



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CHAPAS DE
PEQUENA ESPESSURA SUBMETIDAS AO PASSE DE
ENCRUAMENTO POR LAMINAÇÃO E POSTERIOR
ENSAIO DE TRAÇÃO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO PELO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

ALEXANDRE MOURA GIAROLA

Belo Horizonte, 14 de Fevereiro de 2012

Alexandre Moura Giarola

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CHAPAS DE
PEQUENA ESPESSURA SUBMETIDAS AO PASSE DE
ENCRUAMENTO POR LAMINAÇÃO E POSTERIOR
ENSAIO DE TRAÇÃO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO PELO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos Mecânicos

Orientador(a): Prof. Antônio Eustáquio de Melo Pertence
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CHAPAS DE
PEQUENA ESPESSURA SUBMETIDAS AO PASSE
DE ENCRUAMENTO POR LAMINAÇÃO E POSTERIOR
ENSAIO DE TRAÇÃO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO PELO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

ALEXANDRE MOURA GIAROLA

Dissertação defendida e aprovada em 14, de Fevereiro de 2012, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projetos Mecânicos**".

Prof. Dr. Antônio Eustáquio de Melo Pertence – UFMG – Orientador

Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin– UFMG – Examinador

Prof. Dr. Roberto Braga Figueiredo– UFMG – Examinador

Prof. Dr. Haroldo Béria Campos– UFMG – Examinador (Suplente)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antônio Eustáquio de Melo Pertence pelos longos anos de ajuda em vários trabalhos e pela sua enorme paciência.

Ao Professor Paulo Roberto Cetlin, pela oportunidade de trabalhar com um pesquisador tão completo.

À minha família, Mauro, Luci, Henrique e Vássia pelo apoio.

À Universidade Federal de Minas Gerais que proporcionou meu estudo da graduação até o mestrado.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

	Página
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE GRÁFICOS.....	XII
LISTA DE TABELAS.....	XIV
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	2
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 – Aços baixo carbono	3
3.1.1 – Mecanismo de envelhecimento por deformação	3
3.2 – Propriedades obtidas no ensaio de tração	4
3.3 – Mecanismos de formação das bandas de Lüders	5
3.4 – Laminação de encruamento	8
3.4.1 – Supressão do patamar de escoamento.....	8
3.4.2 – Influência das deformações no encruamento sobre as propriedades de tração... 10	
3.4.3 – Espaçamento das bandas de Lüders:.....	16
3.4.4 – Influência do limite superior de escoamento na formação das bandas de Lüders:	17
3.5 – Método dos elementos finitos:.....	21
3.5.1 – Formulação plástica	23
3.5.2 – Formulação elasto-plástica – abordagem estática implícita	23
4 – METODOLOGIA	24
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1 – Análise da formação das bandas de Lüders	28
5.1.1 – Resultados do passe de laminação para diâmetro de 150 mm.....	28
5.1.2 – Resultados do passe de laminação para diâmetro de 100mm.....	33
5.2 – Distribuição da deformação efetiva ao longo do plano médio	39
5.3 – Espaçamento das bandas de Lüders.....	44
5.4 – Bandas de Lüders no ensaio de tração:.....	47

5.5 – Tração após laminação:	50
6– CONCLUSÃO	55
ABSTRACT.....	56
TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

RESUMO

As bandas de Lüders ocorrem após o Limite de escoamento Superior (LES) e durante o patamar de escoamento no ensaio de tração de chapas de aço envelhecidas. Para que tais bandas não ocorram em artefatos fabricados com essas chapas, causando danos à aparência desses produtos, a última etapa de fabricação das chapas envolve uma leve laminação a frio, com reduções de espessura de cerca de 1 a 2 % (laminação de encruamento ou “skin-pass”). Esse passe introduz na chapa um grande número de bandas de Lüders incipientes, reduzindo os danos à aparência dos artefatos.

Utilizando o método de elementos finitos, avaliou-se a formação das bandas na laminação de chapas finas, estudou-se o mecanismo de movimentação das bandas após a laminação e o levantamento das curvas de fluxo do material em função do aumento da redução percentual da espessura na laminação à frio, com o foco na eliminação do patamar de escoamento.

Foram levantados os resultados da influência do limite superior de escoamento e do diâmetro do cilindro do laminador na distribuição da deformação efetiva da chapa; um método gráfico foi proposto como nova forma de análise para verificação da deformação da chapa.

Palavras-chave: Bandas de Lüders, Método de Elementos Finitos, Ensaio de Tração, Passe de Encruamento.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

σ - Tensão

C – Carbono

DEMEC – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFMG

FEM – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS – *FINITE ELEMENT*

MODELING

LE – Limite de escoamento

LSE – Limite superior de escoamento

PE – Patamar de escoamento

R – Raio

S – Espaçamento das bandas

UFMG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 3.1-. Envelhecimento por deformação (A). A carga foi removida do corpo de prova no ponto c e o recarregamento foi feito após um curto intervalo de tempo (horas) .(B) A carga foi removida no ponto c e recarregado após um longo período de tempo..	4
FIGURA 3.2- Curva esquemática do Limite de escoamento superior (LSE) e patamar de escoamento (PE) no ensaio à tração de chapas de aço envelhecidas combinada à evolução das bandas de Lüders no ensaio de tração	6
FIGURA 3.3- Interações entre solutos e deslocações.....	7
FIGURA 3.4- Bandas de Lüders em uma chapa de aço 1008 estampada	7
FIGURA 3.5- Ilustração esquemática da formação de bandas de Lüders no passe de encruamento.....	9
FIGURA 3.6-. Ilustração esquemática da propagação das bandas de Lüders durante o passe de encruamento (FERNANDES, 2007) e resultado experimental obtido na literatura para 0,9% de deformação (HUNDY, 1955).	10
FIGURA 3.7- Variação do limite de escoamento e da extensão do patamar de escoamento de um aço acalmado ao alumínio, submetido a níveis crescentes de redução no passe de encruamento	11
FIGURA 3.8- Limite de escoamento (símbolos fechados) e deformações no patamar de escoamento (símbolos abertos) em função do grau de deformação aplicado no laminador de encruamento de um aço capeado	14
FIGURA 3.9 –Mudanças da deformação no patamar de escoamento e do limite de escoamento com aumento de deformações do SPM	15
FIGURA 3.10– Materiais analisados por Yoshida.	18
Na amostra do Material A, padrões de bandas apareceram que dependeram tanto das propriedades do material quanto das condições de contorno estabelecidas. Ao contrário a amostra do Material B apresentou uma situação de deformação quase que homogênea (Yoshida,	18
FIGURA 3.11– Padrão de deformação plástica efetiva na chapa de 1,2mm com vários passes de encruamento para Material A (a) 0,5 %; (b) 1,0 % e (c) 2,0 %	19

FIGURA 3.12– Padrão de deformação plástica efetiva na chapa de 1,2mm com vários passes de encruamento para Material B (a) 0,5 %; (b) 1,0 % e (c) 2,0 %	19
FIGURA 3.13– Curvas de Tensão deformação obtidas após o passe de encruamento para a chapa composta por Material A	20
FIGURA 3.14– Curvas de Tensão deformação obtidas após o passe de encruamento para a chapa composta por Material B	20
FIGURA 4.1–. Condições de contorno para chapa na simulação da laminação.	25
FIGURA 4.2- Condições de contorno para chapa na simulação do ensaio de tração. ...	26
FIGURA 4.3– Esquema da medição do espaçamento das bandas feitas de centro a centro (Material 1 , passe de encruamento de 1% e diâmetro do cilindro de 150 mm)..	27
FIGURA 4.4– Análise gráfica da deformação efetiva da chapa utilizando pontos de captação de deformação. (Material 1 , passe de encruamento de 1% e diâmetro do cilindro de 150 mm).....	27
FIGURA 5.1- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 0,5 mm	28
FIGURA 5.2- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 0,5 mm	29
FIGURA 5.3-Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 0,5 mm	29
FIGURA 5.4- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 1,0 mm	30
FIGURA 5.5- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 1,0 mm	30
FIGURA 5.6- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 1,0 mm	31
FIGURA 5.7- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 2,0 mm	31
FIGURA 5.8- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 2,0 mm	32
FIGURA 5.9- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 2,0 mm	32

FIGURA 5.10- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 0,5 mm	34
FIGURA 5.11- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0% para chapa de 0,5 mm	34
FIGURA 5.12- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0% para chapa de 0,5 mm	35
FIGURA 5.13- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 1,0 mm	35
FIGURA 5.14- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 1,0 mm	36
FIGURA 5.15- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 1,0 mm	36
FIGURA 5.16- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 2,0 mm	37
FIGURA 5.17- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 2,0 mm	37
FIGURA 5.18- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 2,0 mm	38
FIGURA 5.19- Simulação da nucleação e crescimento das bandas de Lüders no ensaio de tração dos materiais 1 e 2 antes do passe de encruamento, para chapa de 0,5mm. ...	48
FIGURA 5.20- Simulação da nucleação e crescimento das bandas de Lüders no ensaio de tração dos materiais 1 e 2 antes do passe de encruamento, para chapa de 2,0mm. ...	49
FIGURA 5.21- Simulação da nucleação e crescimento das bandas de Lüders no ensaio de tração dos materiais 1 e 2 antes do passe de encruamento, para chapa de 2,0 mm. ..	49
FIGURA 5.22- Simulação das bandas de deformação na tração após o passe de encruamento.....	50

LISTA DE GRÁFICOS

	Página
GRÁFICO 3.1– Efeito do passe de encruamento no limite de escoamento de uma aço Dual Phase 0,05%C, recozido continuamente após 599°C de overanging por 1 minuto (temperatura de encharque 816° por 1 minuto)	12
GRÁFICO 3.2– Proporção da área deformada em função da redução de laminação	12
GRÁFICO 3.3– Influência do LSE na espessura da chapa e na redução necessária para eliminação do mesmo, para diâmetro do cilindro de ótimo acabamento (LAKE, 1985).	14
GRÁFICO 3.4– Espaçamento das bandas de Lüders para vários valores de redução no passe de encruamento, a amostra estava totalmente deformada para o valor de 2%.....	16
GRÁFICO 3.5– Espaçamento das bandas de Lüders para cilindros com ótimo acabamento superficial.	17
GRÁFICO 4.1–Curva de fluxo dos materiais utilizados nas simulações.	24
GRÁFICO 5.1- Deformação efetiva para chapa de 0,5mm e 0,5% de redução	39
GRÁFICO 5.2– Deformação efetiva para chapa de 0,5mm e 1% de redução.....	40
GRÁFICO 5.3- Deformação efetiva para chapa de 0,5mm e 2% de redução	40
GRÁFICO 5.4- Deformação efetiva para chapa de 1,0mm e 0,5% de redução	41
GRÁFICO 5.5- Deformação efetiva para chapa de 1,0mm e 1% de redução	41
GRÁFICO 5.6- Deformação efetiva para chapa de 1,0mm e 2% de redução	42
GRÁFICO 5.7- Deformação efetiva para chapa de 2,0mm e 0,5% de redução	42
GRÁFICO 5.8- Deformação efetiva para chapa de 2,0mm e 1,0% de redução	43
GRÁFICO 5.9- Deformação efetiva para chapa de 2,0mm e 2,0% de redução	43
GRÁFICO 5.10- Comportamento da deformação com aumento da laminação para chapa de 1,0 mm e diâmetro de 150 com os materiais 1 e 2.....	44
GRÁFICO 5.11- Espaçamento das bandas para chapa do Material 1 e 2 para laminação de 0,5%,1,0% e 2,0%, de espessura 0,5mm.....	45
GRÁFICO 5.12- Espaçamento das bandas para chapa do Material 1 e 2 para laminação de 0,5%,1,0% e 2,0%, de espessura 1,0mm.....	45
GRÁFICO 5.13- Espaçamento das bandas para chapa do Material 1 e 2 para laminação de 0,5%,1,0% e 2,0%, de espessura 2,0mm.....	46

GRÁFICO 5.14- Espaçamento das bandas para o material 1 com redução de laminação 1, % e espessura de 0,5, 1,0 e 2,0 mm.	47
GRÁFICO.5.15- Ensaio de tração na chapa do Material 1 espessura de 0,5mm até uma deformação de 0,08.....	51
GRÁFICO.5.16- Ensaio de tração na chapa do Material 2 espessura de 0,5mm até uma deformação de 0,08.....	51
GRÁFICO.5.17- Ensaio de tração na chapa do Material 1 espessura de 1,0mm até uma deformação de 0,08.....	52
GRÁFICO.5.18- Ensaio de tração na chapa do Material 2, espessura de 1,0mm até uma deformação de 0,08.....	52
GRÁFICO.5.19- Ensaio de tração na chapa do Material 1, espessura de 2,0mm até uma deformação de 0,08.....	53
GRÁFICO.5.20- Ensaio de tração na chapa do Material 2, espessura de 2,0mm até uma deformação de 0,08.....	53

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 3.1- Efeito do diâmetro do cilindro na supressão do limite superior de escoamento e da obtenção de uma curva suave na tração.....	13
TABELA 3.2 - Efeito da variação do diâmetro do cilindro no espaçamento das bandas.....	17
TABELA 4.1.- Resumo das condições da simulação utilizadas na laminação de encruamento.	25
TABELA 4.2.- Resumo das condições da simulação utilizadas nos ensaios de tração após laminação.....	26

1 – INTRODUÇÃO

A utilização de aços baixo carbono na estampagem pode ser inviabilizada pela presença do patamar de escoamento, que causa escoamento descontínuo e imperfeições nas chapas chamadas bandas de Lüders.

A instabilidade plástica ocorre em aços que possuem elementos intersticiais em solução sólida como carbono e nitrogênio. Esses elementos podem travar as deslocções pelo efeito do tempo e temperatura e travá-las (Tsukara, 1998).

O passe de encruamento (ou “skin pass”) corresponde a uma redução, por laminação a frio, da espessura de uma chapa de cerca de 1 a 2% e representa a etapa final dos processos de produção de chapas finas. Tal passe introduz grande número de bandas de Lüders no material, conduzindo à eliminação do patamar de escoamento no ensaio de tração das chapas após a laminação e à ausência de problemas superficiais no material após a estampagem, garantindo uma alta qualidade de acabamento dos produtos (Reed-Hill, 1982, Kainz, 2003).

Outro parâmetro importante é o espaçamento das bandas que foi estudado por Lake (1985) para vários tipos de aço e condições de laminação, envolvendo a variação da espessura inicial da chapa, a composição química do material das chapas, diâmetro e acabamento superficial do cilindro de laminação.

O objetivo mais importante do passe de encruamento é a obtenção de uma curva de fluxo suave no ensaio de tração, logo após a laminação da chapa. O passe de encruamento tem a função de eliminar o limite superior de escoamento e o patamar de escoamento em chapas de baixo carbono.

2 – OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivos gerais a simulação do passe de encruamento de chapas de pequena espessura e análise do comportamento destas chapas sob posterior tração e como objetivos específicos:

- Estudar o comportamento das bandas para várias reduções de laminação, relacionadas à aços com níveis de envelhecimento diferentes;
- Avaliar a influência do diâmetro do cilindro de laminação no comportamento das bandas;
- Medição dos espaçamentos das bandas para todos os casos analisados e correlacioná-los com a literatura;
- Traçar as curvas de tração após a laminação analisando a eliminação do patamar de escoamento e limite superior de escoamento.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Aços baixo carbono

O aço é uma liga de Fe-C e outros elementos de liga do processo de produção ou adicionados para melhorar as propriedades mecânicas. O teor de carbono varia entre 0,008% até 2,11% que determina a classificação do aço hipoeutetóide (menos de 0,77% C), eutetóide (0,77% C) ou hipereutetóide (acima de 0,77% C a 2,11% C) (Callister, 2002).

As transformações de fase em ligas metálicas são obtidas através da variação da temperatura ou variação da composição química (Callister, 2002).

A Ferrita (Ferro α) se forma por difusão e nucleia-se, preferencialmente nos contornos de grão da austenita. A ferrita apresenta estrutura CCC e é encontrada à temperatura ambiente até 912°C aproximadamente. A estrutura CCC é compacta e possui espaços interatômicos pequenos e a máxima solubilidade de carbono é de 0,008 % a 723°C (Reed-Hill, 1982).

A austenita (Ferro γ) possui estrutura CFC sendo a forma estável do ferro puro entre 910°C a 1400°C, aproximadamente. A essa temperatura a estrutura CFC apresenta grande ductilidade sendo o principal motivo para ser utilizado em vários processos de fabricação. A estrutura CFC possui um espaçamento interatômico maior que a CCC, o que possibilita que a solubilidade máxima de carbono na austenita chegue a 2,0 % (Callister, 2002).

3.1.1 – Mecanismo de envelhecimento por deformação

O envelhecimento por deformação consiste no fenômeno do metal endurecer por envelhecimento após deformação plástica. O mecanismo é ilustrado na FIG 3.1, que apresenta o ensaio de tração de um metal que apresenta limite de escoamento definido. No decorrer do ensaio parou-se o carregamento no ponto c e, então, a carga foi removida. Durante o descarregamento, a curva tensão deformação segue uma trajetória linear paralela ao trecho elástico linear da curva (linha ab). Recarregando-se após um curto intervalo de

tempo (horas) o corpo de prova se comporta elasticamente até o ponto c e depois deforma plasticamente, deixando de ser notado qualquer limite de escoamento definido. Se o corpo de prova ficar muito tempo a temperatura ambiente, o limite de escoamento definido reaparecerá, como ilustrado na FIG 3.1.b. O período de envelhecimento elevou o a tensão de escoamento do corpo de prova. O limite de escoamento é associado a formação de atmosferas de átomos de soluto em torno das discordâncias. As fontes de discordâncias que eram ativas no processo de deformação pouco antes do corpo de prova ser descarregado, são ancoradas. Como os átomos de soluto devem difundir-se no reticulado para acumularem em torno da discordância o reaparecimento do limite de escoamento definido é função do tempo (Reed-Hill, 1982).

O limite de escoamento definido e os fenômenos de envelhecimento por deformação estão associados ao ferro e ao aço de baixo teor de carbono. Entretanto, eles também são observados em outros metais cúbicos de corpo centrado, cúbicos de face centrada e hexagonais compactos (Reed-Hill, 1982).



FIGURA 3.1-. Envelhecimento por deformação (A). A carga foi removida do corpo de prova no ponto c e o recarregamento foi feito após um curto intervalo de tempo (horas) . (B) A carga foi removida no ponto c e recarregado após um longo período de tempo

FONTE - (Reed-Hill,1982).

3.2 – Propriedades obtidas no ensaio de tração

Transição elasto-plástico é o valor máximo de tensão que não produz deformação residual do material após seu descarregamento. Neste caso, o material permanece no

regime elástico, ou seja, com a retirada do carregamento o material retorna à sua forma original sem tensões ou deformações residuais. Normalmente o limite de escoamento é definido como sendo a carga que produz 0,2 % de deformação plástica residual. Este limite é definido assim devido à dificuldade em se localizar o início da deformação plástica do metal, pois nem todos apresentam patamar de escoamento (Reis, 2002).

O patamar de escoamento é caracterizado por um alongamento do material, sem acréscimo de carga. Esta chega a oscilar, entre pontos máximos e mínimos, em uma pequena variação (Reis, 2002).

3.3 – Mecanismos de formação das bandas de Lüders

Os aços baixo carbono de maneira geral, na condição recozida, apresentam um tipo de transição localizada heterogênea, da deformação elástica para plástica, produzindo um escoamento descontínuo da curva tensão deformação, ilustrado na FIG. 3.2. Ao realizar um ensaio de tração, a carga aplicada ao corpo de prova cresce constantemente com a deformação elástica até um ponto de máximo (limite superior de escoamento), cai repentinamente, flutuando em um valor aproximadamente constante (limite inferior de escoamento) e depois cresce com a continuação da deformação. Durante a região do patamar de escoamento a deformação é heterogênea (Fernandes, 2007).

A nucleação da primeira banda, próximo a algum concentrador de tensão, é verificada logo após que a tensão de tração supera o limite superior de escoamento. Após as primeiras bandas ocorre a formação de novas bandas que se propagam ao longo de todo o corpo de prova, ilustrado na FIG.3.2.

A tensão de escoamento é a soma das tensões necessárias para ativar uma fonte de deslocamentos com as demais tensões necessárias para ativar uma fonte de deslocamentos ancoradas (Reed-Hill, 1982).

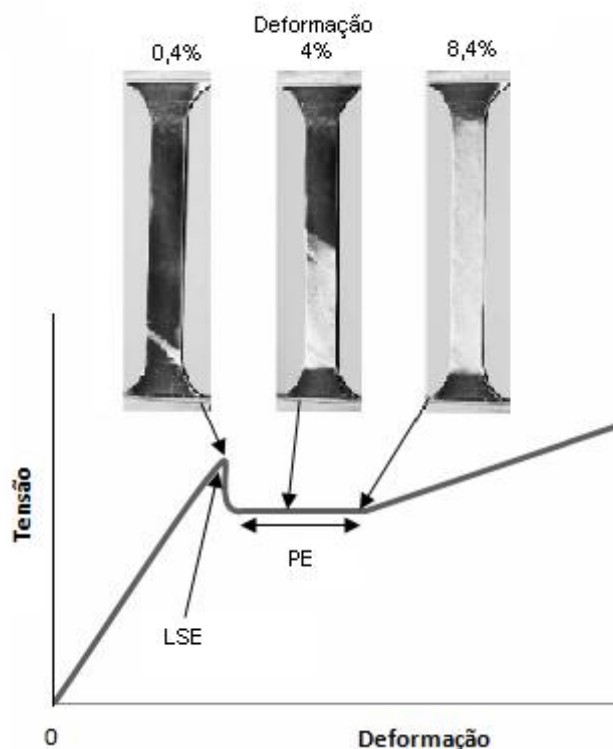


FIGURA 3.2- Curva esquemática do Limite de escoamento superior (LSE) e patamar de escoamento (PE) no ensaio à tração de chapas de aço envelhecidas combinada à evolução das bandas de Lüders no ensaio de tração

FONTE - (Sun, 2003).

A explicação para este fenômeno veio da teoria de Cottrell, (Cottrell, 1965), onde as fontes de deslocações são bloqueadas pela interação com átomos de soluto, C e N em solução sólida. Quando uma deslocação é “movida” do átomo de soluto o seu movimento passa a ocorrer em tensões mais baixas como indica a FIG.3.3. Isto significa que o limite inferior de escoamento representa a tensão necessária para movimentar deslocações já liberadas de suas atmosferas (pela tensão adicional do limite superior de escoamento). Além disto, novas deslocações também são geradas para permitir a tensão de escoamento cair. Portanto, o escoamento descontínuo ocorre como resultado da liberação das deslocações bloqueadas (através de altas tensões), ou pela criação de outras nos pontos de concentração de tensões. As deslocações que ficam livres para se movimentarem no plano de deslizamento do material empilham-se nos contornos de grão. Este empilhamento produz uma concentração de tensão na ponta do empilhamento, a qual se combina com a tensão aplicada no grão vizinho para liberar as fontes (ou criar novas deslocações), e dessa

maneira uma banda de Lüders se propaga pelo material. Desta forma, a magnitude do efeito de escoamento descontínuo dependerá da energia de interação e da concentração de átomos de soluto nas deslocações (Fernandes, 2007).

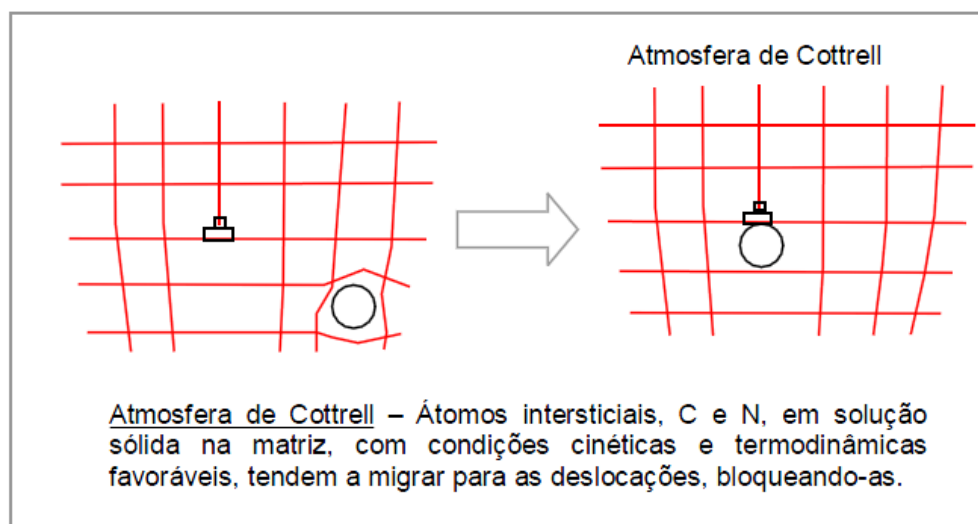


FIGURA 3.3- Interações entre solutos e deslocações

FONTE - (Fernandes, 2007)

As bandas de Lüders se formam também no processo de estampagem ilustrado na FIG.3.4.



FIGURA 3.4- Bandas de Lüders em uma chapa de aço 1008 estampada

FONTE - (Hosford, 1983).

3.4 – Laminação de encruamento

O passe de encruamento conhecida em inglês por *skin pass ou temper Rolling* é uma das etapas mais importantes dos aços laminados a frio, uma vez que o controle geométrico e propriedades mecânicas são fortemente influenciados por esse processo (Pinto, 1985).

A distribuição de deformação ao longo da espessura da chapa para aços baixo carbono comuns é heterogênea após a laminação de encruamento, e o nível de deformação é pequeno e concentrado na superfície (Fernandes, 2007). A distribuição é influenciada principalmente pelos seguintes parâmetros:

- Espessura da chapa e seu tamanho de grão;
- Grau e velocidade de deformação;
- Condições de atrito (influenciadas pela textura superficial do cilindro e do material e pela utilização de lubrificantes).

A laminação de encruamento possui quatro finalidades básicas:

- Eliminação do patamar de escoamento (exceto para aços IF, *Dual Phase* e *Trip*);
- Ajuste e adequação das propriedades mecânicas;
- Transferência de textura do cilindro para superfície da chapa;
- Correção da planicidade.

3.4.1 – Supressão do patamar de escoamento

Uma das principais finalidades da laminação de encruamento é a supressão do patamar de escoamento. Sua eliminação está vinculada ao fato de que caso ela não seja realizada, material apresenta o defeito chamado de “estrias” (FIG 3.4), também conhecido linhas ou bandas de Lüders. No ensaio de tração, esse fenômeno ocorre precisamente ao atingir o patamar de escoamento definido. A eliminação deste defeito se dá com a nucleação de uma grande quantidade de bandas de Lüders através do contato entre os cilindros e a chapa, Ilustrado na FIG 3.5.

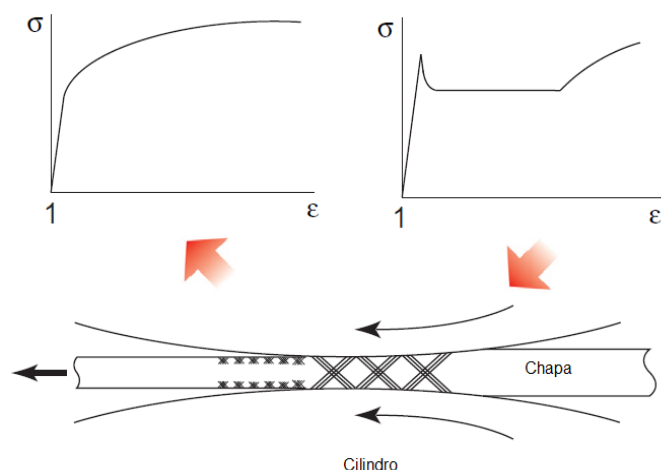


FIGURA 3.5- Ilustração esquemática da formação de bandas de Lüders no passe de encruamento
 FONTE - (Yoshida,2008)

Estas bandas iniciam-se na superfície da chapa e se propagam em direção ao centro do material com uma inclinação de aproximadamente 45° . O resultado do processo, assim como no ensaio de tração, é a distribuição de deformações bastante heterogêneas, consistindo de zonas deformadas com zonas não deformadas, em níveis diferentes de deformação, ilustrada na FIG 3.6.

Com maiores deformações as zonas não deformadas se dissipam dando lugar a uma estrutura de deslocação uniforme e é favorecido o processamento do aço nas aplicações subseqüentes, como por exemplo, a estampagem onde estas pequenas bandas crescem, mas devido seus reduzidos tamanhos e grandes proximidades as irregularidades da superfície é muito pequena e não perceptível ao olho nu.

A periodicidade das bandas resulta da repentina queda de tensão quando uma banda de deformação se forma. Logo após, a deformação elástica aumenta até que uma nova banda seja formada (Fernandes, 2007).

Os fatores que influenciam a propagação das bandas de Lüders são o tamanho médio do grão ferrítico, quanto mais fino, menor a propagação para uma dada deformação no encruamento.

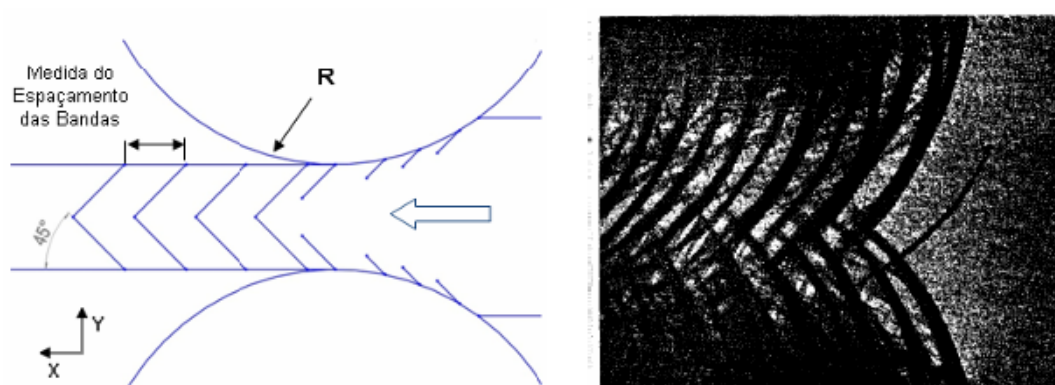


FIGURA 3.6-. Ilustração esquemática da propagação das bandas de Lüders durante o passe de encruamento (FERNANDES, 2007) e resultado experimental obtido na literatura para 0,9% de deformação (HUNDY, 1955).

FONTE-(Fernandes, 2007, Hundy, 1955)

3.4.2 – Influência das deformações no encruamento sobre as propriedades de tração.

O comportamento do limite de escoamento e do comprimento do patamar de escoamento, quando submetidos a variações de deformações no encruamento foi estudado e por Pereira (1987) e é ilustrado na FIG 3.7.

O limite de escoamento decresce com o aumento da deformação até encontrar um mínimo, para uma laminação de 0,7% a partir deste valor volta a crescer.

O patamar de escoamento visto no gráfico inferior da FIG 3.7, torna-se inexistente com aproximadamente 1% de laminação.

Cabe ressaltar que a supressão do patamar de escoamento é muito próxima do grau de encruamento para no qual o limite de escoamento é mínimo.

Forma feitos estudos relacionando a independência da microestrutura entre os aços *Dual Phase* e aços baixo carbono recozidos submetidos a várias temperaturas de “overaging”. No estudo as amostras submetidas a um “overaging” acima de 150°, estes aços apresentaram patamar de escoamento de aproximadamente 5% a 8% e que ao submetê-los ao passe de encruamento conseguiu-se um resultado similar ao aço carbono comum, sugerindo que o mecanismo para se explicar o efeito do passe de encruamento independesse da microestrutura do aço (Fernandes, 2007).

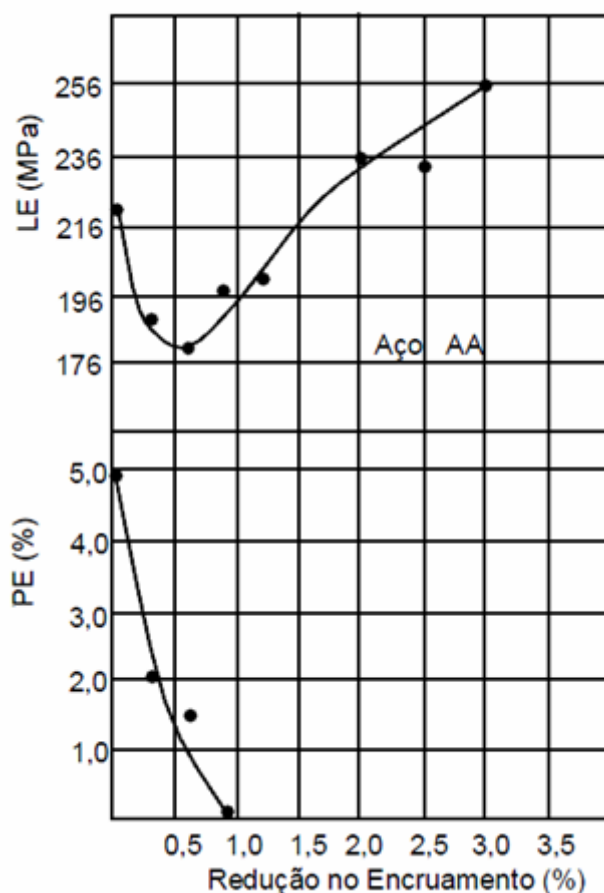


FIGURA 3.7- Variação do limite de escoamento e da extensão do patamar de escoamento de um aço acalmado ao alumínio, submetido a níveis crescentes de redução no passe de encruamento

FONTE - (Pereira, 1987).

O GRA.3.1 ilustra o comportamento parabólico do limite de escoamento com o aumento da redução de laminação. O limite de escoamento decresce sob a influência da deformação inicial até aproximadamente 1%, onde o patamar de escoamento foi totalmente removido e então cresce novamente pelo efeito de encruamento da chapa.

Utilizando um microscópio eletrônico de varredura Lake (1985) estudou a diferença da área deformada em relação à superfície ao plano médio da chapa de aço capeado com espessura de 0,84mm, ilustrado no GRA.3.2. Verifica-se uma deformação na superfície maior que no plano médio, com o valor de redução de 2% de laminação, onde Lake afirma conseguir uma curva de tração perfeitamente suave com supressão do patamar de escoamento e limite superior de escoamento.

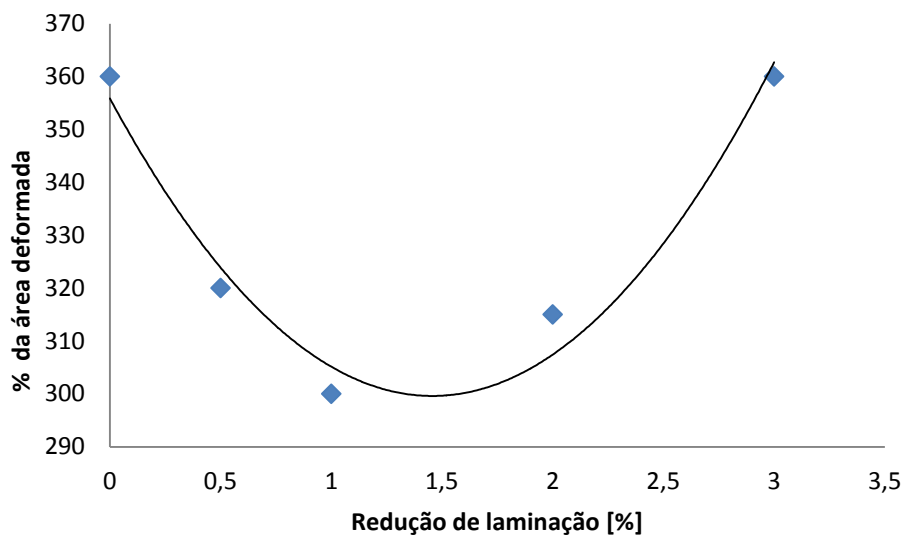


GRÁFICO 3.1– Efeito do passe de encruamento no limite de escoamento de uma aço Dual Phase 0,05%C, recozido continuamente após 599°C de overanging por 1 minuto (temperatura de encharque 816° por 1 minuto)

FONTE- (Chang, 1984).

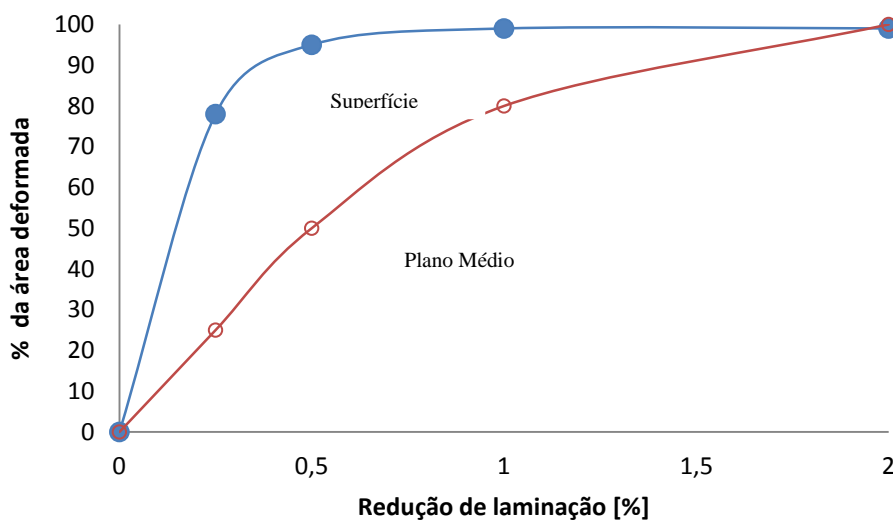


GRÁFICO 3.2– Proporção da área deformada em função da redução de laminação

FONTE - (LAKE, 1985).

A Influência do diâmetro do cilindro e do atrito na laminação de encruamento foi estudada por Lake, ilustrada na TAB.3.1.

TABELA 3.1

Efeito do diâmetro do cilindro na supressão do limite superior de escoamento e da obtenção de uma curva suave na tração

Amostra	Redução Crítica para:	Diâmetro 150 mm	Diâmetro 38 mm
		Cilindros Seco (%)	Cilindros Seco (%)
CC	Supressão LSE	0,72	0,64
	Curva suave	1,8	1,2
CR	Supressão LSE	1,0	0,82
	Curva suave	2,1	1,8

FONTE - (Lake, 1985)

A amostra CC possuía 1,06 mm de espessura e a amostra CR 0,84 mm. Apesar da espessura de laminação ser menor a amostra CR apresentou uma redução crítica maior que da amostra CC, isso se deve principalmente ao Maior LSE que para amostra CC é de 246MPa e da CR 262MPa.

O estudo da influência do limite superior de escoamento (LSE) em função da espessura da chapa para eliminação do mesmo é ilustrada na GRA.3.3, onde se observa que para uma mesma espessura uma amostra com LSE maior necessariamente deve apresentar uma redução de laminação maior para eliminação do LSE. Cabe ressaltar que o aumento da espessura não está relacionada com o aumento do valor de laminação.

O comportamento do limite de escoamento (LE) e das deformações do patamar de escoamento (PE), para um aço capeado submetido a várias deformações no encruamento (SPM), foi estudado por Lake, ilustrado na FIG.3.8.

Observa-se na FIG.3.8 que o limite de escoamento decresce sob a influência de pequenas deformações no encruamento (SPM) e então, permanece constante até o início de formação da porção curva do PE. Já o patamar de escoamento diminuiu rapidamente com o aumento da deformação no encruamento até o valor de redução em que o LE se torna constante a partir desse momento diminuiu linearmente até atingir o valor de zero (Fernandes, 2007).

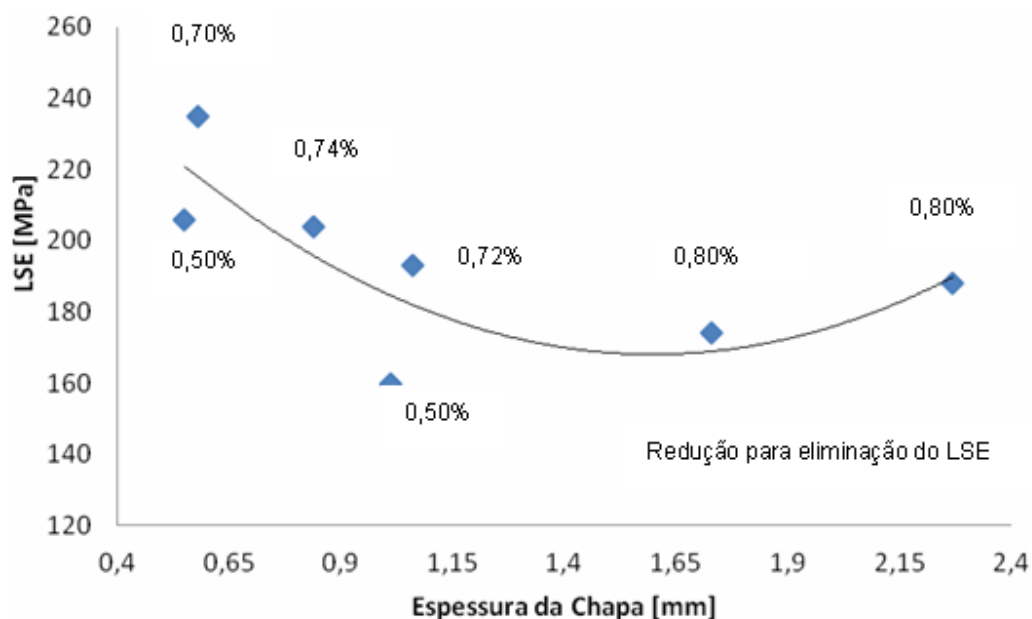


GRÁFICO 3.3– Influência do LSE na espessura da chapa e na redução necessária para eliminação do mesmo, para diâmetro do cilindro de ótimo acabamento (LAKE, 1985).

FONTE: (Lake, 1985)

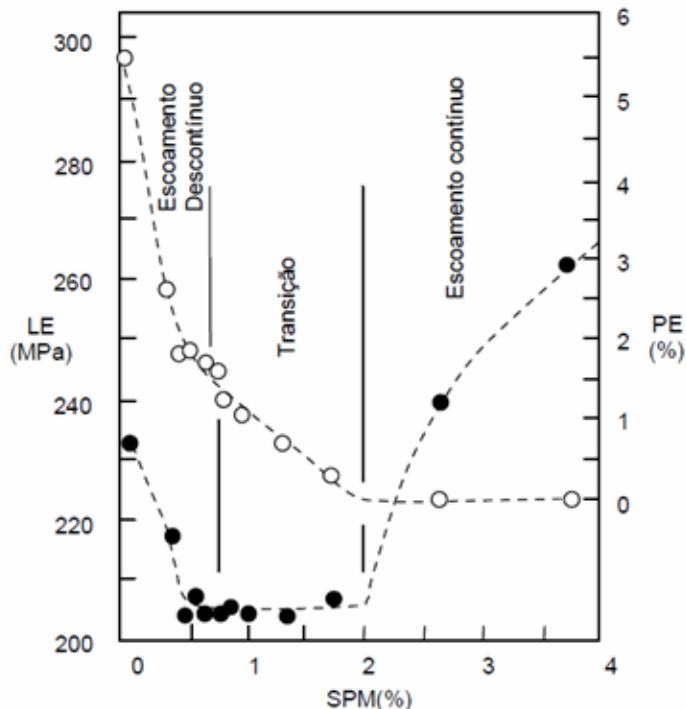


FIGURA 3.8- Limite de escoamento (símbolos fechados) e deformações no patamar de escoamento (símbolos abertos) em função do grau de deformação aplicado no laminador de encruamento de um aço capeado .

FONTE: (Lake, 2007).

Lake caracterizou 3 regiões conforme apresentado na FIG.3.9: Região de escoamento descontínuo – caracterizada pelas reduções tanto de LE quanto do PE, cujo aspecto da curva tensão deformação, é representado pela FIG.3.12, nas curvas A e B.

- Região de transição – caracteriza pela transição do escoamento descontínuo para o contínuo, onde o PE decresce linearmente e se manter constante, curva C da FIG. 3.9.
- Região de escoamento contínuo – caracterizado pelo fim do patamar de escoamento e elevação do LE, curva D FIG.3.9.

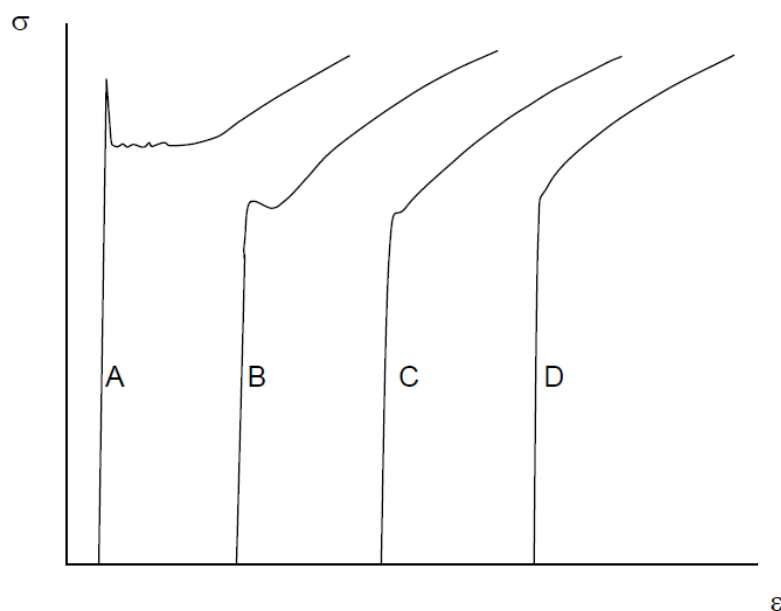


FIGURA 3.9 –Mudanças da deformação no patamar de escoamento e do limite de escoamento com aumento de deformações do SPM .

FONTE: (LAKE,1985).

Nas regiões de escoamento descontínuo e de transição, o limite de escoamento pode ser entendido através da seguinte EQUAÇÃO (3.1), (Lake,1985)

$$e^* = el.V.\frac{2}{S} \quad (3.1)$$

Onde:

e^* : Taxa de deformação

el : Deformação das bandas de Lüders

V : Velocidade das bandas de Lüders

S: Espaçamento das bandas de Lüders

3.4.3 – Espaçamento das bandas de Lüders:

O espaçamento das bandas é determinado por análises metalográficas e é influenciado pelo efeito de fricção causado pelo atrito entre o cilindro e a tira. Quanto maior o S , maior será a quantidade requerida de redução no encruamento para supressão do patamar de escoamento (Fernandes, 2007). O estudo do espaçamento das bandas em função do aumento do valor do passe de redução é ilustrado no GRA.3.4.

Observa-se que o espaçamento das bandas sofre pouca alteração com o aumento do passe de laminação, como ilustrado no GRA.3.4.

As regiões de escoamento descontínuo e de transição apresentam assim, de acordo com a EQUAÇÃO (3.1), uma taxa de deformação constante. Na região do passe de encruamento entre 0,5 % e 2,0 % o espaçamento constante de S implica em um comportamento constante de V e com isso o LE permanece constante, que pode ser ilustrado na GRA 3.4 (Lake,1985).

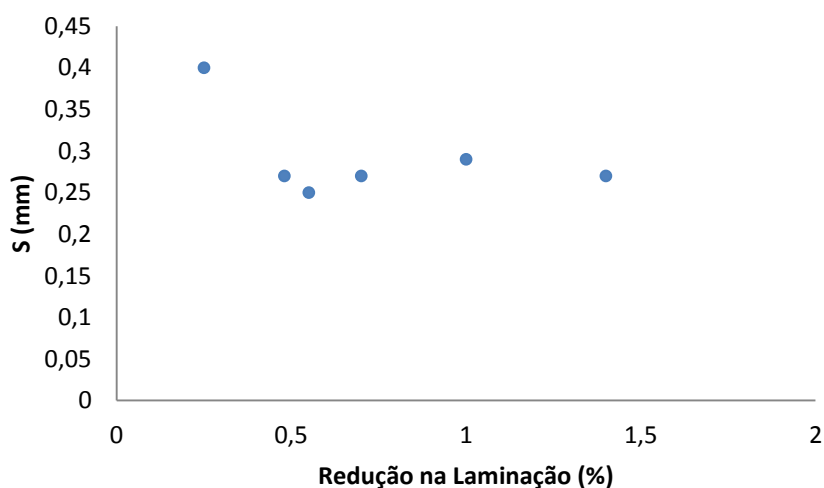


GRÁFICO 3.4– Espaçamento das bandas de Lüders para vários valores de redução no passe de encruamento, a amostra estava totalmente deformada para o valor de 2%.

FONTE – (Lake,1985)

Lake estudou também o espaçamento das bandas em função da espessura da chapa ilustrada na GRA.3.5.

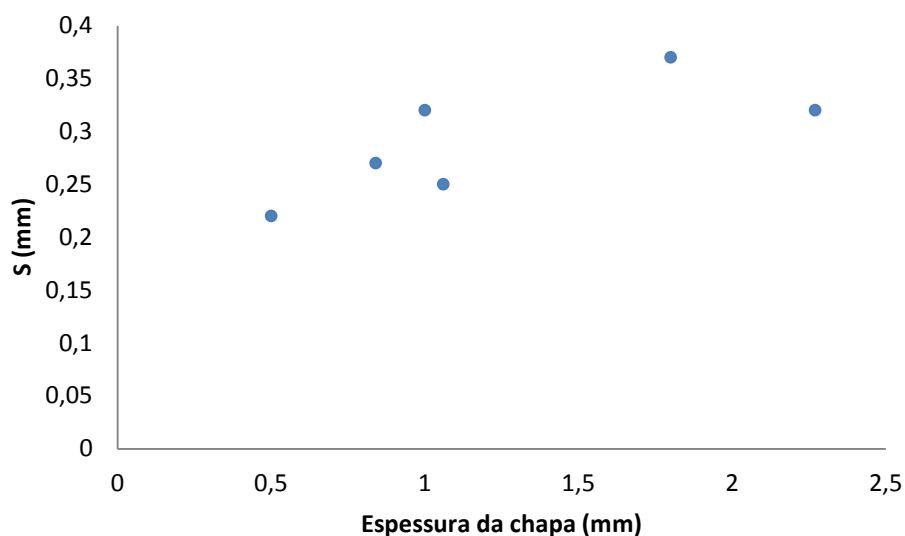


GRÁFICO 3.5– Espaçoamento das bandas de Lüders para cilindros com ótimo acabamento superficial.

FONTE: (Lake,1985)

O efeito da modificação do espaçoamento das bandas com a variação do diâmetro do cilindro é ilustrado na TAB.3.2.

TABELA 3.2

Efeito da variação do diâmetro do cilindro no espaçoamento das bandas

Amostra	Espes. da chapa (mm)	Diâmetro 150 mm	Diâmetro 38 mm
		Cilindros Seco (mm)	Cilindros Seco (mm)
CC	1,06	0,25	0,19
CQ	1,25	0,27	0,24
CR	0,82	0,22	0,19

FONTE: (LAKE, 1985).

3.4.4 – Influência do limite superior de escoamento na formação das bandas de Lüders:

A influência do limite superior de escoamento na formação das bandas foi estudada por Yoshida em dois tipos de materiais: “Material A” com LSE de 600 MPa e “Material B” com 300MPa, ilustrado na FIG.3.9. A laminação do material foi feita a 0,5 %, 1,0 % e 2,0 % para um cilindro com $\phi = 125$ mm com ótimo acabamento superficial.

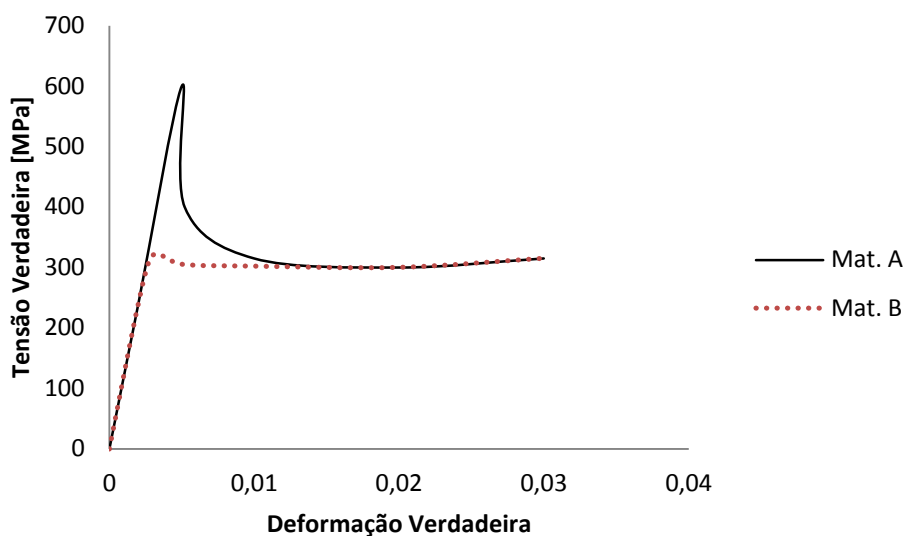


FIGURA 3.10– Materiais analisados por Yoshida.

FONTE: (Yoshida, 2008)

A formação das bandas de Lüders para os dois tipos de materiais é ilustrado nas FIG.3.11 e FIG.3.12.

Na amostra do Material A, padrões de bandas apareceram que dependeram tanto das propriedades do material quanto das condições de contorno estabelecidas. Já a amostra do Material B apresentou uma situação de deformação quase que homogênea (Yoshida, 2008).

A tração após laminação com resultados semelhantes ao mecanismo proposto por Lake (Figura 3.12) obtidos por Yoshida para as amostras são ilustrados nas FIG.3.13 e FIG.3.14.

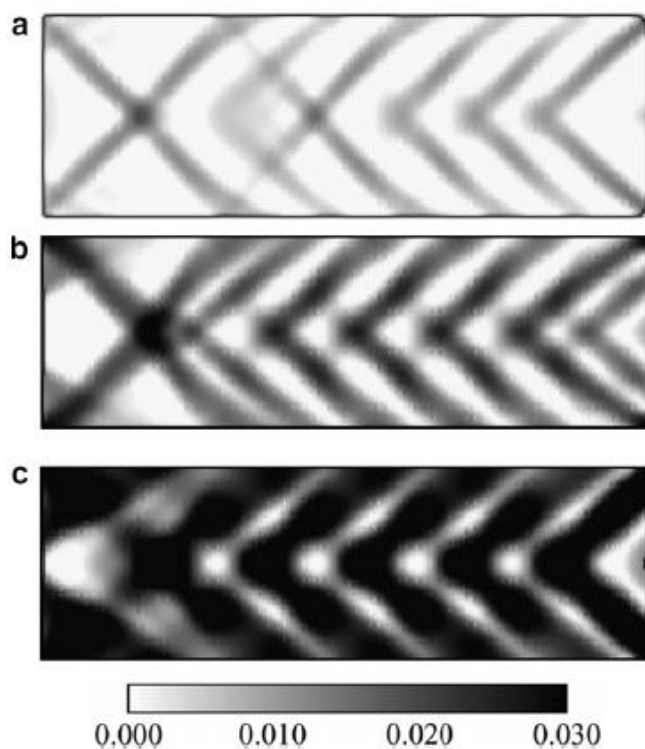


FIGURA 3.11– Padrão de deformação plástica efetiva na chapa de 1,2mm com vários passes de encruamento para Material A (a) 0,5 %; (b) 1,0 % e (c) 2,0 %

FONTE - (Yoshida, 2008)..

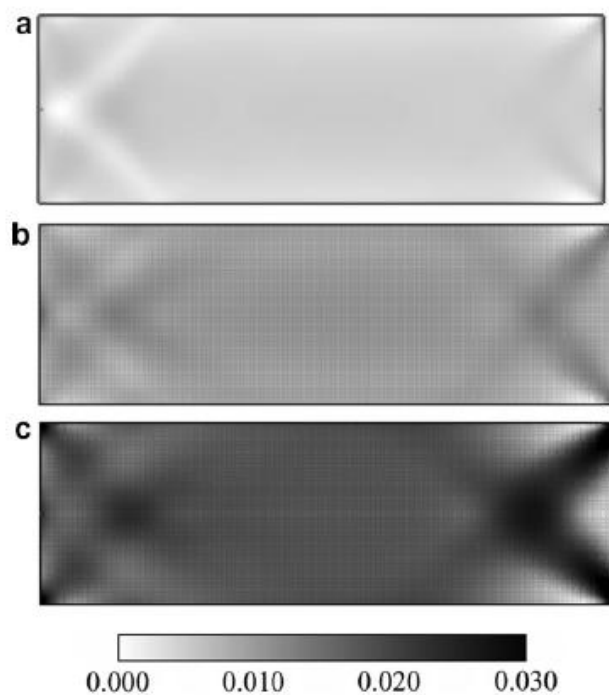


FIGURA 3.12– Padrão de deformação plástica efetiva na chapa de 1,2mm com vários passes de encruamento para Material B (a) 0,5 %; (b) 1,0 % e (c) 2,0 %

FONTE: (Yoshida, 2008).

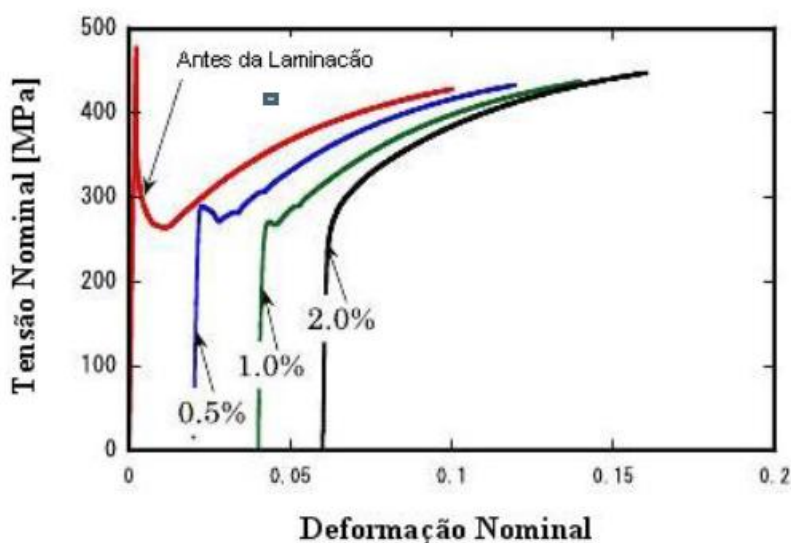


FIGURA 3.13– Curvas de Tensão deformação obtidas após o passe de encruamento para a chapa composta por Material A .

FONTE – (Yoshida, 2008).

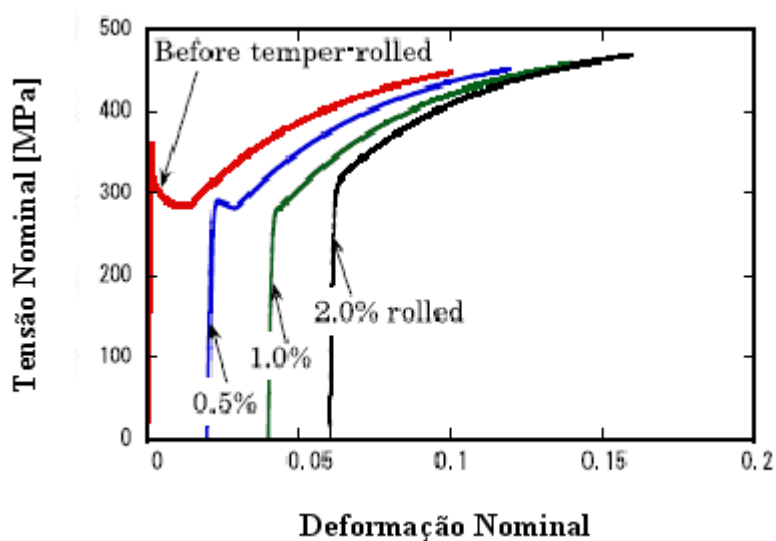


FIGURA 3.14– Curvas de Tensão deformação obtidas após o passe de encruamento para a chapa composta por Material B .

FONTE: (Yoshida, 2008).

As FIG.3.13 e FIG.3.14 ilustram o mesmo comportamento propostos por Lake, ambos os materiais apresentaram a eliminação do patamar de escoamento e apresentaram o comportamento da curva suave com 2,0 % de laminação. Observa-se que a queda de tensão

após 0,5 % de laminação o valor da tensão nominal para ambas as amostras é muito próximo, apresentando pouca diferença no valor de tração para os dois tipos de materiais

3.5 – Método dos elementos finitos:

Os principais objetivos da análise de engenharia são: determinar os princípios básicos que governam o comportamento de um fenômeno e transferir estes princípios para um modelo matemático envolvendo uma equação ou equações que possam prever soluções qualitativas e/ou quantitativas do comportamento deste fenômeno (Oliveira,2009).

O Método de Elementos Finitos (FEM), desenvolvido na década de 1950, é uma ferramenta analítica de equacionamento de fenômenos através do modelamento físico e matemático, utilizando os recursos de informática para processamento de inúmeras matrizes de equações, tenha-se difundido mais amplamente no último quarto do século passado. A amplitude de aplicação desta ferramenta, devido ao poderio dos modelamentos físicos e matemáticos, além do avanço tecnológico das ferramentas computacionais, abrange às mais distintas áreas, como: mecânica dos sólidos e fluídos, transferência de calor, vibrações, potencial elétrico, campos magnéticos, comportamentos de materiais em processos de conformação (Oliveira,2009).

Segundo Bickford (1994) o método de elementos finitos consiste em subdividir um corpo contínuo em um número finito de elementos, denominada discretização geométrica ou espacial, interligados entre si através de nós. Dessa forma os esforços são transferidos a cada elementos da malha.

As subdivisões apresentadas são as seguintes:

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

De acordo com Zienkiewicz (1989), o método consiste em três passos:

1º.) Pré-processamento

Nesta fase, o fenômeno a ser estudado já foi equacionado e a partir da construção de um modelo de simulação deste processo, é realizada a divisão do modelo em malhas. A partir do conhecimento do processo ou fenômeno, são aplicadas aos nós das malhas as condições de contorno ou restrições, como esforços aplicados e graus de liberdade do elemento. A escolha do formato e número de elementos da malha é um fator de extrema atenção e demanda a maior parte do tempo na elaboração do trabalho. Esta fase engloba as etapas “a” e “b” citadas acima (Oliveira, 2009).

2º.) Análise

Nesta etapa é escolhida a ferramenta adequada para processamento dos dados preparados na etapa do pré-processamento. Normalmente são utilizados softwares comerciais de processamento numérico para equações lineares e não-lineares, porém podem ser desenvolvidos algoritmos específicos para solução de sistemas. A parametrização realizada no pré-processamento é implementada no software escolhido para o processamento e fornecimento da solução matemática das equações. Esta fase engloba as etapas “c” e “d” citadas acima (Oliveira, 2009).

3º.) Pós-processamento

Nesta etapa analisa-se, interpreta-se e verificam-se os resultados apresentados pelo aplicativo numérico.

Devido à precisão requerida na solução das equações, validade e coerência dos resultados apresentados é comum nesta fase, verificar a necessidade de um reprocessamento do fenômeno em estudo, alterando, por exemplo, a malha, as condições de contorno e a modificação das equações governantes (Oliveira, 2009).

3.5.1 – Formulação plástica

Nesta formulação admite-se que o material possui comportamento plástico , desprezando na conformação do material o efeito da resposta elástica do mesmo, quando submetido a deformação plástica. A tensão de escoamento é função da deformação e da taxa de deformação do material e da temperatura do processo (Oliveira,2009).

Para a simulação da laminação tem sido utilizados elementos plásticos, que é uma abordagem bastante razoável pois o efeito elástico após o processamento do material é desprezível (Oliveira, 2009).

3.5.2 – Formulação elasto-plástica – abordagem estática implícita

O software DEFORM 2D/3D[®] utiliza o método de solução de abordagem implícita onde é necessário que o processamento do material ocorra sem ação de impacto, dessa forma assume-se a condição de quase equilíbrio durante a conformação. A integração estática implícita atende essa condição, desde que esta condição seja mantida a cada passo de integração (Oliveira, 2009).

Esta formulação foi utilizada no ensaio de tração para conseguir levantar as curvas de fluxo do material após a laminação.

4 – METODOLOGIA

O comportamento do material em cada ponto da chapa foi descrito de forma semelhante à adotada por Yoshida (2008), porém considerando as condições mostradas no GRA.4.1, para os materiais 1 e 2.

A ambos os materiais apresentam um limite inferior de escoamento de 216MPa, a uma deformação verdadeira de 0,005 mm/mm. O Material 1 apresenta um limite de escoamento superior de 300MPa e o Material 2 um limite de escoamento superior de 230MPa; essa diferença reflete um maior grau de envelhecimento para o Material 1 em relação ao Material 2.

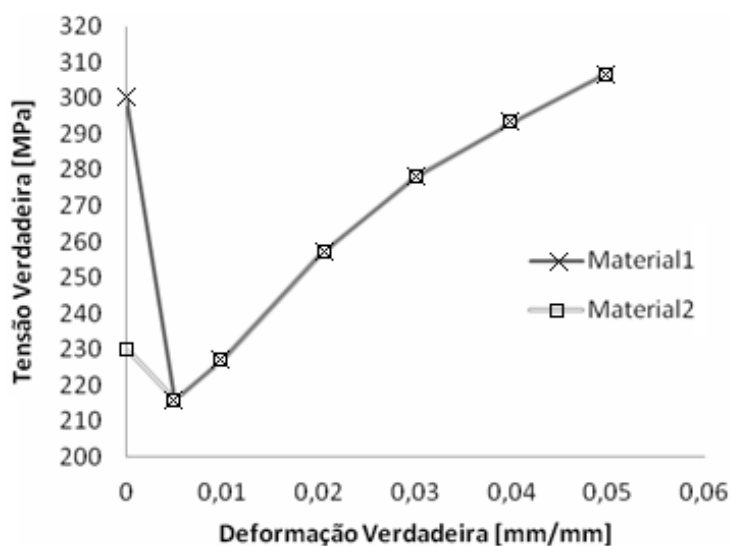


GRÁFICO 4.1–Curva de fluxo dos materiais utilizados nas simulações.

FONTE: (Cunha,2007)

Na simulação da laminação por elementos finitos foi empregado o software DEFORM 10.0 em 2D[®], considerando as curvas de fluxo dos Materiais 1 e 2. O cilindro foi tomado como rígido, e a TABELA 3.1 resume as condições de entrada no software DEFORM 2D.

As chapas tinham um comprimento inicial de 40 mm e espessura inicial de 0,5 ,1, e 2,0 mm. Os cilindros de laminação tinham diâmetro de no $\phi=150\text{mm}$ agrupamento 1, e no $\phi= 100\text{ mm}$ agrupamento 2 . As reduções na espessura foram de 0,5%, 1% e 2%.

Inicialmente, os cilindros tinham uma luz maior que a espessura inicial da chapa; a ponta desta chapa foi posicionada entre os cilindros, que foram aproximados até que se alcançasse a redução da espessura apropriada. Os cilindros foram então girados com a velocidade angular mostrada na TAB 4.1. Dada a simetria do processo, a simulação foi realizada utilizando um cilindro de laminação e metade da espessura da chapa; impôs-se à linha de simetria da chapa movimentos somente na direção de laminação, como indica a FIG.4.1.

TABELA 4.1.

Resumo das condições da simulação utilizadas na laminação de encruamento.

Coeficiente de atrito	0,12
Número de etapas na simulação	220 steps ($\phi=150\text{mm}$) 340 steps ($\phi=100\text{mm}$)
Tempo de cada etapa	0,0004s
Velocidade angular dos cilindros	6,24 rad/s
Temperatura	20°C
Malha inicial do material	10.000 elementos

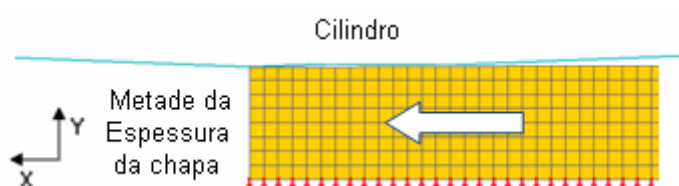


FIGURA 4.1–. Condições de contorno para chapa na simulação da laminação.

Para os ensaios de tração do material antes da laminação e depois dos diferentes passes de encruamento, os resultados obtidos na simulação da laminação em 2D foram transferidos para o software DEFORM 3D V.10.0[®], onde inicialmente é necessário estabelecer o número de elementos utilizados e a largura da chapa. A TAB 4.2 resume as condições de entrada no software DEFORM 3D.

Os nós da extremidade do corpo de prova de tração foram tomados como imóveis, enquanto uma garra rígida foi aderida à outra extremidade do corpo de prova. O movimento desta garra impunha a realização do ensaio de tração. A FIG.4.2 ilustra as condições de contorno para a chapa na simulação do ensaio de tração.

TABELA 4.2.

Resumo das condições da simulação utilizadas nos ensaios de tração após laminação.

Largura do corpo de prova	5 mm
Número de etapas na simulação	200
Tempo da etapa	0,005s
Temperatura	20°C
Malha inicial	32000 elementos elasto-plásticos
Velocidade da garra de tração (direção X)	0,5 mm/s

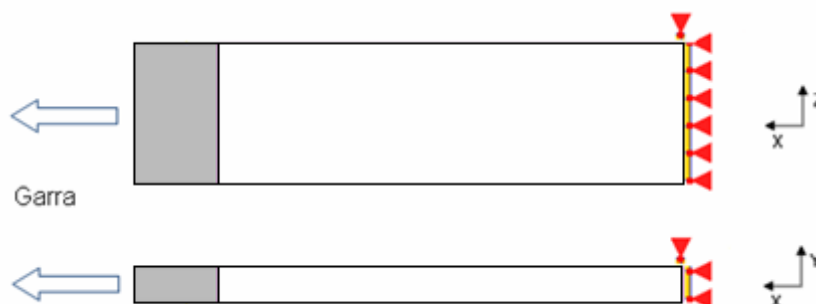


FIGURA 4.2- Condições de contorno para chapa na simulação do ensaio de tração.

A medição do espaçamento das bandas de Lüders é feito utilizando o próprio software DEFORM 2D® com uma ferramenta especial de medição. Três medidas foram feitas do centro da deformação das bandas até o centro da outra deformação e a média foi calculada para cada redução.

Deve-se tomar cuidado para sempre conseguir posicionar as setas de centro a centro para evitar medições erradas: o esquema da medição é ilustrado na FIG. 4.3 onde as setas indicam a medição do posicionamento de centro a centro da banda.

A análise de deformação feita por meio de gráficos é ilustrada na FIG.4.4, onde uma linha perpendicular à direção da chapa com 20 pontos de captação é traçada e os resultados são colhidos e um gráfico de deformação é composto em relação à meia

espessura da chapa, possibilitando assim uma análise mais refinada da distribuição de deformação que apenas a de imagem.

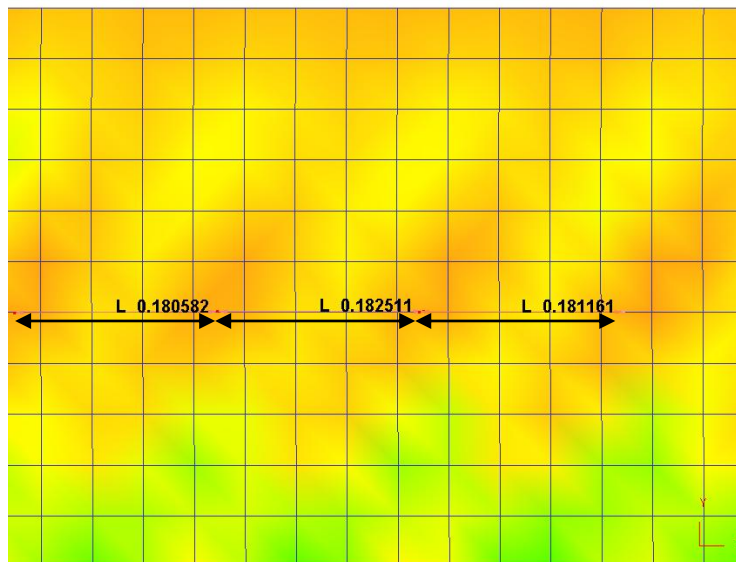


FIGURA 4.3– Esquema da medição do espaçamento das bandas feitas de centro a centro (Material 1 , passe de encruamento de 1% e diâmetro do cilindro de 150 mm)

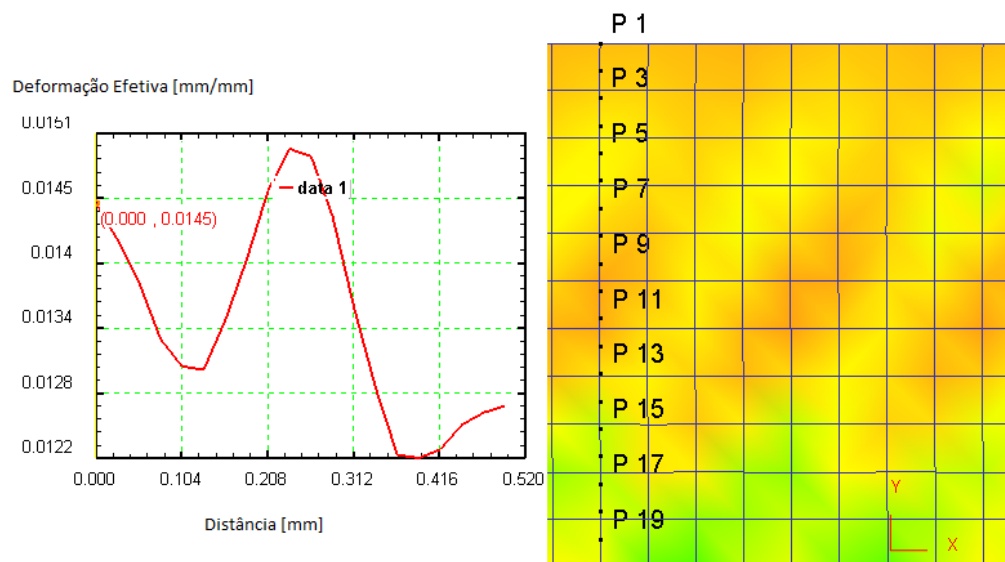


FIGURA 4.4– Análise gráfica da deformação efetiva da chapa utilizando pontos de captura de deformação. (Material 1 , passe de encruamento de 1% e diâmetro do cilindro de 150 mm)

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Análise da formação das bandas de Lüders

Neste tópico serão apresentados os resultados da simulação numérica do passe de encruamento variando para os casos de diâmetro do laminador de 100 mm e 150 mm

5.1.1 – Resultados do passe de laminação para diâmetro de 150 mm

Os resultados da laminação para os Materiais 1 e 2 nas reduções de laminação de 0,5% , 1,0% e 2% considerando as chapas de 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm são apresentados nas FIG 5.1 a 5.9.

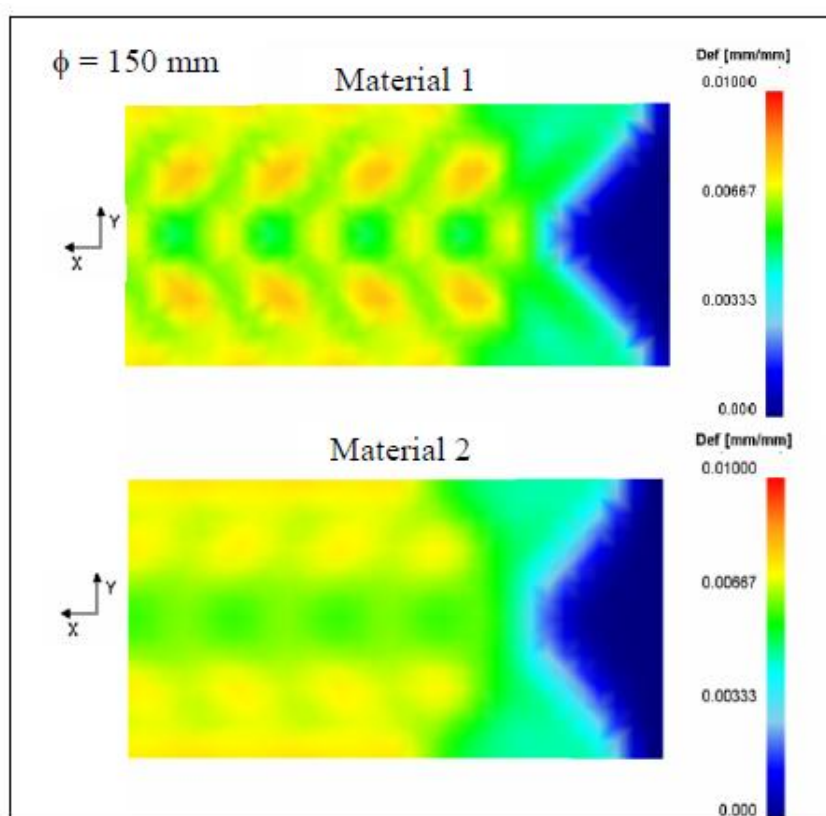


FIGURA 5.1- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 0,5 mm

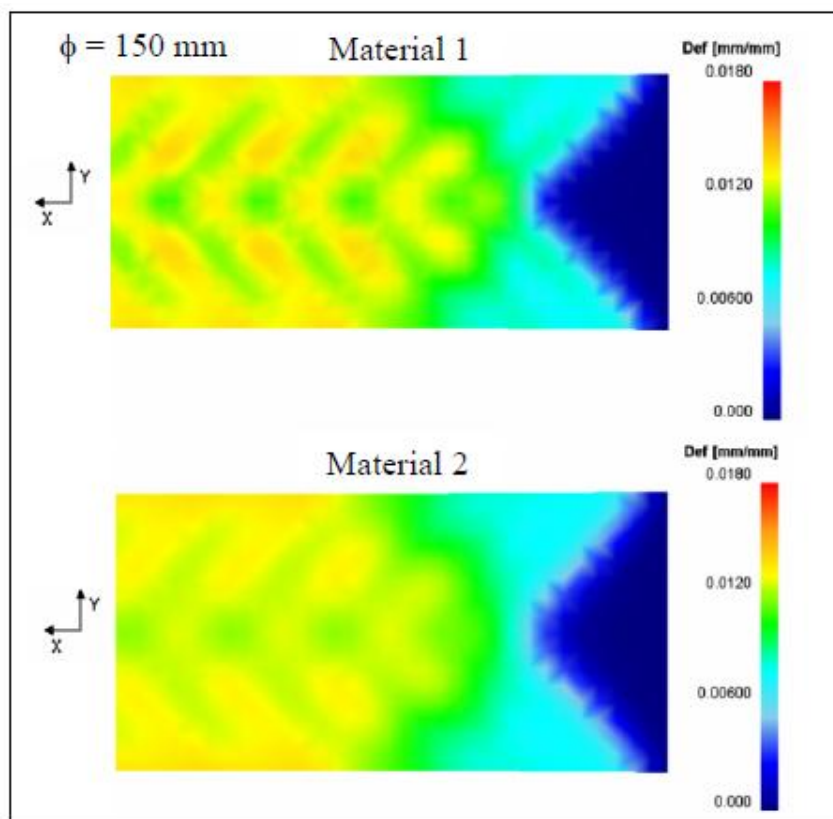


FIGURA 5.2- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 0,5 mm

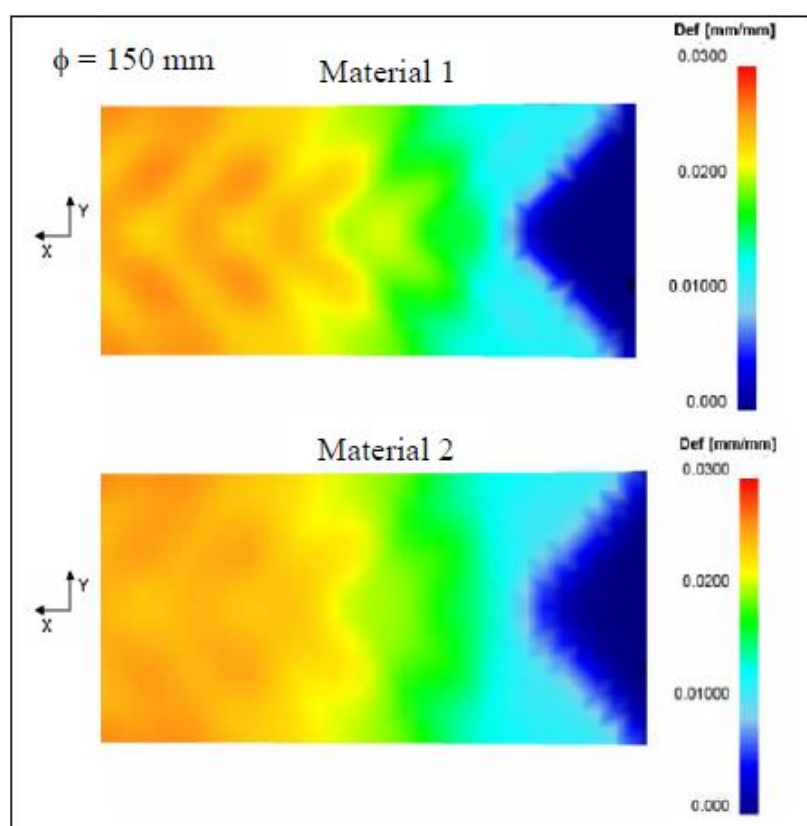


FIGURA 5.3-Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 0,5 mm

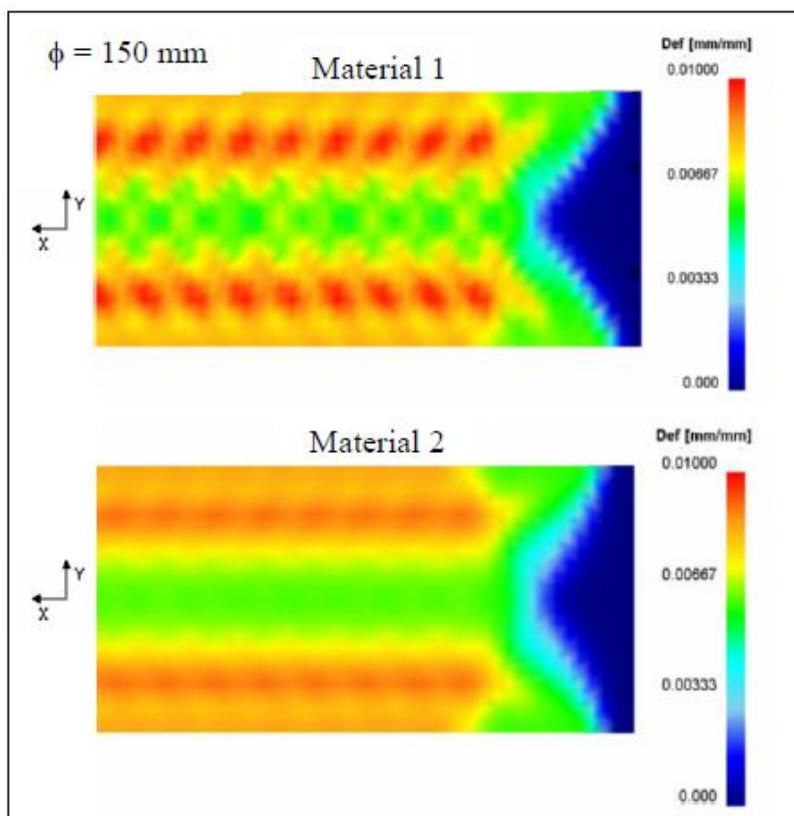


FIGURA 5.4- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 1,0 mm

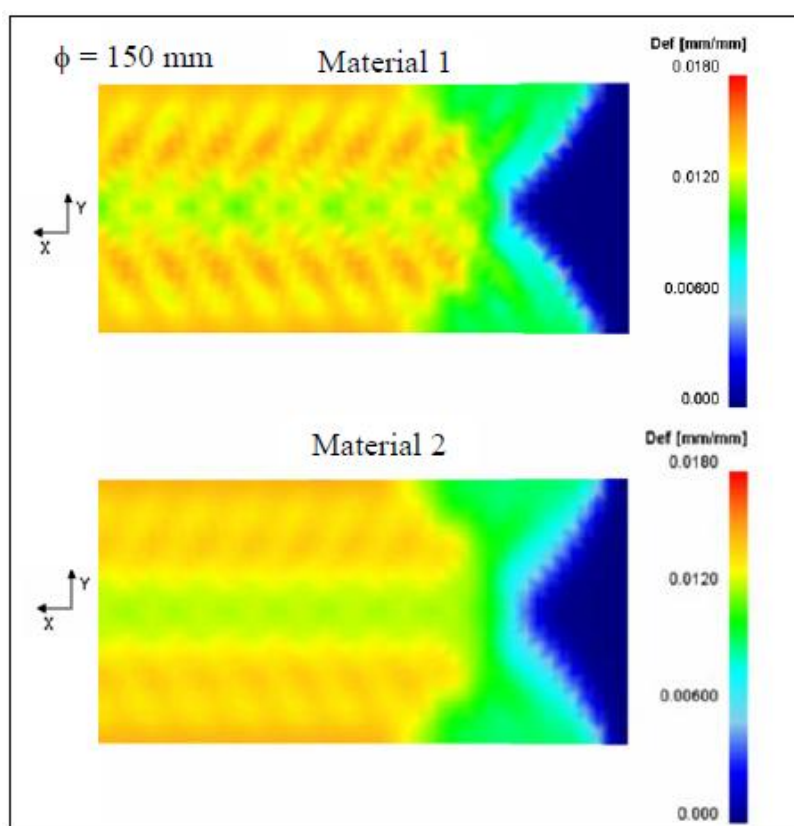


FIGURA 5.5- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 1,0 mm

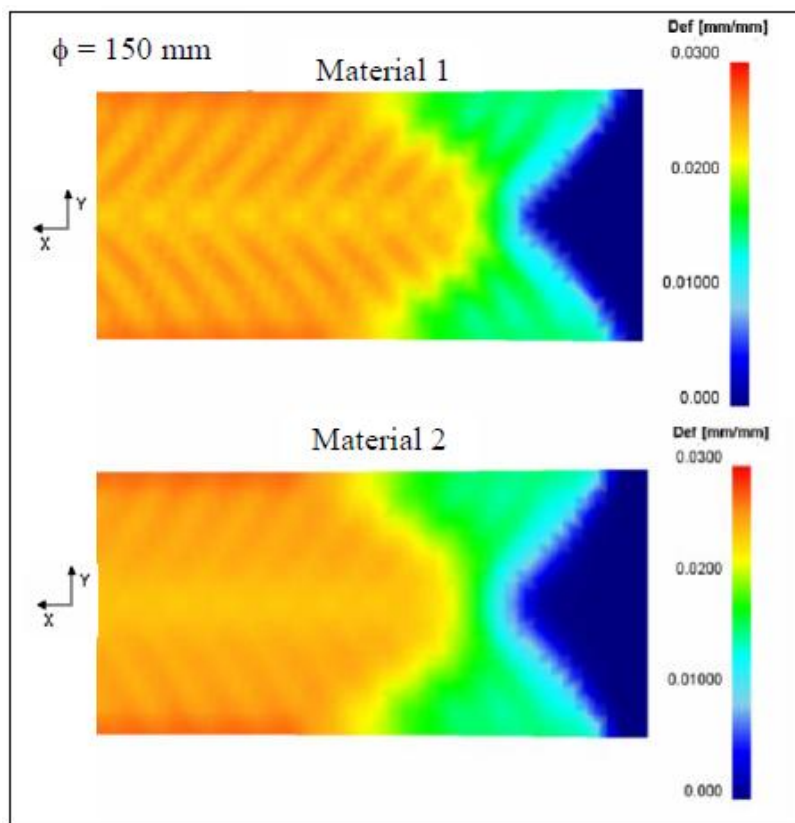


FIGURA 5.6- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 1,0 mm

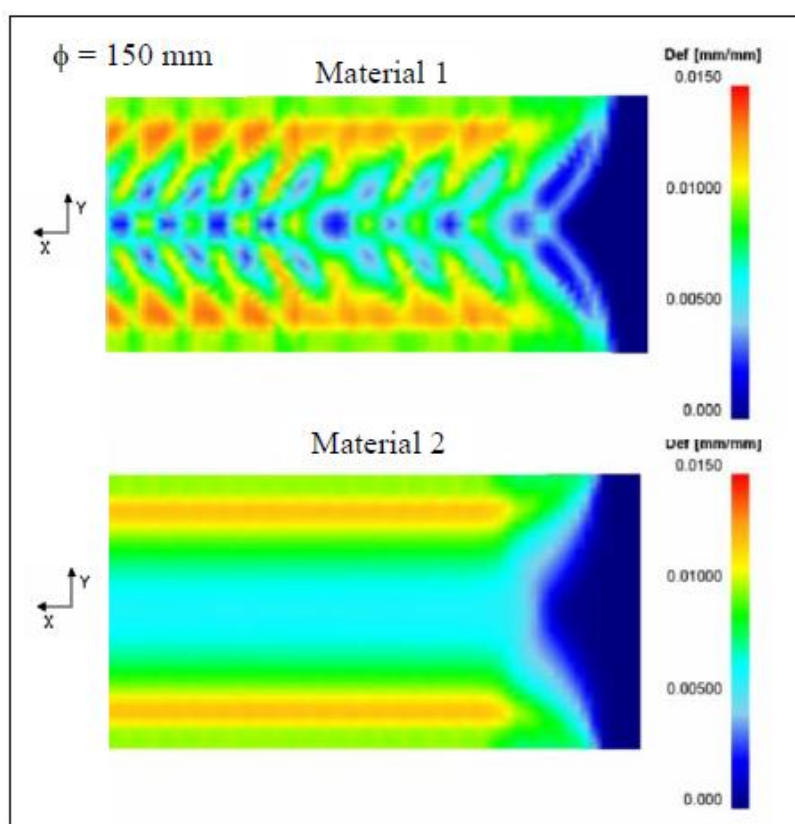


FIGURA 5.7- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 2,0 mm

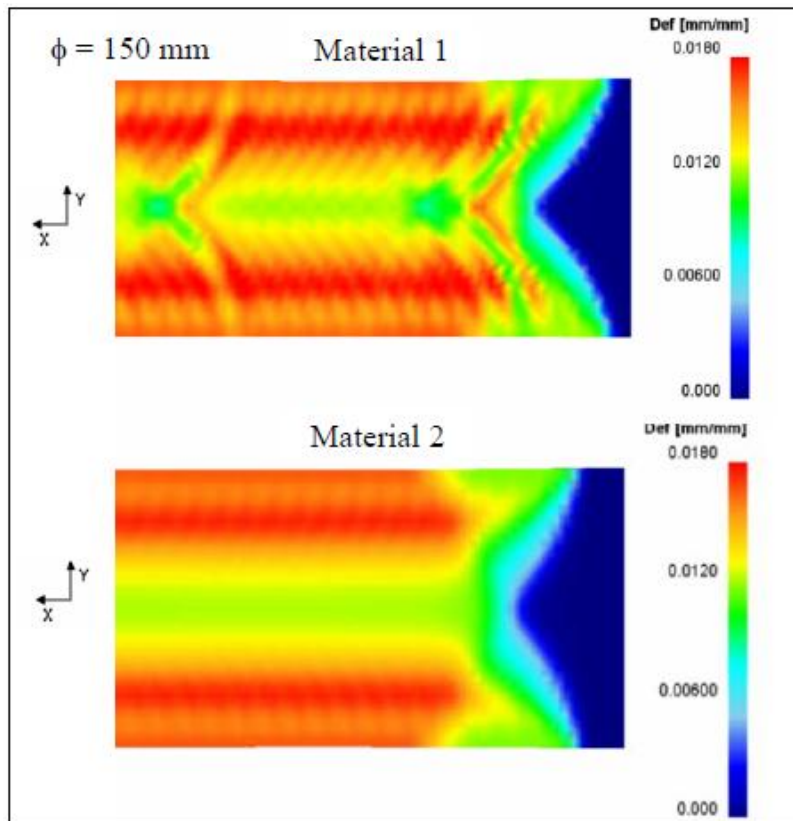


FIGURA 5.8- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 2,0 mm

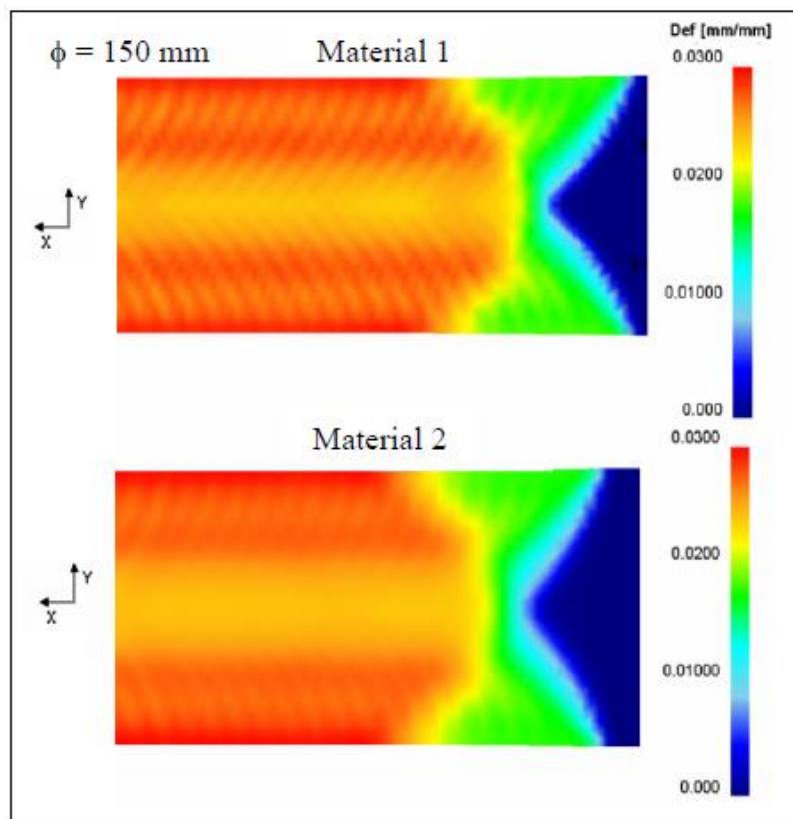


FIGURA 5.9- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 2,0 mm

As regiões de maior deformação efetiva indicam a presença das bandas de Lüders que se iniciam na região da superfície em contato com o cilindro de laminação e dirigem-se para o centro da chapa, confirmando a situação descrita na FIG. 3.6.

Observa-se nas FIG 5.1 a 5.9 que material 1, cujo limite de escoamento superior é maior, apresentou bandas mais nítidas e bem formadas. Já o material 2 que tem limite de escoamento superior menor apresenta uma distribuição de deformação mais homogênea ao longo da espessura da chapa, apresentando-se em forma de borrões ilustradas como discutido por Yoshida (2008) nas FIG. 3.11 e FIG.3.12.

Observa-se que na superfície da chapa em todos os casos, não há descontinuidade de deformação. Há sempre uma região imediatamente abaixo da superfície com deformação constante, onde as bandas se unem diferentemente do mecanismo proposto por Yoshida (2008) ilustrado na FIG. 3.11

O aumento da espessura da chapa laminada induz uma maior descontinuidade da deformação, deixando as bandas mais irregulares como ilustrado na FIG. 5.7 e FIG. 5.8 para o material 1.

À medida que aumenta a redução por laminação observa-se que as bandas atingem cada vez mais a região central da chapa . Além disso, o maior nível de envelhecimento do material 1 claramente conduz a uma maior heterogeneidade de deformação do que aquela observada no caso do material 2, como mostra a FIG. 5.8 e FIG. 5.9.

5.1.2 – Resultados do passe de laminação para diâmetro de 100mm

Os resultados da laminação para os Materiais 1 e 2 nas reduções de laminação de 0,5 % , 1,0 % e 2 % considerando as chapas de 0,5 mm, 1,00 mm e 2,00 mm são apresentados nas FIG 5.10 a 5.18.

Observa-se nas FIG. 5.10 a 5.18 que para a laminação com diâmetro do cilindro de 100 mm, novamente o material 1, apresentou bandas mais nítidas e bem formadas. O material 2 apresenta uma distribuição de deformação mais homogênea ao longo da espessura da chapa, apresentando-se em forma de borrões.

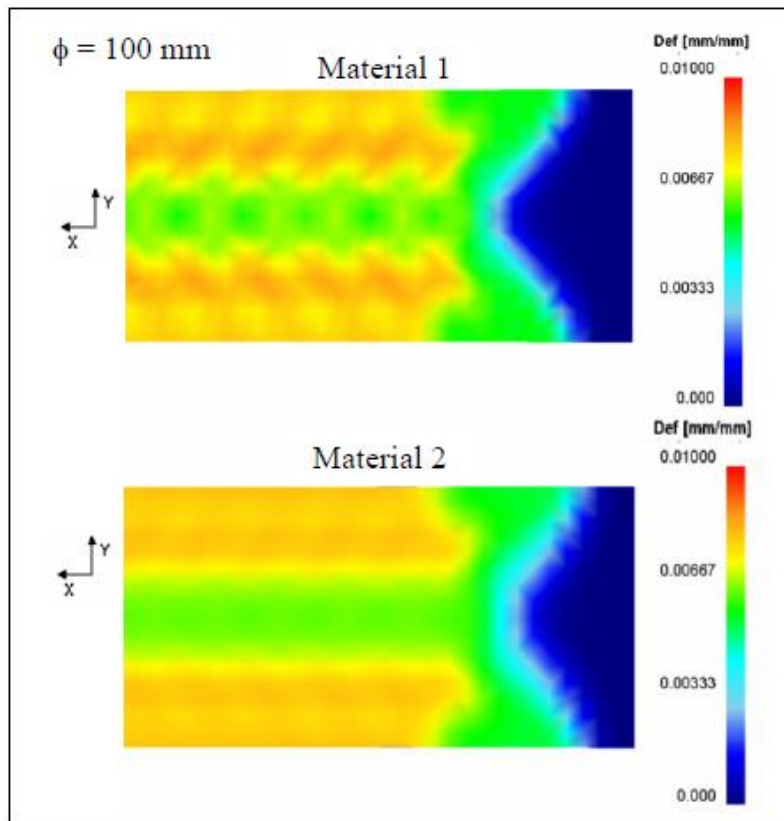


FIGURA 5.10- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 0,5 mm

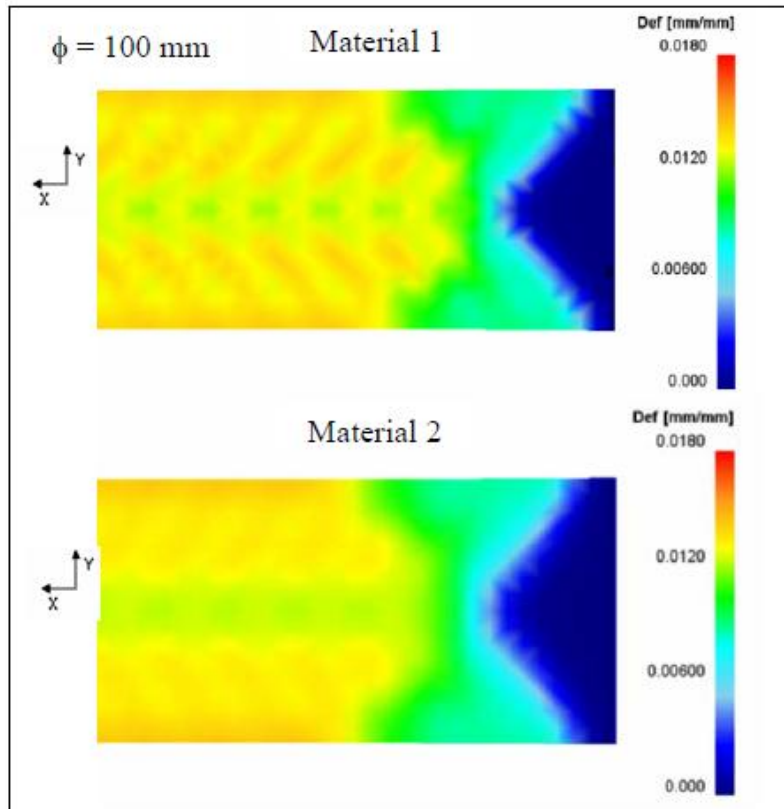


FIGURA 5.11- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0% para chapa de 0,5 mm

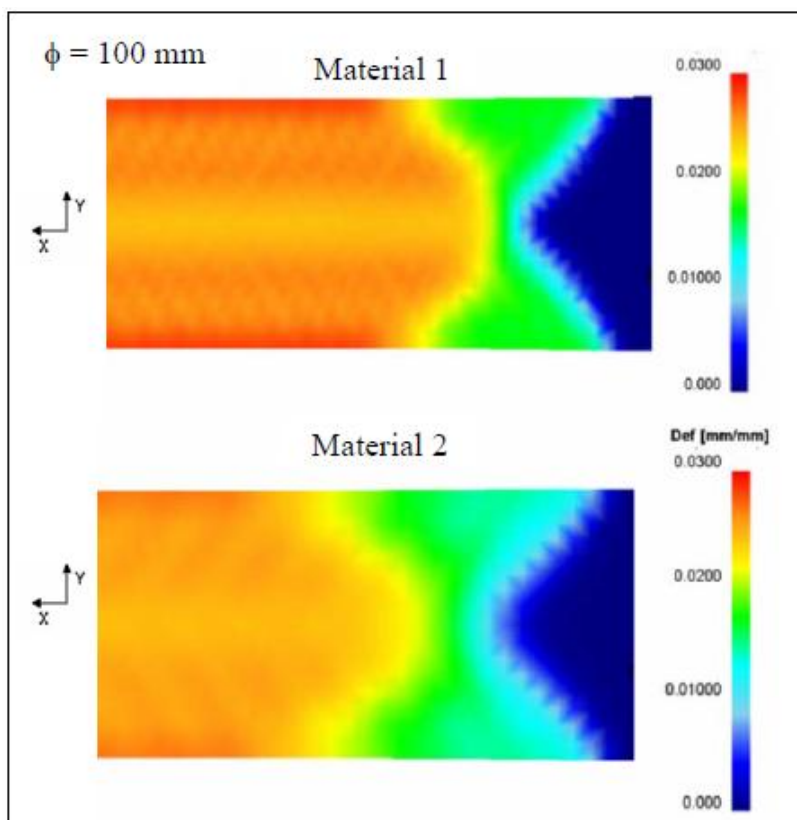


FIGURA 5.12- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0% para chapa de 0,5 mm

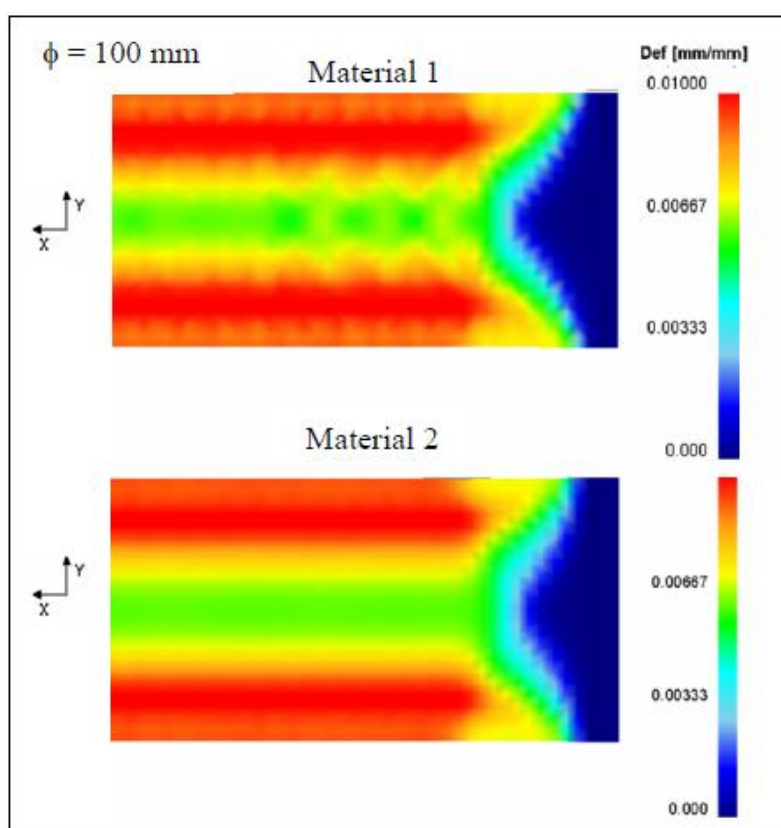


FIGURA 5.13- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 1,0 mm

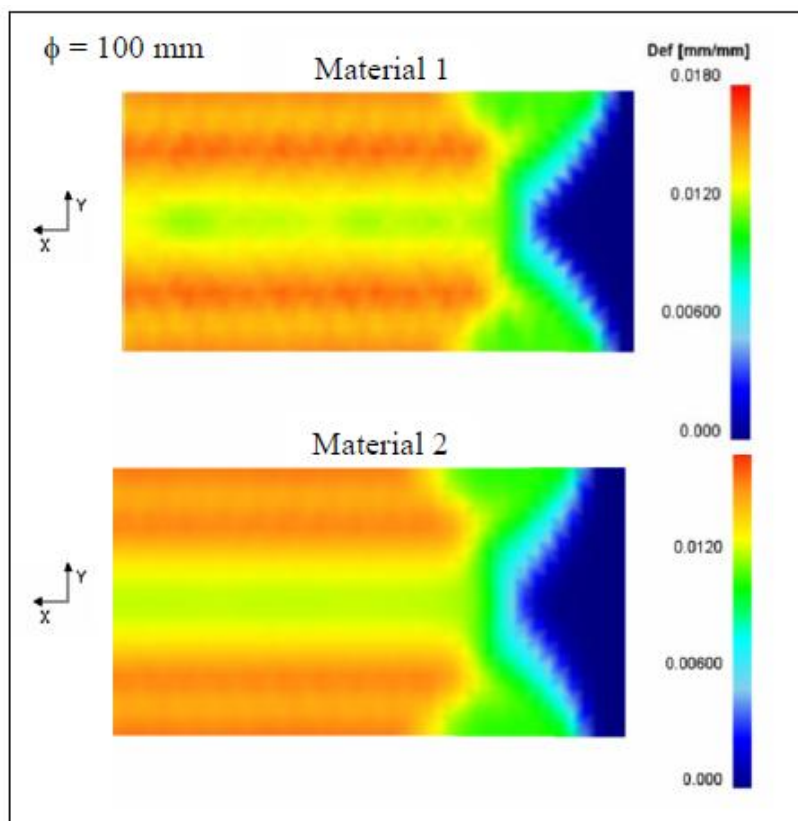


FIGURA 5.14- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 1,0 mm

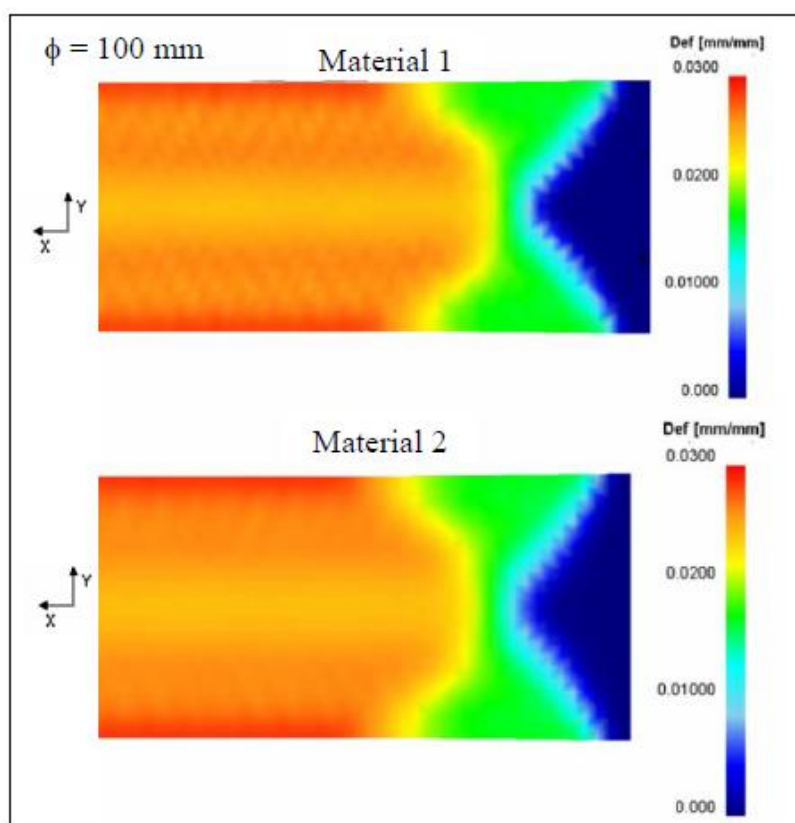


FIGURA 5.15- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 1,0 mm

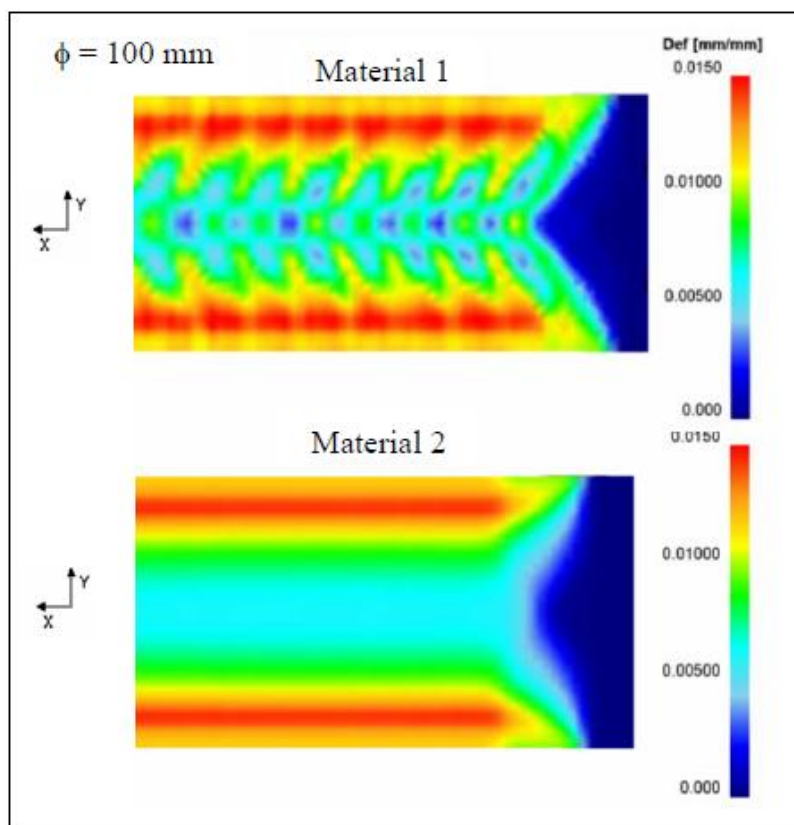


FIGURA 5.16- Distribuição de def. efetiva para redução de 0,5 % para chapa de 2,0 mm

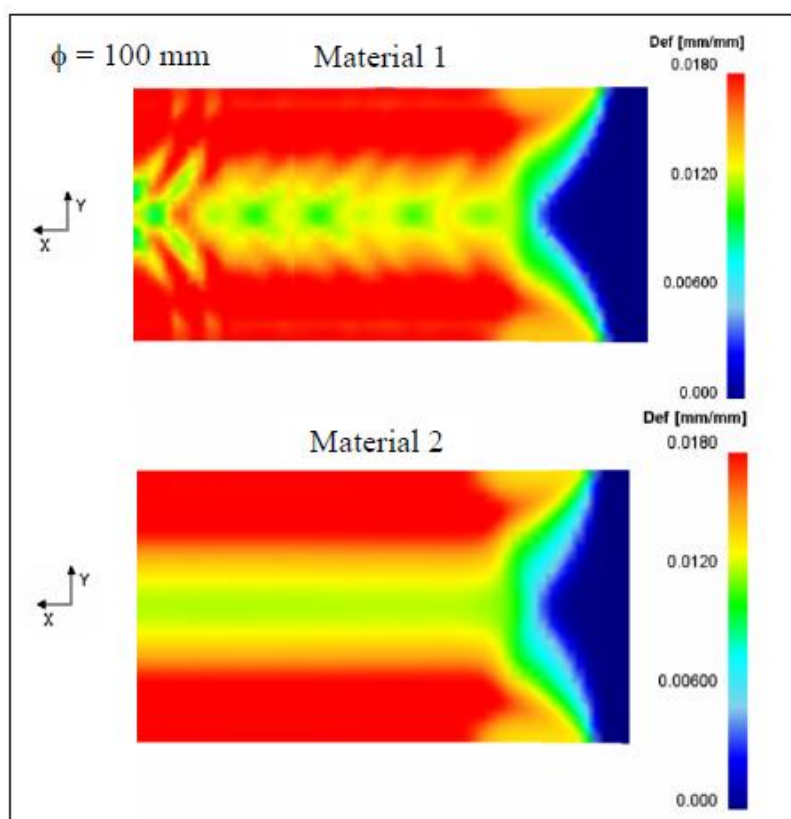


FIGURA 5.17- Distribuição de def. efetiva para redução de 1,0 % para chapa de 2,0 mm

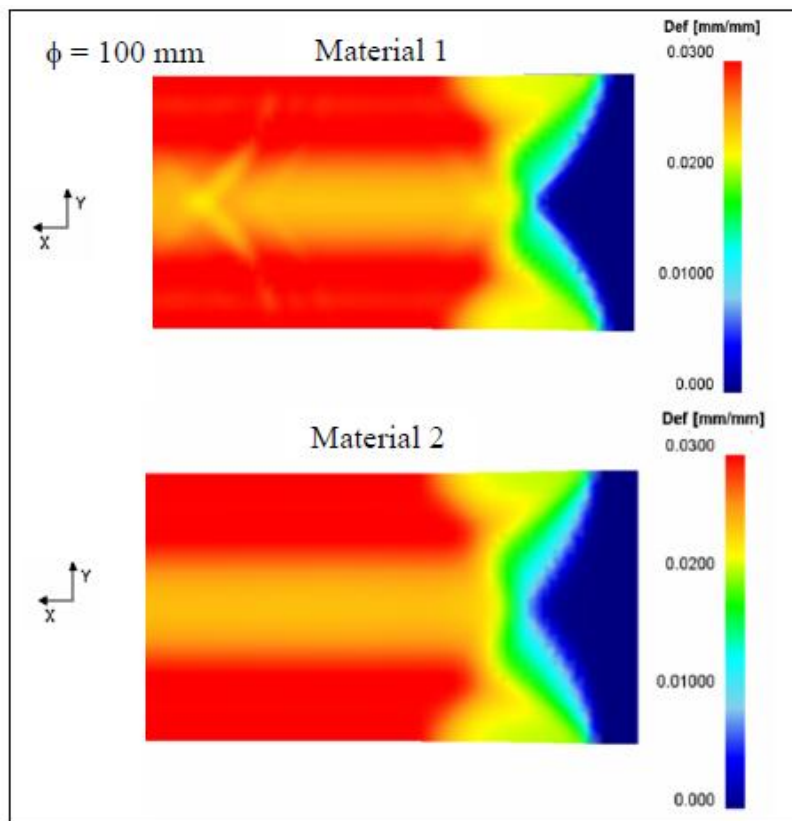


FIGURA 5.18- Distribuição de def. efetiva para redução de 2,0 % para chapa de 2,0 mm

O aumento da espessura da chapa laminada influencia na região de mordida do cilindro, para chapas mais finas a região em azul (sem deformação) apresenta um ângulo mais próximo de 45° ilustrados nas chapas de 0,5 mm das FIG. 5.10 a FIG. 5.12, que vai se tornando mais parabólico na chapa de 2,0 mm ilustrado nas FIG. 5.16 a 5.18.

Observa-se que para o diâmetro de 100 mm a identificação das bandas fica mais difícil e seus espaçamentos de serem medidos, pois a uniformidade de deformação fica maior, apresentando um espaçamento mais visível apenas nas FIG. 5.11, 5.12 e 5.16 do material 1.

A região de deformação das bandas dificilmente chega ao plano médio da chapa, tornando a deformação neste local muito baixa, contrariando a idéia de que as bandas se formam na superfície e necessariamente tocam-se no plano médio (FIG.3.6).

O nível de deformação das bandas aumenta com o aumento da redução no passe de encruamento, pode-se observar que para a redução de 0,5 % um nível de deformação efetiva de aproximadamente $0,010 \text{ mm.mm}^{-1}$, para redução de 1,0 % a deformação de $0,018 \text{ mm.mm}^{-1}$ e para 2 % uma deformação média $0,030 \text{ mm.mm}^{-1}$, exceto para chapa de 2,0 mm e 0,5% de redução que apresentou uma deformação maior de $0,015 \text{ mm.mm}^{-1}$.

O diâmetro menor do cilindro contribuiu para uma maior homogeneidade de deformação, o que sugere a sua utilização na indústria para conseguir uma chapa com um padrão de deformação mais uniforme.

5.2 – Distribuição da deformação efetiva ao longo do plano médio

As figuras dos itens 5.1.1 e 5.1.2 apresentam os resultados de deformação em escala em cores, portanto fica difícil de identificar precisamente qual variação que o diâmetro do cilindro influenciou no passe de encruamento.

Para se obter um resultado em maior clareza foram medidas as deformações em 20 pontos ao longo da espessura da chapa para identificação das diferenças relacionadas ao diâmetro do cilindro para laminação.

Os resultados são ilustrados em forma de gráficos agrupados para cada chapa para cada redução, ilustrados nas GRA.5.1 a 5.9.

A deformação para chapa de 0,5 mm e 0,5 % para os materiais 1 e 2 apresentou um resultado parecido para o mesmo diâmetro de cilindro, a diminuição do diâmetro do cilindro aumentou a deformação efetiva na chapa (GRA. 5.1).

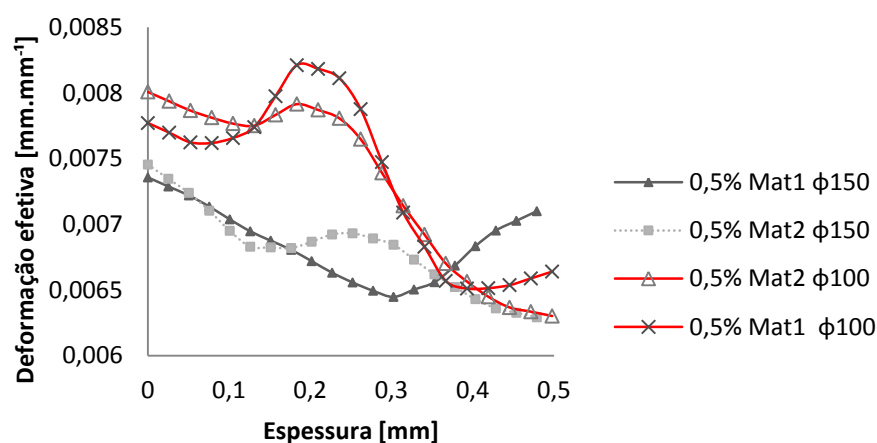


GRÁFICO 5.1- Deformação efetiva para chapa de 0,5mm e 0,5% de redução

A chapa de 0,5mm para 1,0% e 2,0% de redução, apresentou resultados parecidos (GRA.5.2 e GRA.5.3), a diminuição do diâmetro houve um aumento da heterogeneidade.

Cabe ressaltar que para o material 2 e diâmetro de 150 mm houve um comportamento de decaimento contínuo da superfície ao plano médio, não apresentando crescimento de deformação logo após a superfície (GRA. 5.3).

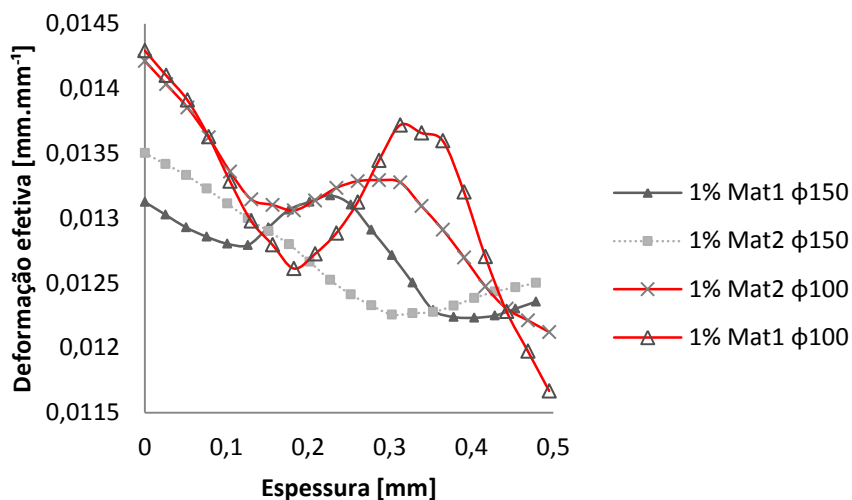


GRÁFICO 5.2– Deformação efetiva para chapa de 0,5mm e 1% de redução

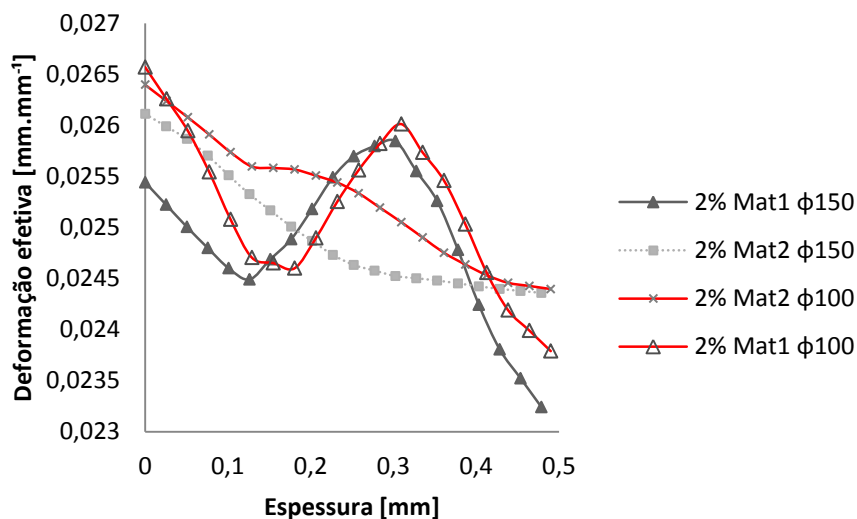


GRÁFICO 5.3- Deformação efetiva para chapa de 0,5mm e 2% de redução

Para chapa de 1 mm, houve uma diferença de comportamento para os testes com diâmetro de 150, o material 1 apresentou um nível de deformação maior do que o material 2. Observa-se que para diâmetro de 100 mm o perfil de deformação ficou semelhante ao perfil do material 2 diâmetro de 150mm (GRA.5.4 a GRA.5.6).

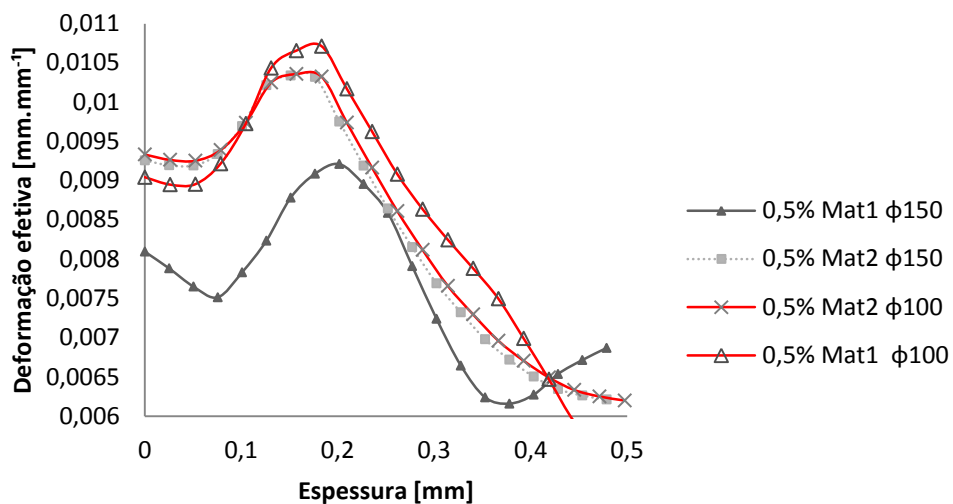


GRÁFICO 5.4- Deformação efetiva para chapa de 1,0mm e 0,5% de redução

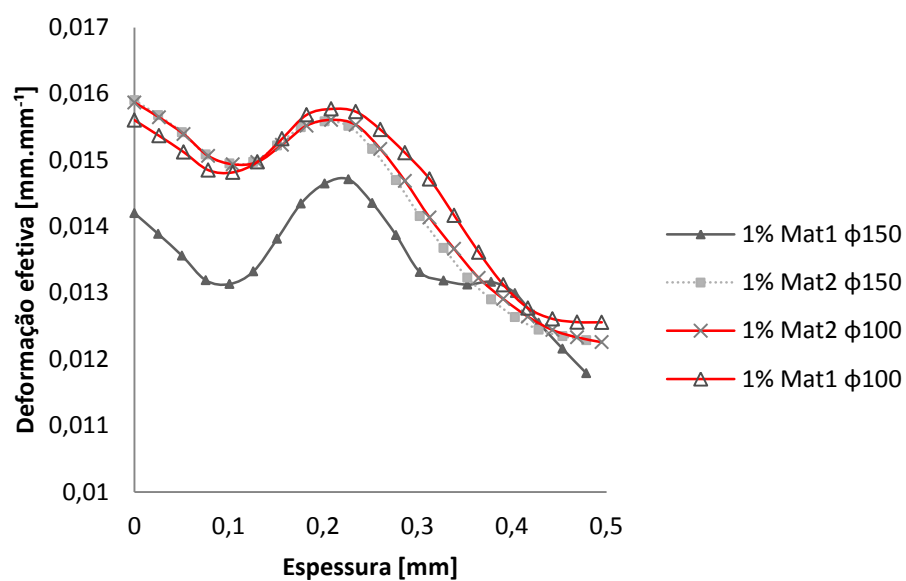


GRÁFICO 5.5- Deformação efetiva para chapa de 1,0mm e 1% de redução

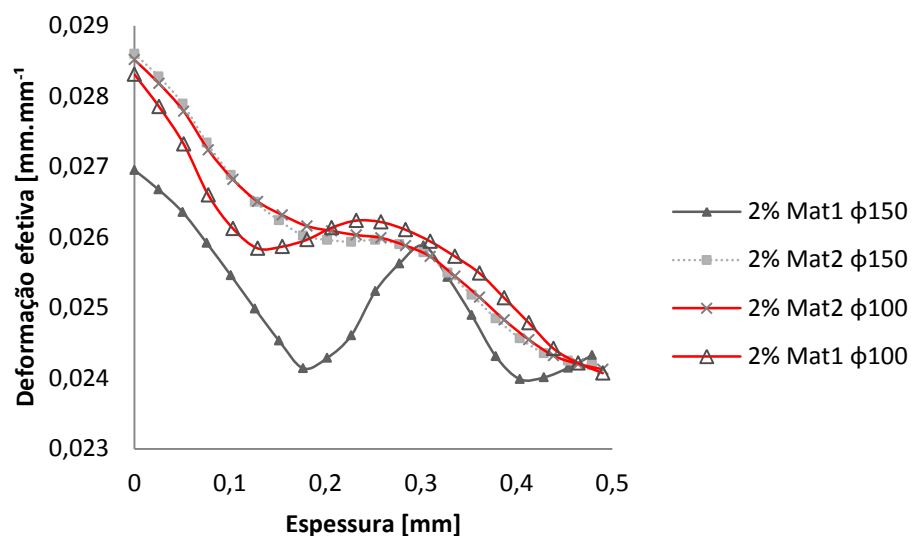


GRÁFICO 5.6- Deformação efetiva para chapa de 1,0mm e 2% de redução

A chapa de 2 mm para 0,5 % de redução apresentou comportamento semelhante para todas as simulações (GRA.5.7).

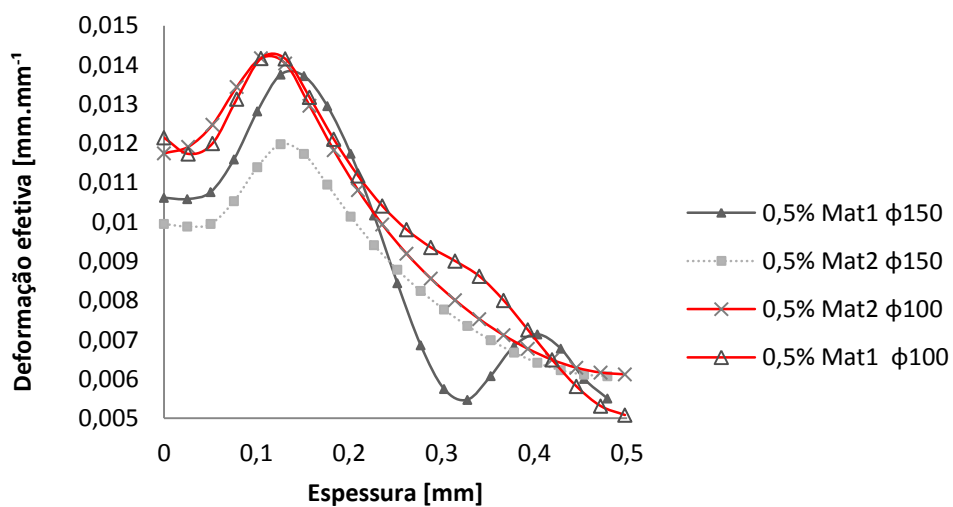


GRÁFICO 5.7- Deformação efetiva para chapa de 2,0mm e 0,5% de redução

O aumento da redução deixou o comportamento das curvas mais homogêneo e a redução do diâmetro aumentou a deformação para ambos os materiais (GRA.5.8 e GRA.5.9).

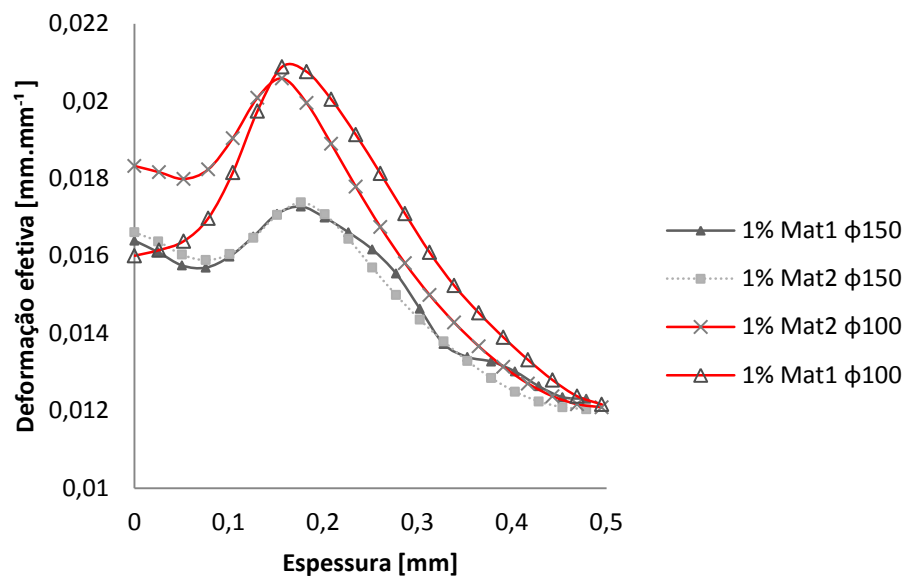


GRÁFICO 5.8- Deformação efetiva para chapa de 2,0mm e 1,0% de redução

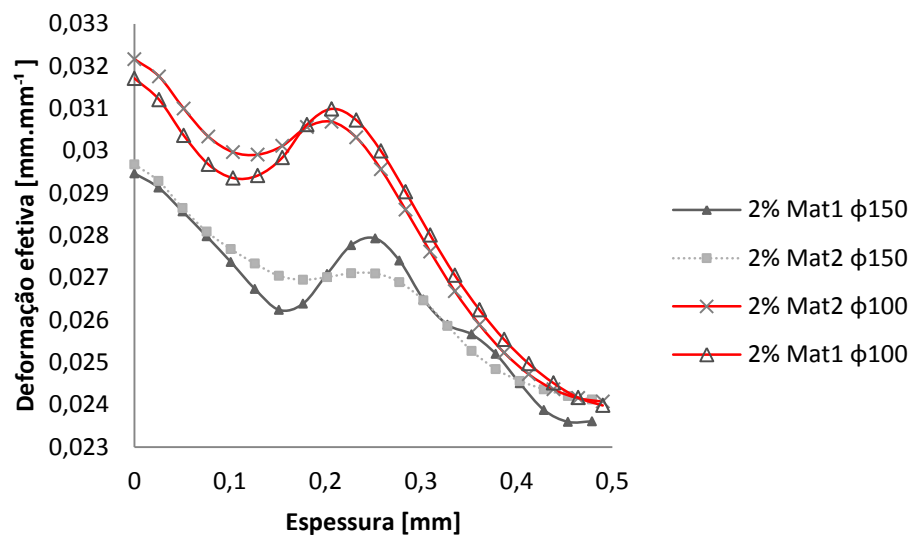


GRÁFICO 5.9- Deformação efetiva para chapa de 2,0mm e 2,0% de redução

A deformação efetiva na superfície e no plano médio foi coletada para se conseguir a tendência de crescimento da deformação efetiva com o aumento da redução no passe de laminação, o resultado para chapa de 1,0 mm para o diâmetro de 150 mm é apresentado na GRA 5.10.

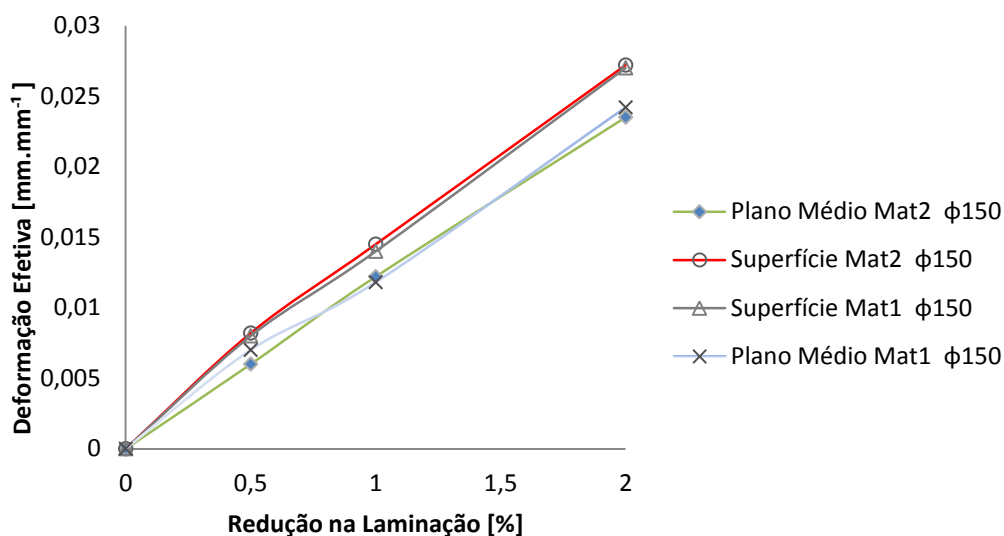


GRÁFICO 5.10- Comportamento da deformação com aumento da laminação para chapa de 1,0 mm e diâmetro de 150 com os materiais 1 e 2.

5.3 – Espaçamento das bandas de Lüders

Os GRA. 5.11 a GRA. 5.13 demonstram o espaçamento das bandas para as chapas de 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm para o valor de laminação de 0,5 %, 1,0 % e 2,0 %.

Os espaçamentos das bandas para chapa de 0,5 mm apresentaram comportamentos muito próximos. Para o material 2 e diâmetro de 100 mm conseguiu-se apenas medir o espaçamento para 2 % de redução (GRA. 5.11).

O GRA. 5.12 apresenta os valores para o espaçamento das bandas para chapa de 1 mm de espessura. Observaram-se dificuldades na medição das bandas principalmente para o material 2, que como observado pela FIG.3.12, FIG.5.8 e FIG5.10 o material com menor LSE apresenta bandas menos nítidas.

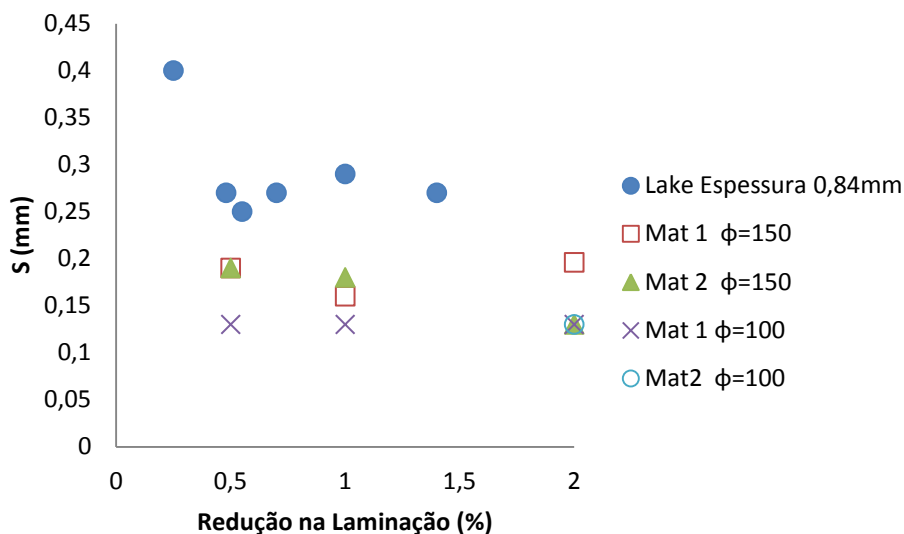


GRÁFICO 5.11- Espaço das bandas para chapa do Material 1 e 2 para laminação de 0,5%,1,0% e 2,0%, de espessura 0,5mm

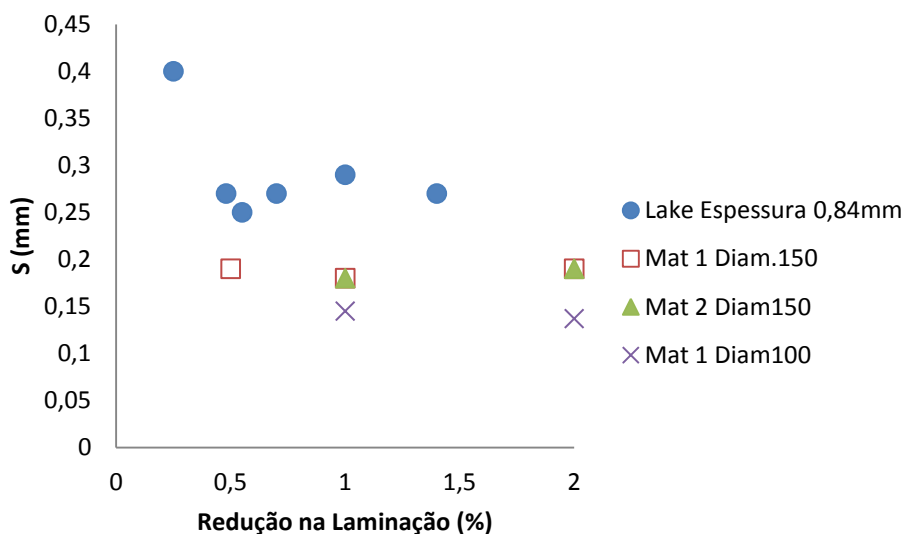


GRÁFICO 5.12- Espaço das bandas para chapa do Material 1 e 2 para laminação de 0,5%,1,0% e 2,0%, de espessura 1,0mm

Não foram obtidos resultados para os espaçamentos das bandas para as chapas de 2,0 mm para o cilindro de diâmetro de 100 mm, pois a chapa praticamente não apresentou homogeneidade de deformação para formação de bandas. Para o diâmetro do cilindro de 150 mm verificou-se o mesmo espaçamento para as reduções de 1 % e 2 %. Para a redução de 0,5 % houve um pico no valor de espaçamento com indica a GRA. 5.13 e pode ser verificado também pela FIG. 5.7 onde o escoamento das bandas é muito descontínuo.

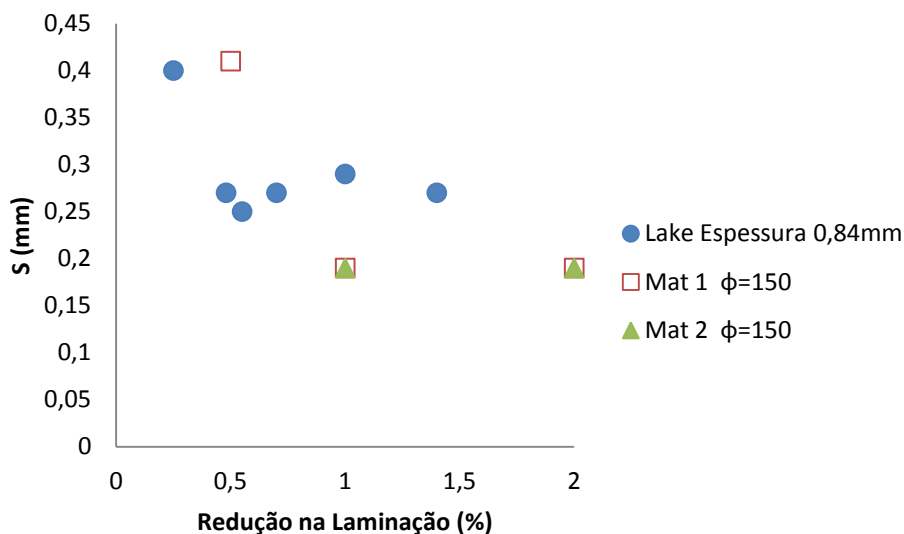


GRÁFICO 5.13- Espaçamento das bandas para chapa do Material 1 e 2 para laminação de 0,5%,1,0% e 2,0%, de espessura 2,0mm

Observa-se que os espaçamentos mostrados para os materiais 1 e 2 estão abaixo da maioria dos valores obtidos por Lake (1985). Entretanto, os espaçamentos das bandas obtidos se assemelham aos de Lake (1985), no sentido de que o espaçamento das bandas se altera muito pouco com a redução no passe de encruamento.

A variação do LSE do material não apresentou grande diferença no espaçamento das bandas (GRA.5.11, GRA.5.12 e GRA.5.13). Verificou-se no GRA.5.12 que houve uma diminuição do espaçamento das bandas com a diminuição do diâmetro do cilindro como indicado na literatura (ver TAB.3.2).

O aumento do espaçamento das bandas com o aumento da espessura indicado por Lake (1985) pode também ser observado, no GRA. 5.13. O GRA. 5.14 apresenta o espaçamento das bandas em função da espessura da chapa para redução de 1 % para o material 1.

De qualquer forma, Lake não forneceu os dados do grau de envelhecimento do material laminado nem detalhes da forma como foi medido as bandas experimentalmente.

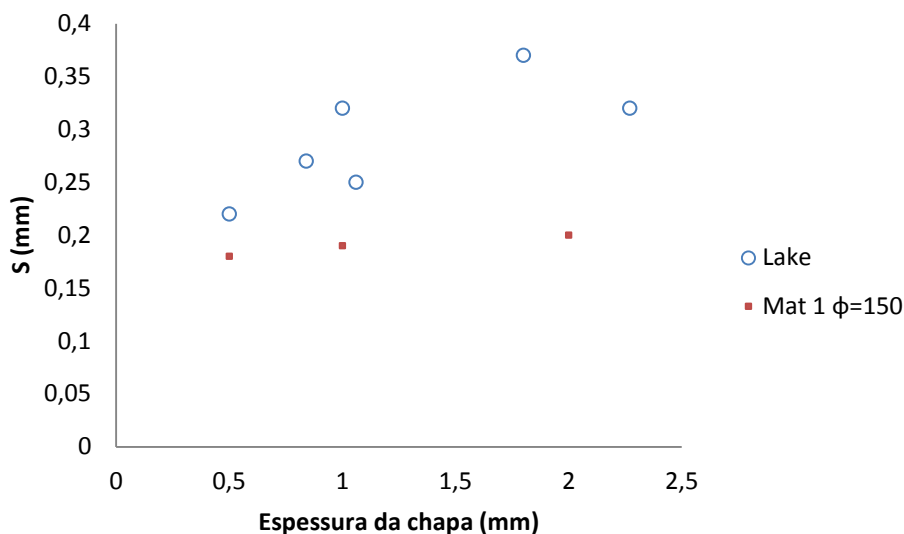


GRÁFICO 5.14- Espaçamento das bandas para o material 1 com redução de laminação 1, % e espessura de 0,5, 1,0 e 2,0 mm.

5.4 – Bandas de Lüders no ensaio de tração:

A simulação do desenvolvimento das bandas de Lüders no ensaio de tração antes da laminação de encruamento está ilustrada nas FIGS. 5.19 a 5.21 para os dois materiais nas espessuras de 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm, para três níveis de deformação.

Observa-se que o maior nível de envelhecimento do material 1 levou a um maior número de bandas de Lüders do que no ensaio do material 2; além disso, atingiu-se um maior nível de deformação em uma só das bandas, no caso do material 2, em oposição à situação simulada para o material 1.

A nucleação das bandas seguiu um comportamento diferente do ilustrado por Sun (2005) (FIG. 3.2) onde mais regiões de deformação foram notadas (FIG. 5.19): este mecanismo pode ter sido modificado pelo material ou por utilizar no método numérico um fator de escala tão pequeno que não fosse possível observar à olho nu estas variações.

A nucleação das bandas para o material 1 apresenta-se de forma mais espalhadas no corpo de prova e não localizadas em apenas uma região da chapa. Para o material 2 não há o desenvolvimento de nucleação em todo corpo de prova, mas sim em regiões mais específicas.

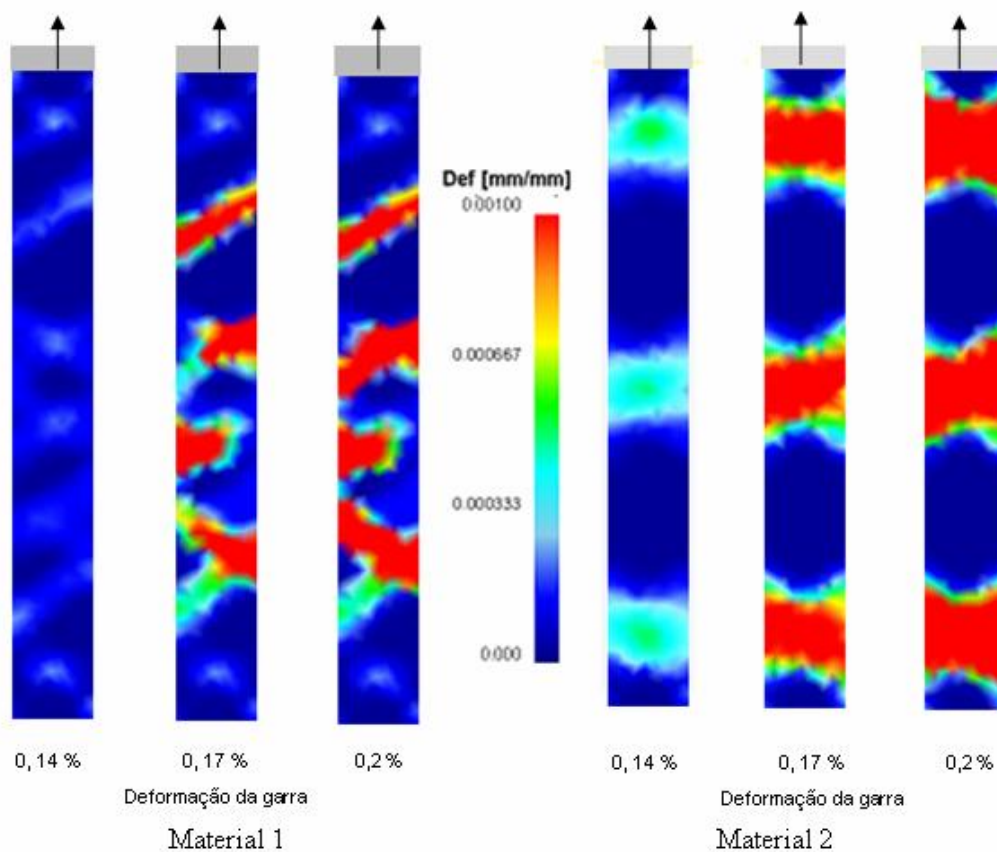


FIGURA 5.19- Simulação da nucleação e crescimento das bandas de Lüders no ensaio de tração dos materiais 1 e 2 antes do passe de encruamento, para chapa de 0,5mm.

Na chapa de 0,5 mm e de 2,0 mm, para o material 1 ocorre uma deformação mais centralizada, e para o material 2 dividida igualmente em 3 regiões na parte superior, central e inferior da chapa.

A chapa de 1,0 mm para o material 1 a descontinuidade de deformação é grande ocupando quase toda a região da chapa, e para o material 2 ocorre uma concentração na base inferior da chapa.

O comportamento diferenciado da nucleação das bandas para as chapas de diferentes espessuras, provavelmente se deve à diferença do valor do LSE dos dois materiais.

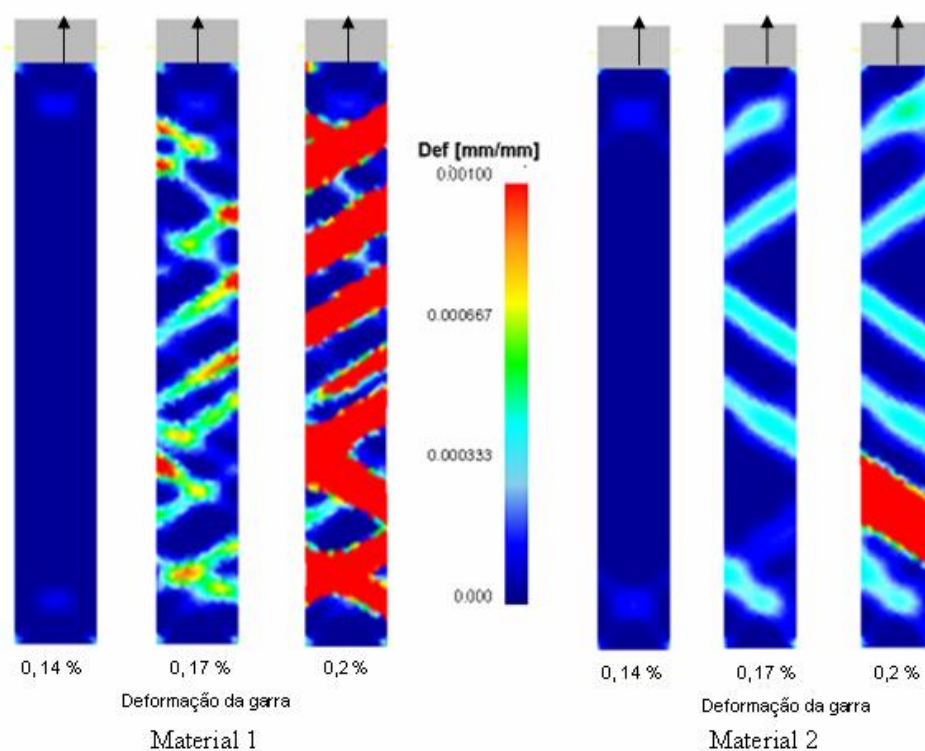


FIGURA 5.20- Simulação da nucleação e crescimento das bandas de Lüders no ensaio de tração dos materiais 1 e 2 antes do passe de encruamento, para chapa de 2,0mm.

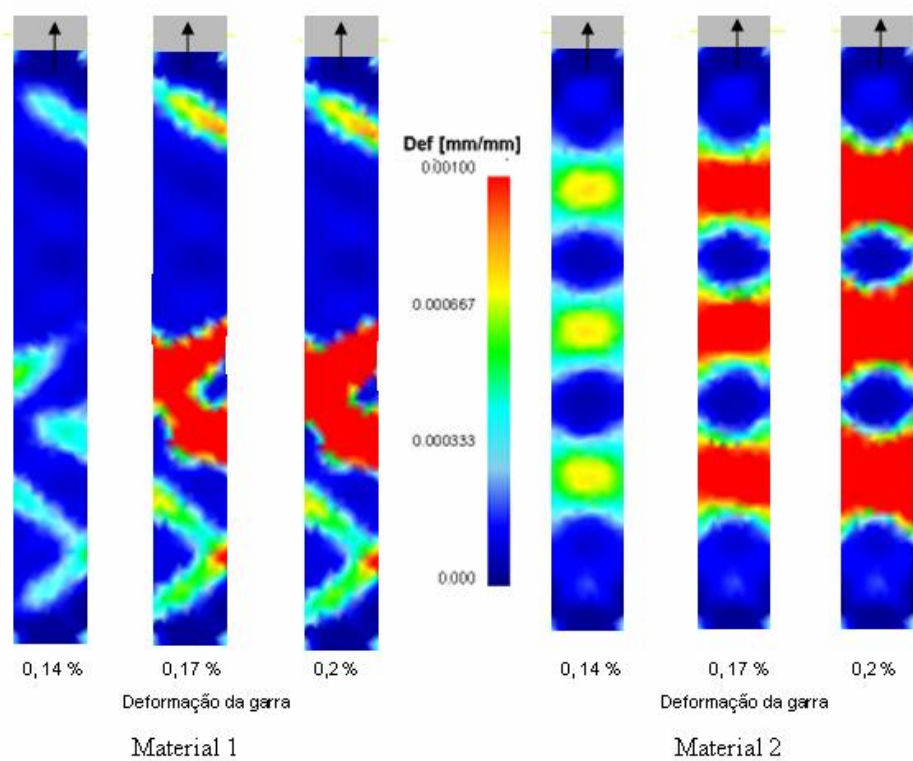


FIGURA 5.21- Simulação da nucleação e crescimento das bandas de Lüders no ensaio de tração dos materiais 1 e 2 antes do passe de encruamento, para chapa de 2,0 mm.

5.5 – Tração após laminação:

A FIG.5.22 ilustra o que se passa com as bandas de Lüders nucleadas durante o passe de encruamento, quando o material 1 é submetido à tração após o passe de encruamento. Mostram-se resultados para 4 níveis de deslocamento da garra de tração, que se move a uma velocidade de 0,5 mm/s. O comportamento da banda ao longo da espessura apresenta um gradual aumento da deformação das diversas regiões do material. É digno de nota que mesmo após uma tração apreciável, permanece uma heterogeneidade de deformação do material semelhante àquela estabelecida imediatamente após o passe de encruamento. Por outro lado, há um aumento do espaçamento médio das bandas, de 0,182 mm para 0,195 mm para o deslocamento da garra de 0,1375 mm.

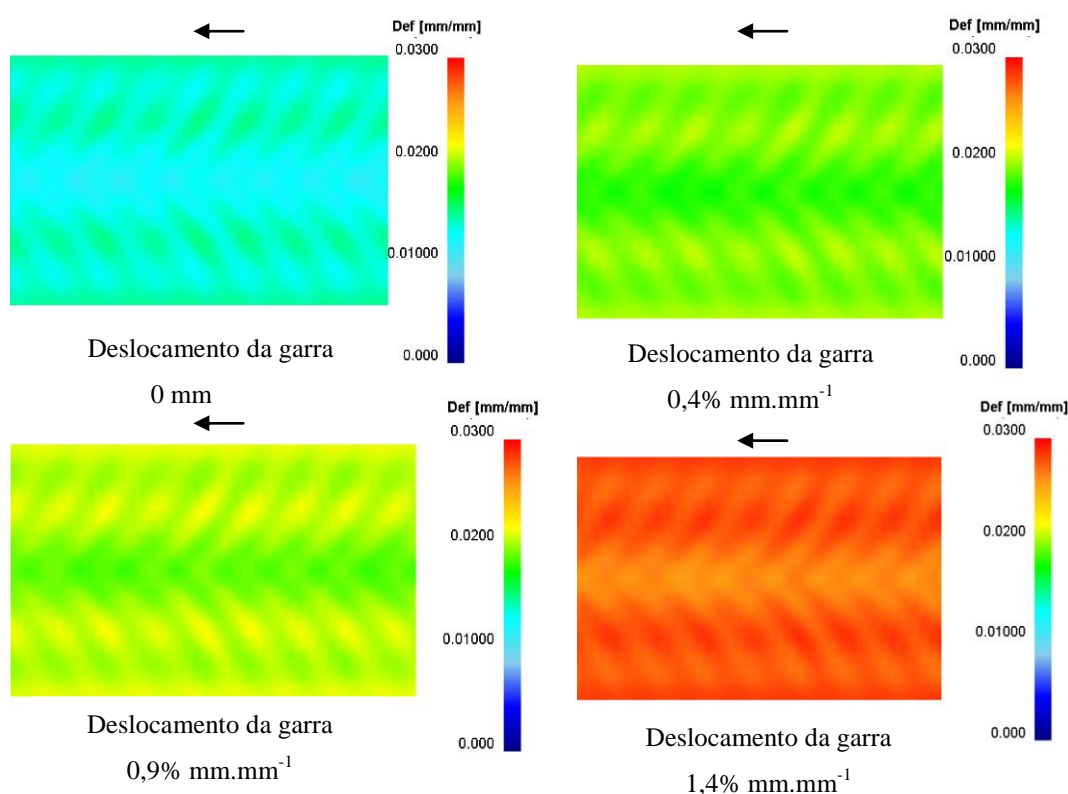


FIGURA 5.22- Simulação das bandas de deformação na tração após o passe de encruamento.

OS GRA.5.15 a GRA.5.20 mostram as curvas de tensão x deformação convencionais obtidas a partir da simulação da tração do material 1 (com um grau de envelhecimento que conduz a um limite superior de escoamento de 300 MPa, quando existente) e material 2 (com um grau de envelhecimento que conduz a um limite superior

de escoamento de 230 MPa, quando existente), após diferentes reduções de espessura no passe de encruamento.

A estrição das amostras aconteceu praticamente no mesmo ponto, a aproximadamente 8% de deformação, para todos os casos.

A tração da chapa sem laminação para o material 1 apresentou uma descontinuidade muito grande, para chapa de 0,5 mm e 1,0 mm.

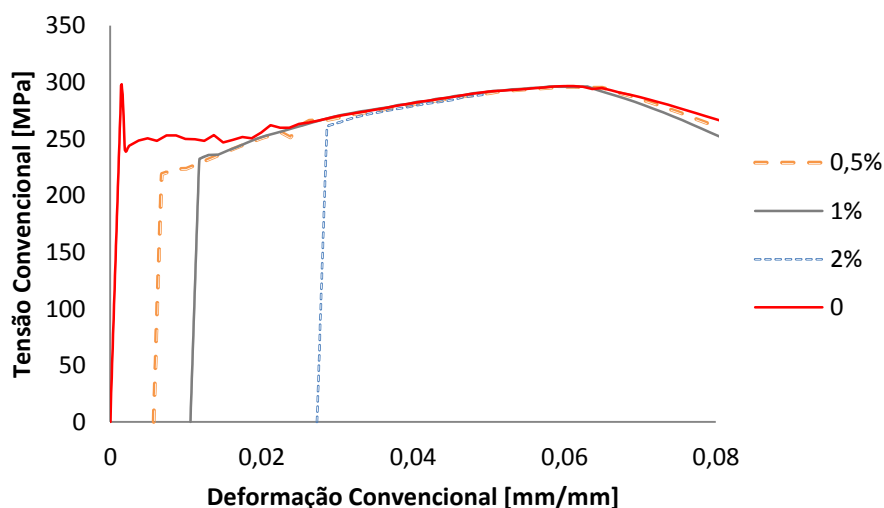


GRÁFICO.5.15- Ensaio de tração na chapa do Material 1 espessura de 0,5mm até uma deformação de 0,08

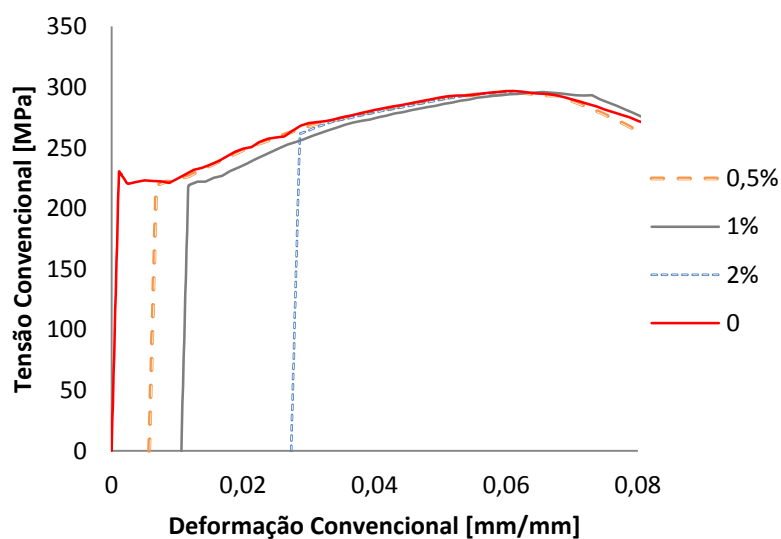


GRÁFICO.5.16- Ensaio de tração na chapa do Material 2 espessura de 0,5mm até uma deformação de 0,08

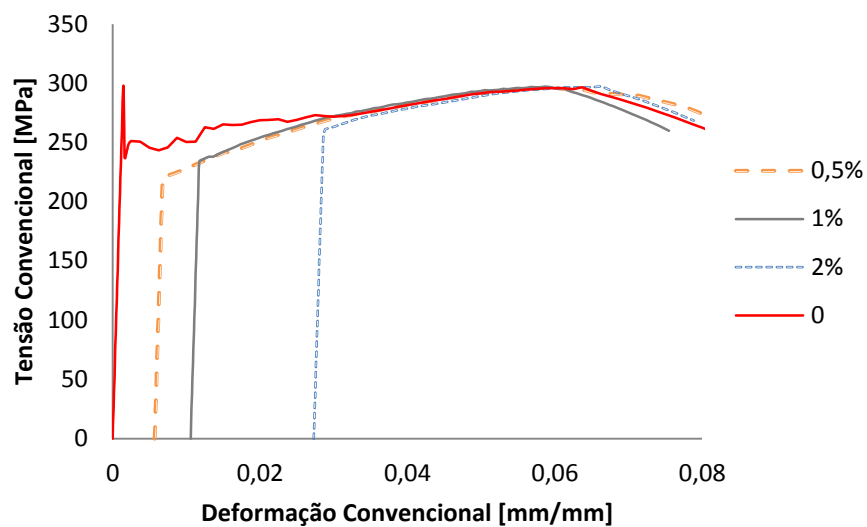


GRÁFICO.5.17- Ensaio de tração na chapa do Material 1 espessura de 1,0mm até uma deformação de 0,08

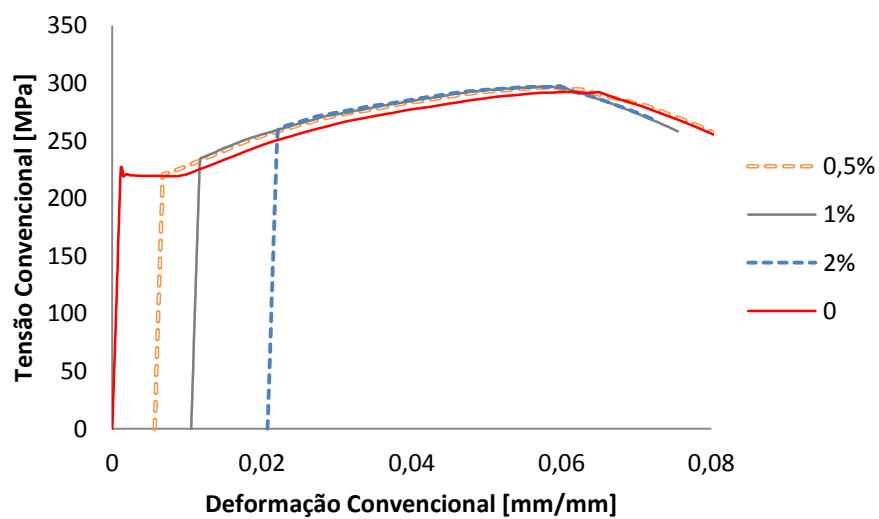


GRÁFICO.5.18- Ensaio de tração na chapa do Material 2, espessura de 1,0mm até uma deformação de 0,08

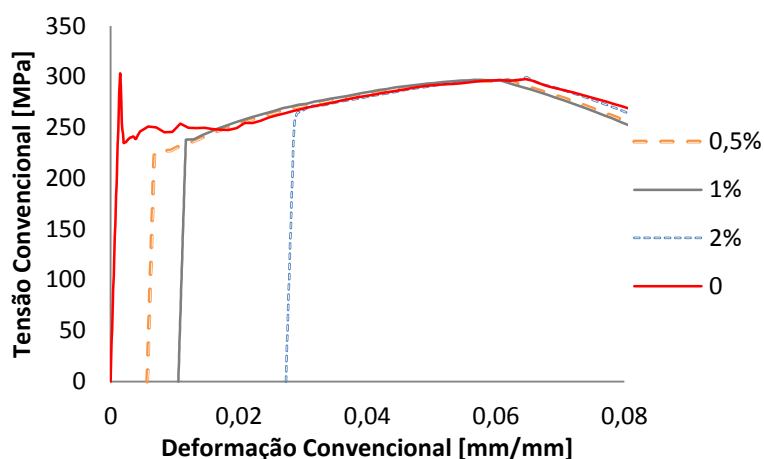


GRÁFICO.5.19- Ensaio de tração na chapa do Material 1, espessura de 2,0mm até uma deformação de 0,08

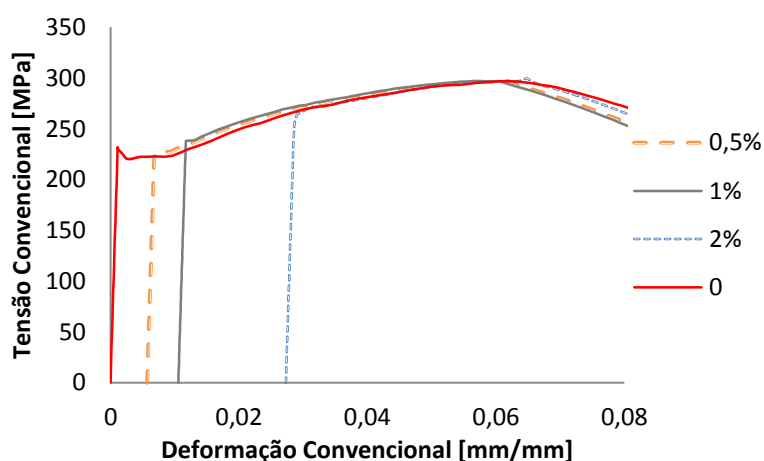


GRÁFICO.5.20- Ensaio de tração na chapa do Material 2, espessura de 2,0mm até uma deformação de 0,08

Observa-se para o caso de tração do material 2 que o patamar de escoamento é mais bem definido, ao contrário do patamar para o material 1 que apresenta um nível de tensão maior e apresenta uma região bastante descontínua até atingir uma deformação de 1 % a 2 %.

Os resultados acima correspondem àqueles relatados por Yoshida (2008), onde a eliminação do limite de escoamento superior ocorre para uma redução de 2 % no passe de encruamento; essa era a deformação para a qual este autor adotou o mínimo de tensões

para a curva de fluxo de cada ponto da chapa; a situação é análoga à do presente caso, onde o mínimo de tensões ocorre a uma deformação de 0,5 %.

6– CONCLUSÕES

De uma maneira geral podem-se indicar, a partir do trabalho desenvolvido, as seguintes conclusões:

1. A simulação por elementos finitos do passe de encruamento de materiais com níveis de envelhecimento diferentes reproduziu satisfatoriamente os aspectos revelados por dados experimentais existentes.
2. Níveis mais acentuados de envelhecimento conduzem a maior heterogeneidade de deformação no material, após o passe de encruamento, com a formação de bandas de Lüders mais claramente definidas que para o material menos envelhecido.
3. A simulação pelo método de elementos finitos confirmou a formação de bandas de Lüders, durante a laminação de encruamento, a cerca de 45° com a superfície da chapa e propagando-se da superfície para o centro das chapas. A deformação dos materiais é sensivelmente maior perto da superfície que ao longo da linha média de sua espessura.
4. O espaçamento das bandas de Lüders ao longo do comprimento das chapas não depende da redução de espessura no passe de encruamento, tanto de acordo com a simulação quanto de acordo com os dados experimentais; no entanto, os valores deste espaçamento obtidos na pesquisa foram menores que aqueles relatados na literatura.
5. A tração dos materiais envelhecidos e sem a aplicação do passe de encruamento leva à nucleação e desenvolvimento de bandas de Lüders ao longo de todo o material. Já o ensaio de tração dos materiais após o passe de encruamento não levou à formação de qualquer nova banda de Lüders, além daquelas previamente induzidas pelo passe de encruamento. Além disso, a tração não eliminou a heterogeneidade de deformação provocada pela laminação de encruamento, mas só aumentou o espaçamento das bandas pré-existentes nos materiais.

ABSTRACT

Lüders bands occur after the upper yield stress and during the yield plateau in the tensile testing of aged low carbon steel sheets. The sheet forming of aged material leads to the formation of unacceptable surface defects caused by these Lüders bands; this problem is industrially solved by the so called “skin pass”, which is the final cold rolling of the annealed sheets with a light reduction in thickness (1 to 2%). This introduces a large number of small Lüders Bands in the sheets, which do not evolve into surface defects upon further forming. A finite element analysis (FEA) of the skin pass of aged low carbon sheets was performed, covering the development of the Lüders bands during the rolling deformation, the influence of the thickness reduction and the effect of the diameter of the rolls. Two levels of initial aging of the material were considered. Tensile testing of the sheets after the skin pass was also simulated, and the behavior of the Lüders bands already in the sheets, during the tensile strain was studied. An analysis of the necessary rolling reduction in order to eliminate the yield plateau in the tensile test was completed.

Key words: Lüders Bands, Finite Element Analysis, tensile testing, Skin pass.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar o comportamento da variação do nível de deformação inicial do material e suas influências na propagação e espaçamento das bandas, bem como a influencia nas propriedades de tração após laminação.

Fazer um estudo de correlação e validação da EQUAÇÃO (3.1) coletando dados das deformações, velocidade das bandas e espaçamento das bandas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Callister, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução*. 5ª Ed. Rio de Janeiro, Editora LTC, p.116, 2002.
2. Chang, P. H., *Effects of Prior Cold Rolling and Post Temper Rolling on the Properties of Continuously Annealed Low Carbon Dual Phase Steel*, *Metallurgical Transactions*, v.15a, n.1, p. 671-678, april, 1984.
3. Cottrell, A. H., *Dislocations and Plastic Flow in Crystals*, Oxford, Clarendon Press, p.223, 1965.
4. Fernandes R. C. O., *Efeito da Temperatura de Encharque no Recozimento Contínuo e da Deformação na Laminação de Encruamento sobre as Propriedades Mecânicas de um Aço Microligado Laminado a Frio*. 2007 (Dissertação Mestrado em Curso de Pós Grad.de Eng. Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais)
5. Hosford, W. F. e Caddell, R. M., *Metal Forming – Mechanics and Metallurgy*, Prentice- Hall, 1983
6. Hundy, B. B., *Inhomogeneous Deformation During the Temper-Rolling of Annealed Mild Steel*, *Journal of the Iron and Steel Institute*, p. 313-314, 1955.
7. Kainz. A., Krimpelstätter K., and Zeman K., *FE-Simulation of Thin Strip and Temper Rolling Processes*, *Abaqus Austria Users' Conference*, Vienna, november 25, 2003.
8. Lake, J. S. H., *Control of Discontinuous Yielding by Temper Rolling.*, *Journal of Mechanical Working Technology*, v.12, p. 35-66, 1985.
9. Oliveira, R.S., *Análise da Fabricação de Fio Retangular de Cobre Eletrolítico, Com Seção de 3,5 x 8,8 mm a Partir de Vergalhão Cilíndrico de Diâmetro 8 mm*. 2009.

(Dissertação Mestrado em Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais)

10. Pereira, J. F. B. et al., Efeito das Variações do Processo da Laminação de Encruamento nas Propriedades Mecânicas das Chapas Laminadas a Frio. Projeto do Centro de Pesquisas da Usiminas, in: Curso Estampagem dos Aços, dez. 1987.
11. Pinto, M. C., Laminação a Frio com Pequenas Reduções. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1985. 98p. (Dissertação Mestrado em Curso de Pós Grad. De Eng. Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais)
12. Reed-Hill, R.E. Princípios de Metalurgia Física. 2. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982.
13. Reis L.C., Estudo dos Parâmetros de Influência na Simulação Numérica de Estampagem de Chapas. 2002. Dissertação Mestrado em Curso de Pós Grad. de Eng. Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais)
14. Sun, H.B., Yoshida, F., Ma, X., Kamei, T. e Ohmori, M., Finite Element Simulation of the Propagation of Lüders Bands and Effect of Stress Concentration, Materials Letters, v. 57, p. 3206-3210, 2003.
15. Tsukahara H. e Lung, T. Finite element simulation of the Piobert–Lüders behavior in an uniaxial tensile test, Materials Science and Engineering: A, vol. 248, Issues 1-2, June, p. 304-308, 1998
16. Yoshida F., Kaneda e Y. Yamamoto. S., A plasticity model describing yield-point phenomena of steels and its application to FE simulation of temper rolling, International Journal of Plasticity, v.24 n. 10 p. 1792–1818, aug. 2008
17. Zienkiewicz, O. C. The Finite Element Method. 4ª Ed. New York: Mcgraw-Hill, 1989.