PMT 2404 – TRANSFORMAÇÃO MECÂNICA I

Recozimento de bobinas

NOME	NºUSP
Carlos Eduardo Rizzo e Silva	5692666
Danilo César Silva Gonçalves	5944617
Eduardo Hideki Shimojo	6520596
Guilherme Shimizu	5944916
Iara Beatriz Braga Luz	5947429
Renato Hamakawa Ito	6482138

EPUSP

2011

Sumário

1. Introdução 1

2. Conceitos 3

2.1 – Deformação a frio – O Estado Encruado 3

2.2 – Energias de defeito de empilhamento 4

2.2.1 – Defeitos puntiformes 5

2.2.2 - Tamanho de grão inicial 6

2.2.3 - Temperatura e velocidade de deformação 6

2.3 - Recozimento 8

2.3.1 - Recuperação 8

2.3.2 - Recristalização 11

2.3.2.1 - Formação das regiões recristalizadas 11

2.3.2.2 – Heterogeneidades de deformação 13

2.3.2.3 - O efeito do tempo e da temperatura de recristalização 13

2.3.2.4 - O efeito do grau de deformação na recristalização 15

2.3.2.5 - O tamanho de grão recristalizado 16

2.3.2.6 - Pureza ou composição do metal 19

2.3.2.7 - O tamanho de grão inicial 19

2.3.2.8 - Cinética de Recristalização 20

2.3.2.9 – Recristalização de Ligas na Presença de Segundas Fases 20

2.4 - Crescimento de grão 21

3. Recozimento 24

3.1 - Recozimento em caixa 25

3.1.1 - Equipamentos 25

3.1.2 - Bases 26

3.1.3 - Campânulas 27
3.1.4 - Fornos 30
3.1.4.1 - Fornos estacionários 30
3.1.4.2 - Fornos portáteis 30
3.1.5 - O processo de recozimento 32
3.1.6 - Recozimento em “bobina aberta” 34
3.2. Recozimento contínuo 36
3.2.1 - Equipamento 37
3.2.2 - O Processo 38
3.2.3 - Variantes do processo 41
3.2.4 - Forno horizontal 42
3.3 - Alternativas 42
3.4 - Principais Tipos de Defeitos 43
3.5 - Atmosferas protetoras 44
3.5.1 - Tipos de Atmosferas Protetoras 46
3.5.2 - Combustão completa de gás combustível 47
3.5.3. Combustão completa de gás combustível seguida da eliminação do CO2 e H2O 47
3.5.4. Combustão incompleta de gás combustível (DX – gás desoxidante) 49
3.5.5. Combustão completa de gás combustível seguida da eliminação do C02 e H20 51
4. Modelamento Matemático 55
4.1 - Aplicação do Método das Diferenças Finitas 57
4.2 - Simplificações aplicadas 58
4.2.1 - Bobinas de Tamanhos Diferentes 58
4.2.2 - 3 ou 4 bobinas a uma Única Bobina 59
4.2.3 - Placa enrolada 60
4.2.4 - Aquecimento tridimensional 60

4.2.5 - Uma bobina pode ser entendida como uma placa grossa 61

4.2.6 - Temperatura da parte interna da bobina é diferente da temperatura da parte externa 62

4.2.7 - Condutividade térmica (k) varia com a temperatura.....62

4.3 - Ciclo de temperaturas de um forno de recozimento 63

4.4 - Aplicação das equações após as simplificações 64

4.5 - Resultados obtidos 66

5. Acabamento de produtos planos.....70

5.1 - Manuseio de bobinas.....70

5.2 - Acabamento de chapas finas 71

5.3 - Linha de tesouras 72

5.4 - Linhas de corte para material laminado a quente.....73

5.5 - Linhas de corte para chapas laminadas a frio 75

5.6 - Aplainamento.....75

5.7 - Estiramento 76

6. - Conclusão 77

7.- Bibliografia 78

Figura 1. Simplificação de uma bobina em uma placa 2
Figura 2. Esquematização de um passe de laminação destacando a deformação a frio (modificação de tamanho e formato dos grãos) e as energias envolvidas no processo.....4
Figura 3. Arranjos de discordâncias em metal com (a) baixa energia de defeito de empilhamento e (b) alta energia de defeito de empilhamento. Note a presença de células de deformação no metal com alta energia de defeito de empilhamento. 5
Figura 4. Realinhamento de discordâncias em cunha durante a poligonização. (a) as discordâncias em excesso que permanecem nos planos ativos de escorregamento após o cristal ser fletido e (b) o rearranjo das discordâncias após a poligonização. ...9
Figura 5. Rearranjo de discordância e formação de estrutura celular de discordâncias. 10
Figura 6.Coalescimento de subgrãos por intermédio da rotação de subgrãos. 13
Figura 7. Curvas de transformação isotérmica de recristalização para o cobre puro (99,999% de cobre) laminado a frio com 98% de redução em espessura. 14
Figura 8. Inverso da temperatura absoluta (K) em função do tempo para 50% de fração recristalizada do cobre puro. 15
Figura 9. Relação tempo e temperatura para a recristalização de zircônio correspondendo a dois diferentes graus de deformação no trabalho a frio.....16
Figura 10. Efeito do trabalho a frio no tamanho de grão recristalizado do latão alfa. Nota-se que o tamanho de grão no final da recristalização não depende da temperatura de recristalização. 17
Figura 11. Variação da taxa de nucleação (N) e da taxa de crescimento (G) e da sua razão (N/G) com o grau de deformação antes do recozimento. Dados para o alumínio recozido a 350°C. 18
Figura 12. Estágios (a,b,c,d) no reajuste do perfil das bolhas quando o tamanho dessas diminui.....22
Figura 13. Pátio da unidade de recozimento (em caixa) da COSIPA.....24
Figura 14. Exemplo de fornos de recozimento em caixa.....25
Figura 15. foto da base de um forno de recozimento. 26
Figura 16. Esquema da base de um forno de recozimento em caixa.....27
Figura 17. Foto de uma campânula (abafador) sendo colocada sobre um empilhamento de bobinas a serem recozidas. 28
Figura 18. Esquema da campânula no recozimento em caixa. 29

Figura 19. Fotos de fornos portáteis e esquema da entrada do forno. 32
Figura 20. Foto de convectores utilizados na COSIPA. 34
Figura 21. Forno de recozimento contínuo. 36
Figura 22. Fluxograma de uma unidade de recozimento contínuo.....38
Figura 23/ Ilustração esquemática da zona de resfriamento lento. 39
Figura 24. Ilustração esquemática da zona de resfriamento. 39
Figura 25. Ilustração esquemática da zona de resfriamento rápido. 40
Figura 26. Ponto frio e ponto quente de um bobina recozida 57
Figura 27. Simplificação para 1 bobina 59
Figura 28. Ponto quente e o ponto frio com a simplificação 61
Figura 29. Simplificação de uma bobina em uma placa. 61
Figura 30. As temperaturas dos dois lados da placa são iguais.....62
Figura 31. Exemplo de um ciclo de temperatura para um forno de recozimento em caixa 63
Figura 32. Temperatura da bobina em função do tempo e da posição 67
Figura 33. Curva de aquecimento e resfriamento da bobina.....68
Figura 34. Comparação entre um ciclo térmico real (realizado em um forno caixa da COSIPA) e o calculado pelo método matemático 68
Figura 35. Linha de corte para chapas finas laminadas a quente 74
Figura 36. Aplainadeira de rolos.....76
Figura 37. Aplainadeira por estiramento. 76

Tabela 1. Simplificações aplicadas para aplicação do modelamento matemático 58
Tabela 2. Divisão do ciclo de temperaturas em etapas 64
Tabela 3. Critérios de parada 66
Tabela 4. Valores de h em cada etapa 66

1. Introdução

O processo de laminação a frio dos aços, que tem como objetivo principal o ajuste da espessura final, propicia no material um aumento excessivo da resistência mecânica. Este incremento é devido, principalmente, ao aumento da densidade de discordâncias, e varia dependendo da severidade de deformação. Quanto maior for a redução, mais forte é a modificação da estrutura interna do aço, correspondendo a um trabalho de deformação elevado que alonga os grãos ferríticos na direção de laminação, ficando o aço no estado encruado, que aumenta sua resistência mecânica e dureza, mas diminui sua ductilidade e tenacidade, podendo tornar o aço quebradiço e impróprio para utilização neste estado.

Assim sendo, é necessário submeter o aço a um tratamento térmico para se aliviar as tensões internas e promover a formação de novos grãos, com a mesma composição e estrutura cristalina dos grãos originais, porém alongados e heterogêneos (recristalização).

Desta forma, a função do recozimento é realizar o tratamento térmico nas bobinas de aço laminadas, com o objetivo de se obter um produto final cuja dureza esteja de acordo com as necessidades e com superfície totalmente limpa.

Este relatório enfoca na compreensão das teorias da recristalização, recuperação e crescimento de grão, assim como do conceito de energia de empilhamento. As bobinas foram consideradas como placas grossas. Esta simplificação pode ser feita porque, a bobina pode ser vista como um anel, um corpo infinito, como se fosse uma placa tão comprida que o aquecimento e o resfriamento pela borda dela são desprezíveis. Desta maneira uma placa infinita só perde ou ganha calor pelas partes superiores ou inferiores, e neste caso seria pela parte de dentro ou de fora da bobina. Então, considerando-se a simetria radial da bobina, realiza-se a aproximação vista na **figura 1.**

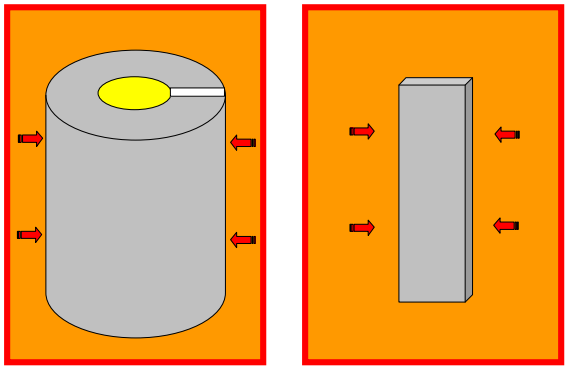


Figura 1. Simplificação de uma bobina em uma placa

Os produtos planos são recozidos em dois tipos de fornos: os contínuos e em caixa. Os fornos contínuos possuem alta produtividade e homogeneidade microestrutural, devido à melhor distribuição de temperatura, porém, o seu preço é elevado. Por este motivo, no Brasil há muitos fornos em caixa e poucos fornos de recozimento contínuo.

Os fornos em caixa se diferenciam entre si de acordo com o tipo de atmosfera que ele trabalha. Os mais modernos utilizam atmosferas de H_2, que são mais produtivos e produzem chapas de melhor qualidade, e há os fornos com atmosferas de N_2 e também com misturas de N_2 e H_2, chamados de NHx.

2. Conceitos

2.1 – Deformação a frio – O Estado Encruado

Quando um metal é plasticamente deformado em temperaturas que são baixas em relação ao seu ponto de fusão, diz-se que este fora trabalhado a frio. Geralmente, a temperatura máxima é assumida ser da ordem de metade da temperatura de fusão na escala absoluta. Sabe-se que ao se deformar a frio um metal, este terá algumas de suas propriedades alteradas, tais como o aumento da resistência mecânica, diminuição da ductilidade e tenacidade, o abaixamento da densidade e da condutividade elétrica, etc.

A maior parcela da energia despendida no trabalho a frio é dissipada na forma de calor. Contudo, uma porção finita dessa energia é armazenada no material como energia de deformação, associada com os diversos defeitos cristalinos gerados pela deformação plástica.

A zona plástica caracteriza-se pelo endurecimento por deformação a frio, ou seja, pelo encruamento do metal. Quanto mais o metal é deformado, mais ele se torna resistente. O encruamento de um modo geral é explicado pelas interações das discordâncias com outras discordâncias ou com outras barreiras que impedem a sua livre movimentação. Um metal recozido sem sofrer deformação plástica possui de 10^6 a 10^8 discordâncias por centímetro quadrado, enquanto que um metal severamente deformado plasticamente contém cerca de 10^{12} discordâncias pela mesma unidade de área. Assim, a interferência de discordâncias ocorre muito mais frequentemente devido ao maior número de sistemas de escorregamento operando e é necessário oferecer maior energia para que as discordâncias vençam as barreiras citadas e possam se movimentar. Os contornos de grão são exemplos específicos de barreiras à movimentação das discordâncias, que são empilhadas nesses contornos. (Souza, 1982)

A figura 2, mostra esquematicamente as regiões em um passe de laminação em que se tem a dissipação de energia na forma de calor e o armazenamento de energia no material através da deformação a frio.

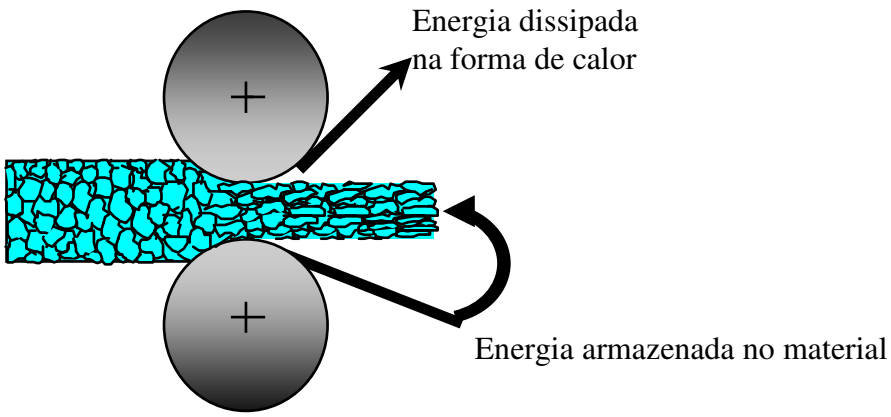


Figura 2. Esquematização de um passe de laminação destacando a deformação a frio (modificação de tamanho e formato dos grãos) e as energias envolvidas no processo.

2.2 – Energias de defeito de empilhamento

Quanto maior for a energia por unidade de área do defeito de empilhamento, mais próximas estarão as discordâncias parciais, de modo a minimizar a área defeituosa. A energia de defeito de empilhamento (EDE) é um dos mais importantes parâmetros indicativos das propriedades dos materiais. Por exemplo, um material com energia de defeito de empilhamento baixa apresenta após deformação plástica maior densidade de discordâncias, distribuição mais uniforme de discordâncias e maior energia armazenada na deformação, do que um material com energia de defeito de empilhamento alta e deformado nas mesmas condições. Isso acontece porque nos metais com alta energia de defeito de empilhamento, as discordâncias possuem maior mobilidade, tendo maior probabilidade de serem aniquiladas por intermédio do seu rearranjo. Além disso, os materiais com baixa EDE geralmente apresentam maior taxa de encruamento, maior resistência à fluência e maior suscetibilidade à corrosão sob tensão que materiais com alta EDE como pode ser visto **na figura 3**. (Padilha, 2000)

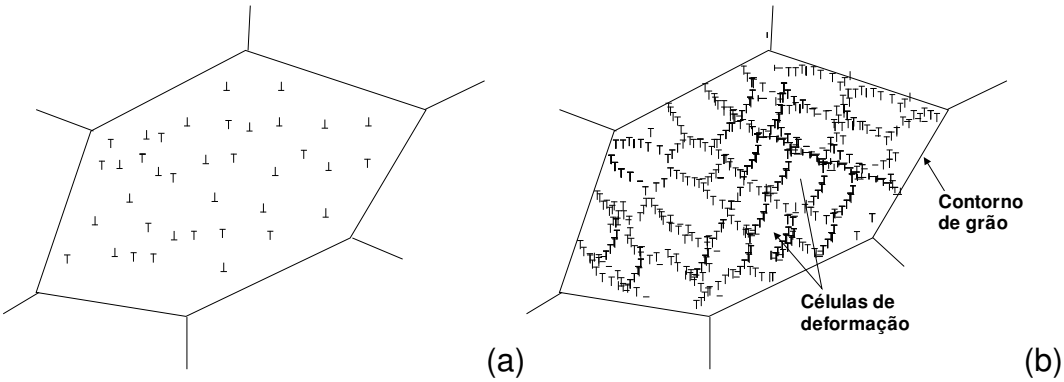


Figura 3. Arranjos de discordâncias em metal com (a) baixa energia de defeito de empilhamento e (b) alta energia de defeito de empilhamento. Note a presença de células de deformação no metal com alta energia de defeito de empilhamento.

Nesta figura nota-se a presença de células de deformação que são delineadas pelas paredes de discordâncias, regiões com maior densidade de discordâncias. As células de deformação apresentam no seu interior uma quantidade de discordâncias bem menor que nos seus contornos.

2.2.1 – Defeitos puntiformes

A presença de defeitos puntiformes como átomos de soluto ou lacunas em um material modifica cria uma tensão elástica que distorce o retículo cristalino. De modo geral, o aumento do número de defeitos puntiformes provoca um aumento na densidade de discordâncias devido ao travamento do deslocamento das discordâncias, impossibilitando a aniquilação das mesmas via reações entre estas (fenômeno de recuperação).

Considerando o caso particular de dois elementos, um deles é o solvente, isto é, o que está em maior teor e o outro é o soluto. O solvente é sempre um metal, no caso de solução sólida aplicada à Metalurgia e o soluto pode ser um outro metal (por exemplo, o zinco nas ligas cobre-zinco, dando a solução sólida denominada latão α) ou um não-metal (por exemplo, o carbono nas ligas ferro-carbono, ou seja, os aços-carbono, dando as soluções sólidas denominadas ferrita e austenita).

Um metal puro contém na sua rede cristalina somente átomos desse metal. A introdução de átomos do soluto produz invariavelmente uma liga que é mais resistente que o metal puro. Os átomos do soluto podem substituir alguns átomos do

metal puro, tomando o lugar desses na rede, caso o tamanho dos átomos do soluto seja equiparável aos átomos substituídos. Esse é o tipo chamado solução sólida substitucional. No caso dos átomos de soluto serem bem menores que os do solvente, eles irão ocupar posições intersticiais, ou seja, entre os átomos do solvente e tem-se então a solução sólida intersticial.

A explicação de como a resistência do metal puro é aumentada pela dissolução de outro elemento é sempre baseada em mecanismos que dificultam a movimentação das discordâncias no interior do cristal. Essa movimentação das discordâncias, que é responsável pela deformação plástica, sendo dificultada, exige tensão maior para ser realizada. Os átomos substitucionais do soluto, agindo por fricção nas discordâncias pela perturbação causada, provocam também uma barreira para a movimentação das mesmas, deslocando a curva tensão-deformação na região plástica para cima. (Souza, 1982)

2.2.2 - Tamanho de grão inicial

O contorno de grão (CG) funciona como um obstáculo para a movimentação de discordâncias, causando o empilhamento destas. Desta forma, um tamanho de grão (TG) inicial menor, acarreta num aumento na densidade de discordâncias em relação a um mesmo material com tamanho de grão inicial maior (menor TG implica em maior quantidade de CG, que são obstáculos à movimentação das discordâncias, impossibilitando aniquilação das mesmas via recuperação). Estas diferenças são notadas principalmente para baixos graus de deformação, uma vez que em altas deformações existe a possibilidade de ocorrer o fenômeno de recristalização que elimina as discordâncias através da nucleação de novos grãos.

2.2.3 - Temperatura e velocidade de deformação

O efeito da temperatura na distribuição e densidade de discordâncias pode ser explicado pelos mecanismos que necessitam de ativação térmica, tais como a

ascensão (escalada) de discordâncias em cunha e a movimentação de discordâncias em hélice com degraus. Assim, temperaturas cada vez menores provocam um aumento na densidade de discordâncias porque as discordâncias apresentam menor mobilidade e não interagem aniquilando-se. Pela mesma razão, a formação de células de deformação pode ser inibida, uma vez que não surge uma distinção entre regiões com alta e com baixa densidade de discordâncias, já que a movimentação de discordâncias não é favorecida a baixa temperatura.

O efeito do aumento da velocidade de deformação é o mesmo que aquele do abaixamento da temperatura de deformação, ou seja, aumentar a densidade de discordâncias. Tal efeito é bem menor que aquele da temperatura de deformação, pois a relação entre densidade de discordâncias e temperatura é exponencial enquanto que a relação com a velocidade de deformação é regida por uma lei de potência.

2.3 - Recozimento

A seguir, descreve-se o processo de recozimento através dos fenômenos de recuperação, recristalização e crescimento de grão.

2.3.1 - Recuperação

O primeiro dos fenômenos que pode ocorrer numa amostra deformada é a recuperação. Os principais mecanismos envolvidos na recuperação estão descritos a seguir:

- Diminuição na quantidade de defeitos puntiformes por intermédio da reação entre estes (eliminação de lacunas em discordâncias);
- Aniquilação de discordâncias de sinais opostos e encolhimentos de anéis de discordâncias;
- Formação de contornos de alto ângulo

Quando um metal é encruado, diversas mudanças ocorrem nas suas propriedades físicas e mecânicas, tais como o aumento na resistência a tração, dureza e resistência elétrica e diminuição na ductilidade. No estágio de recuperação, as propriedades físicas e mecânicas que se modificaram por causa do encruamento recuperam os seus valores originais. Tal recuperação não envolve uma mudança evidente na microestrutura, ou seja, em princípio não há qualquer evidência microestrutural (vista ao microscópio óptico) que possa justificar a recuperação das propriedades.

Um mecanismo conhecido de recuperação é a poligonização. Este mecanismo pode ser entendido através da análise da **figura 4**. Ao fletir um

monocristal de um metal qualquer, é de se esperar que algumas discordâncias se apresentem conforme estão dispostas na figura. Ao fazer o recozimento, estas discordâncias podem se posicionar por ascensão ou escorregamento em uma situação que minimize a energia associada com a presença destas. Isto é obtido, por exemplo, através da disposição das discordâncias em cunha uma abaixo da outra.

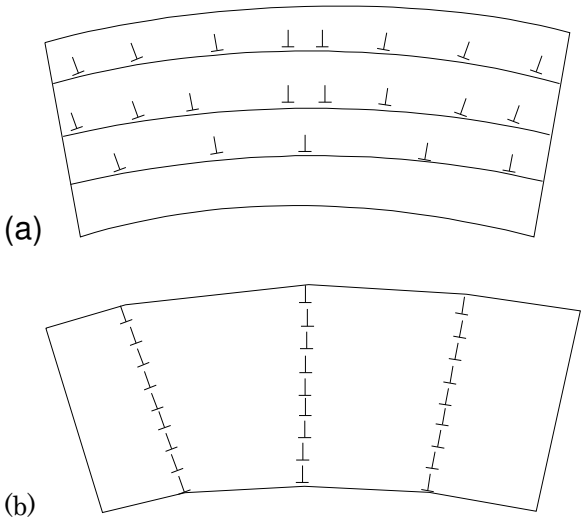


Figura 4. Realinhamento de discordâncias em cunha durante a poligonização. (a) as discordâncias em excesso que permanecem nos planos ativos de escorregamento após o cristal ser fletido e (b) o rearranjo das discordâncias após a poligonização.

O campo de tensões da discordância em cunha varia, dependendo da região que se esteja analisando. No plano extra de átomos tem-se um campo de tensões compressivo enquanto abaixo deste tem-se um campo de tensões trativo. Desta forma, se o campo inferior de uma determinada discordância situar-se próximo ao campo superior de uma outra discordância, os campos serão diminuídos nos seus valores nominais de tensão porque estes se cancelam e, portanto, esta parece ser uma configuração energeticamente mais favorável. Assim, a disposição das diversas discordâncias em cunha é tal que um defeito bidimensional denominado “sub-contorno” é criado. Este sub-contorno delimita diversas regiões relativamente livres de discordâncias que são denominadas de subgrãos. Assim, os subcontornos são também denominados contornos de subgrão.

Os contornos de subgrão são de baixo ângulo (em geral menor que 15º). A poligonização acarreta aos segmentos cristalinos se desenvolverem entre um par de contornos de baixo ângulo como cristais próximos daqueles livres de deformação com planos chatos (não curvados). Contudo, cada pequeno cristal (ou subgrão)

possui uma orientação ligeiramente diferente dos seus vizinhos por causa dos contornos de baixo ângulo que os separam.

O próximo estágio da poligonização é o coalescimento de contornos de baixo ângulo onde dois ou mais contornos podem se combinar para formar um único contorno. O ângulo de rotação dos subgrãos através do contorno deve aumentar neste processo. Neste caso, a densidade de discordâncias nos contornos de baixo ângulo aumenta e, como conseqüência, maior é ângulo dos contornos de subgrão e menor é a quantidade desses contornos (na unidade de volume).

O movimento de quaisquer discordâncias pode induzir o movimento das demais, desde que haja temperatura e tempo suficientes para tanto a ascensão como o escorregamento. À medida que as paredes dos subgrãos vão ficando mais definidas, a velocidade de coalescimento diminui com o tempo e a temperatura de forma que o processo de poligonização atinge um estado próximo da estabilidade com subcontornos largamente espaçados. A essa formação dá-se o nome de estrutura celular de discordâncias **(figura 5).**

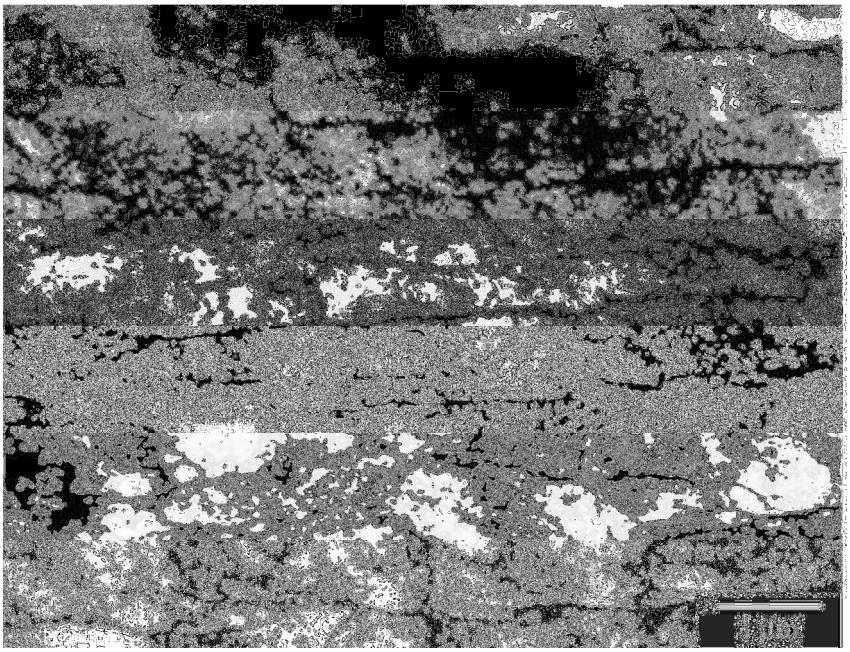


Figura 5. Rearranjo de discordância e formação de estrutura celular de discordâncias.

Do mesmo modo que esse mecanismo pode ser constatado nos monocristais, ele pode ser visto nos policristais, com a diferença que em cada grão, haverá diversos subgrãos, com os seus diversos contornos de subgrão.

A energia de defeito de empilhamento possui uma forte influência nos mecanismos de recuperação, principalmente o de poligonização. Isto porque em um metal com alta energia de defeito de empilhamento a facilidade de realizar escorregamento em desvio é maior e, portanto, mais facilmente será o movimento das discordâncias. Esta facilidade no movimento permite que os contornos de subgrão sejam formados e, portanto, mais rapidamente o metal será recuperado das suas propriedades, pois forma-se regiões sem discordâncias.

2.3.2 - Recristalização

Do mesmo modo que o fenômeno de recuperação, o potencial termodinâmico para a recristalização é a energia armazenada na deformação. Isto quer dizer que ambos os fenômenos ocorrem por causa da mesma energia e conseqüentemente se competem.

A recristalização pode ser conceituada como o fenômeno que ocorre no recozimento envolvendo a migração de contornos de alto ângulo sobre a estrutura encruada, cujo contorno delimita internamente uma região livre de discordâncias.

Fatores que afetam a recristalização:

Seis importantes variáveis infuênciam o comportamento da recristalização (Dieter , 1981):

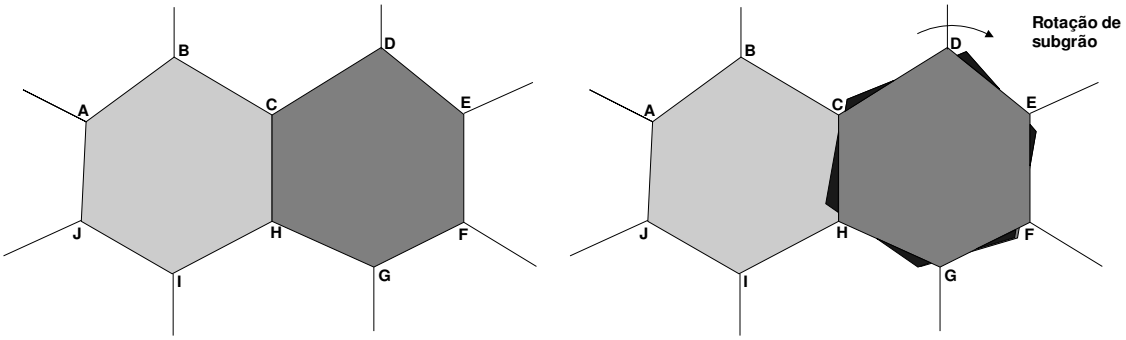
1) quantidade de pré-deformação;
2) temperatura;
3) tempo;
4) tamanho de grão inicial;
5) composição;
6) grau de recuperação ou poligonização anterior ao inicio da recristalização.

2.3.2.1 - Formação das regiões recristalizadas

A formação das regiões recristalizadas é dada por diversos mecanismos. Primeiramente a formação de uma região livre de discordâncias pode ser criada pela poligonização (recuperação). Pelo fenômeno de coalescimento dos subgrãos tem-se a formação de contornos de alto ângulo como já explicado anteriormente. Se as

regiões vizinhas a esta região livre de discordâncias possuírem uma densidade de discordâncias substancialmente maior, é possível que os contornos de alto ângulo passem a migrar na direção dessas regiões encruadas. Assim, os contornos de alto ângulo varrem a microestrutura deformada, coletando as discordâncias da sua frente e deixando atrás de si uma região com uma densidade de discordâncias substancialmente menor. Deve-se citar que os contornos de alto ângulo possuem de um modo geral, uma mobilidade muito maior que os contornos de baixo ângulo, já que, neste último caso, a força motriz para o crescimento é menor.

Outro mecanismo que pode ocorrer é a rotação de subgrão, como pode ser visto na **figura 6** a seguir. Neste, dois subgrãos vizinhos de orientação pouco diferente são delimitados por um contorno de subgrão. Um dos grãos pode executar uma rotação através do movimento de átomos (ou discordâncias) do seu reticulado, diminuindo ou retirando a diferença em orientação entre estes dois reticulados, como pode ser visto na figura a seguir em (b) e (c). Como não há mais diferença de orientação entre os dois subgrãos vizinhos, o contorno de subgrão CH da figura a seguir, em (c), deixa de existir e tem-se então a situação mostrada em (d). Os contornos BD e GI, por absorverem várias discordâncias do outrora contorno de subgrão CH, passam a ser de alto ângulo. Se esta região, livre de discordâncias, for delimitada por outras regiões de maior densidade de discordâncias, é possível que estes contornos de alto ângulo passem a migrar na direção de maior densidade de discordâncias, provocando novamente a recristalização.



(a) (b)

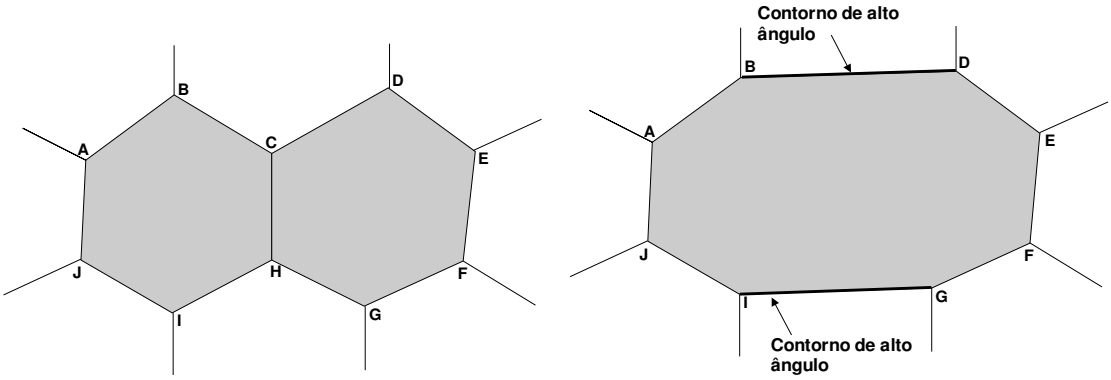


Figura 6.Coalescimento de subgrãos por intermédio da rotação de subgrãos.

Do exposto, fica claro que uma região recristalizada é caracterizada por uma densidade de discordâncias bastante baixa, circundada por um contorno de alto ângulo.

2.3.2.2 – Heterogeneidades de deformação

As heterogeneidades de deformação são causadas por diversos fatores. Um deles é devido à diferença na geometria da peça que causa variados graus de deformação dependendo da dimensão que está sendo deformada. Outro é a presença de partículas de segunda fase, que possui um comportamento plástico diferente do da matriz. Tais heterogeneidades podem conter uma quantidade apreciável de defeitos cristalinos. Esta quantidade é tal que o número de defeitos é maior que aqueles de outras regiões do metal deformado plasticamente. Estas regiões são propensas a exibir a recristalização primária porque podem constituir em embriões para o início da recristalização. Outro exemplo é aquele dos metais que apresentam maclas de deformação.

2.3.2.3 - O efeito do tempo e da temperatura de recristalização

A temperatura de recristalização representa a temperatura a qual um determinado metal ou liga com uma particular quantidade de deformação a frio, se recristaliza completamente após um período definido de tempo. A temperatura de

recristalização não tem qualquer significado a menos que o tempo para que a recristalização ocorra seja especificado.

Uma forma de estudar a recristalização é através da análise de tratamentos de recozimento isotérmicos em diferentes tempos. Como na **figura 7** que apresenta as curvas de transformação isotérmica para o Cu99%. Cada curva representa a fração recristalizada para as várias temperaturas de tratamento de recozimento, por diversos tempos de tratamento. O perfil destas curvas mostra que a recristalização ocorre após um determinado tempo, denominado de tempo de incubação, quando não ocorre recristalização ou esta é baixa (durante o tempo de incubação ainda não há energia para ocorrer este processo). Neste período, pode haver o fenômeno de recuperação, se houver energia para o mesmo.

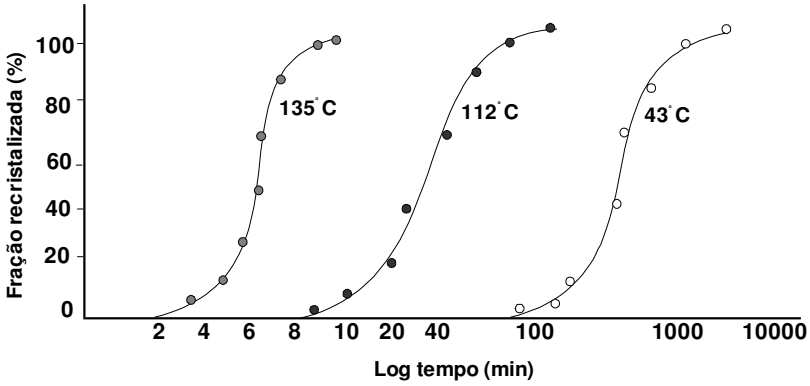


Figura 7. Curvas de transformação isotérmica de recristalização para o cobre puro (99,999% de cobre) laminado a frio com 98% de redução em espessura.

A análise da figura 7 permite concluir que o aumento na temperatura de recristalização acelera o processo de recristalização, ou seja, quanto maior a temperatura de recristalização, para um dado grau de deformação, menor é o tempo requerido para se conseguir uma mesma fração volumétrica recristalizada. Como exemplo, consegue-se praticamente 100% da fração recristalizada em tempos menores que 6 minutos para a temperatura de 135°C enquanto não se observa qualquer recristalização para a temperatura de 112°C.

Pode-se desenhar uma linha horizontal a partir das curvas obtidas anteriormente para uma determinada fração volumétrica. A partir desta linha, pode-se determinar o tempo que cada uma das amostras leva para se conseguir a dada fração volumétrica nas diversas temperaturas estudadas. Tais dados podem ser plotados como no gráfico da **figura 8**. Esta figura mostra o inverso da temperatura em função da temperatura para ocorrência de 50% de fração recristalizada.

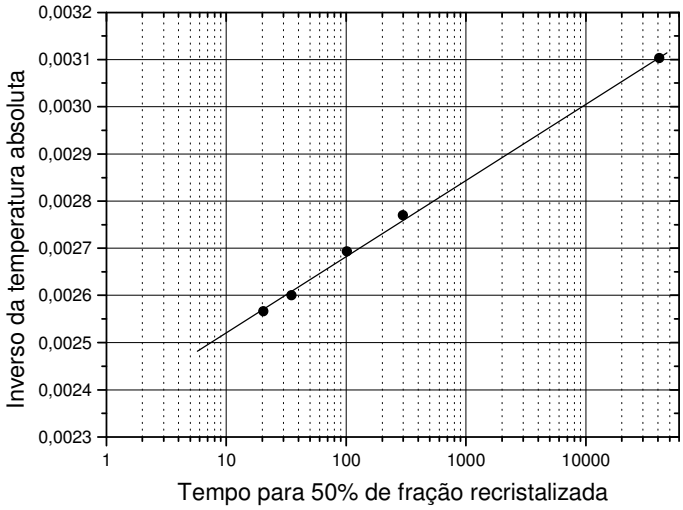


Figura 8. Inverso da temperatura absoluta (K) em função do tempo para 50% de fração recristalizada do cobre puro.

2.3.2.4 - O efeito do grau de deformação na recristalização

As curvas mostradas na **figura 9** permitem avaliar o efeito do grau de deformação no fenômeno de recristalização. Esta apresenta o valor em horas para se conseguir 100% de recristalização em diversas temperaturas de recozimento para amostras deformadas de zircônio em dois graus diferentes. Nota-se que a amostra com maior grau de deformação apresenta um tempo para recristalização menor para uma dada temperatura de recozimento, como por exemplo, na temperatura de 557°C, a amostra deformada com 13% de redução em área apresenta 100% de recristalização em 40 horas enquanto a amostra deformada com 51% de redução em área apresenta 100% de recristalização por pouco menos de 2 horas.

De modo análogo, para um dado tempo ou velocidade, a amostra com maior grau de deformação apresenta uma temperatura de recristalização inferior. Como exemplo, para o tempo de 1 hora, a amostra com 51% de redução em área apresenta 100% de recristalização na temperatura de 567°C enquanto a amostra com 13% de redução em área apresenta 100% de recristalização a 627°C.

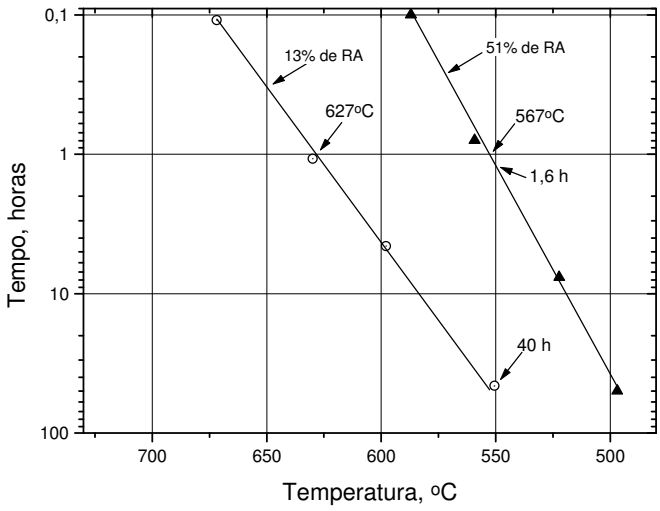


Figura 9. Relação tempo e temperatura para a recristalização de zircônio correspondendo a dois diferentes graus de deformação no trabalho a frio.

2.3.2.5 - O tamanho de grão recristalizado

A **figura 10** mostra o tamanho de grão recristalizado para o latão alfa encruado a frio em função do grau de deformação. As temperaturas em que esta liga foi recozida também podem ser vistas. O tempo para os diversos tratamentos foi tal que a estrutura apresentava-se 100% recristalizada, ou seja, sem a presença de grãos deformados a frio. Nota-se que o tamanho de grão diminui à medida que se aumenta o grau de deformação. O tamanho é cada vez menor quanto maior o grau de deformação. A figura também mostra que graus de deformação cada vez menores levam a um tamanho de grão recristalizado menor. Para graus de deformação menores que a deformação crítica, a recristalização não é notada, ou seja, há uma quantidade crítica de deformação a partir da qual a recristalização ocorre. A quantidade crítica de deformação nessa figura corresponde a cerca de 3%, mas tal valor é dependente do modo de deformação e não é, portanto, uma propriedade do metal.

Outro aspecto que pode ser visto nesta figura é o fato de que o tamanho de grão recristalizado é independente da temperatura de recozimento. Isto porque, apesar de se ter estudado várias temperaturas de recozimento, o tamanho de grão

recristalizado segue uma mesma curva de tamanho de grão recristalizado versus grau de deformação. A temperatura de recristalização, do mesmo modo que a quantidade crítica de deformação, não é uma propriedade do metal, porque essa depende de uma série de fatores, tais como o tamanho de grão inicial, do modo de deformação e da velocidade de aquecimento.

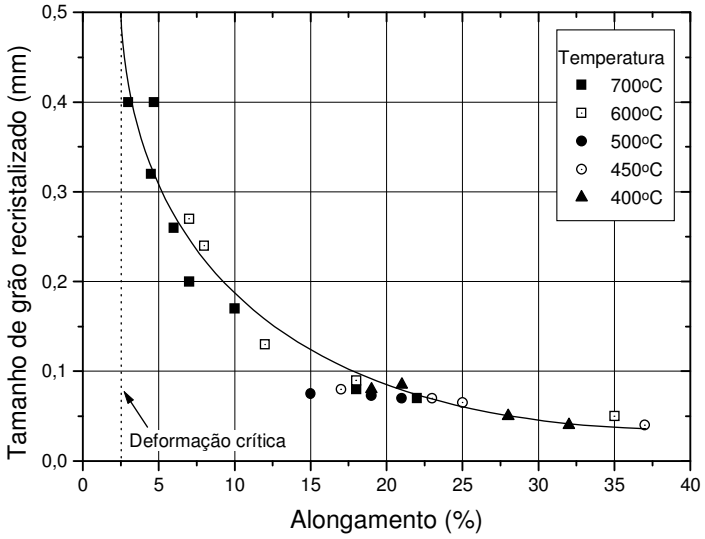


Figura 10. Efeito do trabalho a frio no tamanho de grão recristalizado do latão alfa. Nota-se que o tamanho de grão no final da recristalização não depende da temperatura de recristalização.

Para se entender o comportamento do tamanho de grão recristalizado, deve-se compreender os conceitos de taxa de nucleação e de crescimento. Embora o fenômeno de recristalização não possa ser descrito pela teoria clássica de nucleação e crescimento, os referidos nomes são utilizados num senso mais geral, em concordância com a história do desenvolvimento do entendimento do fenômeno.

O tamanho de grão recristalizado é proporcional à razão da taxa de nucleação com a taxa de crescimento. A **figura 11** mostra o comportamento da taxa de deformação em função do grau de deformação. Nota-se que para baixos graus de deformação a taxa de nucleação (N) é bastante baixa porque maior é a dificuldade em se obter regiões ou núcleos capazes de exibir posteriormente a recristalização. Esta taxa aumenta sensivelmente, porém, para graus de deformação maiores, acima de 10%, no caso citado.

A taxa de crescimento (G), entretanto, possui um acréscimo para graus de deformação baixos enquanto para graus de deformação mais altos tal valor não possui muita variação. A diferença no comportamento destas duas taxas pode ser traduzida pela razão entre estas, como pode ser visto também na figura a seguir. O valor de N/G é reduzido para deformações baixas e aumenta rapidamente para valores cada vez mais crescentes. Quando o valor dessa razão é baixo, as regiões recristalizadas são em número relativamente baixo (baixo N) e as poucas regiões que podem recristalizar crescem a um tamanho considerável (alto G). Isto é encontrado nas regiões de baixa deformação. Por outro lado, quando o valor dessa razão N/G é alto, tem-se um número relativamente alto de regiões propensas à recristalização (alto N), fazendo com que estas cresçam e rapidamente se encontrem umas às outras, finalizando a recristalização. Neste caso, a estrutura resultante é aquela com numerosos grãos recristalizados, porém finos.

A quantidade crítica de deformação corresponde, portanto, à região em que se tem o menor número de núcleos possíveis os quais exibem um crescimento considerável, provocando a obtenção de um tamanho de grão recristalizado grosseiro. Tal conhecimento foi importante para a obtenção de monocristais por deformação seguida de recozimento.

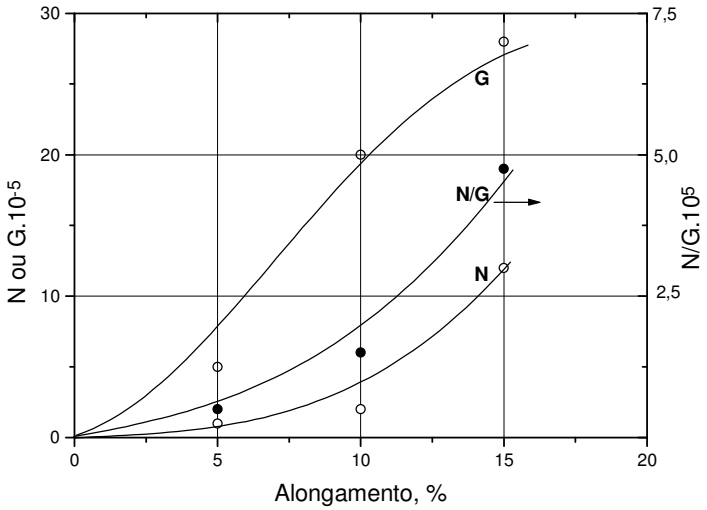


Figura 11. Variação da taxa de nucleação (N) e da taxa de crescimento (G) e da sua razão (N/G) com o grau de deformação antes do recozimento. Dados para o alumínio recozido a 350°C.

Mostrou-se que a velocidade de recristalização depende de duas variáveis: a temperatura de recozimento e a quantidade de deformação (ou grau de deformação). Da mesma forma, fora mostrado que o tamanho de grão recristalizado dos metais é dependente da temperatura de recozimento, mas sensível a quantidade de deformação. O processo de recristalização depende também de outras variáveis. Dentre as mais importantes são a pureza ou composição do metal e o tamanho de grão inicial (antes da deformação).

2.3.2.6 - Pureza ou composição do metal

Quanto mais puro for o metal, mais rápida é a sua recristalização. A presença de átomos de soluto, ainda que em quantidades tão baixas quanto 0,02% pode provocar um retardamento pronunciado na ocorrência da recristalização. Isto pode ser traduzido, por exemplo, no aumento da temperatura de recristalização. Em princípio, o retardamento da recristalização ocorre porque os átomos de soluto tendem a ficar próximo dos contornos de alto ângulo, porque o campo elástico destes átomos de soluto é diminuído quanto estão juntos aos contornos de alto ângulo. Sendo assim, uma migração posterior dos contornos faz com que os átomos de soluto se movam juntos, restringindo ou retardando dessa forma a migração dos contornos de alto ângulo.

2.3.2.7 - O tamanho de grão inicial

Quando um metal policristalino é trabalhado a frio, os contornos de grão interrompem o processo de escorregamento que ocorre nos cristais. Conseqüentemente, o reticulado adjacente aos contornos de grão é, na média, muito mais distorcido do que aquele no centro dos grãos. Ao diminuir o tamanho médio de grão há um aumento na área de contorno de grão e, da mesma forma, aumenta o volume e a uniformidade de metal distorcido (aquele adjacente aos contornos de grãos). Tal efeito aumenta o número de locais possíveis para formar regiões recristalizadas, ou seja, quanto menor os grãos antes do trabalho a frio,

maior será a taxa de nucleação e menor será o tamanho de grão recristalizado para um dado grau de deformação.

2.3.2.8 - Cinética de Recristalização

A recristalização pode ser tratada como um processo de nucleação segundo o modelo de cinética de Johnson-Mehl., supondo que, dependendo da temperatura, inicialmente existirão *N* domínios de núcleos por unidade de volume, ou seja, locais onde preferencialmente ocorrerá a nucleação. Este volume aumentará em todas as direções a uma taxa constante v até que os domínios entrem em contato uns com os outros.

Sendo a expressão geral dada por:

$$X = 1 - \exp[-\frac{4}{3}\pi v^3 N(t) t^3]$$

Em que: X: fração ordenada;

v: volume;

N: número de núcleos por unidade de volume;

t: tempo.

Como a relação entre a fração recristalizada (ordenada) e tempo é exponencial, pode-se optar por tempos de tratamento que sigam este fator. **(Espósito, 2006).**

2.3.2.9 – Recristalização de Ligas na Presença de Segundas Fases

Adição de elementos a metais proporciona três de situações distintas no que concerne aos elementos de liga, do ponto de vista da recristalização:

1) Os elementos de liga encontram-se em solução sólida;

2) Os elementos de liga encontram-se na forma de precipitados de segunda fase;

3) Os elementos de liga encontram-se na forma de uma segunda fase e a fração volumétrica desta segunda fase é alta.

Os efeitos desses elementos de segunda fase sobre a recristalização podem tanto estimular, como retardar a recristalização, dependendo do modo como a partícula interage com a microestrutura durante o processamento termomecânico.

Em ligas com dispersão de precipitados de segundas fases existem evidências que mostram o atraso do processo de recristalização. Tais partículas atuam como barreiras para a movimentação dos contornos de alto ângulo devido à força de ancoramento exercida pelas partículas sobre os contornos de grão. Se esta força for maior que a de movimentação de contornos, não haverá migração e, conseqüentemente, o núcleo de recristalização não poderá crescer, impedindo a recristalização. **(Espósito, 2006).**

2.4 - Crescimento de grão

A recristalização primária e o crescimento de contornos de grãos são fenômenos ativados termicamente. **(Espósito, 2006).**

Após a ocorrência da recristalização, a estrutura apresenta-se livre de defeitos cristalinos ou com uma quantidade menor destes. Tal estrutura obtida consiste de grãos com diferentes orientações cristalográficas separados pelos contornos de alto ângulo, denominados comumente de contornos de grão.

O potencial termodinâmico para o crescimento de grão é a diminuição na energia livre associada com a presença de contornos de grão. Isto porque a presença de contornos de grão em um metal ou liga é uma condição metaestável, ou seja, não é aquela de equilíbrio. A estrutura de equilíbrio seria aquela sem a presença dos contornos de grão.

A ordem de grandeza da energia associada com a presença de contornos de grãos é cerca de 1000 vezes menor que a energia armazenada na deformação, que é o potencial termodinâmico para a recristalização. Dessa forma, o crescimento de grão ocorre normalmente após a recristalização ter-se completado.

O mecanismo pelo qual o crescimento de grão toma lugar pode ser visto na **figura 12**. Um agregado policristalino é o resultado do compromisso entre os requisitos físicos que operam entre as partes individuais - os contornos de grãos - e os matemáticos, que servem para justificar o preenchimento de espaço. Os

requisitos físicos derivam da presença de tensões superficiais associadas aos contornos de grãos.

Nesse sentido, Smith fez um estudo de crescimento de grão fazendo analogia com bolhas de sabão. Esse estudo consistiu em colocar bolhas de sabão em tubos de ensaio com pressão interna inferior à atmosférica (para acelerar o processo de crescimento de bolhas) e tirou várias fotos ao longo do processo. O seguinte mecanismo foi verificado, como pode ser visto na figura 12 em (a): Inicialmente, têm-se dois grãos vizinhos, um com quatro lados e outro com cinco lados. Os ângulos que formam os grãos vizinhos são inferiores a 120o e, dessa forma, tendem a se rearranjar para esse valor, conduzindo à situação descrita na figura, em (b). Os contornos continuam movimentando-se pela mesma razão até atingirem a situação mostrada na figura a seguir, em (c). Nessa situação, há uma condição extremamente instável porque têm-se quatro lados encontrando-se num ponto. Pela mesma razão já citada, o arranjo modifica-se para a situação mostrada na figura a seguir, em (d). Essa situação final é tal que o grão inicial, de quatro lados, possui agora somente três lados, enquanto o grão inicial de cinco lados possui somente quatro lados. Os grãos A e B, por sua vez, ganharam um contorno. A partir dessa condição, o grão com três lados desaparece, diminuindo em tamanho, enquanto o grão com quatro lados exibe o mesmo processo descrito na figura a seguir (a,b,c,d).

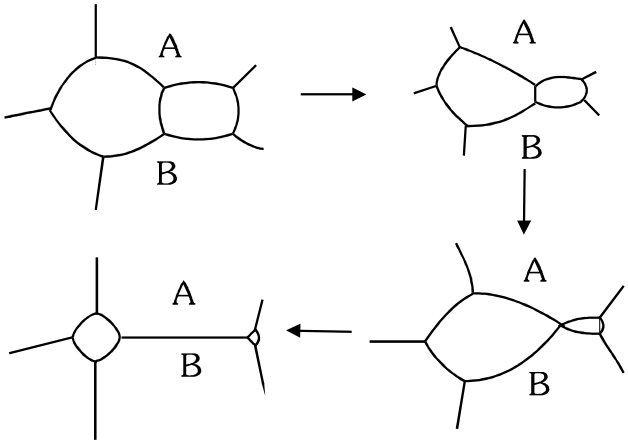


Figura 12. Estágios (a,b,c,d) no reajuste do perfil das bolhas quando o tamanho dessas diminui.

O mecanismo proposto por Smith seria o de crescimento de grão visto por uma abordagem topológica ou não-atomística. A analogia que se faz entre o crescimento de grão em metais e ligas metálicas monofásicas com o crescimento de bolhas de sabão possui como único inconveniente a diferença que se tem na energia livre de superfície dos contornos de grão, que é dependente da relação de

orientação entre os cristais ou grãos vizinhos. No caso das bolhas de sabão, essa tensão superficial é a mesma para todas as bolhas. (Siciliano, 1996)

3. Recozimento

Durante o processo de laminação a frio há um aumento do limite de escoamento do material, ele se torna mais resistente, mais frágil e menos dúctil (encruamento). O material que sai do laminador, portanto, passa a ter pequena capacidade de deformação o que prejudica processamentos posteriores como o da estampagem.

O tamanho final do grão do material acabado, que influencia diretamente as propriedades mecânicas do material, depende do tamanho destes antes da laminação, das reduções sofridas durante a laminação, da temperatura de recozimento e do tempo de permanência a essa temperatura (tempo de encharque).

Desta maneira, o recozimento tem como objetivo restaurar a ductilidade, remover tensões internas oriundas da laminação a frio e obter uma estrutura adequada à utilização da chapa.

Existem basicamente dois tipos de fornos de recozimento, o recozimento em caixa (na **figura 13)** tem-se o pátio da COSIPA da unidade de recozimento em caixa) e o contínuo que serão detalhados a seguir.

Figura 13. Pátio da unidade de recozimento (em caixa) da COSIPA.

3.1 - Recozimento em caixa

3.1.1 - Equipamentos

O equipamento para recozimento em caixa é constituído por bases, campânulas internas e fornos. 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 no desenho 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.

A **figura 14** mostra um forno de recozimento em caixa, nesta pode-se dimensionar qualitativamente o tamanho do forno.

Figura 14. Exemplo de fornos de recozimento em caixa.

3.1.2 - Bases

No recozimento de bobinas e produtos deformados a frio são utilizadas bases circulares (**figura 3.3**), enquanto que para outras aplicações utilizam-se bases retangulares. 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.

As atmosferas protetoras utilizadas no interior das campânulas são normalmente caras, como amônia craqueada, que previne a descarbonetação dos aços. A campânula é vedada com óleo ou com uma liga de baixo ponto de fusão. Dependendo da carga, suportes de aço podem ser dispostos sobre a base para garantir melhor circulação da atmosfera protetora. Estes suportes podem ser sofisticados, chegando a ter ventiladores para forçar a entrada de gases entre as folhas de uma bobina, por exemplo. É comum a presença de termopares nas bases para acompanhamento da variação de temperatura.

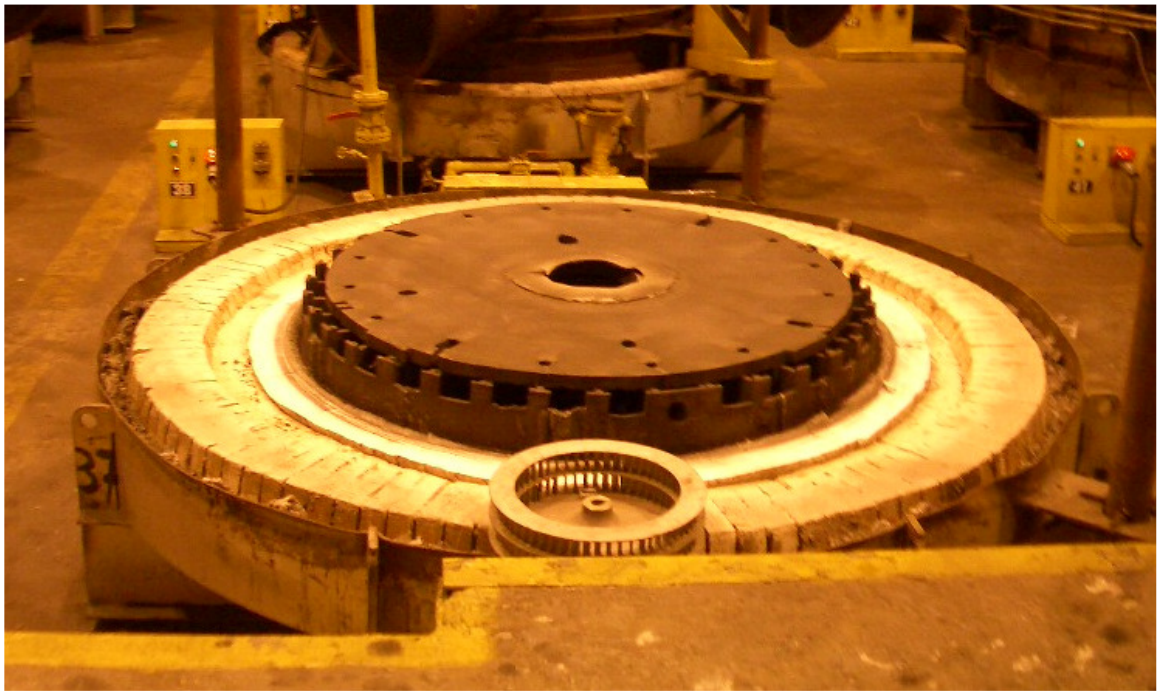


Figura 15. foto da base de um forno de recozimento.

Na **figura 16** tem-se a esquematização da base de um forno de recozimento em caixa.

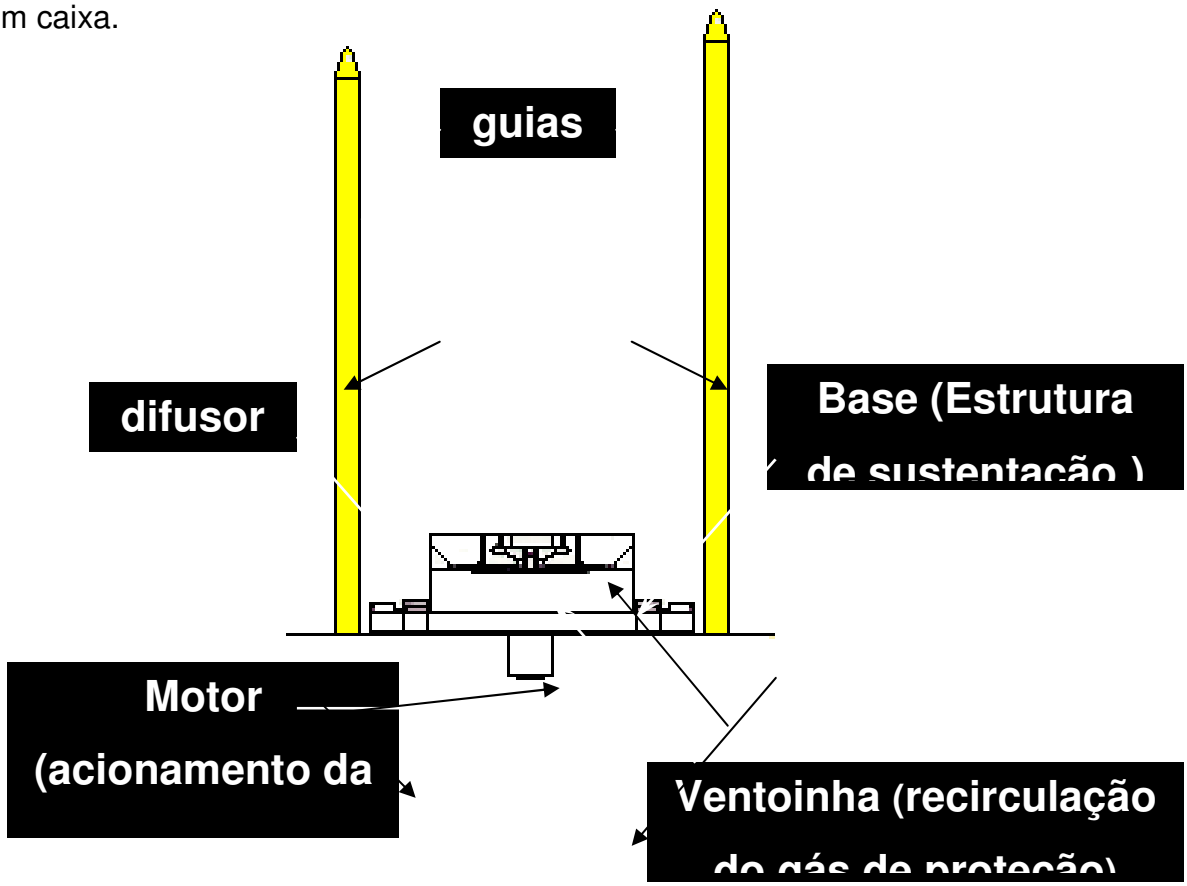


Figura 16. Esquema da base de um forno de recozimento em caixa.

3.1.3 - Campânulas

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 (ver **figura 17**). São normalmente construídas em 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. As paredes das campânulas de aço carbono são recobertas de alumina, silicato de sódio ou qualquer outro composto que reduza a taxa de oxidação.

Pode-se 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.

Figura 17. Foto de uma campânula (abafador) sendo colocada sobre um empilhamento de bobinas a serem recozidas.

Na **figura 18**, tem-se a esquematização da campânula e seus componentes.

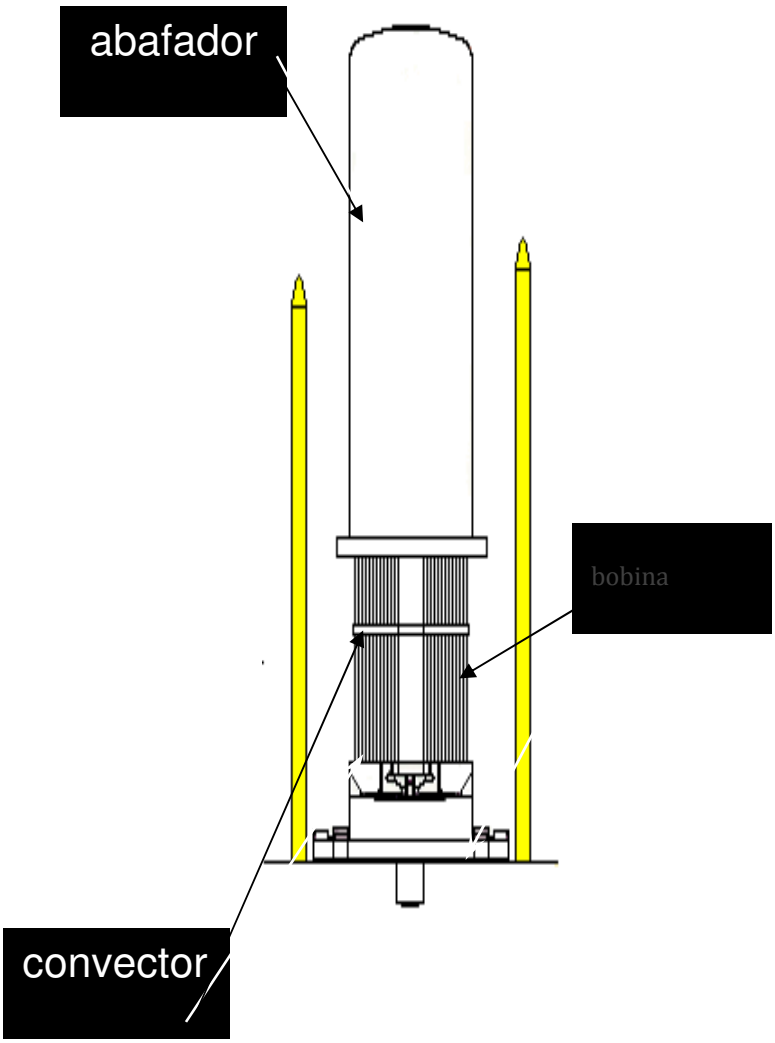


Figura 18. Esquema da campânula no recozimento em caixa.

3.1.4 - Fornos

3.1.4.1 - Fornos estacionários

Os fornos estacionários apresentam seção transversal cilíndrica ou retangular.

Podem ser construídos em baterias de até quatro fornos. Cada forno possui paredes internas de aço recobertas por uma camada de 10 a 14 polegadas de tijolos refratários. O combustível utilizado nos fornos pode ser carvão, óleo ou gás.

Os fornos estacionários são empregados no recozimento de bobinas. A maioria deles possui campânulas internas de ferro fundido podendo suportar cargas de até 25 toneladas, com um consumo de até $4{,}22 \times 10^9$ J por tonelada de chapas recozidas, o que representa uma eficiência muito baixa. Fornos mais modernos, com finas campânulas de aço podem suportar cargas de até 150 toneladas sob um consumo de $1{,}7 \times 10^9$ J por tonelada de carga.

3.1.4.2 - Fornos portáteis

Os fornos portáteis são constituídos por uma estrutura de aço coberta por chapas de aço e recoberta por uma camada de tijolos refratários de até 12 polegadas. A carga de placas pode variar de 25 a 150 toneladas, enquanto que a de bobinas varia de 50 a 500 toneladas. O consumo de combustível varia de $8{,}44 \times 10^8$ a $1{,}6 \times 10^9$ J por tonelada de carga, sob uma taxa de 1 a 10 toneladas de aço por hora de tratamento.

Esse tipo de forno utiliza aquecimento por chama pela queima de gás, embora possa ser utilizado combustível liquido. O aquecimento por resistência elétrica já foi testado, sem grandes benefícios. Os queimadores são dispostos no interior de tubos radiantes de aço inoxidável, que são aquecidos internamente pela chama e irradiam o calor para o exterior.

Estes tubos podem ser dispostos tanto na posição vertical quanta na horizontal, no interior das paredes do forno, podendo até ser acondicionados nas paredes das campânulas, como dito anteriormente.

A disposição dos tubos e a versatilidade obtida pela alimentação individual de cada queimador no interior de cada tubo permitem que a temperatura de tratamento seja bastante uniforme. Ajustes finos podem ser feitos pelo ajuste de cada queimador, apesar do fluxo de combustível ser determinado por uma única válvula que é controlada automaticamente pela temperatura dos tubos e da carga.

Existem ainda fornos onde o aquecimento é feito pela descarga dos queimadores sobre um difusor, que impede a incidência da chama sobre a campânula mas permite a circulação dos gases entre a parede do forno e da campânula. A convecção nesse caso é de extrema importância. A decisão em optar por um forno sem tubos radiantes é influenciada pela relativa importância da economia de combustível, custo do sistema de tubos, custo de reparo das campânulas e heterogeneidades de temperatura durante o tratamento.

A **figura 19** ilustra a entrada do forno e algumas fotos reais de fornos portáteis.

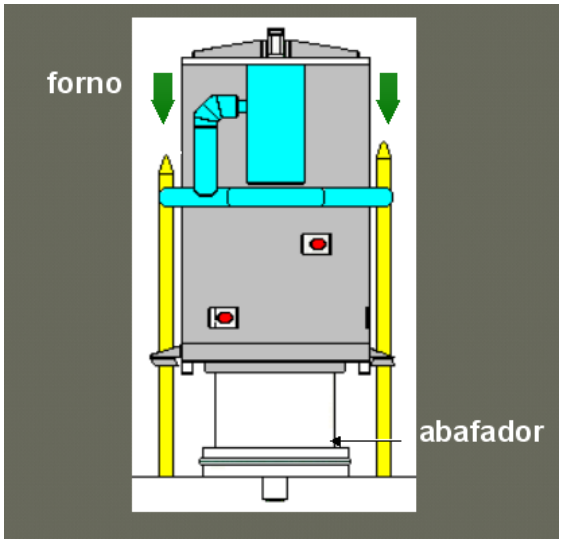


Figura 19. Fotos de fornos portáteis e esquema da entrada do forno.

3.1.5 - O processo de recozimento

A primeira etapa do processo de recozimento em fornos portáteis é o carregamento. Ele e feito em pilhas de 1 a 1,5 m no caso de placas e em pilhas de 2,5 a 3,5 m no caso de bobinas. O carregamento é usualmente realizado por pontes rolantes. Apos o carregamento, são dispostos os termopares e é abaixada a campânula. O forno é então posicionado sobre as campânulas e ocorre a sua vedação. Os termopares e os dutos de combustível são conectados, e inicia-se a circulação de gás desoxidante para a purga do ar. A seguir, os queimadores são acionados e os ventiladores, quando disponíveis, são ligados.

Os gases desoxidantes utilizados são provenientes da combustão parcial de um gás combustível em um determinado volume de ar. Estes produtos são tratados para remoção de vapor d'água, poeira e partículas carbonizadas. Em alguns casos e necessário o tratamento de retirada de dióxido de enxofre e de carbono. A mistura resultante apresenta 75 a 85% de nitrogênio, acrescida de variadas quantidades de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano. Estes gases protegem a superfície do aço contra oxidação durante o ciclo de recozimento. Outras atmosferas incluem amônia craqueada e nitrogênio de alta pureza.

Durante o período de aquecimento, o consumo de combustível é mantido numa taxa fixa até que a temperatura dos tubos ou do forno, determinada por um

termopar conectado a um instrumento de controle, atinja um nível pré-determinado escolhido de modo a evitar danos ao equipamento.

A alimentação de combustível é controlada de maneira automática ou manualmente, para que a temperatura crítica de operação não seja excedida. O próximo ponto de controle é atingido quando o termopar localizado na região mais quente da carga atinge a temperatura crítica de tratamento, evitando que a carga se una. O encharque se inicia quando o ponto frio da carga atinge a temperatura de tratamento, conhecida como temperatura de encharque. Neste ponto ocorre uma interrupção do fornecimento de combustível, para que essa temperatura seja mantida durante o tempo de tratamento (tempo de encharque).

Ao final do período de encharque, o combustível é definitivamente cortado e o forno é retirado para trabalho em outra base. A carga sofre resfriamento sob a atmosfera protetora até 150℃, quando pode ser exposta ao ar sem o perigo de sofrer oxidação. O período de resfriamento leva no mínimo o mesmo tempo que a soma dos períodos de aquecimento e encharque.

As temperaturas e tempos especificados para a prática de recozimento variam muito de projeto para projeto, mesmo para produtos bastante similares. Isto é fruto das diferenças de tamanho e desenho dos fornos de recozimento, tamanho da carga, disposição das pilhas e localização dos termopares.

Uma carga de bobinas consiste de um cilindro oco com diâmetro interno de até 0,8m e diâmetro externo de até 2,2m, recebendo calor de uma campânula incandescente. A dificuldade de transmissão de calor pode ser superada pela circulação da atmosfera tanto pelo exterior quanto pelo interior da pilha, transferindo parte do calor através do diâmetro interno. Uma outra maneira é separar uma bobina da outra através do uso de convectores (**figura 20**), que aumentam a área exposta aos gases aquecidos. A forma dos convectores empregados determina seu desempenho

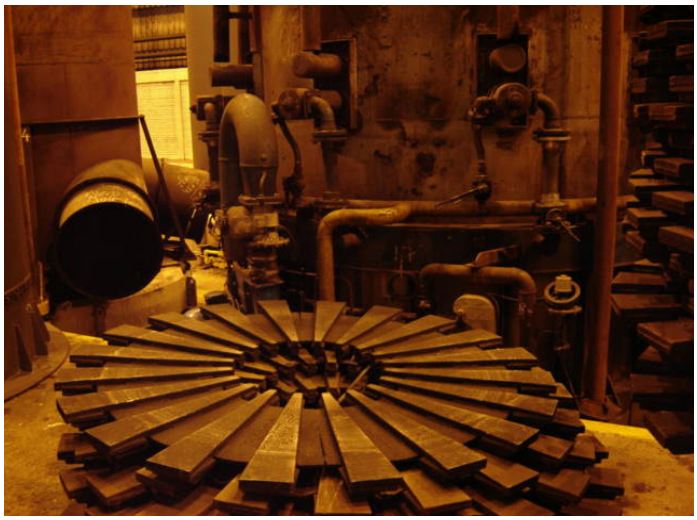


Figura 20. Foto de convectores utilizados na COSIPA.

Dependendo das características do forno e da carga, a região mais quente sofre tratamento de 700 a 730℃ por 20 a 50 horas, enquanto que o forno está aquecendo de 30 a 90 horas. Essas diferenças de temperatura são mais críticas no recozimento de folhas-de-flandres (chapas de aço estanhado para fins anti-corrosivos), onde elevados níveis de dureza são objetivados.

3.1.6 - Recozimento em “bobina aberta”

O tratamento de recozimento com bobinas abertas minimiza as dificuldades inerentes ao processo de recozimento em caixa, uma vez que aumenta a uniformidade e velocidade do aquecimento. O recozimento de bobinas abertas pode empregar atmosferas protetoras para prevenir scaling, descarbonetação ou cementação da mesma maneira que no tratamento de bobinas fechadas. Entretanto, pela escolha apropriada da atmosfera, a prática de bobina aberta pode ser também usada para modificação da composição química do aço, ou para obter mudanças de superfície de maneira controlada.

No recozimento em "bobina aberta", prevê-se um espaçamento suficiente entre as espiras de modo a permitir a livre passagem dos gases quentes. Assim, a bobina e é aquecida ou resfriada de forma muito mais rápida e uniformemente que no recozimento em fornos de campânula.

As bobinas vindas da laminação a frio eram primeiramente reenroladas, colocando-se um fio de nylon entre as espiras, servindo como separador, o qual era retirado antes do recozimento.

Quando se deseja efetuar tratamentos de superfície de chapa, como a descarbonetação ou cementação, emprega-se com sucesso, uma tira corrugada de aço, com 6 mm de largura, a qual permanece na bobina durante o recozimento e assegura a separação entre as espiras individuais.

Embora as primeiras instalações tenham sido em fornos de campânula, o projeto evoluiu no sentido de empregar-se um forno rotativo, que permite um recozimento mais econômico devido à circulação de gases das zonas de resfriamento para as zonas de aquecimento. Somente nas zonas de aquecimento final de encharque e que são usadas fontes de calor.

Uma das utilizações deste tipo de recozimento e produzir aço para esmaltação (processo que deposita óxidos na superfície para conferir aparência e/ou proteção)[12], a partir de aço de efervescência normal: sabe-se que o aço para esmaltação deve ter baixo teor de carbono (0,03%) e de manganês (0,08%), sendo bastante difícil laminar a quente e de recristalizar na estrutura desejada. Descarbonetando-se um aço com 0,06% de carbono e 0,40% de manganês, com atmosferas de hidrogênio - nitrogênio ou gás desoxidante e adicionando quantidades controladas de vapor de água durante a fase de encharque, pode-se até usar uma única camada de esmalte, ao invés das duas demãos normalmente necessárias.

Mediante o processo de “bobina aberta”, é possível:

• produzir aços efervescentes resistentes ao envelhecimento, reduzindo o teor de carbono a 0,001% e o de nitrogênio a 0,0004%;

• reduzir o carbono e o nitrogênio no aço efervescente a fim de produzir um material recozido adequado a esmaltação a fogo;

• reduzir o teor de carbono do aço ao silício para melhores características da chapa de motor ou de transformador.

3.2. Recozimento contínuo

Em meados do século XIX perseguiu-se um processo contínuo de recozimento, que consistiria no deslocamento da tira no sentido do produto final sem paradas forçadas.

Na década de 1950 surgiram as primeiras instalações industriais que começaram a empregar esta técnica.

O processo apresenta grande uniformidade de recozimento. Existe também a possibilidade de ajustá-lo ao fluxo de outras unidades contínuas, como uma linha de desengraxe ou uma linha de zincagem.

Para ilustrar a grande produtividade do processo, produções da ordem 40 t/h são comuns nessas linhas; além disso, a velocidade da tira é de aproximadamente 400 mm/min, com materiais da ordem de 0,25 mm de espessura e larguras de 900 a 1300 mm. Estes dados correspondem à produção de cerca de 20 fornos do tipo monopilha para bobinas da ordem de 8 a 10 t.

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.

Abaixo, tem-se na **figura 21** a foto de um forno de recozimeno contínuo.

Figura 21. Forno de recozimento contínuo.

3.2.1 - Equipamento

São utilizados longos fornos com comprimentos da ordem dos 40 a 50 metros, com altura (fornos verticais) da ordem dos 20 a 25 metros, encaixados entre as unidades de entrada e saída com interposição de torres de acumulação.

A alimentação da linha e feita com as bobinas que saem do laminador a frio, com a tira passando pelas desenroladeiras, tesouras de ponta, máquina de solda com costura, roletes tensionadores e uma torre de acumulação, (que permite a continuidade de funcionamento das demais seções enquanto se faz a alimentação e solda de uma nova bobina a extremidade da tira anterior), com o objetivo de manter constante a velocidade de operação através do forno, enquanto a seção de entrada esta parada. Em algumas plantas tem-se antes do recozimento uma unidade de desengraxe, na qual utiliza-se a seguinte seqüência de processamento:

- Faz-se uma solução alcalina (2~3% 90℃);
- Espirra-se a solução alcalina e efetua-se a limpeza com escovas de nylon;
- A superfície é limpa com eletrólitos;
- Uma escória cilíndrica limpa a superfície do material;
- Espirra-se água (com escovamento), num tanque a contracorrente;
- Seca-se com ar-quente.

Tem-se, na **figura 22**, o fluxograma ilustrativo do processo.

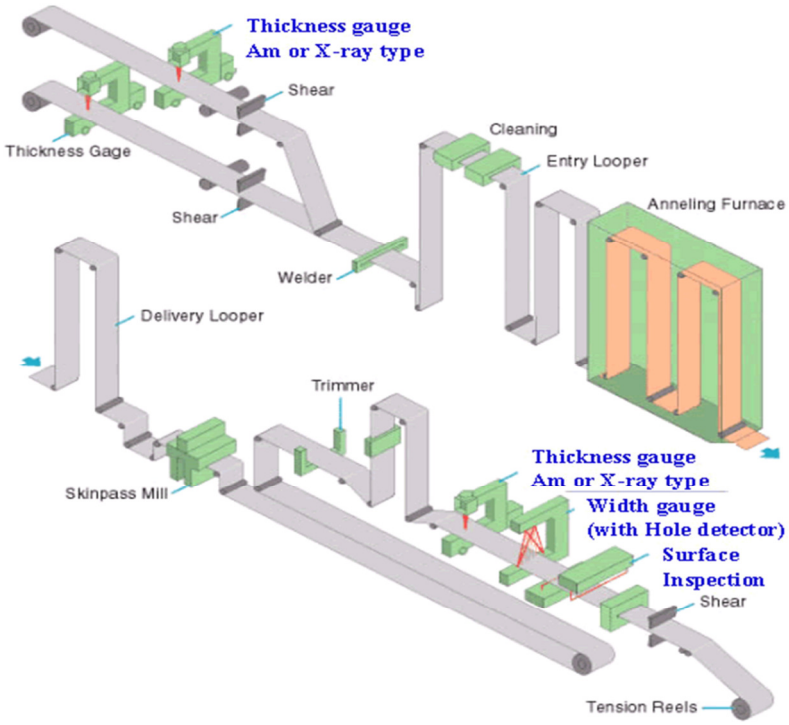


Figura 22. Fluxograma de uma unidade de recozimento contínuo.

3.2.2 - O Processo

O processo propriamente dito consiste da evolução de uma tira metálica no forno com velocidades de 100 a 600 m/min, permanecendo de 2 a 3 minutos no interior do forno.

A zona de aquecimento compreende uma serie de placas radiantes, dispostas de ambos os lados da tira a uma distancia de 20cm e operadas a 900°C.

Nesta região a temperatura se eleva de 200 para 705°C em menos de 5s. Em seguida, o material passa pela zona de encharque, que em algumas instalações é aquecida eletricamente. Posteriormente o material passa por uma zona de resfriamento lento (300 ou 480°C) e outra de resfriamento rápido.

A zona de resfriamento lento é revestida de refratários e possui circulação de ar frio no seu interior, onde se abaixa a temperatura por volta de 300°C.

A zona de resfriamento rápido consiste de dutos com camisas de água, com jatos de gás inerte (para proteção), entre as quais a tira passa um certo número de vezes até atingir a temperatura final, ligeiramente acima do ambiente.

O resfriamento lento (da ordem de 10℃/s) é feito para prevenir efeitos de têmpera por envelhecimento, que resulta da queda de solubilidade do carbono na ferrita as temperaturas mais baixas. Havendo um resfriamento rápido o carbono ficaria dissolvido em super saturação, vindo a se precipitar posteriormente. Portanto, conclui-se que o objetivo do resfriamento lento é, então, precipitar a massa de carbono em solução à alta temperatura.

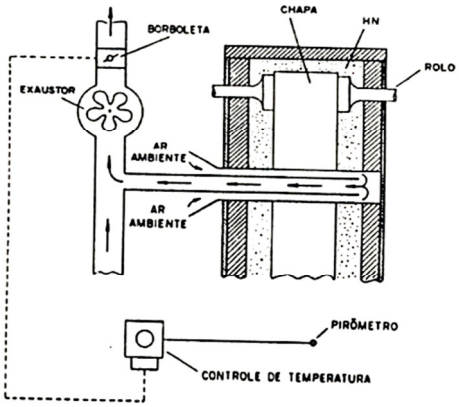


Figura 23/ Ilustração esquemática da zona de resfriamento lento.

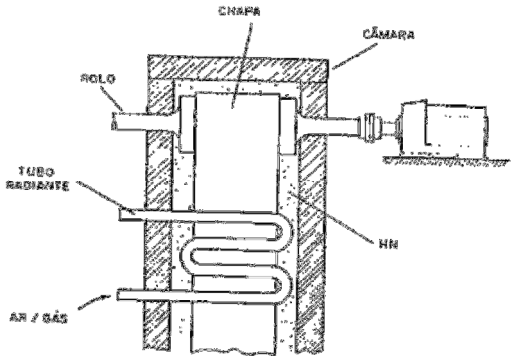


Figura 24. Ilustração esquemática da zona de resfriamento.

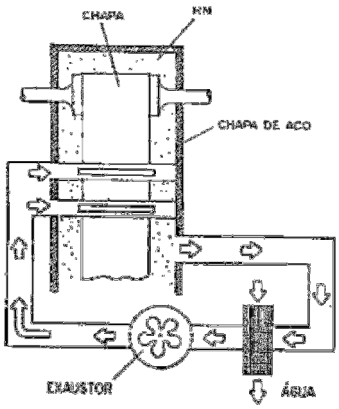


Figura 25. Ilustração esquemática da zona de resfriamento rápido.

Após sair do forno, a tira passa por rolos tensionadores, torre de acumulação de saída (para permitir o corte e a retirada das bobinas), tesoura, rolos de empuxe e bobinadeiras com mandril expansível, para continuar processando o material, enrolando em uma bobinadeira, enquanto se retira uma bobina de uma segunda bobinadeira, sem que haja paralisação da linha.

No interior do forno, a atmosfera é constituída de nitrogênio de 3 a 6 % de hidrogênio. Esta atmosfera é obtida pela queima de hidrocarbonetos com ar (na presença de um catalisador) e posterior do CO_2 e da umidade.

A vantagem do recozimento contínuo é a possibilidade de regular mais rapidamente a temperatura de recozimento, tempo de encharque e velocidade de resfriamento. Outra vantagem deste processo é evitar-se a colagem das espiras umas às outras, o que ocorre no recozimento em forno de campânula. Também notamos a eliminação das manchas de areia (causadas pelos grãos de sílica da vedação dos fornos de campânula) que ficam presos entre as espiras e depois são triturados pela passagem no laminador de encruamento, marcando a superfície da chapa.

Todavia, quando é necessário um material para aplicações específicas de estampagem profunda, utiliza-se um material proveniente do recozimento de bobinas abertas.

3.2.3 - Variantes do processo

A principal variável do recozimento contínuo é a velocidade da chapa dentro do equipamento: variando-se a velocidade, conseguem-se diferentes ciclos térmicos, e benefícios distintos, por isso segue abaixo a descrição dos dois extremos de velocidade de chapa: 150 e 600 m/min.

- Velocidade de 150m/min

Com baixa velocidade é mais fácil controlar as variáveis de processo (maior facilidade de homogeneização de temperatura) e o tempo total de processamento fica em torno de 90 segundos. Seu ciclo térmico e constituído basicamente de uma etapa de aquecimento e quatro etapas de resfriamento (consecutivas). O aquecimento é feito até temperaturas da ordem de 660°C, posteriormente tem-se um primeiro resfriamento (rápido) ao ar (grande gradiente térmico), seguido de uma segunda etapa de resfriamento (lento), com o auxílio de resistências elétricas, na terceira etapa tem-se um resfriamento mais rápido do que o da segunda, onde utilizam-se trocadores de calor (geralmente com água) e gás inerte e por último tem-se um resfriamento em água com posterior secagem com ar quente.

As desvantagens deste tipo de processo estão no grande gasto calórico por quilo de bobina recozida (300kj/kg) e pelo elevado custo de operação.

- Velocidade de 600m/min

Com esta velocidade de chapa, tem-se uma alta produtividade, sendo que o comprimento do forno para este tipo de velocidade é somente 7 metros maior do que o do caso anterior. Nesta variante, é muito importante o controle do processo deve ser mais preciso, por causa da velocidade e do menor tempo de latência.

O ciclo térmico deste processo é basicamente igual ao do caso anterior, a não ser pela presença de uma zona de estabilização de temperatura (homogeneização)

entre a zona de aquecimento e a primeira zona de resfriamento e pela troca de calor por convecção na terceira zona de resfriamento.

Neste processo é necessário manter algumas variáveis como:

-Não passar mais do que 25 segundos a temperatura de 593ºC, para não causar crescimento de grão elevado;

-Não permanecer em temperaturas entre 300ºC e 593ºC par mais de 25 segundos, para não causar crescimento de grão.

3.2.4 - Forno horizontal

Além do forno vertical, tem-se o forno horizontal, o qual tem uma produtividade menor e é indicado para instalações onde a produtividade seja menor do que 10.000 toneladas/mês.

Neste tipo de forno o tratamento térmico é feito de cima para baixo, em cinco camadas sobrepostas. No 1º andar, temos o pré-aquecimento, com resistências elétricas, seguido de aquecimento por radiação; no 2° e 3° andares, temos o resfriamento ao ar e no 4° e 5° temos o resfriamento por convecção, através de ventiladores, estes puxam o ar que passa por uma grande zona de troca de calor, que é rodeada por camisas d'água, assemelhando-se a radiadores.

3.3 - Alternativas

Há perspectivas de que o recozimento contínuo venha a dominar também o campo da estampagem profunda e dos aços acalmados. Uma alternativa é combinar um recozimento contínuo com um rápido ciclo posterior em forno tipo caixa, o que tem sido largamente praticado em chapas zincadas. Outra, mais recente e definida pelos japoneses da Nippon Kokan, é conhecida como "*Shelf-annealing*".

Este processo consiste das seguintes etapas

1- Aquecimento e encharque usuais;

2- Resfriamento rápido até logo abaixo de 500° C, criando uma solução sólida supersaturada de carbono;

3- Encharque de cerca de 30 segundos entre 350 e 500°C precipitando o carbono;
4- Resfriamento até 100°C.
Estes dois últimos processos citados ainda se encontram em desenvolvimento, não sendo difundidos comercialmente.

3.4 - Principais Tipos de Defeitos

No recozimento em caixa um dos defeitos encontrados é o da colagem das chapas umas às outras , principalmente quando se trata de material já cortado, entre os principais fatores que influenciam o aparecimento desse tipo de imperfeição estão a temperatura e o tempo de encharque, a altura da pilha e a superfície da chapa. Outro tipo de imperfeição consiste no aparecimento de manchas de areia, causadas pelos grãos de sílica usados na vedação dos fornos de campânula, que são triturados quando da passagem da chapa no laminador de encruamento, marcando a superfície da chapa.
Um outro tipo de problema observado nesse tipo de recozimento está no fato de que a transmissão do calor acontece lentamente da parte mais externa da bobina para a mais interna, até esta atingir a temperatura de recozimento e depois resfriado também de forma lenta. Isso faz com que, apesar das melhorias obtidas no sistema de aquecimento e na circulação dos gases, o material possua diferenças em sua estrutura, resultando em diferentes propriedades mecânicas ao longo da tira. Esse tipo de problema não é observado no recozimento contínuo, pois cada porção da tira é submetida a um tratamento térmico uniforme, que garante constância e reprodutibilidade nas propriedades mecânicas da chapa.
Já no recozimento contínuo aparecem outros defeitos, o colamento das chapas é evitado mas outros tais como mossa na tira , causada pela formação de casca de óxidos ou de matéria estranha na superfície dos rolos de guia das zonas de temperatura elevada, surgem durante esse tipo de recozimento.
Existem, entretanto, defeitos que são encontrados em ambos os tipos de recozimento um dos principais consiste no tamanho de grão obtido durante o processo. Em caso da obtenção de uma granulação grosseira dos cristais do metal pode surgir, durante a estampagem, uma rugosidade que tem o nome de “casca de

laranja", já no caso da granulação obtida ser muito fina o material obtido possui resistência excessiva e Linhas de Luder.

Há também uma outra preocupação quanto à temperatura de bobinagem, a temperaturas muito altas ocorre a precipitação de partículas de cementita grandes e irregulares, já a temperaturas muito baixas ocorre a formação de cementita mais fina e melhor distribuída.

A ocorrência de manchas de recozimento, causadas por resíduos remanescentes da laminação de tiras também é observada em ambos os processos. Esses resíduos dão origem à manchas que surgem após o recozimento e permanecem na superfície do material. Elas podem causar a inutilização da chapa para determinadas aplicações, principalmente quando submetidas a revestimentos posteriores tais como zincagem, cromagem, entre outros.

3.5 - Atmosferas protetoras

Devido à necessidade de se manter a superfície da bobina lisa e bem acabada, após a decapagem e a laminação a frio, o recozimento deve ser realizado com a adição de gases que formem uma atmosfera protetora, cujos componentes não reajam com o aço.

As atmosferas protetoras usadas comercialmente consistem de gás parcialmente queimado (gás de coqueria ou gás natural) e purificado para a remoção de outros componentes com efeitos deletérios. Um gerador de atmosfera protetora consiste em quatro módulos de controle:

Queimador de gás com controle preciso da taxa de ar/gás;

Câmara de combustão, com catalisador para facilitar as reações;

Resfriador, para a retirada do vapor de água;

Purificador

Os diversos gases componentes de uma atmosfera protetora atuam sobre o aço e as temperaturas elevadas, da seguinte forma:

Oxigênio:

Reage com o ferro para produzir óxido de ferro (carepa):

$2\ Fe + O_2 = 2\ FeO$

Reage com o carbono provocando a descarbonetação:

$2Fe_3C + O_2 = 6Fe + 2CO$

Nitrogênio:

Inerte quando nas atmosferas de gerador, reage quando no estado nascente (atmosferas de amônia dissociada);

Dióxido de Carbono:

Reage com o ferro para produzir oxido de ferro:

$Fe + CO_2 = FeO + CO$

Reage com o carbono provocando a descarbonetação:

$Fe_3C + CO_2 = 3\ Fe + 2CO$

Monóxido de Carbono:

Reage lentamente com o ferro para produzir Fe_3C (carbonetação):

$3Fe + 2CO = Fe_3C + CO_2$

A baixa temperatura, decompõe gerando fuligem:

$2CO = CO_2 + C$

Hidrogênio:

Reage com o oxido de ferro formando Fe metálico. Porem pode ser absorvido pelos aços de alto teor de carbono:

$FeO + H_2 = Fe + H_2O$

Vapor d'água:

Reage com 0 ferro para formar oxido:

$Fe + H_2O = FeO + H_2$

Pode gerar descarbonetação:

$Fe_3C + H_2O = 3\ Fe + 2\ CO + H_2$

Hidrocarbonetos:

Ajudam na carbonetação:

$3Fe + CH_4 = Fe_3C + 2\ H_2$

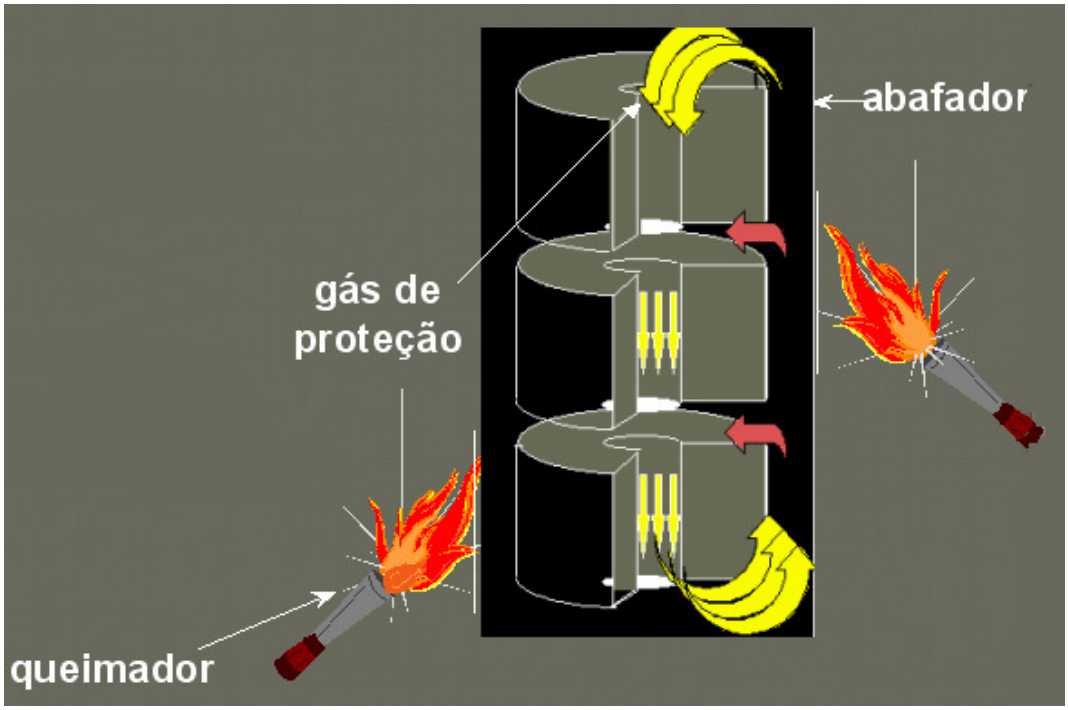


Figura 3.14: Esquema da circulação dos gases da atmosfera protetora dentro do forno de recozimento em caixa.

3.5.1 - Tipos de Atmosferas Protetoras

As atmosferas utilizadas em fornos de tratamento térmico destinam-se a proporcionar uma atmosfera neutra a fim de evitar alterações na composição química do aço e/ou em determinados casos, alterar essa mesma composição com processo tais como a carbonetaçao, a descarbonetaçao ou a carbonitretaçao.

As atmosferas mais comumente usadas resultam da combustão parcial de hidrocarbonetos com o ar, na presença de catalisadores. São resultantes de um dos seguintes processos:

-Combustão completa de gás combustível

-Combustão completa de gás combustível seguida da eliminação do C02 e H20;

-Combustão incompleta de gás combustível;

-Combustão completa de gás combustível seguida da eliminação do CO2 e H20;

-Amônia dissociada;

-Amônia dissociada parcialmente queimada;

-Amônia dissociada completamente queimada;

-Nitrogênio;

Em seguida, analisaremos cada tipo de atmosfera separadamente.

3.5.2 - Combustão completa de gás combustível

A queima de um gás combustível produz CO, H2O e N2. Se o processo de combustão for conduzido com uma leve deficiência de ar, não haverá oxigênio na atmosfera protetora resultante e sim pequenas quantidades de CO e H2.

O gerador para este tipo de atmosfera consiste num pré-misturador, da bomba para mistura e da câmara de combustão com um catalítico depositado sobre o revestimento refratário. Não há necessidade de fonte externa de calor, pois a temperatura na câmara é mantida pelo calor das reações.

A umidade dos gases resultantes é condensada num resfriador e retirada.

Uma analise típica deste tipo de atmosferas seria:

10,0% CO2; 0,50/0 CO; 0,5% H2; 0,0% CH4; 0,0% O2; 89,0% N2

Devemos destacar que essa atmosfera, embora inerte e não explosiva, não é adequada para o recozimento brilhante do aço às temperaturas elevadas devido à ação oxidante do CO2 e H20.

3.5.3. Combustão completa de gás combustível seguida da eliminação do CO2 e H2O

Se o gás da atmosfera anteriormente descrita, depois da queima quase completa, passar por uma aparelhagem que retire o dióxido de carbono e o vapor d'água, obtém-se uma atmosfera adequada cuja analise típica é:

0,0% CO2; 0,5% CO; 0,0% H2; 0,0% CH4; 0,0% 02; 98,9 - 99,0% N2

Este gás produzido, é inerte devido ao altíssimo teor de nitrogênio e possui ponto de orvalho em 4°C.

A atmosfera protetora conhecida pela designação comercial de "Gás NX" é produzida pela queima de um gás combustivel com deficiência de ar (para assegurar a ausência completa de oxigênio nos produtos da combustão), sendo por isso usada no recozimento de aços de médio e alto teor de carbono e aços ferramenta, sem haver descarbonetaçao.

A eliminaçao de todo CO2 e H20 que são agentes descarbonetantes, resulta num elevado teor de nitrogênio no gás. A analise típica desse gás é:

0,1% CO2; 1,0 - 4,0% CO; 1,1- 4,0% H2; 91,9 - 97,8% N2

O gás combustivel é queimado quase completamente para obter baixos teores de CO e assim minimizar o perigo de deposição de carbono na chapa e depois, resfriado a 4°C para eliminar o vapor de água.

O C02 formado, é absorvido pela passagem através de uma torre, com anéis de Raschig, em contra-corrente com uma solução aquosa, a 10 - 15% de monoetanolamina e o vapor d'água restante é retirado pelo resfriamento a 4°C e passagem através de alumima ativada.

Como a 95° C a monoetanolamina desprende CO2, a instalação trabalha em recirculação, com ebulidores, trocadores de calor e uma torre de lavagem.

As atmosferas tipo NX tem menos de 40% de gases combustíveis e assim, não oferecem perigo de explosão, sendo por isso extensamente usadas para a purga de fornos contínuos e em caixa. Não tem o inconveniente das atmosferas tipo DX que depositam carbono nas bordas das bobinas recozidas, pois, sob certas condições de temperatura, o CO é instável e pode se decompor.

Este gás é superior ao tipo DX para o recozimento de bobinas destinadas a fabricação de folha-de-flandres, porque, com seu uso são eliminadas as "bordas pretas" comumente produzidas pelo gás DX. Para a purga do forno, também pode ser utilizado, tanto nas linhas contínuas de galvanização, quanta no tratamento térmico de aços ao silício.

Um outro tipo de atmosfera é a HNX. É uma atmosfera protetora com eliminação do CO e C02 e é preparada em geradores semelhantes ao do gás NX com uma torre adicional para a absorção do C02 formado pela conversão do CO

existente no gás sob a ação do vapor d'água, na presença de um catalisador, segundo a reação:

$CO + H_2O = CO_2 + H_2$

Depois do CO_2 ser removido pela solução de monoetanolamina, o gás passa por uma câmara de reversão, na qual o CO e o H_2O (introduzido sob a forma de vapor), são aquecidos e reagem para formar H_2 e CO_2, atravessando então a segunda coluna de absorção e a seguir, é resfriado a 4°C para condensar a água.

As atmosferas comerciais com a designação HNX são utilizadas para o recozimento brilhante de aço comum e de aços inoxidáveis e ao silício e apresentam a seguinte composição:

0,05% CO_2; 0,05% CO; 3,0 - 10,0% H_2 ; 0,0% CH_4; 0,0% H_2O; 89,9 - 96,9% N_2

As misturas de gases com teores elevados de monóxido de carbono ou de hidrogênio (como DX) não são adequadas para esta finalidade pois o ciclo de recozimento desses aços apresenta uma grande variação de temperatura durante o aquecimento, encharque e resfriamento. Essas misturas gasosas, contendo vapor de água e gás carbônico, reagirão com a superfície metálica para promover a reação $2\ CO = C_2O + C$, depositando carbono na superfície do material, especialmente nas temperaturas entre 540-650°C.

O gás HNX e incombustível e oferece a vantagem de não depositar carbono sobre as bordas das bobinas que estão sendo recozidas. Esta atmosfera é ligeiramente desoxidante e é muito usada para o recozimento de folha-de-flandres, porque não mancha a chapa pela oxidação e não deixa resíduos carbonosos na sua superfície.

3.5.4. Combustão incompleta de gás combustível (DX – gás desoxidante)

Resulta da queima parcial de um combustível gasoso sem eliminar o gás carbônico e a água. Os gases empregados normalmente são: gás de coqueria ou gás natural.

A remoção de H2S é feita mediante a passagem através de camadas de óxido de ferro, misturado com cavacos de madeira, com o intuito de aumentar a superfície de contato.

O gás natural ou o gás de coqueria dessulfurado é queimado numa câmara revestida de refratário, na presença de um agente catalisador, como por exemplo a alumina, e o calor da combustão mantém a temperatura da câmara em 1320° C.

Os gases quentes ao deixarem a câmara de combustão são resfriados em duas etapas, primeiro ate 26-38° C e depois a cerce de 4°C, para a eliminação do vapor d'água. A uma atmosfera de:

5 - 6% C02; 9 - 11% CO; 10 - 15% H2; 0,5 - 1,0% CH4; 0,0% O2; 69 - 73% N2

com um ponto de orvalho de 4°C, comumente chamado de "Gás DX' e que foi a primeira atmosfera protetora especialmente preparada para os fomos de recozimento.

Nas temperaturas de recozimento normais, de 620°C a 705°C para chapas de aço carbono comum, o gás DX tem efeito desoxidante, dai o seu nome. Ao se trabalhar entre 425 e 480°C, tende a depositar carbono sobre o material.

A prática normal é colocar as bobinas sobre a base do forno de recozimento, cobri-las com a coifa intermediária e vedar a junção desta com a base, com areia seca e então passar o gás DX para o interior da caixa. Quando todo o ar for purgado do interior da coifa intermediária, coloca-se sobre ela, o forno de aquecimento.

Durante todo o ciclo de aquecimento e resfriamento, mantém-se o fluxo de gás DX com uma leve sobre pressão. Para obter-se uma superfície brilhante, a atmosfera protetora só deve ser interrompida depois que as bobinas estiverem abaixo de 110°C.

Esta atmosfera é combustível, devendo-se tomar cuidado de purgar bem a instalação para evitar explosões, alem do teor de CO ser perigoso para a respiração. É usada para o recozimento brilhante de aços de baixo teor de carbono, não sendo

recomendada para aços de médio e alto teor de carbono, devido a sua porcentagem de CO que possui uma ação descarbonetante.

3.5.5. Combustão completa de gás combustível seguida da eliminação do C02 e H20

O gás é preparado num gerador semelhante ao usado para produzir a atmosfera do item anterior, queimando gás (natural, de coqueria ou de petróleo), pré-misturado com o ar, numa câmara revestida de refratário. Os produtos da combustão passam depois através de um sistema de absorção, onde o C02 é retirado pela reação com uma solução aquosa de monoetanolamina.

- Amônia dissociada

Pode ser obtido por meio do craqueamento da amônia anidra, resultando num gás de elevado teor de hidrogênio e baixo ponto de orvalho.

A dissociação completa da amônia resulta numa atmosfera com 75% de hidrogênio e 25% de nitrogênio, cujo ponto de orvalho e inferior a -40°C.

O equipamento necessário consiste de uma retorta cheia com o catalítico, aquecida eletricamente, através da qual, passam os vapores de amônia anidra. É utilizada para o recozimento de aços inoxidáveis.

-Amônia dissociada parcialmente queimada

É produzida misturando uma certa quantidade de ar a amônia dissociada, a fim de se ter uma mistura com menor teor de hidrogênio. Uma analise típica do gás obtido é:

20% H2; 0,0% O2; 80% N2

O equipamento consiste no dissociador de amônia, semelhante ao da atmosfera de amônia completamente dissociada, e de uma segunda câmara para a queima da mistura de ar e da amônia dissociada. O gás AX e produzido pelo

aquecimento da amônia anidra a temperatura de 870 – 980°C, numa câmara com um catalisador e resfriando a mistura dissociada. A reação é a seguinte:

$2NH_3 + calor = N_2 + 3H_2$

A análise do gás AX nos revela um percentual de: 75% H_2 e 25% N_2.

A amônia dissociada é altamente explosiva, devido ao seu elevado teor em hidrogênio e por isso, devem ser tornados cuidados extremos para evitar a infiltração de ar no interior do forno.

É uma atmosfera fortemente desoxidante, sendo, porém, inerte ao aço nas temperaturas usadas em tratamentos térmicos. É muito usada em fornos contínuos de galvanização, pois em pouco tempo o hidrogênio remove os óxidos da superfície, formando vapor d' água:

$FeO + H_2 = Fe + H_2O$

O vapor de água formado, por sua vez, reage com o carbono da superfície:

$2H_2O + C = CO + H_2$

A amônia dissociada é também usada no recozimento a temperatura elevada dos aços ao silício. Para o recozimento de aço inox, deve-se tomar precauções especiais para reduzir a um mínimo a infiltração de ar e de umidade no forno, pois o cromo se oxida rapidamente nas temperaturas elevadas usadas.

- Amônia dissociada completamente queimada

Para produzir esta atmosfera, mantém-se uma ligeira deficiência de ar de combustão, para que não haja oxigênio livre nos gases formados, obtendo-se uma mistura de 1% H_2 e 99%N_2.

O equipamento necessário para a produção deste tipo de atmosfera é muito semelhante ao utilizado para a produção da atmosfera de amônia parcialmente queimada, sendo desnecessário aquecer a câmara de combustão da amônia

dissociada, pois o calor das reações e suficiente para assegurar a continuidade da operação.

- Nitrogênio

Como subproduto da produção de oxigênio industrial, quantidades crescentes de nitrogênio têm ficado disponíveis. Para sua utilização como atmosfera protetora, este N2 deve conter menos de 20 ppm de O2. A maneira de preparar esta atmosfera protetora e fazer reagir o oxigênio residual com o hidrogênio obtido da am6nia dissociada, na presença de um catalítico como o paládio, e em seguida retirar a água formada.

Obtém-se uma mistura de hidrogênio e nitrogênio com a seguinte analise:

0,02 - 0,3% CO2; 3 -12% H2; 0,2 - 0,3% CO; 0,0% 02; 87 - 97% N2

Outra atmosfera protetora usando processo catalítico a baixa temperatura, a partir de amônia anidra e ar, tem a seguinte análise:

2 - 30% H2; 70 - 98% N2

A remoção da umidade é feita pela refrigeração a temperaturas de 2 a 4°C ou pela absorção em alumina ativada, usando-se duas unidades secadoras alternadamente, uma secando o gás e a outra sendo recondicionada, invertendo-se o ciclo a cada oito horas. Além destas, ainda podemos destacar as atmosferas protetoras HX e RX.

A atmosfera HX e obtida pela dissociação de combustível gasoso com vapor de água numa retorta aquecida externamente e mediante a ação de um catalítico. Obtém-se um gás rico em CO e H2, que e tratado de modo a remover o CO e CO2, deixando apenas H2. A análise típica deste gás é:

0,0 - 0,05% C02; 0,0% H20; 0,0 --4,55% CO; 0,0% 02; 0% N2; 95 - 100% H2

A atmosfera RX é obtida por um gerador endotérmico que necessita de aquecimento externo para a continuidade das reações e consiste essencialmente de:

0,0 - 0,2% C02; 20 - 21% CO; 38 - 41% H2; 0,2 - 0,4% CH2; 37 - 39% N2

O gás RX é extensamente usado para carbonetar a superfície de peças durante o tratamento térmico.

4. Modelamento Matemático

Com o surgimento das técnicas computacionais, a capacidade de processar informações aumentou, e isso possibilitou a resolução de equações matemáticas sofisticadas para simular o comportamento de peças sujeitas a operações e tratamentos, sem ter a necessidade da realização prática do processo. Isto indica uma diminuição de tempo, desde a elaboração de um projeto até a sua aplicação industrial, bem como uma grande economia em experiências que seriam realizadas até que se detectassem defeitos no processo, que são facilmente vistos na simulação.

O Método das Diferenças Finitas, utilizado neste modelo, consiste em uma ferramenta computacional baseada na solução de equações diferenciais que possibilitam prever a condutividade térmica em materiais. Mudando-se as suas equações é possível prever uma infinidade de fenômenos que vão desde os campos de tensões em uma peça que será deformada mecanicamente até o resfriamento de uma peça que será fundida.

No recozimento de chapas este método pode ser usado para entender e prever o resfriamento e o aquecimento de uma bobina em um forno de recozimento. Ele também pode ser usado para a compreensão do resfriamento de chapas nos chuveiros de laminação, feito para introduzir propriedades desejadas e para evitar defeitos em chapas.

As equações utilizadas neste modelo matemático são para um ambiente transiente unidimensional e onde a transferência de calor ocorre somente por condução. Basicamente, para esse caso particular, após uma série de simplificações que serão explicitadas à frente, o Método das Diferenças Finitas Explícito possui duas equações: uma para os pontos que estão na superfície do material, em contato com a temperatura do ambiente, e outra equação para os pontos que se encontram no interior da chapa.

A equação de um ponto na superfície é dada por:

$$T_0^{i+1} = \frac{1}{1 + h\frac{\Delta x}{K}}\left[T_1^{i+1} + \frac{h * T_{amb} * \Delta x}{K}\right]$$

Em que:

T = temperatura [ºC]

h = coeficiente de transferência de calor [W/m^2 ºC]

Δx = (espessura da placa) / (nº de intervalos em que ela foi dividida) [m]

K = condutividade térmica W/m ºC

T_{amb} = temperatura do ambiente em que está o material. Em alguns casos é a temperatura do forno. [ºC]

Esta equação mostra que um ponto que está na superfície da bobina varia de acordo com a temperatura do ambiente, além da temperatura do ponto imediatamente seguinte no interior da placa.

A equação de um ponto no interior da placa é dada por:

$$T_n^{i+1} = \Gamma * T_{n-1}^{i} + (1 - 2\Gamma) * T_n^{i} + \Gamma * T_{n+1}^{i}$$

Em que:

T = temperatura [ºC]

Γ = Fo = número de Fourier = (α*Δt)/ (Δx)^2

α= difusividade térmica [m^2/s]

Δt = intervalo de tempo em que está analisando [s]

Δx = intervalo de espaço em que está analisando[m]

Sendo que: α= K/ (ρ*c)

K = condutividade térmica w/m ºC

ρ = densidade do material [kg/ m^3]

c = calor específico [J/ kg ºK]

Neste caso, considera-se se que o aquecimento é unidimensional e por isso um ponto no interior, como mostrado na equação, depende da temperatura dele mesmo no instante anterior e das temperaturas dos pontos ao lado dele no instante anterior.

4.1 - Aplicação do Método das Diferenças Finitas

O Método das Diferenças Finitas foi utilizado para modelar as curvas de aquecimento e resfriamento de pontos diferentes de uma bobina recozida em um forno de caixa. Como dito, para poder aplicar este método foram feitas diversas simplificações, que serão apresentadas a seguir.

O ponto quente da bobina é o ponto que possui sempre a maior temperatura da bobina, local onde se recebe mais calor. Normalmente, o ponto quente se localiza na parte externa superior da bobina, devido à radiação recebida da parede do forno. O ponto frio, parte que mais demora a se esquentar, se localiza na parte interna e inferior. O ponto quente e o ponto frio em uma situação real estão indicados na **figura 26.**

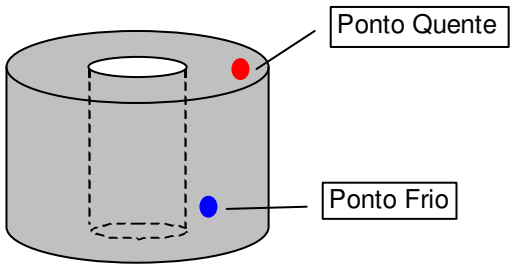


Figura 26. Ponto frio e ponto quente de um bobina recozida

Para se compreender o fenômeno do recozimento de uma bobina em um forno em caixa foram feitas algumas simplificações para uma aproximação inicial do modelo. As simplificações estão descritas a seguir.

4.2 - Simplificações aplicadas

A **tabela 1** apresenta lista todas as simplificações feitas nesse modelo. Em seguida, estas serão justificadas estas simplificações.

Tabela 1. Simplificações aplicadas para aplicação do modelamento matemático

Núme	Real	Simplificado
1	Bobinas de tamanhos	Bobinas de tamanhos
2	3 ou 4	1 bobina
3	Placa	Peca
4	Aquecimento	Aquecimento
5	1 bobina	1 placa
6	Temperatura no interior na diferente da temperatura	Temperatura no interior na igual a temperatura do
7	K varia com a	K constante com a

4.2.1 - Bobinas de Tamanhos Diferentes

Em uma usina integrada os lingotes são feitos de tamanhos parecidos, mas nenhum é rigorosamente igual ao outro, todos possuem diferenças de comprimento e espessura. Os lingotes cujo material é proveniente do final de uma panela de metal líquido e do início de outra normalmente têm dimensões diferentes das padrões. Essa parte de transição é desconsiderada durante o modelamento. Portanto, os lingotes de tamanhos diferentes darão origem a placas de comprimentos diferentes que, conseqüentemente, quando bobinadas terão tamanho (diâmetro) de bobinas diferentes. Neste modelo apresentado considerou-se que todas as bobinas eram de tamanhos iguais, ou seja, apresentavam o mesmo diâmetro, além de mesma altura, para termos um caso geral do aquecimento e do resfriamento da bobina no forno em caixa.

4.2.2 - 3 ou 4 bobinas a uma Única Bobina

Os fornos de recozimento têm um tamanho padrão. Isto porque, como o ciclo de recozimento em caixa é longo, é necessário que ele tenha uma boa produtividade para ser rentável. Porém, não se pode empilhar muitas bobinas porque pode ocorrer deformação das bobinas inferiores com o peso das bobinas posicionadas acima (devido ao amolescimento conseqüente do aquecimento).

Entre uma bobina e outra há um convector de ar, como foi explicado no item 3.1.5 deste trabalho. Mas nos cálculos do modelo considerou-se que não houvesse convectores e que as 3 ou 4 bobinas fossem 1 única bobina de cuja altura seja igual a soma das alturas das 3 ou 4 bobinas, como ilustrado na **figura 27.** Esta simplificação é possível devido ao fluxo de calor no sentido vertical da bobina ser desprezível perante o fluxo radial.

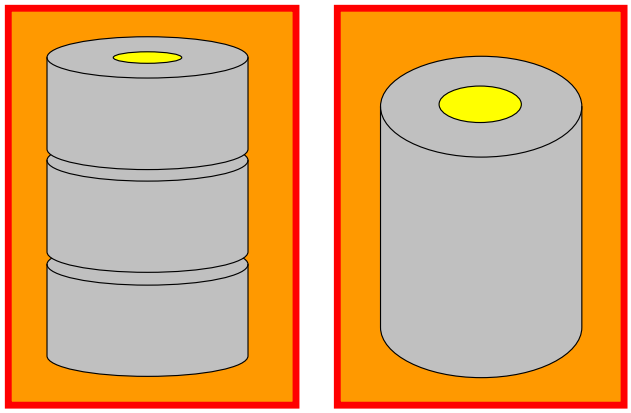


Figura 27. Simplificação para 1 bobina

4.2.3 - Placa enrolada

Uma bobina nada mais é do que uma chapa longa enrolada. Além disto, ela é recoberta por lubrificante que é utilizado na laminação. Se fosse utilizada para a aplicação deste método uma precisão maior, o ideal seria considerar que a bobina é como um compensado de chapas e filmes de lubrificantes de laminação.

A conseqüência imediata é que a condutividade térmica da bobina seria em função da condutividade térmica do metal da placa e do óleo lubrificante. O método apresentado nesse trabalho não visa obter uma precisão muito rigorosa, por isso considerou-se que a condutividade da bobina é em função somente da condutividade térmica da chapa metálica.

4.2.4 - Aquecimento tridimensional

A bobina dentro do forno se aquece na parte externa pela radiação do calor da campânula e também pela convecção de gás da atmosfera em que a bobina está envolvida. A parte interna da bobina se aquece com a convecção do gás da atmosfera e pela condução de calor da parte externa para a interna. Para facilitar a aplicação do modelo considerou-se que a bobina se aquece igualmente tanto na parte interna quanto na parte externa.

Esta modificação influencia na localização do ponto frio e do ponto quente da bobina. Deste modo o ponto frio foi deslocado para o ponto médio entre o raio interno e externo da bobina, enquanto o ponto quente é qualquer ponto localizado na parte externa da bobina. O novo ponto quente e ponto frio são indicados na **figura 28.**

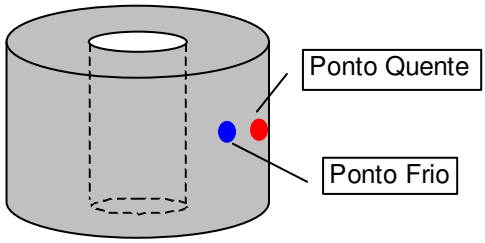


Figura 28. Ponto quente e o ponto frio com a simplificação

4.2.5 - Uma bobina pode ser entendida como uma placa grossa

Esta simplificação pode ser feita porque, depois das simplificações já feitas, a bobina pode ser vista como um anel, um corpo infinito, como se fosse uma placa tão comprida que o aquecimento e o resfriamento pela borda dela é desprezível. Desta maneira uma placa infinita só perde ou ganha calor pela parte superiores ou inferiores, e neste caso seria pela parte de dentro ou de fora da bobina. Então, considerando-se a simetria radial da bobina, realiza-se a aproximação, mostrada na **figura 29.**

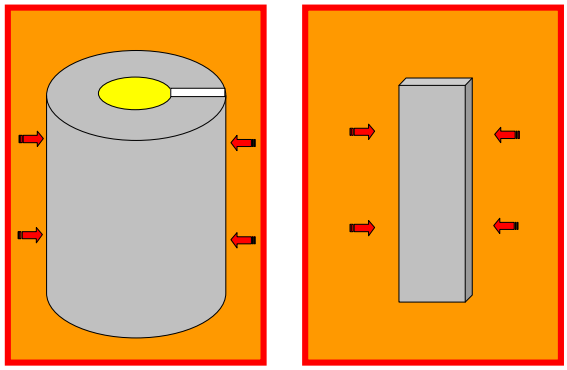


Figura 29. Simplificação de uma bobina em uma placa.

4.2.6 - Temperatura da parte interna da bobina é diferente da temperatura da parte externa

Como a parte interna de bobina é resfriada e aquecida somente por convecção do gás da atmosfera do forno enquanto que a parte externa é também aquecida pela radiação de calor da campânula, a parte externa está sob uma temperatura mais elevada que a parte interna da bobina.

Aproximou-se dessa maneira e assim modificou-se a localização do ponto frio e do ponto quente da bobina que são mostrados na **figura 28**. Sem essa aproximação o ponto frio não estaria no ponto médio entre o raio interno e externo. Abaixo tem-se a **figura 30**, que representa esta simplificação.

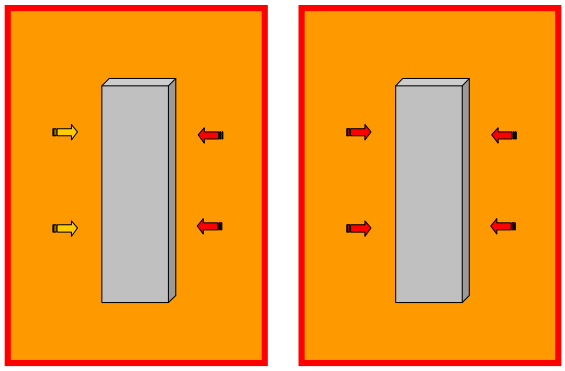


Figura 30. As temperaturas dos dois lados da placa são iguais

4.2.7 - Condutividade térmica (k) varia com a temperatura

A condutividade térmica é uma propriedade intrínseca de cada material. Ela está relacionada com capacidade de um átomo passar calor para outro, e esta capacidade varia proporcionalmente com a temperatura. Isso torna-se lógico se notado que em temperaturas mais elevadas os átomos estão mais agitados e por isso eles se colidem mais uns com os outros transmitindo energia - calor.

A aproximação ideal seria utilizar uma condutividade térmica a cada temperatura, pois a variação de temperatura é muito grande (de 27ºC na temperatura ambiente até 750ºC na temperatura máxima do forno). Porém, neste

caso utilizou-se somente a condutividade térmica média do metal e considerou-se que a mesma é constante para facilitar os cálculos. Para este fim, adotou-se uma condutividade média obtida no ASM *Metals Handbook* (referência 11) para várias temperaturas.

4.3 - Ciclo de temperaturas de um forno de recozimento

Em um forno de recozimento são feitos diversos tipos de aços e para cada um destes passa-se por um ciclo de temperaturas diferentes. De um ciclo para outro pode se variar o tempo de encharque, o tempo de permanência total no forno, a temperatura máxima de recozimento, o tipo de atmosfera e outras variáveis. Como exemplo, nesse estudo, utilizou-se um ciclo de recozimento como o mostrado na **figura 31**.

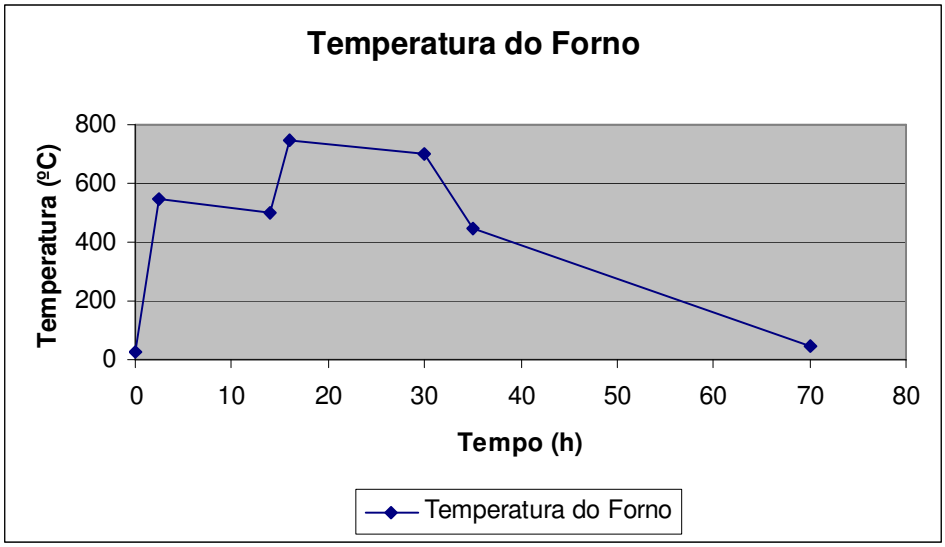


Figura 31. Exemplo de um ciclo de temperatura para um forno de recozimento em caixa

O ciclo do gráfico acima foi dividido em 6 etapas, de acordo com a **tabela 2**

Tabela 2. Divisão do ciclo de temperaturas em etapas

Etapa	Tempo (h)
Etapa I	0-2,5
Etapa II	2,5-14
Etapa III	14-16
Etapa IV	16-30
Etapa V	30-35
Etapa VI	35-70

A etapa I corresponde a um pré-aquecimento do forno até a temperatura deura de 550ºC. Quando o forno atinge esta temperatura, ela é mantida por volta de 11,5 horas, o que corresponde à etapa II. Esta etapa tem duas finalidades principais: quebrar as moléculas do óleo de laminação em partículas menores para evitar o craqueamento e homogeneizar a temperatura da bobina, ou seja, diminuir a diferença de temperatura entre os pontos quente e frio da bobina.

Após isso, o forno é novamente aquecido; agora até a temperatura de 750ºC, o que corresponde à etapa III. Essa temperatura é mantida por 14 horas na etapa IV e é nela que ocorre o recozimento. O tempo de duração da etapa IV também é chamado de tempo de encharque, que corresponde ao tempo em que o forno fica a uma temperatura constante até o ponto frio sofrer recozimento. Caso esse tempo não seja adequado o ponto frio pode não recozer e a bobina fica fora das especificações.

As etapas V e VI Consistem no resfriamento das bobinas. Este, por sua vez, é feito em etapas de modo a ser o mais próximo possível do resfriamento de equilíbrio.

4.4 - Aplicação das equações após as simplificações

As simplificações foram feitas para se compreender de maneira simplificada os fenômenos durante o aquecimento e no resfriamento da bobina e para poder aplicar as equações do método das diferenças finitas explícito.

A equação da temperatura das partes internas à placa é dada por:

$$T_n^{i+1} = \Gamma * T_{n-1}^i + (1 - 2\Gamma) * T_n^i + \Gamma * T_{n+1}^i$$

Para que o método seja estável, Γ < 0,5. Divide-se a placa em 8 partes (n=8), sendo que cada parte mede 0,10166 m (Δx = 0,1066m) e faz-se uma iteração a cada 10 minutos (600s). A condutividade térmica do material, segundo o Metals Handbook, é 35,05 W/m °C. Com esses números obteve-se Γ = 0,32315.
Desta maneira, foi possível calcular as temperaturas internas da chapa.

As equações da temperatura das partes externas (superfície) à placa são dadas por:

$$T_0^{i+1} = \frac{1}{1 + h\frac{\Delta x}{K}} \left[T_1^{i+1} + \frac{h * T_{amb} * \Delta x}{K} \right]$$

Nesta equação utilizaram-se os mesmos Δx, Δt, k da equação anterior, porém o T_{amb} é a temperatura do forno no determinado instante. O valor do coeficiente de transferência de calor (h) não pode ser obtido através da literatura, pois ele varia com diversos fatores relacionados a cada projeto. Neste caso ele varia em função da taxa de aquecimento, da velocidade de convecção dos gases, do tipo de atmosfera presente no forno e outros.

Para determinar o coeficiente de transferência de calor utilizou-se a curva de um ciclo de uma bobina para determinar alguns critérios de parada. Então, pela tentativa e erro, variaram-se os valores de h até que os critérios de paradas fossem satisfeitos. Os critérios de parada são as temperaturas do pontos quentes em cada instante de tempo de cada etapa, indicados na **tabela 3.**

Tabela 3. Critérios de parada

Etapa	Tempo (h)	$T_{Pto\ Quente}$ (°C)
Etapa I	0-2,5	280
Etapa II	2,5-14	480
Etapa III	14-16	580
Etapa IV	16-30	680
Etapa V	30-35	510
Etapa VI	35-70	80

Com os critérios de para foi possível ter um valor aproximado do coeficiente de transferência de calor que está indicado na **tabela 4**.

Tabela 4. Valores de h em cada etapa

Valores de h (W/m^2 ºC)		
Etapa I	t=0-2,5h	146
Etapa II	t= 2,5-14h	1650
Etapa III	t=14-16h	93
Etapa IV	t=16-30h	240
Etapa V	t=30-35h	316
Etapa VI	t=35-70h	237

4.5 - Resultados obtidos

Utilizando os valores dos coeficientes apresentados na tabela 4 e as simplificações citadas anteriormente, obteve-se a curva de aquecimento/resfriamento de cada distância n da chapa.

A **figura 32** mostra o aquecimento da bobina até a etapa V, ou seja, até o fim do recozimento. No gráfico, cada linha corresponde à variação de temperatura dentro da bobina para um determinado instante. São mostrados apenas os nós até o 4, pois os pontos onde n = 5, 6, 7 e 8 são semelhantes aos pontos n = 3, 2, 1, e 0 respectivamente. Observa-se que, no fim do tempo de encharque, a diferença entre os pontos frio (nó 1) e quente (nó 4) da bobina é mínima, o que garante uma maior homogeneidade do produto final.

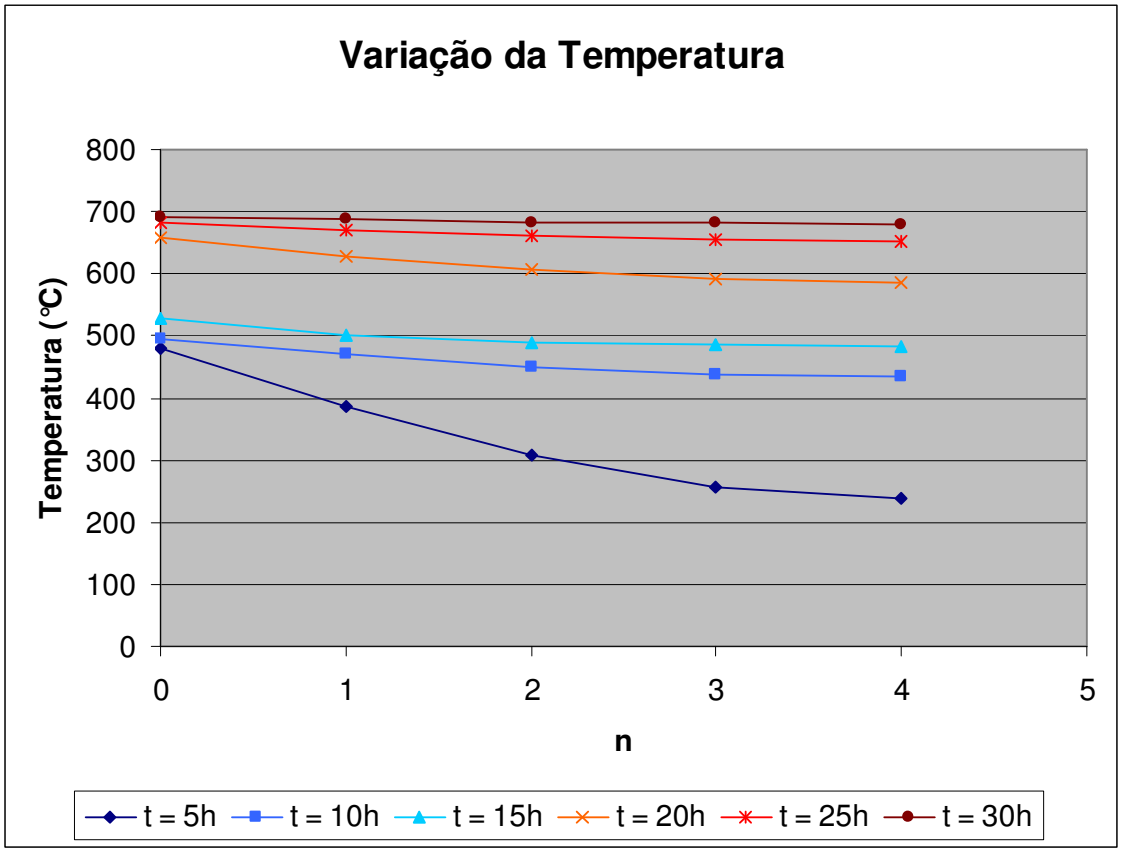


Figura 32. Temperatura da bobina em função do tempo e da posição

O aquecimento junto com o resfriamento da bobina é apresentado na **figura 33**. A variação de temperatura também é mostrada em relação aos nós da bobina. Observa-se que, nos pontos mais externos (mais sensíveis à variações de temperatura do forno), a variação de temperatura é mais próxima da do ciclo térmico e, em pontos mais internos, a variação é mais constante.

Outro aspecto válido de atenção é o de que o ponto frio, na etapa de resfriamento, é o mais quente da bobina, o que também se deve ao fato de que pontos mais internos são menos sensíveis às variações de temperatura do forno.

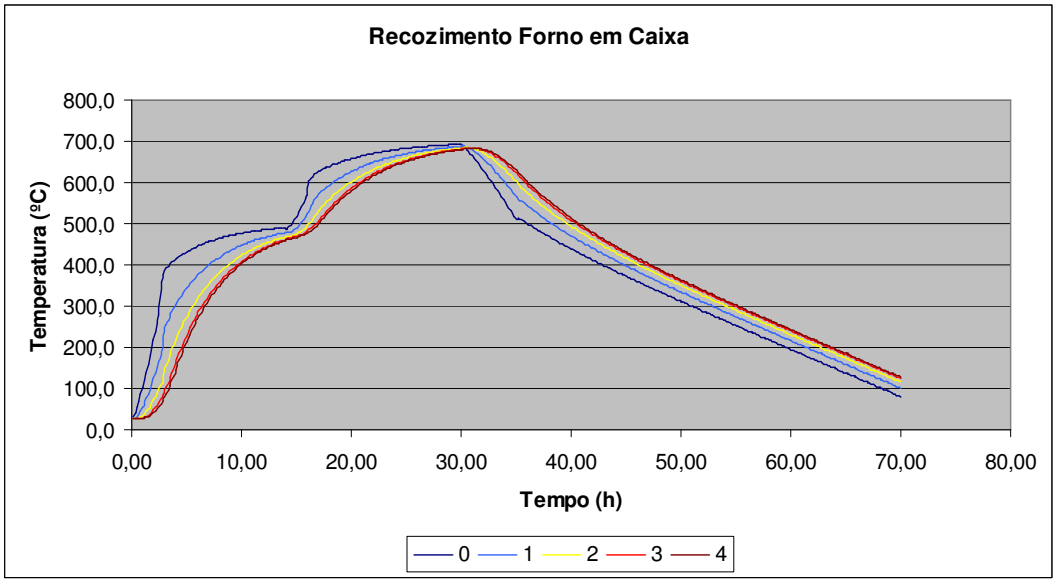


Figura 33. Curva de aquecimento e resfriamento da bobina

A variação de temperatura com o tempo para os pontos frio e quente foi comparada à variação em um ciclo térmico real, realizado pela COSIPA. Isso é mostrado na **figura 34**.

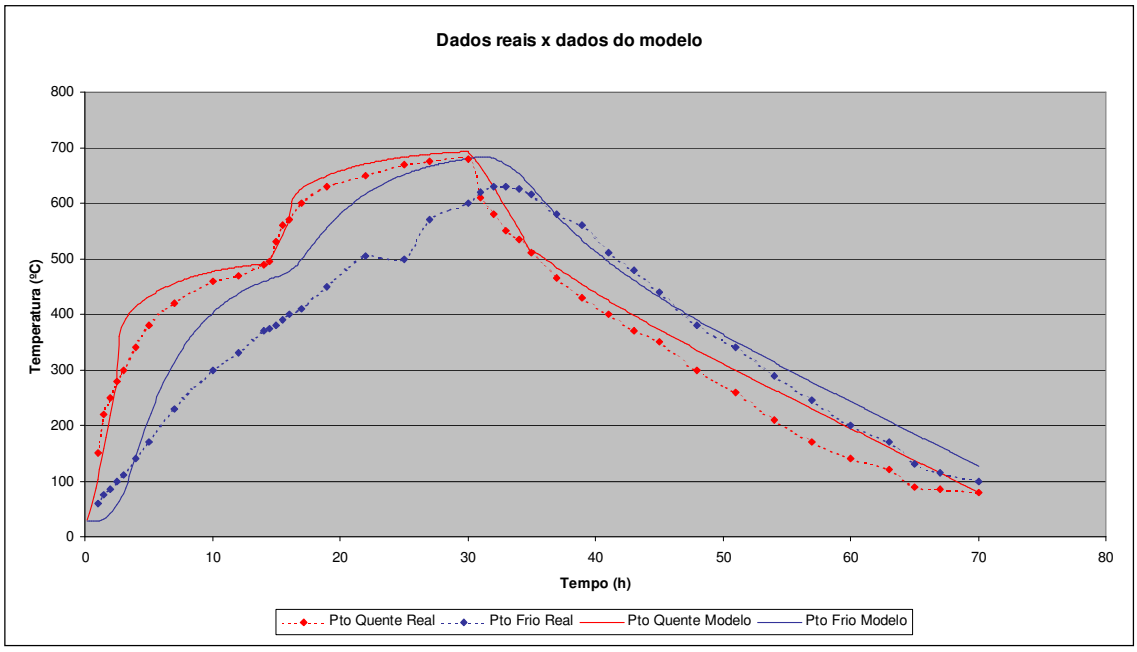


Figura 34. Comparação entre um ciclo térmico real (realizado em um forno caixa da COSIPA) e o calculado pelo método matemático

Pode-se observar que o modelo tem um desvio pequeno nas etapas V e VI, na parte do resfriamento e nas etapas I, II, III e IV ele tem um desvio maior, principalmente para o ponto frio.

Apesar dos desvios apresentados, as curvas obtidas pelo modelo matemático são boas suficientes para se estimar o aquecimento em diversos pontos da bobina. Esses dados são muito válidos para se saber, por exemplo, qual a temperatura do ponto frio no desligamento do forno.

Caso a temperatura deste ponto esteja muito distante da do ponto quente, o ponto frio pode não ter passado por um recozimento adequado, estando possivelmente cru, o que provocaria uma grande heterogeneidade nas propriedades do inicio e do fim da bobina. Portanto, a bobina retida do forno com grande diferença entre as temperaturas dos dois pontos, quando desenrolada, será uma chapa com texturas diferentes ao longo dela. No início terá uma boa textura, com grãos equiaxiais, e será fácil de conformá-la. Ao longo dela, a textura será diferente, ela estará cada vez mais encruada porque o material foi menos recozido, e no final, será muito difícil conformá-la.

Outro ponto importante que também deve ser lembrado é o de que as curvas obtidas são uma primeira aproximação. Em uma situação industrial a etapa seguinte seria refinar o modelo. Isto poderia ser feito utilizando uma condutividade térmica variando com a temperatura e também excluindo algumas simplificações muito utópicas, assim, aproximando-nos do modelo real.

5. Acabamento de produtos planos

5.1 - Manuseio de bobinas

Ao deixarem o laminador de tiras a quente e antes do tratamento de decapagem, as bobinas são depositadas na sua vertical ou horizontal. De qualquer modo, não se deve colocar mais que três bobinas uma sobre a outra, para evitar deformá-las, achatando-se aquelas localizadas na parte inferior das pilhas. À saída da decapagem, são manuseadas com o seu eixo na horizontal e, também não devem ser empilhadas uma sobre a outra. O manuseio das bobinas deve ser feito através de guindastes ou similares, o modo mais comum e eficiente para erguer bobinas de até 20 toneladas, nas áreas de acabamento, é o trator com garfos elevatórios. Os principais problemas destes equipamentos, muito pesados, são: a necessidade de construir pisos com elevada capacidade de carga e os corredores bastante largos. Um piso para um trator capaz de transportar bobinas de 15 toneladas precisa de 20 cm de concreto, revestido de blocos de madeira de 10 cm de altura.

Outro método de transporte para transportar bobinas no seu eixo vertical é a ponte rolante, empregando-se eletroímãs ou garras articuladas especiais, ou gancho em forma de “C”. A desvantagem é que o operador está afastado da área de trabalho, isso dificulta depositar delicadamente a bobina, sem danificar os seus bordos. Atualmente, utilizam-se as pontes rolantes dotadas de controle remoto via rádio frequência para assegura um melhor posicionamento do operador.

Os transportadores de rolos em “V” podem ser usados para transferir, de um edifício para outro, bobinas de pequeno peso e com seu eixo na horizontal.

O modo mais eficiente, embora mais caro, de transportar as bobinas é a corrente sem fim, com patins, sobre os quais a bobina é depositada. A vantagem deste sistema é que a bobina não roda sobre si mesma durante o manuseio estando com todo o peso sobre as espiras externas, o que seria prejudicial no caso de material já pronto.

5.2 - Acabamento de chapas finas

Aproximadamente 75% do material laminado a quente passa pela linha de decapagem, o restante pelo acabamento de chapas a quente, onde é cortado na forma de chapas e ainda, se necessário, por um laminador de acabamento.

As tiras que atravessam as linhas de decapagem de uma usina de produtos planos podem ser destinadas ao laminador de tiras a frio, ao laminador de folhas-de-flandres ou, em menor quantidade, ao acabamento de produtos laminados a quente, decapados e oleados. Estes produtos são processados da mesma forma que as bobinas vindas diretamente do laminador de tiras a quente. Uma pequena quantidade de material laminado a quente e decapado, passa por uma linha de galvanização. Trata-se de material mais espesso, que não necessita de redução a frio.

As bobinas que vão aos laminadores de tiras a frio são reduzidas num trem continuo de 4 a 6 cadeiras ou num laminador reversível. É comum hoje, combinar o laminador a frio com a linha de galvanização, que contem um forno de tratamento térmico. As bobinas destinadas à esmaltação vítrea passam por uma linha contínua de recozimento e decapagem.

Uma parte das bobinas laminadas a frio ainda é recozida em fornos de campânula e laminada na cadeira de encruamento, sendo depois enviada diretamente ao cliente sob a forma de bobinas, ou cortada numa linha de tesouras e embarcada sob a forma de pacotes de chapas. Pequenas tonelagens são cortadas logo depois da laminação a frio, recozidas em fornos de campânula e encruadas já na forma de chapas.

O outro grande fluxo de material deixando a decapagem é laminado para folha-de-flandres em instalações de quatro, cinco, ou seis cadeiras ou num laminador reversível de múltiplos cilindros. Depois da redução a frio, todo o material para folha-de-flandres sofre limpeza eletrolítica e recozimento e a linha de estanhamento eletrolítico.

5.3 - Linha de tesouras

Dois tipos de operações de corte longitudinal podem ser necessários numa linha de acabamento de um laminador de tiras: aparamento dos bordos, para obtenção de uma bobina de largura rigorosamente exata, ou divisão de bobinas em fitas mais estreitas. Para o último tipo de aplicação, a tesoura rotativa ou de discos, é a solução ideal. Para o aparamento lateral da tira na largura exata as tesouras montadas sobre carcaças móveis são utilizadas, que podem ser aproximadas e afastadas, sem modificar a ajustagem das facas circulares. As linhas para divisão longitudinal cortam material que foi enrolado em bobinas pesando até 30 toneladas.

Existem desenroladeiras de dois tipos: cones e mandril expansível. As de cones têm a vantagem de poderem ser empregadas para um grande número de diâmetros internos de bobinas, sem haver necessidade de adaptadores. Porém, os cones amassam as bordas das espiras internas, diminuindo o aproveitamento do material. Os cones são montados em suportes deslocáveis, por meio de pistões hidráulicos, igual e uniformemente em relação à linha de centro da máquina. Uma mesa elevatória coloca as bobinas na posição adequada para a inserção dos cones.

As desenroladeiras de mandril expansível possuem quatro segmentos, cuja expansão ou contração é feita por um cilindro hidráulico. Os segmentos são movimentados radialmente por meio de anéis excêntricos e por meio de cunhas piramidais, para tamanhos maiores. O ajuste lateral permite a guiagem exata da tira, mesmo no caso de bobinas danificadas ou cujas espiras ficaram mal enroladas, ao se deslocar a parte superior da bobinadeira, por meio de um pistão hidráulico.

A tesoura de divisão em tiras estreitas é construída com suportes excêntricos para os mancais, de modo que, ao ajustar verticalmente as lâminas, o eixo superior desce ao mesmo tempo em que o inferior é deslocado para cima, mantendo-se a mesma altura da linha de passe. As lâminas das facas têm quatro gumes, sendo suficiente mudar a posição da peça, para ter-se um novo gume, de modo a permitir maiores períodos entre afiamentos. O tambor rotativo é projetado de modo a ter duas facas colocadas a 180°, permitindo uma melhor distribuição dos esforços e possui um volante pesado para neutralizar o choque no momento do corte. A ligação entre o motor e o volante é feito por meio de correias em V, o que evita o travamento no caso de sobrecarga momentânea.

As rebobinadeiras têm mandris do tipo retrátil, cuja expansão e contração é operada hidraulicamente; os separadores são discos de grande diâmetro, com furo central do mesmo tamanho que o mandril e que permitem enrolar as tiras corretamente e sem interferência.

5.4 - Linhas de corte para material laminado a quente

Uma linha de corte possui os seguintes componentes **(ver figura 35):**

- Rampa de entrada: com batentes acionados por meio de cilindros pneumáticos, para armazenar três a quatro bobinas a serem processadas;

- Abridor: a bobina é posta em posição por meio de roletes-suporte, que a giram em torno do seu eixo de modo a colocá-la na posição correta para que o cutelo, ao descer verticalmente, afaste a ponta suficientemente do corpo da bobina, permitindo depois, que esta ponta entre nos roletes alimentadores;

- Desenrolador: que além do desenvolvimento da bobina efetua o seu aplainamento;

- Mesa de acumulação;

- Guias com roletes laterais: para guiar as tiras;

- Rolos alimentadores: sendo o rolete inferior acionado por um motor de corrente contínua e o superior, livre, pressionado contra a chapa por meio de cilindros de ar comprimido;

- Tesoura de aparamento lateral: de discos rotativos, com o picador de sucata constituído de duas lâminas fixas de duas outras montadas, a 180° uma da outra, num eixo girante;

- Mesa de acumulação: antes da tesoura vertical, com sua mesa de medição e respectivo esbarro;

- Aplainadeiras a frio: a primeira, tipo quádruo para material mais fino e a segunda, tipo Duo, para material mais espesso.

- Esteira transportadora: inclinável pela atuação de cilindros de ar comprimido, que funciona como alçapão, rejeitando as chapas defeituosas para um transportador localizado sob a maquina ou encaminhando, quando na posição elevada, as chapas de primeira qualidade para esteira de transporte que as leva ao empilhador deste material;

- Balança: determinação do peso dos amarrados de chapa antes da embalagem final;

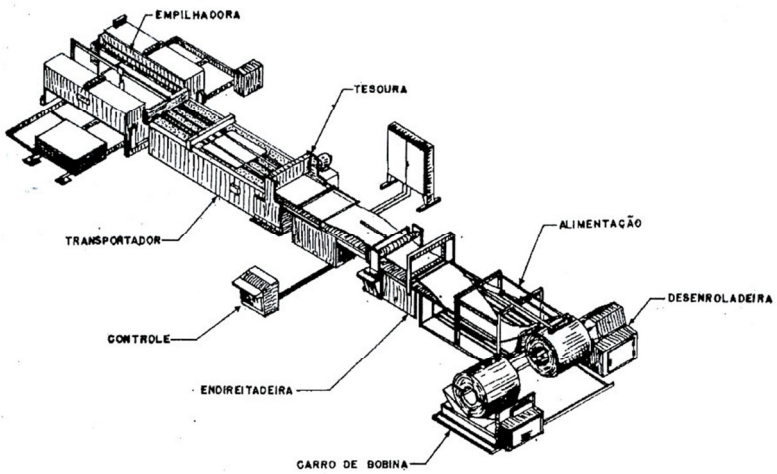


Figura 35. Linha de corte para chapas finas laminadas a quente

As desenroladeiras do tipo de cones são usadas quando devem ser processadas bobinas de vários diâmetros internos. Os cones são montados em suportes móveis e deslocáveis por igual, em relação à linha de centro, através de cilindros hidráulicos.

As de mandril expansível são usadas especialmente em linhas de corte de bobinas laminadas a frio ou quando se usa bobinas sempre do mesmo diâmetro interno. Os quatro elementos expansivos são montados sobre um eixo de aço forjado e a sua dilatação ou contração é feita por um pistão hidráulico.

A aplainadeira tem três a quatro rolos superiores, ajustáveis individualmente e dois a três roletes fixos, inferiores.

Nas linhas de corte de chapas laminadas a quente, uma mesa de rolos forma uma corcova na tira, com uma reserva de material, enquanto a linha é paralisada momentaneamente durante a efetivação do corte na tesoura a qual é do tipo de corte vertical, de baixo para cima, com acionamento por motor elétrico e acoplamento de disco.

Na mesa de medição, a ponta da chapa ao atingir o esbarro montado no cursor move, faz com que um contato elétrico coloque em funcionamento a tesoura, cortando a chapa nas medidas exatas. Para mudar o comprimento a ser cortado, é suficiente destravar o esbarro e movimentá-lo para a nova posição ao longo da

escala de medição. A chapa, ao deixar a mesa, no caso de bitolas mais finas, passa por uma segunda aplainadeira antes de ser levada aos empilhadores.

5.5 - Linhas de corte para chapas laminadas a frio

Estas linhas empregam tesouras volantes, sejam do tipo rotativo ou do tipo guilhotina oscilante, cuja velocidade é limitada. Quando as encomendas são variadas nas dimensões e tipos das chapas a serem cortadas, é igualmente eficiente usar uma tesoura guilhotina oscilante devido às paradas freqüentes para mudança de dimensões, na tesoura e nas empilhadeiras. Na laminação a frio, as linhas de tesouras são projetadas para aparar as bordas longitudinais e cortar as tiras, que podem atingir 3mm de espessura, em comprimentos determinados.

Na entrada da linha, um elevador hidráulico permite a centragem da bobina entre os cones da desenroladeira e os rolos alimentadores introduzem a tira na tesoura rotativa para o corte lateral, a qual possui um picador de sucata, constituído por uma lâmina estacionária e duas facas rotativas. A seguir, a tira passa pela aplainadeira que alimenta a tesoura volante, do tipo rotativo. Da tesoura, as chapas podem ainda atravessar uma oleadeira antes de seguir para o empilhamento.

5.6 - Aplainamento

As chapas finas são vendidas normalmente em dois tipos de aplainamento. O comercial, quando as chapas vão ser estampadas e repuxadas, deste modo, o aplainamento original não tem muita influência na forma da peça estampada. O outro é por estiramento, quando forem utilizadas em painéis, em que pouco trabalho de estampagem é feito nas chapas e o produto acabado deve ser perfeitamente plano e isento de ondulações.

O aplainamento comercial pode ser obtido no laminador a frio ou na aplainadeira de rolos **(figura 36)**, quando é necessário um aplainamento mais perfeito, utiliza-se o estiramento.

Na aplainadeira de rolos, os roletes superiores são dispostos alternadamente com os inferiores, de modo que a chapa ao atravessar a maquina, é flexionada

alternadamente para e para baixo, além do limite de deformação permanente das fibras externas. O conjunto de rolos superiores pode ser afastado ou aproximado dos rolos inferiores, atuando-se sobre os parafusos ajustadores e controlando-se assim, a flexão exercida sobre o material.

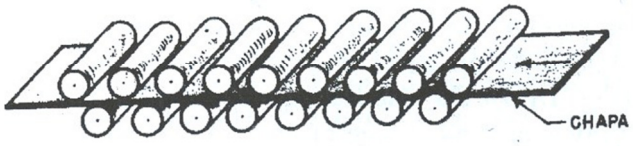


Figura 36. Aplainadeira de rolos.

5.7 - Estiramento

Nesta operação, as chapas são presas pelas extremidades por meio de garras serrilhadas. Uma das garras é deslocável ao longo da mesa e é mantida firmemente travada durante a operação. A outra garra é fixa, excetuando-se o deslocamento produzido por um pistão hidráulico, que fornece o esforço necessário para produzir o aplainamento.

O estiramento é controlado e a máquina para automaticamente ao ser atingido um alongamento pré-determinado, obtendo-se a mesma elevação da resistência mecânica. O efeito produzido pelo estiramento é de eliminar o esforço além do limite de deformação permanente do aço, fazendo-se um alongamento de 1 a 2%, de modo que as chapas não retornem à forma inicial e permaneçam planas. Adiante, na **figura 37**, a esquematização de uma aplainadeira por estiramento.

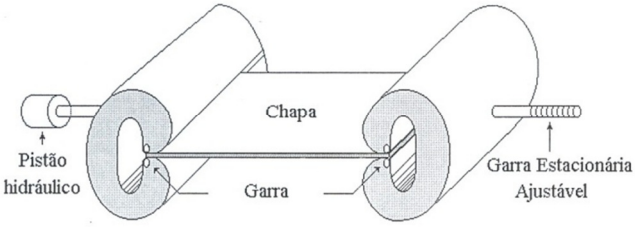


Figura 37. Aplainadeira por estiramento.

6. - Conclusão

Sabemos que durante a laminação ocorre um aumento do limite de escoamento do material devido à sua deformação. O recozimento tem como objetivo remover as tensões internas e restaurar a ductilidade a ponto de obter uma estrutura adequada à utilização da bobina.

Comparando o recozimento contínuo com o recozimento feito em caixa, concluímos que o contínuo apresenta maior produtividade, além disso, apresenta melhores propriedades mecânicas por ser um processo que faz com que a microestrutura fique homogênea, já que a temperatura e a atmosfera ao longo de toda sua extensão são as mesmas. Por esses motivos, ele vem substituindo aos poucos o recozimento em caixa em grandes indústrias, apesar de necessitar de maior espaço físico e investimento inicial, apesar do alto custo.

Quanto à atmosfera protetora, pode-se afirmar que a melhor delas é constituída por 100% de hidrogênio. Por ser redutora ela reage com o óxido de ferro reduzindo-o a ferro metálico, e ainda aumenta o coeficiente de transmissão de calor no sentido radial da bobina dando origem a propriedades mecânicas mais uniformes no produto final, acelera a transferência de calor do abafador para a carga aumentando a produtividade do forno. Entretanto, por ser extremamente explosiva ela requer cuidados no que diz respeito à segurança e ao manuseio do equipamento, exigindo maiores gastos.

7.- Bibliografia

1. Padilha, A.F. & Siciliano Jr., Fúlvio Encruamento, recristalização, Crescimento de Grão e Textura. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo.
2. Reed-Hill, R.E. Physical Metallurgy Principles. D. Van Nostrand Company, New York. Chap.7: Annealing. 2ª. p.267-325, 1973.
3. ARAUJO, L.A.de. Manual de Siderurgia – Volume 2: Transformação. São Paulo, Ed. Arte & Ciência, 1997.
4. RENO, Roberto; FURTADO, Eduardo; MONTEIRO, Bárbara – "Melhoria da qualidade: Desenvolvimento de Processos para Obtenção de Produtos Isentos de Manchas de Recozimento", 39º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, 2002.
5. ANTUNES, Ronaldo; GRAÇAS, Maria; CÈSAR, Melo – "Otimização do Recozimento em Caixa – Simulação Através do Método dos Elementos Finitos" – Revista Metalurgia e Materiais, vol. 57, no 515, Novembro 2001.
6. PALHEIROS, Franklin; SILVA, Alexandre – "Modelamento Matemático do Processo de Recozimento em Caixa com Atmosfera de Hidrogênio com Convecção Forçada" – 35º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, 1998.
7. RENO, Roberto; PALHEIROS, Franklin; SILVA, Aldair – Recozimento em Caixa de Alta Convecção e Atmosfera de Hidrogênio Puro "Evolução da Produção e Qualidade na C.S.N" – 35º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, 1998.

8. http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=40&cod_conteudo=28 (acesso Nov/2009)
9. R. E. Reed-Hill – Princípios de Metalurgia Física.
10. ASM *Metals Handbook* – volume 4 – *Heat Treating*.
11. http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=40&cod_conteudo=31 (acesso Nov/2009)