



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



“Influência do Atrito na Laminação”

Autor: Filipe Henrique Gonçalves Batista Dias

Orientadora: Prof.^a Maria Aparecida Pinto

Ouro Preto/MG, maio de 2023

Filipe Henrique Gonçalves Batista Dias

Influência do Atrito na Laminação

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista.

Ouro Preto, maio de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541i Dias, Filipe Henrique Goncalves Batista.
Influencia do atrito na laminação. [manuscrito] / Filipe Henrique
Goncalves Batista Dias. - 2023.
22 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.
Coorientadora: Profa. Dra. Paula Cibely Flausino.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Laminação (Metalurgia). 2. Método dos Elementos Finitos. 3.
Métodos de simulação - Simulação numérica. 4. Atrito. I. Pinto, Maria
Aparecida. II. Flausino, Paula Cibely. III. Universidade Federal de Ouro
Preto. IV. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Filipe Henrique Gonçalves Batista Dias

Influência do atrito na laminação

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 05 de maio de 2023

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr.^a Paula Cibely Alves Flausino - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/07/2023



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2023, às 18:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0557191** e o código CRC **BDDBA53A**.

RESUMO

O processo de laminação a frio de aços planos é constituído por várias etapas operacionais. Em linhas gerais, a função é receber a matéria-prima proveniente da laminação a quente, chamada bobina a quente, e reduzir sua seção transversal para fornecer produtos planos, utilizados nas indústrias automotiva, de eletrodomésticos, de construção civil, etc. No processo de laminação a frio um dos parâmetros importantes é o atrito. Neste trabalho, avaliou-se a influência do atrito na laminação a frio do aço IF (*Interstitial Free*), por meio da simulação física e simulação computacional, utilizando o método dos elementos finitos. Verificou-se que a diferença na espessura de saída entre as amostras laminadas com e sem lubrificação pode estar associada, entre outros fatores, a uma maior carga de laminação esperada na condição de processamento sem lubrificação, que possui um atrito mais elevado. Não foi possível estabelecer diferenças quantitativas e/ou qualitativas significativas em relação à influência do atrito/lubrificação no desenvolvimento de microbandas e/ou no grau de empanhecimento dos grãos durante o processo de laminação a frio. Os dados da simulação numérica não exibem uma relação linear entre a carga e o coeficiente de atrito, ao contrário da tendência observada a partir dos dados experimentais. É importante destacar que essas diferenças podem estar associadas às diferentes premissas adotadas em cada um dos métodos de cálculo.

Palavras-chave: Laminação. Atrito. Método dos Elementos Finitos. Simulação numérica.

ABSTRACT

The cold rolling process of flat steels consists of several operational stages. In general terms, the function is to receive the raw material from hot rolling, called as hot coil, and reduce its cross-sectional area to produce flat products used in industries such as automotive, household appliances, and construction. One of the important parameters in the cold rolling process is friction. In this study, the influence of friction on the cold rolling of Interstitial Free (IF) steel was evaluated through physical and computational simulation using the finite element method. It was verified that the difference in the output thickness between the samples rolled with and without lubrication may be associated, among other factors, with a higher expected rolling load in the processing condition without lubrication, which has a higher friction. It was not possible to establish significant quantitative and/or qualitative differences regarding the influence of attrition/lubrication on the development of microbands and/or on the degree of deformed grain during the cold rolling process. It's not observed a linear relationship between load and coefficient of friction in numerical simulation as observed from experimental data. It is important to point out that these differences may be associated with the different assumptions adopted in each of the calculation methods.

Keywords: Rolling. Friction. Finite Element Method. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Representação esquemática da laminação a quente.....	10
Figura 3.2 - Fluxograma de processo da laminação a frio.	12
Figura 3.3 - Malha gerada para em problema axissimétrico.	16
Figura 3.4 - Malha de um elemento cilíndrico em compressão.....	17
Figura 3.5 - Atualização das coordenadas dos nós.....	17
Figura 4.1 – (a) Laminador piloto. (b) Detalhe do volante de comando dos cilindros: cada volta equivale a 0,4mm.....	19
Figura 4.2 - Simulação com empurrador. QFORM.....	21
Figura 4.3 – Região de refinamento da malha do material laminado.....	22
Figura 5.1 - Micrografia aço IF, amostra submetida a lixamento com lixa 400#: (a) Seção longitudinal com lubrificação, (b) seção longitudinal sem lubrificação, (c) seção transversal com lubrificação, (c) seção transversal sem lubrificação. As setas indicam evidências de bandas de cisalhamento no interior dos grãos originais.	24
Figura 5.2 - Distribuição de deformação efetiva ao longo da espessura após laminação em estado plano de deformação com atrito 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5.	26
Figura 5.3 - Gráfico força de laminação versus coeficiente de Atrito.....	27
Figura 5.4 - Falha de execução do QFORM.....	28

LISTA DE TABELA

Tabela 5.1 - Dados da laminação 400# sem lubrificação.....	23
Tabela 5.2 - Dados da laminação 400# com lubrificação.....	23
Tabela 5.3 - Comparação do Coeficiente de Atrito versus Carga.	27

LISTA DE SÍMBOLOS/SIGLAS

μ - coeficiente de atrito

F - força tangencial (N)

IF - Interstitial Free

k - tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro

m - fator de atrito

MEF – Método dos Elementos Finitos

P - força normal (N)

ε - deformação

σ_N - tensão normal (MPa)

τ - tensão cisalhante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	8
	2.1 Objetivo Geral	8
	2.2 Objetivos Específicos	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
	3.1 Aço IF	9
	3.1.1 Laminação a quente do aço IF	10
	3.1.2 Laminação a frio do aço IF	11
	3.1.3 Atrito na Laminação	12
	3.1.4 Simulação numérica da laminação	14
	3.1.5 Método dos elementos finitos	15
	3.1.6 Programa QForm	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
	4.1 Laminação a Frio	19
	4.2 Análise Metalográfica	20
	4.3 Simulação Numérica do Processo de Laminação	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
	5.1 Laminação	23
	5.2 Microscopia Ótica	24
	5.3 Simulações numéricas por elementos finitos	25
6	CONCLUSÕES	29
	6.1 Conclusão sobre a laminação	29
	6.2 Conclusão sobre a análise por microscopia óptica	29
	6.3 Conclusão sobre a simulação numérica por elementos finitos	29
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	31

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação a frio de aços planos é constituído de várias etapas operacionais. Em linhas gerais, a função do processo é receber a matéria-prima proveniente da laminação a quente, chamada bobina a quente, e reduzir sua seção transversal para fornecer produtos utilizados no mercado de produtos planos, em setores das indústrias automotiva, de eletrodomésticos e de construção civil (SILVA, 2016).

A laminação a frio promove o encruamento do material, ou seja, eleva a resistência mecânica e a dureza e melhora o controle dimensional e qualidade de superfície (ALMEIDA e FONSECA, 2014).

Hoje a laminação necessita atender as exigências de um mercado altamente competitivo, devendo apresentar alta produtividade, baixos custos operacionais, alto desempenho e alta flexibilidade de produção (ALMEIDA e FONSECA, 2014).

Na laminação o material é submetido a altas tensões compressivas, resultantes da ação direta dos cilindros, a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os cilindros e o material, e a tensões de tração, no caso de laminação com tração avante e a ré, que são responsáveis pelo ato de puxar o metal para fora do espaço entre os cilindros (INFOMET, 2023).

O atrito entre os cilindros e a superfície do metal é de grande importância na laminação. Um atrito alto resulta em grandes forças de laminação, um ponto de máximo acentuado na curva de distribuição de pressões e uma tendência ao trincamento nas bordas. Já um atrito baixo pode levar à patinação, impedindo que o metal seja puxado pelos cilindros, não ocorrendo a laminação (DIETER Jr., 1981).

Neste trabalho, descreveu-se a influência do atrito na laminação a frio do aço IF (*Interstitial Free*) e foram utilizadas técnicas de simulação computacional para analisar este fenômeno do atrito. Devido às particularidades do processo de laminação a frio de aços, que engloba diversos parâmetros, via simulação física e simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos, obtém-se resultados por meio dos parâmetros, permitindo detectar possíveis problemas no material devido à influência do atrito.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo a determinação da influência do atrito na laminação a frio do aço IF (Interstitial Free) via simulação física e simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Laminar amostras de aço IF com diferentes condições de acabamento superficial, com e sem lubrificação;
- Realizar a análise metalográfica no sentido longitudinal e transversal das amostras do aço IF laminadas;
- Realizar a simulação computacional da laminação atribuindo diferentes valores de coeficiente de atrito e observar a influência do atrito na deformação plástica e força de laminação utilizando o programa QForm.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentadas as principais informações a respeito da laminação do aço IF (Interstitial Free), considerando a influência do atrito e a utilização da simulação numérica para avaliar estes efeitos.

3.1 Aço IF

Em 1977 iniciou-se a comercialização do aço Interstitial Free (IF), ou Livre de Intersticiais, no Japão. O aço IF possui um teor ultrabaixo de Carbono e Nitrogênio, com Manganês, Nióbio e Titânio como elementos de liga, com excelentes propriedades mecânicas para uma boa estampabilidade, como baixo limite de escoamento e alto alongamento total (FONSECA *et al.*, 2009).

Aço IF (Interstitial Free) é um aço que possui baixo teor de carbono e adição de manganês e de titânio como elementos de liga. O carbono e o nitrogênio são removidos da solução sólida por meio da precipitação de carbonitretos de titânio. A remoção do carbono e do nitrogênio da solução sólida, associada a um processamento adequado na laminação, produz um aço com baixo limite de escoamento, elevado alongamento e boas propriedades de estampagem (FONSECA, ALVES e LACERDA, 2009).

O aço IF é produzido em usinas integradas, seguindo três etapas essenciais: o refino primário, a desgaseificação a vácuo e o lingotamento contínuo. Na etapa do refino primário do aço IF, o carbono é removido nos convertedores de modo a produzir uma temperatura ideal para o processo seguinte (REGONE, 2001).

Na etapa de desgaseificação a vácuo obtém-se um aço IF de baixo carbono da ordem de 0,005%. Na atualidade, é utilizado um desgaseificador do tipo RH. Neste desgaseificador, dois tubos (*snorkes*) refratários são imersos no interior da panela contendo o aço líquido. É feito o vácuo na câmara acima dos tubos, injeta-se o argônio no interior do aço por meio de vários pontos localizados em um dos tubos. O argônio reduz a densidade do aço e gera um movimento ascendente do aço líquido que entra na câmara e retorna desgaseificado à panela por meio do segundo tubo. A diferença de densidade determina o fluxo de circulação (REGONE, 2001).

O aço IF pode ser classificado de acordo com o elemento químico utilizado com formador de carboneto, sendo três tipos: aço IF com adição de titânio (IF-Ti), aço IF com

adição de nióbio (IF-Nb) e aço IF com adições de nióbio e titânio (IF-Nb+Ti). Comparando os três tipos, o aço IF-Ti possui a maior sensibilidade às variações de composição e de processamento (REGONE, 2001).

O aço IF é conhecido por possuir um baixo nível de átomos intersticiais. É um material que apresenta um grande desempenho quando conformados a frio, cuja aplicação exige uma alta conformabilidade (REGONE, 2001). Geralmente, o aço IF é produzido no formato de chapa, ideal para aplicação no setor automobilístico na confecção de carrocerias de automóveis e áreas afins (REGONE, 2001).

3.1.1 Laminação a quente do aço IF

No processo de laminação, a espessura de um produto plano é reduzida por meio de esforços compressivos e trativos, com a finalidade de reduzir a seção transversal e aumentar o comprimento pela passagem do material entre dois cilindros, girando em sentidos opostos (SANTOS FILHO, 2009).

Na conformabilidade a quente de um metal ou liga metálica, é necessário considerar as condições referentes à resistência mecânica e às mudanças microestruturais que acontecem em função da temperatura, deformação plástica, taxa de deformação e intervalo entre passes. Esses parâmetros são de extrema importância na conformação mecânica a quente. A microestrutura obtida é a resposta interna das propriedades dos materiais. No processo de laminação a quente a primeira etapa é o aquecimento do aço até a temperatura de austenitização. A laminação convencional a quente possui os seguintes estágios: aquecimento, desbaste, acabamento e resfriamento, como ilustrado na Figura 3.1 (REGONE, 2001).

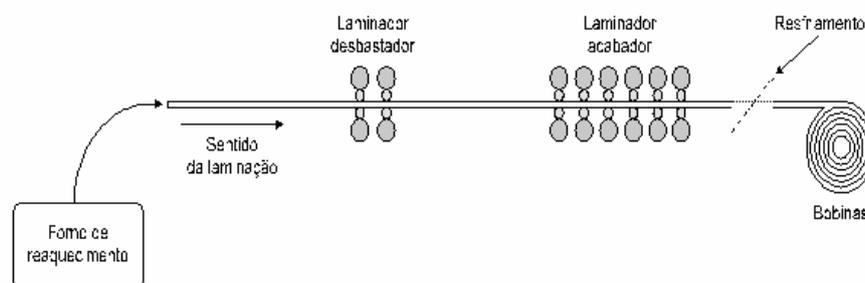


Figura 3.1- Representação esquemática da laminação a quente.
(REGONE, 2001).

3.1.2 Laminação a frio do aço IF

Na conformação a frio de um metal ou liga metálica, o material é processado abaixo da temperatura de recristalização, alterando a microestrutura e as propriedades mecânicas do material. A laminação a frio do aço aumenta sua dureza, sua resistência à tração e o valor do seu limite de escoamento, que resulta na redução da sua ductilidade (SANTOS FILHO, 2009).

O trabalho a frio tem uma grande importância no aumento da resistência mecânica do material, resultando no fenômeno do encruamento que é o endurecimento do material por deformação plástica (ALMEIDA e FONSECA, 2014).

O processo de laminação a frio é executado a partir de bobinas laminadas a quente. Na primeira etapa do processo, o material é submetido a uma decapagem química para retirar a oxidação da superfície. Em seguida, as bobinas são direcionadas para o laminador a frio que tem a função de reduzir a espessura do material (SILVA, 2016).

Após a laminação a frio, as bobinas são processadas na linha de limpeza eletrolítica para remoção de óleo e das partículas do material resultante da conformação a frio. Em seguida, as bobinas passam pelo tratamento de recozimento. No processo do recozimento, as bobinas são tratadas termicamente para restituir as propriedades mecânicas do aço após sua laminação a frio (SILVA, 2016).

Depois de passar pelo processo de recozimento, as bobinas passam pelo passe de encruamento para ajustar as propriedades mecânicas do material, a textura superficial e planicidade do produto. Logo depois, as bobinas são direcionadas para o processo de acabamento ou para o processo de eletrodeposição. De modo geral, a eletrodeposição é um processo utilizado para a obtenção de revestimentos de pequenas espessuras e livres de poros. Aplicam-se camadas finas e econômicas de metais de alto custo, como é o caso da deposição do zinco que aumenta a resistência à corrosão. Por fim, o material é inspecionado e enviado como produto acabado para os clientes. A Figura 3.2 ilustra o fluxograma do processo de laminação a frio (SILVA, 2016).

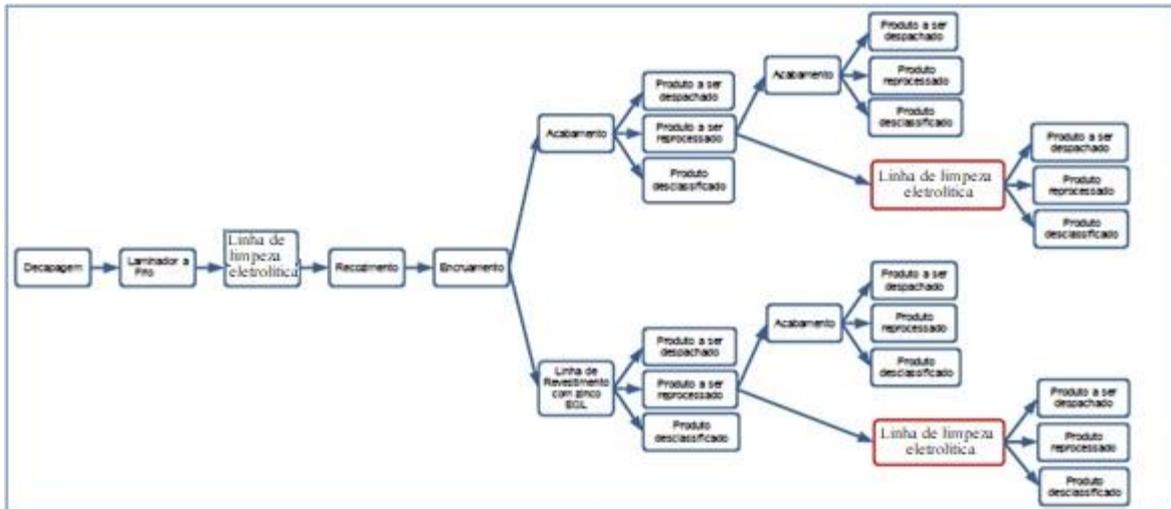


Figura 3.2 - Fluxograma de processo da laminação a frio.
(SILVA, 2016).

3.1.3 Atrito na Laminação

No processo de conformação mecânica de aços planos, um fator que é sempre existente é a força de atrito no instante em que o material entra em contato com os cilindros de laminação. Esse é um dos principais fatores que influencia diretamente na deformação plástica do material. O valor da força de atrito é fundamental na definição de características importantes do processo, tais como, a definição das cargas para conformação, a qualidade superficial das chapas e a vida útil das ferramentas (COSTA *et al.*, 2017).

As alterações no coeficiente de atrito, assim como na tensão de escoamento, afetam de forma semelhante a carga de laminação. Para um coeficiente de atrito mais elevado, acima daquele considerado normal, ou um material mais duro, exige-se maior carga de laminação (CETLIN e HELMAN, 2005).

Outro fator importante é a velocidade de laminação. Para uma velocidade de laminação elevada tem-se uma redução no coeficiente de atrito e conseqüente redução na carga de laminação (CETLIN e HELMAN, 2005).

O atrito entre os cilindros e a superfície do metal afeta a magnitude e a distribuição de pressão nos cilindros. Quanto maior a força de atrito, maior deve ser a carga de laminação e mais acentuadamente a pressão aumenta em direção a um valor máximo no ponto neutro (DIETER Jr., 1981).

O coeficiente de atrito, μ , segundo Amontons-Coulomb, é a razão entre a força de atrito e a força normal à superfície ou entre a tensão cisalhante e a tensão normal na superfície de contato, independente da área de contato, como apresentado na Equação 3.1.

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau}{\sigma_N} \quad (3.1)$$

em que: μ é o coeficiente de atrito, adimensional; F é a força tangencial, em N; P é a força normal aplicada, em N; τ é tensão cisalhante na superfície, em MPa; σ_N é tensão normal à superfície, em MPa (COSTA *et al.*, 2017).

O modelo de Amontons-Coulomb é aplicado quando a pressão de contato é baixa, por exemplo, na laminação de aços planos quando a tensão normal média na peça é menor ou igual à tensão de escoamento. A teoria descrita por Amontons-Coulomb determina que a tensão de cisalhamento na interface de contato entre o material e a ferramenta é a tensão limite de elasticidade do material em cisalhamento puro (COSTA *et al.*, 2017).

Em processos de conformação mecânica a tensão de contato entre o material e a ferramenta pode ser muito maior. Na Equação 3.2, uma vez obtida a tensão de escoamento em cisalhamento do material, observa-se que um aumento no valor da tensão normal resulta na diminuição do atrito. Assim, quando altas tensões de contato estão presentes, o atrito deve ser medido de acordo com a Equação 3.2:

$$m = \frac{\tau}{k} \quad (3.2)$$

em que: m é o fator de atrito adimensional; τ é tensão de cisalhamento na interface material/ferramenta e k é a tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro (COSTA *et al.*, 2017).

Para reduzir o efeito do atrito entre o material e a ferramenta, utilizam-se lubrificantes entre as superfícies metálicas, permitindo a formação de uma camada de baixa resistência ao cisalhamento que se coloca entre a peça e a ferramenta, diminuindo esses efeitos. Existem quatro tipos de lubrificantes que podem ser utilizados no processo de conformação a frio: calcário, sabão, óleos minerais e bissulfeto de molibdênio (MoS_2) (COSTA *et al.*, 2017).

A rugosidade superficial é muito importante para o desempenho de um lubrificante. Quando as superfícies da peça e da ferramenta são muito rugosas, as peças podem ser

danificadas pela superfície de maior dureza e rugosidade da ferramenta, ou seja, deseja-se que a peça e não a ferramenta seja a superfície mais rugosa (COSTA *et al.*, 2017).

O atrito varia ao longo do arco de contato do cilindro, no entanto, para a teoria simplificada da laminação assume um coeficiente de atrito constante. O método para medir o atrito nas condições de laminação em que o deslizamento avante é zero, isto é, velocidade de saída do material igual à velocidade periférica do cilindro de laminação, é obtido como apresentado na Equação 3.3:

$$\mu = \frac{M_T}{P.R} \quad (3.3)$$

em que: μ é o coeficiente de atrito; M_T é o torque aplicado nos cilindros de laminação; P é a força de laminação e R é o raio do cilindro de laminação (LOVATO NETO, 2006).

Para o caso em que o deslizamento avante não é zero, utilizam-se os valores da força de laminação, torque e o deslizamento avante. Este método admite que os cilindros são rígidos e a distribuição de pressão ao longo do arco de contato, chamada colina de fricção, é simétrica em relação ao ponto neutro e o coeficiente de atrito μ é constante ao longo do arco de contato. O atrito deve ser medido de acordo com a Equação 3.4.

$$\mu = \frac{M_T}{PR \left(1 - 2 \sqrt{\frac{v(1-e)}{e}} \right)} \quad (3.4)$$

em que: v é a velocidade do material e e é a deformação convencional ou de engenharia do material (LOVATO NETO, 2006).

3.1.4 Simulação numérica da laminação

A mecânica dos meios contínuos utiliza modelos matemáticos complexos que possam reproduzir perfeitamente a situação física real de um material submetido a esforços mecânicos. No entanto, tem-se buscado desenvolver ou adotar métodos aproximados que facilitem a aplicação dos princípios da mecânica do contínuo de forma fácil e exata. Um dos métodos mais utilizados é aquele que se fundamenta na divisão do meio contínuo. Esta divisão é intitulada pelo termo discretização dos meios contínuos (LOVATO NETO, 2006).

Diversos estudos têm sido conduzidos na área de simulação numérica na laminação a frio. A simulação numérica pode ser utilizada para estudar o efeito do atrito entre os

cilindros de laminação e a chapa de metal durante o processo de laminação a frio (ZHUANG *et al.*, 2012).

Além disso, a partir de um modelo de simulação numérica 3D pode-se prever as deformações e as tensões em um processo de laminação de tiras finas. A simulação numérica permite avaliar a influência de diferentes condições de processamento, como a geometria dos cilindros e a temperatura da chapa de metal, nas propriedades do produto (ZHUANG *et al.*, 2012).

Outros estudos utilizaram a simulação numérica para otimizar a geometria dos cilindros de laminação a frio para melhorar a uniformidade da deformação da chapa metálica e para investigar o efeito da taxa de deformação na microestrutura e nas propriedades mecânicas de uma chapa de aço laminada a frio (ZHUANG *et al.*, 2012).

Em geral, a simulação numérica tem se mostrado uma ferramenta valiosa para a análise e a otimização do processo de laminação a frio. Por meio desses estudos, é possível avaliar a influência de diferentes parâmetros de processamento nas propriedades do produto, bem como otimizar a geometria dos cilindros de laminação para melhorar a qualidade do produto final (ZHUANG *et al.*, 2012).

3.1.5 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta muito importante na simulação de processos de conformação mecânica, podendo ser utilizado para planejar adequadamente o número e sequência de etapas do processo produtivo de maneira mais rápida e eficiente (LOVATO NETO, 2006).

Pode-se testar protótipos em condições severas sem grandes investimentos. Consegue-se detectar possíveis problemas em produtos e projetos, é possível melhorar produtos e projetos antes da produção em escala industrial, minimizando métodos de tentativa e erro. Assim, com a utilização do método dos elementos finitos há uma redução de custos e tempo de desenvolvimento do produto no processo de conformação mecânica (LOVATO NETO, 2006).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é a ferramenta mais utilizada na discretização dos meios contínuos. A discretização de sistemas contínuos permite a solução

de equações de difícil solução analítica. Para a discretização de sistemas contínuos divide-se o domínio em componentes mais simples (LOVATO NETO, 2006).

À divisão do domínio dá-se o nome de malha, podendo ser usada de dois modos: um problema no estado plano e outro axissimétrico. A Figura 3.3 ilustra a malha de um problema axissimétrico (LOVATO NETO, 2006).

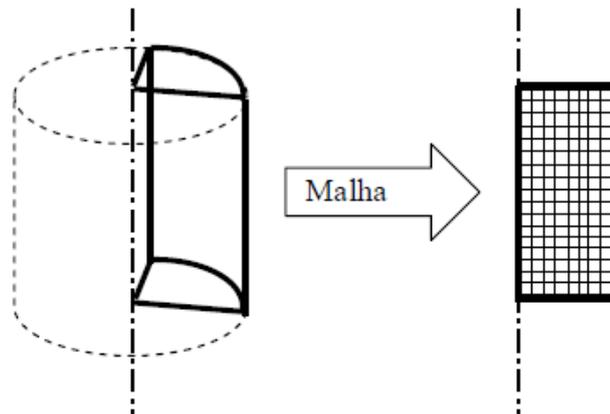


Figura 3.3 - Malha gerada para em problema axissimétrico. (LOVATO NETO, 2006).

Na malha cada retângulo gerado corresponde uma parte do material e é nomeado de elemento. Estes elementos são conectados por meio de nós, estes nós são as interseções entre as linhas da malha (LOVATO NETO, 2006).

No processo de conformação mecânica, o material deformado pode apresentar um comportamento rígido, elástico ou plástico. Como a deformação plástica é muito maior do que a deformação elástica, durante a conformação mecânica, o material em análise é geralmente considerado rígido-plástico (LOVATO NETO, 2006).

A Figura 3.4 ilustra a deformação axial de um corpo cilíndrico. Neste exemplo, a condição de contorno é a velocidade de queda de uma ferramenta, aplicando um esforço de compressão, e as condições de atrito entre a ferramenta e o material deformado (LOVATO NETO, 2006).

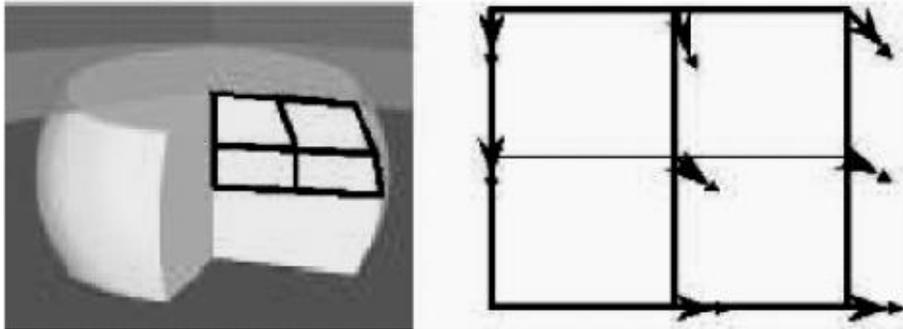


Figura 3.4 - Malha de um elemento cilíndrico em compressão.
(LOVATO NETO, 2006).

Uma vez determinadas as velocidades dos nós, deve-se atualizar as coordenadas integrando a velocidade no tempo, a cada passo, como pode ser visto na Figura 3.5 (LOVATO NETO, 2006).

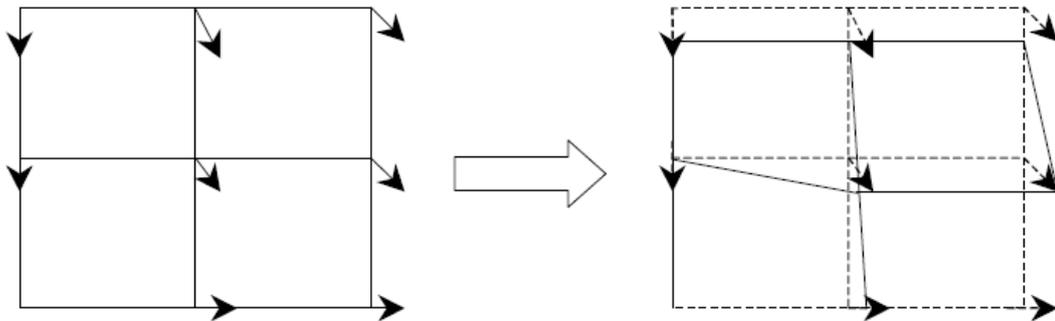


Figura 3.5 - Atualização das coordenadas dos nós.
(LOVATO NETO, 2006).

As equações para as coordenadas dos nós são obtidas como apresentado nas Equações 3.5 e 3.6.

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x \Delta t \quad (3.5)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y \Delta t \quad (3.6)$$

O programa de elementos finitos é desenvolvido de acordo com os seguintes estágios: a entrada de dados, a superposição das matrizes e vetores do elemento, a imposição das condições de contorno, a definição das equações dos elementos, a solução do sistema de equações e a saída dos resultados (LOVATO NETO, 2006).

3.1.6 Programa QForm

O programa QForm destina-se à simulação e otimização de forjamento a frio, a morno e a quente, forjamento em matriz aberta, laminação, extrusão de perfis e outros processos de conformação de metais. Uma variedade de módulos especiais adicionais, como previsão de microestrutura, simulação de tratamento térmico, atribuição de subrotinas do usuário e outros, podem ser implementados no programa (QFORM, 2022).

O QForm possui uma interface amigável, com um tempo de simulação mais rápido graças às mais modernas técnicas de programação e ampla funcionalidade. É possível simular qualquer tipo de processo de conformação de metais, via interface que ajuda a resolver facilmente problemas de pré/pós-processamento em uma única interface. A simulação, análise e correção de parâmetros de simulação e/ou dados iniciais para a simulação são apresentados em uma única janela, o que aumenta significativamente a eficiência do trabalho (QFORM, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Laminação a Frio

Empregando-se laminador piloto do tipo Ourives (Figura 4.1) pertencente ao Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, foi realizada a laminação experimental de amostras de aço IF, com dimensões 250mm x 90mm x 6mm, em diferentes condições de acabamento superficial e lubrificação, a saber: estado de entrega com superfície lixada com lixa 120# sem lubrificação, com superfície lixada com lixa 320# com e sem lubrificação, com superfície lixada com lixa 400# com e sem lubrificação, totalizando 5 amostras. As amostras foram submetidas, cada uma, a 6 passes de laminação, visando espessura final de 3,6 mm. A lubrificação, quando considerada, foi feita com vaselina.

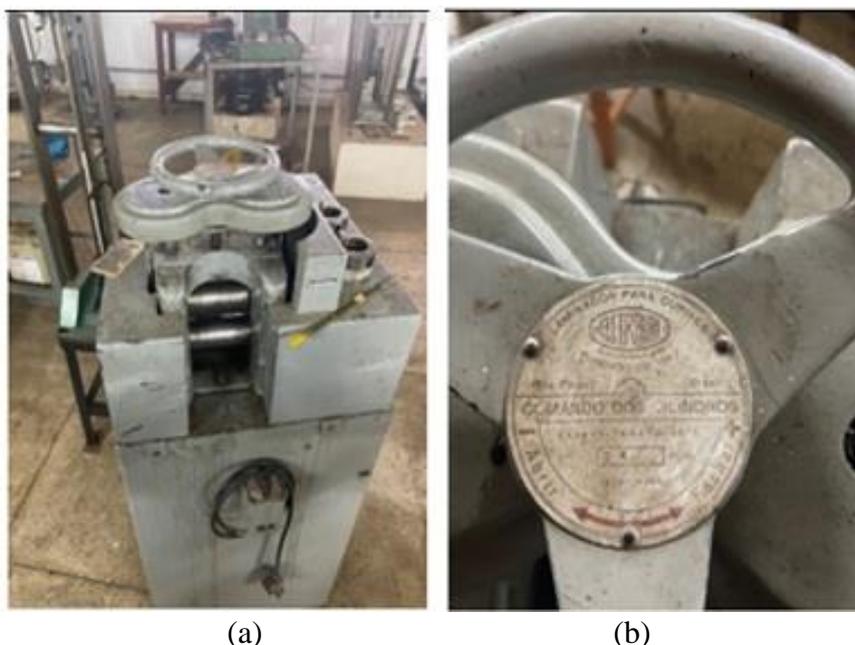


Figura 4.1 – (a) Laminador piloto. (b) Detalhe do volante de comando dos cilindros: cada volta equivale a 0,4mm.

Dados do laminador:

- Raio do cilindro: 35mm;
- Velocidade de rotação: 20rpm;
- Largura da mesa: 110mm;
- Redução por volta do volante: 0,4mm

Na simulação física da laminação, a carga de laminação foi calculada a partir na Equação 4.1. Para este modelo de cálculo de força, realizado utilizando uma planilha Excel, foi considerada a mesma equação de fluxo inserida no programa QForm.

$$F = \frac{LW\sigma}{A} (\epsilon^A - 1) \quad (4.1)$$

em que: F é a carga de laminação; L é o comprimento do arco de contato; W é largura da chapa; σ é a tensão de *Hollomon* e A é a área de contato cilindro/chapa.

4.2 Análise Metalográfica

Dentre as condições anteriormente descritas no item 4.1, foram selecionadas para análise por microscopia ótica (MO) amostras submetidas a lixamento com lixa 400# e laminadas com e sem lubrificação, sendo a metalografia realizada nos sentidos longitudinal e transversal de laminação das amostras do aço IF. A preparação foi realizada conforme padrão metalográfico, com embutimento, seguido de lixamento, polimento com suspensão de alumina de 1 μ m e com pasta de diamante de 0,25 μ m. O ataque para revelar a microestrutura foi feito com Nital 2%. A caracterização microestrutural das amostras foi realizada no Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

4.3 Simulação Numérica do Processo de Laminação

Considerando-se diferentes condições de atrito, foi realizada simulação computacional de 1 passe de laminação por meio do programa QForm, conforme condições descritas a seguir:

- Para descrever o comportamento mecânico do material, foi considerada a curva de fluxo do aço IF com equação do tipo *Hollomon* (Equação 4.2) para entrada no programa (GONORING *et al.*, 2021):

$$\sigma \text{ (MPa)} = 494,2 \epsilon^{0,22} \quad (4.2);$$

- A simulação foi realizada em duas dimensões (2D), implicando em menor tempo computacional;

- O processo foi conduzido a frio, simulando as condições reais de laminação em baixa temperatura homóloga;
- A análise térmica e, portanto, possíveis efeitos de geração e troca de calor durante o processo de laminação foram desconsiderados;
- Foi empregado modelo de atrito Coulombiano, com $\mu \approx 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$ e $0,5$;
- A deformação elástica dos cilindros foi desprezada, assumindo que as ferramentas de laminação são elementos rígidos;
- O processo de laminação foi executado com cilindros de raio 35mm, girando a uma velocidade constante de 20rpm;
- Não foram aplicadas trações avante ou à ré durante o processo, mas apenas o uso de um empurrador, conforme mostrado na Figura 4.2.

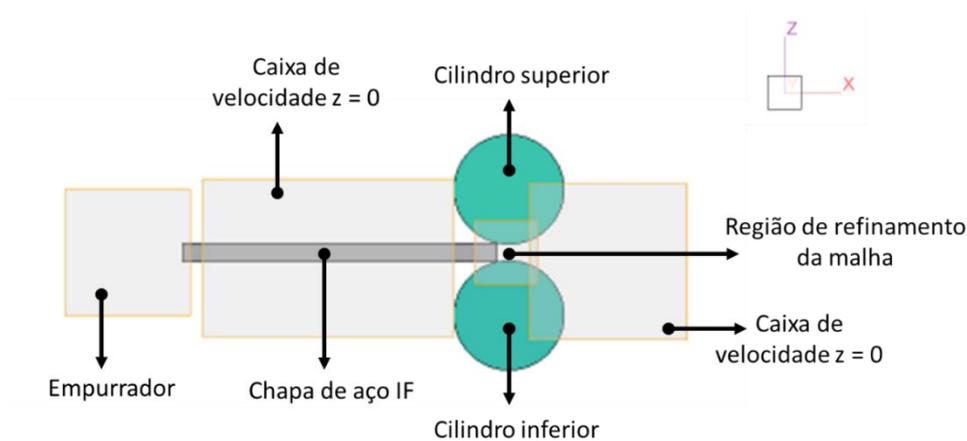


Figura 4.2 - Simulação com empurrador. QFORM.

- As dimensões iniciais da chapa consideradas na simulação foram: espessura de 6mm, largura de 90mm e comprimento de 100mm submetida a 1 passe de laminação em estado plano de deformação com redução de 0,7mm o que implica em uma deformação efetiva de 0,14.
- Visando menor tempo computacional, uma malha refinada (tamanho máximo de elemento 0,05mm) foi aplicada somente na região delimitada pela entrada e saída do laminador (Figura 4.3).

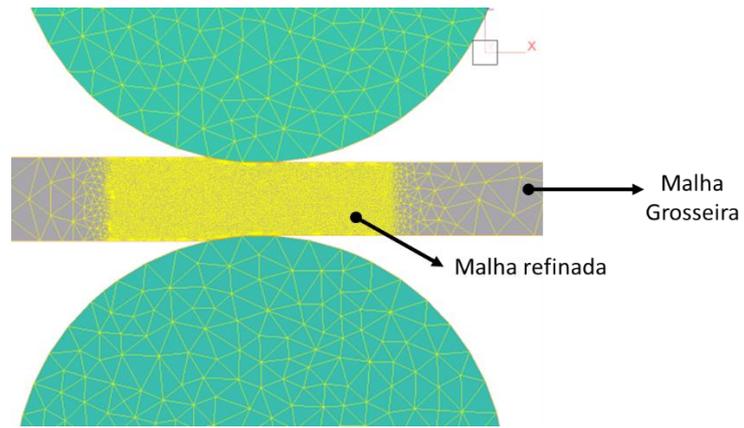


Figura 4.3 – Região de refinamento da malha do material laminado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Laminação

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os dados referentes à laminação das amostras submetidas a lixamento com lixa 400# e posteriormente laminadas por 6 passes de laminação com e sem lubrificação.

Tabela 5.1 - Dados da laminação 400# sem lubrificação.

400# sem lubrificação	Espessura planejada (mm)	Redução planejada	w (mm)	Espessura medida (mm)
Medidas originais	6,00		90,00	-
Passe 1	5,60	0,40	90,00	5,60
Passe 2	5,20	0,40	90,00	5,20
Passe 3	4,80	0,40	90,00	4,85
Passe 4	4,40	0,40	90,00	4,40
Passe 5	4,00	0,40	90,00	4,00
Passe 6	3,60	0,40	90,00	3,65

Tabela 5.2 - Dados da laminação 400# com lubrificação.

400# com lubrificação	Espessura planejada (mm)	Redução planejada (mm)	Largura (mm)	Espessura medida (mm)
Medidas originais	6,00		-	-
Passe 1	5,60	0,40	90,00	5,40
Passe 2	5,20	0,40	90,00	4,95
Passe 3	4,80	0,40	90,00	4,55
Passe 4	4,40	0,40	90,00	4,20
Passe 5	4,00	0,40	90,00	3,80
Passe 6	3,60	0,40	90,00	3,45

É sabido que a espessura final de uma chapa no processo de laminação é afetada pela deformação elástica do laminador que por sua vez depende do seu módulo de rigidez (cujo valor não é conhecido neste estudo) e da carga de laminação. Por conseguinte, alterações em variáveis de processo que afetem a carga de laminação afetarão a espessura de saída da chapa. Com base nestas colocações, as maiores espessuras de saída, evidentes na Tabela 5.1,

para condição de laminação sem lubrificação, quando comparada aos valores apresentados na Tabela 5.2 (com lubrificação), podem estar relacionadas, dentre outros fatores, à maior carga de laminação esperada para a condição de processamento sem lubrificação, que apresenta maior atrito.

5.2 Microscopia Ótica

A Figura 5.1 apresenta as micrografias da seção longitudinal e transversal das amostras submetidas a lixamento com lixa 400# e posteriormente laminadas por 6 passes com e sem lubrificação. É possível observar na Figura 5.1 em (a) e (b) o achatamento e alinhamento dos grãos do sentido de laminação. Para todas as condições (a, b, c e d), verifica-se a fragmentação dos grãos originais por bandas de deslizamento que se distribuem de maneira heterogênea e cuja orientação varia de grão para grão. Isto pode estar associado às diferentes orientações de cada grão em relação à direção de sollicitação mecânica, de modo que alguns grãos iniciariam sua deformação primeiro que outros.

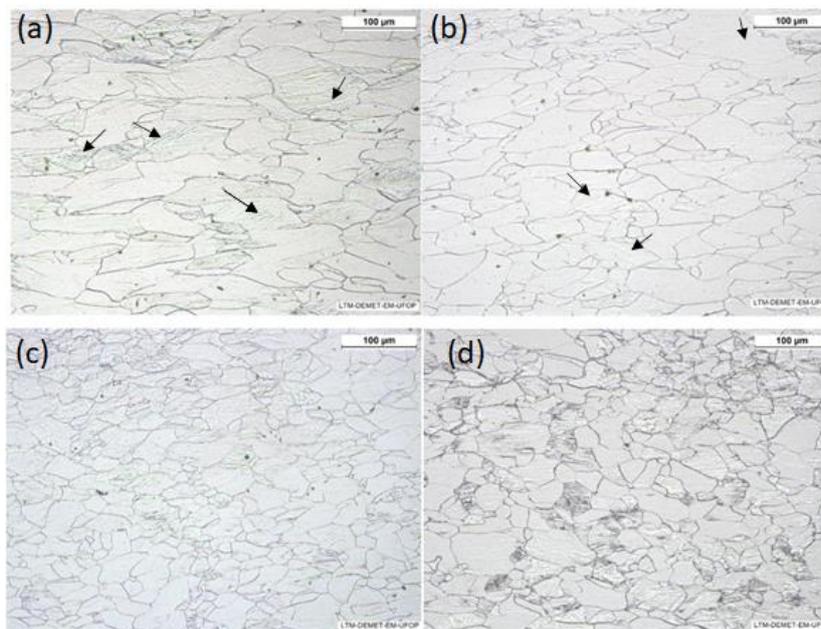


Figura 5.1 - Micrografia aço IF, amostra submetida a lixamento com lixa 400#: (a) Seção longitudinal com lubrificação, (b) seção longitudinal sem lubrificação, (c) seção transversal com lubrificação, (d) seção transversal sem lubrificação. As setas indicam evidências de bandas de cisalhamento no interior dos grãos originais.

Destaca-se que, com base nas análises por MO aqui apresentadas, não é possível estabelecer diferenças quantitativas e/ou qualitativas acerca da influência da lubrificação no

desenvolvimento de microbandas e/ou no grau de empanhecimento dos grãos na laminação a frio.

5.3 Simulações numéricas por elementos finitos

Na Figura 5.2 é apresentada, a partir de uma escala de cores, a distribuição de deformação efetiva, introduzida pelo processo de laminação em estado plano de deformação, ao longo da espessura da chapa para diferentes condições de atrito e considerando-se o regime permanente de deformação, sendo as imagens provenientes da região de refinamento da malha.

Para todas as condições de atrito, observa-se uma distribuição heterogênea de deformação ao longo da seção transversal da tira: a deformação efetiva é menor na região central e cresce em direção à superfície livre do material. Esta heterogeneidade está associada à deformação redundante, cuja contribuição é mais expressiva na superfície em contato com os cilindros de laminação, somada à influência do atrito, cujo efeito é também maior na região de contato cilindro/peça.

Ainda na Figura 5.3, verifica-se que a deformação na região próxima aos cilindros é tanto maior quanto maior o coeficiente de atrito considerado na simulação. Interessante mencionar que, para todas as condições apresentadas na Figura 5.3, a deformação na superfície é substancialmente superior à prevista pelo cálculo teórico que prevê a redução de espessura de 0,7mm ($\epsilon_{ef} \approx 0,16$).

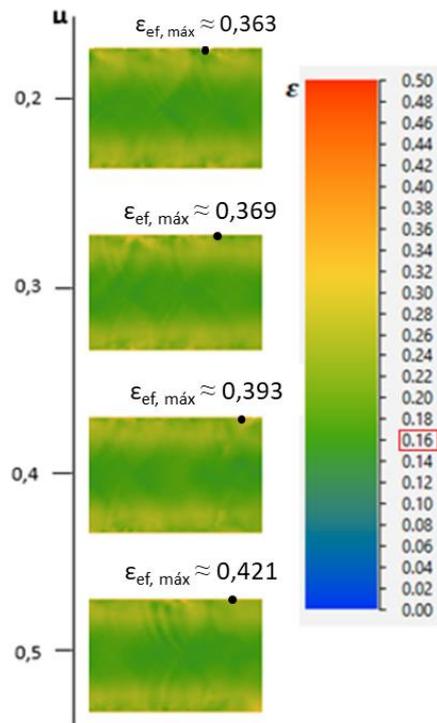


Figura 5.2 - Distribuição de deformação efetiva ao longo da espessura após laminação em estado plano de deformação com atrito 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5.

Os resultados referentes à influência do coeficiente de atrito na carga de laminação, obtidos via simulação numérica, são apresentados na Figura 5.3. Para compor a análise, foram adicionalmente plotados na referida Figura 5.3 a carga de laminação calculada a partir na Equação 5.1. Para este modelo de cálculo de força, realizado utilizando uma planilha Excel, foi considerada a mesma equação de fluxo inserida no programa QForm, bem como os mesmos parâmetros de laminação, como o diâmetro do cilindro, coeficiente de atrito, geometria da chapa e deformação. Os dados da Figura 5.3 são apresentados na Tabela 5.3.

$$F = \frac{LW\sigma}{A} (e^A - 1) \quad (5.1)$$

em que: F é a carga de laminação; L é o comprimento do arco de contato; W é largura da chapa; σ é a tensão de Hollomon, dada pela Equação 5.2, e A é a área de contato (Equação 5.3).

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (5.2)$$

em que: K é o coeficiente de resistência; ε é a deformação e n é o coeficiente de encruamento;

$$A = \frac{\mu L}{h} \quad (5.3)$$

em que: A é a área de contato; μ é o coeficiente de atrito; h é a espessura e L é o comprimento do arco de contato (Equação 5.4).

$$L = \sqrt{R\Delta h} \quad (5.4)$$

em que: L é o comprimento do arco de contato; R é o raio do cilindro e h é a espessura.

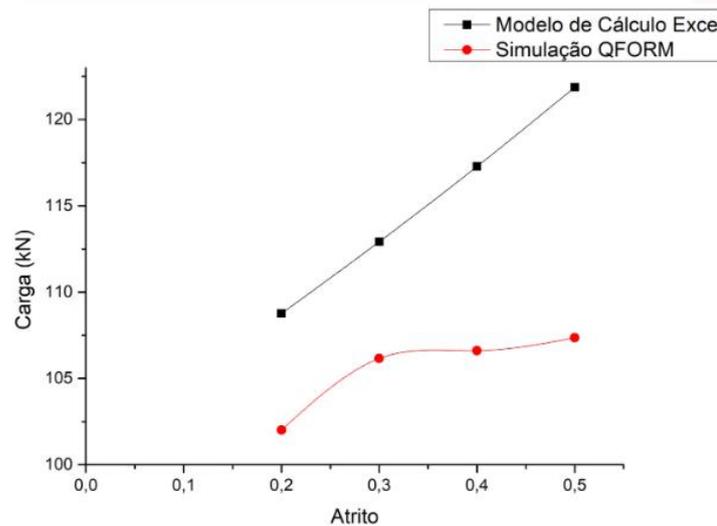


Figura 5.3 - Gráfico força de laminação versus coeficiente de Atrito.

Tabela 5.3 - Comparação do Coeficiente de Atrito versus Carga.

Coeficiente de Atrito - μ	Simulação QFORM Carga (kN)	Modelo de Cálculo Excel Carga (kN)
0,2	102,011 ± 34,257	108,764
0,3	106,155 ± 25,783	112,917
0,4	106,607 ± 23,373	117,281
0,5	107,359 ± 21,581	121,867

A análise da Figura 5.3 deixa evidente que valores superiores de μ implicam em maior carga de laminação. Verifica-se, ainda, que os valores obtidos por meio da simulação no programa QFORM são menores que aqueles obtidos pelo modelo em Excel e que os dados relativos à simulação numérica não exibem uma relação linear entre carga e coeficiente de atrito, ao contrário da tendência observada para o cálculo em Excel. Nota-se, para os dados relativos à simulação via Qform, que o aumento da carga de laminação

decorrente do aumento no atrito é menos expressivo quando $\mu > 0,3$: há aumento de ~0,42% na carga de laminação quando μ aumenta de 0,3 para 0,4, enquanto a carga aumenta 4,6% quando μ é alterado de 0,2 para 0,3. A diferenças acima descritas podem estar associadas às diferentes premissas relativas a cada um dos métodos de cálculo.

Finalmente, destaca-se que durante a realização deste trabalho não foi possível realizar a simulação no QFORM para o coeficiente de atrito igual a 0,1, conforme evidenciado na Figura 5.4. Essa limitação pode indicar que a condição de mordida e arraste não foi satisfatoriamente atendida, resultando em dificuldades na execução da simulação, mesmo recorrendo-se ao auxílio externo do empurrador.

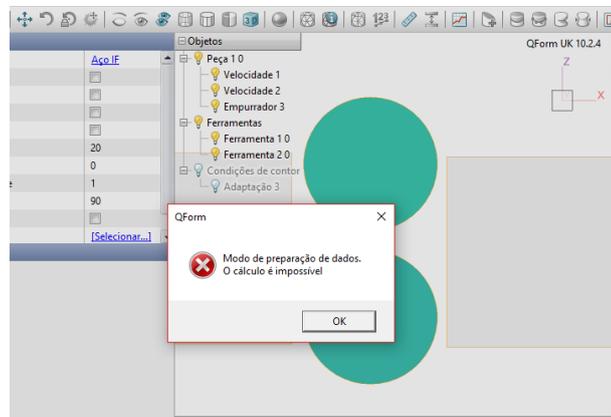


Figura 5.4 - Falha de execução do QFORM.

6 CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento do trabalho e com base nos resultados apresentados, pode-se apresentar as seguintes conclusões sobre a influência do atrito na laminação:

6.1 Conclusão sobre a laminação

É amplamente reconhecido que a espessura final de uma chapa no processo de laminação é influenciada pela deformação elástica do laminador, a qual depende de seu módulo de rigidez (cujo valor não foi determinado neste estudo) e da carga de laminação. Portanto, qualquer alteração nas variáveis do processo que afetem a carga de laminação terá um impacto na espessura final da chapa. Com base nessas considerações, a observação de uma maior espessura de saída apresentada na Tabela 5.1 para a condição de laminação sem lubrificação em comparação com os dados da Tabela 5.2 (com lubrificação) pode estar associada, entre outros fatores, a uma maior carga de laminação esperada na condição de processamento sem lubrificação, que possui um atrito mais elevado.

6.2 Conclusão sobre a análise por microscopia óptica

Com base nas análises realizadas por microscopia óptica (MO), não foi possível estabelecer diferenças quantitativas e/ou qualitativas significativas em relação à influência do atrito/lubrificação no desenvolvimento de microbandas e/ou no grau de empanqueamento dos grãos durante o processo de laminação a frio. Esses resultados indicam que a presença ou ausência de lubrificação não demonstrou uma influência clara na formação dessas características microestruturais.

6.3 Conclusão sobre a simulação numérica por elementos finitos

Com base nas análises realizadas, a distribuição de deformação efetiva ao longo da espessura da chapa para diferentes condições de atrito durante o processo de laminação em estado plano de deformação (Figuras 5.2 e 5.3), é possível observar uma distribuição heterogênea de deformação na seção transversal da tira. Essa heterogeneidade é caracterizada pela menor deformação efetiva na região central da chapa, que aumenta em direção à superfície livre do material. Essa observação indica a presença de deformação

redundante, especialmente na região em contato com os cilindros de laminação, combinada com a influência do atrito, que é mais pronunciada na região de contato cilindro/peça.

De acordo com a análise ilustrada na Figura 5.2, observa-se que valores mais altos do coeficiente de atrito (μ) resultam em uma maior carga de laminação. Além disso, observa-se uma diferença nos valores obtidos por meio da simulação via programa QFORM em comparação com o modelo calculado em planilha Excel. Os dados da simulação numérica não exibem uma relação linear entre a carga e o coeficiente de atrito, ao contrário da tendência observada no cálculo em Excel. É importante destacar que essas diferenças podem estar associadas às diferentes premissas adotadas em cada um dos métodos de cálculo. O modelo em Excel e o programa QFORM podem ter considerado diferentes equações constitutivas, parâmetros de material, geometrias de contato ou outros aspectos do processo de laminação. Essas discrepâncias ressaltam a importância de compreender as limitações e pressupostos específicos de cada método de cálculo utilizado.

Por fim, é destacada uma limitação encontrada durante a realização deste trabalho, que foi a impossibilidade de simular no QFORM um coeficiente de atrito igual a 0,1, conforme evidenciado na Figura 5.4. Essa limitação pode indicar que a condição de mordida e arraste não foi adequadamente satisfeita, resultando em dificuldades na execução da simulação, mesmo com o auxílio externo do empurrador.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALMEIDA, B. S., FONSECA, G. S. Avaliação do comportamento mecânico de um aço IF entre as cadeiras de um laminador a frio. In: Congresso Anual da ABM – Internacional. 69º, 2014, São Paulo, SP, Brasil. **Anais...** São Paulo: Editora ABM, 2014. p.1576–1585.

CETLIN, P.R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.260p.

COSTA, L. L., ZOTTIS, J., LISBOA, C. P., SCHAEFFER, L. Interface Peça-Ferramenta na Conformação Mecânica: Conceitos Referentes ao Atrito. In: Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, 6º, 2017, Sapucaia do Sul – RS. **Anais...** São Paulo: Editora ABM, 2017. p. 299-306.

DIETER Jr., G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p

FONSECA, M. A., ALVES, W. B., LACERDA, J. C. Estampabilidade dos Aços IF e AA para aplicação automotiva. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 5º. 2009. Belo Horizonte, MG, Brasil. **Anais...** Belo Horizonte, 2009, p. 1-6.

GONORING, T.B.; MOREIRA, L.P.; ORLANDO, M.T.A. **An equivalent work-hardening description of an interstitial-free steel sheet based on uniaxial tensile and hydraulic bulge tests**. Journal of Materials Research and Technology, v. 13, p. 2138-2143, 2021.

LOVATO NETO, C. L. **Simulação Numérica da Laminação a Frio no Laminador Sendzimir Número 2 da Acesita**. 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2006.

QFORM. Disponível em: <https://www.qform3d.com/products/qform>. Acessado em: 13 out 2022.

REGONE, W. **Simulação da Laminação a Quente de um Aço Livre de Intersticiais (IF) através de Ensaios de Torção**. 2001. 174f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos - SP. 2001.

SANTOS FILHO, A. L. **Inteligência Computacional Aplicada à adaptação na modelagem matemática do processo de Laminação a Frio de Aços Planos**. 2009. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2009.

SILVA, E. P. **Otimização da Configuração Produtiva da Planta de Laminação a Frio de Aços Planos**. 2016. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Otimização de Sistemas) - Departamento de Ciências da Computação. Instituto de Ciências Exatas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2016l.

ZHUANG, X.; ZHAO, Z.; HONGYE LI, H.; XIANG, H. **Experimental Methodology for Obtaining the Flow Curve of Sheet Materials in a Wide Range of Strains**. Steel Research International, v 83, n. 9999, p. 1-9, 2012