



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

JAIME JAYSI LIMA RABELO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AÇO RECOZIDO EM CAIXA E AÇO
RECOZIDO NO CONTÍNUO COM ALTERAÇÃO DO LAMINADOR DE
ENCRUAMENTO**

FORTALEZA

2016

JAIME JAYSI LIMA RABELO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AÇO RECOZIDO EM CAIXA E AÇO RECOZIDO
NO CONTÍNUO COM ALTERAÇÃO DO LAMINADOR DE ENCRUAMENTO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

R114m Rabelo, Jaime Jaysi Lima.
Estudo comparativo entre aço recozido em caixa e aço recozido no contínuo com alteração no laminador de encruamento. / Jaime Jaysi Lima Rabelo. – 2016.
56 f. : il., color.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2015.
Orientação: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

1. Laminação (Metalurgia). 2. Aço. 3. Metalurgia. I. Título.

CDD 620.11

JAIME JAYSI LIMA RABELO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AÇO RECOZIDO EM CAIXA E AÇO RECOZIDO
NO CONTÍNUO COM ALTERAÇÃO DO LAMINADOR DE ENCRUAMENTO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Venceslau Xavier de Lima Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por cada dia me dando força, fé e saúde para enfrentar os desafios.

Aos meus pais, Jaime Costa Rabelo e Rose Meire Xavier de Lima que são as pessoas mais importantes que eu tenho em minha vida.

Agradeço a UFC (Universidade Federal do Ceará), que contribuiu para minha formação acadêmica. Agradeço também ao coordenador do curso de Engenharia Metalúrgica, Professor Dr. Marcelo José e a todos os Professores do curso de Engenharia Metalúrgica que me ajudaram nessa caminhada.

Ao Professor e orientador Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, a quem tenho grande admiração e respeito, por seu acompanhamento e orientação durante a execução deste trabalho e pelos conhecimentos repassados ao longo da graduação.

Agradeço a CSN, pela oportunidade única de estagiar em uma empresa que é referência não só no Brasil, mas no mundo. Também agradeço a todos os profissionais desta empresa em que me relacionei, aos engenheiros e técnicos. Agradecimento especial ao meu orientador de Cleverson Godinho e ao técnico Carlos Alberto pela sua ajuda, paciência e conhecimento compartilhado.

RESUMO

As fabricações de folhas metálicas ocorrem em diversas etapas, englobando processos desde a laminação a frio até a embalagem da bobina. Dentre os principais processos existem alguns indispensáveis, no qual são os processos de recozimento e de laminação de encruamento. O processo de recozimento tem como objetivo restaurar a ductilidade perdida do aço no processo de laminação a frio, e para isso ele consiste em aquecer o material a uma determinada temperatura (temperatura de recristalização) e mantê-lo por um determinado período. A temperatura e o tempo de recozimento podem variar, dependendo do tipo de recozimento aplicado. Para recozimento em caixa, haverá um maior ciclo de recozimento obtendo materiais com uma maior ductilidade que são recomendados para embalagens onde requer uma conformação mais severa. Para embalagens que requerem uma conformação menos severa, é usado o processo de recozimento contínuo, que apesar de produzir materiais menos dúcteis do que os do processo em caixa, tem um menor tempo de processamento e um menor consumo de energia. O trabalho tem como foco principal o estudo prático, avaliando o comportamento do aço com alterações do processo de recozimento em caixa para processo de recozimento contínuo. Também foram feitas variações do processo de encruamento entre amostras produzidas de forma tradicional (encruamento a seco) e a amostra produzida de forma alternativa (encruamento úmido) avaliando e comparando dados gráficos de ensaios mecânicos em conjunto com propriedades mecânicas e aspectos microestruturais.

Palavras-chave: Recozimento contínuo, recozimento em caixa, encruamento, encruamento seco, encruamento úmido.

ABSTRACT

The fabrication of sheet metal occurs in several stages, including processes from the cold rolling until to the packaging of the coil. Among the main processes there are some indispensable, which are the processes of annealing and skin-pass. The annealing process it has goal to restore lost ductility of the steel in the cold rolling process, and for that it consists in heating the material at a temperature (recrystallization temperature) and keeping it for a certain period. The annealing temperature and time may vary depending on the applied annealing. For annealing box, there is an increased annealing cycle obtaining materials with a higher ductility are recommended for packaging which requires a more severe forming. For packages that require a less severe conformation, it is used annealing process continue, that despite producing material with lower ductility than the process in box, has a shorter processing time and lower power consumption. The work focuses primarily on the study practice, evaluating the steel behavior with changes in the annealing process in box annealing to continuous annealing. Variations were prepared the skin-pass process between samples produced in the traditional way (dry skin-pass) and produced sample alternative forms (wet skin-pass) evaluating and comparing graphical data mechanical tests combined with mechanical properties and microstructural features.

Key words: Continuous Annealing, annealing box, skinn-pass, dry skin-pass, wet skin-pass.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

PE	Patamar de escoamento
LE	Limite de escoamento
LSE	Limite superior de escoamento
LIE	Limite inferior de escoamento
LR	Limite de resistência
LTf	Linha de tiras a frio
LLE	Linha de limpeza eletrolítica
LE3	Linha de encruamento úmido
LE2	Linha de encruamento a seco
LPB	Linha de preparação de bobinas
LEE	Linha de estanhamento eletrolítico
PE	Patamar de escoamento
σ	Tensão
R	Raio
S	Espaçamento das bandas
TMG	Tamanho de grão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação esquemática do processo de laminação	18
Figura 2	– Gráfico do comportamento da dureza do material em função da porcentagem de redução de área, anterior ao processo de recozimento	20
Figura 3	– Gráfico do comportamento do limite de resistência do material em função da porcentagem de redução de área, anterior ao processo de recozimento	20
Figura 4	– Gráfico do comportamento do alongamento do material em função da porcentagem de redução de área, anterior ao processo de recozimento	21
Figura 5	– Influência da temperatura de recozimento sobre a microestrutura e propriedade a partir de uma estrutura encruada	22
Figura 6	– Corte transversal de um forno tipo tubo radiante mostrando as bobinas empilhadas e separadas pelos convectores	26
Figura 7	– Ciclo do processo de recozimento caixa usado na CSN	27
Figura 8	– Visão geral da seção de entrada de uma linha de recozimento contínuo de folhas metálicas	28
Figura 9	– Visão da seção de processo que basicamente é o forno de recozimento no qual pode-se verificar as quatro diferentes seções	29
Figura 10	– Visão da seção de processo que basicamente é o forno de recozimento no qual pode-se verificar as quatro diferentes seções	30
Figura 11	– Ciclo de recozimento contínuo usado na CSN	31
Figura 12	– Variação do limite de escoamento em função do alongamento dado ao material	33
Figura 13	– Influência do comprimento do patamar inicial sobre a diminuição do limite de elasticidade (Em = porcentagem de deformação mínima para eliminação do patamar de escoamento)	34
Figura 14	– Influência da velocidade de encruamento na diminuição do limite de elasticidade	35

Figura 15 – Faixa de patamar de escoamento eliminado e desigual para com relação a força de laminação e tensão de tração	36
Figura 16 – Micrografias da amostra após o revestimento por estanhamento eletrolítico do aço A (a) 200x (b) 500x	41
Figura 17 – Micrografias da amostra após o revestimento por estanhamento eletrolítico do aço B (a) 200x (b) 500x	42
Figura 18 – Micrografias da amostra após o revestimento por estanhamento eletrolítico do aço C (a) 200x (b) 500x	42
Figura 19 – Gráfico do comportamento da carga aplicada no material em função da deformação na amostra A (a) Amostra antes de ser encruada (b) Amostra após encruamento	44
Figura 20 – Gráfico do comportamento da carga aplicada no material em função da deformação na amostra B (a) Amostra antes de ser encruada (b) Amostra após encruamento	44
Figura 21 – Gráfico do comportamento da carga aplicada no material em função da deformação na amostra C (1) Amostra antes de ser encruada (2) Amostra após encruamento	45
Figura 22 – Ilustração esquemática da formação de bandas de Lüders no passe de encruamento	46
Figura 23 – Figura 23 – Ilustração esquemática da propagação das bandas de Lüders durante o passe de encruamento.....	47
Figura 24 – Evolução do limite de resistência para cada processo aplicado nas amostras A, B e C.....	49
Figura 25 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis.....	50
Figura 26 – Evolução do limite de escoamento para cada processo aplicado na amostra A.....	51
Figura 27 – Evolução do limite de escoamento para cada processo aplicado na amostra B.....	51

Figura 28 – Evolução do limite de escoamento para cada processo aplicado na amostra C.....	52
Figura 29 – Comparação de propriedades mecânicas entre amostras produzidas na CSN pelos mesmo processos, diferindo apenas no processo de encruamento.....	53

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Dados sobre valores aplicados no ensaio de tração	39
Tabela 2 – Composição química da amostra A	40
Tabela 3 – Composição química da amostra B	40
Tabela 4 – Composição química da amostra C	41
Tabela 5 – Valores de propriedades mecânicas das amostras A e B depois de ser processada na linha de recozimento em caixa.....	47
Tabela 6 – Valores de propriedades mecânicas da amostra C depois de ser processada na linha de recozimento contínuo	47
Tabela 7 – Valores de propriedades mecânicas das amostras A e B depois de ser processada na linha de encruamento a seco	48
Tabela 8 – Valores de propriedades mecânicas da amostra C depois de ser processada na linha de encruamento a úmido	48
Tabela 9 – Valores das propriedades mecânicas das amostras A e B depois de ser processada na linha de estanhamento eletrolítico	48
Tabela 10 – Valores das propriedades mecânicas da amostra C depois de ser processada na linha de estanhamento eletrolítico	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Laminação	18
3.1.1	Laminador de tiras a frio (LTF)	19
3.2	Recozimento	21
3.2.1	Recozimento de bobinas em caixa	23
3.2.1.1	Principais equipamentos	24
3.2.1.2	Ciclo térmico de recozimento em caixa	26
3.2.2	Recozimento contínuo.....	27
3.2.2.1	Linha de recozimento contínuo de folhas metálicas	28
3.2.2.2	Ciclo térmico de recozimento contínuo	31
3.3	Laminação de Encruamento	31
3.3.1	Supressão do patamar de escoamento	33
3.3.2	Laminação de encruamento a seco (LE2)	36
3.3.3	Laminação de encruamento úmido (LE3)	36
3.4	Linha de preparação de bobinas (LPB)	37
3.5	Linha de estanhamento eletrolítico (LEE)	38
4	METODOLOGIA	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1	EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL	41
5.1.1	Amostra A - Tamanho de grão: 9,1 ASTM	41
5.1.2	Amostra B - Tamanho de grão: 10,2 ASTM	42
5.1.3	Amostra C - Tamanho de grão: 12,2 ASTM	42
5.2	Ensaio mecânico	43
5.2.1	Gráficos	43
5.3	Propriedades mecânicas	47
5.3.1	Resultados das amostras antes do encruamento	47
5.3.2	Resultados das amostras depois do encruamento	48
5.3.3	Resultados das amostras revestidas	48
5.3.4	Gráficos gerados	49

6	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIA	55

1 INTRODUÇÃO

A Companhia Siderúrgica Nacional representa a maior fornecedora de aço para a confecções de embalagens da América, produzindo e comercializando embalagens para diversos segmentos no Brasil, atendendo as demandas requeridas de revestimento, resistência, dimensão e acabamento. Tendo inúmeras especificações, cuidadosamente estudadas, obtidas e fornecidas de acordo com as necessidades de cada aplicação para uma melhor produção.

As fabricações de folhas metálicas ocorrem em diversas etapas na companhia, englobando processos desde a laminação a frio até a embalagem da bobina. Dentre os principais processos existem alguns indispensáveis ao atual trabalho, no qual são os processos de recozimento e de laminação de encruamento.

O processo de recozimento consiste em aquecer o material a uma determinada temperatura (temperatura de recristalização) e mantê-lo por um determinado período. A temperatura e o tempo de recozimento são variáveis importantes pois alterando-as podemos obter processos de recozimento diferentes e aços com propriedades diferentes, como ocorre nos processos de recozimento em caixa e contínuo. O processo de recozimento em caixa produz matérias com uma maior ductilidade devido ao seu maior ciclo de recozimento, sendo excelente para processos de estampagem, mas devido ao seu longo tempo de recozimento (aproximadamente 76 horas) é menos eficiente que o processo contínuo que leva em torno de 126 segundos (DOTTI, 1997).

Outra etapa importante é a laminação de encruamento que é dado após o recozimento do material, no qual será dado um passe de laminação com pequena deformação (encruamento), que pode ocorrer de forma úmida ou a seco, para eliminação do patamar de escoamento, evitando assim o aparecimento das linhas de Lüders em peças estampadas.

Após o acompanhamento e coleta das amostras de todos os processos posteriores ao recozimento, foram elaborados ensaios de tração e ensaio metalográficos das amostras nos laboratórios no centro de pesquisa e desenvolvimento da CSN, todos foram conduzidos conforme as normas. Foram feitas avaliações dos processos, aplicando alterações de recozimento e de variações nos passes de encruamento.

2 OBJETIVOS

Avaliar o comportamento do aço com alterações do processo de recozimento em caixa para processo de recozimento contínuo mensurando e comparando dados gráficos de ensaio mecânico em conjunto com propriedades mecânicas e aspecto microestrutural.

Mostrar como se comportam as propriedades mecânicas com a variação do processo de encruamento entre a amostra produzida de forma tradicional (encruamento a seco) e a amostra produzida de forma alternativa (encruamento úmido).

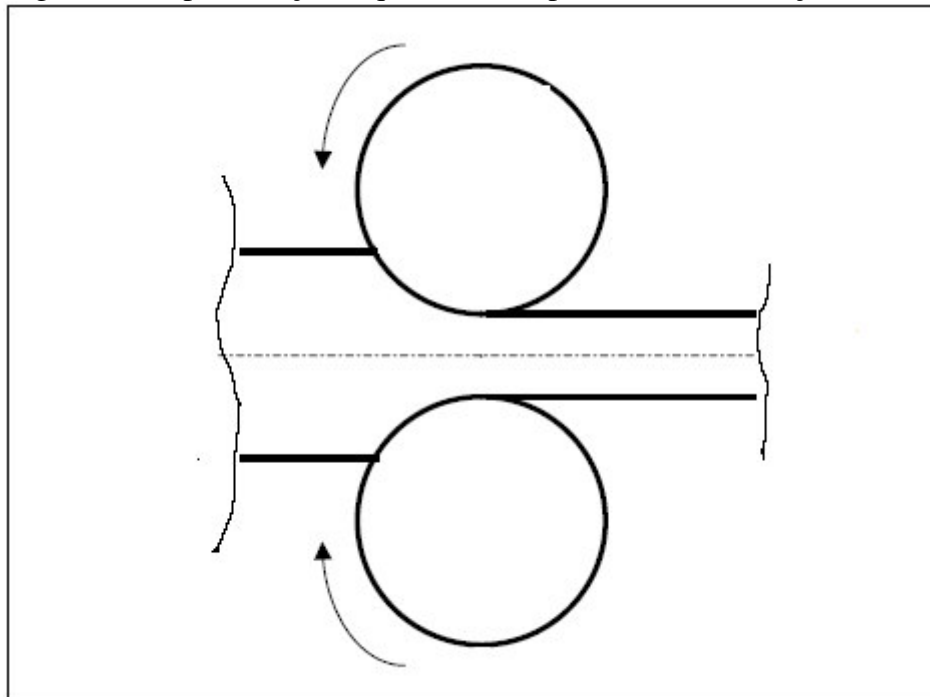
Estudar a influência dos processos de recozimento e encruamento para a microestrutura do material e do tamanho de grão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Laminação

Para o processo de laminação, o metal é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentido oposto, com a mesma velocidade superficial, distanciados entre si a uma distância menor que o valor da espessura da peça a ser deformada. Ao passar entre os cilindros o metal sofre deformação plástica, a espessura é reduzida e o comprimento e a largura são aumentados. (DIETER, 1988)

Figura 1 – Representação esquemática do processo de laminação



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (1986).

Pela laminação, o perfil obtido pode ser o definitivo e a peça resultante pronta para ser usada, ou o perfil obtido corresponde ao de um produto intermediário a ser empregado em outros processos de conformação mecânica como, por exemplo, tarugos para forjamento e chapas para estampagem profunda (BRESCIANI, 1997).

As diferenças entre a espessura inicial e a final, da largura inicial e final e do comprimento inicial e final, chamam-se respectivamente: redução total, alargamento total e alongamento total.

$$\begin{aligned}\Delta h &= h_0 - h_1 \\ \Delta b &= b_1 - b_0 \\ \Delta l &= l_1 - l_0\end{aligned}$$

Nas condições normais, o resultado principal da redução de espessura no metal é o seu alongamento, visto que o seu alargamento é relativamente pequeno e pode ser desprezado (PRADHAN, 1984)

3.1.1 Laminador de tiras a frio (LTF)

A laminação a frio é um processo mecânico-metalúrgico de conformação plástica dos metais e ligas, realizado em temperaturas abaixo da temperatura de recristalização do material, no qual ocorre a redução da área da seção transversal reta de corpos metálicos pela sua passagem entre dois ou mais cilindros, dotados de movimento de rotação. A importância da laminação a frio pode ser constatada pelas melhorias no acabamento dos produtos planos, na sua maior resistência e redução adicional de espessura em relação à laminação a quente, com aplicações em diferentes tipos de aço. Esses fatores têm sido decisivos para a aplicação da laminação a frio em processos de laminação (PRADHAN, 1984)

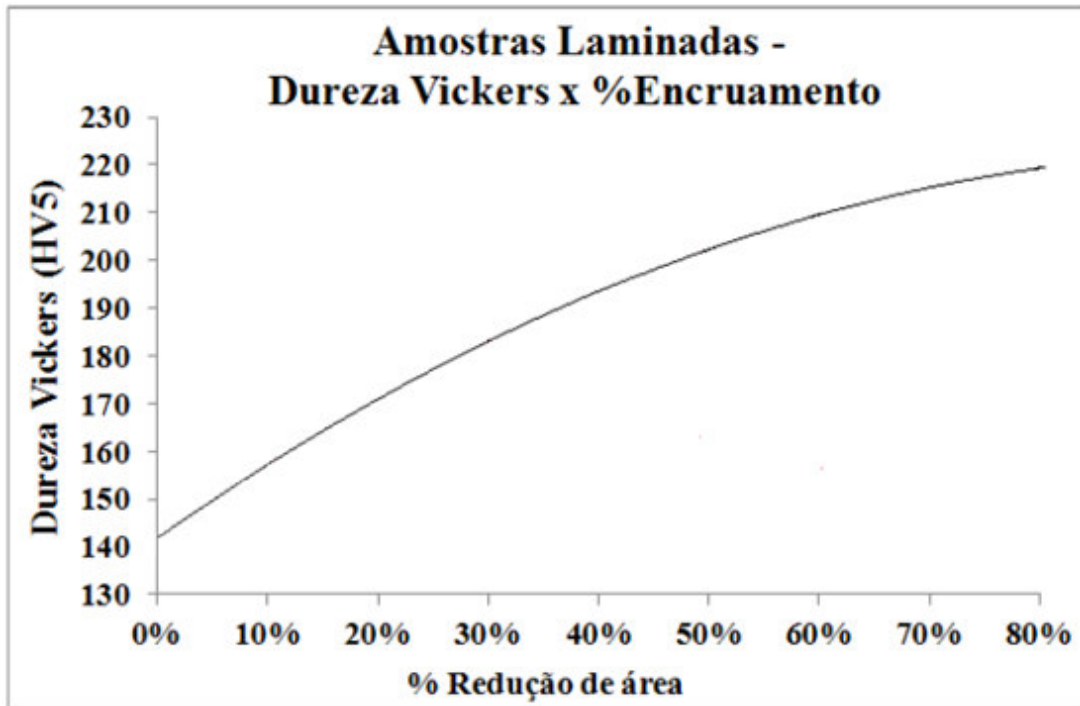
O processo é usado para produzir tiras com acabamento superficial e tolerâncias dimensionais superiores a laminação a quente. Além disso, o encruamento resultante da laminação a frio pode ser utilizado para aumentar a dureza. A laminação a frio é realizada sobre chapas e barras laminadas a quente gerando um produto acabado de superfície regular. A redução alcançada neste processo varia entre 50% e 90%. Estabelecendo a redução em cada passe ou em cada cadeira, é interessante distribuir o trabalho o mais uniformemente possível em todos os passes sem ficar muito abaixo da máxima redução em cada passe. Geralmente, a menor redução é feita no último passe para permitir um melhor controle da planicidade, das medidas e acabamento superficial (PLAUT, 1984)

A função principal da deformação a frio é obter uma espessura adequada de produto e fornecer energia suficiente para que o material seja recristalizado na etapa posterior de recozimento. A quantidade de deformação a frio afeta os valores de propriedades mecânicas do material, por alterar as condições de recristalização destes aços no recozimento.

Quanto maior a redução direta da espessura por laminação a frio, maior é a densidade e consequente intercepto de linhas de discordâncias no reticulado cristalino, maior a formação de bandas de deformação que causam fragmentação do grão e maior a energia armazenada em contorno de grão, resultando em maior quantidade de núcleos para

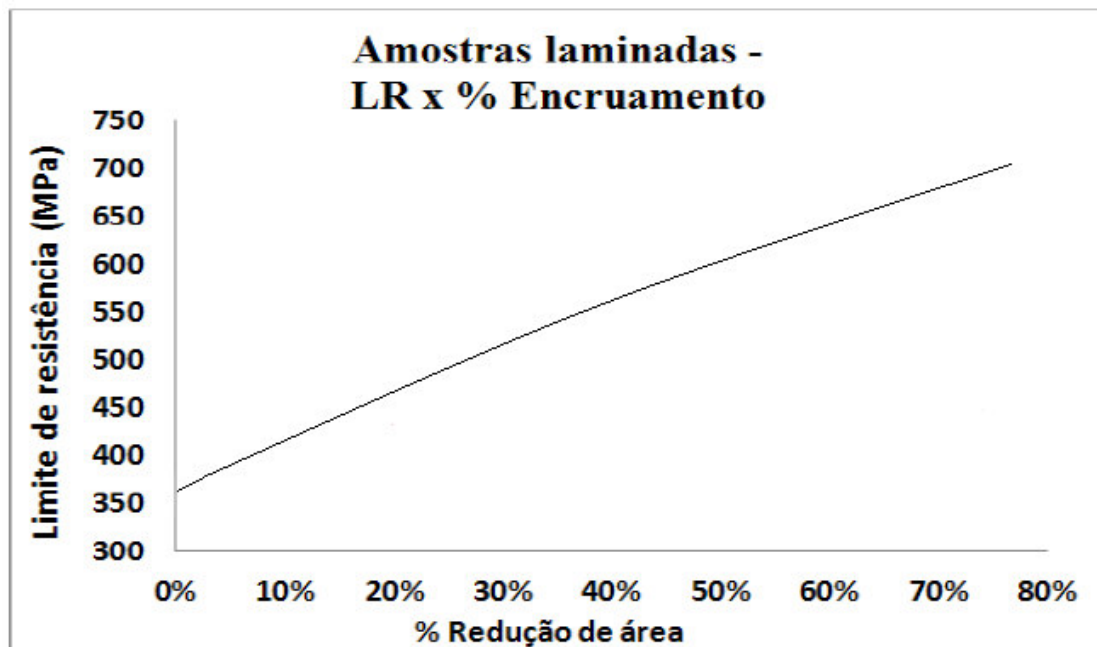
recristalização (CORASSINI, 2012). Com isso, ocorre aumento progressivo da dureza, limite de resistência e limite de escoamento, e diminuição do alongamento, como pode ser evidenciada através das Figuras 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 2 – Gráfico do comportamento da dureza do material em função da porcentagem de redução de área, anterior ao processo de recozimento.



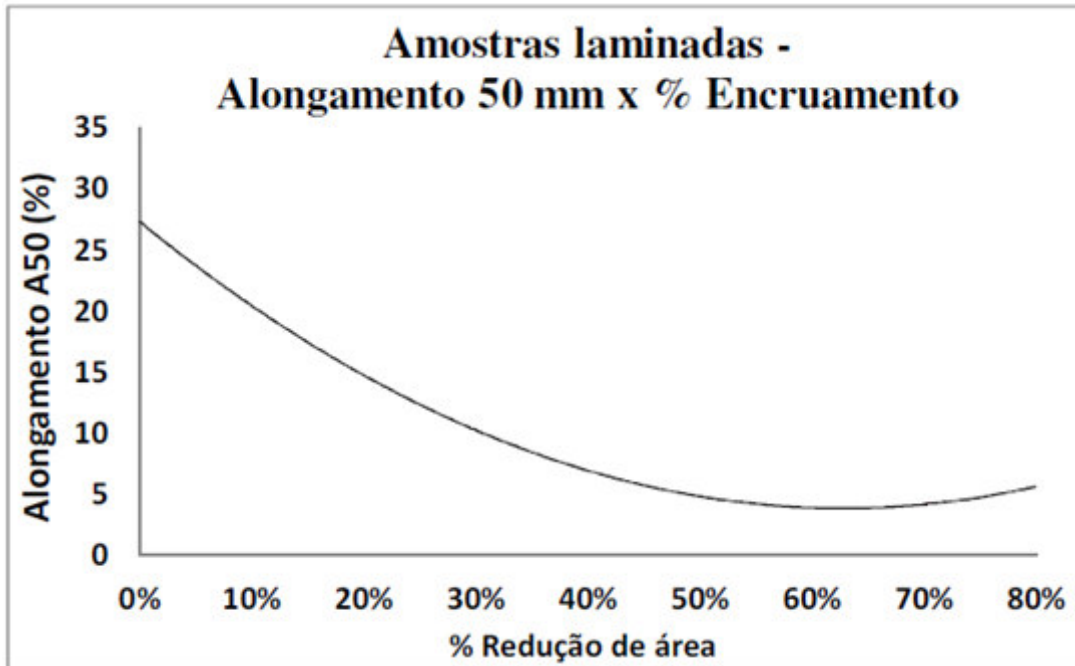
Fonte: Adaptado de CORASSINI (2012).

Figura 3 – Gráfico do comportamento do limite de resistência do material em função da porcentagem de redução de área, anterior ao processo de recozimento.



Fonte: Adaptado de CORASSINI (2012).

Figura 4 – Gráfico do comportamento do alongamento do material em função da porcentagem de redução de área, anterior ao processo de recozimento.



Fonte: Adaptado de CORASSINI (2012).

3.2 Recozimento

Esta etapa do processo tem o objetivo de restaurar a ductilidade perdida pelos aços no processo de laminação a frio, visto que a redução a frio torna o material encruado e o mesmo nesta condição é altamente frágil, dependendo do percentual de redução permitindo, poderá não ocorrer trabalho mecânico no mesmo.

O processo de recozimento consiste em aquecer o material a uma determinada temperatura (temperatura de recristalização) e mantê-lo por um determinado período. A temperatura e o tempo de recozimento dependem basicamente do nível de propriedade mecânica que se deseja obter no aço e da composição química do mesmo. Para materiais de estampagem as temperaturas e os tempos de recozimento geralmente são maiores que para os materiais com qualidade comercial, independente se o processo é de recozimento em caixa ou recozimento contínuo (PADILHA, 1996).

As etapas do processo de recozimento consistem em:

- Aquecimento do metal até uma certa temperatura.
- Encharque, nesta temperatura por um tempo suficiente para permitir que as mudanças necessárias ocorram.
- Resfriamento a uma taxa predeterminada.

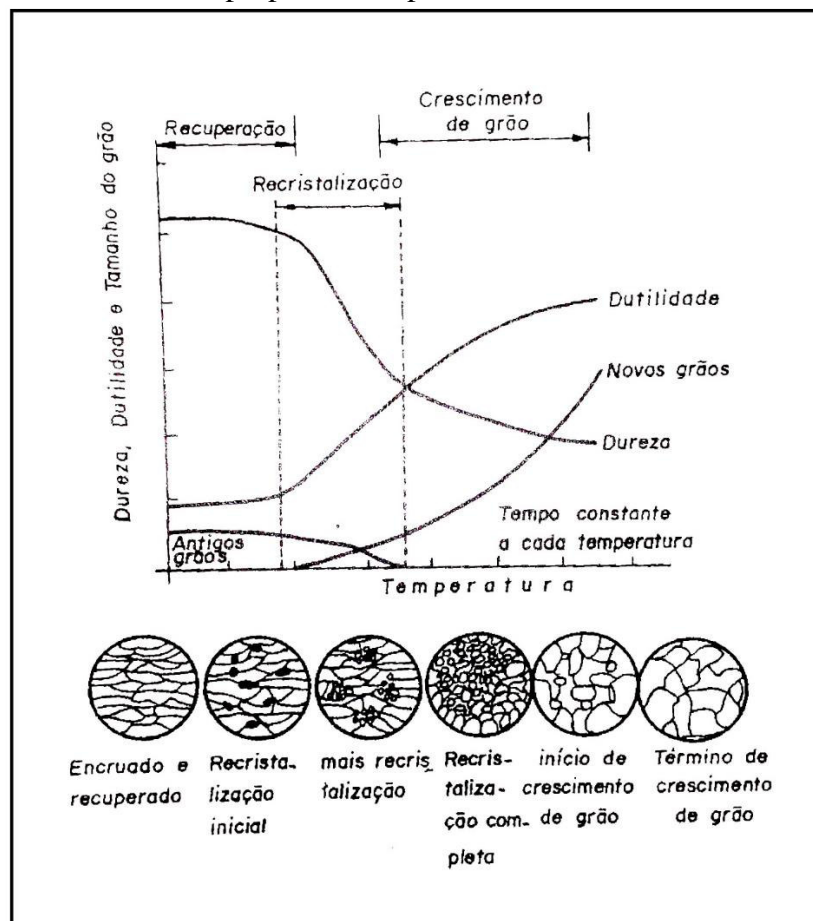
Além de devolver a ductilidade ao material encruado, os parâmetros de processo são ajustados de forma a definirem os valores finais de propriedade mecânica do material. Tempos e temperaturas de recozimento fora do determinado para o material em recozimento afetarão o nível de propriedade mecânica do mesmo, podendo gerar a não conformidade de não atendimento aos valores especificados em norma (CHANG, 1984).

A finalidade do processo de recozimento pode envolver um ou mais objetivos como descritos abaixo:

- a) Amaciar o aço e melhorar sua usinabilidade;
- b) Aliviar tensões internas induzidas por algum tratamento anterior (laminação, soldagem, forjamento, etc)
- c) Remover crescimento grosseiro de grãos.

O tratamento de recozimento é normalmente aplicado em forjados, chapas e fios trabalhados a frio e fundidos. A Figura 5, apresenta a influência da temperatura de recozimento na microestrutura e propriedades mecânicas de um material “encruado”.

Figura 5 – Influência da temperatura de recozimento sobre a microestrutura e propriedade a partir de uma estrutura encruada.



Fonte: GOODMAM (1984).

As propriedades descritas na Figura 5 são com relação a ductilidade, e a dureza. Na parte inferior da figura, apresentam as microestruturas de acordo com a variação da temperatura. A medida que vai ocorrendo a recristalização o material vai melhorando suas propriedades mecânicas, até o termino do crescimento de grão.

É usual referir-se a uma temperatura de recristalização de um metal, para designar a temperatura na qual o metal com um dado grau de encruamento, se recristalizará completamente após um período determinado de tempo, que é normalmente uma hora. O processo de recristalização é muito mais sensível a variações de temperatura que do tempo.

Além da temperatura e do tempo, vários outros fatores exercem influência sobre o processo, dentre eles podemos destacar o grau de encruamento, os elementos de liga e o tamanho de grão inicial. A temperatura de recristalização diminui a medida que o grau de encruamento aumenta. Isto se deve ao fato de que a energia armazenada no aço aumenta com o encruamento (PADILHA, 1996).

A pureza do metal é outro fator relevante no processo de recristalização. O ferro é um exemplo típico. Enquanto que o ferro eletrolítico se recristaliza a aproximadamente 400°C, a presença fosforo, silício, nitrogênio, etc, elevam a temperatura do material.

Quanto menor o tamanho do grão inicial, maior será a área total dos contornos de grão em um dado volume de metal, o que propicia uma maior velocidade de nucleação para recristalização. Isto resulta numa granulação recristalizada menor. Após terminada a recristalização, se a temperatura for mantida, haverá uma lenta migração dos contornos de alguns grãos, produzindo crescimento uniforme destes grãos as custas do desaparecimento gradual de grãos menores. Este fenômeno é conhecido como crescimento de grão (PADILHA, 1996).

3.2.1 Recozimento de bobinas em caixa

Este processo foi desenvolvido nos anos 30. Foi projetado de modo a garantir um ciclo térmico com 3 estágios: Aquecimento, encharque e resfriamento. Em cada base podem ser posicionadas até 4 bobinas, dependendo da largura de cada material.

A seguir são descritos os principais equipamentos que fazem parte de um sistema recozimento em caixa ou campânula. Dentre elas podemos destacar: o forno de recozimento (convencional de alta convecção), a base (onde são apoiados os fornos), a campânula protetora (abafador), o convector (separador das bobinas) e o resfriador (campânula de resfriamento). A carga de aço é colocada sobre as bases, e coberta pelas campânulas internas, que são

responsáveis por manter uma atmosfera protetora, prevenindo a oxidação do aço. Finalmente, os fornos se aplicam calor.

Cada uma dessas unidades básicas pode variar consideravelmente utilizando vários equipamentos auxiliares. Nas usinas, várias unidades são agrupadas em um setor de recozimento, que é servido por esteiras, tratores, pontes rolantes, guindastes e equipamentos geradores de atmosfera protetora. Nos equipamentos mais modernos, as bases são estacionárias e os fornos são portáteis, transportados por guindastes até as bases e conectados aos controles de combustível. Para se obter máxima produtividade, até quatro bases, com suas correspondentes campânulas, são posicionadas para serem atendidas por um único forno (DOTTI, 1997).

3.2.1.1 Principais equipamentos

a) Base

É um suporte onde são apoiadas e empilhadas as bobinas a serem recozidas. É construída de uma carcaça metálica, revestida de material refratário (tijolos ou argamassa). Na sua parte central, sobre o refratário, está posicionado o difusor, dentro do qual está alojada a ventoinha, que é responsável pela circulação do gás de proteção ao longo da carga. A movimentação do gás no interior da câmara, que é a convecção forçada, propicia a transmissão do calor da parte central da bobina (miolo) para o exterior da bobina.

Uma base consiste em uma bandeja rasa de ferro fundido, ou mais comumente, aço de alto ponto de fusão. A parte inferior é coberta por uma camada de areia para a vedação da campânula.

No recozimento de bobinas e produtos deformados a frio são utilizadas bases circulares, enquanto que para outras aplicações utilizam-se bases retangulares.

b) Campânula protetora ou abafador

As campânulas são geralmente abertas em baixo, tem paredes finas de aço e se apresentam na forma de caixas ou cilindros para perfeito acondicionamento de placas ou bobinas.

Tem como finalidade principal fazer o isolamento entre o material a ser recozido e o meio ambiente (oxigênio do ar). São normalmente fabricados de aço inoxidável austenítico ou aço baixo carbono e apresentam espessura de parede de 3/16 a 1/4 de polegada, ou 3/32 a 1/8 de polegada se o material utilizado for aço inoxidável. Podem ser lisos ou corrugados.

É importante destacar que as paredes corrugadas aumentam a superfície externa dos abafadores e também permitem que se utilize um material com menor espessura devido a sua maior resistência. Os de aço inox são duradouros em contrapartida são de alto custo. Durante o processo de recozimento as paredes dos abafadores atingem temperaturas da ordem de 800°C (DOTTI, 1997).

Existe uma disposição no equipamento no qual altera a economia de combustível, sendo necessário projetar a instalação de tubos radiantes, que são tubos colocados na campânula, ocorrendo neles a queima do combustível. Desse modo, o forno passa a ser apenas uma cobertura isolante. Essa disposição de equipamento visa economia de combustível e aquecimento mais rápido.

c) Convector ou separador de bobinas

São espaçadores colocados entre as bobinas que formam a carga para possibilitar a passagem do gás de proteção entre as bobinas empilhadas propiciando que o calor seja transportado do topo e da base das bobinas para a parte central.

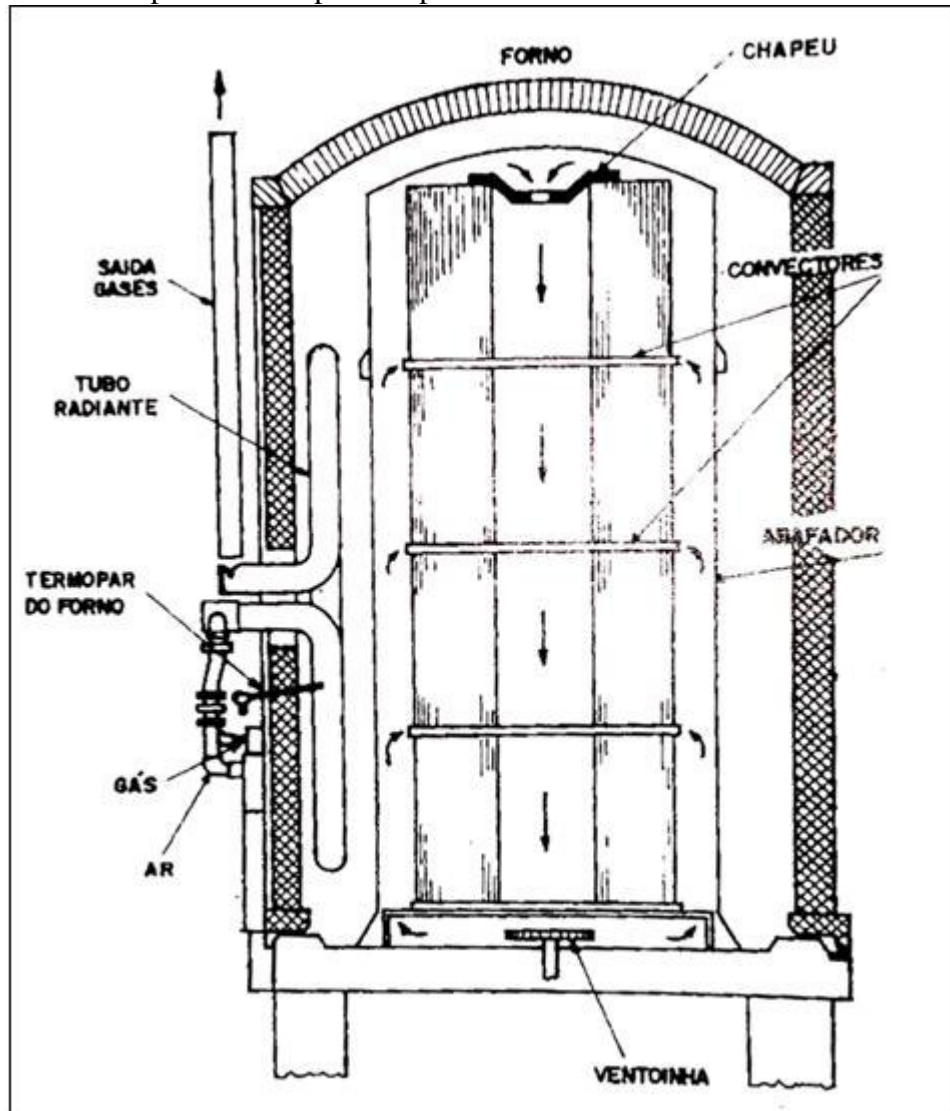
A convecção forçada do gás de proteção depende fortemente dos convectores. Seu formato (desenho) também é muito importante no rendimento final do sistema (DOTTI, 1997).

d) Resfriador ou campânula de resfriamento

Uma grande parte do tempo total de processamento é gasto na etapa de resfriamento. O ideal é fazer a descarga do material em temperaturas abaixo de 100°C. Para acelerar a velocidade de resfriamento, são utilizados os resfriadores. Eles aspiram o ar atmosférico em torno dos abafadores.

A Figura 6 apresenta um corte transversal de um forno típico tipo composto de tubos radiantes, os quais são fabricados normalmente de aço inoxidável centrifugado. São mostradas também, nesta figura, as bobinas empilhadas e separadas por separadores ou convectores (DOTTI, 1997).

Fig. 6 – Corte transversal de um forno tipo tubo radiante mostrando as bobinas empilhadas e separadas pelos convectores.



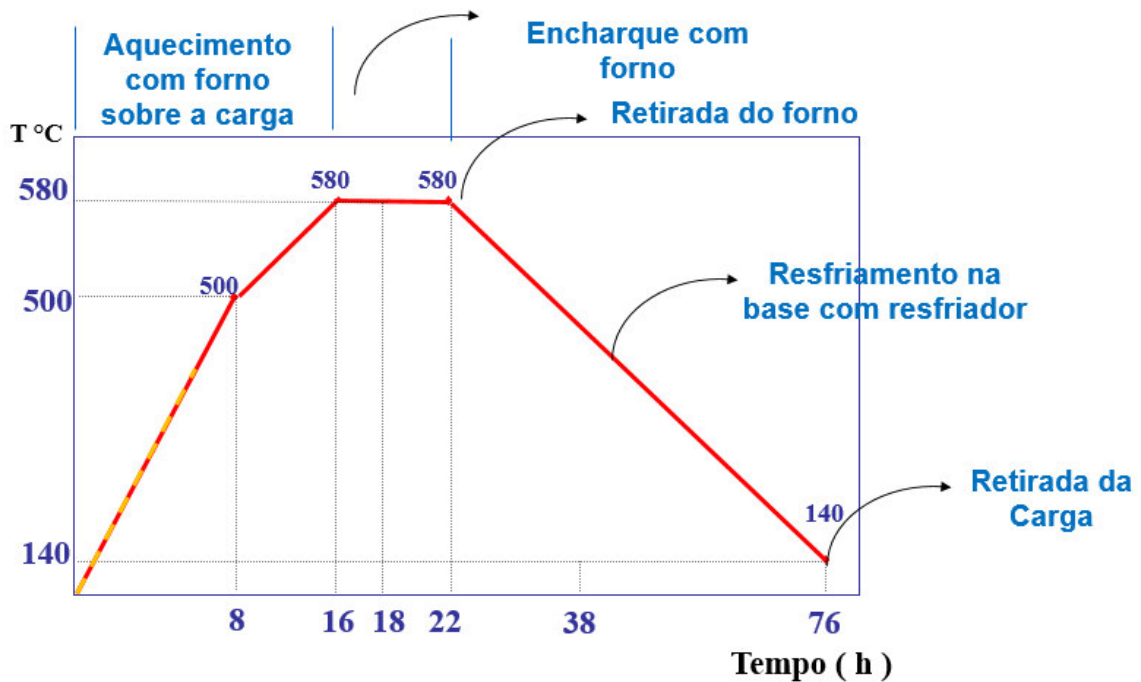
Fonte: DOTTI (1997).

3.2.1.2 Ciclo térmico de recozimento em caixa

O ciclo térmico do forno em caixa é dividido em três partes principais: aquecimento, encharque e resfriamento. São mostradas as temperaturas mais frias bem como as partes mais quentes.

É mostrado um dos ciclos de recozimento em Caixa usados na CSN na Figura 7.

Figura 7 – Ciclo do processo de recozimento em caixa usado na CSN.



Fonte: Adaptado de DOTTI (1997).

3.2.2 Recozimento contínuo

Como o recozimento em caixa é um processo bastante lento, houve a necessidade do desenvolvimento de uma maior produtividade. Iniciou-se então a linha de recozimento contínuo, inventada pela Corwn Cork and Steel company nos EUA em 1940 (LINHARES, 1994).

O recozimento contínuo é um processo de tratamento onde o material é quem faz o perfil térmico através de seu movimento no interior do forno (no recozimento em caixa o material é estático). As temperaturas de cada seção do forno são mantidas numa pequena faixa de variação. A tira viaja numa velocidade praticamente constante.

Uma das diferenças com o processo convencional em caixa, é o volume de produção, a quantidade de superfície e a homogeneidade de propriedades mecânicas. (PRADHAN, 1984)

As unidades em operação mais populares são aquelas destinadas ao recozimento para folhas de flandres (chapa fina), pois para aplicações onde há necessidade de um menor nível de dureza, as altas relações tempo-temperatura (para que haja uma recristalização completa) metalurgicamente exigidas vem se apoiando no recozimento de bobinas abertas (LINHARES, 1994).

3.2.2.1 Linha de recozimento contínuo de folhas metálicas

Uma linha contínua de folhas metálicas, é dividida em três partes principais: Seção de entrada, processo e seção de saída, processo e seção de saída.

Na seção de entrada a folha passa por um processo de limpeza eletrolítica que tem como finalidade retirar os óleos e resíduos provenientes do processo de laminação a frio.

Na seção de processo é realizado o recozimento propriamente dito de forma a se obter o grau de dureza requerido.

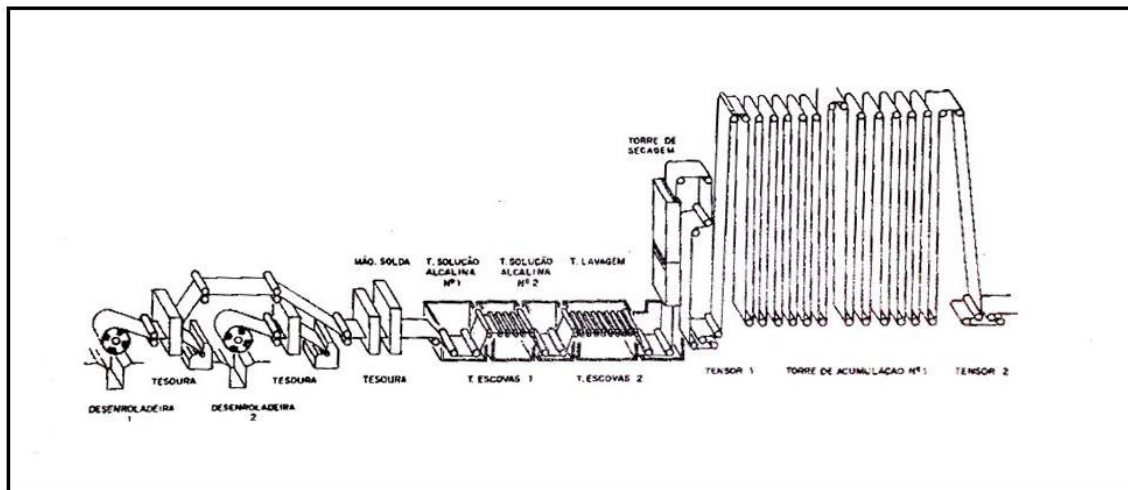
Na seção de saída é feita uma inspeção e preparação do material para a operação subsequente, ou seja, a laminação de encruamento (LINHARES, 1994)

a) Seção de entrada

Basicamente a seção de entrada é constituída de limpeza superficial da tira, a qual é composta de um processo eletrolítico e limpeza mecânica através de escovamento rotativo.

A Figura 8 mostra uma visão geral da seção de entrada de uma linha de recozimento contínuo de folhas metálicas.

Figura 8 – Visão geral da seção de entrada de uma linha de recozimento contínuo de folhas metálicas.



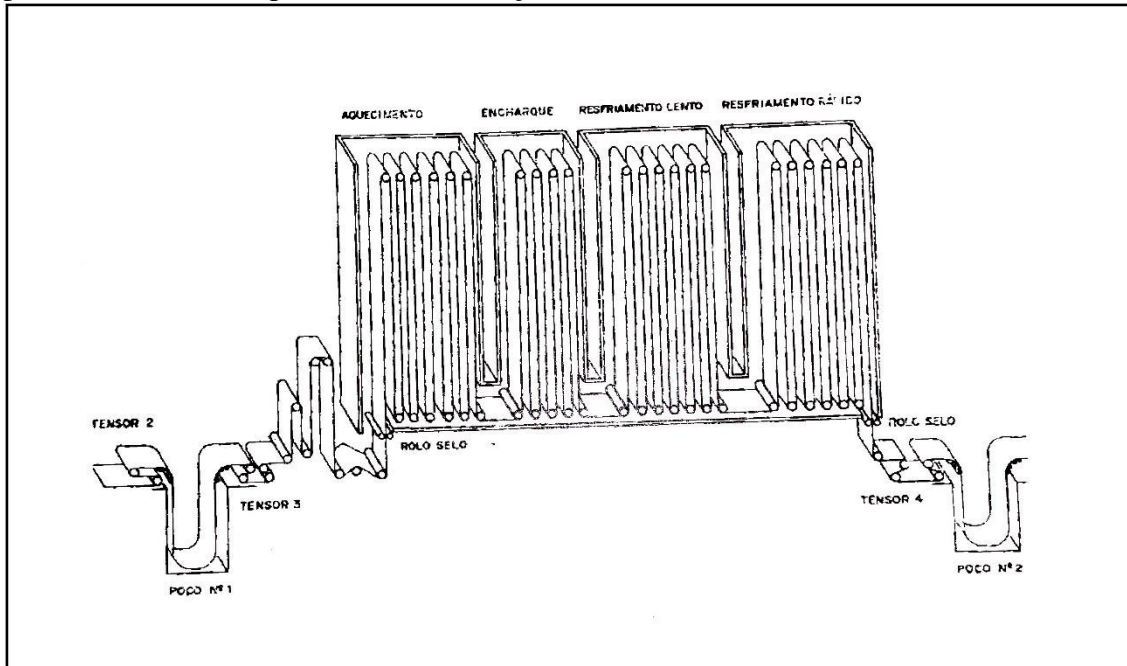
Fonte: DOTTI (1997).

A seção é composta de duas desenroladeiras, tesouras, máquina de solda, tanques de limpeza, torre de secagem de acumulação.

Os tanques de limpeza têm a finalidade de fazer o desengraxe eletrolítico da tira. Nesta seção consta também de escovamento mecânico.

b) Seção de processo

Figura 9 – Visão da seção de processo que basicamente é o forno de recozimento no qual pode-se verificar as quatro diferentes seções.



Fonte: DOTTI (1997).

Tem como finalidade fazer o recozimento propriamente dito. A seção de processo é a seção principal, em que se situa o forno de tratamento térmico, representado na Figura 9, ajustável para a obtenção das propriedades mecânicas especificadas no produto com alta precisão.

O forno é vertical com cerca de 100 m de comprimento e 20 m de altura dividido em 7 compartimentos separados por túneis de conexão (LINHARES, 1994).

As seções do forno são as seguintes:

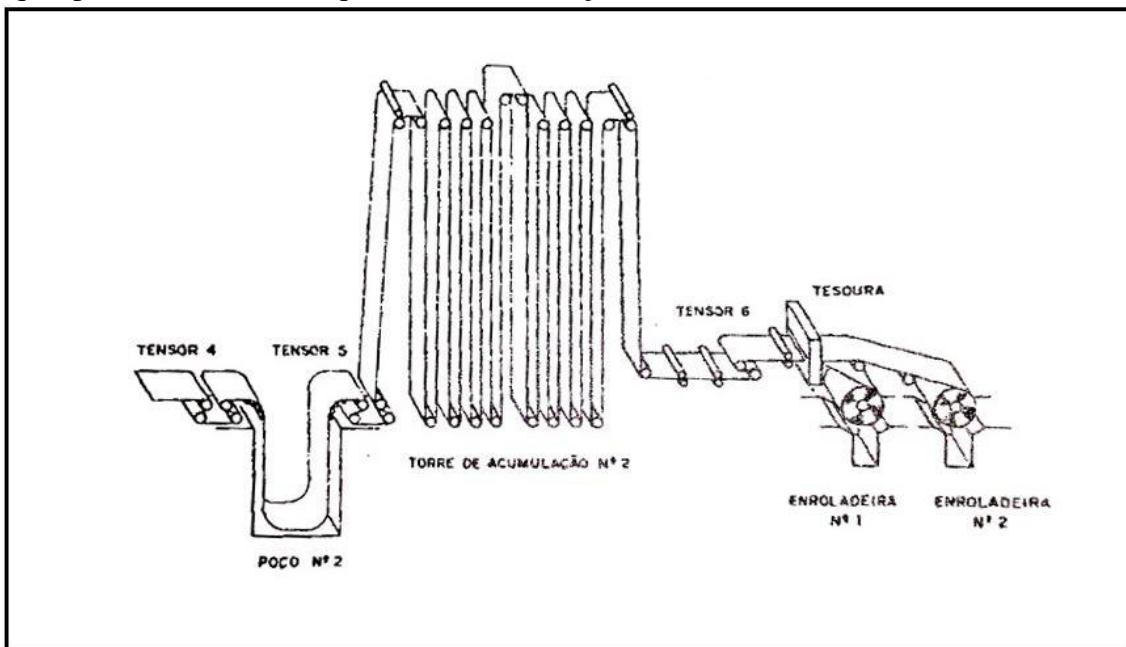
1. Pré-aquecimento – No qual são usados os gases do aquecimento para pré-aquecer a tira (atualmente desativado).
2. Aquecimento – Projetada para elevar gradualmente a temperatura da tira, através da queima do gás de coqueria em queimadores do tipo recuperativo. Os produtos de combustão, após aquecer o ar de combustão, são usados no pré-aquecimento.
3. Encharque – destina-se a manter a tira na temperatura objetivada de encharque durante certo tempo para completar as transformações metalúrgicas. Este compartimento é aquecido por resistências elétricas.

4. Resfriamento – reduz a temperatura da tira. Possui trocadores de calor para baixar a temperatura do gás protetivo (HN) que é soprado sobre a tira.
5. Super-envelhecimento – a tira é mantida por cerca de 3 minutos a temperatura de $400^{\circ}\text{C}/300^{\circ}\text{C}$, para precipitação do carbono dissolvido e adequar as características mecânicas do produto.
6. Resfriamento rápido – para baixar a temperatura da tira até a temperatura ambiente. São usados trocadores de calor semelhantes aos usados no resfriamento.

c) Seção de saída

Tem como finalidade fazer uma inspeção e avaliação da dureza da tira recozida. É a parte final do processo. A Figura 10 apresenta uma visão de uma seção de saída. Basicamente é composta pela torre de acumulação, tesoura e enroladeiras.

Figura 10 – Visão da seção de processo que basicamente é o forno de recozimento no qual pode-se verificar as quatro diferentes seções.

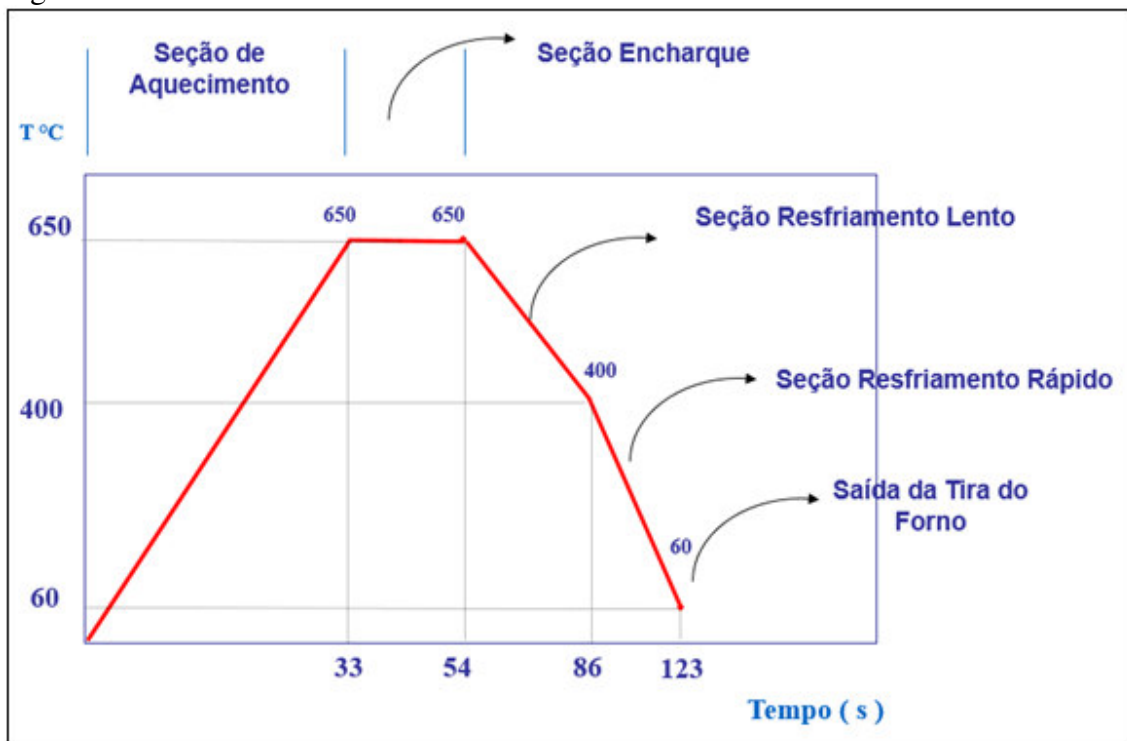


Fonte: DOTTI (1997).

3.2.2.2 Ciclo térmico do recozimento contínuo

A primeira etapa é o aquecimento do material desde a temperatura ambiente até a temperatura de encharque (650°C). A etapa 2 consiste na manutenção do material em temperatura de encharque na temperatura de 650°C por 21 segundos. Dependendo das condições do processo, pode então ocorrer a recristalização seguida de crescimento de grão, que é uma das determinantes das propriedades finais do produto laminado a frio. Já a etapa 3, chamada de resfriamento lento, é realizada a partir da temperatura de encharque até cerca de 400°C levando 32 segundos. Nesta etapa ocorre a homogeneização da precipitação. Após isso temos quarta etapa, a de resfriamento rápido no qual o aço irá de 400°C até 60°C em 37 segundos.

Figura 11 – Ciclo de recozimento contínuo usado na CSN.



Fonte: Adaptado de DOTTI (1997).

3.3 Laminação de Encruamento

Após o recozimento de tiras laminadas a frio é dado um passe de laminação com pequena deformação (encruamento) para eliminar o patamar de escoamento, evitando assim o aparecimento das linhas de Lüders em peças estampadas. A laminação de encruamento ou passe

de encruamento, é uma das etapas mais importantes na fabricação de aços laminados a frio, uma vez que as propriedades mecânicas e fatores geométricos das chapas laminadas a frio são influenciadas por este processo (PINTO, 1985). A laminação de acabamento pode ser feita com o uso de emulsão (úmido), ou sem emulsão (Seco).

Melhora o aspecto superficial imprimindo e/ou acertando a rugosidade da tira e melhora sua limpeza superficial. Tem também a finalidade de fazer o acerto de forma e planidade da tira através do uso de coroamento físico de cilindros e sistemas bending, finalidade de ajustar resistência mecânica de acordo com o grau de dureza requerido e a principal finalidade, que é a eliminação do patamar de escoamento.

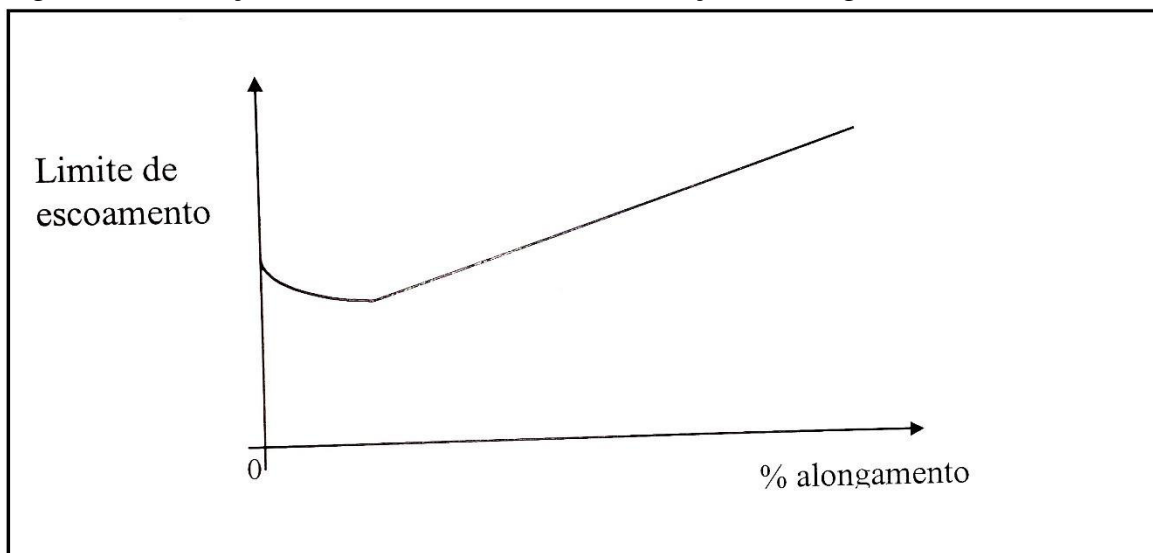
Na laminação de encruamento, determinadas variáveis devem ser mantidas sob controle, por sua influência sobre os resultados, podendo ressaltar:

- a) Diâmetro de cilindros de trabalho;
- b) Espessura da tira;
- c) Alongamento necessário para eliminação do patamar de escoamento;
- d) Velocidade da laminação de encruamento;
- e) Tensões de tração a frente e a ré.

Como consequência da laminação de encruamento, ocorre um aumento da dureza superficial da tira, abaixamento do limite de escoamento, para pequenas reduções e elevação do limite de escoamento, para reduções no encruamento de valores mais elevados, como pode ser observado na Figura 12, onde o limite de escoamento inicialmente decrescia e posteriormente, como aumento da porcentagem do alongamento tornou-se crescente (FANG, 2002).

Isto pode ser explicado pelo fato de o aço, após o recozimento, apresentar estrutura cristalina com pequena quantidade de deslocações. As deslocações, por sua vez, são necessárias para que se provoquem deformações plásticas no material, ou seja, sua inexistência leva a tensões elevadíssimas para que se provoque o escoamento do aço. Assim, à medida em que a redução aumenta, geram-se deslocações, favorecendo a deformação plástica do material, até que o número de deslocações gerado seja alto o suficiente para que comecem a interagir entre si, tendo então sua mobilidade reduzida, quando começam a ser necessárias tensões mais elevadas para que uma deformação plástica apreciável seja dada ao aço (FANG, 2002).

Figura 12 – Variação do limite de escoamento em função do alongamento dado ao material



Fonte: PARGAMONOV (1987).

Da análise do diagrama de variação do limite de escoamento em função da quantidade de alongamento dada a tira na Figura 12, pode-se notar a importância de se trabalhar dentro de uma faixa restrita de alongamento, pois o limite de escoamento é parte integrante da especificação de produto, quanto menor o limite de escoamento (dentro de certos limites) menor poderá ser o esforço para a conformação da chapa (PARGAMONOV, 1987).

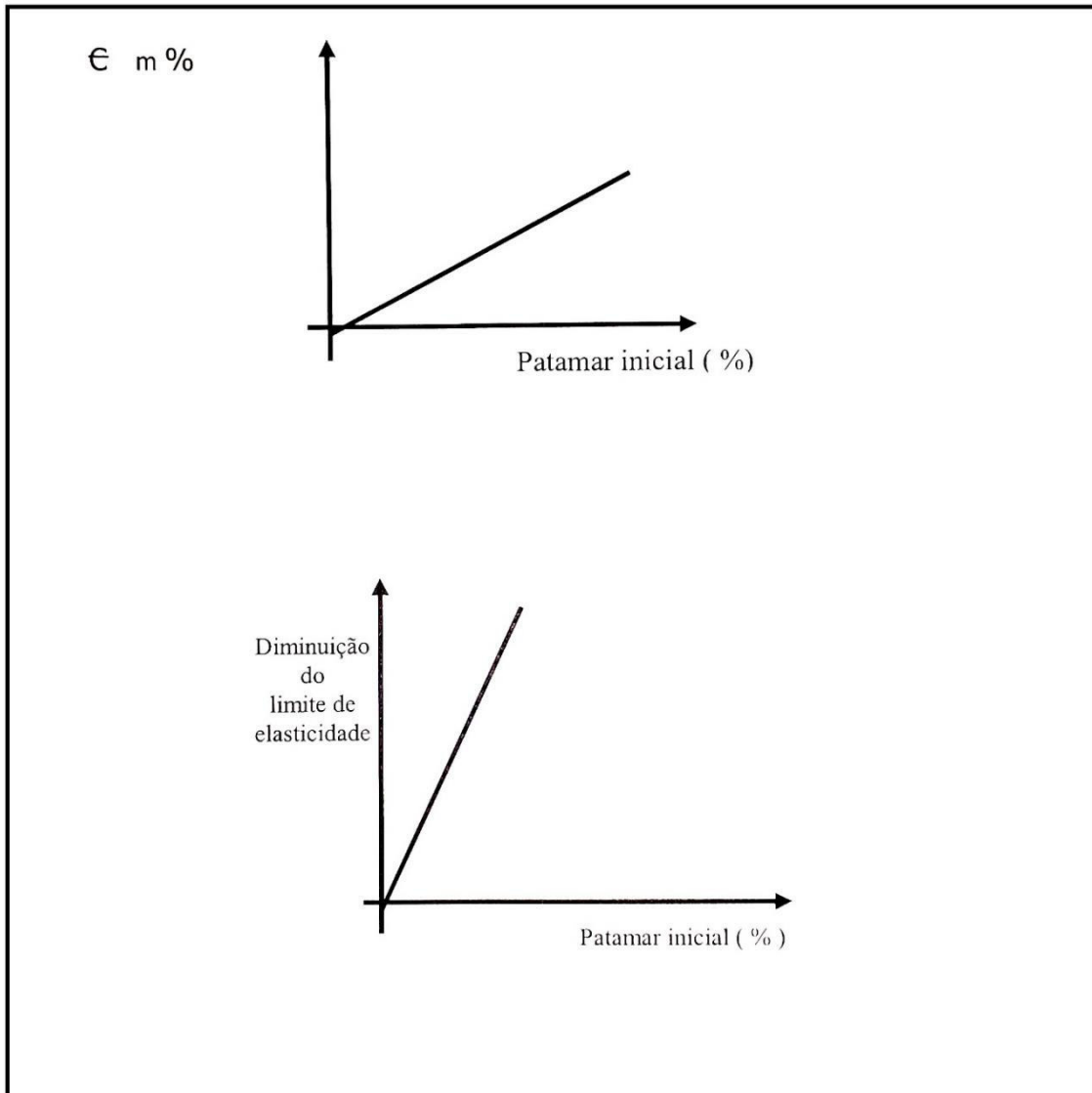
3.3.1 Supressão do patamar de escoamento

A principal finalidade da laminação de encruamento é a eliminação do patamar de escoamento, que ocorre em função da existência de carbono e nitrogênio em solução sólida no aço. Estes elementos ocupam os interstícios na estrutura cristalina do ferro, provocando distorções na rede (LAKE, 1985).

As deslocamentos, como mencionado anteriormente, são responsáveis pela deformação plástica do aço, e por sua vez, também provocam distorções na rede cristalina do ferro. A interação dos campos de distorção provocados tanto pelas deslocamentos como pelos elementos intersticiais carbono e nitrogênio, formam um arranjo mais estável da estrutura, o que levará a formação de uma atmosfera de átomos intersticiais em torno das deslocamentos, o que diminui a mobilidade das deslocamentos quando sujeitas a aplicação de tensões (ALVAREZ, 2004). Assim, diminuindo as tensões, o material passa a encruar com tensões menores e praticamente constantes até o momento em que o aço começa a encruar, quando então, a tensão

de escoamento cresce novamente, sem ocorrência do patamar de escoamento. (LAKE, 1985). Este comportamento pode ser visualizado na Figura 13.

Fig. 13 – Influencia do comprimento do patamar inicial sobre a diminuição do limite de elasticidade (E_m = porcentagem de deformação mínima para eliminação do patamar de escoamento).



Fonte: Adaptado de PARGAMONOV (1987).

A espessura da tira também deve ser levada em consideração, pois, esta determina o comprimento do arco de contato, o esforço de laminação e consequentemente o raio do cilindro deformado.

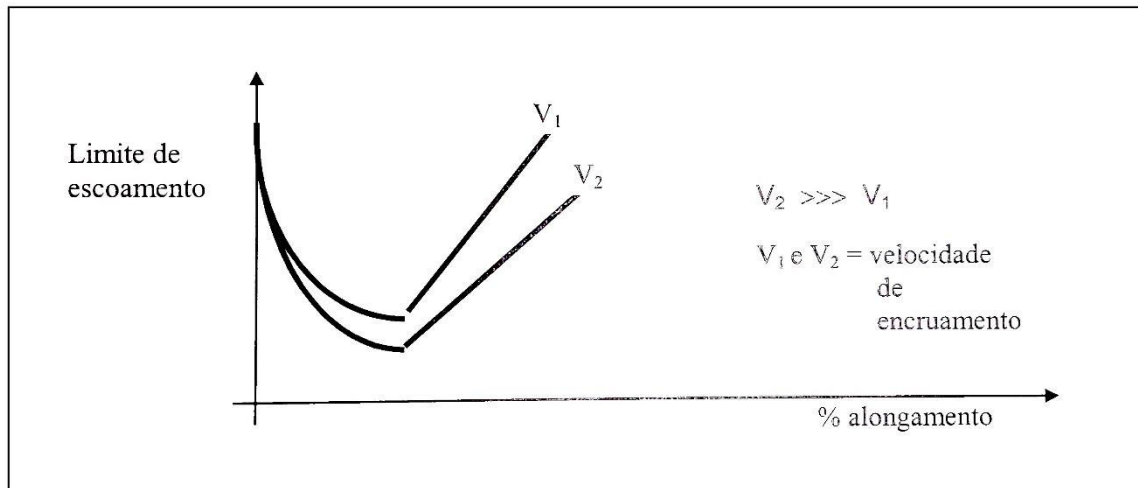
$$l = \sqrt{R' \cdot e \cdot E}$$

l = comprimento do arco

R' = raio do cilindro deformado

As propriedades mecânicas obtidas através de deformação plásticas têm seus valores profundamente alterados pela velocidade de deformação, que no caso do encruamento, pode ser notado através da diminuição do limite de elasticidade quando a velocidade é violentamente aumentada (PARGAMONOV, 1987).

Figura 14 – Influencia da velocidade de encruamento na diminuição do limite de elasticidade.

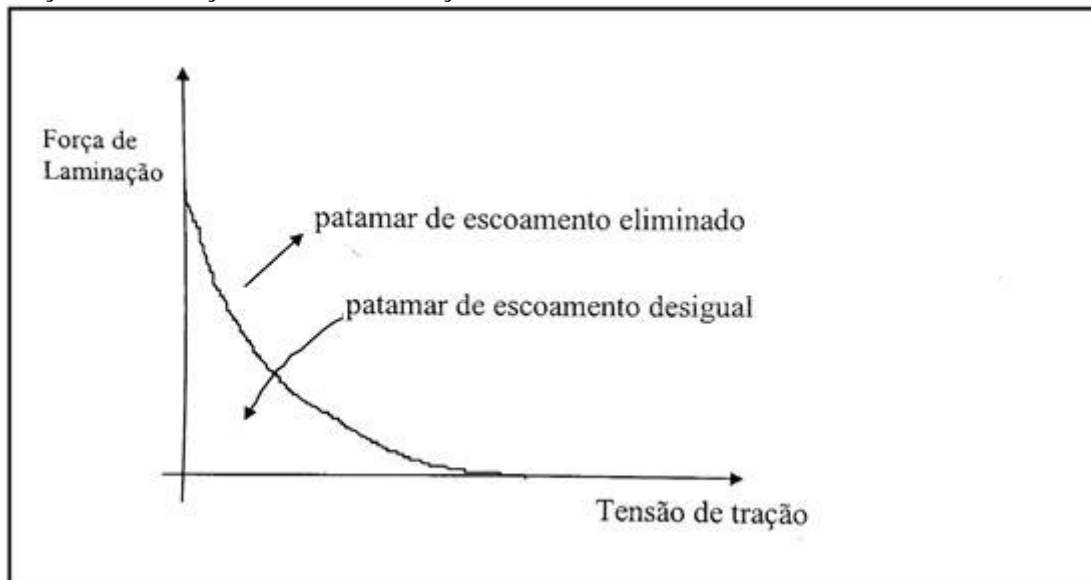


Fonte: Adaptado de FANG (2002).

Conforme já foi dito anteriormente, o processo de laminação consiste basicamente em compressão (força de laminação) e tração (tração de ré e a frente), o que equivale dizer que, para produzir uma mesma deformação, o aumento em tipo de esforço (compressão ou tração) implica na diminuição do outro (FANG, 2002).

Como nosso tema central é encruamento e o objetivo é a eliminação do patamar de escoamento pode-se representar:

Figura 15 – Faixa de patamar de escoamento eliminado e desigual para com relação a força de laminação e tensão de tração.



Fonte: FANG (2002).

3.3.2 Laminação de encruamento a seco (LE2)

É uma boa alternativa na produção tiras que necessitam de um bom acabamento superficial, entretanto essa alternativa exige uma redução na velocidade do processo de laminação (baixa produtividade) a fim de evitar o aquecimento e oxidação dos cilindros devido às altas temperaturas geradas no processo (MOREIRA, 1986).

Com a laminação de acabamento a seco se torna necessário uma maior frequência de troca de cilindros o que se traduz em menor campanha de laminação devido ao intenso desgaste além dos riscos de aparecimento de trincas térmicas. A possibilidade do aumento de rejeições de produtos devido à qualidade irregular no acabamento de superfície também é maior. Estas adversidades acabam se traduzindo em custos elevados, de forma que a laminação a seco é uma prática viável, porém restrições durante sua aplicação devem ser consideradas na escolha deste processo alternativo (MOREIRA, 1986).

3.3.2 – Laminação de encruamento úmido (LE3)

A laminação de encruamento úmido tem o intuito de se eliminar ou minimizar as desvantagens da baixa velocidade de laminação e os problemas intrínsecos da laminação a seco, utiliza-se a emulsão como meio lubrificante e refrigerante.

A laminação com o uso de emulsão permite aumentar de forma significativa a velocidade de processo quando comparada a laminação a seco, entretanto com este tipo de processo tem-se em muitos casos uma tira com um acabamento de superfície pobre (opaco sem brilho) inadequado para determinadas aplicações (MOREIRA, 1986).

A emulsão aplicada no conjunto cilindros/tira durante a laminação deve ser totalmente removida da superfície da tira, sob risco de provocar defeitos na mesma que poderão se manifestarem processos subsequentes. Portanto, quando se utiliza a emulsão tornam-se necessários elevados investimentos na instalação de um eficiente sistema no “corte” (remoção) da emulsão nos laminadores. A fim de se preservar o material contra oxidação deve-se aplicar um filme de óleo de proteção na superfície da tira. Este procedimento minimiza a possibilidade de oxidação da tira, entretanto leva a processos adicionais de desengraxe para a remoção do óleo de proteção durante o uso (MOREIRA, 1986).

3.4 Linha de preparação de bobinas (LPB)

A finalidade desta unidade é a de fazer uma preparação das bobinas para entrada nas linhas de estanhamento. É feito uma apara lateral de modo a que a bobina não tenha imperfeições nas laterais. Todo trecho com imperfeição é eliminado e o corte é estabelecido de acordo com a encomenda.

Pontos importantes na operação de apara lateral:

a) Aplainamento

Cuidar para que não haja rolos fora de nível nem problemas com navalhas ou com os quebradores de rebarba, de modo a se prevenir a formação de ondulos laterais.

b) Limpeza da tira

Mesmas observações feitas sobre contaminação de óleo e graxa nos laminadores de encruamento, aqui permanecem.

c) Informações sobre fora de bitola e número de furos

Em um painel digital são registrados, a cada bobina processada, a metragem total, e a metragem fora de bitola e o número de furos.

Baseado nestas informações é que o operador decide se o material pode seguir ou não.

Para o caso de bobinas estanhadas, esta rotina é de suma importância.

d) Ausência de rebarbas

Manter os quebradores de rebarba ou o eixo de apoio deles em bom estado (superfície). Isto é o bastante para garantia de ausência de rebarba no material. Também as navalhas com corte ruim devem ser trocadas imediatamente.

3.5 Linha de estanhamento eletrolítico (LEE)

A estanhagem eletrolítica é um método de galvanoplastia, que por sua vez trata-se de um processo que cria uma reação química de precipitação de um fino revestimento de metal sobre uma base de outro metal. No caso da estanhagem eletrolítica, a metal base costuma ser o ferro e para a cobertura o estanho. Esse processo possui mais de 200 anos de idade, mas com o tempo, vem sendo aprimorado (DOTTI, 1997).

Resumidamente, o processo eletrolítico consiste processar o aço em bobina por uma série de tanques e unidades colocadas em sequência, fazendo-se o corte do produto no final da linha de acordo com os tamanhos desejados. Em ordem são as seguintes as operações sofridas pela bobina (DOTTI, 1997).

- a) Desbobinamento e solda da ponta de uma bobina à extremidade da precedente;
- b) Limpeza eletrolítica, mediante a passagem do aço em solução alcalina, ficando a bobina positiva ou negativamente eletrizada para maior eficiência da limpeza superficial;
- c) Lavagem para remover restos da solução alcalina;
- d) Decapagem eletrolítica, com solução sulfúrica diluída destinada a remover óxidos superficiais para melhor aderência do revestimento de estanho;
- e) Lavagem para remover vestígios da solução ácida da superfície;
- f) Eletrodeposição, feita em tanques em série, contendo o eletrólito. A bobina é eletrizada negativamente (cátodo) e blocos de estanho são eletrizados positivamente (ânodo). Pela dissolução dos ânodos, o estanho entra em solução e deposita-se uniformemente na superfície da bobina cuja velocidade, correlacionada com a densidade da corrente, controla a espessura desejada do revestimento;
- g) Fusão do revestimento, que consiste em se fundir o estanho recém-depositado a fim de lhe dar brilho característico.
- h) Tratamento eletroquímico superficial, feito em dois tanques contendo solução de ácido crômico e bicromato de sódio; o óxido superficial da fusão é removidos e substituído por outros de composição complexa, e mais adequadas para receber tintas, vernizes, etc., além de concorrerem para maior resistência à corrosão;
- i) Oleamento superficial com óleo de caroço de algodão, feito eletrostaticamente;

j) Operações de acabamento: desempenho, corte nas dimensões, inspeção, desvio de chapas furadas por meio de célula fotoelétrica, desvio de chapas de espessura fora de tolerância por meio de micrômetro automático, empilhamento e contagem das folhas por equipamento eletrônico.

4 METODOLOGIA

O trabalho durante quatro meses na CSN consistiu no acompanhamento de todo o processo de laminação, recozimento e revestimento das bobinas selecionadas. Passando pelas linhas de laminação a frio, recozimento contínuo, recozimento em caixa, encruamento, preparação de bobina, e revestimento. Após o processamento de toda a bobina, eram retiradas amostras de um metro quadrado, ao total foram nove amostras, que eram embaladas e guardadas para posteriormente serem levadas aos laboratórios para os preparos de corpos de prova.

Para os ensaios de tração, foram preparados dois corpos de prova para cada amostra coletada, totalizando 18 corpos de provas com dimensões de 250mm de comprimento e 19mm de largura. Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos do centro de pesquisa e desenvolvimento da CSN, com intuito de obter as propriedades mecânicas principais do material em estudo, como limite de resistência a tração, limite de escoamento e ductilidade (alongamento total). Na tabela abaixo se obtém mais dados sobre o ensaio.

Tabela 1 – Dados sobre valores aplicados no ensaio de tração.

MÁQUINA:	INSTRON 5585H
ESCALA:	3.000 Kgf
EXTENSÔMETRO:	50,0 AVE
VEL. ENSAIO ATÉ LE:	1 mm/min
VEL. ENSAIO APÓS LE:	10 mm/min

Fonte: Própria do autor.

O ensaio de dureza foi realizado em todas as amostras coletadas, utilizando o método rockwell, que é realizado em três etapas. Na primeira, o corpo de prova é submetido a uma pré-carga, garantindo um contato firme do penetrador com a superfície a ser ensaiada. Na segunda, aplica-se a carga maior que, somada à pré-carga, resulta a carga total ou carga nominal do ensaio. Na terceira, retira-se a carga; neste momento, a profundidade da impressão é dada

diretamente no mostrador sob forma de um número de dureza, lido em uma escala apropriada ao penetrador e à carga utilizada. Os ensaios de dureza foram preparados em uma máquina WILSON INSTRON SERIES 2000.

Para caracterização metalográfica, foram preparados três corpos de prova das amostras revestidas coletadas, no qual foram cortadas em pequenas amostras na direção longitudinal para serem embutidas em baquelite através do equipamento Allied Techpress 2. As amostras embutidas foram lixadas com as lixas #220, #320, #400 e #600 e panos de polimento com abrasivo de diamante de 6µm, 3µm e 1µm através do equipamento Struers Abramin. Foram analisadas microscopicamente as três amostras revestidas em um microscópio ótico Olympus. O ataque químico utilizado foi de nital 4% e tempo de ataque entre 20 e 30 segundos.

A determinação do tamanho de grão foi feita através da utilização de um analisador de imagens do tipo QUANTIMET 600 HR. A determinação foi realizada utilizando o método dos interceptos conforme norma ASTM-E-112 (1996).

Das amostras coletadas:

Primeira amostra (A): Material tradicional, já produzido na CSN. Para este material foram feitos processos de laminação a frio, recozimento em caixa e laminação de encruamento a seco e revestimento.

Tabela 2 – Composição química da amostra A.

CARBONO	MANGANÊS	ALUMÍNIO	NITROGÊNIO	ENXOFRE
0,06 máximo	0,30 máximo	0,06	0,006	0,025

Fonte: Própria do autor.

Segunda amostra (B): Material tradicional, já produzido na CSN. Para este material foram feitos processos de laminação a frio, recozimento em caixa e laminação de encruamento a seco e revestimento.

Tabela 3 – Composição química da amostra B.

CARBONO	MANGANÊS	ALUMÍNIO	NITROGÊNIO	ENXOFRE
0,10 máximo	0,50 máximo	0,06	0,006	0,015

Fonte: Própria do autor.

Terceira amostra (C): Material alternativo com 1% de alongamento (aplicado no laminador de encruamento), intuito de comparar com o material tradicional. Para este material foram

elaborados processos de laminação a frio, recozimento contínuo e laminação de encruamento úmido e revestimento.

Tabela 4 – Composição química da amostra C.

CARBONO	MANGANÊS	ALUMÍNIO	NITROGÊNIO	ENXOFRE
0,06 máximo	0,30 máximo	0,06	0,006	0,025

Fonte: Própria do autor.

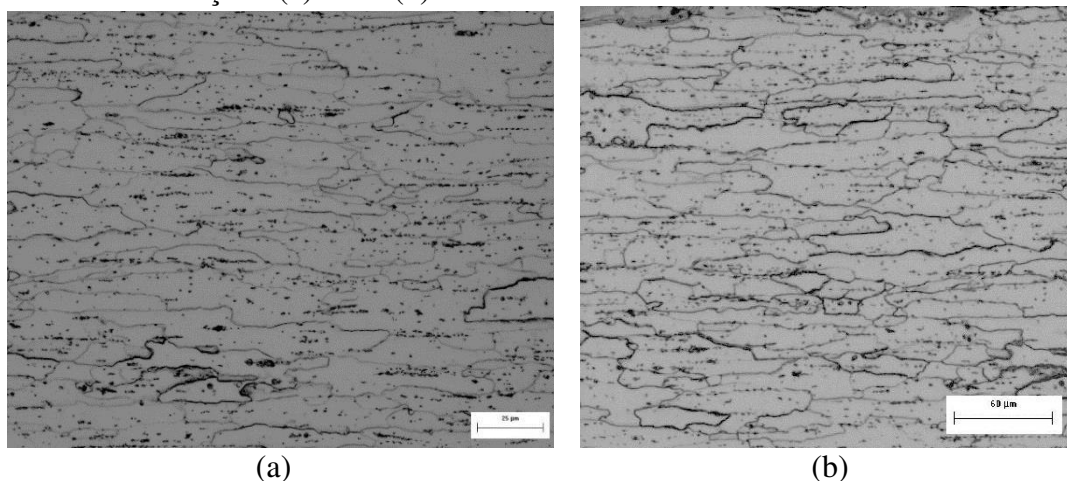
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL

Podemos observar nas Figuras 16 a 18 onde são apresentadas as metalografias das amostras A, B e C, o comportamento da evolução microestrutural das três amostras revestidas em estudo. Amostras A e B de materiais tradicionais (já produzidos na CSN) submetidas a tratamento térmico de recozimento em caixa e encruamento a seco, e para a amostra C (material alternativo) foram submetidas a tratamento térmico de recozimento contínuo e encruamento úmido. Vale ressaltar que também foram retirados valores de tamanho de grãos para cada amostra, sendo que este é um fator importante para avaliar as propriedades mecânicas de um material, em especial a dureza e o limite de escoamento.

5.1.1 Amostra A – Tamanho de grão: 9,1 ASTM.

Figura 16–Micrografias da amostra após o revestimento por estanhamento eletrolítico do aço A (a) 500x (b) 200x.

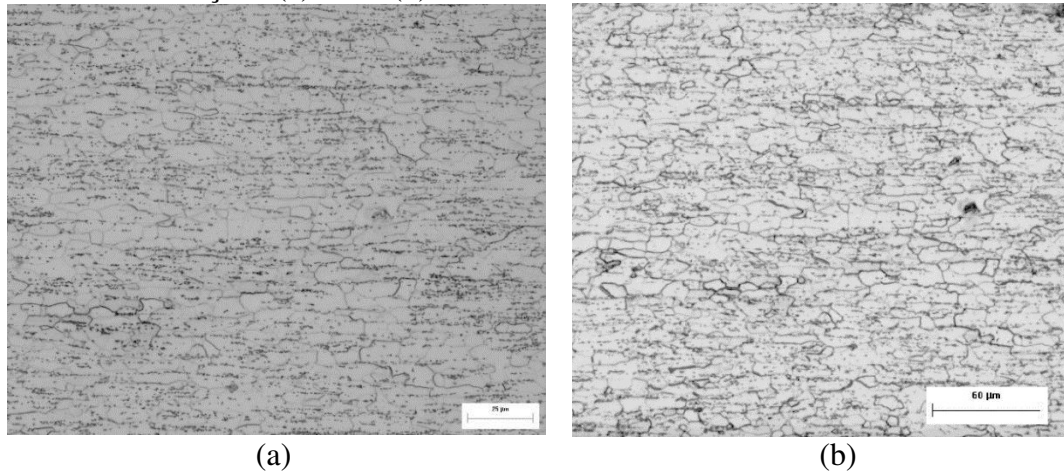


Fonte: Própria do autor.

As amostras da Figura 16, apresentam grãos ferríticos alongados com uma microestrutura bastante homogênea associado a regular quantidade de cementita em alinhamento com a matriz.

5.1.2 Amostra B - Tamanho de grão: 10,2 ASTM.

Figura 17– Micrografias da amostra após o revestimento por estanhamento eletrolítico do aço B (a) 500x (b) 200x.

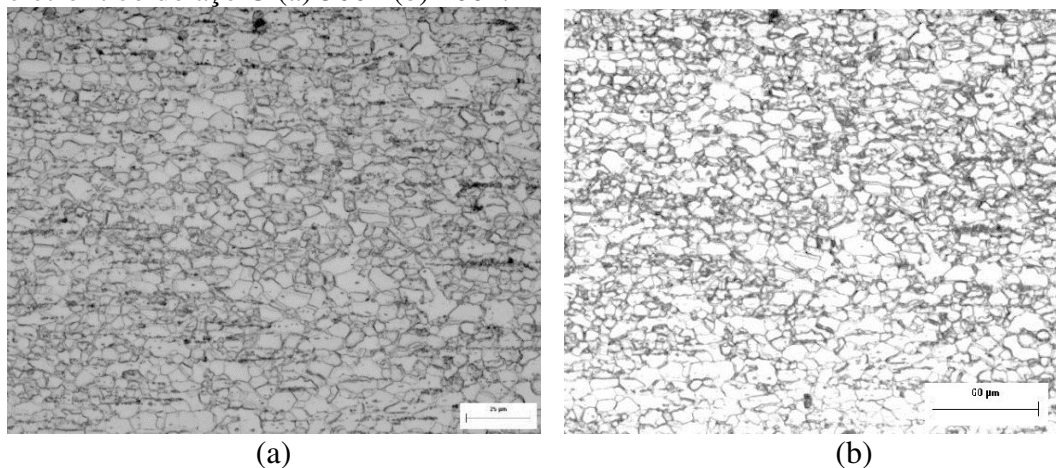


Fonte: Própria do autor.

As amostras da Figura 17, apresentam grãos ferríticos poligonais em uma microestrutura heterogênea associada a regulares quantidade de cementita em alinhamento na matriz.

5.1.3 Amostra C - Tamanho de grão: 12,2 ASTM.

Figura 18– Micrografias da amostra após o revestimento por estanhamento eletrolítico do aço C (a) 500x (b) 200x.



Fonte: Própria do autor.

A última amostra apresenta grãos ferríticos poligonais em uma microestrutura heterogênea associada a regulares quantidade de cementita em alinhamento na matriz.

Observa-se claramente uma diferença entre os refinamentos de grãos ferríticos de cada microestrutura, embora varie em uma morfologia poligonal e alongada. No geral foram obtidas microestruturas muito semelhantes, diferindo apenas no tamanho dos grãos, com exceção da amostra A, no qual observou-se um aumento da deformação dos grãos de ferrita na direção principal de laminação (longitudinal), gerando um formato alongado. Essa maior intensidade de deformação pode ser explicada devido a amostra A apresentar grãos mais grosseiros, facilitando a deformação dos grãos ferríticos, deixando-os alongados. Quanto mais grosseiros os grãos, maior será a ausência de obstáculos como contornos de grãos com orientações cristalográficas distintas gerando menores intercepções de linhas de discordâncias na estrutura do aço, facilitando assim o estiramento do grão no sentido de deformação.

Um fator importante a se notar é que existe decréscimo no valor do tamanho de grão para as amostras A e B com relação a amostra C, isso ocorreu devido ao tratamento de recozimento em caixa apresentar um maior ciclo de recozimento, apresentando uma recristalização mais homogênea no material e consequentemente obtendo um maior crescimento dos grãos, diferente do que ocorreu na amostra C que não apresentaram potencial termodinâmico suficiente para a recristalização em todo o material no tratamento de recozimento contínuo aplicado, apresentando assim uma microestrutura com grãos mais finos.

5.2 Ensaio mecânico

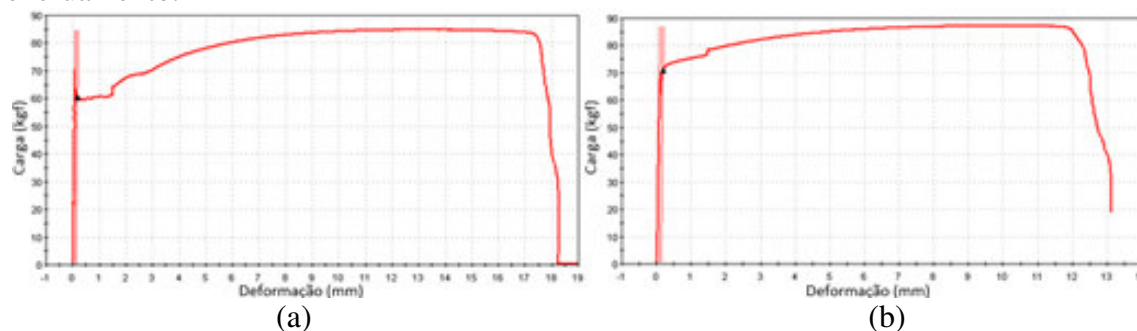
5.2.1 Gráficos

As propriedades mais importantes para avaliação da estampagem de um aço são obtidas através do ensaio de tração no material, onde os corpos de prova são submetidos a forças de tração uniaxial levando a se romper.

Limite de escoamento, Limite de resistência, ductilidade (alongamento total) e dureza são as principais propriedades mecânicas dos materiais em estudo.

As Figuras 19 a 21 são apresentadas as curvas tensão x deformação de engenharia para as amostras A, B e C. Nas figuras, a carga aplicada é dada em quilograma força e a deformação é dada em milímetros.

Figura 19 – Gráfico do comportamento da carga aplicada no material em função da deformação na amostra A (a) Amostra antes de ser encruada (b) Amostra após encruamento.

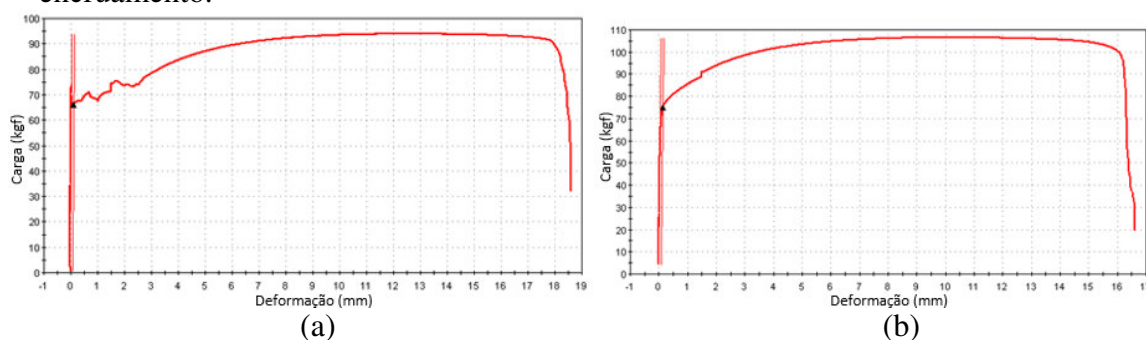


Fonte: Própria do autor.

Para a figura 19 (a) pode-se notar com clareza onde se localiza o patamar de escoamento da amostra antes de se encruada. A presença do patamar de escoamento permite uma fácil identificação da tensão de escoamento superior e inferior.

Para amostra após o encruamento na figura 19 (b), podemos observar que foi eliminado o patamar de escoamento, graças a operação de encruamento do aço. A tensão de escoamento da figura 19 (b) só é identificada devido a uma deformação específica residual convencional de 0,2% também chamada de 2 por mil.

Figura 20 – Gráfico do comportamento da carga aplicada no material em função da deformação na amostra B (a) Amostra antes de ser encruada (b) Amostra após encruamento.

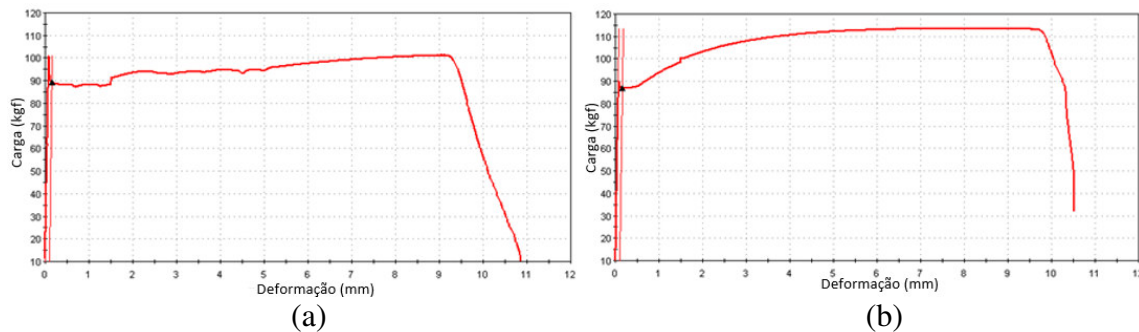


Fonte: Própria do autor.

Nota-se que no gráfico da amostra antes do encruamento da Figura 20 (a) é possível localizar com facilidade o patamar de escoamento, que se localiza em torno de 0 a 2,3 mm, permitindo uma fácil identificação do limite de escoamento superior e inferior. Para o gráfico após o encruamento da Figura 20 (b) a tensão de escoamento só é identificada por uma deformação específica residual convencional de 0,2%.

Os gráficos da amostra A muito se assemelham com os da amostra B, isso se deve porque foram aplicados os mesmos processos de recozimento em caixa e de laminação de encruamento.

Figura 21 – Gráfico do comportamento da carga aplicada no material em função da deformação na amostra C (a) Amostra antes de ser encruada (b) Amostra após encruamento.

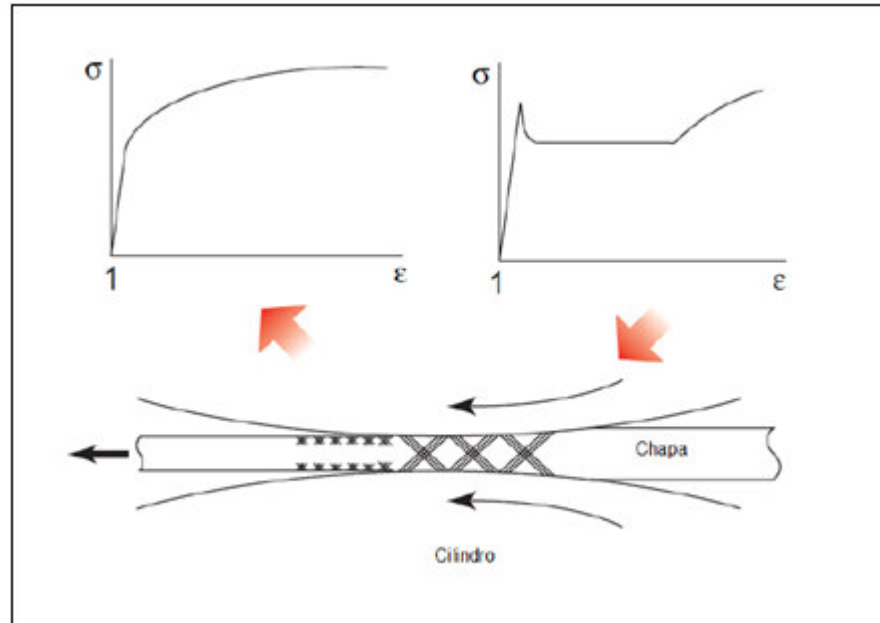


Fonte: Própria do autor.

O gráfico da amostra C antes do encruamento na Figura 21 (a) são visualmente diferentes das amostras anteriores A e B, apresentando pequenas oscilações devido a variações de tensões. Essas variações de tensões ocorreram devido ser aplicado um processo de recozimento contínuo na amostra C, sendo um processo com um ciclo de recozimento menos intenso que no recozimento aplicado nas amostras A e B, quanto menor o ciclo de recozimento menos uniforme será a amostra, produzindo um crescimento desigual entre os grãos, afetando as tensões geradas no gráfico (a). Após o encruamento na Figura 21 (c) nota-se um gradual decréscimo nas oscilações devido ao passe de laminação com pequena deformação aplicada no encruamento, influenciando na eventual saída da linha de Lüders no aço.

Um ponto importante que não foi comentado sobre os gráficos, foi da eliminação do patamar de escoamento, onde se localizam as linhas de Luders. A eliminação do patamar de escoamento ocorreu em todas as amostras após o encruamento, podendo ser observadas nas Figuras 19,20 e 21. Essa eliminação do patamar, não ocorreu de forma involuntária, ela era prevista para evitar o defeito chamado de “estrias”, também conhecido como linhas ou banda de Lüders que se localizam no patamar de escoamento. A eliminação desse defeito pode ser melhor visualizada na Figura 22.

Figura 22 – Ilustração esquemática da formação de bandas de Lüders no passe de encruamento



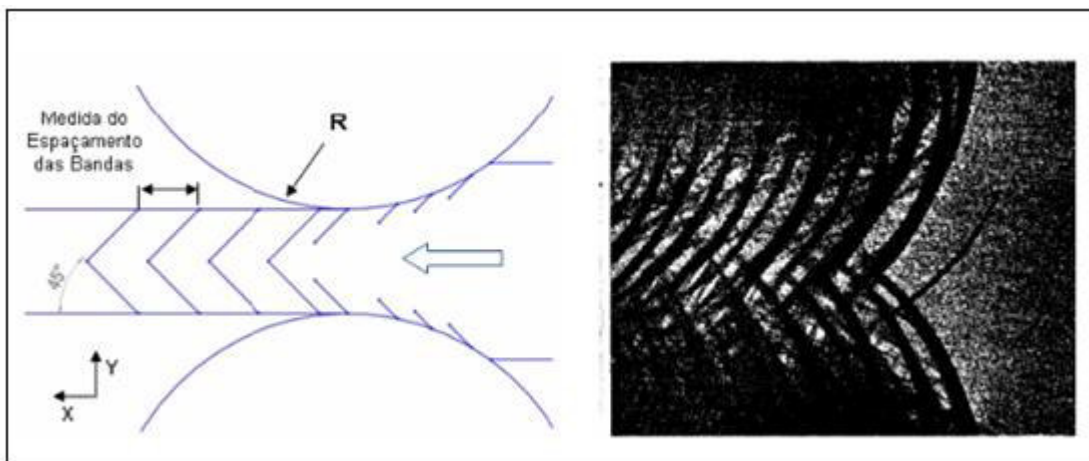
Fonte – YOSHIDA (2008).

Para eliminação deste defeito ocorreu devido a uma nucleação de uma grande quantidade de bandas de Lüders através de contato entre cilindro e chapa ou que também é chamado de laminação de encruamento (YOSHIDA, 2008).

As bandas de Lüders se iniciam na superfície do material e se propagam em direção ao centro do material em uma inclinação de 45°. Resultando, assim como no ensaio de tração, em uma distribuição de deformações bastantes heterogenias, como pode ser observado na Figura 23.

Pode haver uma repentina queda de tensão quando uma banda de deformação se forma devido a periodicidade das bandas. 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 (FERNANDES, 2007).

Figura 23 – Ilustração esquemática da propagação das bandas de Lüders durante o passe de encruamento.



Fonte: (FERNANDES, 2007).

5.3 Propriedades mecânicas

As tabelas 5 a 10 mostram a evolução das propriedades mecânicas das amostras analisadas em cada etapa após a laminação a frio. No qual para cada processo se tem a comparação das amostras de cada linha em função do tipo de recozimento ou encruamento aplicado. Os resultados obtidos nas tabelas são de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento (AL) e dureza rockwell.

5.3.1 Resultados das amostras antes do encruamento

Tabela 5 – Valores de propriedades mecânicas das amostras A e B depois de ser processada na linha de recozimento em caixa.

	Le(Mpa)	Lr (MPa)	Al (%)	Dureza (Rockwell)
Amostra A	280,51\233,81	319,49	36,52	48,3
Amostra B	261,69\235,30	334,5	37,18	52,43

Fonte: Própria do autor.

Tabela 6 – Valores de propriedades mecânicas da amostras C depois de ser processada na linha de recozimento contínuo.

	Le(Mpa)	Lr (MPa)	Al (%)	Dureza (Rockwell)
Amostra C	383,27\331,26	384,80	21,8	61

Fonte: Própria do autor.

5.3.2 Resultados das amostras depois do encruamento

Tabela 7 – Valores de propriedades mecânicas das amostras A e B depois de ser processada na linha de encruamento a seco.

	Le(Mpa)	Lr (MPa)	Al (%)	Dureza (Rockwell)
Amostra A	269,77	331,64	26,26	55
Amostra B	254,45	362,44	33,18	58,47

Fonte: Própria do autor.

Tabela 8 – Valores de propriedades mecânicas da amostra C depois de ser processada na linha de encruamento a úmido.

	Le(Mpa)	Lr (MPa)	Al (%)	Dureza (Rockwell)
Amostra C	325,68	430,16	21,02	61

Fonte: Própria do autor.

5.3.3 Resultados das amostras revestidas

Tabela 9 – Valores das propriedades mecânicas das amostras A e B depois de ser processada na linha de estanhamento eletrolítico.

	Le(Mpa)	Lr (MPa)	Al (%)	Dureza (Rockwell)
Amostra A	270,74	337,96	32,78	55,7
Amostra B	252,54	376,99	35,44	57,76

Fonte: Própria do autor.

Tabela 10 – Valores das propriedades mecânicas da amostra C depois de ser processada na linha de estanhamento eletrolítico.

	Le(Mpa)	Lr (MPa)	Al (%)	Dureza (Rockwell)
Amostra C	358,71	427	20,10	61

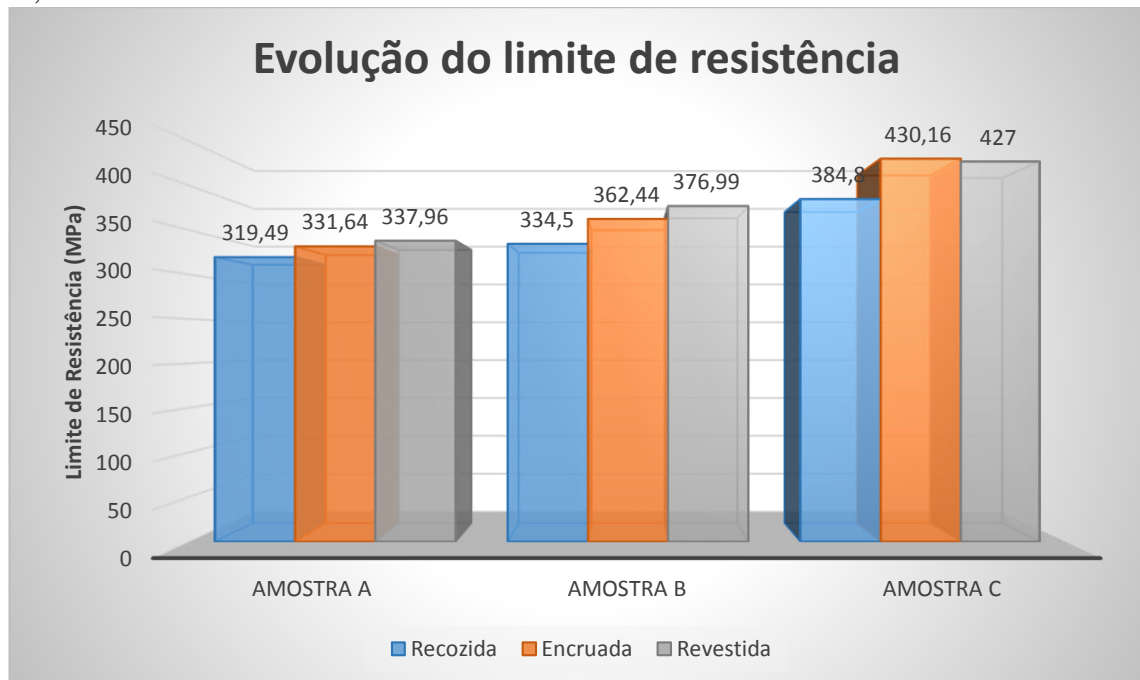
Fonte: Própria do autor.

5.3.4 Gráficos gerados

Os gráficos a seguir mostram a evolução das propriedades mecânicas para cada processo acompanhado. O intuito é mostrar como se comporta as propriedades mecânicas com a variação de processo de encruamento entre a amostra produzida na CSN de forma tradicional (com encruamento a seco) e a amostra produzida de forma alternativa (encruamento úmido).

Os parâmetros obtidos nos ensaios de tração, foram estabelecidos devido a significativas correlações entre os seus valores e o comportamento na estampagem (etapa posterior das bobinas revestidas). A estampabilidade se eleva para uma ductilidade maior associada a um limite de resistência maior e um limite de escoamento menor. Considerando também que o limite de escoamento é parte integrante da especificação de produto na CSN, pois, quanto menor o limite de escoamento (dentro de certos limites) menor poderá ser o esforço para a conformação da chapa.

Figura 24 – Evolução do limite de resistência para cada processo aplicado nas amostras A, B e C.

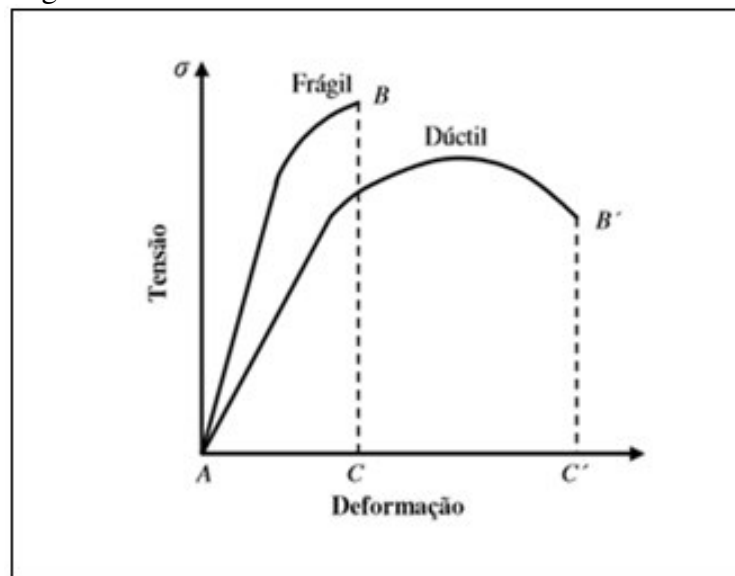


Fonte: Própria do autor.

Resistência à tração é raramente usada no projeto de corpos dúcteis devido apresentarem uma grande capacidade de suportar deformação plástica sob a ação de cargas sem se romper ou fraturar, mas é uma importante propriedade mecânica para saber em qual faixa de tensão pode ser aplicada na conformação do material.

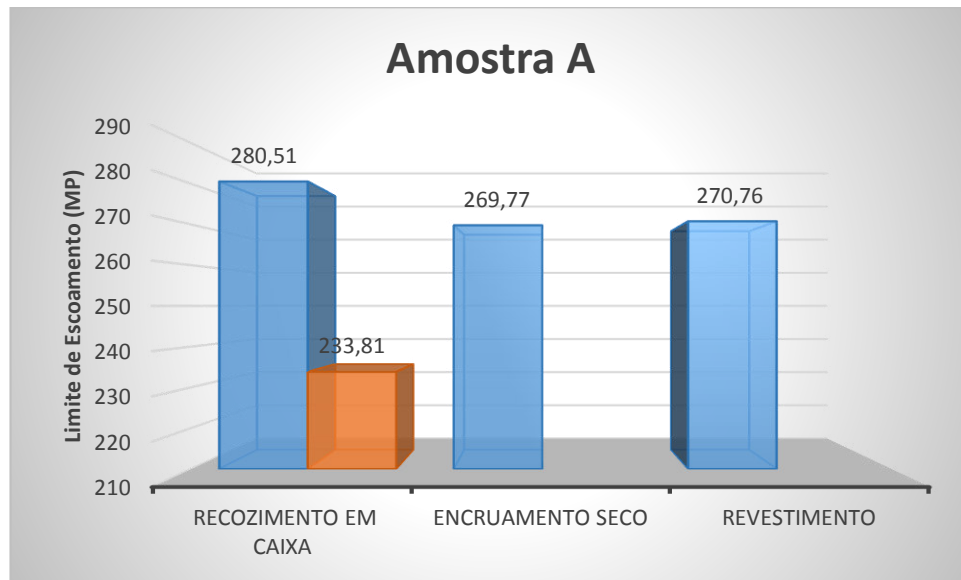
Como observado nos gráficos da figura 24, as amostras A e B se mantêm muito semelhantes sobre a variação de crescimento entre os limites de resistência para cada processo, apresentando uma mudança de variação apenas na amostra C, no qual passou por processo de encruamento úmido. Nota-se também um crescimento linear no LR para cada amostra, isso ocorreu devido cada amostra apresentar tamanhos de grãos diferentes. Nota-se que as amostras com grãos mais refinados apresentaram propriedades de limite de resistência superiores. O refino dos grãos infligira em uma maior quantidade de contornos, o que irá dificultar a movimentação de discordâncias (DIETER, 1988). Esta dificuldade de movimentação de discordâncias implicará em um material mais frágil, e essa maior fragilidade irá afetar o comportamento do limite de resistência, como podemos observar na Figura 25.

Figura 25 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis.



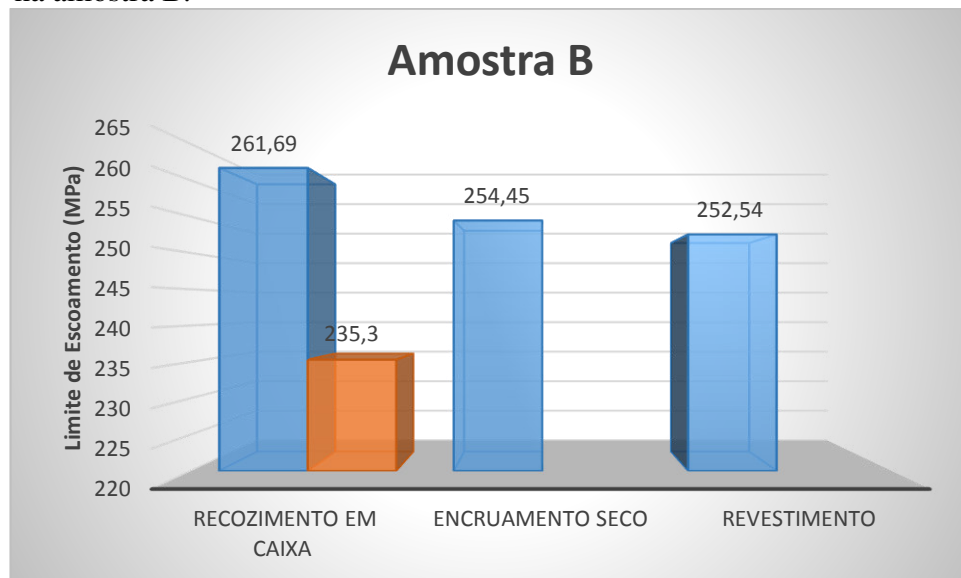
Fonte: Adaptado de GARCIA (2000).

Figura 26 – Evolução do limite de escoamento para cada processo aplicado na amostra A.



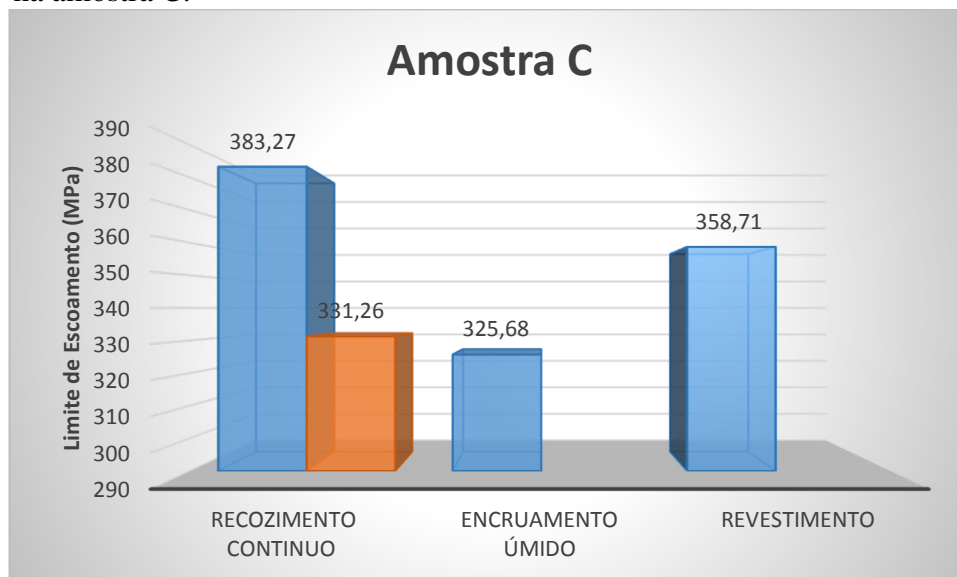
Fonte: Própria do autor.

Figura 27 – Evolução do limite de escoamento para cada processo aplicado na amostra B.



Fonte: Própria do autor

Figura 28 – Evolução do limite de escoamento para cada processo aplicado na amostra C.



Fonte: Própria do autor.

Os ensaios de tração das amostras A e B mostraram valores de limite de escoamento semelhantes entre os processos sendo que há uma certa variação entre a amostra recozida e a encruada. A amostra encruada apresentou uma pequena redução da propriedade mecânica. O posterior revestimento do material não resultou numa variação abrupta do limite de escoamento.

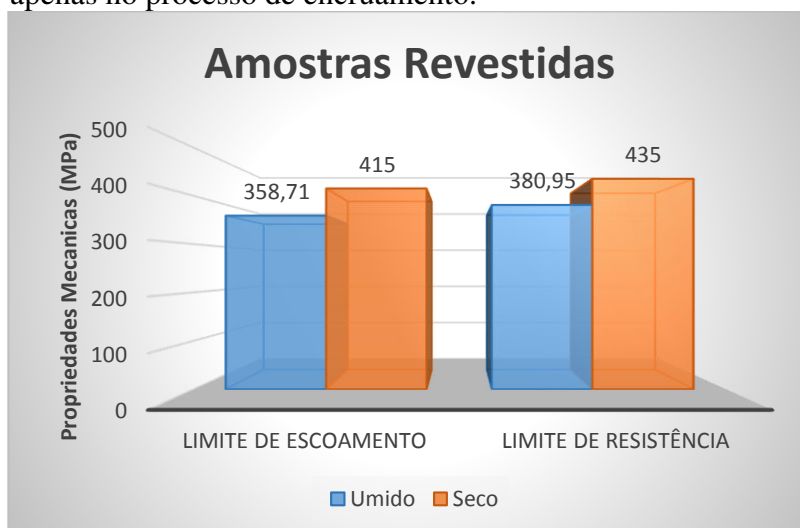
Para os ensaios de tração da Figura 28 da amostra C, pode-se notar uma grande variação do limite de escoamento entre os processos de recozimento e encruamento, no qual apresentou uma queda no limite de escoamento. O revestimento no material C resultou em uma variação abrupta do limite de escoamento, isso ocorreu devido o carbono não estar dissolvido na amostra ao processar na linha de estanhamento, ocorrendo o envelhecimento na amostra, elevando consideravelmente a dureza e consequentemente o limite de escoamento.

É importante ressaltar que este resultado só foi obtido devido todo o processo ser trabalhado dentro de uma faixa restrita de alongamento (para as amostras testadas foi em torno de 1%), para reduções no encruamento com valores mais elevados no alongamento ocorre uma elevação do limite de escoamento. Isto pode ser explicado pelo fato de o aço, após o recozimento, apresentar estrutura cristalina com pequena quantidade de discordâncias. Assim, à medida em que a redução aumenta, geram-se mais discordâncias, até que a densidade de discordâncias seja alta o suficiente para que comecem a interagir entre si, tendo então sua mobilidade reduzida, quando começam a ser necessárias tensões mais elevadas para que uma deformação plástica apreciável seja dada ao aço.

Outro ponto importante a citar é a diferença entre os processos de encruamento, no qual para o processo de encruamento úmido demonstra queda abrupta do LE, diferente das amostras A e B que demonstraram uma leve queda do LE. Essa diferença de variação no limite de escoamento, só ocorreu devido as diferenças dos cilindros da primeira cadeira das linhas de encruamento, no qual a alta rugosidade dos cilindros jateados empregados no encruamento a seco promoveu uma deformação superficial muito mais intensa do que a obtida com cilindros apenas retificados do processo úmido, essa maior deformação superficial alterou significativamente as propriedades mecânicas do material, principalmente no limite de escoamento.

Quanto mais deformado o material, mais duro ele fica devido a maior introdução de obstáculos (discordâncias), elevando o limite de escoamento. Essa diferença pode ser melhor observada, na Figura 29 onde é possível visualizar a diferença entre as propriedades mecânicas de um aço que foi produzido por encruamento seco (aço já produzido tradicionalmente pela CSN), e um aço com a mudança no processo para encruamento úmido (aço produzido de forma alternativa, amostra C).

Figura 29 – Comparação de propriedades mecânicas entre amostras produzidas na CSN pelos mesmos processos, diferindo apenas no processo de encruamento.



Fonte: Própria do autor.

6 CONCLUSÃO

Foram elaborados ensaios metalográficos nas amostras revestidas, no qual apresentaram microestruturas muito semelhantes, diferindo apenas nos tamanhos de grãos, com exceção da amostra A (recozida pelo caixa), no qual observou-se um aumento da deformação dos grãos de ferrita na direção principal de laminação (longitudinal), gerando um formato alongado. Essa maior intensidade de deformação pode ser explicada devido a amostra A ser processada pela linha de recozimento em caixa, no qual tem um ciclo de recozimento mais elevado comparado com processo contínuo, apresentando maior potencial termodinâmico para recristalização, gerando grãos mais grosseiros, facilitando a deformação dos grãos ferríticos.

Com o ensaio mecânico foi possível analisar a evolução das propriedades mecânicas para cada processo, e dentre estes se destacaram as variações dos processos de encruamento a seco (usado para material tradicional) e do encruamento úmido (usado para material alternativo) no qual apresentaram uma grande variação nas propriedades mecânicas devido aos cilindros de trabalho empregados na primeira cadeira de laminação de encruamento. A baixa rugosidade dos cilindros retificados, empregados no encruamento úmido, promoveu uma deformação menos intensa do que os cilindros jateados do processo a seco, alterando significativamente as propriedades mecânicas, em especial do alongamento e do limite de escoamento.

A alteração dos processos de fabricação do material tradicional produzido por recozimento em caixa e encruamento a seco pelo processo alternativo de recozimento contínuo e encruamento úmido, se mostrou eficiente, tendo seus resultados confirmados pela evolução das propriedades mecânicas. Foi demonstrado ser possível uma substituição do material alternativo pelo material tradicional no qual ocasionaria uma otimização do tempo de processamento das bobinas com um menor consumo de energia, causando um impacto significativo na produtividade e no custo final das bobinas.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, M.A.V. Effect of processing conditions on mechanical properties of interstitial free steel. **Steel Research International**, v.75, n.6, p.411-418, may 2004.
- BRESCIANI, Ettore; ZAVAGLIA, Cecilia. **Conformação Plástica dos Metais**. 5.ed. Campinas: Editora Unicamp, 1997.
- 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.15, n.1, p.671-678, abr. 1984.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CORASSINI, E. **Influência do grau de encruamento e tratamentos térmicos de recozimento nas propriedades mecânicas do aço abnt 1006**. 2012. 75f. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo, 2012.
- DOTTI, B. **Recozimento HPH em bobinas de chapas. Manual de instalação planta CSN**. São Paulo: Brasimet, 1997.
- DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**, SI metric ed. Singapore: McGraw-Hill, 1988.
- FANG, R.B.; EVANS P.R. Effect of temper rolling on tensile properties of C-Mn steels. **Materials Science and Technology**, v.18, n.3, p.285-288, mar. 2002.
- FERNANDES, R.C. **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**. 2007.93f Tese (Mestrado) – UFMG, Minas Gerais, 2007.
- GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaaios dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- GOODMAM, S.R.; CHAUDHRY, A.R. Recrystallization Behavior and Tensile Properties of Continuous Annealed High-Strength Cold Rolled Steel Sheets Containing Columbium and Titanium. In: International Rolling Conference, 6., 1984, Dallas, **Symposium on metallurgy of continuous annealed sheet steel**, Warrendale: AIME, 1984. p.229-247.
- LAKE, J.S.H. Control of Discontinuous Yelding by Temper Rolling. **Journal of Mechanical Working Technology**, [s.l.], 10 nov.1985. v.12, p.35-66.
- LINHARES, N.J. **Manual de treinamento da Linha de Recozimento Continuo de Chapas**. Volta Redonda: CSN, 1994.
- MOREIRA, D. **Estudo das variáveis de processo que influenciam nas propriedades das folhas metálicas**. 1986. 151f. Tese (mestrado) - UFMG, Belo Horizonte, 1986.
- PADILHA, A.F.; SICILIANO Jr., F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. São Paulo: ABM, 1996.

PARGAMONOV, E.A.; NESTERENKO, A. M.; MAZUR, V.L. Influence of temper rolling conditions on mechanical properties and structure of low carbon steel. **Steel in the USSR**, v.17, n.6, p268-270, may 1987.

PINTO, M.C. **Laminação a frio com pequenas reduções**. 1985. 98f. Tese (Mestrado) – UFMG, Belo Horizonte, 1985.

PLAUT, R.L. **Laminação dos Aços – Tópicos Avançados**. São Paulo: ABM, 1984.

PRADHAN, R. High Strength\High Yield-Ratio Cold-Rolled Steels Produced by Continuous Annealing. **Scandinavian journal Metallurgy**, v.13, n.5, p.298-307, may 1984.

YOSHIDA, F. YAMAMOTO, S. A plasticity model describing yield-point phenomena of steels and its application to FE simulation of temper rolling. **International Article of Plasticity**, v.24, n.10, p.1792–1818, aug. 2008.