

# SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO DESBASTE NA LAMINAÇÃO DE LONGOS<sup>1</sup>

Isaac Rosa Soares<sup>2</sup>  
Antonio Eustaquio de Melo Pertence<sup>3</sup>  
Frederico de Castro Magalhães<sup>4</sup>  
Tito Hugo Nogueira Coelho<sup>5</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>6</sup>

## 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. 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 variáveis de laminação como atrito, luz entre canais, tensões entre passes, diâmetro dos cilindros de laminação e canal de calibração através de modelo matemático na etapa de desbaste. O trabalho será conduzido pelo método de elementos finitos utilizando o pacote comercial DEFORM 3D elaborado pela Scientific Forming Technology Corporation – SFTC. Os resultados dimensionais obtidos do modelo em cada passe obtiveram aproximação aceitável comparados com amostras fornecidas por um produtor de barras comercial.

**Palavras-chave:** Laminação de desbaste; Modelo matemático; Elementos finitos.

## SIMULATION OF ROUGHING MILL USING FINITE ELEMENTS METHOD IN ROLLING OF LONG PRODUCTS

## Abstract

Technology investments to increase productivity and product quality has long been the focus of studies by companies given the high competitiveness. 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 of the work was study the effect of rolling variables such as friction, gap, interstand tensions, roll diameter and shape of caliper through mathematical model in the roughing mill. The work will be conducted by method of element finite using the commercial software Deform 3D developed by Scientific Forming Technology Corporation - SFTC. 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.

**Key words:** Roughing mill; Mathematic model; Finite elements method.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte; Eng. De Assistência Técnica da Gerdau Açominas. isaacrosasoares@gmail.com.br

<sup>3</sup> Professor Associado do Departamento Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

<sup>4</sup> Pós-Dr., Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

<sup>5</sup> Aluno de Graduação de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

<sup>6</sup> Professor Associado do Departamento Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Bickford,<sup>(1)</sup> 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<sup>(2)</sup> o método de elementos finitos é uma ferramenta analítica de 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 fluídos, transferência de calor, vibrações, potencial elétrico, campos magnéticos, comportamentos de materiais em processos de conformação etc.

A motivação do trabalho é o de prever resultados práticos através do método de elementos finitos para avaliação de 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 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 evitar a ocorrência de defeitos de laminação.

O objetivo principal é modelar a etapa de desbaste de uma laminação de barras comerciais através do método de elementos finitos. Deseja-se também avaliar o efeito de variáveis de laminação na deformação de produtos longos. Entender a relação entre o projeto de calibração dos passes de desbastes na qualidade do material laminado utilizando o método de elementos finitos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

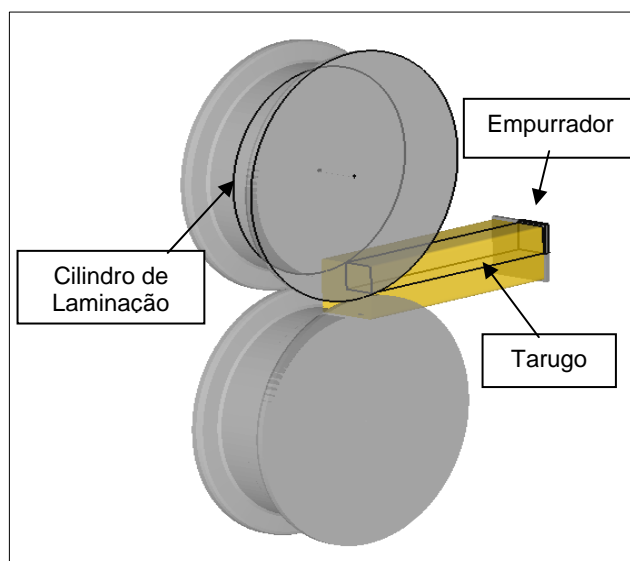
Visando estabelecer um conjunto de parâmetros para realizar as simulações numéricas propostas neste trabalho, define-se na etapa de pré-processamento a configuração do software Deform 3D<sup>®</sup> atendendo-se todos os pontos necessários à realização de uma simulação que retrate um ambiente real.

Os parâmetros de simulação no pré-processador do Deform 3D<sup>®</sup> foram ajustados com as seguintes condições de contorno: laminação com deformação plástica incremental (Laminação Lagrangiana) e processo com cálculo de temperatura na peça (não-isotérmico) com temperatura inicial de laminação de 1.200°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. O tarugo foi definido como um material plástico.

### 2.1 Geometrias Utilizadas na Simulação Numérica

A geometria do material a ser laminado (tarugo com dimensional de 130x130x500 mm de comprimento), o cilindro de laminação de cada passe e o

empurrador (com dimensional de 140x140 mm) foi elaborada no “software” utilizando o módulo *Shape Rolling*. Devido à simetria dos perfis, o material base (tarugo de aço DIN C-15) os cilindros e o empurrador foram projetados no Deform 3D<sup>®</sup> considerando  $\frac{1}{4}$  do perfil original de cada item, conforme Figura 1.



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

### 2.1.1 Tarugo

As simulações foram realizadas considerando o aço DIN C-15 presente na biblioteca de materiais do Deform 3D<sup>®</sup> na qual os dados de comportamento mecânico já estão definidos no mesmo. Esse material foi definido como plástico. O módulo *Shape Rolling* do software permite a criação da geometria 2-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.

### 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 2. A única exceção foi o passe cinco, canal quadrado, não disponível na biblioteca, cuja seção 2D foi criada utilizando o software Solid Works<sup>®</sup> e exportada para o Deform 3D<sup>®</sup>. No processo de simulação foi adotada a temperatura dos cilindros 55°C, velocidade angular constante de 50 rpm para todas as simulações numéricas propostas.

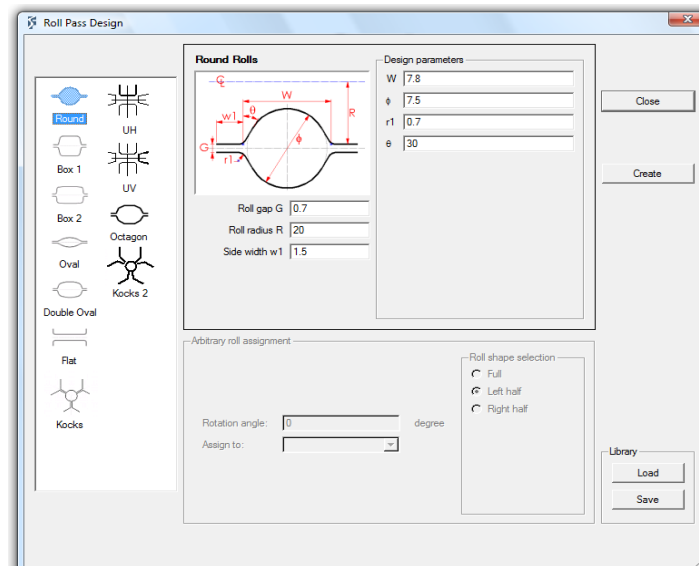


Figura 2. Geometrias primitivas presentes na biblioteca do Deform 3D<sup>®</sup> versão 10.0.

### 2.1.3 Projeto de calibração

Nesse estudo as simulações serão conduzidas com as cadeiras dos passes 1, 2, 4, 6 na posição vertical e nos passes 3, 5 e 7 na posição horizontal girando estas cadeiras em 90°. A Figura 3 demonstra a seqüência da etapa de desbaste a ser estudada para obtenção de esboço final redondo.

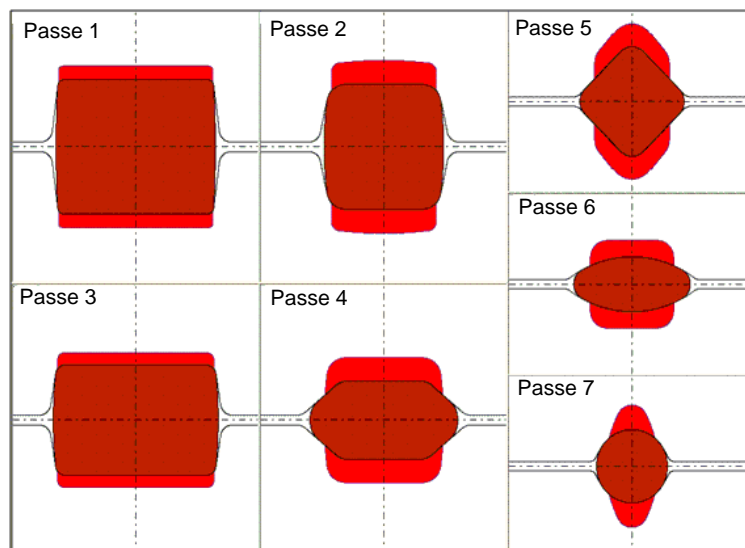


Figura 3. Sequência de calibração na etapa de desbaste utilizada para simulação por elementos finitos para obtenção de esboço final redondo.

As simulações numéricas foram divididas em cinco principais estudos de caso na qual os parâmetros para a simulação estão descritos nas Tabelas 1 e 2. Para o Caso 2\* foi estudado o efeito da variação da luz entre os canais (S) na qual as simulações foram realizadas com os passes 1, 3, 5 e 7 configurado com valor de 7mm. No Caso 5, laminação do tipo multi-passe ou contínua, a velocidade das cadeiras foi mantida constante para todos os passes para permitir a avaliação da tensão entre passes.

**Tabela 1.** 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
	<i>Tabela</i>	<i>M</i>	<i>R [mm]</i>	
Caso 1 – Padrão	2	0,5	300,00	Passes individuais
Caso 2* – Luz entre canais	<b>2</b>	0,5	300,00	Passes individuais
Caso 3 - Atrito	2	<b>0,7</b>	300,00	Passes individuais
Caso 4 – Raio dos cilindros	2	0,5	<b>500,00</b>	Passes individuais
Caso 5 – Multi-passes	2	0,5	300,00	<b>Multi-passe</b>

\*No caso 2 a luz entre canais para os passes 1, 3, 5 e 7 foi de 7 mm.

**Tabela 2.** Principais relações geométricas de cada passe utilizadas na simulação numérica para o Caso 1

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

Obteve-se amostra de cada passe da etapa de desbaste retirada durante uma operação real de laminação de barras para comparação dos resultados dimensionais com os resultados obtidos em cada passe pela simulação numérica. Os parâmetros de calibração durante a laminação foram de acordo com o Caso 1 definidos nas Tabelas 1 e 2.

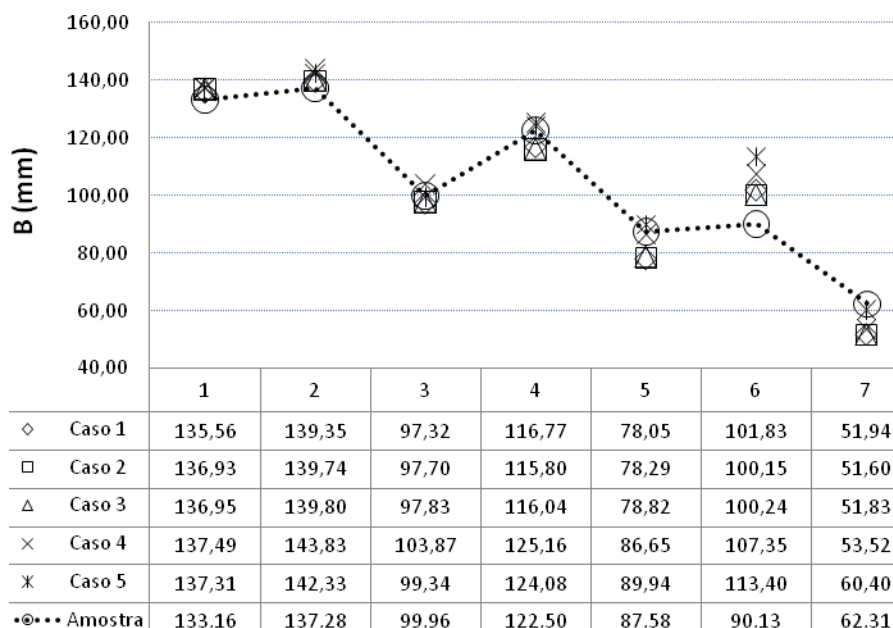
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 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 do esboço obtido através de um laminador para produção de barras comerciais.

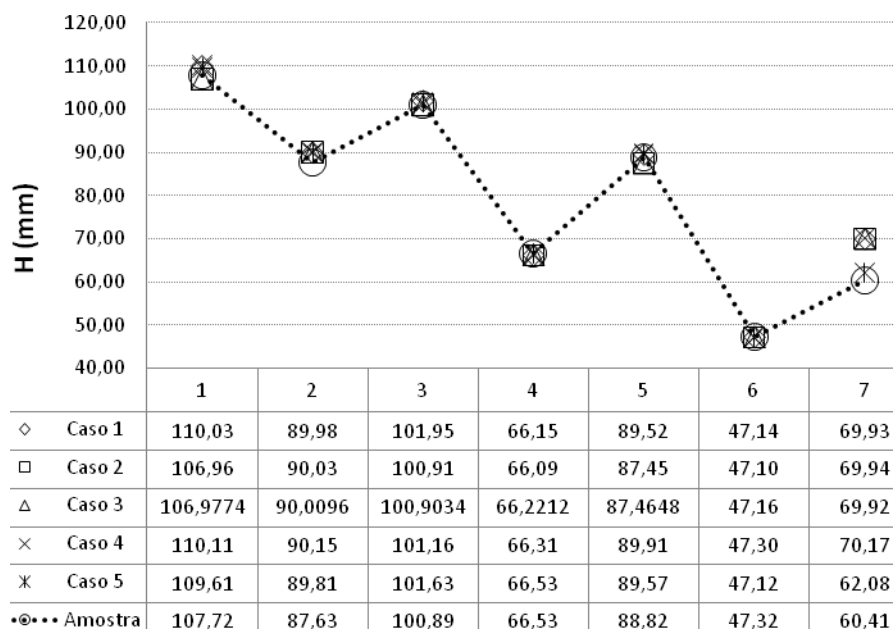
Observa-se que os resultados dimensionais apresentados na Figura 4 para a largura, obtidos pela simulação numérica através do Deform 3D<sup>®</sup> estão de acordo com os valores apresentados pela amostra retirada do esboço durante a laminação.

As maiores variações foram encontradas para o esboço obtido após o passe seis na qual todos os casos apresentaram largura superior à medida da amostra. O Caso 5, laminação multi-passe, foi o que apresentou melhor resultado final.



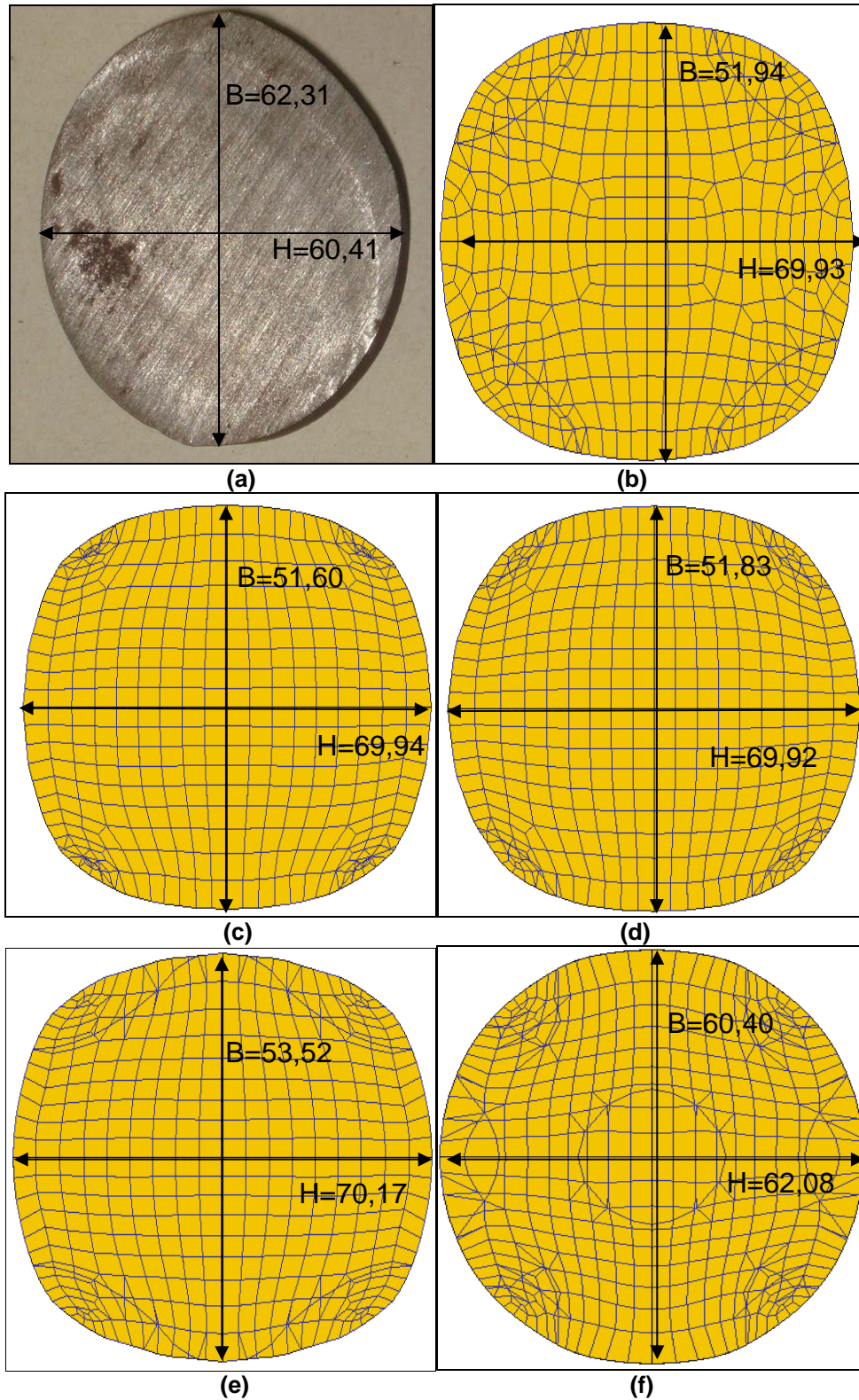
**Figura 4.** Comparativo da variação da largura obtida na simulação numérica de cada caso estudado com as medidas da amostra obtida durante o processo de laminação em cada passe.

Através da Figura 5 é possível observar que os resultados da simulação numérica para variação da altura durante a laminação foram bastante semelhantes aos obtidos pela amostra até o final do sexto passe. Assim como para a largura, o Caso 5 foi o que obteve melhor resultado no esboço final, após o sétimo passe, enquanto que todos os outros casos a altura final foi maior que da amostra.



**Figura 5.** Comparativo da variação da altura obtida na simulação numérica de cada caso estudado com as medidas da amostra obtida durante o processo de laminação em cada passe.

Através das Figuras 6 de amostras retiradas do esboço final da simulação numérica após o sétimo passe; é possível comparar a qualidade da simulação numérica com a amostra. O melhor resultado dimensional das simulações numéricas estudadas como apresentados pelas Figuras 4 e 5 foi para o Casos 5.



**Figura 6.** Resultados comparativo dimensional em mm da amostra do esboço após 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.

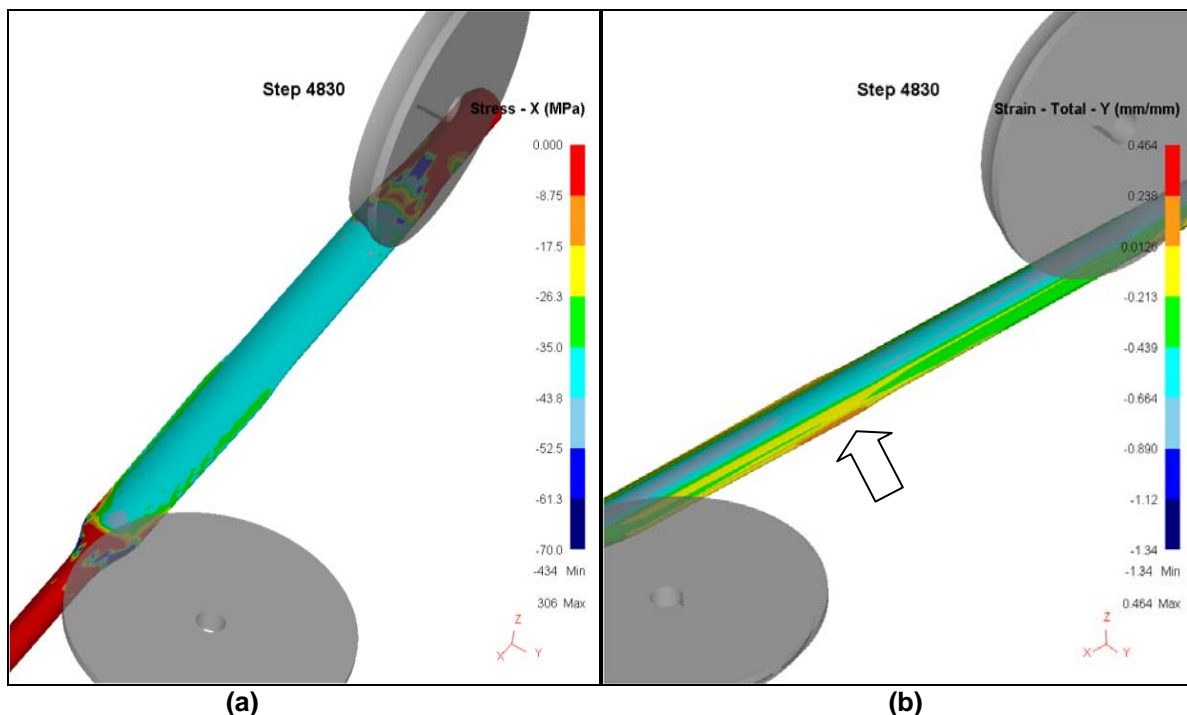
Nas simulações numéricas do tipo passe a passe, casos 1 a 4, observa-se principalmente para os esboços após os passes 5 e 7 menor largura comparado com a amostra. Comparando o caso 1, padrão, com os outros casos 2, 3 e 4, observa-se que o aumento do raio dos cilindros foi a variável mais significativa para o aumento da largura. Não se observou diferenças significativas nos resultados dimensionais obtidos nas simulações influenciadas pela mudança da luz entre canais (Caso 2) e pela alteração do coeficiente de atrito (Caso 3) comparado com o Caso 1.

O resultado final obtido após o último passe da etapa de desbaste, passe 7, na simulação multi-passe, caso 5, foi o melhor resultado dimensional. Todos os outros casos em estudo tiveram resultados semelhantes, a altura não reduziu suficientemente nem ocorreu enchimento dos canais para que o resultado final chegasse ao redondo com baixo índice de ovalização como ocorrido nos Casos 1, 2, 3 e 4.

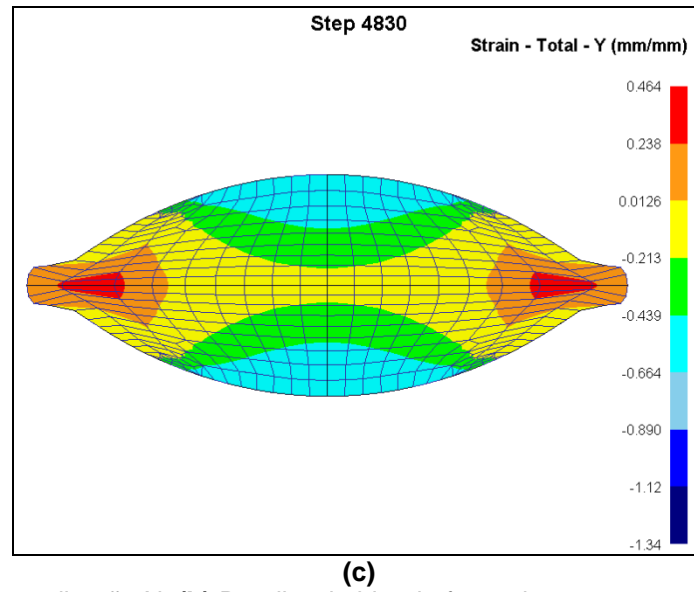
### 3.2 Avaliação do Efeito das Tensões entre Passes na Simulação Numérica Multi-passe

Os resultados dimensionais obtidos pela simulação definida no caso 5 foram bem próximos aos obtidos pelas amostras fornecidas pelo produtor. No entanto como será discutido nesse tópico, devem-se controlar as tensões geradas entre passes para manter um fluxo de material constante para evitar os defeitos encontrados nessa simulação.

Através da análise da tensão na direção X [Figura 7 (a)], 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. Observa-se que a tensão gerada estava predominantemente na faixa de -35 MPa a -44 MPa para a velocidade de laminação de 50 rpm.



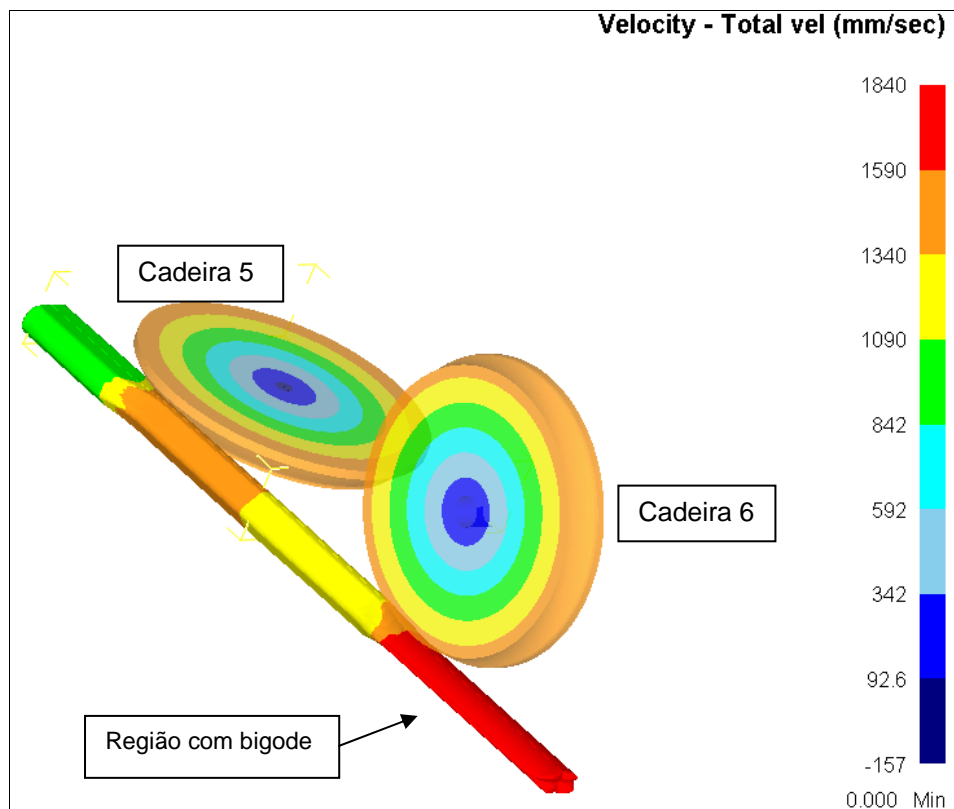




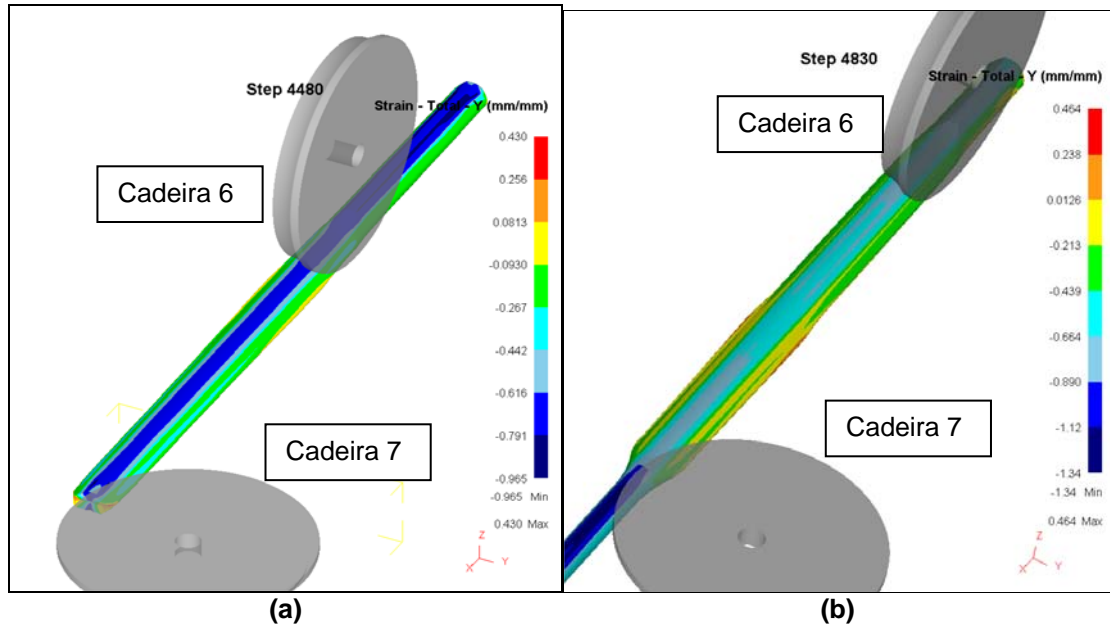
**Figura 7. (a)** Tensão na direção X. **(b)** Detalhe do bigode formado entre os passes 6 e 7. **(c)** Amostra da seção transversal do esboço na região do bigode indicada pela seta.

As tensões geradas entre passes favoreceram a formação do defeito conhecido como bigode cujo detalhe pode ser observado nas Figuras 7 (b) e (c).

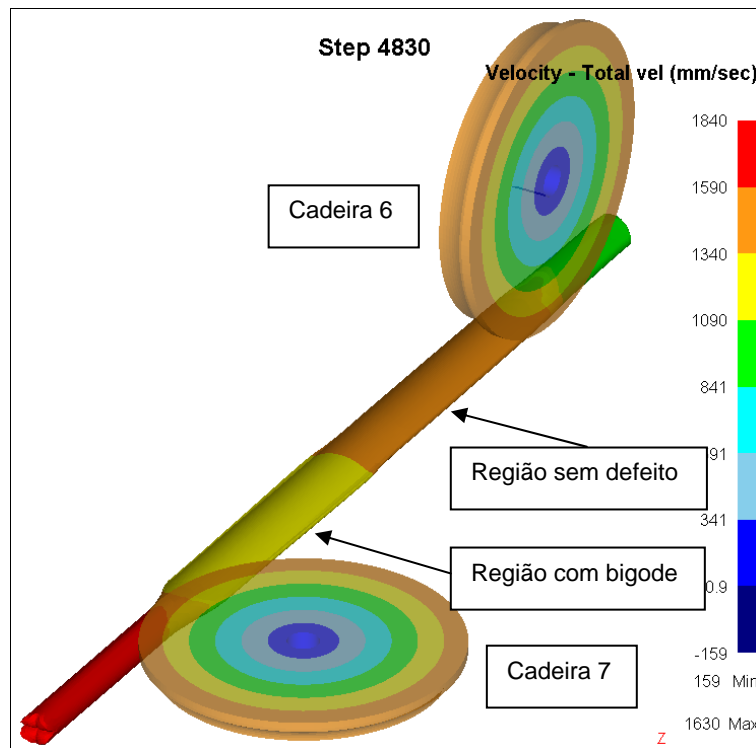
O defeito teve início com a entrada do esboço no passe 6 enquanto ainda o passe 5 era laminado de acordo com a Figura 8 e permaneceu até a entrada do passe 7 [Figura 9 (a)]. No entanto, observa-se que a entrada do passe 7 alterou o fluxo de material que estava saindo do passe 6 sendo possível a eliminação do defeito como pode ser observado pelas Figuras 9 (b) e 10.



**Figura 8.** Aparecimento do defeito bigode entre os passes 5 e 6.

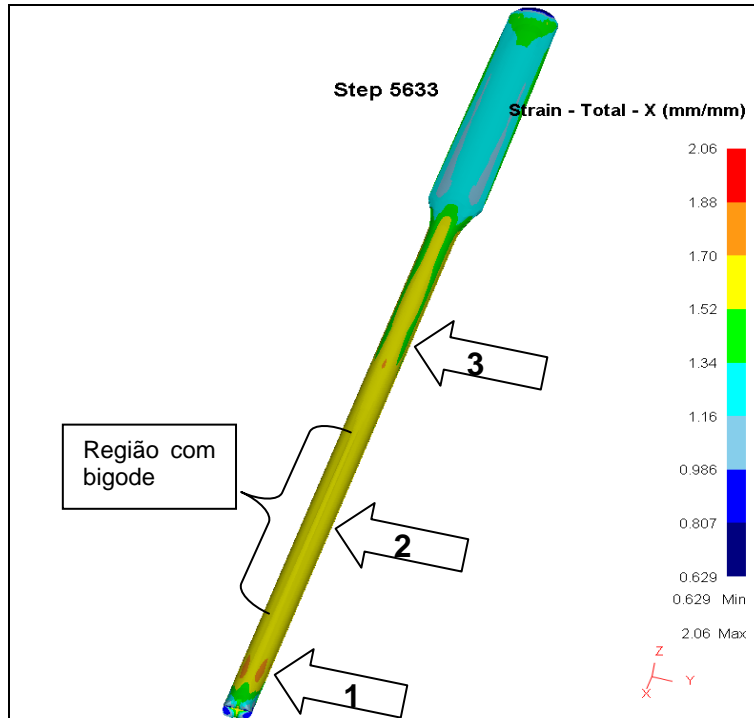


**Figura 9.** (a) Esboço com bigode anterior ao passe 7 e (b) bigode sendo eliminado durante laminação simultânea dos passes 6 e 7.

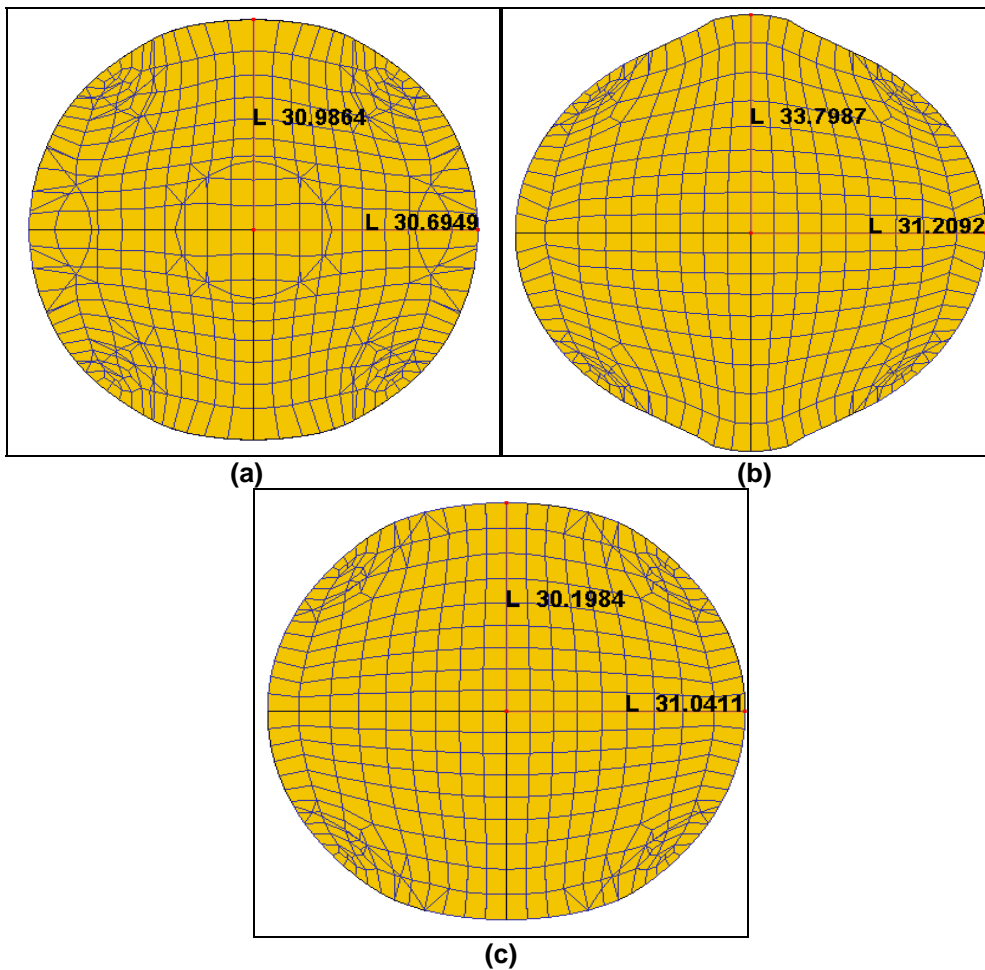


**Figura 10.** Eliminação do primeiro bigode formado entre os passes 5 e 6.

Também foi possível observar a formação do defeito bigode durante a laminação dos passes 6 e 7 resultando num esboço final apresentando defeito bigode (Figura 11). O não controle das tensões entre passes gerou um esboço final com significativa variação dimensional que pode ser observado pelas Figuras 11 e 12 ao longo do comprimento.



**Figura 11.** Variação dimensional e região com bigode apresentada no esboço final após o passe 7. As setas indicam a variação dimensional na peça gerada pela tensão entre passes.



**Figura 12.** Variação dimensional no esboço final observado através da seção transversal das regiões indicadas pelas setas na Figura 11 de acordo com: (a) seta 1; (b) seta 2 e (c) seta 3.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na simulação matemática utilizando o software Deform 3D<sup>®</sup> da laminação da etapa de desbaste obteve resultados satisfatórios comparados com as amostras obtidas num laminador real de barras comercial. É possível o uso desse modelo para estudos dessa etapa para o laminador de barras em estudo.

Os resultados obtidos no Caso 5, laminação do tipo multi-passe, obtiveram aproximação dimensional, altura e largura próximos das amostras fornecidas pelo produtor.

Os Casos 2 (alteração da luz entre os canais) e 3 (alteração do atrito) não apresentaram diferenças significativas em comparação com o Caso 1 (padrão) nos resultados dimensionais.

O aumento do raio do cilindro simulado no Caso 4 foi efetivo no aumento do alargamento como indicado em literatura por Coda.<sup>(3)</sup>

As tensões entre passes presentes na simulação de laminação do tipo multi-passe, Caso 5, geraram variação dimensional e defeito conhecido como bigode no esboço final como citado em literatura.<sup>(4)</sup>

### Agradecimentos

Aos professores Dr. Paulo Roberto Cetlin e Dr. Antonio Eustaquio de Melo Pertence pela contribuição técnica e apoio para realização do trabalho. Ao Tito Hugo Nogueira Coelho e Dr. Frederico de Castro Magalhães pela colaboração e valiosa participação na etapa de simulação numérica.

### REFERÊNCIAS

- 1 BICKFORD, W. B. *A First Course in the Finite Element Method*. 2ª. ed., 652 p. Illinois: Irwin, 1994.
- 2 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.
- 3 CODA, R. C. *Processo Laminação de Barras*. 97p. Porto Alegre: Fundação Luiz Englert, 2008.
- 4 ERIKSSON, C. *Roll Pass Design for Improved Flexibility and Quality in Wire Rod Rolling*. 2004. 41p. Tese (Doutorado). Royal Institute of Technology. Estocolmo. 2004.