

# MODELAMENTO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS\*

Yukio Shigaki<sup>1</sup>  
Eduardo Amorim Motta<sup>2</sup>  
Jonatas Mezêncio Silva<sup>3</sup>  
Rafael Narciso Mendes Alvarenga Romie<sup>3</sup>  
Sandro Cardoso Santos<sup>4</sup>

## Resumo

Diversos modelos matemáticos da laminação de encruamento foram desenvolvidos, porém poucos demonstram a distribuição de tensões no interior da tira dentro do arco de contato e após sair do mesmo. Os modelos desenvolvidos em elementos finitos permitem determinar essas tensões internas de forma bastante precisa. O modelamento, porém, da laminação de encruamento em elementos finitos não é tarefa simples, envolvendo a aplicação correta das condições de contorno, entrada da propriedade do material da tira, discretização da chapa e principalmente do cilindro de trabalho e mais alguns ajustes numéricos. O presente trabalho apresenta detalhadamente o modelamento da laminação de encruamento no programa de elementos finitos Simulia Abaqus explícito dinâmico, baseado em um laminador real industrial e resultados são comparados ao final. Observa-se a necessidade de continuar a ajustar o modelo para se conseguir uma melhor precisão.

**Palavras-chave:** Laminação de Encruamento; Método dos Elementos Finitos; Simulação; Carga de Laminação

## TEMPER ROLLING PROCESS MODELING WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

### Abstract

Several mathematical models of the temper rolling process have been developed, but only a few demonstrate the distribution of stresses inside the strip within the arc of contact and in the outgoing strip. The models developed in finite elements allow to determine these internal tensions in a very precise way. The modeling, however, of the finite element temper rolling process is not a simple task, involving the correct application of the boundary conditions, strip's material properties input, discretization of the strip and especially of the working roll and some numerical adjustments. The present work presents in detail the temper rolling modeling in the finite element program Simulia Abaqus explicit-dynamic, based on an actual industrial temper rolling mill and results are compared at the end. There is a need to continue adjusting the model to achieve better accuracy.

**Keywords:** Temper Rolling; Finite Element Method; Simulation; Rolling Load.

<sup>1</sup> Engenheiro Naval, Doutor em Engenharia Metalúrgica pela UFMG, Professor universitário, Departamento de Eng. Mecânica, CEFET-MG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Membro ABM.**

<sup>2</sup> Engenheiro de Metalúrgico, Mestre em Engenharia de Materiais pela EEL / USP, Gerência Geral de Folhas Metálicas, Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica pela UFU, Professor universitário, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação de encruamento a frio é um dos últimos passos na produção de tiras finas e possui muitos propósitos. Caracteriza-se pela baixa redução aplicada sobre a tira, geralmente da ordem de 0,5 a 1,5%. A laminação de encruamento é realizada para melhorar a planicidade final da tira e suas propriedades metalúrgicas, eliminar o patamar de tensão de escoamento superior e inferior, obter um melhor acabamento superficial e, às vezes, induzir propriedades magnéticas. As condições na laminação de encruamento são diferentes de outros tipos de laminação a frio em laminadores reversíveis e em série. Como foi mencionado antes, a redução é muito baixa, a deformação do cilindro de trabalho é muito localizada no arco de contato e há considerável restituição elástica da tira. Essas diferenças tornam o cálculo da carga de laminação de encruamento extremamente difícil. Dentre os aspectos mais importantes, devem-se considerar: 1 – o comportamento da curva tensão-deformação do material da chapa, que é recozido, e que em baixas reduções é sensivelmente variável para diferentes taxas de deformação; 2 – o fato das reduções serem muito baixas em alguns casos, levando-se a comprimentos de arco de contato pequenos, provocando uma carga extremamente concentrada, o que leva a instabilidades nos modelos numéricos, requerendo uma estratégia de relaxação para as variações de carga e de perfil a cada iteração; 3 – espessuras reduzidas e reduções baixas que podem ser da ordem da rugosidade dos materiais envolvidos; 4 – a necessidade de se considerar a deformação elástica dos cilindros para se obter um resultado preciso; 5 – a possibilidade de haver dois regimes de atrito, o de deslizamento e de agarre, dentro do arco de contato, e a existência de uma região intermediária plana (hipótese ainda controversa) onde a deformação plástica é contida devido ao estado complexo de tensões.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para a determinação da carga de laminação, por se tratar de um item fundamental no funcionamento dos sistemas de controle dos laminadores.

### 1.1 Modelos de Cálculo da Carga de Laminação

Um dos modelos mais simples é o da deformação homogênea, onde se assume um valor de tensão de escoamento médio em estado plano de deformação para dada redução de espessura de chapa. Ekelund desenvolveu posteriormente um modelo superior que determina semi-analiticamente a carga de laminação, incluindo o coeficiente de atrito. O modelo desenvolvido por von Karman [1] é um dos mais completos para o cálculo da carga baseado no método dos blocos em equilíbrio. Orowan [2] posteriormente realizou estudos mais aprofundados considerando a distribuição de tensões ao longo da espessura da chapa e a não homogeneidade da deformação. Bland e Ford [3], realizando algumas simplificações no modelo de von Karman, determinaram uma equação analítica à equação diferencial para cálculo da carga. Alexander [4], Rusia [5] e Freshwater [6, 7] fizeram algumas modificações nos modelos de blocos, com o objetivo de melhorar a sua precisão. Sutcliffe e Rayner [8] desenvolveram o método de cálculo de carga baseado no método dos blocos para a situação crítica dos laminadores de chapas finas e de elevada resistência, caso em que a deformação elástica não circular do cilindro de trabalho deve ser considerada. Shigaki et al. [9] desenvolveram o método descrito em [8] para a situação de atrito

de deslizamento e de agarre, com o modelo de atrito regularizado, e o adaptaram para a situação de encruamento do material da chapa.

Para as situações em que a deformação elástica dos cilindros não for crítica sugeriu-se a aproximação de Hitchcock [10], onde se assume que a colina de atrito (ou de pressão normal que gera a carga de laminação) tem uma forma semi-elíptica, resultando em um raio deformado (manutenção do perfil circular).

Mais recentemente podem ser citados os trabalhos em que se modela a laminação utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) [11] e a aplicação de Redes Neurais Artificiais [12] para determinação da carga de laminação.

## 1.2 Modelos de Cálculo de Carga para a Laminação de Encruamento

Os modelos matemáticos citados até o momento, com exceção do método dos blocos e o MEF, dificilmente podem ser aplicados diretamente à análise do processo de laminação de encruamento por características específicas do processo de fabricação. Assim, diversos autores sugeriram outros modelos semi-empíricos para o cálculo da carga de laminação, sendo o mais famoso o de Roberts [13]. Este modelo supõe que a pressão de contato no arco é semi-elíptica, sugere uma equação empírica para calcular a resistência à deformação da chapa e também um modo de estimar o comprimento do arco de contato entre o cilindro de trabalho e a chapa. Interessante observar que Roberts inclui a influência da taxa de deformação em suas equações, pois é sabido a sua influência sobre a carga. Lenard, em seu livro [14] comenta sobre outros modelos matemáticos desenvolvidos para a modelagem da laminação de encruamento em que, resumindo:

- os parâmetros mais importantes do processo são a tensão à ré e à frente, espessuras de entrada e de saída, parâmetros do material, velocidade de laminação, as condições de deslizamento no arco de contato, a carga de laminação e a dinâmica do laminador;

- os modelos tradicionais de cálculo da carga de laminação não se aplicam na laminação de chapas finas, folhas e na laminação de encruamento, e que o fator mais importante é a maneira em que ocorre o acoplamento da deformação do cilindro de trabalho com a da tira;

- existe uma grande dificuldade na modelagem desse processo devido à imprecisão no cálculo do deslizamento no arco de contato e no elevado tempo de processamento em elementos finitos;

- existem modelos da laminação de encruamento em elementos finitos em combinação com redes neurais artificiais, conseguindo resultados precisos de carga, porém, surpreendentemente utilizando coeficientes de atrito bastante baixos.

Liu e Lee [15] questionam a presença de uma região plana dentro do arco de contato. De acordo com seu modelo, a chapa possui regiões elásticas e plásticas, sendo que a parte principal de contato da tira é elástica. Assim, o atrito é governado principalmente para dois corpos elásticos em contato. Considera também a deformação real dos cilindros no regime elástico utilizando o método dos coeficientes de influência, além de considerar a rugosidade da chapa.

Pawelski [16] considera que as reduções em chapas finas que ocorrem na laminação de encruamento são da ordem de 1% apenas, o que equivale praticamente à rugosidade da chapa (da ordem de 1 a 2  $\mu\text{m}$ ). Aplicando um modelo de deformação de cilindros como um espaço elástico semi-infinito em conjunto com a abordagem de *slip-linefield*, considerando a fração de área de contato da superfície rugosa.

Dbouk e colegas [17] desenvolveram um modelo avançado de cálculo de carga de laminação a frio e de encruamento, considerando a deformação real dos cilindros, um modelo de lubrificação misto e modelos de deformação da rugosidade superficial. O programa desenvolvido por estes pesquisadores é bastante semelhante ao programa Noncirc [9], porém este necessita ser desenvolvido para as especificidades da laminação de encruamento, além de melhorar sua eficiência.

O Método dos Elementos Finitos também tem sido utilizado na análise da laminação de encruamento. Podem-se citar os trabalhos de Kainz [18], Gratacos [19] e Shigaki [20]. A grande vantagem deste método em relação aos tradicionais baseados no método dos blocos reside no fato de se poder determinar a distribuição de tensões e deformações, perfil do arco de contato e da deformação dos cilindros e a carga de laminação com grande detalhe.

Neste estudo será apresentado um modelo bidimensional da laminação de encruamento via método dos elementos finitos (MEF). Este modelo baseia-se na hipótese de estado plano de deformação que ocorre na tira e no cilindro. Suas características e dimensões foram tomadas de um laminador industrial real fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional, e os resultados para efeitos de validação do modelo numérico serão comparados a valores reais.

Será apresentado o modelo em elementos finitos desenvolvido no software Simulia Abaqus versão 2016, com os detalhes da aplicação das condições de contorno, velocidades, tensões de tração à ré e à frente, curvas tensão-deformação da chapa, propriedades dos materiais dos cilindros, em especial, a estratégia de discretização da malha de elementos finitos. Por se tratar de dimensões bastante díspares entre a espessura da chapa e o diâmetro do cilindro de trabalho, o tamanho médio dos elementos das malhas da chapa e da região de contato no cilindro deve ser cuidadosamente escolhido.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Neste item será descrito passo-a-passo o modelo em elementos finitos desenvolvido no presente trabalho. Primeiro será apresentado o material e dimensões da chapa, o laminador de encruamento e as condições operacionais do experimento. A seguir será apresentado o modelo em elementos finitos com detalhes de sua modelagem, a saber, geometria, inserção das propriedades dos materiais, montagem, tipo de análise escolhida, aplicação das condições de contorno, condições de contato, geração da malha ideal, ajuste do tempo do modelo, aplicação das tensões à ré e à frente, e sua solução.

### 2.1 Informações sobre o laminador de encruamento o material laminado

O laminador de encruamento utilizado neste estudo pertence à categoria dos laminadores quádruplos, com atuadores de contraflexão dos cilindros. É utilizado para aplicar uma pequena redução à chapa, corrigir eventuais não planicidades e imprimir uma rugosidade requerida.

A Tabela 1 apresenta os dados da chapa e do equipamento.

Comprimento da chapa no modelo numérico: 133 mm

**Tabela 1.**Dados geométricos do laminador de encruamento.

| Parâmetros                               |       |
|--|-------|
| Espessura de entrada (mm)                | 0,252 |
| Espessura de saída (mm)                  | 0,247 |
| Alongamento (%)                          | 1,76  |
| Diâmetro do cilindro de trabalho (mm)    | 508   |
| Largura da chapa (mm)                    | 885   |
| Coeficiente A (MPa)                      | 290   |
| Coeficiente B (MPa)                      | 500   |
| Taxa de encruamento $n$                  | 0,22  |
| Coeficiente $m$ (Johnson-Cook)           | 0,5   |
| Módulo de elasticidade da chapa (GPa)    | 200   |
| Módulo de elasticidade do cilindro (GPa) | 200   |
| Coeficiente de Poisson, chapa            | 0,3   |
| Coeficiente de Poisson, cilindro         | 0,3   |
| Coeficiente de atrito                    | 0,4   |
| Tensão à frente (MPa)                    | 129,6 |
| Tensão à ré (MPa)                        | 38,2  |
| Velocidade de laminação (m/min)          | 650   |
| Carga de laminação medida (t)            | 1174  |

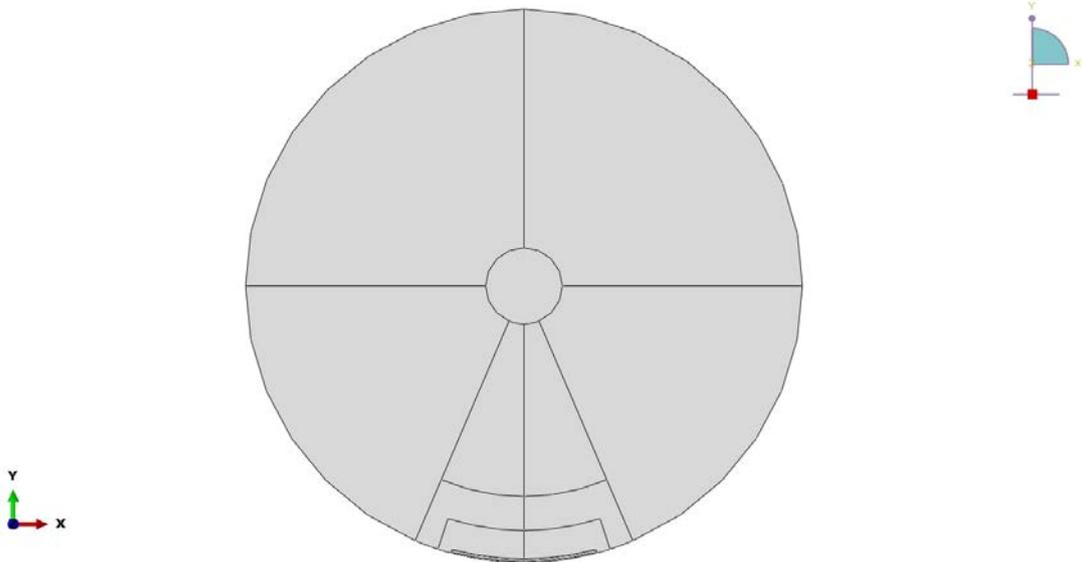
## 2.2 Modelamento em elementos finitos

O modelo em elementos foi simplificado para um caso bidimensional e o pré-processamento consiste nas seguintes etapas: geração da geometria, propriedades do material, geração de malha, declaração de contato entre as peças, condições de contorno e definição do tipo de análise.

As dimensões da geometria e definição dos materiais do modelo estão listadas na Tabela 1, sendo que o modelo é constituído por duas partes: o cilindro de laminação e a chapa. A simplificação para o caso bidimensional possibilita a modelagem do cilindro como um círculo e da chapa como um retângulo representando a metade da chapa em relação à espessura.

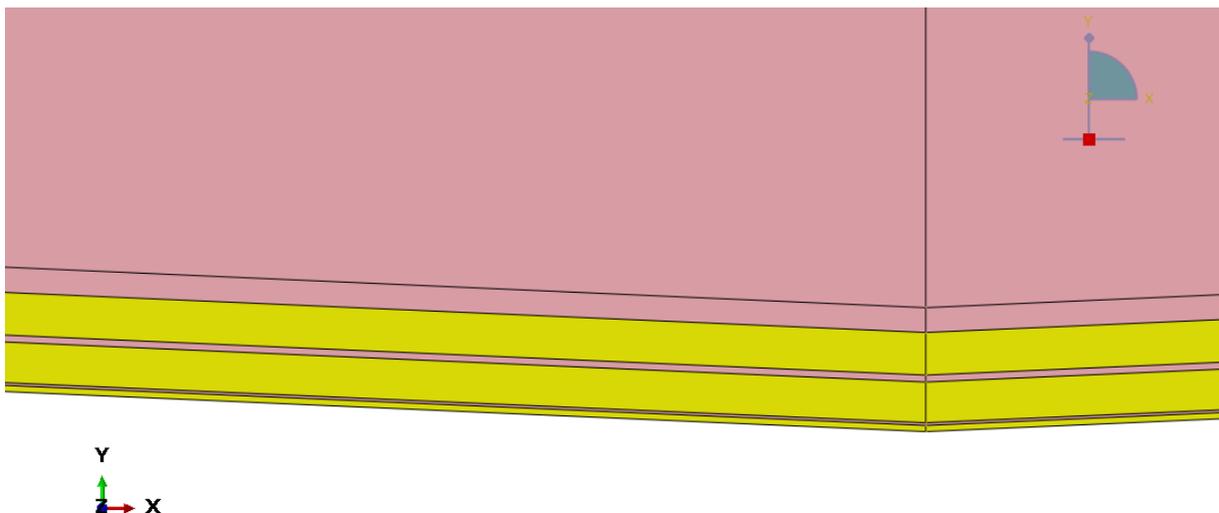
A geometria do cilindro foi particionada a fim possibilitar o refino de malha na região do contato com a chapa, além de possibilitar transição suave para áreas menos refinadas. As partições estão descritas na Figura 1 e foram definidas da seguinte maneira: primeiramente o cilindro foi particionado na região central e a coroa circular externa foi particionada em 4 quadrantes de 90 graus, após estas divisões os dois quadrantes inferiores foram divididos por duas linhas formando duas coroas

circulares com ângulo de 23 graus, e finalmente essas coroas foram particionadas com diversos círculos com diâmetros intermediários entre o círculo central e o diâmetro externo, possibilitando assim o refino na região de contato e a geração de malhas nas áreas de transição.



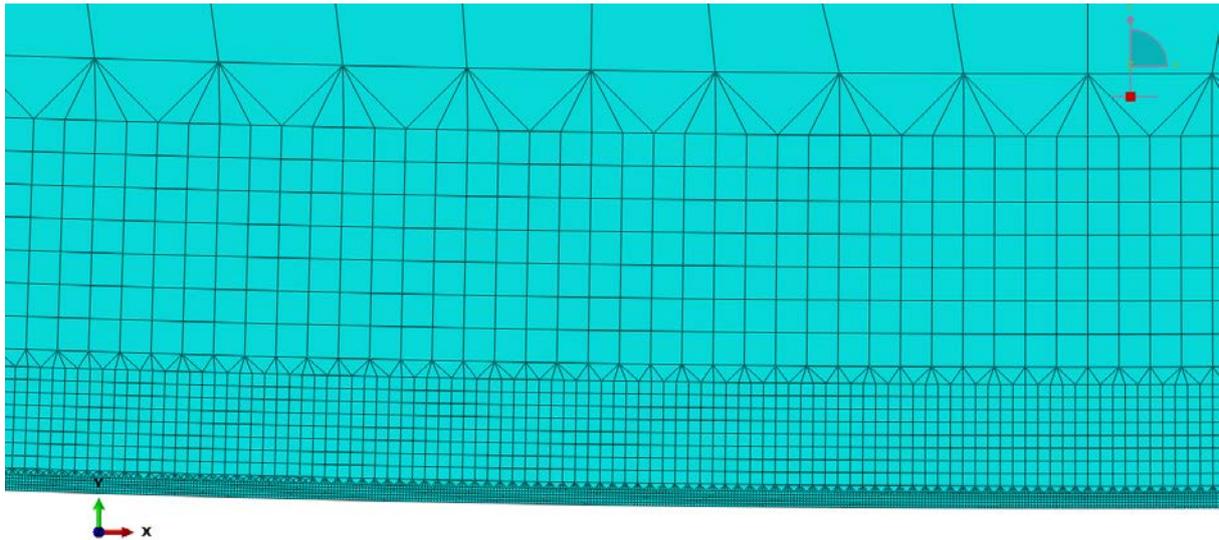
**Figura 1.** Cortes aplicados ao cilindro para geração da malha de elementos finitos.

Nas regiões de transição indicadas pela coloração vermelha na Figura 2 foi aplicada o controle de malha com elementos de três nós afim de que a transição da área refinada para a mais grosseira fosse obtida sem perda de qualidade dos elementos. Nas regiões em amarelo o controle de malha utilizado foi a malha estruturada de 4 nós.



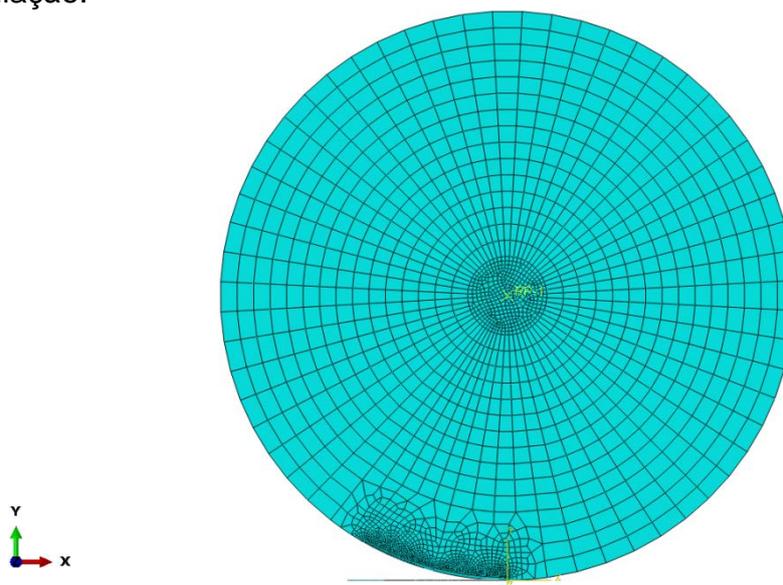
**Figura 2.** Detalhes dos cortes realizados na área de transição.

Os elementos utilizados para confecção do modelo assumem a hipótese de estado plano de deformação e possuem 4 nós na região de malha estruturada e 3 nós na região de transição como mostra a Figura 3.



**Figura 3.** Detalhes dos elementos utilizados na área de transição.

A Figura 4 mostra o resultado geral da malha geral para o conjunto cilindro e chapa, sendo que o centro do cilindro foi modelado por elementos rígidos para acelerar o tempo de simulação.



**Figura 4.** Malha gerada no conjunto montado.

O tamanho de elemento utilizado no modelo está descrito Figura 5, sendo 0,025mm para a chapa, 0,1mm para região do cilindro em contato com a chapa, 0,25mm para área acima da região de contato e 25mm o refino geral.

Foi realizado um arredondamento na borda da chapa (Figura 6) para evitar a formação de quina viva na região que entra em contato com o cilindro, desta forma é possível evitar a deformação exagerada dos elementos desta região, pois a ocorrência deste tipo de deformação reduz a qualidade da malha e implica em aumento de tempo de simulação.

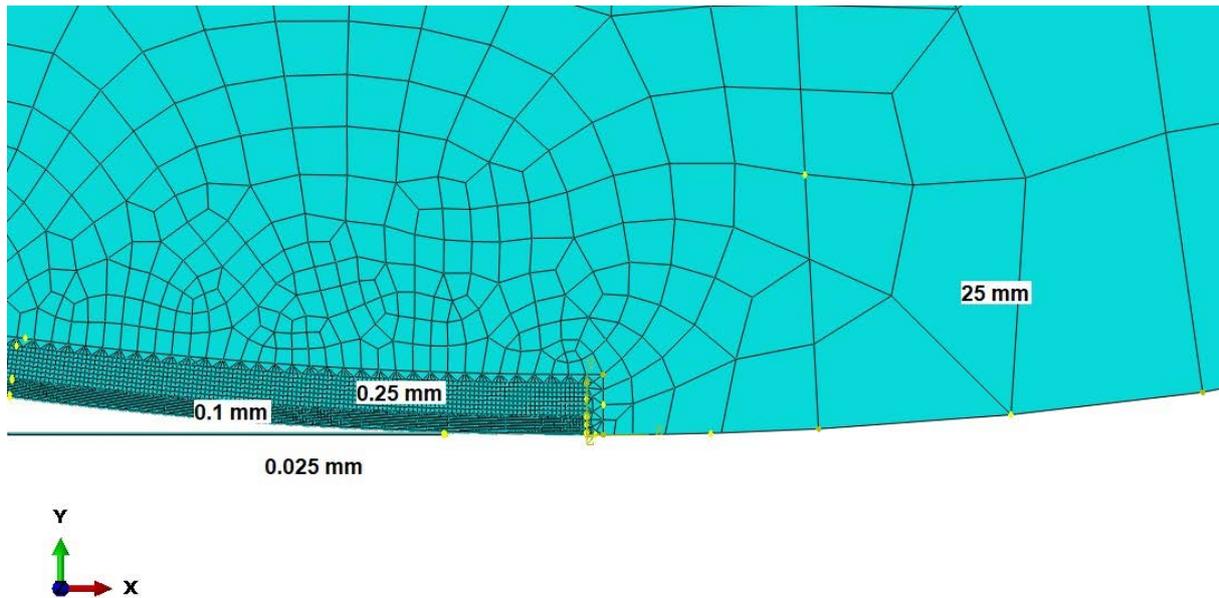


Figura 5. Tamanho dos elementos da malha de elementos finitos.

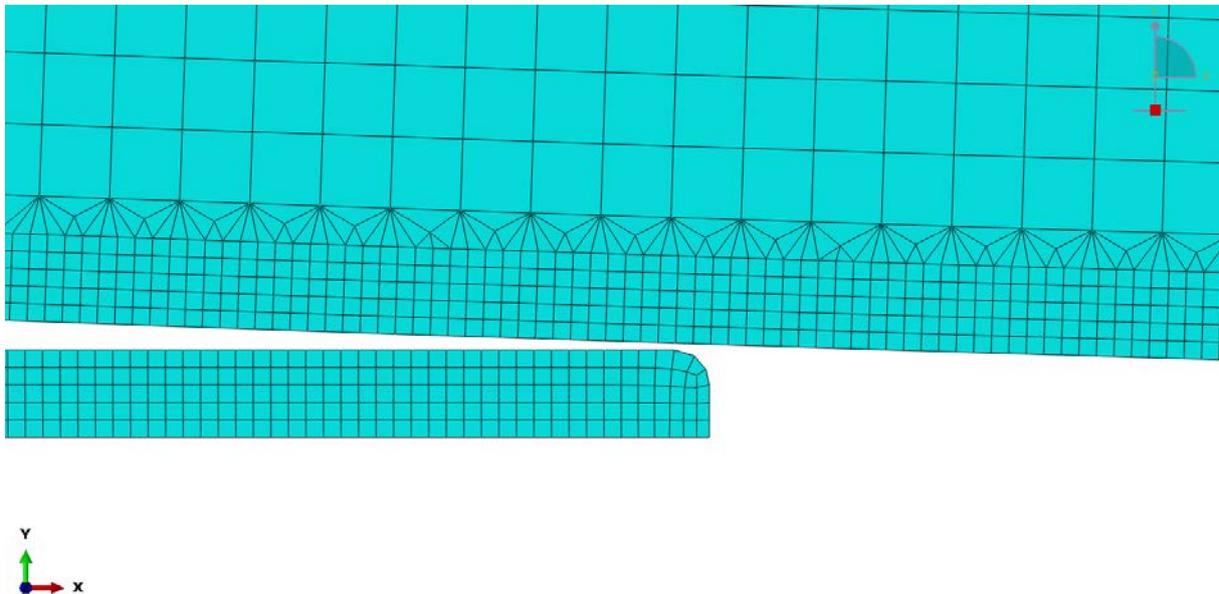
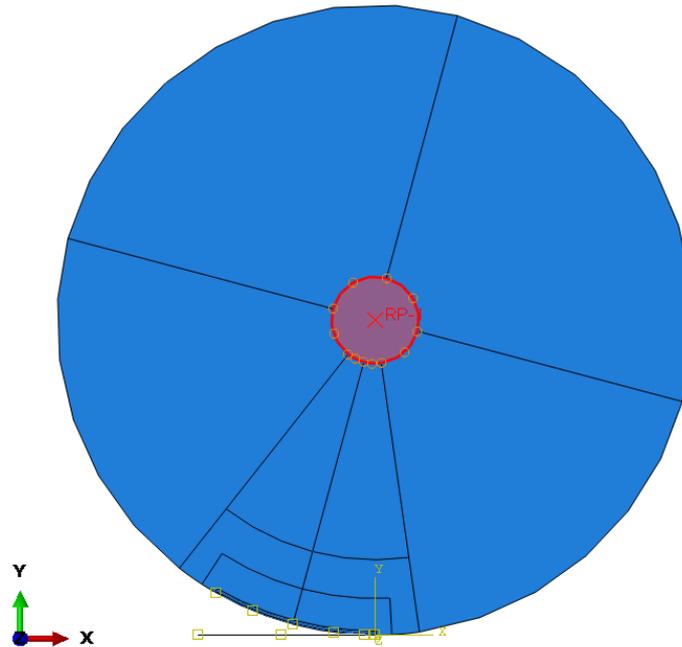
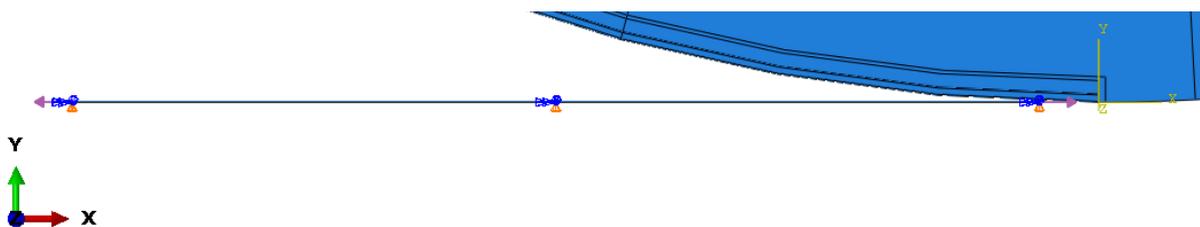


Figura 6. Detalhe do arredondamento da quina da chapa laminada.

A declaração de contato entre o cilindro de trabalho e a chapa laminada foi modelado através do método das penalidades no sentido tangencial com um fator de atrito de 0,4, a região de contato está representada pelos quadrados amarelos da Figura 7. Um ponto de referência foi atribuído ao centro do cilindro de trabalho e uma relação de acoplamento dos graus de liberdade foi atribuída entre o ponto de referência e os nós do núcleo rígido, região em vermelho, ainda na Figura 7. As cargas de tração a ré e a frente foram aplicadas ao modelo através de uma pressão distribuída nas arestas da chapa, possuindo um valor de 38,2 MPa tração a ré e de 127,03 MPa de tração a frente, estas cargas estão representadas pelos vetores da cor roxa mostrado na figura 8.



**Figura 7.** Declaração de contato entre as partes do modelo em elementos finitos



**Figura 8.** Aplicação de cargas do modelo.

As condições de contorno do modelo foram aplicadas em duas etapas: primeiramente é necessário restringir a movimentação indesejada do conjunto, para isso foi aplicada uma condição de simetria em relação ao eixo x na aresta inferior da chapa e uma condição de pino no ponto de referência adicionado ao centro do cilindro. A segunda parte consiste e aplicar a movimentação esperada do conjunto, em relação ao cilindro de trabalho. Foi aplicada uma velocidade angular constante no valor de 45,93 rad/s como condição inicial que foi propagada ao longo do *step*, Em relação à chapa foi aplicada uma velocidade linear na direção x no valor de 650 m/min como condição inicial que foi suprimida ao longo do *step*, pois a velocidade angular do cilindro é a responsável por manter a velocidade linear da chapa ao longo da simulação (Figura 9).

A simulação realizada neste trabalho foi uma simulação dinâmica explícita para simular um período de 0,01 segundos do processo de laminação, com incremento de tempo calculado automaticamente pelo software e o fator de *massscaling* igual a 1.

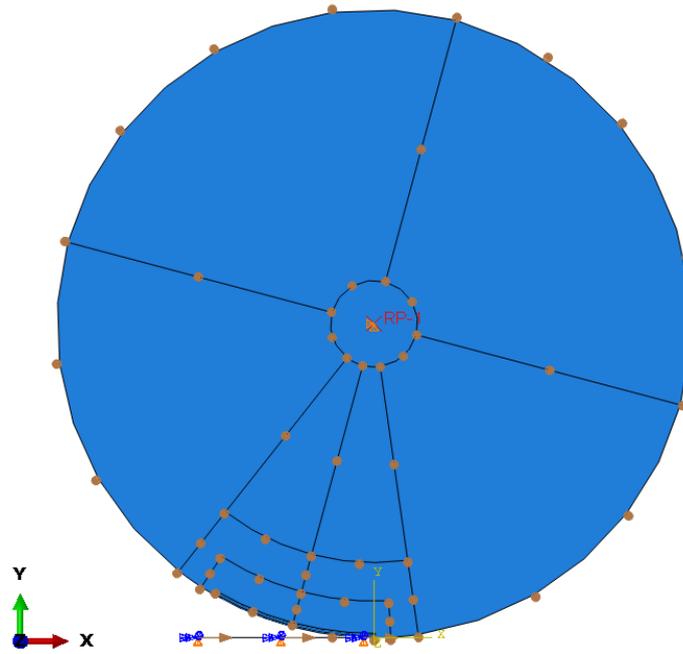


Figura 9. Aplicação das condições de iniciais no modelo

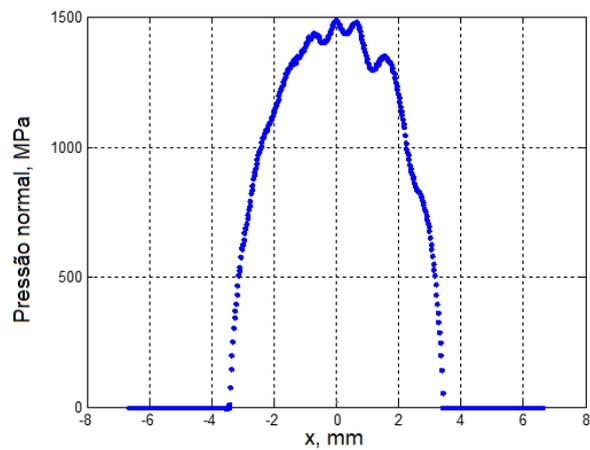
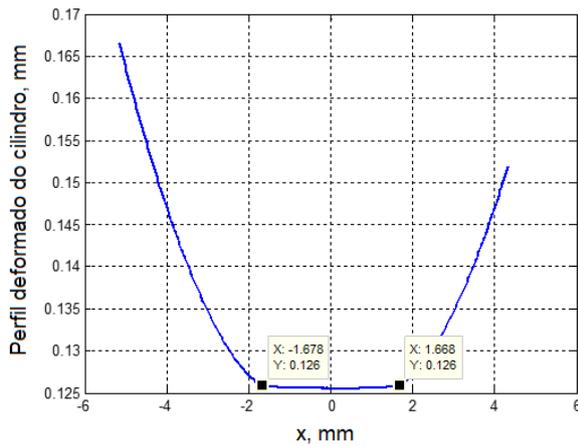


Figura 10. Deformação do cilindro. Figura 11. Pressão normal no arco de contato.

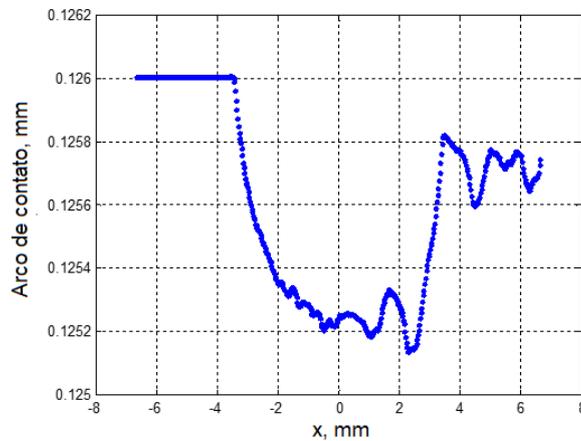


Figura 12. Arco de contato.

### 3 RESULTADOS

Apresentam-se os resultados obtidos da simulação do modelo bidimensional da laminação de encruamento para o processo com os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Pode-se observar pela Figura 10 uma região relativamente plana dentro do arco de contato. A Figura 11 apresenta a colina de atrito, ou pressão normal que ocorre na interface cilindro de trabalho/chapa. Pode-se observar um perfil relativamente parabólico, próximo da hipótese adotada por Roberts. A partir desse resultado calculou-se a carga de laminação, resultando em 1371t, um pouco superior ao valor medido, de 1174t. Um cálculo rápido pelo método simplificado proposto por Roberts resulta em 1170t.

Pela Figura 12, porém, pode-se constatar que não se conseguiu atingir a espessura final de 0,247 mm experimental (a figura apresenta a metade superior da chapa).

A Figura 13 apresenta a distribuição de tensões dentro do arco de contato.



**Figura 13.** Distribuição de tensões de von Mises dentro do arco de contato.

### 4 CONCLUSÕES

Pelos resultados pode-se concluir que o modelo em elementos finitos produz resultados próximos do valor de carga de laminação, devendo-se realizar um estudo mais pormenorizado de ajuste nos parâmetros de abertura entre os cilindros (gap) e coeficiente de atrito para se chegar, em especial, ao valor de redução medido. Pode-se observar, também, que o modelo simplificado de Roberts para cálculo da carga de laminação de encruamento é bastante preciso.

Outro aspecto muito interessante da simulação em elementos finitos se refere à distribuição das tensões internas na chapa e o aspecto do arco de contato. Pode-se observar uma região larga sob escoamento dentro do arco, na cor vermelha da Figura 13. Também observa-se uma região relativamente plana dentro do arco de contato.

Como o objetivo do presente estudo é a demonstração passo-a-passo da modelagem do processo de laminação de encruamento em elementos finitos, e o tempo de processamento para cada simulação é bastante elevado (cerca de 12 horas em uma workstation com 12 processadores em paralelo), limitou-se ao estudo de um caso industrial, fornecido pela CSN.

Os estudos continuarão a ser feitos na tentativa de se atingir a espessura final de 0,247mm, apesar de parecer que o cilindro está cedendo à elevada carga de laminação, impedindo-se uma maior redução na espessura da tira.

## Agradecimentos

Nossos agradecimentos ao CNPq, Proc. 488027/2013-6, CEFET-MG (Propesq), e ao CEFET-MG pelo auxílio à inscrição e apresentação deste artigo.

## REFERÊNCIAS

- 1 von Karman T. Beiträge zur Entstehung der Turbulenz. ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1925;5(3):200-217.
- 2 Orowan E. The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1943;150(1):140-167.
- 3 Bland D, Ford H. The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1948;159(1):144-163.
- 4 Alexander JM. 1972. On the Theory of Rolling. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1972;326(1567):535-563.
- 5 Rusia D. Improvements to Alexander's computer model for force and torque calculations in strip rolling processes. Journal of Materials Shaping Technology. 1990;8(3):167-177.
- 6 Freshwater IJ. Simplified theories of flat rolling—I. The calculation of roll pressure, roll force and roll torque. International Journal of Mechanical Sciences. 1996;38(6):633-648.
- 7 Freshwater IJ. Simplified theories of flat rolling—II. Comparison of calculated and experimental results. International Journal of Mechanical Sciences. 1996 ;38(6):649-660.
- 8 Sutcliffe MPF, Rayner PJ. Experimental measurements of load and strip profile in thin strip rolling. International Journal of Mechanical Sciences. 1998;40(9):887-899.
- 9 Shigaki Y, Nakhoul R, Montmitonnet P. Numerical Treatments of Slipping/No-Slip Zones in Cold Rolling of Thin Sheets with Heavy Roll Deformation. Lubricants; 2015;3(2):113-131.
- 10 Hitchcock JH. Roll neck bearings. ASME Research Publication, Appendix 1. 1935.
- 11 Cavaliere MA, Goldschmidt MB, Dvorkin EN. Finite element analysis of steel rolling processes. Computers and Structures. 2001;79(22):2075-2089.
- 12 Yang YY, Linkens DA, Talamantes-Silva J. Roll load prediction – data collection, analysis and neural network modelling. Journal of Materials Processing Technology. 2004;152(3):304-315.
- 13 Roberts W. Hot Rolling of Steel. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC; 1983.
- 14 Lenard J. Primer on flat rolling. Segunda Edição. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier; 2014.
- 15 Liu Y, Lee WH. Application of the preliminary displacement principle to the temper rolling model. KSME International Journal. 2001;15(2):225-231.
- 16 Pawelski H. Modelling of temper rolling considering surface change of strip. 8th International Conference on Metal Forming. 2000. In : Lenard J. Primer on flat rolling. Segunda Edição. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier; 2014:301-302.
- 17 Dbouk T, Montmitonnet P, Suzuki N, Takahama Y, Legrand N, Ngo T, *et al.* Advanced roll bite models for cold and temper rolling processes. In Proc. 9th Int. Rolling Conf. & 6th European Rolling Con.; 2013; Venice, Italy.
- 18 Kainz A, Krimpelstätter K, Zeman K. FE-simulation of thin strip and temper rolling processes. In ABAQUS Austria User's Conference; 2003; Vienna.
- 19 Gratacos P, Montmitonnet P, Fromholz C, Chenot JL. A plane-strain elastoplastic finite element model for cold rolling of thin strip. International journal of mechanical sciences. 1992;34(3):195-210.
- 20 Shigaki Y, Silva JM, Romie RNMA, Magalhães FC, Pessanha L. Elastoplastic finite element analysis of the temper rolling process. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE. 2016;2(23):297-319.