

# ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA LAMINAÇÃO DE CHAPAS FINAS A FRIO<sup>1</sup>

Rodrigo Monteiro de Oliveira<sup>2</sup>  
Alexsandro Santos de Moraes<sup>3</sup>

## Resumo

A aplicação de tensões trativas é prática comum na laminação de chapas finas a frio, com o objetivo de reduzir a carga de laminação e garantir a planicidade da chapa. No entanto, determinar o valor das cargas a serem aplicadas para tracionar a chapa, tanto a frente quanto a ré, sem rompe-la é uma tarefa complexa, pois as tensões que atuam na zona de deformação variam com a qualidade do material, velocidade de laminação, grau de redução, entre outros. Os programas de simulação numérica evoluíram nos últimos anos tanto quanto sua interface gráfica, quanto ao tempo de processamento que foi reduzido devido ao avanço dos computadores e dos calculadores (*solvers*). Mas, ainda os resultados de simulação são discutidos e, por isto, neste trabalho avaliamos o programa Simufact.Forming quanto a capacidade de prever cargas de laminação e as tensões efetivas no material sendo laminado com tensões trativas a frente e a ré. Para avaliação, os resultados virtuais foram comparados aos resultados reais da laminação de uma chapa de aço AISI-1006 sofrendo uma redução de 86% de altura em cinco passes. Com os resultados obtidos, pode-se observar que as cargas e as tensões virtuais variam em 10% em relação aos valores reais.

**Palavras-chave:** Simulação numérica; Laminação a frio.

## NUMERICAL-EXPERIMENTAL OF THIN PLATES COLD ROLLED

### Abstract

The application of tensile stresses is common practice in the thin cold rolling sheets, with the goal by reducing rolling load and ensure the flatness of the sheet. However, determining the value of the loads to be applied to pull the sheet, both front and back without breaks it is a complex task, because the stresses acting in the deformation zone vary with the quality of material, machine speed, degree of reduction, among others. The numerical simulation programs have evolved in recent years as its graphical interface, the processing time has been reduced due to the advancement of computers and calculators (*solvers*). But even the simulation results are discussed and, therefore, in this paper we evaluated the program Simufact.Forming as the ability to predict rolling loads and effective stresses in the material being rolled with front and back tensions. For evaluation, the virtual results were compared to actual results of laminating a sheet of AISI-1006 suffering a 86% reduction in height five passes. With the results obtained, it was able to observe that the loads and stresses virtual vary by 10% in relation to the actual values.

**Key words:** Numerical simulation; Cold rolling.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais. Mestrando em Nanociências e Materiais Avançados. Engenheiro de Processos na Armco do Brasil SA. São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico. Mestre em Engenharia. Consultor Técnico na Simufact-Americas LLC. Porto Alegre, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente competitividade estimulada por mercados cada vez mais integrados, desenvolver novos produtos e processos de fabricação mais eficientes é crucial para a manutenção e crescimento das empresas. O processo de desenvolvimento de novos produtos, a melhoria contínua dos atuais processos de fabricação, além é claro do investimento tecnológico, propiciam um maior poder e participação de mercado para as empresas que possuem essa visão.

Para que esse processo seja bem sucedido, o tempo é fator crucial, pois processos de produção com *lead time* maior apresentam custos maiores, além de possibilitarem a maior presença de não qualidade dos produtos, por estes estarem muito mais tempo em processo ou em etapas de movimentação, armazenagem, etc. Responder com precisão todas as etapas envolvidas em um processo de desenvolvimento de produtos laminados a frio e as variáveis de processo, tais como velocidade de laminação, redução, número de passes, trações envolvidas, propriedades finais do produto acabado de acordo com as especificações do cliente, etc., permitem com que o valor de produção para determinado item seja muito mais preciso, dando firmeza à tomada de decisões.

Neste contexto os *softwares* de simulação permitem que o custo envolvido para o desenvolvimento de novos produtos seja drasticamente reduzido. Através da utilização desses poderosos programas diminui-se a realização de *try outs*, diminui-se o tempo de espera de equipamentos produtivos, diminuem-se os custos de realização de alterações no processo, por esses estarem em etapa inicial, permitem a predição de problemas produtivos e possibilitam grande acertividade para a etapa produtiva (pós desenvolvimento). A aposta nessas novas ferramentas será cada dia mais constante no meio industrial, haja visto o advento de computadores mais poderosos à um custo menor, *softwares* que levam em consideração grandes números de variáveis de processo e propiciam um ambiente amigável ao usuário. Já não são poucos os casos conhecidos de utilização de *softwares* de simulação computacional, dos mais variáveis tipos e das mais variadas aplicações finais, que apresentam excelentes resultados finais, conforme apontado pelo ESSS<sup>(1)</sup> (*Engineering Simulation and Scientific Software*).

Hoje em dia parece impensável conceber um equipamento ou um projeto qualquer sem a utilização de *softwares* de desenho (CAD - *Computer Aided Design* – Desenho assistido por computador). Os processos produtivos estão cada vez mais bem representados neste novo ambiente virtual, os resultados são extremamente animadores. Para um futuro próximo, podemos imaginar uma integração entre indústria e simulação computacional muito maior.

Inseridos neste contexto, a Armco do Brasil SA e a Simufact Americas LLC, decidiram desenvolver um modelo virtual de laminação a frio de produtos planos utilizando o software de simulação de processos de conformação Simufact.Forming. Este modelo, desenvolvido em conjunto, permite predizer condições de processo e de produto, além de tornar muito mais efetivo o processo de desenvolvimento de novos produtos planos laminados a frio. Condições como trações envolvidas, redução por passe, velocidade de laminação, tipo de material envolvido, tornam-se variáveis de entrada, e como resultado podemos descrever o comportamento do material, o aperto necessário para redução de espessura e até mesmo a corrente necessária do motor para a realização de tal tarefa, etc. A curva de aprendizagem para novos equipamentos cai drasticamente e a melhoria dos processos já

consolidados se faz possível, sem que haja grandes custos ou a necessidade de sucessivos testes práticos.<sup>(2)</sup>

Através deste trabalho, esperamos demonstrar a efetividade do *software* de simulação Simufact.Forming na predição do processo de laminação e no desenvolvimento de novos produtos laminados a frio.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Da Laminação

A laminação a frio ou relaminação confere ao aço uma série de propriedades para as mais diferentes funções, o que o torna um produto de excelência pela versatilidade com que pode ser aplicado.<sup>(3)</sup>

Para a realização da comparação dos resultados da simulação, utilizou-se o Laminador SMS Schuler da Armco do Brasil SA, que é um laminador a frio para produtos planos com sistema quadro reversível, ou seja, um laminador que possui quatro cilindros envolvidos no processo de laminação (dois cilindros de apoio - os chamados *backup rolls*, e dois cilindros de trabalho - ou *work rolls*), além de possibilitar a laminação para ambos os sentidos. O sistema de controle de espessura é feito através de medidores de espessura que estão dispostos em ambos os lados do laminador e trabalham em malha com o AGC (Automatic Gauge Control) que movimenta os mancais dos cilindros de apoios e por consequência os cilindros de trabalho, permitindo precisão e rapidez para a correção da espessura, mesmo com as variações de espessura oriundas da matéria prima.

O laminador trabalha com dois bobinadores dispostos antes e depois da gaiola de laminação, além de um desbobinador que agiliza o processo de engate de novos materiais. A velocidade do laminador é dividida em duas faixas, chamadas de marcha pesada (para reduções de espessura maior e maiores trações, ou seja, velocidade menor), e marcha leve (para passes com reduções menores e menores valores de tração, ou seja, velocidades maiores).

Para o este trabalho laminou-se a frio um aço SAE 1006 com espessura inicial de 2,00 mm e 394 mm de largura para 0,28 mm de espessura final em 05 passes. Tal procedimento foi semelhantemente simulado no *software* Simufact.Forming aplicando-se as simplificações descritas abaixo, de maneira a garantir a validade de comparação entre o modelo real e o modelo virtual.

A carga dos cilindros de laminação foi determinada pelo transdutor de pressão presente no sistema hidráulico responsável pelo deslocamento e carga gerados nos mancais dos cilindros de apoio. O ensaio de tração seguiu as especificações determinadas pela norma NBR 6152<sup>(4)</sup> (Materiais Metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente), e foi realizado na máquina de ensaios Instron modelo 3385H.

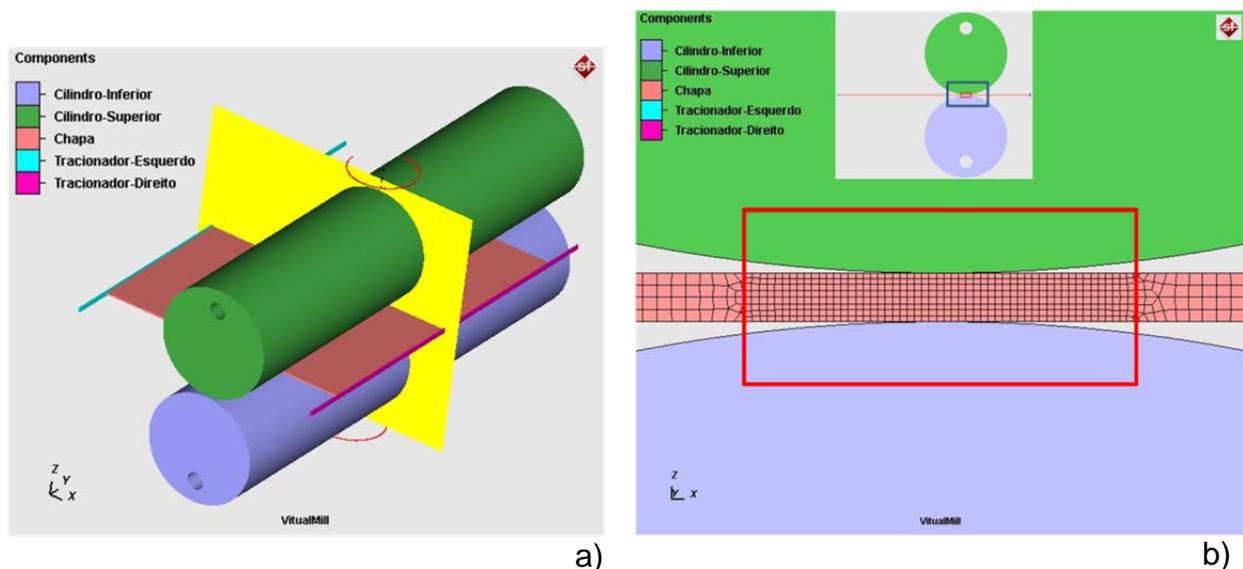
### 2.2 Da Simulação

No processo de laminação, os bobinadores (responsáveis por tracionar a chapa) estão distantes dos cilindros de trabalho (que deformam a chapa) aproximadamente três metros, entre eixos. A simulação completa deste processo de conformação seria inviável em termos de tempo de processamento. Então, as seguintes simplificações foram definidas no modelo de simulação:

- o comprimento inicial da chapa é 1/20 da distância entre eixos dos bobinadores, mas apenas 1/3 deste comprimento será laminado;
- após cada passe de laminação, haverá uma operação de corte para reduzir o comprimento da chapa laminada novamente para o comprimento inicial;
- e, também, os bobinadores são representados como placas coladas a chapa, e seus movimentos são controlados por molas.

Após a definição das simplificações, os modelos geométricos tridimensionais dos corpos presentes no processo (cilindros, chapa inicial, etc) foram desenhados num programa CAD específico, e importados diretamente de sua extensão nativa para o Simufact.Forming, onde foi realizado o posicionamento dos corpos através de recursos direcionados para isto. O modelo de simulação do laminador, o qual foi nomeado laminador virtual, foi desenvolvido no programa comercial Simufact.Forming.

No Simufact.Forming, aproveitando-se da simetria do processo e considerando que, neste trabalho, o comportamento do material ao longo de sua largura não será analisado, o processo pode ser representado por uma simetria 2D-planar. Com isto, a chapa foi discretizada pelo método dos elementos finitos numa malha quadrática, onde o comprimento de aresta do elemento é 1/4 da espessura da chapa. E, para obter melhores resultados, foi adicionada uma caixa de refinamento de malha ao redor da zona de deformação. A Figura 1 mostra os modelos geométricos tridimensionais dos corpos com o plano de corte que representa a simetria 2D-planar, bem como a malha de elementos finitos com a caixa de refinamento em evidência.



**Figura 1.** Modelos geométricos tridimensionais dos corpos com o plano de corte que representa a simetria 2D-planar, bem como a malha de elementos finitos com a caixa de refinamento em evidência.

Os tracionadores (as placas que representam os bobinadores), como escrito anteriormente, são componentes controlados por molas. Quando o tracionador for responsável por puxar a chapa no sentido da laminação, aplicando tração a frente, molas inicialmente comprimidas (com energia armazenada) são utilizadas; e, molas inicialmente relaxadas são utilizadas quando o tracionador for puxar a chapa no sentido contrário ao de laminação, aplicando tração a ré.

No modelo de simulação, como no processo real, cada passe de laminação é composto por dois estágios, chamados de (i) pré-passe, e (ii) passe. No estágio de Pré-Passe, os tracionadores atuam mantendo a chapa tensionada, evitando sua distorção, e o cilindro superior desce comprimindo a chapa sobre o cilindro inferior, formando a pré-forma para o estágio seguinte (o Passe).

O aço SAE 1006 presente na biblioteca de materiais do Simufact.Forming foi utilizado para definir as propriedades do material. O modelo de atrito de Coulomb foi usado, sendo que os valores do coeficiente de atrito foram calculados para cada passe utilizando as fórmulas de Ekelund para cilindros de aço, conforme descrito por Wusatowski.<sup>(5)</sup>

Para validar esse modelo de simulação, os resultados de carga de laminação e tensão efetiva no material, estimados pelo Simufact.Forming, foram comparados com os valores medidos da carga de aperto dos cilindros de laminação e da tensão máxima de tração do material.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados abaixo apresentam as seguintes identificações:

- a) Real: medidos no processo de laminação; e
- b) Virtual: valores estimados por simulação.

Na Tabela 1 que apresenta a os valores de cargas e tensões virtuais e reais para cada passe de laminação, bem como a diferença relativa do virtual para o real, pode-se observar que os valores divergem em no máximo 6,3%. Esta variação pode ser considerada insignificante frente à todas as simplificações realizadas para aumentar a velocidade de resposta do modelo virtual.

**Tabela 1.** Comparação entre os valores reais (medidos na laminação) e os resultados virtuais (estimados por simulação)

Carga (tf)		Tensão (MPa)		Diferença (%)	
Real	Virtual	Real	Virtual	Carga	Tensão
145	140	570	534	-3,4	-6,3
155	150	602	610	-3,2	1,3
160	150	724	736	-6,3	1,7
170	160	754	749	-5,9	-0,7
170	160	790	810	-5,9	2,5

Os valores da Tabela 1 foram traçados em dois gráficos: Figura 2 ilustrando as curvas de carga por passe de laminação, e a Figura 3 mostrando o comportamento da tensão máxima do material ao longo do processo. Estes gráficos nos permitem visualizar a precisão dos resultados, mediante a comparação entre as curvas virtuais e reais.

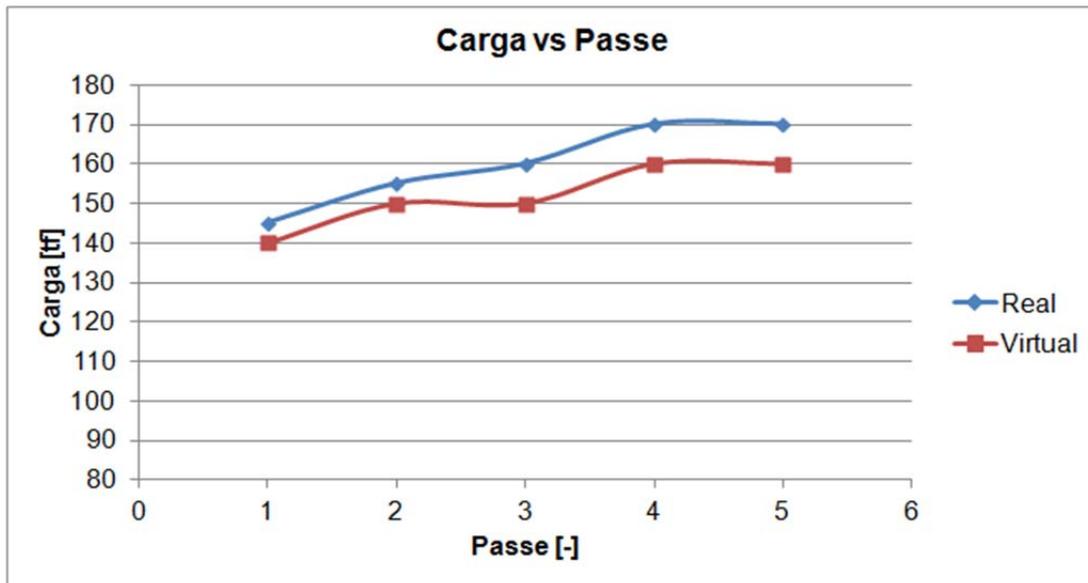


Figura 2. Variação da carga de aperto dos cilindros por passe de laminação.

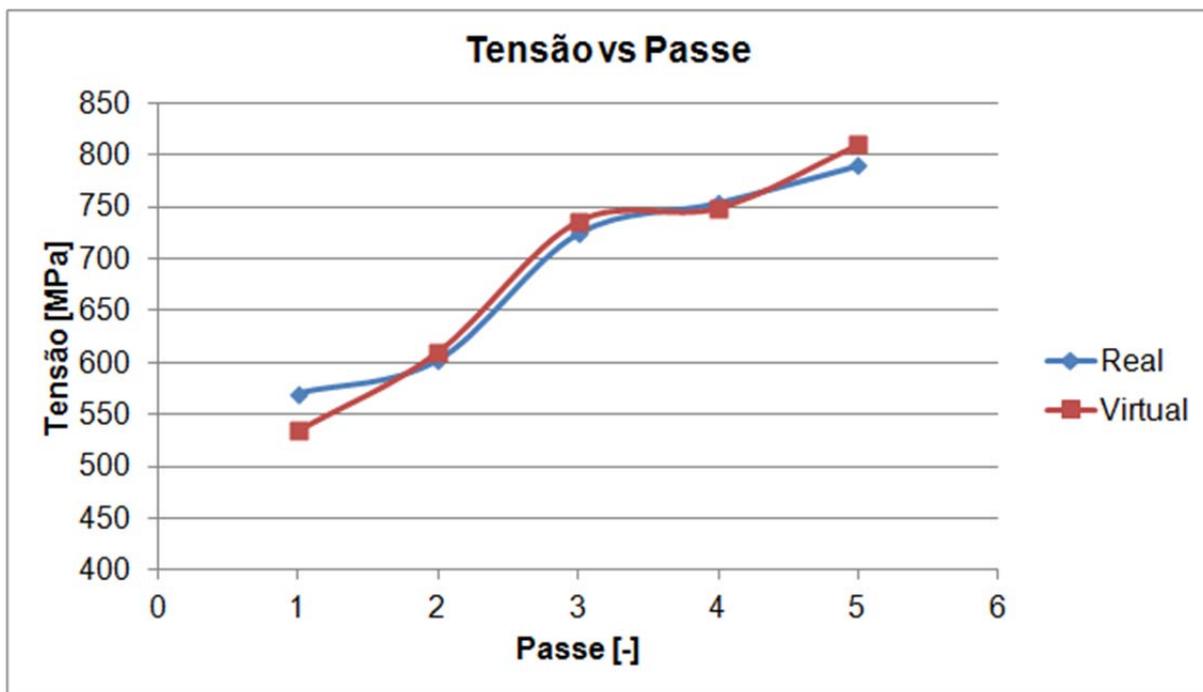


Figura 3. Comportamento da tensão máxima do material ao longo do processo de laminação.

Um outro resultado importante é o tempo de simulação. Utilizando todas as simplificações citadas, o processo completo foi simulado em menos de 2 horas. O tempo de simulação antes das simplificações descritas, foi de mais de 100 horas.

#### 4 CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados podemos considerar que a variação do resultados de simulação para o processo de laminação são de 10%, ou para mais ou para menos. Esse resultado pode ser considerado excelente visto que algumas simplificações foram realizadas para a diminuição do tempo de simulação.

O tempo de simulação é aceitável do ponto de vista industrial, onde seria possível testar até quatro variações de processo por dia de trabalho. O fato da simulação 2D-

planar extrapolada como modelo 3D, representar o comportamento do material com tal precisão é fator fundamental para a validação deste trabalho, uma vez que o material em questão foi simulado e pôde-se obter o tempo de resposta em tempo inferior à duas horas.

A utilização de técnicas de simulação baseadas em elementos finitos, permitem maior embasamento para o desenvolvimento de produtos.<sup>(6)</sup> Com a infinidade de testes possíveis através do *software* de simulação Simufact.Forming, é totalmente válida a utilização do ambiente virtual para validação de processos e produtos, e assim sendo realização de execução prática com precisão muito apurada vinda da simulação.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às pessoas que direta ou indiretamente participaram da execução deste trabalho, tanto da Armco do Brasil quanto da Simufact Americas LLC, dentre os quais gostaríamos de listar os Srs. Sérgio Fontes, Jorge Zacarias e Paulo Vieira, gerente industrial, gerente da qualidade e supervisor de produção da Armco respectivamente. Os Srs. Charles Morales e Antenor Ferreira Filho responsáveis por novos desenvolvimentos de produtos. Os Srs. João Bosco Martinelli e Manoel Marcos, diretor industrial e diretor da qualidade respectivamente, e aos Srs. Cledson e Maurício Salustiano que foram facilitadores para a execução de testes práticos. Também não podemos deixar de agradecer ao Sr. Rodrigo A. Paschoalato, supervisor de manutenção que auxilio com disponibilidade de tempo e pessoal. Por parte da Simufact Americas LLC gostaríamos de agradecer aos Srs. Paulo Sauer, gerente de vendas no Brasil, e Arjaan Buijk, diretor da Simufact Americas.

## REFERÊNCIAS

- 1 ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software). Simulação computacional pode responder por até 30% na redução do custo de produtos do setor automotivo. **ESSS Newsletter**, São Paulo, Brasil. Disponível em <[https://www.esss.com.br/newsletter/pdf/CAE\\_Auto.pdf](https://www.esss.com.br/newsletter/pdf/CAE_Auto.pdf)>. Acesso em 4 jun. 2013.
- 2 ANDERSSON, A. Comparison of sheet-metal-forming simulation and try-out tools in the design of a forming tool. **Journal of Engineering Design**, Lund, Suécia. Vol. 15, n.3, p. 11. 2004.
- 3 FERREIRA FILHO, Antenor; BIELSKIS, Marcelo Franck. Tiras de aço laminadas a frio com o uso de nitrogênio líquido. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.4, n.3, p. 30-36, jan.-mar. 2008
- 4 ABNT NBR 6152:2002 – Materiais Metálicos Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente.
- 5 WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of rolling**. New York, Ed. Pergamon Press, 1969.
- 6 SHUAI, Mei-rong et al. Finite Element Simulation of Cold-Rolling Process of Shaped Steel Tube for Driving Shaft. **Journal of Iron and Steel Research, International**, China. Vol. 17, n.8, p. 25-29. 2010.