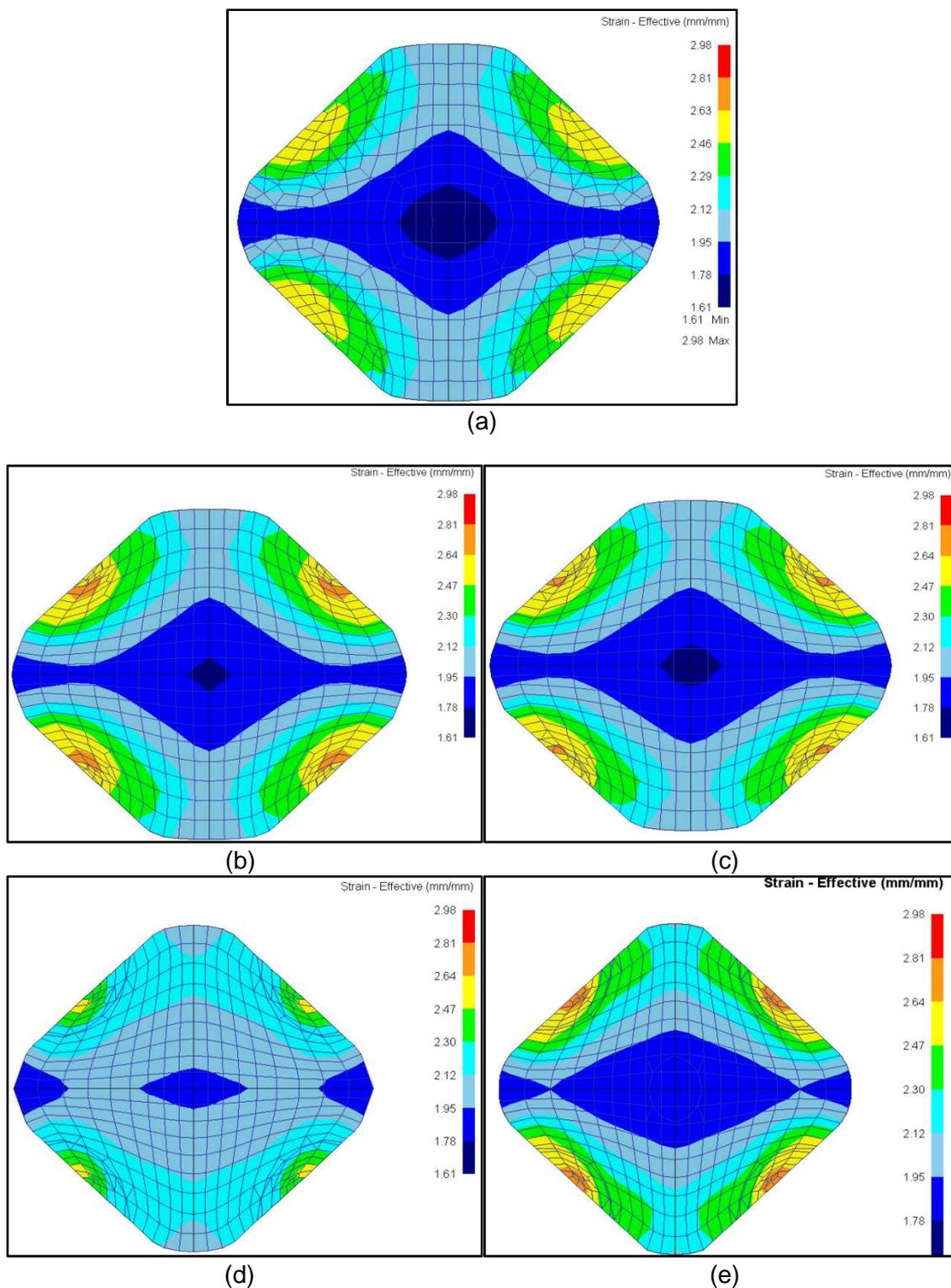


Figura 5.16 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 5 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 6 – Horizontal

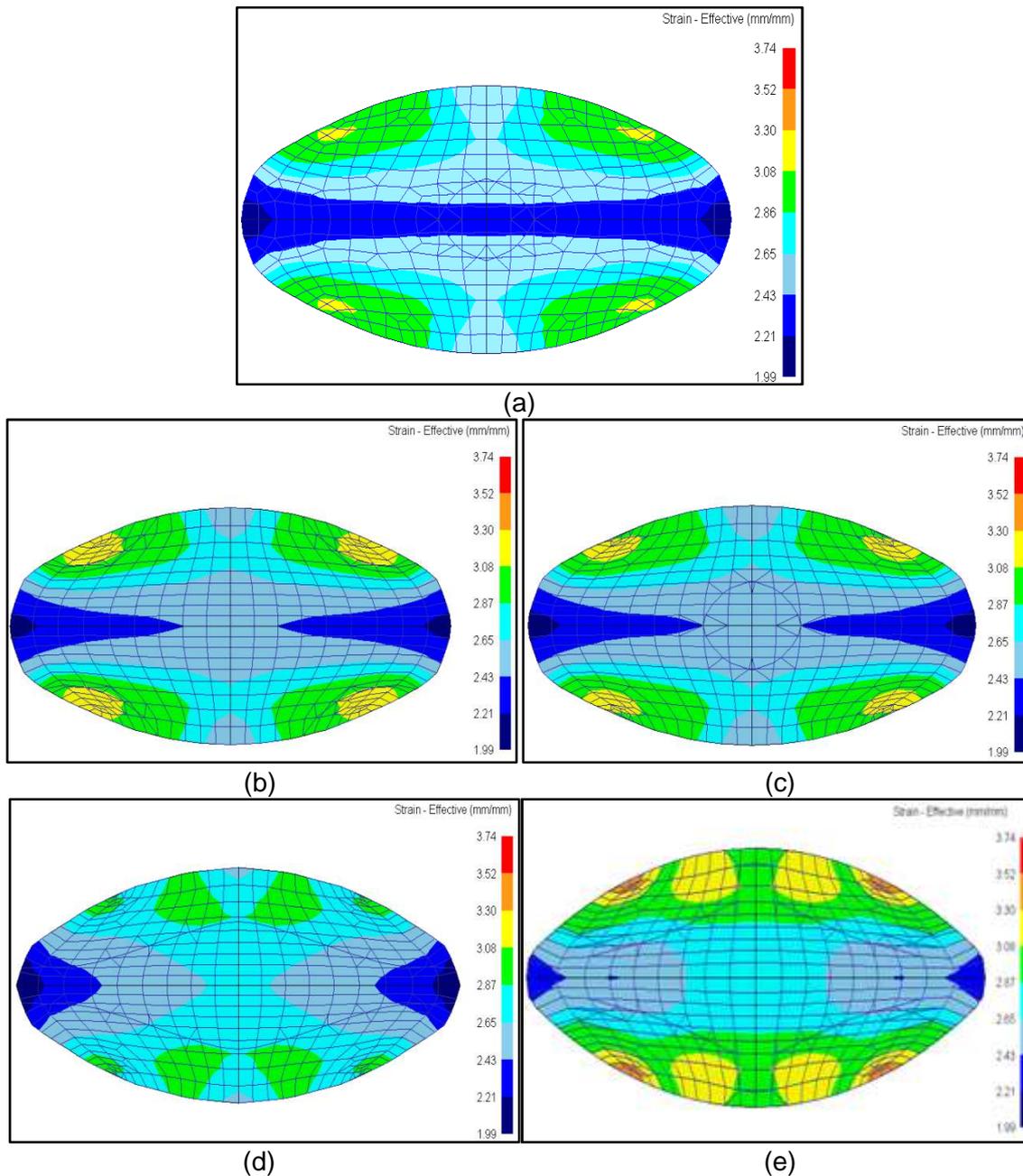


Figura 5.17 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 6 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

Passe 7 – Vertical

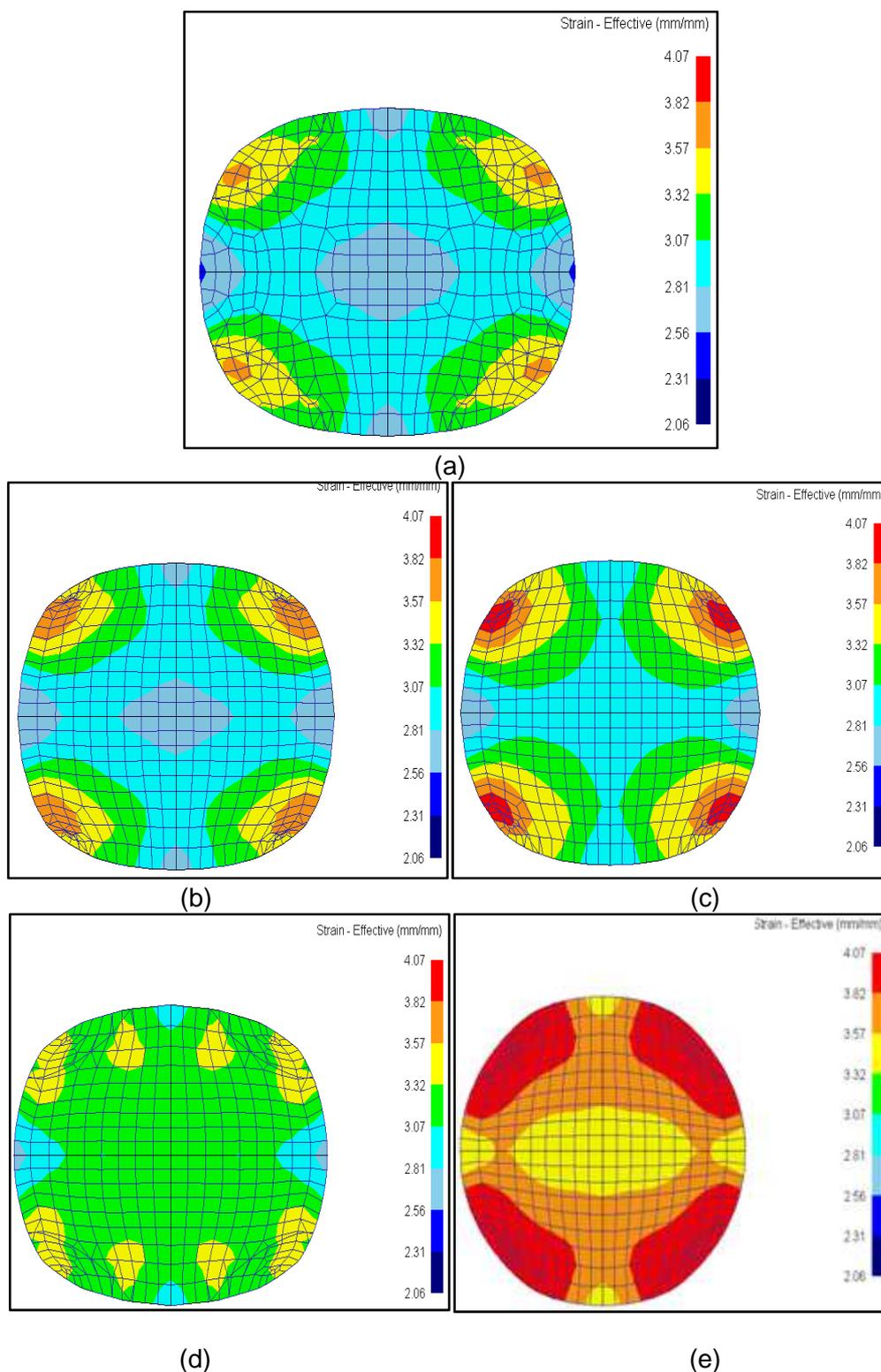


Figura 5.18 – Deformação efetiva na seção transversal do passe 7 para as simulações numéricas: (a) Caso 1 – Padrão; (b) Caso 2 – Luz entre canais; (c) Caso 3 – Atrito; (d) Caso 4 – Raio dos cilindros; (e) Caso 5 – Multi-passe.

A Figura 5.19 mostra que a houve boa concordância dos resultados de redução em altura obtida pelas simulações numéricas propostas em comparação com a amostra industrial até o quarto passe (4H). A partir do quinto passe (5V), observa-se menor redução em altura na comparação dos Casos 1, 2 e 3 em relação tanto da amostra industrial quanto dos Casos 4 e 5. Não se observa diferença significativa nos resultados de redução em altura nos Casos 1, 2 e 3 em nenhum dos passes. Nota-se aumento significativo para a redução em altura do Caso 5 em comparação com a amostra e os outros Casos estudados no último passe (7V). Tal fato pode ser explicado pela maior largura (B) encontrada no passe 6 do Caso 5 em comparação com a amostra industrial, sendo a diferença de até 23mm de acordo com a Figuras 5.8 (a) e (f). Como o passe 7 está na posição vertical, a largura (B) do passe 6 se torna a altura (H) do passe 7. Como a altura final do passe 7 para esse Caso foi bem próximo da amostra, (Figuras 5.9 (a) e (f)), observou-se maior redução em altura.

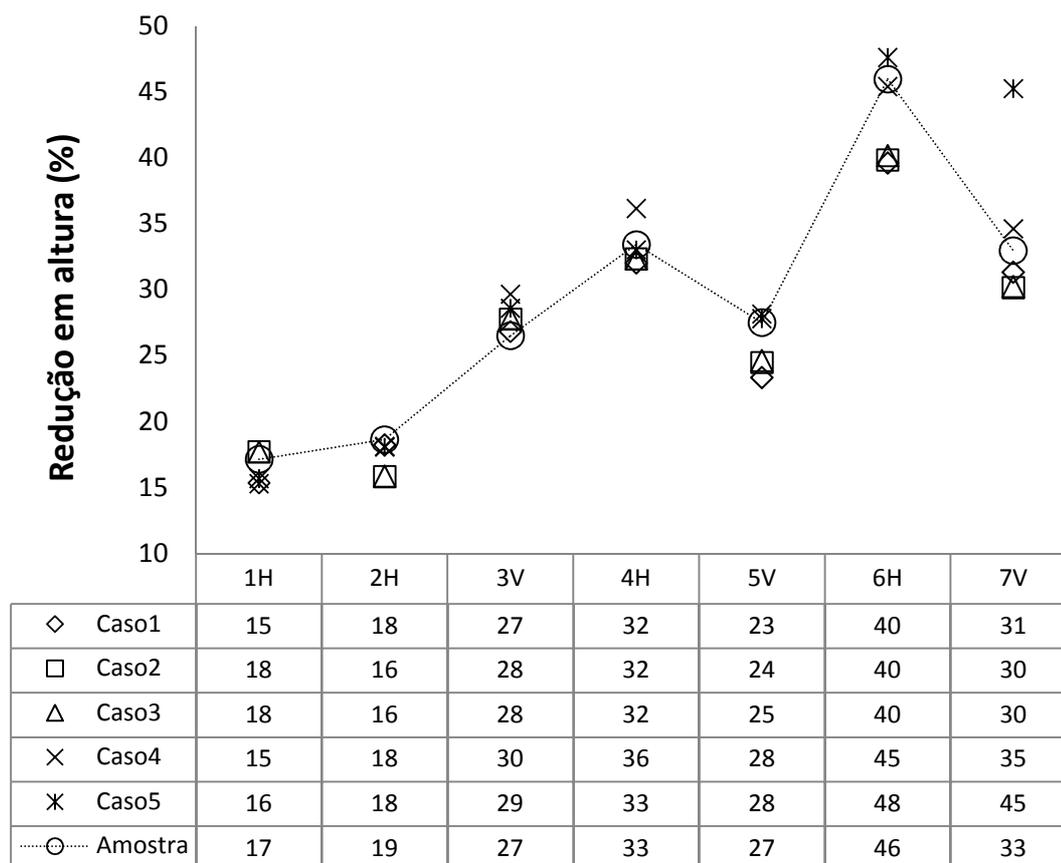


Figura 5.19 – Variação da redução em altura durante a laminação.

Na avaliação do alargamento (Figura 5.20), as simulações numéricas definidas nos Casos 1, 2, e 3, exceto para o passe 6-H, obteve menor alargamento que os encontrado pela amostra de laminação. Assim como para os resultados de redução em altura, para os Casos 1, 2 e 3, não foi observado diferença significativa nos resultados de alargamento em nenhum dos passes. A simulação numérica do Caso 4, aumento do raio do cilindro de laminação, obteve resultados de alargamento próximo da amostra para os 5 primeiros passes. No passe 6-H obteve alargamento superior e no passe 7, da mesma forma que para os casos 1, 2 e 3, o alargamento foi menor. Os resultados de alargamento obtidos pela simulação numérica do caso 5, laminação multi-passe, foram bem semelhantes aos obtidos pela amostra exceto para o passe 6.

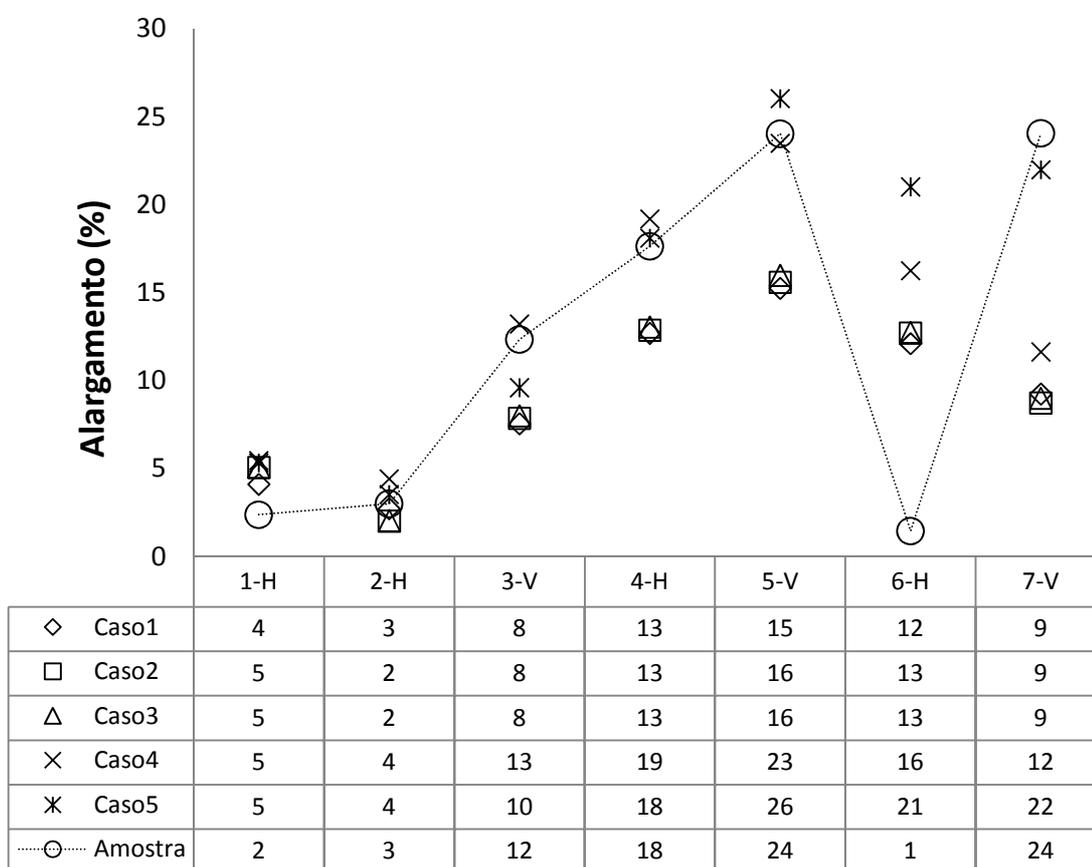


Figura 5.20 – Variação do alargamento durante a laminação.

5.3 – Avaliação do efeito das tensões entre passes na simulação numérica multi-passe.

Os resultados dimensionais obtidos no último passe da etapa de desbaste (7V) pela simulação numérica definida no caso 5 foram bem próximos aos das amostras

fornecidas pelo produtor (Figura 5.9). No entanto como será discutido nesse tópico, devem-se controlar as tensões geradas entre passes para manter um fluxo de material constante para evitar defeitos de laminação como bigode, dobras ou variação dimensional de acordo com ERIKSSON (2004).

Através da análise da tensão na direção X (Figura 5.21), observa-se que as tensões geradas foram de compressão ocorrendo o fenômeno conhecido como laço. Esse fato foi observado na simulação multi-passe para os passes 4, 5, 6 e 7. Nota-se que a tensão entre passes estava aproximadamente na faixa de -35 a -44 MPa para a velocidade de laminação definida em 50 rpm.

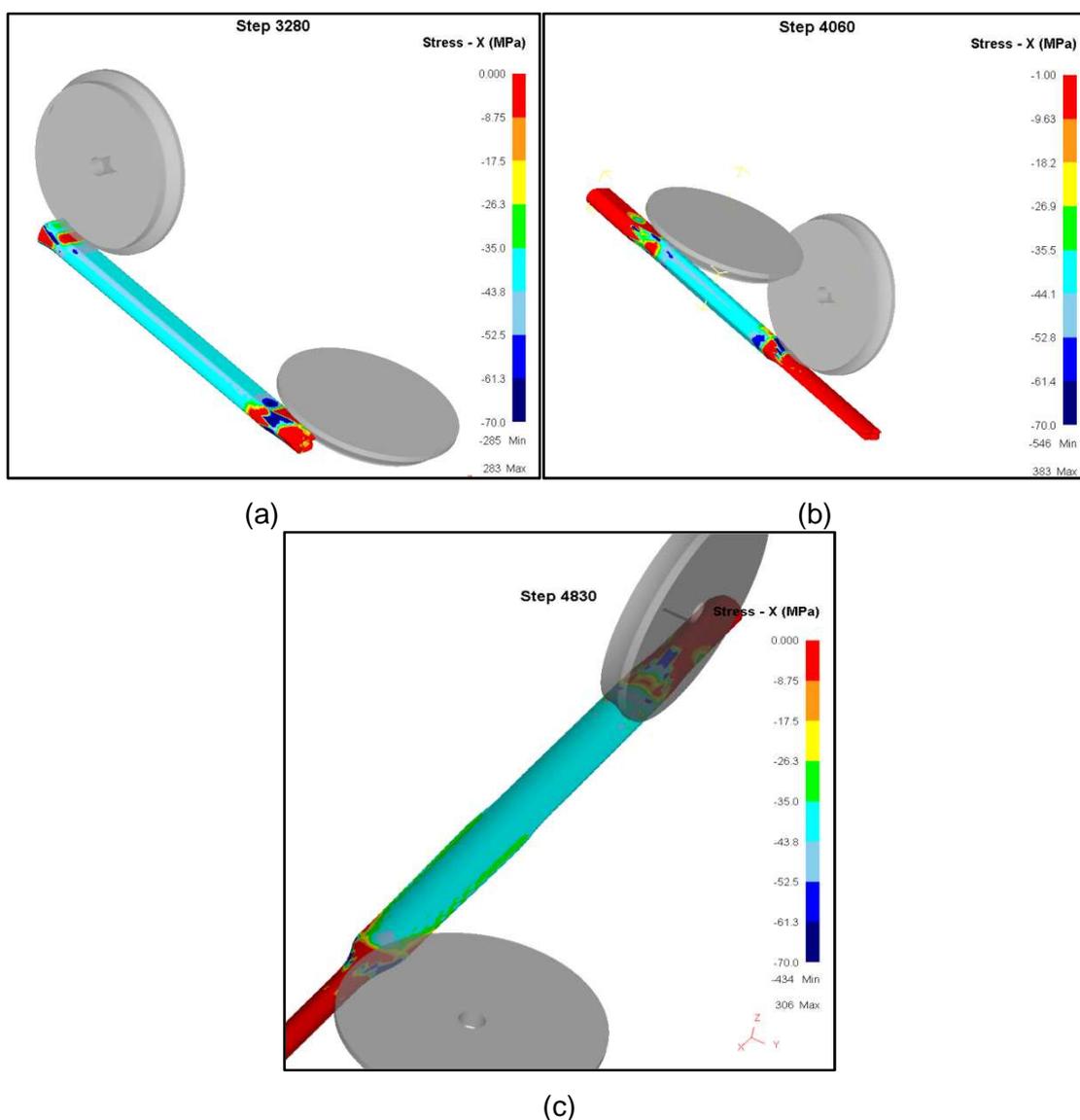
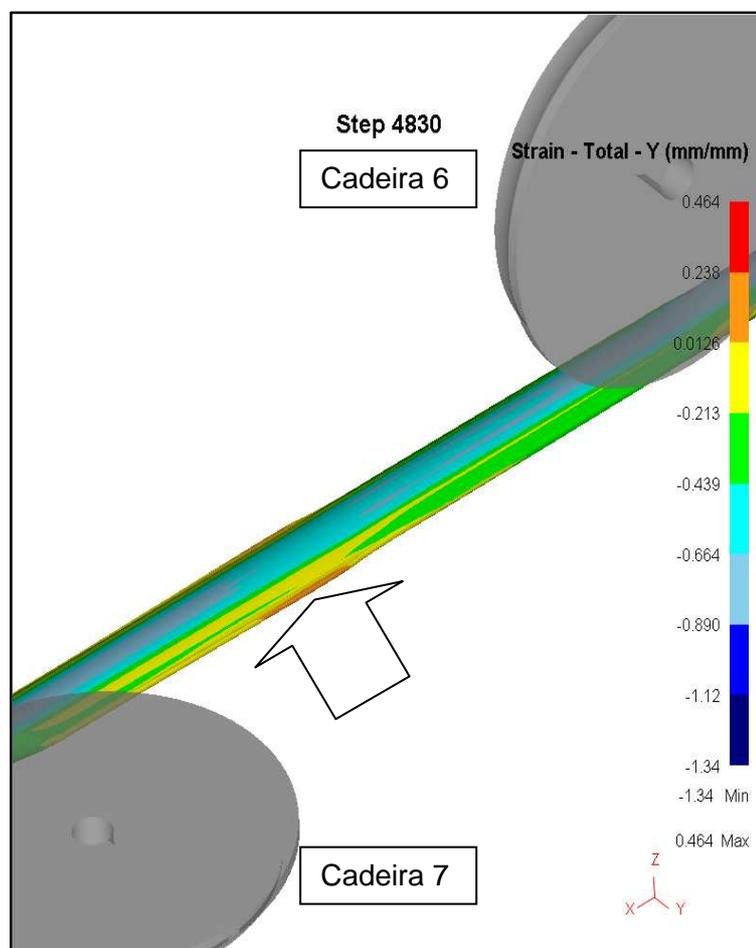
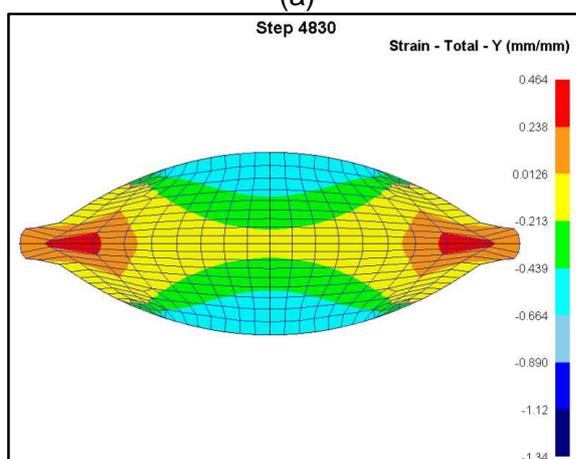


Figura 5.21 – Tensão na direção do eixo X ocorrida entre os passes: (a) 4 e 5; (b) 5 e 6 e (c) 6 e 7.

As tensões geradas entre passes favoreceram a formação do defeito conhecido como bigode cujo detalhe pode ser observado nas Figuras 5.22 e 5.23.



(a)



(b)

Figura 5.22 – (a) Detalhe do bigode formado entre os passes 6 e 7. (b) Amostra da seção transversal do esboço na região do bigode indicada pela seta.

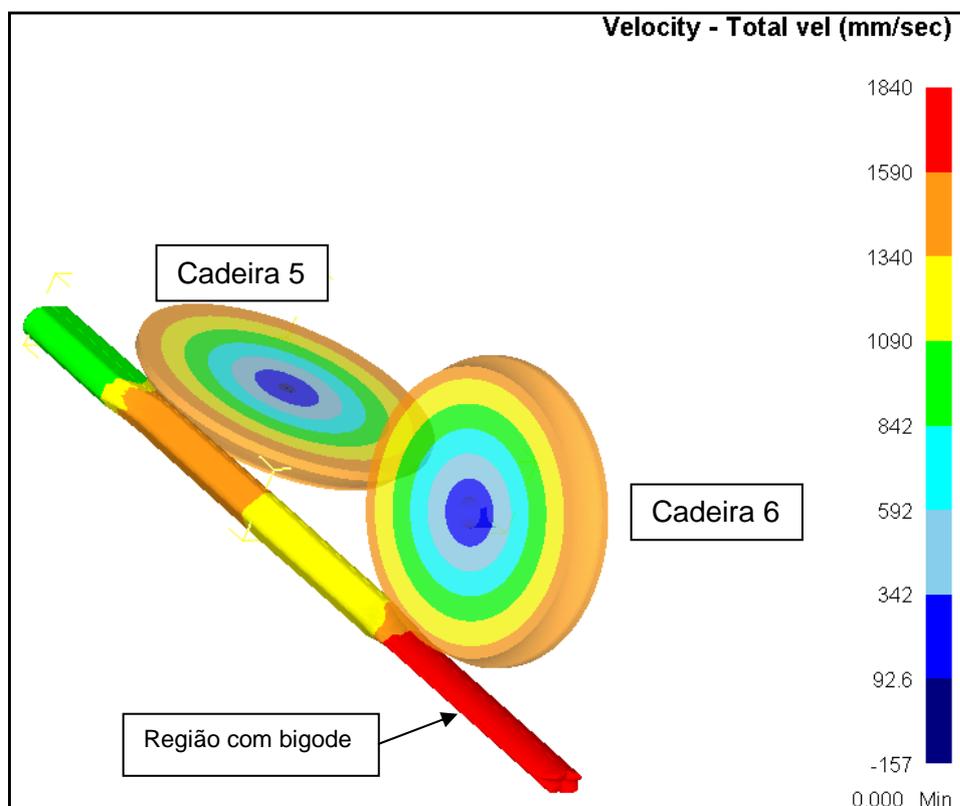
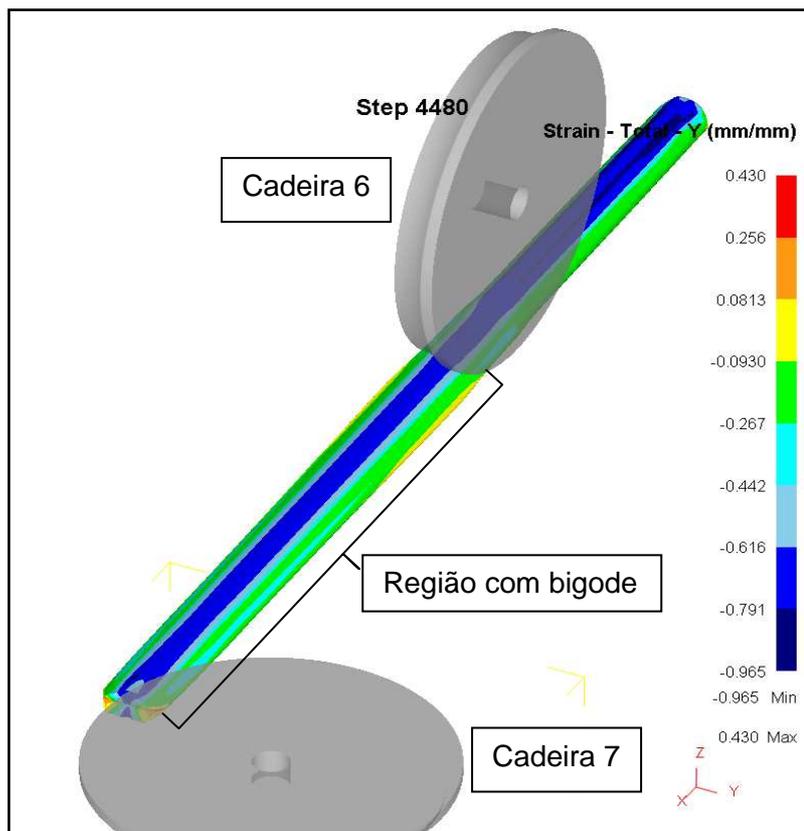
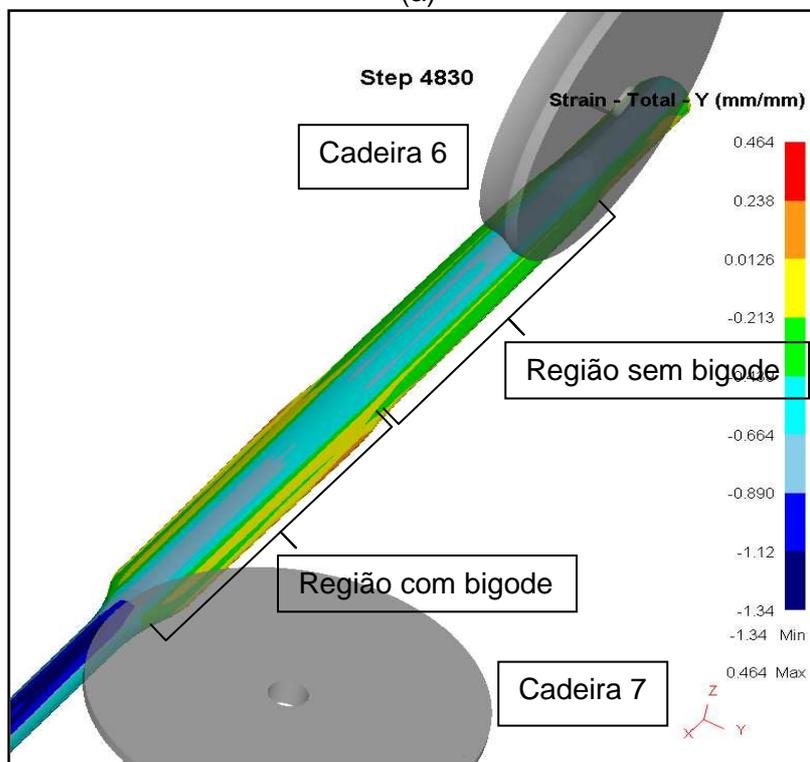


Figura 5.23 – Aparecimento do defeito bigode entre os passes 5 e 6.

O defeito teve início com a entrada do esboço no passe 6 enquanto ainda o passe 5 era laminado de acordo com a Figura 5.23 e permaneceu até o momento imediatamente antes da entrada do passe 7 [Figura 5.24 (a)], ou seja, toda a porção de material que saiu do passe 6 estava com defeito até esse momento. No entanto, observa-se que assim que o material passou a ser laminado pela cadeira 7, a porção de material que estava saindo da cadeira 6 nesse momento passou a não apresentar bigode (Figuras 5.24 (b) e 5.25). A entrada da laminação pela cadeira 7 alterou o fluxo de material, observado pela alteração de velocidade na porção com defeito (Figuras 5.23 e 5.25) que estava saindo do passe 6. Na Figura 5.23 observa-se o material saindo com bigode da cadeira 6 na faixa de velocidade entre 1590 e 1840 mm/s. Após a entrada do passe 7, o material passou a sair da cadeira 6 na faixa de velocidade entre 1340 e 1590 sendo possível a eliminação do defeito.



(a)



(b)

Figura 5.24 – (a) Esboço com bigode antes de entrar no passe 7 e (b) bigode sendo eliminado durante laminação simultânea dos passes 6 e 7.

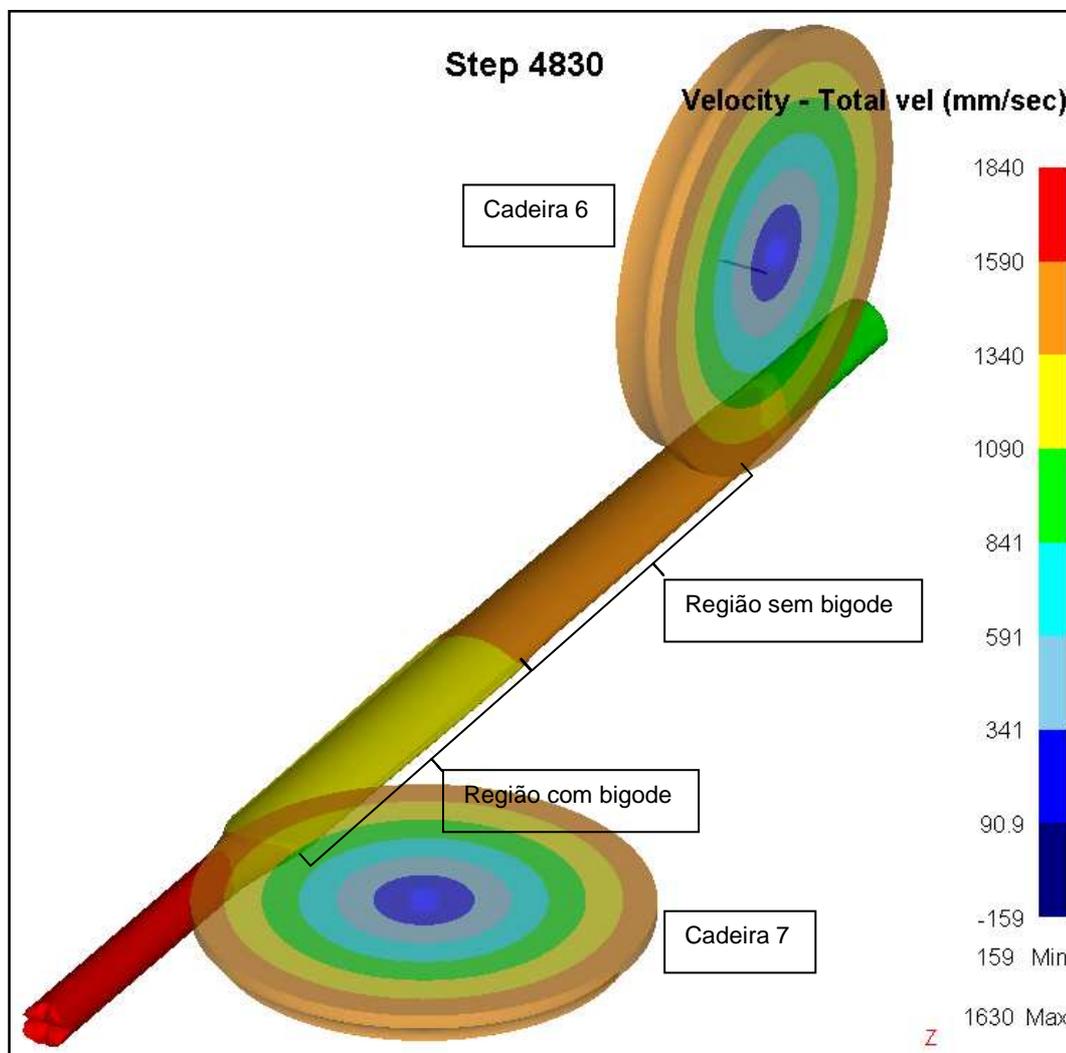


Figura 5.25 – Eliminação do primeiro bigode formado entre os passes 5 e 6.

Também foi possível observar a formação do defeito bigode durante uma parte da laminação da cadeira 7, ou seja, no último passe da etapa de desbaste. O não controle das tensões entre passes gerou um esboço final com significativa variação dimensional que pode ser observado pelas Figuras 5.26 e 5.27 ao longo do comprimento.

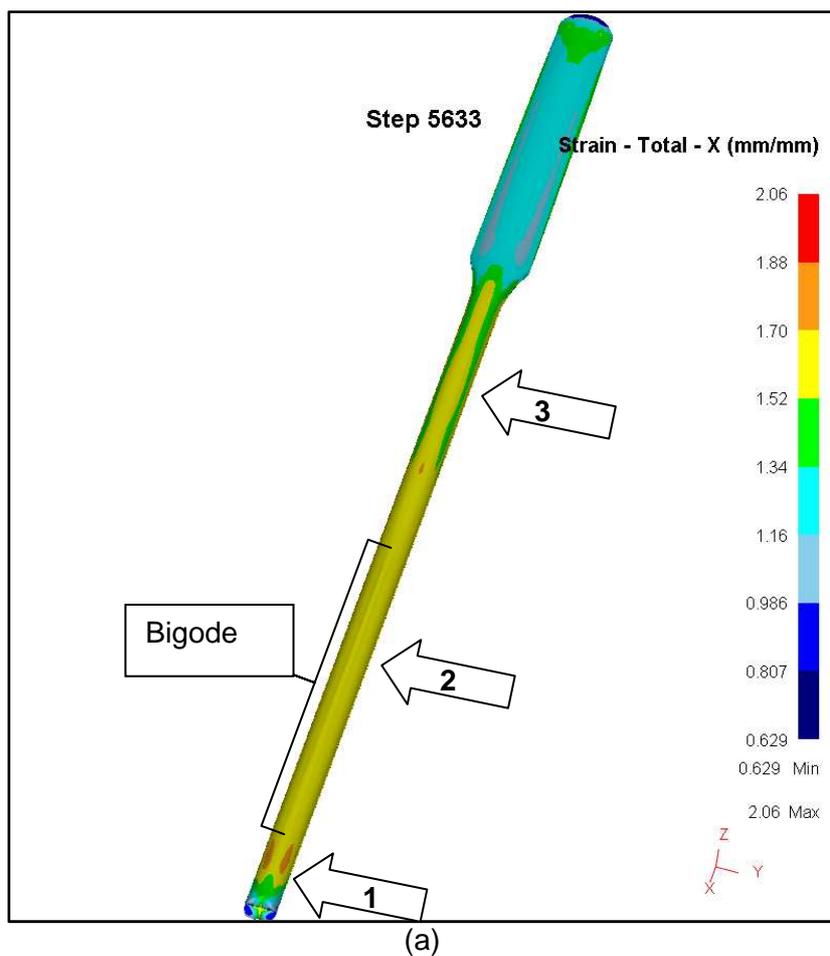


Figura 5.26 – Detalhe do bigode formado no esboço final após o passe 7. As setas indicam a seção de corte na peça cujas medidas estão descritas na Figura 5.27.

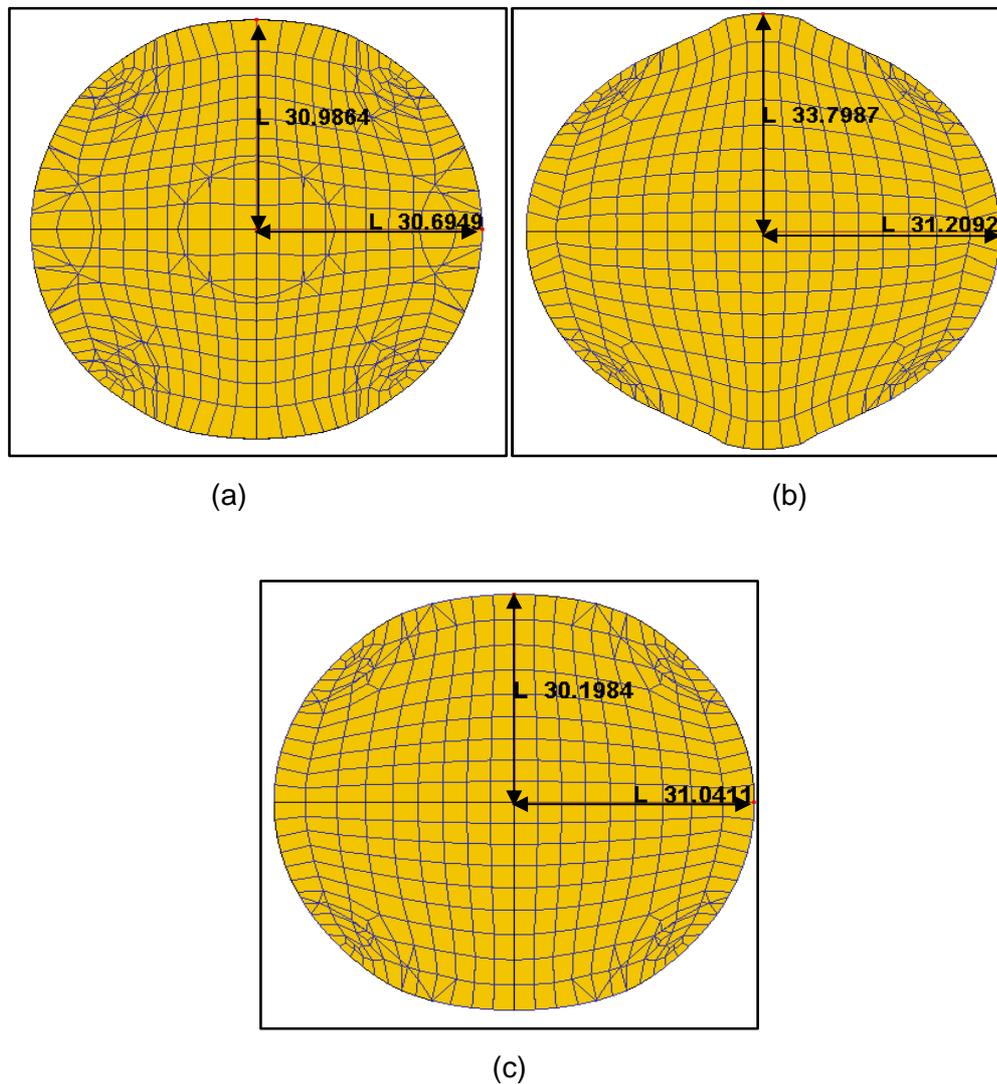


Figura 5.27 – Variação dimensional em milímetros no esboço final observado através de corte da seção transversal das regiões indicadas pelas setas na Figura 5.26 de acordo com: (a) seta 1; (b) seta 2 e (c) seta 3.

6 – CONCLUSÃO

- Os resultados obtidos na simulação numérica utilizando o software DEFORM 3D[®] da laminação da etapa de desbaste obteve resultados satisfatórios comparados com as amostras de um produtor de barras comercial provando a aplicabilidade do método em processos de laminação industrial.
- Observa-se boa semelhança de forma entre a simulação numérica e a amostra industrial para todos os passes em todos os Casos.
- Até o terceiro passe da etapa de desbaste estudada, observa-se boa concordância de resultados dimensionais (largura e altura) para todos os Casos em relação à amostra industrial e não se observa diferença significativa entre as simulações propostas.
- Na comparação entre os resultados das simulações propostas, os Casos 2 (alteração da luz entre os canais) e 3 (alteração do atrito) não apresentaram diferenças significativas em relação ao Caso 1 (padrão) nos resultados dimensionais, redução em altura e de alargamento para todos os passes. Os Casos 4 (aumento do raio do cilindro) e 5 (laminação multi-passe) apresentaram diferenças de resultados dimensional e de deformação em relação ao Caso 1 (padrão).
- Para a altura (H), observa-se boa concordância de resultados dimensionais em comparação com as amostras industriais até o passe 6-H em todos os Casos. No último passe (7V) somente o Caso 5, laminação multi-passe, apresentou resultado de altura próximos da amostra industrial.
- Para a largura (B), nos passes 4-H, 5-V e 7-V, foi observado uma diminuição significativa para os Casos 1 (padrão) , 2 (alteração da luz entre os canais) e 3 (alteração do atrito) em relação a amostra industrial. Para o Caso 4 (aumento do raio do cilindro), essa diminuição ocorreu somente para o passe 7-V.
- Comparando somente as simulações numéricas propostas, a partir do quarto passe (4-H), as simulações dos Casos 4 e 5 tiveram resultados de largura (B) superiores aos Casos 1, 2 e 3 .
- Esse resultado está em acordo com os resultados de deformação efetiva, redução em altura e alargamento superiores para os Casos 4 e 5 a partir do quarto passe de laminação comparados com os Casos 1, 2 e 3. Todos os Casos apresentaram comportamento semelhante de deformação efetiva média até o terceiro passe.

- O resultado do esboço redondo final (passe 7) obtidos no Caso 5, laminação do tipo multi-passe, obteve resultados dimensionais (altura e largura), redução em altura e alargamento muito próximos das amostras fornecidas pelo produtor.
- As tensões entre passes presentes na simulação de laminação do tipo multi-passe geraram defeitos como variação dimensional e bigode no esboço final.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar os fenômenos de tensão entre passes na laminação do tipo multi-passe com o objetivo reduzir as perdas por variação dimensional principalmente na cabeça e cauda de laminação.
- Simular a etapa de desbaste utilizando curvas de fluxo real.
- Estudar outras variáveis de laminação como a condição superficial da matéria-prima a ser laminada. Ex.: Simular a laminação de tarugos com defeitos superficiais artificiais como trincas, riscos ou bolhas.
- Estudar o desgaste em cilindros provocado pela laminação.

6– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BICKFORD, W. B. *A First Course in the Finite Element Method*. 2ª. ed., 652 p. Illinois: Irwin, 1994.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. *Fundamentos da Conformação*. Mecânica dos Metais. 2ª ed., 263 p. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

CODA, R. C. *Processo Laminação de Barras*. 97p. Porto Alegre: Fundação Luiz Englert, 2008.

DIETER, G. E. *Metalurgia Mecânica*. 2ª ed., 653 p. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A., 1981.

ERIKSSON, C. *Roll Pass Design for Improved Flexibility and Quality in Wire Rod Rolling*. 2004. 41p. Tese (Doutorado). Royal Institute of Technology. Estocolmo. 2004.

FILIPOVIC, M. *Evolution of artificial defects during shape rolling*. 2007. 31p. Dissertação (Mestrado). Royal Institute of Technology. Estocolmo. 2007.

KOSAK, D. *Roll Pass Design Manual*. 203 p. Alemanha, 1976.

LIM, K. H.; KIM, H. S.; CHO, Y. K. *More efficient operating practices for improving the surface quality of high quality steel wire*. SEAI SI, 29-3, p. 42-49, 2000.

MAGALHÃES, F. de C. *Estudo da Evolução de Defeitos Superficiais em Barras de Cobre Submetidas ao Processo de Trefilação*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

MAKINOUCI, A. *Sheet Metal Forming Simulation in Industry*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 60, p. 19-26, 1996.

NORDÉN, K. **Surface and Inner Deformation during Shape Rolling of High Speed Steels**. 2007. 14p. Dissertação (Mestrado). Royal Institute of Technology. Estocolmo. 2007.

OLIVEIRA, R. S. **Análise da Fabricação de Fio retangular de Cobre Eletrolítico, com seção 3,5 x 8,8 mm a partir de Vergalhão cilíndrico de Diâmetro 8,0 mm**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, A. D.; MAGALHÃES, F. C.; CETLIN, P. R.; CAMPOS, H. B. **Análise Dimensional da Seção Transversal do Fio de Cobre Eletrolítico Retangular Produzido pelos Processos de Laminação e Trefilação**. Revista Escola de Minas, 7 p. Ago. 2009.

SHINOHARA, T.; YOSHIDA, K.; SRIPRAI, D.; IMAI, T. **Deformation Analysis of Surface Crack in Rolling and Wire Drawing**. JSME International Journal, 48-4, p. 335-340, 2005.

SON, I. H.; LEE, J.; LEE, Y. H.; LEE, D. L.; IM, Y. T. **FE Simulations of Deformation Behavior with Surface Defects in Wire Rod Rolling**. Posco Technical Report, 10-1, p. 71-78, 2007.

TECHNICAL COMMITTEE ON ROD AND BAR MILLS. **Manual de Defeitos A.I.S.I.** 24 p. Washington, 2005.

WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of Rolling**. 1ª ed., 679 p. Polônia: Editora Pergamon, 1969.

WWW.ACOSVIC.COM.BR/TABELAS/TABELA_02.PDF, consulta em 05/06/2010.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The Finite Element Method**. 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 1989.