

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
MBA DE SIDERURGIA

PATRÍCIA PALA DINIZ

**O EFEITO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS GROSSAS
ESTRUTURAIS DE AÇOS CARBONO-MANGANÊS MICROLIGADOS
AO NIÓBIO E TITÂNIO.**

ESP/SO
2008
D613c

SÃO PAULO
2008

PATRÍCIA PALA DINIZ

**O EFEITO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS GROSSAS
ESTRUTURAIS DE AÇOS CARBONO-MANGANÊS MICROLIGADOS
AO NIÓBIO E TITÂNIO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo, para a conclusão de MBA em
Siderurgia.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf

SÃO PAULO

2008

FOLHA DE APROVAÇÃO

Patrícia Pala Diniz

O EFEITO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS GROSSAS ESTRUTURAIS DE AÇOS CARBONO-MANGANÊS MICROLIGADOS AO NIÓBIO E TITÂNIO.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Escola Universidade de São Paulo, conclusão de MBA em Siderurgia.

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf

Aprovado em: 23 de abril de 2008

Banca Examinadora

Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf
Instituição: Escola Politécnica da Escola Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut
Instituição: Escola Politécnica da Escola Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Kenji Camey
Instituição: COSIPA

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio e incentivo, agradeço ao Superintendente de Qualidade e Assistência Técnica da Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Valdomiro Roman da Silva, M.Sc. e ao Gerente do Controle Integrado de Produto da COSIPA, Paulo Loyola de Souza.

Meus agradecimentos especiais ao Dr. Kenji Camey, que sempre colaborou no meu desenvolvimento profissional e na realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf, pela ajuda generosa que me ofereceu, meus sinceros agradecimentos.

Pelos ensaios realizados, agradeço às equipes do Centro de Testes da COSIPA, em especial para Benedito Dias Chivites e Vandelou João dos Santos; ao Laboratório de Materiais da COSIPA, em especial para Vanessa Pala Branco Rodrigues, Carlos Augusto Saraiva de Maria e Paulo Leandro Silva Marinho.

Aos colegas Adriana Tavares Soares, Maurício Martins Pereira, Marcos Roberto Fernandes Noro e Katheryne Nemeth que possibilitaram a realização das experiências.

Ao Willy Ank, M.Sc. meu sincero agradecimento.

Pelo material utilizado na elaboração deste trabalho, sou grata ao Dr. Antônio Augusto Gorni e às bibliotecárias da COSIPA, Vanessa Pereira Straioto e Heloísa Silva Moura.

Pela revisão ortográfica, agradeço a minha amada mamãe Maria Luiza.

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram com a realização deste trabalho.

RESUMO

DINIZ, P.P. **O efeito do processo de laminação de normalização nas propriedades mecânicas de chapas grossas estruturais de aços carbono-manganês microligados ao nióbio e titânio.** 2008. 108 f. Monografia – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Esse estudo apresenta o efeito do processo de laminação de normalização nas propriedades mecânicas de chapas grossas, com exemplos de resultados obtidos no desenvolvimento de chapas grossas estruturais de aços carbono-manganês microligados ao nióbio e titânio na COSIPA. A laminação de normalização é uma laminação controlada na qual a deformação final ocorre numa certa faixa de temperatura conduzindo para uma condição do material equivalente ao obtido depois da normalização em forno de tratamento térmico. Foram realizados ensaios de tração, impacto Charpy, microscopia óptica e microsonda eletrônica, comprovando a similaridade dos processos de normalização no forno e no laminador. Também foi demonstrado que não há necessidade de modificação no projeto de liga para obtenção das propriedades mecânicas definidas em especificações de chapas grossas na condição de fornecimento normalizado.

Palavras-chave: Laminação de normalização, ARBL.

ABSTRACT

DINIZ, P.P. The effect of normalizing rolling in the mechanical properties of structural plates of C-Mn-Nb-Ti steels. 2008. 108 p. Monograph – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

This work presents the results of COSIPA's experiments about the effect of normalizing rolling process on the mechanical properties of structural plates. The normalizing rolling process is a procedure in which the final rolling temperature is generally controlled within the range used for normalizing heat treatments, resulting in a material condition equivalent to that obtained by normalizing. The similarity of results between normalizing rolling and normalizing heat treatment was proved through tensile and Charpy impact tests, and electronic and optical microscopy analysis. It was also demonstrated that it is not necessary to modify the alloy project in order to obtain the mechanical properties required by the plates specifications in the normalized supply condition.

Keywords: Normalized rolling, HSLA.

SUMÁRIO

Listas de Figuras.....	7
Listas de Tabelas	10
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. DEFINIÇÕES DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO SEGUNDO NORMAS INTERNACIONAIS	15
1.2. MERCADO DE AÇO.....	16
1.3. COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA - COSIPA	17
1.3.1. Linha de Chapas Grossas	17
1.3.1.1. Forno de Reaquecimento.....	18
1.3.1.2. Laminador de Chapas Grossas.....	19
1.3.1.3. Tratamento Térmico	20
1.4. VANTAGENS DO MATERIAL NORMALIZADO	22
1.5. VANTAGENS DA IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO	23
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1. PROCESSOS DE LAMINAÇÃO A QUENTE	26
3.1.1. Laminação Controlada	26
3.1.1.1. Evolução da Terminologia Técnica de Laminação de Normalização	27
3.1.1.3. Histórico do Processo de Laminação de Normalização no Brasil.....	28
3.1.1.4. Processo de Laminação de Normalização	29
3.1.1.5. Processo de Laminação Controlada Termomecânica.....	33
3.1.2. Processo de Laminação de Recristalização.....	34
3.2. PRINCÍPIOS METALÚRGICOS DA LAMINAÇÃO A QUENTE.....	35
3.2.1. Fenômenos Metalúrgicos Associados à Deformação a Quente.....	37
3.2.1.1. Recuperação Estática.....	38
3.2.1.2. Recristalização Estática.....	39
3.2.1.3. Cinética da Recristalização Estática	40

3.2.1.4. Tamanho de Grão Recristalizado Estaticamente	41
3.2.1.5. Efeito do Microligante na Recristalização Estática	42
3.3. DISSOLUÇÃO DOS ELEMENTOS DE MICROLIGA DURANTE O REAQUECIMENTO DE PLACAS.....	43
3.4. TEMPERATURA DE NÃO RECRISTALIZAÇÃO.....	44
3.5. TRANSFORMAÇÃO DE FASE.....	46
3.6. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA.....	47
3.7. TRATAMENTOS TÉRMICOS	50
3.7.1. Normalização	52
3.8. TÓPICOS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA A SEREM CONSIDERADOS NO ESTUDO	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
4.1. MATERIAL.....	62
4.1.1. Especificação Seleccionada	62
4.1.2. Projeto de Liga	65
4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	67
4.2.1. Laminação a Quente em Escala Industrial no Laminador de Chapas Grossas	68
4.2.2. Tratamento Térmico de Normalização	73
4.2.3. Amostragem	74
4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE / EQUIPAMENTOS	75
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
6. CONCLUSÃO	100
7. SUGESTÕES.....	102
REFERÊNCIAS*	103

Listas de Figuras

Figura 1. Fluxo de produção da COSIPA ⁽⁹⁾	17
Figura 2. Fluxo de Produção da Linha de Chapas Grossas da COSIPA ⁽⁹⁾	18
Figura 3. Laminador de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾	20
Figura 4. Diagrama esquemático de processos convencional e termo-mecânico de chapas de aço ⁽¹⁴⁾	27
Figura 5. Trajetos para laminação/resfriamento para rotas como laminados, laminação de normalização e tratamento termo-mecânico (cortesia da Siemens VAI) ⁽²³⁾	31
Figura 6: Ilustração esquemática da mudança da microestrutura com a deformação durante a laminação termomecânica (Tanaka, International Metals Reviews, nº4, 1981) ⁽²⁹⁾	34
Figura 7: Faixas de temperaturas de laminação a quente e microestruturas resultantes ⁽²⁹⁾	36
Figura 8. Aumento da temperatura de não recristalização pelo aumento do nível de microligantes em um aço 0,07%C, 1,40%Mn, 0,25%Si ⁽²⁹⁾	45
Figura 9. Parte do diagrama Fe-C com as faixas de temperaturas típicas para a normalização ⁽⁵³⁾	52
Figura 10. Microestrutura de (a) como laminado e (b) como normalizado, chapas de 11 mm de espessura da especificação TC128 grau B ⁽¹⁰⁾	54
Figura 11. Mecanismos de endurecimento de chapas de espessura de 19 mm como laminadas a quente e como normalizada de especificação TC128-garu B com a composição de 0,24%C, 1,27%Mn, 0,36%Si, 0,077%V, 0,043%Al e 0,0095%N ⁽¹⁰⁾	56
Figura 12. Efeito do conteúdo de carbono na porcentagem de perlita na microestrutura de chapas de aço C-Mn como laminadas, recozidas e normalizadas ⁽¹⁰⁾	57
Figura 13. Efeito da porcentagem de perlita na microestrutura de aços C-Mn nos limites de escoamento e resistência ⁽¹⁰⁾	58
Figura 14. Curvas de energia de transição para aços carbono com diferentes porcentagens de carbono ⁽¹⁰⁾	58
Figura 15. Esquema resumido das condições de processo objetivadas para a laminação de normalização e sua relação com sua microestrutura	71

Figura 16. Redução média por passe objetivado nas chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização.	72
Figura 17. Desenho esquemático mostrando a posição de retirada das amostras das chapas, onde a amostra "LN" foi retirada após laminação de normalização e "N" retirada após normalização no forno.	75
Figura 18. Diferença entre o limite de escoamento de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico.	78
Figura 19. Diferença entre o limite de resistência de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico.	79
Figura 20. Diferença entre a energia absorvida no impacto Charpy de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico (realizado à -20°C).	79
Figura 21. Curvas de transição do material de laminação de normalização e submetido à normalização no forno de tratamento térmico.	80
Figura 22: Microestrutura típica observada em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno. Um quarto da espessura da seção longitudinal, polida e ataque Nital 4% - imagem no microscópio óptico (200x).	81
Figura 23 Microestrutura típica observada em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno Um quarto da espessura da seção longitudinal, polida e ataque Nital 4% - imagem de elétrons secundários / microsonda eletrônica.	82
Figura 24. Detalhes da colônia de perlita observadas em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno. Um quarto da espessura da seção longitudinal, polida e ataque Nital 4% - imagem de elétrons secundários / microsonda eletrônica.	83
Figura 25. Curvas de resfriamento sobreposta por um diagrama de transformação em resfriamento contínuo para uma liga de ferro- carbono eutetóide ⁽⁶⁹⁾	84
Figura 26. Microestrutura típica observada em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno. Próximo à superfície da chapa, polida e ataque Nital 4% - imagem de elétrons secundários / microsonda eletrônica.	85
Figura 27. Histograma dos resultados de limite de escoamento das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 16 mm.	89
Figura 28. Histograma dos resultados de limite de escoamento das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 16,01 a 40 mm.	90

Figura 29. Histograma dos resultados de limite de resistência das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.	90
Figura 30. Histograma dos resultados de energia absorvida no impacto Charpy das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.	90
Figura 31. Distribuição estatística do limite de escoamento das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 16 mm.	91
Figura 32. Distribuição estatística do limite de escoamento das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 16,01 a 40 mm.	92
Figura 33. Distribuição estatística do limite de resistência das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.	92
Figura 34. Distribuição estatística da energia absorvida no impacto Charpy das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.	92
Figura 35. Diferença entre limite de escoamento de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e pelo processo de normalização no forno de tratamento térmico em função da espessura.	93
Figura 38: Diferença entre (a) limite de escoamento, (b) limite de resistência e (c) energia absorvida no impacto Charpy de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico especificando apenas a temperatura de acabamento.	97

Listas de Tabelas

Tabela 1 - Características do forno de reaquecimento da linha de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾	19
Tabela 2 - Distribuição de queimadores no forno de reaquecimento da linha de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾	19
Tabela 3 - Informações gerais do tratamento térmico da linha de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾	21
Tabela 4 - Características do forno de tratamento térmico ⁽⁹⁾	22
Tabela 5 - Fatores que afetam os tratamentos térmicos ⁽⁵¹⁾	51
Tabela 6 - Composições típicas (% em peso) e temperatura calculada A_{c3} de aços ferríticos/perlíticos normalizados ⁽¹⁰⁾	55
Tabela 7 - Requisitos de composição química segundo a especificação EN10025-2 S355J2+N ⁽¹⁾	63
Tabela 8 - Requisitos de propriedades mecânicas para a especificação EN10025-2 S355J2+N ⁽¹⁾	64
Tabela 9 - Composição química objetivada das corridas do aço C-Mn microligado ao Nb e Ti aplicado para a especificação EN10025-2 S355 J2+N (% em peso).	66
Tabela 10 - Resultados dos cálculos das temperaturas de solubilização de Nb(CN), e TiN em austenita do aço C-Mn microligado ao nióbio e titânio desse estudo.	69
Tabela 11 - Tempo de permanência mínimo no forno de tratamento térmico para a normalização de chapas grossas em função da espessura (largura de 2440 mm). .	74
Tabela 12 - Tamanho de grão ferrítico apresentado nas amostras de chapas normalizadas em forno e de laminação de normalização, segundo E112 (método: comparação).	86
Tabela 13 - Tamanho de grão ferrítico apresentado nas amostras de chapas normalizadas em forno e de laminação de normalização, segundo E112 (método: intersecção).....	87
Tabela 14 - Diferença entre os resultados dos ensaios de tração e impacto de chapas normalizadas no forno e produzidas pelo processo de laminação de normalização submetidas à normalização no forno de tratamento térmico.	95
Tabela 15 - Resultados dos ensaios mecânicos realizados nas amostras de chapas de laminação de normalização que tiveram problemas de encharque no forno de reaquecimento.	98

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A = alongamento

ABS = American Bureau Standard

API = American Petroleum Institute

A_{c1} = temperatura de início de transformação $\alpha \rightarrow \gamma$

A_{c3} = temperatura de final de transformação $\alpha \rightarrow \gamma$

A_{cm} = temperatura de início da transformação $\gamma \rightarrow \alpha$

A_{r1} = temperatura de final da transformação $\gamma \rightarrow \alpha$

A_{r3} = temperatura de início da transformação $\gamma \rightarrow \alpha$

AR = as rolled (laminação convencional)

ARBL = alta resistência e baixa liga

BV = Bureau Veritas

Ceq= carbono equivalente

COSIPA = Companhia Siderúrgica Paulista

DNV = Det Norske Veritas

DT= orientação do corpo de prova - direção transversal à direção de laminação.

e= espessura nominal da chapa.

EDE = energia de defeito de empilhamento

GL = German Lloyd

Imp = impacto Charpy

J = Joule

LCG = Linha de Chapas Grossas

L.E. = limite de escoamento

L.R. = limite de resistência

LR = LLOYD'S REGISTER

Lo = base de medida do corpo de prova – referência para a avaliação do alongamento (%).

MPa = megapascal

R = redução

RE = razão elástica

T = temperatura

Ta = temperatura de acabamento do último passe de laminação

Ti = temperatura de início de laminação

TMCP = laminação controlada termomecânica

Tnr = temperatura de não recristalização

T_{sol} = temperatura de solubilização

t/h = tonelagem por hora

t/mês = toneladas por mês

So = área da seção útil.

IIW = carbono equivalente

γ = austenita

α = ferrita

1. INTRODUÇÃO

Até meados do ano de 2005, a linha de chapas grossas da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) apresentava sua capacidade ociosa. O forno de tratamento térmico não era totalmente ocupado, passando por períodos em que a COSIPA analisava a possibilidade de desligá-lo por alguns dias, em virtude da não solicitação do mercado.

No entanto, o mercado mundial do aço cresceu impulsionado, principalmente, pelo crescimento da economia da China. Devido ao mercado em alta, o forno de tratamento térmico passou a operar na capacidade máxima. A produção média do laminador da linha de Chapas Grossas da COSIPA é de 90.000 t/mês, dependendo do mix de produtos produzidos. Enquanto o forno de tratamento térmico tem capacidade de normalizar 12.000 t/mês ou temperar 8.000 t/mês e revenir 4.000t/mês de chapas grossas.

Portanto, em decorrência da limitação da capacidade do forno de tratamento térmico da COSIPA, menos de 14% das chapas grossas comercializadas podem ter exigências de tratamento térmico. Além disso, o interessante é comercializar, principalmente, as chapas temperadas e revenidas, que possuem um maior valor agregado.

Os clientes europeus pressionaram a COSIPA no sentido de fornecer chapas grossas para aplicação estruturais na condição de laminação de normalização. A COSIPA fornecia para essa aplicação apenas através do processo de normalização no forno, e demais siderúrgicas produziam através do processo de laminação de normalização, nos casos em que a especificação permite. Assim, a

COSIPA deixava de comercializar alguns pedidos de chapas grossas para o mercado europeu.

A COSIPA vislumbrou a oportunidade de atender aos pedidos de chapas grossas estruturais para o mercado europeu por meio processo de laminação de normalização, substituindo o processo, usualmente empregado, de normalização no forno de tratamento térmico, pois a norma EN10025-2 permite ambos os processos de fabricação para atender à mesma ⁽¹⁾. No ano de 2007, 57% das chapas grossas comercializadas para Europa foram da especificação EN10025-2 S355 J2. Portanto, com essa alteração na condição de fornecimento, a COSIPA estaria disponibilizando o forno de tratamento térmico para tratar chapas de maior valor agregado e atendendo aos pedidos dos clientes europeus.

Os ensaios, neste estudo, foram realizados com objetivo de comprovar a similaridade das propriedades mecânicas dos materiais produzidos pelos processos de normalização no laminador e no forno. E, também, demonstrar que não há necessidade de modificação no projeto de liga do aço, ao fornecer como laminação de normalização, para obtenção das propriedades mecânicas definidas em especificações de chapas grossas na condição de fornecimento normalizado.

Assim, o mesmo pedido do cliente pode ser fornecido pelo processo de laminação de normalização ou normalização em forno, depende da disponibilidade do forno de tratamento térmico e do laminador no momento de sua produção, aumentando a flexibilidade da COSIPA.

1.1. DEFINIÇÕES DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO SEGUNDO NORMAS INTERNACIONAIS

A tecnologia de laminação de normalização é aceita por diversas especificações internacionais, dentre elas, ABS, BV, GL, NV, LR, ASTM, EN10025, API.

Atualmente, o processo de laminação de normalização está implantado em diversas siderúrgicas, tais como, Dillinger, Thyssen, Corus, Usinor, British Steel, Kawasaki Steel, SSAB, Arcelor Mital.

Conforme as especificações ABS, BV, DNV, GL, LR, laminação de normalização é um processo na qual a temperatura final de laminação é geralmente controlada na faixa utilizada pelo tratamento térmico de normalização, resultando em um material em condições equivalentes ao obtidos pela normalização ^(2, 3, 4, 5, 6). Assim, os requisitos de propriedades mecânicas exigidos pelas especificações devem ser satisfeitos por ambos os processos.

Além disso, os valores especificados de propriedades mecânicas devem ser atendidos mesmo depois de um tratamento térmico adicional de normalização ⁽⁵⁾. O processo de laminação de normalização deve, entretanto, ser aceito como equivalente direto do tratamento térmico de normalização ⁽⁶⁾. O controle de temperatura é realizado de modo que a austenita recristalize totalmente ⁽²⁾.

1.2. MERCADO DE AÇO

O ano de 2006 foi o quinto consecutivo de forte crescimento da produção e demanda no mercado mundial de aço. A siderurgia brasileira terminou 2006 com queda de 2,2% na produção de aço bruto em relação a 2005, totalizando 30,9 milhões de toneladas. Porém, no que se refere a laminados, a produção de 23,6 milhões de toneladas foi recorde, com aumento de 4,6% em relação a 2005 ⁽⁷⁾.

O consumo aparente total foi de 10,9%, atingindo 18,6 milhões de toneladas. No setor de aços planos, houve aumento de 9,9%, devido principalmente aos setores automotivos, às máquinas industriais, às utilidades domésticas e comerciais ⁽⁷⁾.

O volume de exportações foi de 12 milhões de toneladas e a receita total prevista de US\$ 6,4 bilhões, segundo maior nível histórico, o que mantém a siderurgia como um dos grandes contribuintes para o saldo da balança comercial do País. O volume total importado foi de 1,8 milhão de toneladas (aumento de 145,5%) ⁽⁷⁾.

Acompanhando o momento positivo da economia brasileira, a demanda de aços planos no mercado interno no 1º semestre de 2007 apresentou um crescimento de 15,9% (aumento de 715 mil toneladas) em relação a igual período do ano passado. Vale destacar que esse crescimento de demanda se verificou tanto nos setores que produzem bens de consumo duráveis (automotivo, utilidades domésticas), quanto nos setores de bens de capital (máquinas e implementos agrícolas, equipamentos industriais, tubos de grande diâmetro e construção civil) ⁽⁸⁾. Em 2006, as exportações do Sistema Usiminas totalizaram 2.657 mil toneladas, o

que representou 33% do seu volume total de vendas ⁽⁸⁾.

1.3. COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA - COSIPA

Em 1953 é fundada a Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa). A unidade operacional da Cosipa, a Usina José Bonifácio de Andrada e Silva, localiza-se estrategicamente em Cubatão, no Estado de São Paulo, a 70 quilômetros da Região Metropolitana de São Paulo, maior centro consumidor do País. Para receber matérias-primas e insumos e escoar a produção, conta com um porto alfandegado, capaz de movimentar 12 milhões de toneladas anuais, e um complexo ferroviário com limite operacional de 4 milhões de toneladas ao ano. A privatização, na década de 1990, foi um marco na história da COSIPA. A Figura 1 resume o fluxo de produção da COSIPA ⁽⁹⁾.

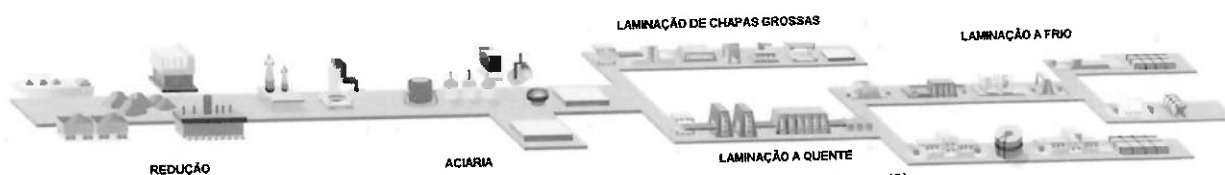


Figura 1. Fluxo de produção da COSIPA ⁽⁹⁾.

1.3.1. Linha de Chapas Grossas

A Linha de Chapas Grossas (LCG) da COSIPA é responsável pela fabricação de chapas com uma variação de espessura entre 6,00 e 100 mm e com

aplicações em diversas áreas, tais como, naval, construção civil, estrutural, vaso de pressão e tubos.

O pátio de placas da linha de chapas grossas recebe as placas provenientes da aciaria e após o processamento dessas placas, as chapas geradas são armazenadas no pátio de embarque para serem encaminhadas aos clientes finais, conforme mostra o esquema do fluxo de produção da linha de chapas grossas da COSIPA na Figura 2 ⁽⁹⁾.

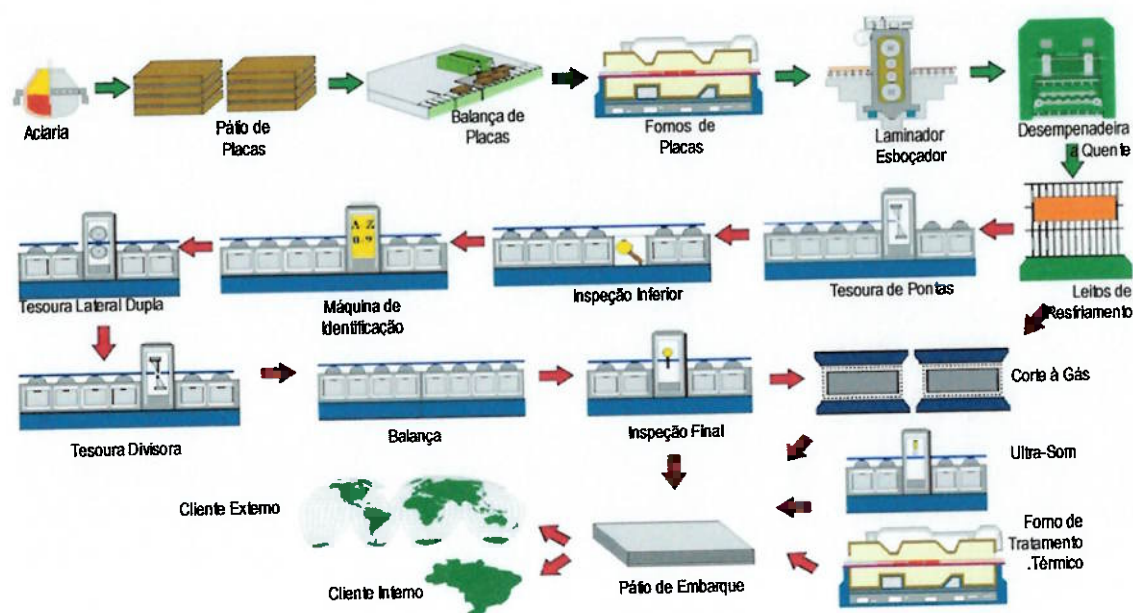


Figura 2. Fluxo de Produção da Linha de Chapas Grossas da COSIPA ⁽⁹⁾.

1.3.1.1. Forno de Reaquecimento

A linha de chapas grossas conta com dois fornos de reaquecimento com capacidade nominal de 130 t/h cada. A finalidade é aquecer as placas até uma temperatura adequada para o processo de laminação. Ao atingir a temperatura

desejada do processo e o tempo mínimo de permanência, as placas são encaminhadas ao laminador. A Tabela 1 resume as características do forno de reaquecimento da linha de chapas grossas ⁽⁹⁾.

Tabela 1 - Características do forno de reaquecimento da linha de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾.

Características	Unidade	Nominal
Tipo de Refratário	-----	Massa Plástica
Combustível	-----	Gás Coqueria / Natural
Dimensão da Soleira	mm	8.100 x 30.100
Altura do Forno	mm	4.910
Zonas de Aquecimento	n.º.	6
Queimadores	n.º.	71
Produtividade	t/h	130
Capacidade de Produção	t/ano	600.000

O forno de placas instalado no LCG é “walking bean”, dotado de queimadores de abóboda e queimadores nas zonas inferiores, distribuídos no forno de reaquecimento conforme Tabela 2 ⁽⁹⁾.

Tabela 2 - Distribuição de queimadores no forno de reaquecimento da linha de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾.

Zona	Superior	Inferior
Zona de Pré-aquecimento	14 queimadores	4 queimadores
Zona de Aquecimento	27 queimadores	4 queimadores
Zona de Encharque	18 queimadores	4 queimadores

1.3.1.2. Laminador de Chapas Grossas

A Linha de Laminação de Chapas Grossa tem apenas um laminador, o qual

executa o desbaste e o acabamento do material. A finalidade é reduzir, sucessivamente, a espessura da placa, de 210 ou 260 mm, até a espessura desejada da chapa. Trata-se de um equipamento tipo quádruplo reversível, com capacidade de 90.000 t/mês. Uma fotografia do laminador de chapas grossas da COSIPA é apresentada na Figura 3 ⁽⁹⁾.



Figura 3. Laminador de chapas grossas da COSIPA ⁽⁹⁾.

1.3.1.3. Tratamento Térmico

O setor de Tratamentos Térmicos da Linha de Acabamento de Chapas Grossas é um complemento importante na produção, pois permite obter chapas com propriedades mecânicas especiais, normalmente não obtidas pelo processo de laminação. Constam, basicamente, de um jateador de granalhas, um forno e uma máquina de têmpera. Informações gerais do forno de tratamento térmico são resumidas na Tabela 3 e suas características constam na Tabela 4 ⁽⁹⁾.

Tabela 3 - Informações gerais do tratamento térmico da linha de chapas grossas da COSIPA⁽⁹⁾

Forno de Tratamento Térmico	
Fabricante	Combustol
Combustíveis	- Gás Natural - Gás misto (Gás de coqueria + 27% de N ₂)
Comprimento útil do forno	57.000 mm
Número de zonas	13 zonas divididas em: - Aquecimento (36 m); - Encharque (21 m).
Tratamentos	- Normalização; - Têmpera; - Revenimento.
Máquina de Têmpera	
Meio utilizado	Água
Faixas de Temperatura	
Normalização	~ 910° C
Têmpera	~ 910° C
Revenimento	~ 640° C

As principais variáveis de controle de processo na normalização são a temperatura e o tempo de permanência nesta temperatura. No processo de têmpera, além da temperatura e tempo, é controlada a vazão de água necessária à completa têmpera das chapas.

Tabela 4 - Características do forno de tratamento térmico ⁽⁹⁾.

Características	Unidade	Nominal
Início de Operação	-----	nov/86
Fabricante	-----	IHI
Tipo	-----	Tubo Radiante atmosfera controlada (N ₂).
Dimensões	mm	Comprimento: 57.600 Largura: 4.500 Altura: 2.217 Área útil: 259,2 m ²
Combustível		Gás de coqueria/ gás natural
Quantidade de rolos	unid.	104
Número de zonas	unid.	13
Número de queimadores (tubos)	unid.	202 (104 superiores e 98 inferiores)
Capacidade de Produção	t.	12.000/mês para material normalizado 4.000/mês para material com revenimento

1.4. VANTAGENS DO MATERIAL NORMALIZADO

Há muitas razões metalúrgicas para normalizar as chapas. As principais motivações são para melhorar a tenacidade; para diminuir a variabilidade nas propriedades mecânicas e usinabilidade. Normalização pode transformar uma microestrutura grosseira, heterogênea da condição de laminado a quente para uma microestrutura fina e mais homogênea ⁽¹⁰⁾.

1.5. VANTAGENS DA IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE NORMALIZAÇÃO

O fornecimento de chapas grossas produzidas por meio do processo de laminação de normalização substituindo a normalização no forno de tratamento térmico permite uma flexibilidade na produção destes, maior competitividade, maior disponibilidade do forno de tratamento térmico para produtos com maior valor agregado, além da diminuição do tempo de fabricação e, conseqüentemente, agilização nos prazos de entrega. O tempo total estimado de fabricação do material normalizado no forno de tratamento térmico é de 30 dias, enquanto o tempo total médio do mesmo material produzido pelo processo de laminação de normalização é de 20 dias.

O desenvolvimento desse processo permite não apenas substituir a normalização no forno, como também ser uma nova alternativa de produção. Algumas normas internacionais, como no caso da especificação ASTM A131, permitem que o fabricante produza a chapa pelo processo que considerar mais apropriado para atender aos requisitos da norma, e dependendo do grau da especificação relaciona as opções de condições de fornecimento permitidas ⁽¹¹⁾.

O material produzido pelo processo de laminação termomecânica (TMCP) é considerado instável à temperatura elevada em relação às propriedades mecânicas, já que seu endurecimento é proveniente de precipitação interfásica coerente e encruamento. As propriedades produzidas na TMCP, não podem ser reproduzidas por subsequente normalização ou outro tratamento térmico ^(2, 3, 4, 5, 6). Portanto, a aplicação de material normalizado, seja no forno ou no laminador, torna-se

interessante para os casos onde são aplicados na construção, conformação a quente e/ou um tratamento térmico final ⁽¹²⁾. Além disso, o processo de laminação de normalização substituindo a laminação termomecânica aumenta a produtividade do laminador em, aproximadamente, 4 %.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

- ✓ Definir condições do processo para viabilizar a produção de chapas grossas estruturais através do processo de laminação de normalização utilizando mesmo projeto de liga especificado para fabricação de chapas grossas estruturais normalizadas no forno de tratamento térmico;
- ✓ Avaliar os efeitos dos parâmetros de processo sobre as propriedades mecânicas e microestrutura de chapas grossas de aço carbono manganês microligado ao nióbio e titânio obtidas pelo processo de laminação de normalização;
- ✓ Comparar as propriedades mecânicas das chapas de aço microligado nióbio e titânio obtidas pelo processo de laminação de normalização com as chapas de mesmo projeto de liga resultantes do processo de normalização no forno de tratamento térmico;
- ✓ Verificar a sensibilidade das propriedades mecânicas das chapas grossas de aço carbono manganês microligado nióbio e titânio, obtidas no processo de laminação de normalização, a um tratamento térmico de normalização adicional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PROCESSOS DE LAMINAÇÃO A QUENTE

Esses processos dividem-se em basicamente dois grupos, laminação a quente convencional e laminação controlada. Na laminação convencional, o objetivo principal é produzir a chapa requerida com o número mínimo de passes de laminação. Na laminação controlada, o objetivo é aumentar a resistência e tenacidade do aço com controle rigoroso de temperatura e deformação durante a laminação ⁽¹³⁾.

3.1.1. Laminação Controlada

Nas décadas de 1960 e 1970, novos campos de aplicações, tais como estações nucleares e plataformas marítimas offshore, exigiram componentes de aços estruturais de melhores propriedades e uma confiabilidade mais elevada do que se tinha previamente disponível. Para erguer estruturas marítimas em ambientes hostis, incluindo águas profundas, grandes tempestades e baixas temperaturas, não só a resistência do material é importante, mas assim como a resistência à fratura frágil. Cuidados também foram concentrados nas propriedades de fabricação, fácil soldabilidade dos componentes de aço sob difíceis condições tinham de ser

garantidas ⁽¹³⁾.

Laminação controlada é um termo genérico para procedimentos de laminação na qual a temperatura e redução por passe são controlados durante a laminação para que as propriedades mecânicas desejadas sejam obtidas ⁽¹³⁾.

Laminação controlada inclui:

- ✓ Laminação de normalização
- ✓ Laminação controlada termomecânica.

A Figura 4 apresenta os esquemas de processos de laminação a quente, dentre eles, o processo de laminação de normalização e laminação controlada termomecânica ⁽¹⁴⁾.

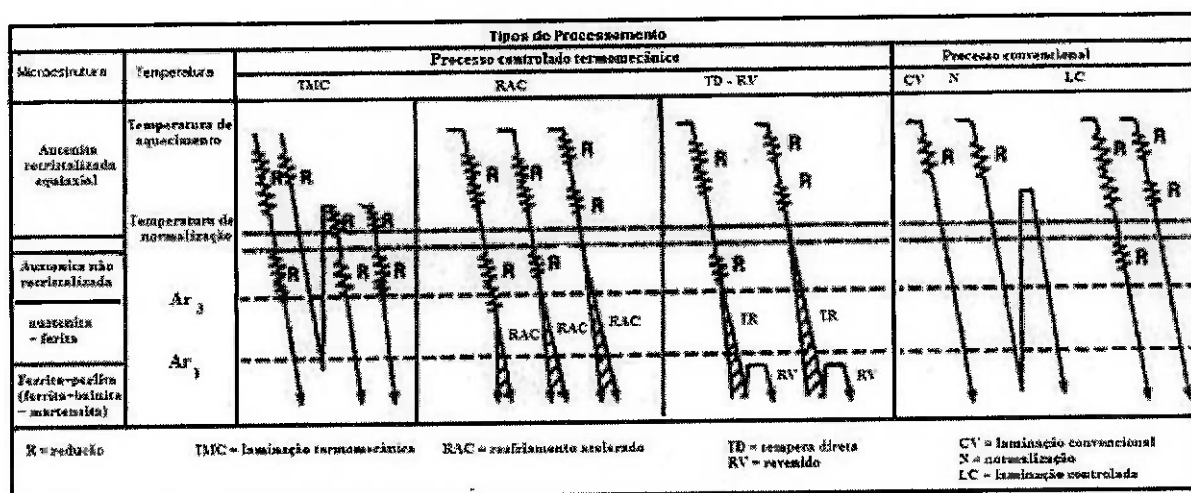


Figura 4. Diagrama esquemático de processos convencional e termo-mecânico de chapas de aço ⁽¹⁴⁾.

3.1.1.1. Evolução da Terminologia Técnica de Laminação de Normalização

O termo laminação controlada é encontrado nas publicações internacionais,

tanto para a laminação de normalização como para laminação termomecânica. No entanto, em função das diferentes aplicações dos produtos, uma distinção dos termos se faz necessária ⁽¹⁾.

Nas especificações navais internacionais, tais como a ABS, BV, DNV, GL, o termo laminação controlada é empregado como sinônimo de laminação de normalização ^(2, 3, 4, 5), exceto a norma naval LR, que não cita essa similaridade entre as expressões ⁽⁶⁾.

Em alguns artigos publicados na Alemanha, os mesmos consideram que a laminação de normalização corresponde à laminação de recristalização da América do Norte ^(15, 16). De fato, a laminação de normalização é uma variante da laminação controlada de recristalização.

Esses desencontros de definições identificadas em diversos artigos internacionais ocorreram também na COSIPA. O termo laminação controlada foi utilizado, durante anos, referindo-se a que hoje se reconhece por laminação controlada termomecânica (TMCP). Isso também ocorre em outras usinas siderúrgicas, como na Blue Scope Steel ⁽¹⁷⁾.

3.1.1.3. Histórico do Processo de Laminação de Normalização no Brasil

O processo de laminação de normalização é utilizado há mais de vinte anos em todo mundo. No entanto, no Brasil, a história desse processo de fabricação é mais recente.

O processo de laminação de normalização foi estudado em 1998 pelo

Centro de Pesquisas da COSIPA. Os resultados das experiências realizadas, na época do desenvolvimento dessa nova rota de fabricação, foram animadores ⁽¹⁸⁾. No entanto, o mercado de chapas grossas naquele período até o ano de 2006, aproximadamente, não estava favorável. O mercado interno, onde os preços estavam mais atraentes, apresentava-se fraco e não absorvia toda a produção das chapas de aço. No mercado externo os preços estavam baixos e requisitos de qualidade cada vez mais severos, devido à grande oferta desse tipo de produto.

Portanto, o forno de tratamento térmico da COSIPA estava com capacidade ociosa e o mercado desaquecido não exigia essa nova condição de fabricação.

3.1.1.4. Processo de Laminação de Normalização

Cerca de 40 anos atrás, era aceito o fato de a normalização ser realizada em um forno, através de um tratamento térmico. Vinte anos depois, a normalização passou a ser muito bem alcançada durante o processo de laminação, por meio de um tratamento termomecânico chamado laminação de normalização. Um aço normalizado, conseqüentemente, tem a estrutura e propriedades mecânicas que podem ser produzidas tanto pelo tratamento térmico como pela laminação controlada ⁽¹⁹⁾.

Se o processo para a fabricação de aços normalizados é alterado de um tratamento térmico para um tratamento termomecânico durante a laminação, a questão que se coloca é saber se a composição do aço também se adapta às características do novo processo de fabricação da mesma forma que ao processo

utilizado há tanto tempo ⁽¹⁹⁾.

Uma vantagem dos aços de laminação de normalização é que podem ser submetidos a um tratamento térmico a qualquer momento, como em um trabalho de reparo, sem grandes alterações nas propriedades ⁽²⁰⁾. Outra vantagem é a qualidade superficial do material no estado de como laminado é muito melhor que depois da normalização em forno de tratamento térmico ^(20, 21).

Segundo as especificações alemãs, a resistência do aço quando o limite de escoamento mínimo especificado é abaixo de 355 MPa altera no máximo 50 MPa e a resistência de um aço com limite de escoamento mínimo maior ou igual a 355 MPa muda no máximo 60 MPa quando a chapa de laminação de normalização é submetida a uma normalização ⁽²²⁾.

Laminação de normalização agora amplamente utilizada como um meio de obter as propriedades tradicionalmente produzidas por um tratamento térmico de normalização em um processo de laminação direta. Tal como a laminação convencional, na fase inicial da laminação quebra da estrutura bruta para produzir grãos austeníticos equiaxiais. Uma espera é aplicada, durante a qual o aço é resfriado, para que os passes finais sejam realizados na faixa de temperatura similar a empregada no processo de normalização no forno de tratamento térmico. Produzindo uma microestrutura fina da ferrita mais perlita, resultando em mais altos níveis de resistência e tenacidade que os produtos de laminação convencional.

A Figura 5 apresenta os trajetos de laminação / resfriamento para os processos de laminação convencional, de normalização e controlada termomecânica ⁽²³⁾.

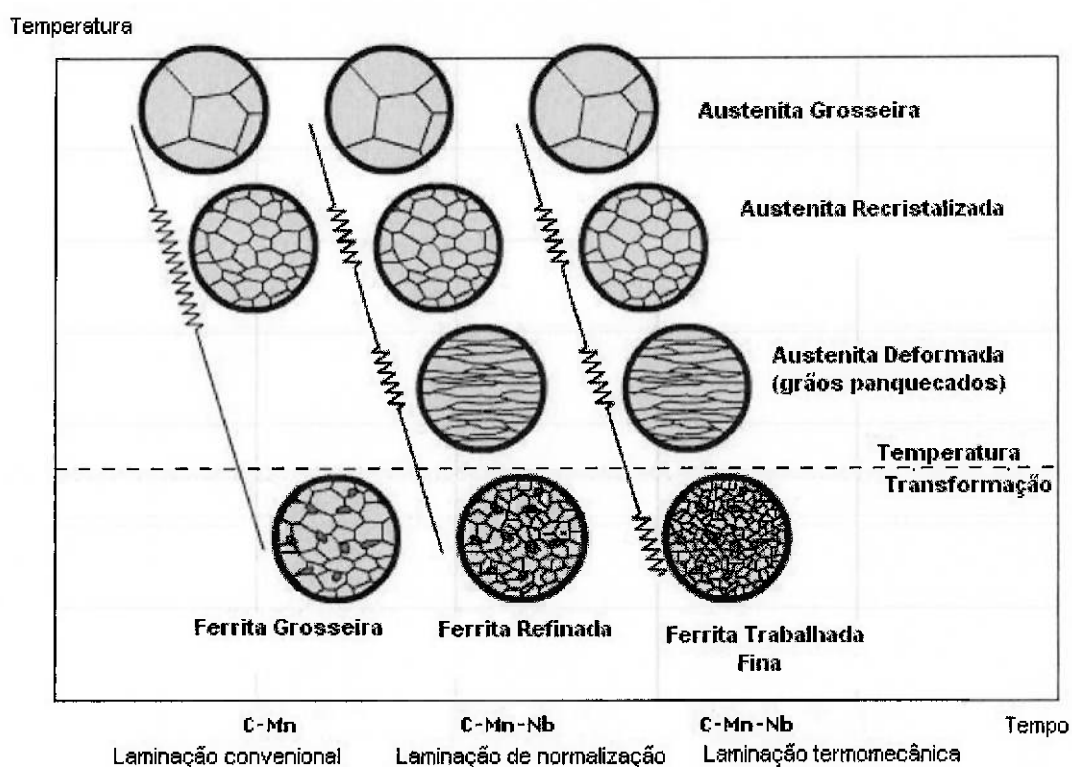


Figura 5. Trajetos para laminação/resfriamento para rotas como laminados, laminação de normalização e tratamento termo-mecânico (cortesia da Siemens VAI) ⁽²³⁾.

No estudo realizado na siderúrgica Usinor concluiu-se que só é possível a produção comercial de chapas pelo processo de laminação de normalização quando utilizar um computador com sistema de controle especial, acertando ao modelo de temperatura e a geração do esquema de laminação num processo iterativo visando à temperatura de acabamento especificada ⁽²¹⁾.

Um problema do processo de laminação de normalização é a homogeneidade térmica da placa. No tratamento térmico de normalização em forno, em princípio, deve conferir alta homogeneidade ao encharque térmico do material. Na laminação, geralmente, a placa apresenta um perfil térmico ao longo de sua espessura, em função do processo de laminação em temperaturas decrescentes. Assim, a temperatura no núcleo da placa apresenta uma temperatura mais elevada do que em sua superfície ⁽²⁴⁾.

Na laminação de normalização, a filosofia é produzir grãos refinados a partir da recristalização estática da austenita com temperatura final de laminação similar a empregada na normalização em forno de tratamento térmico ⁽²⁵⁾.

O refino de grão produzido pela laminação de normalização depende sensivelmente do esquema de laminação adotado. Nos passes finais, o esquema é programado visando também o controle dimensional e forma do produto final ⁽²⁵⁾.

O esquema de laminação deve ser programado de forma que o tamanho de grão austenítico existente após o passe final seja suficientemente fino. Um tamanho de grão fino recristalizado é conseguido através de reduções pesadas na fase final de laminação em temperaturas próximas a T_{nr} ⁽²⁶⁾.

Durante o resfriamento entre a temperatura final e a Ar_3 deve ser restringido o crescimento de grão. Um método usual empregado para inibir o crescimento de grão austenítico é através de precipitados de TiN ^(25, 26).

A laminação a quente na região das duas fases proporciona um aumento na resistência, mas é acompanhado de um aumento na temperatura de transição de impacto devido a, na ferrita, discordâncias serem retidas em forma de subestrutura. Em contraste, a laminação de normalização, como a temperatura final de laminação é na faixa baixa da austenita, ocorre um aumento do limite de escoamento e queda na temperatura de transição devido o refino de grão ⁽²⁷⁾.

As condições ótimas para a laminação de normalização seriam ⁽¹⁵⁾:

- ✓ Um aço que apresente uma temperatura elevada de crescimento de grão para iniciar a laminação com o tamanho de grão austenítico pequeno;
- ✓ Um aço que possua uma baixa temperatura de não recristalização;
- ✓ Laminação com altas reduções nos passes;

- ✓ Nenhum ou pequeno crescimento de grão entre os passes de laminação e entre a laminação final e temperatura A_{r3} ;
- ✓ Um adicional aumento da resistência deve ser realizado pelo endurecimento por precipitação formado durante ou depois a transformação γ / α .

3.1.1.5. Processo de Laminação Controlada Termomecânica

O processo de laminação termomecânico, usualmente referido como “TMCP”, produz aços de grão fino pela combinação de composição química e controles integrados de processos de fabricação desde reaquecimento das placas até o resfriamento após a laminação, conseguindo assim as propriedades mecânicas especificadas nas espessuras de chapas requeridas ⁽¹⁴⁾. A TMCP exige rigoroso controle tanto na temperatura do aço como na redução na laminação ^(2, 14). Geralmente, uma alta redução ocorre perto ou abaixo da temperatura de transformação A_{r3} . Diferentemente da laminação de normalização, as propriedades produzidas na TMCP, não podem ser reproduzidas por subsequente normalização ou outro tratamento térmico ^(2, 3, 4, 5, 6).

A laminação termomecânica para a fabricação de chapas grossas está dividida nos seguintes estágios: reaquecimento, desbaste, espera, laminação de acabamento e resfriamento ⁽²⁸⁾. A Figura 6 apresenta uma ilustração esquemática da alteração da microestrutura com a deformação ⁽²⁹⁾.

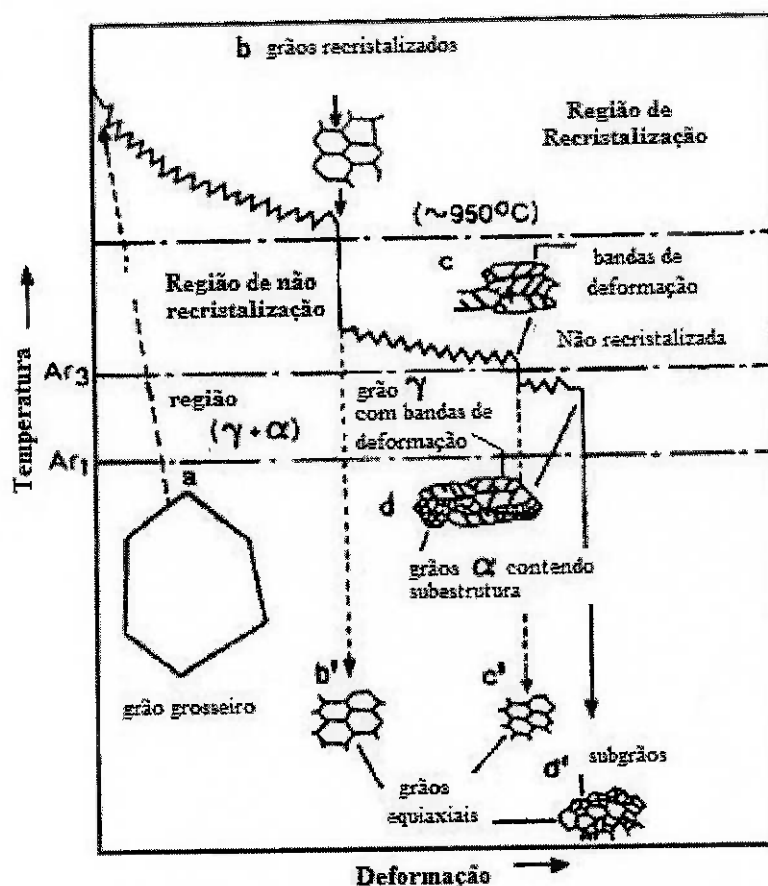


Figura 6: Ilustração esquemática da mudança da microestrutura com a deformação durante a laminação termomecânica (Tanaka, International Metals Reviews, nº4, 1981) ⁽²⁹⁾.

3.1.2. Processo de Laminação de Recristalização

Na laminação de recristalização de chapas, a recristalização estática da austenita em temperaturas moderadas de laminação é utilizada para gerar tamanhos de grão finos de ferrita através da laminação a quente e simultaneamente obter propriedades mecânicas interessantes. A filosofia básica é a de fazer uso do refinamento de grão provenientes da recristalização estática da austenita em temperaturas final de laminação moderadas, tipicamente 900° a 1000°C ⁽²⁵⁾.

Contudo, a fim de obter o refinamento de grão efetivo nos aços ARBL

através da laminação de recristalização, é necessário que o esquema de laminação seja disposto de modo a que o tamanho de grão austenítico existente após o passe final seja suficientemente fino; e que o crescimento do grão durante o resfriamento entre a temperatura final de laminação, relativamente alta, e a temperatura na qual se inicia a transformação em ferrita seja restringido de alguma maneira ⁽²⁶⁾.

O método usual para inibir o crescimento de grão austenítico é com precipitados de nitreto de titânio ^(25, 26). A obtenção de um tamanho de grão austenítico recristalizado fino ao final da laminação depende da sequência de passes de redução, temperaturas e tempo entre os passes ⁽²⁶⁾.

3.2. PRINCÍPIOS METALÚRGICOS DA LAMINAÇÃO A QUENTE

Quatro regiões de temperatura da laminação a quente devem ser distinguidas, conforme Figura 7 ⁽²⁹⁾:

- ✓ Região de recristalização da austenita ($T > T_{nr}$),
- ✓ Região de não-recristalização da austenita ($T_{nr} > T > A_{r3}$),
- ✓ Região de austenita para ferrita (α / γ) – transformação ($A_{r3} > T > A_{r1}$),
- ✓ Região ferrítica ($T < A_{r1}$).

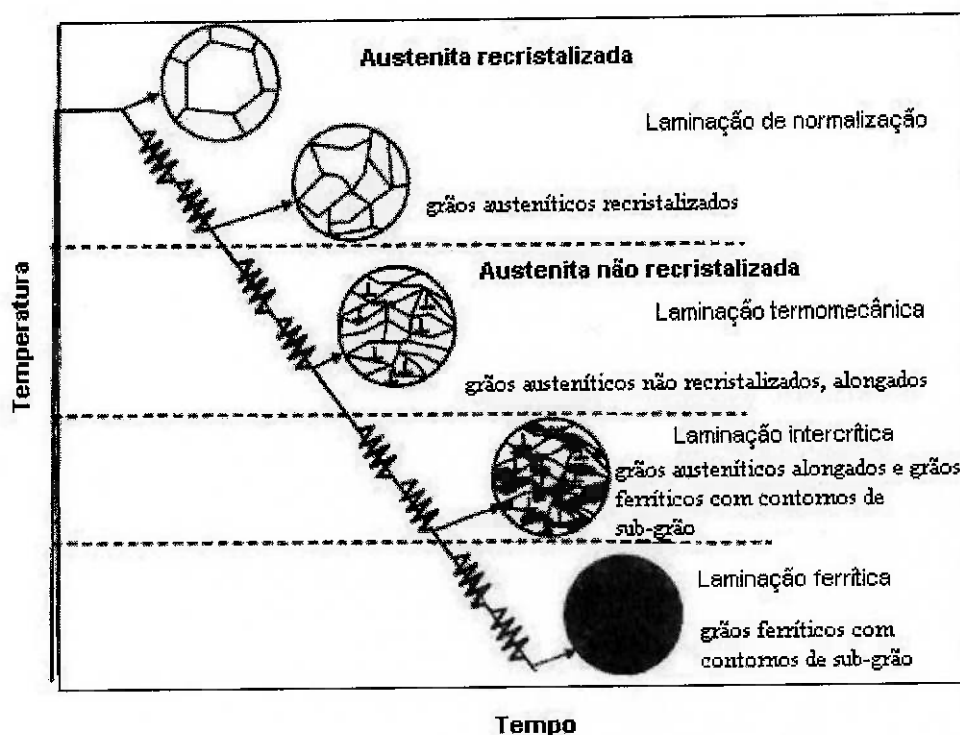


Figura 7: Faixas de temperaturas de laminação a quente e microestruturas resultantes ⁽²⁹⁾.

A laminação de normalização é um processo de laminação controlada na região de recristalização da austenita. A laminação gera discordâncias que nucleiam novos grãos austeníticos. Esses novos grãos austeníticos são menores que os anteriores. Os grãos austeníticos equiaxiais recristalizados transformam em estrutura de grão ferrítica equiaxial e fina ⁽³⁰⁾.

Em laminações de baixas temperaturas, como no caso da laminação termomecânica, a recristalização da fase austenítica é impedida. Laminação nessas temperaturas produz estruturas de grãos alongados com uma alta densidade de discordâncias. Contornos de grão e discordâncias são núcleos para novos grãos ferríticos. Os grãos austeníticos alongados transformam-se em grãos ferríticos pequenos. A alta densidade de discordâncias na austenita dá origem a pequenos grãos ferríticos por nucleação e crescimento ⁽³⁰⁾.

Os carbonetos e nitretos de nióbio, vanádio e titânio são isomorfos e o carbono pode ser encontrado em nitreto e o nitrogênio em carbonetos. Eles são

chamados de carbonitretos ⁽³⁰⁾.

3.2.1. Fenômenos Metalúrgicos Associados à Deformação a Quente

Dentro dos fenômenos metalúrgicos associados à deformação a quente encontram-se o encruamento, a recuperação e a recristalização. O encruamento é um dos mecanismos que contribui para o aumento da resistência dos materiais, devido ao aumento da densidade de discordâncias durante a deformação plástica ⁽³¹⁾.

Entretanto, os fenômenos de recuperação e de recristalização são os processos de restauração microestrutural onde, por um lado, o material encruado readquire a sua microestrutura original e, por outro lado, restaura total ou parcialmente as suas propriedades mecânicas, atingindo valores semelhantes aos apresentados antes da deformação ⁽³¹⁾.

Três tipos de processos de restauração estão relacionados com a laminação a quente. O processo de restauração dinâmica, que se inicia e completa durante a deformação; o processo de restauração metadinâmica no qual inicia durante a deformação e completa depois da redução; e o processo de restauração estática que é um estágio da recuperação na qual a recristalização ocorre pela movimentação de contornos de grão de alto ângulo ⁽²⁹⁾.

3.2.1.1. Recuperação Estática

A recuperação estática inicia-se imediatamente após a interrupção da deformação sem a necessidade de um tempo de incubação. Do mesmo modo que ocorre na recuperação dinâmica, na recuperação estática acontece um rearranjo local de discordâncias que dá origem a uma estrutura celular e de subgrãos ⁽³¹⁾.

Nesse tipo de estrutura celular, as paredes das células são as regiões com alta concentração de discordâncias e circundam as áreas de baixa densidade de discordâncias, que são conhecidas como núcleos das células. Em seguida, as discordâncias interagem entre si, através da aniquilação mútua entre as discordâncias de sinais opostos e do alinhamento de discordâncias de mesmo sinal. Esse processo é conhecido como poligonização e dá origem aos contornos de pequeno ângulo ⁽³¹⁾.

A formação de contornos de pequeno ângulo está associada à energia de defeito de empilhamento (EDE). Quanto maior a EDE, mais fácil será a movimentação de discordâncias. Portanto, as fases com alta EDE, como a ferrita, podem apresentar intensa recuperação, entretanto, as fases com baixa EDE, como a austenita, apresentam uma recuperação bastante limitada, favorecendo a ocorrência do processo de recristalização subsequente ⁽³¹⁾.

Além disso, a taxa de recuperação depende de outros fatores, tais como a quantidade de deformação, a taxa de deformação e a temperatura imposta ⁽³²⁾.

3.2.1.2. Recristalização Estática

Durante a ocorrência da recristalização, o potencial termodinâmico para a migração de contornos de alto ângulo está em constante diminuição devido à ocorrência de recuperação. Isto ocorre em virtude dos processos de recuperação e recristalização ocorrerem simultaneamente ⁽³³⁾.

A recristalização estática é um mecanismo de restauração da microestrutura que ocorre comumente após a deformação a quente dos aços. Este processo envolve a migração de contornos de alto ângulo e a liberação de energia armazenada durante a deformação, através da aniquilação de discordâncias ⁽³¹⁾.

Durante a recristalização estática os novos grãos originam-se do crescimento de subgrãos formados durante a recuperação do material encruado, e que servem de núcleo para recristalização. A força motriz para a migração dos subgrãos é decorrente da diferença de densidade de discordâncias entre o interior do núcleo de recristalização e do material restante. O crescimento de subgrãos ocorre em contornos de grãos preexistentes, inclusões ou partículas de segunda fase, bandas de deformação no interior dos grãos e intersecções de maclas. Uma característica comum destes locais é que eles são regiões de intensa distorção do reticulado ⁽³³⁾. A presença de inclusões ou partículas de segunda fase provoca uma concentração de discordâncias ao seu redor, o que promove a migração de contornos de subgrãos nas vizinhanças ⁽³¹⁾.

Freqüentemente grãos vizinhos podem ter diferentes tamanhos de subgrãos, o que proporciona o crescimento do grão que possui células maiores em direção ao grão com células menores, isso é conhecido como migração de contornos de alto

ângulo. A força motriz para essa migração é fornecida pela diferença de energia existente entre os grãos, através dos contornos de pequeno ângulo dos subgrãos. A energia resultante de um contorno formado a partir de dois subcontornos pode ser menor do que a soma das energias dos dois subcontornos. Este processo pode ocorrer mediante uma sucessão de migrações até que se desenvolva um contorno de alto ângulo que possa ser considerado um núcleo de grão recristalizado ^(33, 34).

Por outro lado, o crescimento de subgrãos formados na estrutura encruada se dá por meio da eliminação de contornos comuns, da rotação do reticulado e do movimento das discordâncias, diminuindo desta forma a energia livre do sistema. Como resultado disso, a desorientação pode se tornar maior. Dois pares de subgrãos coalescidos podem, então, sofrer um coalescimento adicional, produzindo um grão recristalizado definido por contornos de alto ângulo ⁽³⁵⁾.

Portanto, definem-se três mecanismos de nucleação para a recristalização estática: o crescimento de subgrãos; a migração de contornos de subgrãos e o coalescimento de subgrãos. ^(33, 34, 35).

3.2.1.3. Cinética da Recristalização Estática

A cinética da recristalização estática é muito parecida com a cinética das transformações de fase que são decorrentes de um tratamento isotérmico, pois ambas podem ser descritas em termos de taxa de nucleação e de uma taxa de crescimento ⁽³³⁾.

A cinética da recristalização estática pode ser descrita através de uma equação do tipo Avrami (1939) – Johnson Mehl (1939), como uma função do tempo requerido para atingir certo nível de recristalização, sendo que ⁽³⁶⁾:

$$X = 1 - \exp [- A (t / t_f)^n] \quad (1)$$

onde: t_f é o tempo necessário para obter uma dada fração recristalizada f , A é definido como $-\ln(1-f)$ e n é o expoente do tempo.

Os elementos de liga dissolvidos na austenita podem reduzir a velocidade da recristalização estática. Um aumento na concentração de soluto pode conduzir à obtenção de grãos mais finos após a recristalização estática. Estes efeitos estão provavelmente relacionados com a influência das adições de soluto (ou impurezas em solução) sobre a nucleação e a velocidade de crescimento dos grãos recristalizados estaticamente (efeito de arraste de solutos) ⁽³¹⁾.

Em contraste com o papel dos solutos na recristalização estática, a presença de precipitados na austenita deformada pode ter um efeito muito maior na redução da velocidade de recristalização estática por meio do ancoramento dos contornos, o que impede sua movimentação ⁽³⁷⁾.

3.2.1.4. Tamanho de Grão Recristalizado Estaticamente

O tamanho de grão produzido por recristalização estática depende, basicamente, da deformação previa aplicada e do tamanho de grão de partida. Uma

redução no tamanho de grão de partida leva a um acréscimo na densidade de discordâncias e, conseqüentemente, a um acréscimo na taxa de nucleação, resultando em uma estrutura de grãos mais finos ⁽³¹⁾.

3.2.1.5. Efeito do Microligante na Recristalização Estática

Na laminação de recristalização e de normalização deve possuir um sistema que esteja presente imediatamente após o reaquecimento que iniba o crescimento de grão, mas que permita a recristalização estática da austenita ⁽³⁸⁾.

A adição de elementos microligantes, tais como nióbio e titânio, retarda a recristalização da austenita. Nos aços microligados com nióbio esse efeito retardador se deve, por um lado, ao efeito de arraste de soluto provocado pelo acúmulo de átomos em solução sólida, através do qual se dá o ancoramento de contornos e sub-contornos de grãos e, por outro lado, à presença de partículas na forma de precipitados do tipo Nb(C,N) durante o tempo de incubação para a recristalização ⁽³¹⁾. O TiN que precipitado no sólido gera forças de ideal magnitude, isto é, grande o suficiente para reprimir o crescimento de grão do grão austenítico recristalizado, mas pequeno o suficiente para permitir a ocorrência da recristalização estática ^(39, 40).

3.3. DISSOLUÇÃO DOS ELEMENTOS DE MICROLIGA DURANTE O REAQUECIMENTO DE PLACAS

Para que os elementos que compõem estes precipitados estejam disponíveis em solução sólida na matriz austenita, a fim de se precipitarem durante o processo de laminação, é necessário promover a dissolução de partículas de precipitados presentes nas placas durante o reaquecimento ⁽⁴¹⁾. O interesse em que esses elementos permaneçam em solução é devido ao fato de atrasarem a recristalização estática da austenita ⁽⁴²⁾.

Durante o processo de reaquecimento de um aço microligado, os elementos estão presentes inicialmente na forma de carbonetos, nitretos ou carbonitretos dissolvidos na matriz austenítica. À medida que a temperatura é aumentada, esses precipitados dissolvem-se gradualmente, podendo essa dissolução ser parcial ou completa. Enquanto presentes, esses compostos inibem o crescimento dos grãos austeníticos ⁽⁴³⁾.

Uma microestrutura com granulação fina contém uma grande quantidade de área de contorno de grãos por unidade de volume e, conseqüentemente, energia livre em excesso que pode ser minimizada com o crescimento de grãos. Embora os grãos tendam a crescer durante o reaquecimento, a taxa de crescimento pode ser minimizada ou até mesmo eliminada através do ancoramento de contornos por partículas ou com o arrasto de soluto ⁽⁴⁴⁾. Quando um contorno de grão é interceptado por uma partícula, parte do contorno é eliminado. Para mover o contorno é necessária a recriação da área e, portanto, a realização de um trabalho. As partículas com tamanhos pequenos e em grandes frações volumétricas são as

mais indicadas para inibir o crescimento dos grãos. Isto requer que as partículas tenham baixa solubilidade na austenita e baixa taxa de coalescimento. Conforme a temperatura é aumentada durante o reaquecimento, as partículas coalescem ou dissolvem-se, liberando os contornos de grãos ⁽⁴⁵⁾.

Cada fase precipitada apresenta uma estabilidade e uma solubilidade característica. A solubilidade de compostos de carbono e nitrogênio com os elementos de microliga nióbio e titânio na austenita podem ser encontrados na literatura. Algumas equações utilizadas para o cálculo da temperatura de solubilização (T_{sol}) de Nb(CN) ⁽¹⁸⁾ e TiN ⁽⁴⁶⁾ são apresentadas abaixo.

$$\log [Nb][C]^{0,24} [N]^{0,65} = 4,09 - 10500/T_{sol} \quad (1)$$

$$\log [Nb][C+N] = 1,54 - 5860/T_{sol} \quad (2)$$

$$\log [Nb][C]^{0,83} [N]^{0,14} = 4,46 - 9800/T_{sol} \quad (3)$$

$$\log [Ti][N] = 4,94 - 14400/T_{sol} \quad (4)$$

$$\log [Ti][N] = 5,19 - 15490/T_{sol} \quad (5)$$

$$\log [Ti][N] = 3,82 - 15020/T_{sol} \quad (6)$$

$$\log [Ti][N] = 0,32 - 8000/T_{sol} \quad (7)$$

3.4. TEMPERATURA DE NÃO RECRISTALIZAÇÃO

A Figura 8 mostra o aumento da temperatura de não recristalização com o aumento do nível de microligantes ⁽²⁹⁾. Pode-se observar que o aumento da

quantidade de microligantes será responsável pela ocorrência de precipitados de maior estabilidade. Uma quantidade maior de microligantes em estado supersaturado representará também uma maior quantidade de microligantes precipitados. Isto provocará uma maior fração volumétrica de precipitados atuando no sentido de atrasar a recristalização, assim aumentando a temperatura de não recristalização ⁽⁴⁵⁾.

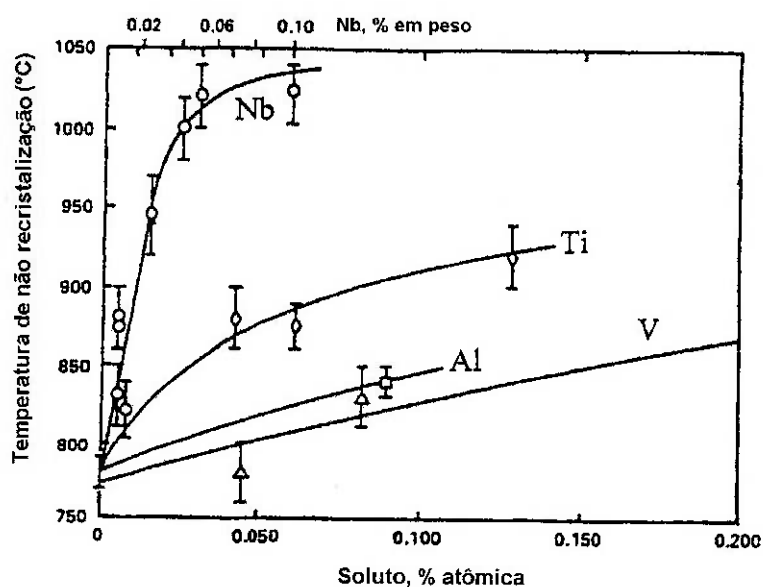


Figura 8. Aumento da temperatura de não recristalização pelo aumento do nível de microligantes em um aço 0,07%C, 1,40%Mn, 0,25%Si ⁽²⁹⁾.

Na Figura 8, pode-se observar que diferentes microligantes têm diferentes efeitos na temperatura de não recristalização. O nióbio apresenta maior aumento de não recristalização para menores quantidades de soluto inicial. O vanádio, por sua vez, apresenta menor efeito na temperatura de não recristalização. Este comportamento está relacionado à capacidade de precipitação e às condições de processamento ⁽⁴⁵⁾. Já a adição de silício diminui esta temperatura, como observado na equação de Boratto ⁽²⁹⁾.

Boratto et al apresenta uma equação para calcular a temperatura de não

recristalização (T_{nr}) em °C ⁽²⁹⁾:

$$T_{nr} = 887 + 464(C) + 6645(Nb) - 644(Nb)^{0,5} + 732(V) - 230(V)^{0,5} + 890(Ti) + 363(Al) - 357(Si) \quad (8)$$

onde: C,Nb,V,Ti,Al,Si = teores em % em peso dos elementos.

3.5. TRANSFORMAÇÃO DE FASE

Ao final da laminação, a austenita é devidamente condicionada pelas sucessivas deformações efetuadas no laminador, através do seu esquema de laminação. A austenita não recristalizada contém elevada densidade de discordâncias e o nióbio parcialmente em solução. Esta austenita é, em seguida, transformada numa estrutura de ferrita/perlita e, possivelmente, alguma austenita deformada. O começo desta transformação austenita/ferrita ocorre na temperatura Ar_3 que é controlada pela composição do aço, velocidade de resfriamento, tamanho de grão austenítico, deformação acumulada na austenita não recristalizada e, no caso dos aços ao nióbio, pela presença de nióbio em solução na austenita ⁽⁴⁷⁾. Dentre as várias equações de estimativa da Ar_3 disponíveis na literatura, destaca-se a desenvolvida por Andrews ⁽⁴⁸⁾:

$$Ar_3 = 910 - 273 (C) - 74 (Mn) - 57 (Ni) - 16 (Cr) - 9 (Mo) - 5 (Cu) \quad (9)$$

onde: Ar_3 = temperatura de início da transformação austenita – ferrita (°C);

C,Mn,Ni,Cr,Mo,Cu = teores em % em peso dos elementos.

A cinética de transformação a partir da A_{r3} , a fração volumétrica de ferrita/perlita e o tamanho de grão decorrente desta transformação devem levar em consideração a característica exotérmica da transformação austenita-ferrita ⁽⁴⁹⁾.

3.6. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

O notável desenvolvimento dos aços microligados, principalmente para aplicações estruturais, navais, petrolíferas e automobilísticas, se deve basicamente às melhores características de tenacidade desses materiais para níveis relativamente altos de resistência mecânica e boa soldabilidade.

Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) compreende um grupo específico de aços com composição química especificamente desenvolvida para alcançar elevados valores de propriedade mecânica. Em alguns casos, esses aços apresentam maior resistência à corrosão atmosférica que os aços carbonos convencionais. Os aços ARBL são geralmente produzidos com ênfases nas propriedades mecânicas exigidas, em vez dos limites de composição química. Não são considerados aços ligados, embora a utilização intencional de qualquer elemento de liga tecnicamente qualifique como tais ⁽²⁷⁾.

Os mecanismos que contribuem para o aumento da resistência dos aços ARBL são ^(27, 50):

- ✓ Endurecimento por solução sólida substitucional (Mn, Cr, Ni, Cu);
- ✓ Endurecimento por refinamento de tamanho de grão;
- ✓ Endurecimento por precipitação de carbonetos / nitretos (V, Nb, Ti);

- ✓ Endurecimento por formação de sub-estrutura de discordância;
- ✓ Endurecimento por transformação de fase.

Os principais microligantes adicionados nos ARBL são nióbio, titânio e vanádio. Independente do elemento de liga, os aços ARBL apresentam uma característica em comum. Em temperaturas abaixo de 1100°C, independentemente da faixa de recristalização, esses aços exibem crescimento de grão não significativo depois de completa recristalização. Fora dessas condições, os efeitos dos vários elementos microligantes na microestrutura dos aços ARBL laminados a quente são um pouco diferentes ⁽²⁹⁾.

O nióbio é o mais eficiente elemento microligante adicionado devido a suas características. Carbo-nitretos de nióbio, formados previamente, podem ser facilmente dissolvidos antes da laminação a quente, em temperaturas entre aproximadamente 1200°C e 1320°C, que correspondem aos valores de temperaturas adotados industrialmente para o re-aquecimento. O nióbio mantém-se dissolvido nas temperaturas que correspondem à faixa de temperatura de conclusão do processo de laminação a quente, entre 1000°C e 900°C. Isso permite a precipitação de carbo-nitretos de nióbio, que é induzida pela deformação induzida pelo processo de laminação, levando a um substancial endurecimento por precipitação e também o retardamento da recristalização no metal sendo laminado ⁽²⁹⁾.

Como já apresentado, o nióbio produz maior efeito no retardamento da recristalização em comparação com os demais elementos microligantes. A solubilização de carbo-nitretos em baixas temperaturas na região da faixa da austenita é muito limitada, praticamente opõe o mecanismo de precipitação ⁽²⁹⁾.

A influência do titânio sobre a microestrutura irá depender da quantidade de

titânio adicionado: pequenas quantidades de titânio irão formar nitretos praticamente insolúveis, adições em quantidades maiores possibilitam a formação de carbonetos solúveis. Pequenas adições de titânio, até aproximadamente 0,04%Ti, formam nitretos de titânio (TiN) no aço, ainda no estado líquido. Na laminação a quente, estes nitretos não são eficientes na restrição ao crescimento de grão, exceto em grandes tamanhos de grão austeníticos. Conseqüentemente, a cinética de recristalização de aços com adições de titânio menores do que 0,04%Ti são similares as dos aços carbono ⁽²⁹⁾.

Adição de maiores quantidades de titânio, aproximadamente 0,10%Ti, em aços de baixo teor de carbono, proporcionam uma sobra de titânio que leva à formação de carbonetos que podem ser solubilizados no reaquecimento. O titânio solubilizado e sua posterior precipitação induzida por deformação atrasam a recristalização dos aços em uma faixa de temperaturas entre 1000°C a 850°C, com pico máximo em 900°C ⁽²⁹⁾.

Titânio rapidamente forma um sulfeto ou carbo-sulfeto em concorrência com manganês pelo enxofre. Em baixos níveis de titânio (ou altos níveis manganês), sulfeto de manganês é formado com titânio na solução sólida. Inversamente, o mais estável sulfeto de titânio é formado em níveis baixos manganês. Os sulfetos de titânio são partículas duras que são não-deformáveis sob condições de laminação a quente. Eles mudam os sulfetos alongados para esferoidizados, levando a uma melhoria significativa da ductilidade ⁽²⁹⁾.

3.7. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Atualmente, o tratamento térmico é considerado como uma etapa fundamental e de importância imprescindível aos processos de fabricação. O mercado tem exigido cada vez mais a aplicação de chapas com os mais diferentes requisitos e propriedades. O objetivo é tornar essas chapas aptas para suportar satisfatoriamente as mais diferentes condições de serviço a que estarão sujeitas ⁽⁵¹⁾.

Fundamentalmente para um projeto eficiente da etapa de tratamento térmico, o profissional deve ter em mente alguns fatores que determinarão o sucesso ou o fracasso do tratamento. Uma chapa que deverá receber um tratamento térmico deve ser analisada, desde a sua dimensão até as características internas, como tamanho de grão, defeitos internos e outros. Os ciclos de aquecimento e resfriamento envolvidos no tratamento térmico devem responder rapidamente a homogeneização de temperatura para se evitar crescimento excessivo de grão. O ambiente de aquecimento, muitas vezes, deve ser controlado para se evitar efeitos nocivos de oxidação e decarbonetação. E, finalmente, o meio de resfriamento deve responder às taxas adequadas para a formação de estruturas específicas da chapa tratada ⁽⁵¹⁾.

Esses conhecimentos propiciam a adoção de vários artifícios de natureza prática, tais como, modificação da forma das peças, alteração da composição da liga, escolha de outro meio de resfriamento, entre outros ⁽⁵²⁾.

A Tabela 5 apresenta os principais fatores que afetam um tratamento térmico ⁽⁵¹⁾.

Tabela 5 - Fatores que afetam os tratamentos térmicos ⁽⁵¹⁾.

Item	Fator
CHAPA	Tamanho e espessura Estrutura original: tamanho de grão, encruamento, nível de segregação, outros.
AQUECIMENTO	Tipo de forno Temperatura crítica Taxa de aquecimento
TEMPO DE AQUECIMENTO	Homogeneização da temperatura Crescimento de grão
AMBIENTE DE AQUECIMENTO	Reações que ocorrem na superfície da chapa
RESFRIAMENTO	Ambiente de resfriamento Taxa de resfriamento Temperatura mínima

As chapas finas devido o menor volume tendem a se aquecer mais rápido que as espessuras mais grossas ⁽⁵¹⁾.

O tempo de permanência à temperatura de aquecimento deve ser o suficiente para que a chapa se aqueça de modo uniforme, ao longo da sua espessura. Deve-se evitar que a chapa permaneça tempo superior ao necessário, para evitar que ocorra o indesejável crescimento de grão, bem como em determinadas ligas, uma maior possibilidade de oxidação e/ou descarbonetação ⁽⁵¹⁾.

A atmosfera de aquecimento deve ser controlada para evitar reações químicas indesejáveis na superfície da chapa. As duas reações mais comuns que podem causar problemas são oxidação e descarbonetação ⁽⁵¹⁾.

O resfriamento é o fator mais importante no tratamento térmico. Através da escolha do meio e a velocidade de resfriamento, após a permanência à temperatura

de aquecimento, podem-se obter mudanças estruturais na chapa, que promovam alteração na ductilidade, dureza e resistência mecânica ⁽⁵¹⁾.

3.7.1. Normalização

Normalização é um tratamento térmico que produz uma microestrutura uniforme de ferrita e perlita. A normalização de aços hipoeutetoides ocorre em temperatura acima da temperatura (Ac_3), enquanto nos aços hipereutetoides a faixa de temperatura de tratamento é acima da temperatura A_{cm} . A Figura 9 mostra parte do diagrama Fe-C com as faixas de temperaturas típicas para a normalização. Na normalização, o aquecimento é seguido por resfriamento ao ar ⁽⁵³⁾.

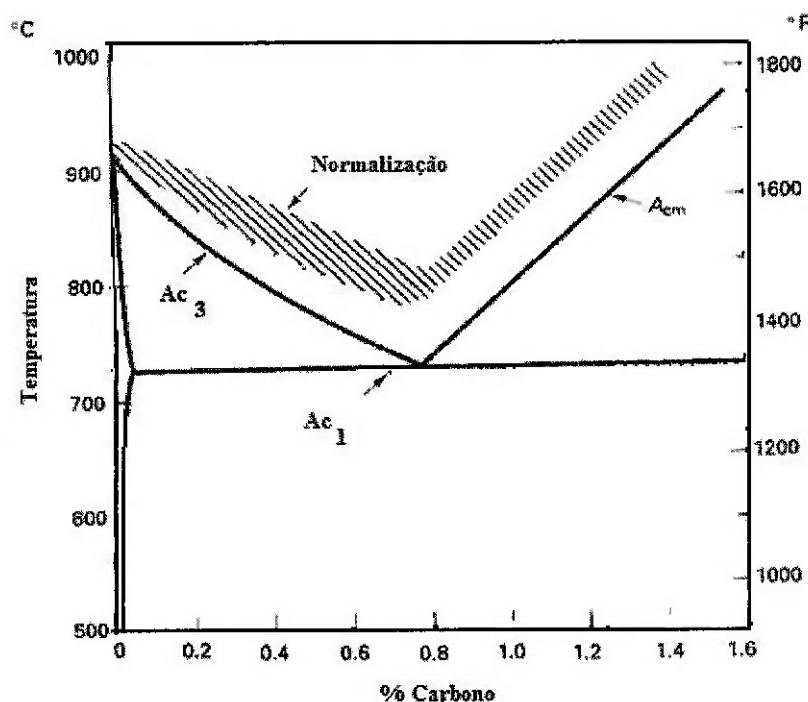


Figura 9. Parte do diagrama Fe-C com as faixas de temperaturas típicas para a normalização ⁽⁵³⁾.

O tratamento térmico de normalização consiste em aquecer a chapa a uma temperatura baixa na região da austenita, mantendo a mesma por um período suficientemente longo para alcançar uniformemente a temperatura e depois realizar o resfriamento ao ar. Este processo forma grãos austeníticos relativamente finos para depois transformar em grãos finos de ferrita e colônias finas de perlita ^(5, 27, 54). O resfriamento ao ar deve ser para uma temperatura substancialmente abaixo da faixa de transformação, isto é, abaixo da temperatura Ar_1 . Normalmente, a chapa é resfriada ao ar até a temperatura ambiente, no entanto o resfriamento ao ar forçado pode ser empregado ^(5, 55).

O tempo na temperatura deve ser apenas o suficiente para causar homogeneização. Deve ser suficiente para permitir a solubilização dos carbonetos e elementos de liga, caso estejam presentes, para obter uma estrutura final desejada. Geralmente, tudo que é requerido é um tempo suficiente para completa austenitização. Pode ser considerada, uma hora de permanência na temperatura por polegada de espessura de chapa ⁽⁵³⁾.

A taxa de resfriamento influencia, significativamente, na quantidade de perlita e no tamanho e espaçamento das lamelas de perlita. Em altas taxas de resfriamento, forma mais perlita, e as lamelas são mais finas e os espaçamentos são mais estreitos. Tanto o aumento da quantidade de perlita como a maior finura da perlita resultam em aumento da resistência e aumento da dureza ⁽⁵³⁾.

A finalidade de normalizar varia consideravelmente. O tratamento térmico de normalização pode aumentar ou diminuir a resistência e dureza de um determinado aço em um dado produto, dependendo da história térmica e mecânica do produto ⁽²⁷⁾. Dentre as diversas razões metalúrgicas para normalizar as chapas estão, aumento da tenacidade, redução da variação das propriedades mecânicas, aumento

da usinabilidade, refinamento de grão, homogeneização, modificação das tensões residuais, redução no tamanho dos carbonetos nos aços microligados ^(5, 27, 54). A normalização pode transformar uma microestrutura grosseira e heterogênea de um como laminado a quente para uma microestrutura fina e mais homogênea. A Figura 10 compara a microestrutura a ¼ da espessura de (a) como laminado e (b) como normalizado, chapas de 11 mm de espessura da especificação TC128 grau B nas três direções ortogonais. Como apresentado nessa figura, a normalização refina o tamanho de grão ferrítico e o tamanho da colônia de perlita, mas não elimina completamente a presença do bandejamento ⁽¹⁰⁾.

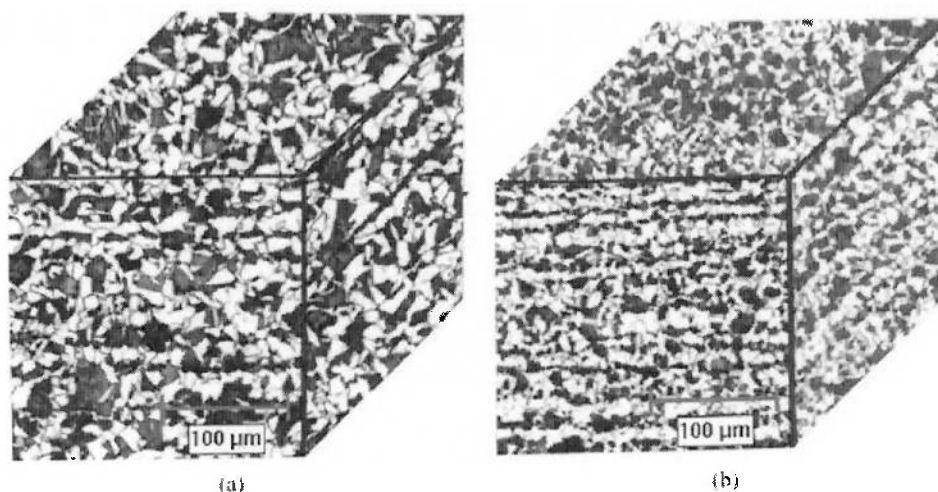


Figura 10. Microestrutura de (a) como laminado e (b) como normalizado, chapas de 11 mm de espessura da especificação TC128 grau B ⁽¹⁰⁾.

A temperatura da região da austenita é tipicamente 30° a 100°C acima da A_{c3} . A temperatura mais relevante para normalização é a temperaturas A_{c3} ⁽¹⁰⁾. Pode-se calcular a temperatura utilizando a equação empírica desenvolvida por Andrews ⁽⁴⁸⁾:

$$A_{c3} (^{\circ}\text{C}) = 910 - 203(\sqrt{\%C}) - 15,2(\%Ni) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo) + 13,1(\%W) \quad (10)$$

onde: C, Ni, Si, V, Mo, W = teores em % em peso dos elementos.

Verifica-se que a temperatura A_{c3} é fortemente dependente da porcentagem de carbono no aço ⁽¹⁰⁾. Os efeitos de outros elementos na A_{c3} são dados pelos fatores adicionais $-[30(\%Mn)+11(\%Cr)+20(\%Cu)-700(\%P)-400(\%Al)-120(\%As)-400(\%Ti)]$, % em peso ⁽⁴⁸⁾.

Apenas alguns elementos químicos são exigidos pelas especificações na composição do aço. No entanto, o fabricante pode adicionar outros elementos no projeto de liga do material.

Composições químicas típicas e cálculo da temperatura de A_{c3} para especificações de graus comuns de chapas de aços são apresentados na Tabela 6 ⁽¹⁰⁾.

Tabela 6 - Composições típicas (% em peso) e temperatura calculada A_{c3} de aços ferríticos/perlíticos normalizados ⁽¹⁰⁾.

Grau	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	N	A_{c3} (°C)
A516-70	0,19	1,10	0,34	0,25	0,20	0,04	0,04	-	-	-	835
A572-50	0,18	1,23	0,30	-	-	-	-	-	0,09	-	847
A588-B	0,16	1,15	0,38	0,30	0,20	0,56	-	-	0,06	-	849
DH36/EH36	0,13	1,42	0,32	-	-	0,09	0,06	0,03	-	-	853
TC128-B	0,22	1,41	0,32	-	-	-	0,06	-	0,06	-	837
A633-E	0,20	1,42	0,40	0,25	0,25	0,20	0,06	-	0,09	0,012	845

Conforme Tabela 6, a temperatura de normalização de, aproximadamente, 900°C é adequada para todos os aços ferríticos/perlíticos ⁽¹⁰⁾.

Em relação ao material laminado a quente, o tratamento térmico de normalização refina o tamanho de grão da ferrita e reduz ligeiramente o conteúdo da perlita; e também, reduz significativamente a resistência e aprimora a tenacidade. Apesar de o material normalizado ter um aumento de sua resistência devido o

refinamento de grão ferrítico, o aumento devido endurecimento por precipitação é pequeno. O material como laminado apresenta um aumento muito maior de sua resistência devido endurecimento por precipitação ⁽¹⁰⁾.

A Figura 11 mostra para as condições de como laminado a quente e normalizado, a contribuição dos mecanismos de endurecimento ⁽¹⁰⁾.

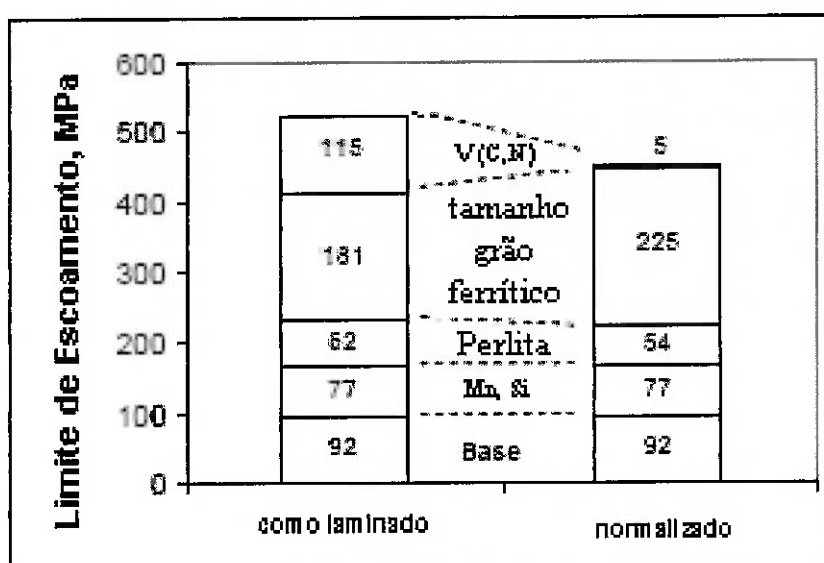


Figura 11. Mecanismos de endurecimento de chapas de espessura de 19 mm como laminadas a quente e como normalizada de especificação TC128-garu B com a composição de 0,24%C, 1,27%Mn, 0,36%Si, 0,077%V, 0,043%Al e 0,0095%N ⁽¹⁰⁾.

Os mecanismos de endurecimento atuantes nos aços normalizados são endurecimento por solução sólida, endurecimento perlítico, endurecimento por tamanho de grão ferrítico e endurecimento por precipitação. É possível estimar a contribuição desses mecanismos utilizando resultados metalográficos ⁽¹⁰⁾. Considerar a equação empírica para o limite de escoamento C-Mn desenvolvida por Grozier e Bucher ⁽⁵⁶⁾:

$$LE \text{ (MPa)}_{\text{calc}} = 91,7 + 40,7(\%Mn) + 70,4(\%Si) + 1,5(\%perlita) + 16,5(1/\sqrt{d}) \quad (12)$$

Onde: d = tamanho de grão ferrítico em mm; Mn, Si = teores em % em peso dos elementos.

De acordo com Irvine e Pickering ⁽⁴⁷⁾, os coeficientes de endurecimento de solução sólida no limite de escoamento dos elementos Mn, Si, Cu, Mo, Ni, Cr e N são +32,4; +84,1; +84,1; +13,7; 0; -31,0 e +4,345 MPa / %peso, respectivamente.

Similar ao limite de escoamento, uma equação empírica pode ser utilizada para calcular o limite de resistência de um aço C-Mn ⁽⁵⁶⁾:

$$LR \text{ (MPa)}_{\text{calc}} = 223,2 + 56,7(\% \text{Mn}) + 102(\% \text{Si}) + 4,3(\% \text{perlita}) + 11,8(1/\sqrt{d}) \quad (13)$$

Onde: d = tamanho de grão ferrítico em mm; Mn, Si = teores em % em peso dos elementos.

À medida que o carbono do aço aumenta, o conteúdo de perlita na chapa aumenta linearmente. Esta relação é mostrada na Figura 12 com base nos dados de Grozier e Bucher ⁽¹⁰⁾.

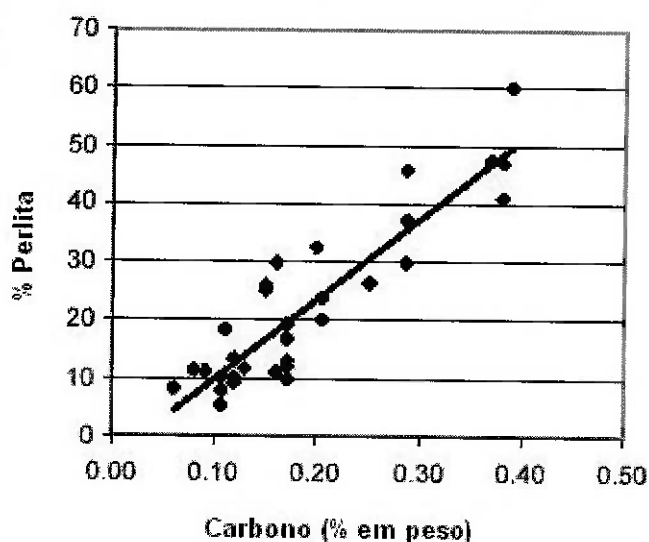


Figura 12. Efeito do conteúdo de carbono na porcentagem de perlita na microestrutura de chapas de aço C-Mn como laminadas, recozidas e normalizadas ⁽¹⁰⁾.

O aumento do conteúdo da perlita tem um forte efeito com o limite de

resistência, mas um baixo efeito no limite de escoamento, conforme Figura 13 ⁽¹⁰⁾.

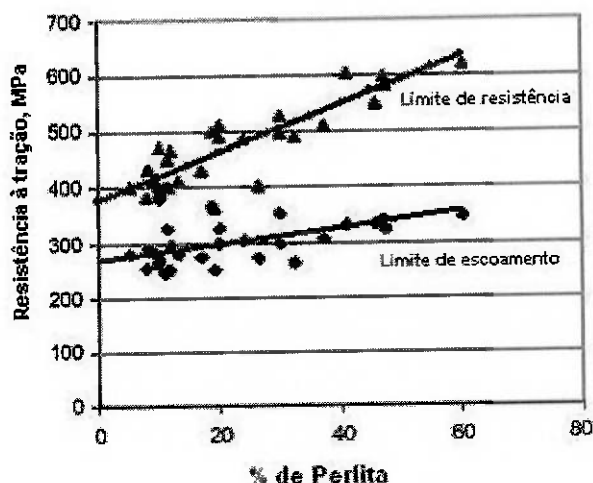


Figura 13. Efeito da porcentagem de perlita na microestrutura de aços C-Mn nos limites de escoamento e resistência ⁽¹⁰⁾.

A adição de carbono é um método eficaz em termos de custo para a produção de chapas normalizadas com requisitos de alto limite de resistência. No entanto, o aumento do carbono e conteúdo da perlita aumenta a temperatura de transição de impacto Charpy e diminui a energia máxima de impacto Charpy, isto é, reduz a tenacidade ⁽¹⁰⁾. A Figura 14 apresenta curvas de energia de transição do ensaio de impacto para aços carbono com várias porcentagens de carbono.

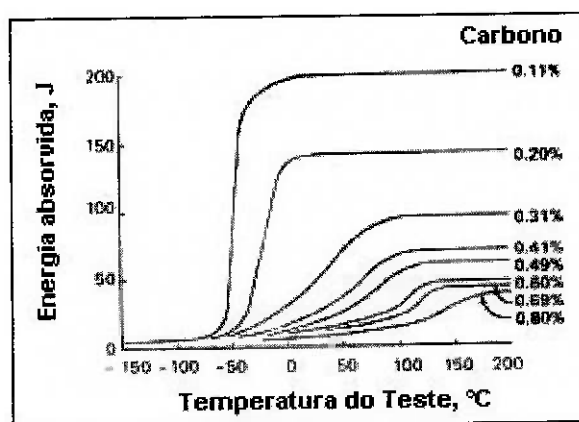


Figura 14. Curvas de energia de transição para aços carbono com diferentes porcentagens de carbono ⁽¹⁰⁾.

O mecanismo mais importante da normalização é o refinamento de grão,

pois pode aumentar a resistência e tenacidade simultaneamente. O refino de grão ferrítico está diretamente relacionado com o refino de grão austenítico. É possível obter grãos austeníticos mais finos na temperatura de normalização por meio da utilização de carbonitreto ou nitreto precipitados para inibir o crescimento do grão austenítico. Na temperatura típica de normalização de 900°C, nitreto de alumínio e carbonitreto de titânio ou nióbio são termodinamicamente estáveis, as partículas precipitadas permanecem fora da austenita. Diferentemente, a solubilidade do V(C,N) é muito maior em temperaturas típicas de normalização, essas partículas normalmente se dissolvem. Um refinador muito utilizado é o AlN. Um benefício importante da formação de partículas de AlN é a remoção do nitrogênio livre no aço C-Mn, e resulta em um aumento da tenacidade ⁽¹⁰⁾.

3.8. TÓPICOS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA A SEREM CONSIDERADOS NO ESTUDO

Laminação de normalização é um processo na qual a temperatura final de laminação é geralmente controlada na faixa utilizada pelo tratamento térmico de normalização, resultando em um material em condições equivalentes ao obtidos pela normalização ^(2, 3, 4, 5, 6).

Além disso, os valores especificados de propriedades mecânicas devem ser atendidos mesmo depois de um tratamento térmico adicional de normalização ⁽⁵⁾. Segundo as especificações alemãs, a resistência do aço quando o limite de escoamento mínimo especificado é maior ou igual a 355 MPa muda no máximo 60

MPa quando a chapa de laminação de normalização é submetida a uma normalização ⁽²²⁾.

Um aço normalizado tem a estrutura e propriedades mecânicas que podem ser produzidas tanto pelo tratamento térmico como pela laminação controlada. A questão que se coloca é saber se a composição do aço utilizado para um processo se adapta às características do novo processo de fabricação ⁽¹⁹⁾.

Na laminação de normalização, a filosofia é produzir grãos refinados a partir da recristalização estática da austenita com temperatura final de laminação similar a empregada na normalização em forno de tratamento térmico ⁽²⁵⁾.

O refino de grão produzido pela laminação de normalização depende sensivelmente do esquema de laminação adotado ⁽²⁵⁾.

O esquema de laminação deve ser programado de forma que o tamanho de grão austenítico existente após o passe final seja suficientemente fino. Um tamanho de grão fino recristalizado é conseguido através de reduções pesadas na fase final de laminação em temperaturas próximas a T_{nr} ⁽²⁶⁾.

Durante o resfriamento entre a temperatura final e a A_{r3} deve ser restringido o crescimento de grão. Um método usual empregado para inibir o crescimento de grão austenítico é através de precipitados de TiN ^(25, 26).

A adição de elementos microligantes, tais como nióbio e titânio, retarda a recristalização da austenita ^(31, 42). Para que os elementos que compõem estes precipitados estejam disponíveis em solução sólida na matriz austenita, a fim de se precipitem durante o processo de laminação, é necessário promover a dissolução de partículas de precipitados presentes nas placas durante o reaquecimento ⁽⁴¹⁾.

A temperatura de acabamento de laminação no processo de laminação de normalização deve ser acima da temperatura de não recristalização.

O tratamento térmico de normalização consiste em aquecer a chapa a uma temperatura baixa na região da austenita, acima da temperatura (A_{c3}), mantendo a mesma por um período suficientemente longo para alcançar uniformemente a temperatura e depois realizar o resfriamento ao ar. Este processo forma grãos austeníticos relativamente finos para depois transformar em grãos finos de ferrita e colônias finas de perlita ^(10, 27, 54).

A taxa de resfriamento influencia, significativamente, na quantidade de perlita e no tamanho e espaçamento das lamelas de perlita. Em altas taxas de resfriamento, forma mais perlita, e as lamelas são mais finas e os espaçamentos são mais estreitos. Tanto o aumento da quantidade de perlita como a maior finura da perlita resultam em aumento da resistência e aumento da dureza ⁽⁵³⁾.

A normalização pode transformar uma microestrutura grosseira e heterogênea de um como laminado a quente para uma microestrutura fina e mais homogênea.

O mecanismo mais importante da normalização é o refinamento de grão, pois pode aumentar a resistência e tenacidade simultaneamente.

Os mecanismos de endurecimento atuantes nos aços normalizados são endurecimento por solução sólida, endurecimento perlítico, endurecimento por tamanho de grão ferrítico e endurecimento por precipitação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo estudado foi a laminação de normalização de aço carbono manganês microligado ao nióbio e titânio de chapas grossas de espessura de 12,70 a 50,80mm para aplicação estrutural. Inicialmente, não foi considerada no estudo, a produção de chapas grossas de espessura entre 6 e 12 mm pelo processo de laminação de normalização, devido à dificuldade em garantir o atendimento da temperatura de acabamento que deve ser similar à temperatura utilizada no tratamento térmico de normalização. Durante a laminação dessas chapas de menores espessuras, vários passes de redução são necessários para as placas de 210 ou 260 mm atingirem a espessura final especificada, demandando mais tempo e conseqüentemente maior perda de temperatura.

Chapas grossas, acima de 50,80 mm de espessura, também não foram consideradas nesse estudo. Neste caso, a perda de produtividade no laminador é o ponto crítico, já que exige um aumento do tempo de espera.

4.1. MATERIAL

4.1.1. Especificação Seleccionada

Nesse estudo, o material selecionado foi laminado a quente visando atender

aos requisitos exigidos pela especificação EN10025-2 S355J2 para a condição de fornecimento +N através da laminação de normalização. Os requisitos químicos e mecânicos exigidos por essa especificação são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Requisitos de composição química segundo a especificação EN10025-2 S355J2+N ⁽¹⁾.

Grau da Especificação (1):		S355J2
Elemento Químico		Valor
C máx.	$e \leq 30,00 \text{ mm}$	0,20%
	$30,00 < e \leq 150,00 \text{ mm}$	0,22%
Mn máx.		1,60%
P máx.		0,03%
S máx.(2)		0,03%
Si máx.		0,55%
Cu máx. (3)		0,55%
Al Solúvel ou (Total) mín.		0,015% (0,020%)
N máx. (4)		-
Ceq. máx. (5)	$e \leq 30,00 \text{ mm}$	0,45%
	$30,00 < e \leq 150,00 \text{ mm}$	0,47%

Onde:

e = espessura nominal da chapa.

Ceq= carbono equivalente.

(1) Deverá ser acrescido "+AR" quando fornecido como laminado (as rolled) e "+N" quando fornecido como laminação de normalização ("normalizing rolling") ou normalizado ("normalized").

(2) O enxofre pode ser aumentado em 0,015%, se por acordo o tratamento do aço sofrer modificado por morfologia de sulfeto e a composição química tiver $\text{Ca} \geq 0,0020\%$.

(3) Quando for adicionado Cu e o valor estiver entre 0,25% e 0,40%, o valor do Ceq., pode ser aumentado em 0,02%.

(4) O teor máximo de N não se aplica quando Al total $\geq 0,020\%$ ou Al solúvel $\geq 0,015\%$.

(5) Fórmula Ceq, conforme IIW: $C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15$.

Apesar da especificação não exigir a adição de nióbio e titânio, esses elementos são adicionados no projeto de liga em questão visando atender os requisitos mecânicos exigidos pela mesma.

Tabela 8 - Requisitos de propriedades mecânicas para a especificação EN10025-2 S355J2+N ⁽¹⁾.

Propriedade Mecânica		Valor
LE mín (DT)	$e \leq 16,00 \text{ mm}$	355 MPa
	$16,00 < e \leq 40,00 \text{ mm}$	345 MPa
	$40,00 < e \leq 63,00 \text{ mm}$	335 MPa
	$63,00 < e \leq 80,00 \text{ mm}$	325 MPa
	$80,00 < e \leq 100,00 \text{ mm}$	315 MPa
	$100,00 < e \leq 150,00 \text{ mm}$	295 MPa
LR	$e < 3,00 \text{ mm}$	510 / 680 MPa
	$3,00 \leq e \leq 100,00 \text{ mm}$	470 / 630 MPa
	$100,00 < e \leq 150,00 \text{ mm}$	450 / 600 MPa
Alongamento Mínimo (%)	$e \leq 1,00 \text{ mm}$	12%
	$1,00 < e \leq 1,50 \text{ mm}$	13%
	$1,50 < e \leq 2,00 \text{ mm}$	14%
	$2,00 < e \leq 2,50 \text{ mm}$	15%
	$2,50 < e < 3,00 \text{ mm}$	16%
	$3,00 \leq e \leq 40,00 \text{ mm}$	20%
	$40,00 < e \leq 63,00 \text{ mm}$	19%
	$63,00 < e \leq 150,00 \text{ mm}$	18%
Impacto Entalhe (V)	Temperatura °C	-20°C
Longitudinal	CP 10,0 x 10,0 mm	27J
Joule min. (esp $\geq 6,00 \text{ mm}$)		

Onde:

LE= limite de escoamento.

LR= limite de resistência.

DT= orientação do corpo de prova - direção transversal à direção de laminação.

Lo= base de medida do corpo de prova – referência para a avaliação do alongamento (%).

e= espessura nominal da chapa.

So= área da seção útil.

O motivo principal da escolha dessa especificação, EN10025-2 S355J2+N foi o fato de a mesma permitir o fornecimento das chapas grossas pelo processo de

laminação de normalização ou normalização convencional. Outras especificações também permitem essa substituição, no entanto, como comentado na introdução deste trabalho, esta representava grande parcela dos pedidos em carteira. Além do evidente benefício em termos de custo mais baixo, a laminação de normalização permite uma flexibilização de produção deste tipo de produto, liberando o forno de tratamento térmico para a produção de chapas de maior valor agregado como os temperados e revenidos.

Para essa especificação, a laminação de normalização é uma escolha do fabricante da chapa, se não for solicitada normalização no forno no pedido. A opção de fornecimento adotada deve ser informada no certificado de qualidade e na identificação das chapas através da inclusão da sigla "+N" ⁽¹⁾.

Nesse estudo, os efeitos dos parâmetros de processo de laminação de normalização foram avaliados objetivando atender os requisitos químicos e mecânicos apresentados nas Tabelas 7 e 8.

4.1.2. Projeto de Liga

Uma característica importante dos aços microligados é a vasta gama de microestrutura, que pode ser obtida pela variação da composição do aço e laminação controlada ⁽⁵⁷⁾. No aço em questão é adicionado titânio em quantidade relativamente baixa. É certo que uma quantidade pequena de titânio, em conjunto com a laminação de normalização, ajuda a atingir uniformemente boas propriedades no produto laminado em consequência do efeito do refino de grão ⁽¹⁹⁾. O titânio é

fortemente empregado na laminação de normalização desde que seja utilizado para refinamento de grão e não como endurecimento por precipitação ⁽¹⁹⁾. O modo mais eficiente de manter um tamanho de grão fino inicial no reaquecimento e ao mesmo tempo controlado tamanho de grão durante a laminação a quente é através da dispersão de nitretos de titânio. O nióbio pode complementar o titânio como elemento microligante. Entretanto, carbonitreto ou carboneto de nióbio tem uma relativamente baixa solubilidade e deve precipitar nos últimos estágios da laminação ⁽⁵⁸⁾.

O aço utilizado nesse estudo foi um aço alta resistência e baixa liga (ARBL), C-Mn microligado ao nióbio e titânio. A composição química objetivada nas corridas avaliadas é apresentada na Tabela 9. As análises químicas foram realizadas pela técnica de emissão óptica, segundo norma ASTM E 415 ⁽⁵⁹⁾.

Tabela 9 - Composição química objetivada das corridas do aço C-Mn microligado ao Nb e Ti aplicado para a especificação EN10025-2 S355 J2+N (% em peso).

C	Mn	Si	Nb	N	Ti
0,16	1,40	0,35	0,030	0,0062	0,015

Esse projeto de liga é o mesmo utilizado para atender a especificação EN10025-2 S355J2+N, por meio de tratamento térmico de normalização em forno. A opção de manter a mesma liga permitiu a avaliação das propriedades mecânicas de chapas produzidas através do processo de laminação de normalização e comparar com as normalizadas no forno de tratamento térmico.

A COSIPA poderia desenvolver um novo projeto de liga que se adaptasse melhor às características do processo de laminação de normalização, no entanto, a utilização do mesmo projeto de liga para produzir chapas normalizadas tanto no forno de tratamento térmico como no laminador também permitiu avaliar a

viabilidade de atender à condição da especificação em questão em que as chapas produzidas por laminação de normalização devem continuar atendendo aos requisitos caso sofram normalização em forno ⁽¹⁾.

Outro fator importante, que envolve custo, caso algum parâmetro do processo de laminação de normalização não seja cumprido, as exigências das especificações podem não ser atendidas, portanto a chapa é reprovada. No caso da utilização do mesmo projeto de liga, a chapa, nesse caso, é recuperada através do processo de normalização no forno de tratamento térmico, evitando uma desclassificação do material. Com base no histórico de desempenho desse projeto de liga na condição de normalizado em forno, assumiu-se que esse requisito das especificações seria atendido.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Visando comparar as propriedades mecânicas das chapas obtidas pelo processo de laminação de normalização com as chapas de mesmo projeto de liga normalizadas no forno de tratamento térmico, amostras foram retiradas das chapas para a realização de ensaios de tração e impacto Charpy, cujos ensaios são exigidos pela especificação EN10025-2 S355J2+N.

Como outro objetivo do estudo é verificar a sensibilidade das propriedades mecânicas das chapas obtidas pelo processo de laminação de normalização a um tratamento térmico de normalização adicional, as chapas produzidas por meio da laminação de normalização, amostradas após essa etapa, foram submetidas à

normalização no forno de tratamento térmico. Após a normalização das chapas, as mesmas foram novamente amostradas. Assim, possibilitou verificar possíveis alterações nas propriedades mecânicas das chapas de laminação de normalização submetidas à normalização convencional.

4.2.1. Laminação a Quente em Escala Industrial no Laminador de Chapas Grossas

Para o reaquecimento das placas, as temperaturas das zonas dos fornos são estabelecidas em função do ritmo de laminação, espessura de placa e temperatura especificada de início de laminação. Para esse estudo, foi especificado que as placas deveriam apresentar no início do primeiro passe da laminação temperatura entre 1080° e 1140 °C. Para tanto, o encharque foi aproximadamente a 1250°C e o tempo de permanência mínimo foi de 210 minutos, para permitir a dissolução dos elementos de microliga.

Utilizando as equações de (1) a (7) para o projeto de liga desse estudo, obteve-se pela análise estatística dos dados, a temperatura de solubilização de Nb(CN) e TiN média de aproximadamente 1189°C e 1486°C, respectivamente, conforme resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos cálculos das temperaturas de solubilização de Nb(CN), e TiN em austenita do aço C-Mn microligado ao nióbio e titânio desse estudo.

Composto	Equação	T _{sol} (°C)
Nb(CN)	(1)	1178
Nb(CN)	(2)	1252
Nb(CN)	(3)	1137
TiN	(4)	1332
TiN	(5)	1407
TiN	(6)	1640
TiN	(7)	1565

Considerando a temperatura de solubilização calculada do Nb(CN) e sabendo que a temperatura de encharque utilizada foi de 1250°C, pode-se considerar que todo o nióbio estava em solução. Assim, a precipitação ocorreu durante a laminação nos contornos de grão ^(23, 29). Assim, inibindo o crescimento de grão entre os passes. A temperatura de solubilização calculada do TiN é maior do que a temperatura de encharque empregada. Os nitretos de titânio distribuídos na matriz austenítica inibem o crescimento de grão. O TiN apresenta alta estabilidade e baixa solubilidade, sendo considerado bastante eficaz na inibição ao crescimento de grão ⁽⁴¹⁾.

A temperatura de aquecimento não deve ser muito elevada, pois propiciaria o crescimento de grão, a formação de carepa, além do aumento no gasto de combustível. No entanto, a mesma não poderia ser muito baixa, pois exigiria um laminador potente e um maior controle da composição química do material para garantir a solubilização dos microligantes.

Como já citado, a temperatura de acabamento do material no processo de laminação de normalização deve ser similar à utilizada durante a fase de austenitização do tratamento térmico de normalização, de forma que ocorra a recristalização da austenita entre os passes. Portanto, a temperatura de não

recristalização (T_{nr}) não pode ser muito elevada para não aumentar a temperatura de acabamento objetivada e reduzir o campo de temperaturas para efetuar a laminação do material.

A temperatura de não recristalização (T_{nr}) calculada para o projeto de liga utilizado nesse estudo foi de 930°C , utilizando a equação (8) de Boratto et al ⁽²⁹⁾. Isto implica que a temperatura dos últimos passes de laminação não deveria ser muito abaixo desta temperatura, para evitar uma recristalização heterogênea com efeito negativo sobre a tenacidade das chapas.

A laminação de normalização é o processo de laminação na qual a temperatura final de laminação é controlada numa certa faixa de temperatura acima da A_{r3} ⁽⁴⁾, com objetivo que a microestrutura da chapa ao final da laminação esteja totalmente austenítica, semelhante ao que ocorre no processo de tratamento térmico convencional de normalização. A temperatura A_{r3} calculada para o projeto de liga em questão é de 763°C , segundo Andrews ⁽⁴⁸⁾, equação 9.

A temperatura de acabamento considerada industrialmente é medida na superfície da chapa, que é bem mais fria que no núcleo. Além disso, os graus de redução mais fortes visando provocar a recristalização estática plena antes do próximo passe, não são efetuados nos últimos passes, para atender os requisitos de forma da chapa. Portanto, no estudo, foi especificada a temperatura de acabamento objetivada de 900°C , com tolerância de mais ou menos 30°C . Ao considerar que o núcleo estará mais quente que a medida na superfície e que os três últimos passes são para acerto de forma (baixa redução), a temperatura de acabamento efetiva seria acima da temperatura de não recristalização calculada para esse projeto de liga.

A laminação de normalização deve ocorrer em duas etapas, com um tempo

de espera. Na fase inicial da laminação, quebra da estrutura bruta de fusão para produzir grãos austeníticos equiaxiais. Durante essa espera, pode iniciar a primeira fase de laminação de outra placa, chamada de "laminação em tandem". A laminação deve ser interrompida para o período de espera quando a placa estiver com espessura de aproximadamente três vezes a espessura nominal da chapa e reservar a redução para permitir a recristalização da austenita em temperaturas próximas à utilizada na normalização em forno. A Figura 15 apresenta um esquema resumido das condições de processo objetivadas para laminação de normalização.

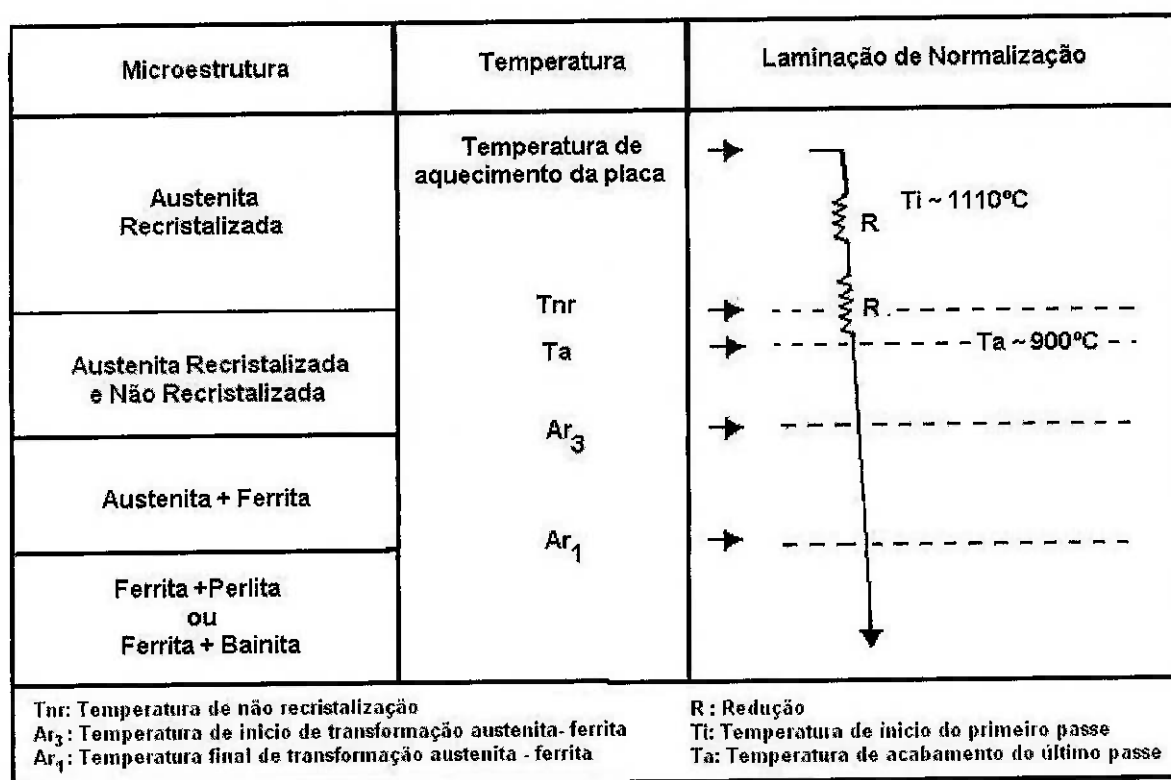


Figura 15. Esquema resumido das condições de processo objetivadas para a laminação de normalização e sua relação com sua microestrutura.

As melhores condições de laminação de acabamento envolvem grandes reduções em temperaturas logo acima da T_{nr} . Na prática industrial, entretanto, os passes finais não podem ser grandes, uma vez que existem exigências de planicidade e tolerância dimensional ⁽⁵⁸⁾. A Figura 16 apresenta a redução média em

cada passe de laminação.

Altas reduções provocam a recristalização estática antes do próximo passe promovendo o refino de grão ⁽²⁶⁾.

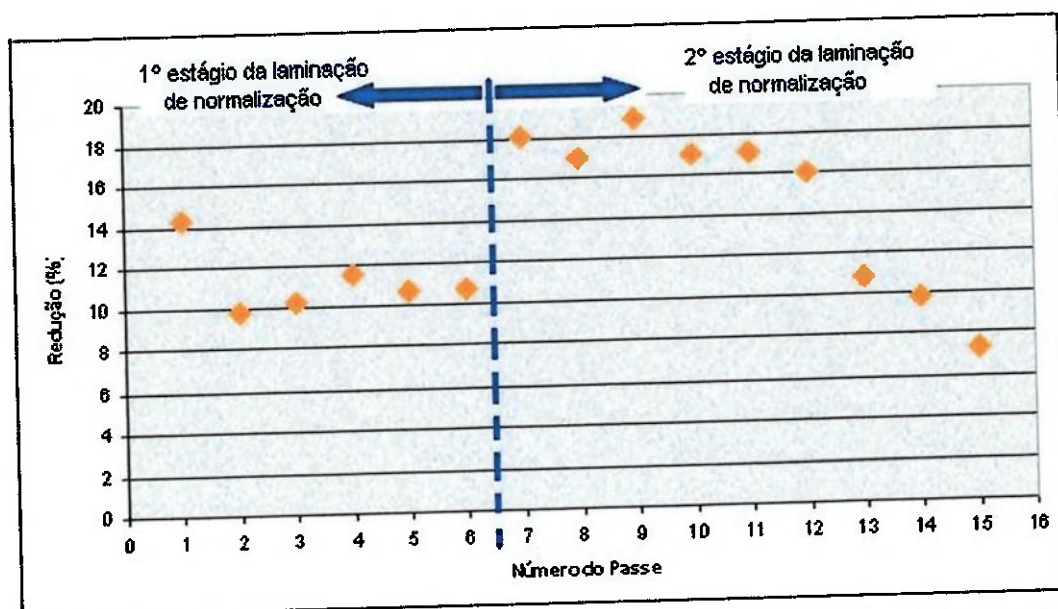


Figura 16. Redução média por passe objetivado nas chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização.

Quando baixas reduções nos passes finais são aplicadas, reduções menores que 0,12% como mostrado na figura 16, visando a um controle de forma da chapa, então, essa condição desfavorável durante esses passes devem ser controladas para que não ocorra a recristalização e o tamanho de grão fino recristalizado formado pelos passes pesados anteriores permanecem até Ar_3 ⁽⁶⁰⁾. Quando diminui as reduções nos últimos passes, pode ocorrer um aumento no tamanho de grão recristalizado, induzindo a formação de grãos grosseiros e heterogêneos ^(26, 58).

Portanto, controles de temperaturas e reduções nos passes finais devem ser aplicados para não ocorrer a recristalização da austenita, de maneira que a austenita fina obtida pelos passes pesados anteriores seja mantida até o final da laminação. Para isso, é necessário utilizar uma liga que iniba a recristalização. De

fato, partículas de nitreto de titânio são utilizadas para reprimir significativamente a recristalização após pequenas deformações e, ao mesmo tempo, têm pouco efeito sobre a cinética da recristalização após pesadas reduções. O esquema da laminação de normalização deve atender ao conflito dos requisitos de microestrutura finas e acerto de forma e tolerâncias dimensionais da chapa final. A principal desvantagem é que o tempo de laminação deve ser aumentado ligeiramente em relação ao material de laminação convencional, pois, geralmente, será necessário para permitir a placa esfriar a uma temperatura na qual o tempo de recristalização é suficientemente longo, mesmo depois de pequenas reduções ⁽²⁶⁾.

4.2.2. Tratamento Térmico de Normalização

Conforme citado anteriormente na revisão bibliográfica, o tratamento térmico de normalização consiste em aquecer a chapa a uma temperatura baixa na região da austenita, mantendo a mesma por um período suficientemente longo para alcançar uniformemente a temperatura e depois realizar o resfriamento ao ar ^(10, 27, 54). Utilizando-se a equação empírica (10) desenvolvida por Andrews, a temperatura Ac_3 do projeto de liga desse estudo é de $845^{\circ}C$ ⁽⁴⁸⁾. A temperatura de tratamento térmico de normalização utilizada não deve ser muito elevada, pois utilizando as faixas de temperatura entre $900^{\circ}C$ e $980^{\circ}C$ é esperado que a tenacidade do material tenda a diminuir à medida que a temperatura aumenta, além da elevada temperatura ser uma oportunidade para o crescimento de grão.

Experiências realizadas confirmam que a melhor tenacidade é obtida quando

a temperatura de normalização é pouco acima da temperatura Ac_3 ⁽³⁾. A temperatura da região da austenita é tipicamente 30° a 100°C acima da Ac_3 ⁽¹⁰⁾. Portanto, as chapas laminadas foram submetidas ao tratamento térmico de normalização a uma temperatura de forno de 910°C, com tolerância de mais ou menos 10°C.

O tempo de aquecimento especificado foi definido conforme padrões internos da COSIPA, que considera a espessura e largura da chapa a ser tratada termicamente. A Tabela 11 apresenta tempos de aquecimento definidos para normalizar as chapas deste estudo. Após cumprir o tempo de permanência especificado no forno de tratamento térmico as chapas foram resfriadas ao ar.

Tabela 11 - Tempo de permanência mínimo no forno de tratamento térmico para a normalização de chapas grossas em função da espessura (largura de 2440 mm).

Espessura (mm)	Tempo (min)
12,80	24
25,40	51
50,80	93

4.2.3. Amostragem

Duas amostras de dimensão de 350 x 350 mm foram retiradas de cada chapa: uma amostra após o processo de laminação de normalização e outra após a normalização no forno de tratamento térmico. As amostras foram retiradas na posição do topo da chapa e a um quarto de largura da mesma, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 17.

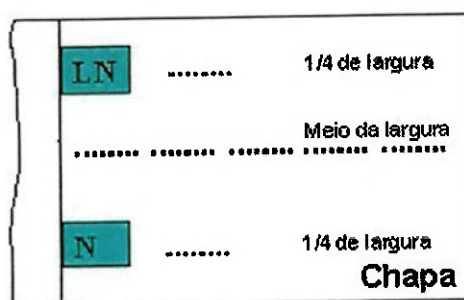


Figura 17. Desenho esquemático mostrando a posição de retirada das amostras das chapas, onde a amostra "LN" foi retirada após laminação de normalização e "N" retirada após normalização no forno.

Segundo a especificação EN10025-2 S355 J2, devem ser retiradas amostras para a realização dos ensaios exigidos pela mesma, na posição do topo do esboço e a um quarto da largura do mesmo ⁽¹⁾. Cada amostra foi dividida em corpos de provas para os ensaios de tração, impacto Charpy e metalografia.

4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE / EQUIPAMENTOS

✓ **Análise Química:**

Composição química / Espectrômetro de emissão óptica ARL 4460;

✓ **Ensaio Mecânicos:**

Ensaio de tração: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento (A), razão elástica (RE) / Máquina de ensaio de tração: capacidade: 100 tf, modelo REH 100 TU, fabricante SHIMADZU.

Ensaio com o uso do extensômetro: a carga é aplicada mantendo a velocidade especificada até que o limite de escoamento seja determinado pelo sistema, retira-se o extensômetro e prossegue o ensaio até a ruptura do corpo de prova.

Número de ensaios de tração por amostra: um corpo de prova ensaiado para cada amostra de chapa;

Ensaio realizado conforme especificação EN10025-1 ⁽⁶¹⁾;

Ensaio de impacto Charpy: energia absorvida (J) / Máquina de ensaio de impacto Charpy: capacidade de 50 Kgm, modelo CH, fabricante SHIMADZU

Os corpos de prova foram resfriados em nitrogênio líquido. Corpo de prova de impacto “Charpy” entalhe em V.

Numero de ensaios de impacto Charpy por amostra: três corpos de prova ensaiados de cada amostra.

Ensaio realizado conforme especificação EN10025-1 ⁽⁶¹⁾;

✓ Metalografia:

Análise microestrutural:

Microscópio óptico CARL ZEISS AXIOPLAN;

Microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JXA 8900R com espectrômetros de energia dispersiva (EDS) e comprimento de onda (WDS) acoplados.

Tamanho de grão ferrítico: conforme especificação ASTM E112 ⁽⁶²⁾;

Métodos: comparação e intersecção.

Intersecção: com apenas um círculo e número de campos igual a 20 (medições realizadas a ¼ da espessura das amostras).

Comparação: a ASTM preparou vários quadros de comparação padronizados, todos contendo diferentes tamanhos médios de grão. O tamanho de

grão foi expresso em termos do número do tamanho de grão no quadro cujos grãos mais se assemelham àqueles na micrografia (medições realizadas próxima a superfície, $\frac{1}{4}$ da espessura, $\frac{3}{4}$ da espessura e próxima a base da amostra).

Fração volumétrica de perlita: conforme especificação ASTM E562 ⁽⁶³⁾; utilizando uma malha de 100 pontos e 20 campos medidos;

Colocou-se uma rede de pontos (grade) sobre a imagem de uma amostra metalográfica e contou-se o número de pontos da grade que estavam sobre o constituinte (medições realizadas a $\frac{1}{4}$ da espessura das amostras).

Preparação das amostras conforme: ASTM E-3 - preparação de amostras metalográficas ⁽⁶⁴⁾ e ASTM E- 407 - microataque de metais e ligas ⁽⁶⁵⁾.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas chapas grossas laminadas pelo processo de laminação de normalização foram satisfatórios, atendendo todos os requisitos exigidos na especificação EN10025-2 S355J2+N.

Uma forma de avaliar se o processo de laminação de normalização foi adequado é submeter o material produzido por esse processo a um tratamento térmico de normalização e verificar se ocorrem alterações nas propriedades mecânicas do material.

As chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização foram submetidas ao tratamento térmico de normalização e suas propriedades mecânicas comparadas, conforme Figura 18, 19 e 20.

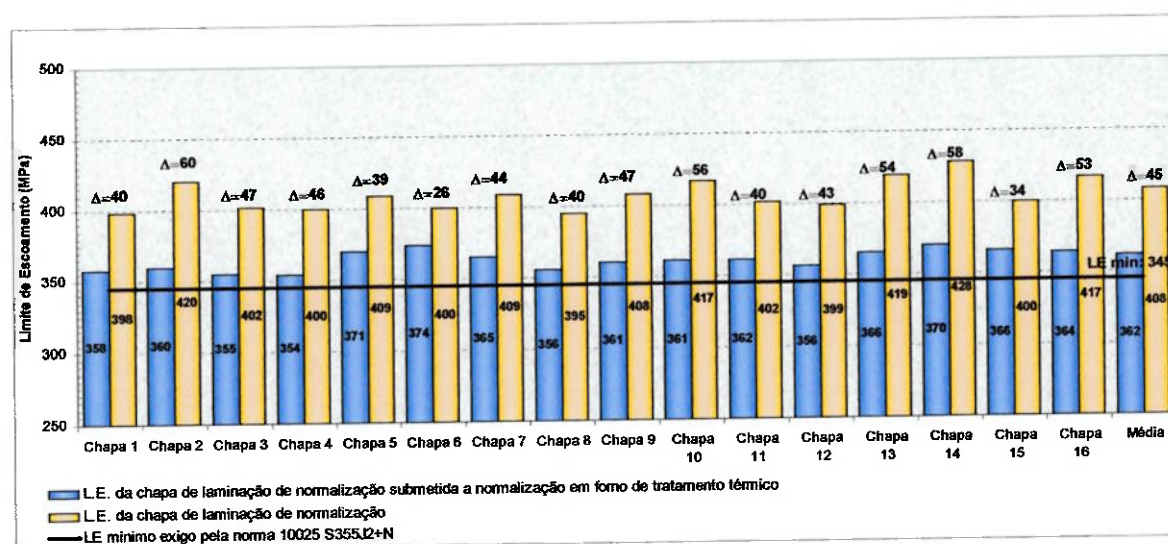


Figura 18. Diferença entre o limite de escoamento de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico.

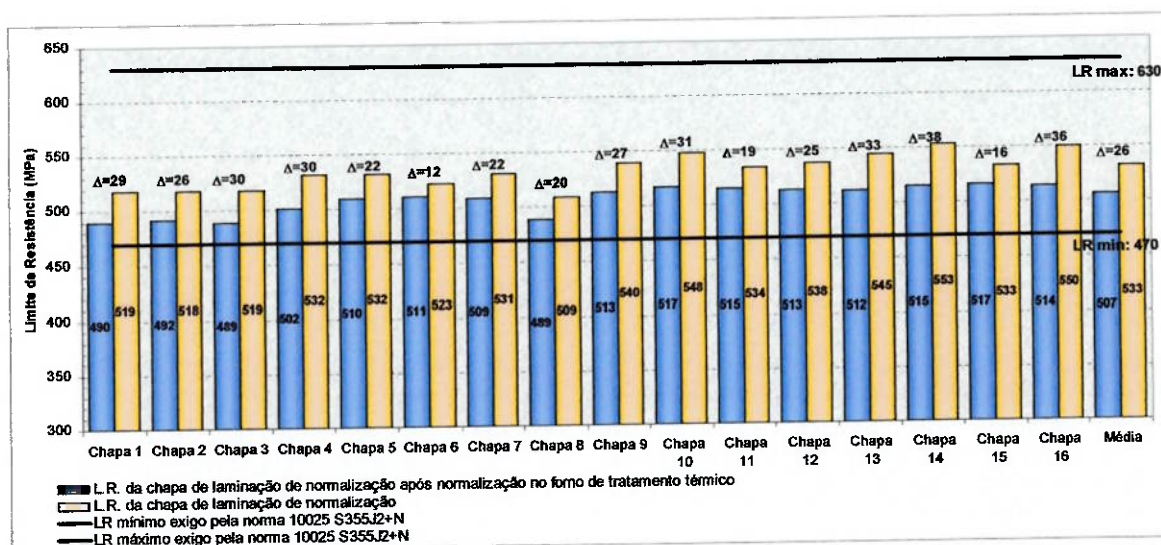


Figura 19. Diferença entre o limite de resistência de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico.

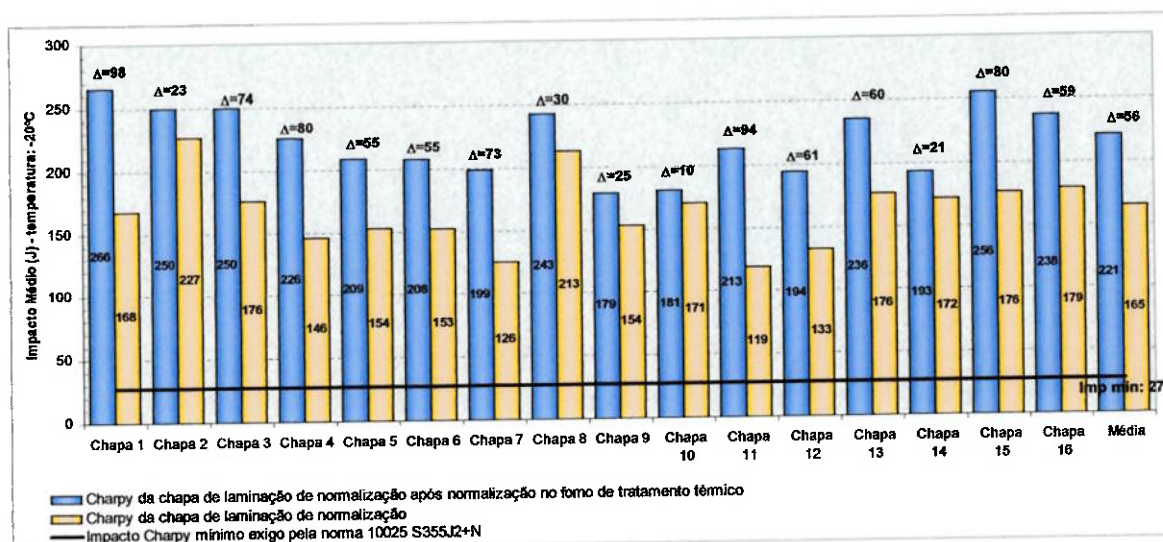


Figura 20. Diferença entre a energia absorvida no impacto Charpy de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico (realizado à -20°C).

Constatou-se na Figura 20 que as propriedades mecânicas obtidas das chapas de laminação de normalização submetidas à normalização no forno continuam atender aos requisitos exigidos pela especificação EN10025-2 S355J2. Essa é uma vantagem dos aços normalizados, os quais podem ser submetidos a um tratamento térmico a qualquer momento sem danificar as propriedades do material.

Segundo as especificações alemãs, a resistência do aço quando o limite de

escoamento mínimo especificado é maior ou igual a 355 MPa, que é o caso desse estudo, muda no máximo 60 MPa quando a chapa de laminação de normalização é submetida a uma normalização ⁽²²⁾.

Conforme observado nas Figuras 18 e 19 as chapas laminadas pelo processo de laminação de normalização quando submetidas a um tratamento térmico de normalização tiveram uma diminuição no limite de escoamento e no limite de resistência, em média, de 45 MPa e 26 MPa respectivamente. Portanto, os resultados do estudo atenderam a essa exigência do processo de laminação de normalização.

Ao contrário do que ocorreu com a resistência das chapas, a tenacidade das mesmas, ao serem normalizadas, aumentaram. A energia absorvida no ensaio de impacto Charpy aumentou, em média, 56J. De fato, os resultados do ensaio de impacto Charpy, apresentados na Figura 21, comparando os valores de energia absorvida dos materiais de laminação de normalização e após serem submetidos ao processo de normalização convencional, mostram que em todas as temperaturas em que o ensaio foi realizado, os valores obtidos dos materiais normalizados são maiores ao dos materiais no estado de laminado.

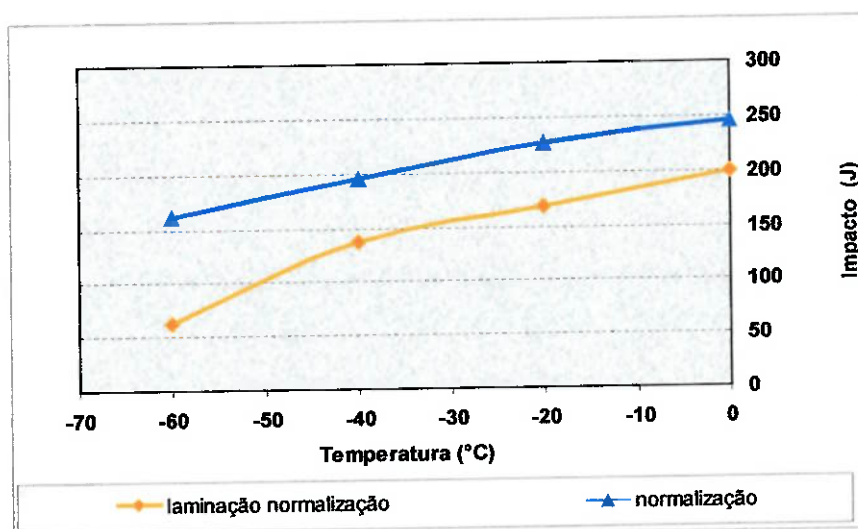


Figura 21. Curvas de transição do material de laminação de normalização e submetido à normalização no forno de tratamento térmico.

Verificou-se uma diferença entre os resultados dos ensaios mecânicos das chapas de laminação de normalização e das chapas normalizadas no forno de tratamento térmico, apesar de ambos atenderem à especificação. O mesmo ocorre ao analisar a microestrutura das chapas.

Na análise metalográfica apresentada na Figura 22 verificou-se que a normalização refinou o grão ferrítico e o tamanho da colônia de perlita, mas não elimina a presença do bandejamento, conforme já previsto na literatura ⁽¹⁰⁾. Na amostra de chapa de laminação de normalização, nos grãos verificou-se uma maior heterogeneidade. Na austenitização no forno, a homogeneização é melhor, pois este processo é uma oportunidade adicional para difusão do carbono e, conseqüentemente, tem potencial para reduzir seu bandejamento.

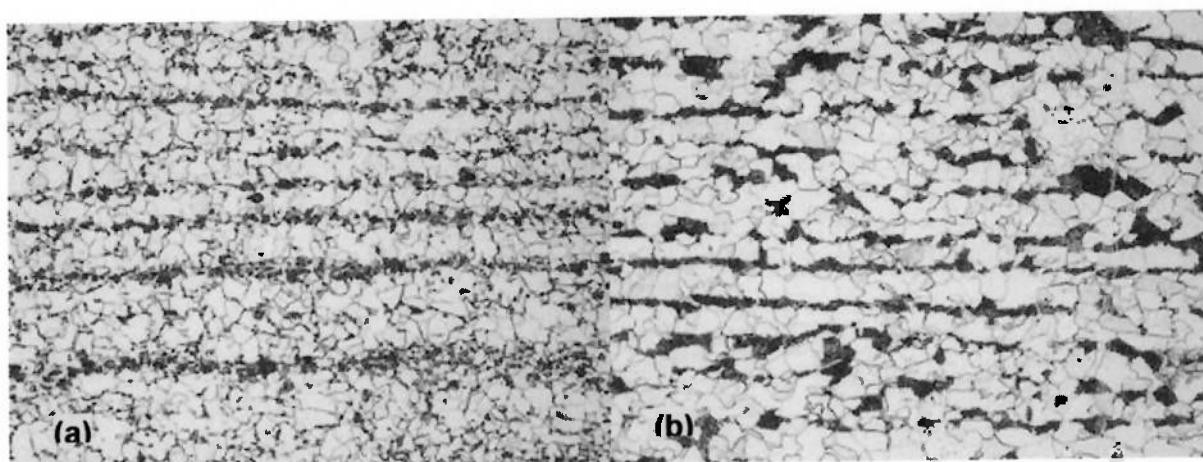


Figura 22: Microestrutura típica observada em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno. Um quarto da espessura da seção longitudinal, polida e ataque Nital 4% - imagem no microscópio óptico (200x).

Na análise microestrutural da amostra de laminação de normalização verificou-se que a microestrutura não era tão homogênea quanto a amostra de normalização, sugerindo que a recristalização foi incompleta. Esta característica decorre da falta de controle do grau de recristalização que ocorre entre passes. A recristalização incompleta gera microestruturas com tamanhos de grãos

heterogêneos. A falta de uniformidade no tamanho de grão do material pode prejudicar a tenacidade do produto final ⁽⁶⁶⁾.

Mesmo no material normalizado, a homogeneização não seria perfeita se ocorresse uma flutuação na temperatura do forno durante a austenitização, com transformações de parciais e cíclicas de decomposição da austenita e re-austenitização. A Figura 23 apresenta uma foto da microestrutura das chapas de laminação de normalização e normalização em forno a um quarto da espessura da chapa.

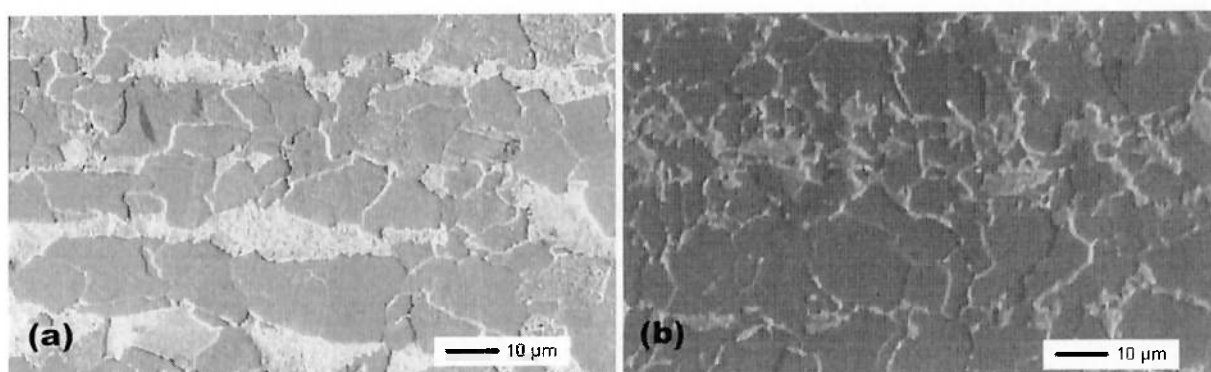


Figura 23 Microestrutura típica observada em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno Um quarto da espessura da seção longitudinal, polida e ataque Nital 4% - imagem de elétrons secundários / microsonda eletrônica.

Outro fator que acarreta uma maior homogeneidade no material normalizado em forno em comparação com o processo de laminação de normalização é a dificuldade em laminar passes pesados durante todo o processo. Como já discutido, a necessidade em atender aos requisitos de forma e dimensional exige que os passes finais sejam mais leves. A deformação alta, durante a laminação, provoca a recristalização estática antes do próximo passe, promovendo o refino de grão e grãos homogêneos. No entanto, os passes leves poderão induzir o crescimento de grão ^(26, 58).

Além disso, o processo de laminação em temperaturas decrescentes acarreta

um perfil característico de temperatura ao longo da espessura da placa. Assim, no núcleo da placa a temperatura é superior à de sua superfície ⁽²⁴⁾.

As colônias de perlita observadas em chapas de laminação de normalização são maiores que as em chapas normalizadas no forno de tratamento térmico, conforme Figura 24. Isto é consistente com a maior taxa de resfriamento imposta pelo processo de laminação, que inibe a transformação ferrítica, elevando a fração volumétrica de perlita deste tipo de liga.

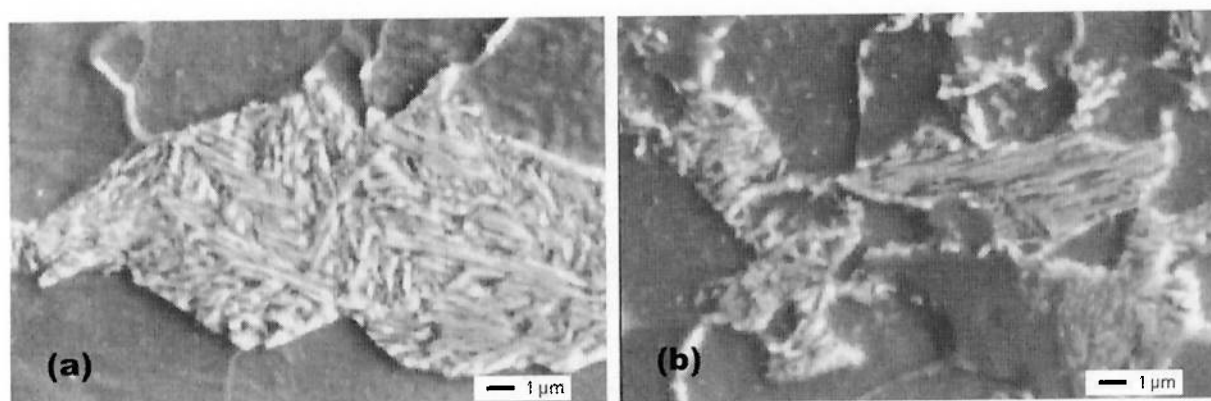


Figura 24. Detalhes da colônia de perlita observadas em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno. Um quarto da espessura da seção longitudinal, polida e ataque Nital 4% - imagem de elétrons secundários / microsonda eletrônica.

Quando o resfriamento é mais rápido, a razão entre ferrita e perlita não é a mesma obtida em um ciclo de resfriamento lento, que se aproxima da transformação em equilíbrio. A quantidade de ferrita no processo irreversível é usualmente menor e, conseqüentemente, a perlita comparece em maior proporção ⁽⁶⁷⁾.

Se apressar o resfriamento verificará que: a quantidade de ferrita diminui com o aumento da velocidade de resfriamento, até que, acima de um certo limite, se anula, de modo que o aço atinge a linha inferior da zona crítica Ar_1 , ainda inteiramente austenítico; que a austenita abaixo da Ar_1 se transforma em perlita de lamelas cada vez mais finas e mais próximas, quanto mais rápido for o resfriamento,

chegando ao ponto das lamelas se tornarem indiscerníveis ao microscópio comum, que para velocidades de esfriamento ainda maiores, não ocorre transformação em perlita e em temperaturas mais baixas formam bainita ou martensita ⁽⁶⁸⁾. A Figura 25 mostra curvas de resfriamento sobreposta por um diagrama de transformação em resfriamento contínuo para uma liga de ferro- carbono eutetóide ⁽⁶⁹⁾.

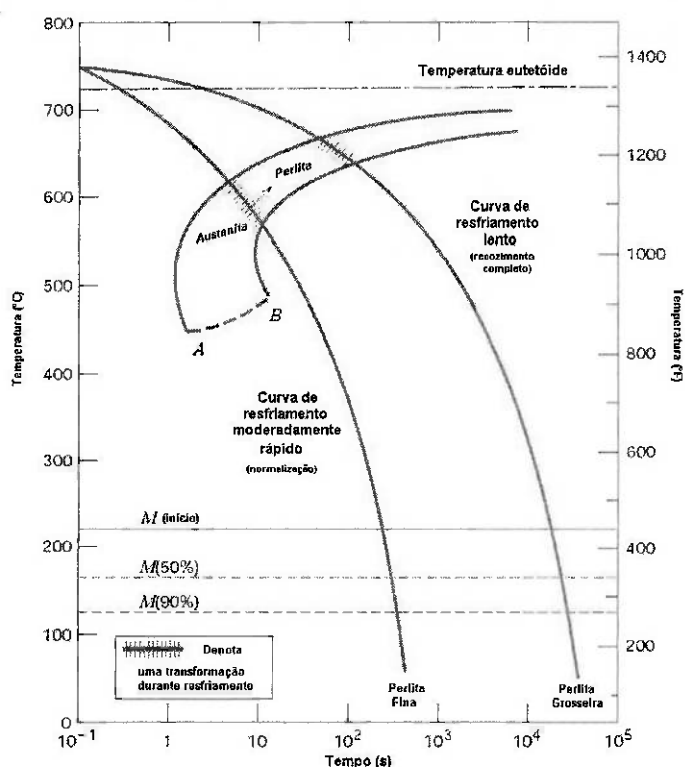


Figura 25. Curvas de resfriamento sobreposta por um diagrama de transformação em resfriamento contínuo para uma liga de ferro- carbono eutetóide ⁽⁶⁹⁾.

O aumento da fração volumétrica de perlita pode ser um dos motivos para a tenacidade ser menor e a resistência maior na chapa de laminação de normalização em comparação à chapa normalizada no forno.

A Figura 26 mostra a microestrutura das chapas próxima à superfície, bainítica na amostra produzida por laminação e ferrítica-bainítica para a produzida por normalização em forno.

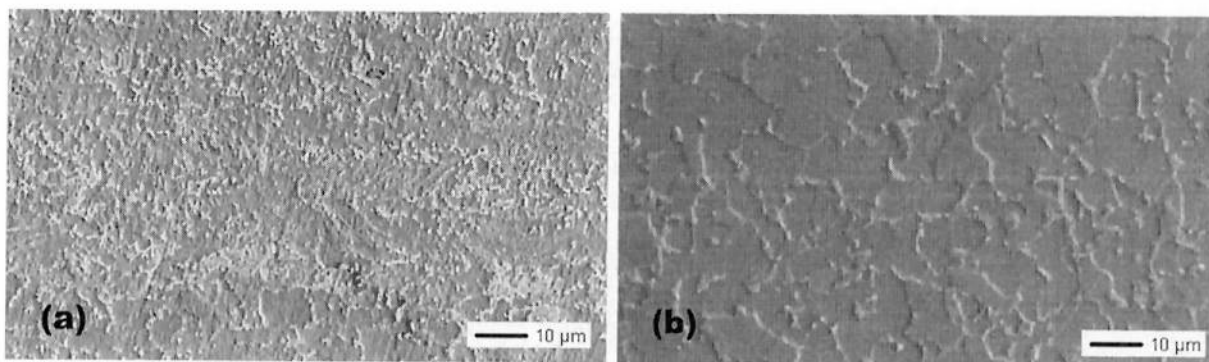


Figura 26. Microestrutura típica observada em (a) amostra da chapa de laminação de normalização e (b) amostra da chapa após normalização no forno. Próximo à superfície da chapa, polida e ataque Nital 4% - imagem de elétrons secundários / microsonda eletrônica.

Esta primeira já era esperada, pois corresponde à região que sofre a maior taxa de resfriamento, típico dos processos de laminação a quente. Na COSIPA, é comum a utilização da descamação (jatos de água de alta pressão) para a retirada da carepa que se forma na superfície da placa, conferindo uma qualidade superficial satisfatória ao produto final, além do uso da refrigeração na desempenadeira a quente.

Nestas condições, esta maior taxa de resfriamento, que foi responsável pelo aumento da fração volumétrica de perlita em regiões mais internas da chapa, pela inibição mais intensa da transformação ferrítica, justifica a formação de uma microestrutura bainítica, como observada. Conseqüentemente, isto também contribui para elevar a resistência deste material em relação ao normalizado no forno. O aumento da fração volumétrica de bainita aumenta o limite de escoamento e resistência ⁽¹⁰⁾. Porém, como a profundidade desta camada com microestrutura bainítica foi apenas da ordem de 1 mm, é esperado que seu efeito sobre a resistência seja proporcionalmente baixo.

Na medição de tamanho de grão realizada conforme especificação ASTM E112 ⁽⁶²⁾, pelo método de comparação, verifica-se uma pequena diferença entre os tamanhos de grãos encontrados nas amostras de chapas de laminação de

normalização e normalizados. O tamanho de grão médio da chapa de laminação de normalização medido foi ligeiramente menor que o da chapa normalizada no forno, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Tamanho de grão ferrítico apresentado nas amostras de chapas normalizadas em forno e de laminação de normalização, segundo E112 (método: comparação).

Amostra	Tamanho de grão (Normalização em Forno)				Tamanho de grão (Laminação de Normalização)			
	Superfície	1/4 e	3/4 e	Base	Superfície	1/4 e	3/4 e	Base
1	11,1	10,6	10,6	11,1	11,6	10,6	10,6	11,1
2	11,6	10,1	10,1	11,1	11,1	10,1	10,6	11,1
3	11,1	9,6	9,6	10,6	11,6	10,1	10,6	11,1
4	11,1	9,6	9,6	10,1	11,1	10,6	10,1	10,6
5	11,6	10,1	9,6	10,6	11,1	10,6	10,1	11,1
6	11,1	10,1	9,6	10,6	11,1	10,6	10,6	11,1
7	11,1	10,1	10,6	11,1	11,6	10,6	10,6	11,1
8	11,6	9,6	10,1	11,6	10,6	10,6	10,6	10,6
9	10,6	9,6	10,1	11,1	11,6	10,6	10,6	11,1
10	11,1	10,1	9,6	10,6	11,6	10,6	10,6	11,6
11	11,1	9,6	9,6	10,6	11,1	10,1	10,1	10,6
12	11,6	10,6	10,6	11,1	11,1	10,6	10,6	11,1
13	11,6	10,1	10,1	11,1	10,6	10,1	10,1	10,6
14	11,1	10,1	10,1	11,1	10,6	10,1	10,1	10,6
15	10,6	9,6	10,1	10,1	11,1	10,6	10,1	10,6
16	11,1	10,1	10,1	10,6	11,1	10,6	10,6	11,1
média	11,2	10,0	10,0	10,8	11,2	10,4	10,4	10,9

Onde :Tamanho de grão = ASTM G; e = espessura; superfície = abaixo de 1 mm de espessura em relação a superfície, excluída a faixa onde a microestrutura está bainítica.

No entanto, ao observar as microestruturas no microscópio óptico, em algumas amostras e posições ao longo da espessura, a diferença no tamanho de grão observado não estava compatível com o medido. Assim, foram realizadas novas medições de tamanhos de grãos, segundo ASTM E112 pelo método de intersecção, em uma amostra de chapa de laminação de normalização e na amostra da mesma chapa após ser submetida a normalização no forno. A Tabela 13 mostra os resultados de tamanho de grão encontrados nas amostras.

Tabela 13 - Tamanho de grão ferrítico apresentado nas amostras de chapas normalizadas em forno e de laminação de normalização, segundo E112 (método: intersecção).

Normalizada em forno	Laminação de normalização
$G = 10,47$	$G = 10,54$
Interceptos médios = $8,2 \pm 0,8 \mu\text{m}$	Interceptos médios = $8,3 \pm 0,8 \mu\text{m}$

Onde: medições realizadas a $\frac{1}{4}$ da espessura da chapa

Conforme a Tabela 13, os tamanhos de grãos das duas amostras de chapas são praticamente iguais.

Os resultados de tamanho de grão medidos nas amostras de chapas de laminação de normalização foram considerados apenas como referência, pois nas análises microestruturais observou-se que os grãos apresentavam tamanhos heterogêneos e a norma ASTM E112 mostrou-se não ser a forma mais indicada para realizações de medições de tamanhos de grãos ferríticos nessas condições.

Os resultados de fração volumétrica de perlita, medição realizada conforme ASTM E562 ⁽⁶³⁾, das amostras de chapas de laminação de normalização e normalizada no forno foram de 25,1% com tolerância de mais ou menos 2,2% e 21,9% com tolerância de mais ou menos 1,8%, respectivamente. Portanto, constatou que a amostra de laminação de normalização apresentava uma maior porcentagem de perlita do que a amostra da chapa normalizada no forno. Conforme observado na Figura 13 ⁽¹⁰⁾, quanto maior a quantidade de porcentagem de perlita da chapa, maior será seu limite de escoamento e resistência, sendo maior a influência no limite de resistência da chapa.

É possível estimar a contribuição dos mecanismos de endurecimento na experiência realizada através do cálculo empírico apresentado na equação 13 ⁽¹⁰⁾. A diferença entre os limites de resistência da amostra de chapa de laminação de normalização (LN) e da amostra da chapa normalizada em forno (N) foi de 26 MPa

(LR (LN)= 533MPa e LR (N)= 507MPa). A diferença entre as porcentagens de perlita medidas foi de 3,2%, considerando o fator de 4,3, portanto da diferença no limite de resistência de 26 MPa, 13,76 MPa (53%) é justificado pela diferença na porcentagem de perlita. De fato, na análise metalográfica, a diferença mais visível entre as microestruturas dos dois processos é a fração de perlita.

A baixa solubilidade do Nb(C,N) e TiN em temperaturas típicas utilizadas na normalização de chapas, geralmente, causa um pequeno ou nenhum incremento devido endurecimento por precipitação ^(70, 71). A precipitação mais eficiente em endurecer o aço é a interfásica, aquela que ocorre durante a transformação de fase da austenita para ferrita com a participação de deformação abaixo de A_{r3} . Assumindo que não há outro mecanismo de endurecimento e considerando o tamanho de grão encontrado a um quarto da espessura para o material normalizado, cuja microestrutura apresentava maior homogeneidade, igual a ASTM G 10, isto é, 0,0112 mm. Apesar da medição realizada não ser ideal para o caso onde a microestrutura está heterogênea, foi considerado tamanho de grão de ASTM G 10,4 para material de laminação de normalização, ou seja, 0,00976 mm. Portanto, o endurecimento conseguido a mais pelo processo de laminação de normalização, por possuir menor grão, contribui com 7,94 MPa no limite de resistência.

Assim, a diferença encontrada no limite de resistência entre os dois processos de 26 MPa pode ser explicada pela porcentagem de perlita, que contribuiu com 13,76 MPa (53%), tamanho de grão ferrítico com 7,94 MPa (30,5%) e o restante, 4,3 MPa (16,5%) pode ser justificado pela camada que sofreu resfriamento acelerado e apresenta bainita. Além disso, essa diferença de 4,3 MPa em relação a 533 MPa é apenas 0,8%, o que pode ser considerada desprezível.

Utilizando a mesma equação 13 ⁽¹⁰⁾, ao substituir pela composição química

obtida na amostra em questão, que é a mesma para os dois processos, a fração volumétrica de perlita e o tamanho de grão, o limite de resistência encontrado é de 536 MPa e 552 MPa para o material normalizado e de laminação de normalização, respectivamente. Portanto, o limite de resistência calculado é em média 5% acima do ensaiado.

Após os resultados satisfatórios obtidos no estudo, diversas chapas grossas dessa especificação, EN10025-2 S355J2+N, foram produzidas pelo processo de laminação de normalização. Os resultados industriais dos ensaios mecânicos realizados atendem os requisitos exigidos pela especificação conforme apresentados nas Figuras 27, 28, 29 e 30.

O limite de escoamento mínimo exigido pela especificação EN10025-2 S355J2 varia de acordo com a espessura nominal da chapa grossa, conforme apresentado anteriormente na Tabela 8.

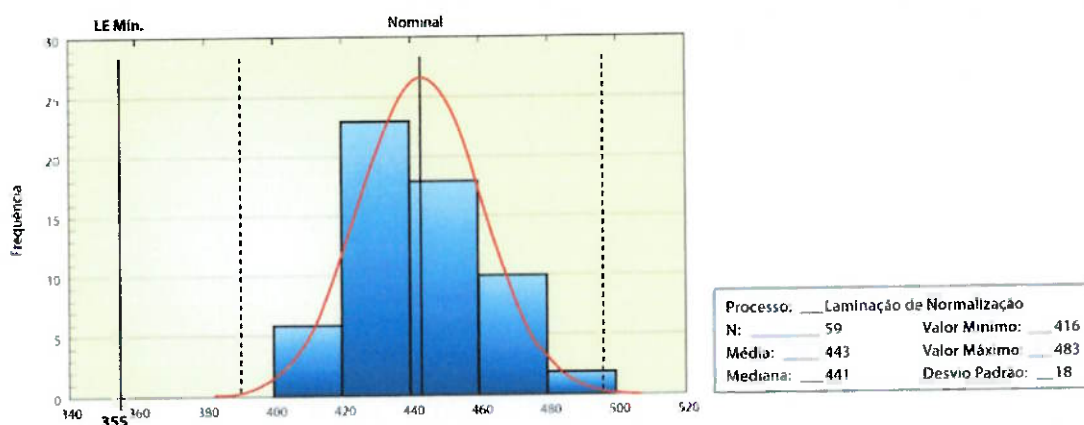


Figura 27. Histograma dos resultados de limite de escoamento das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 16 mm.

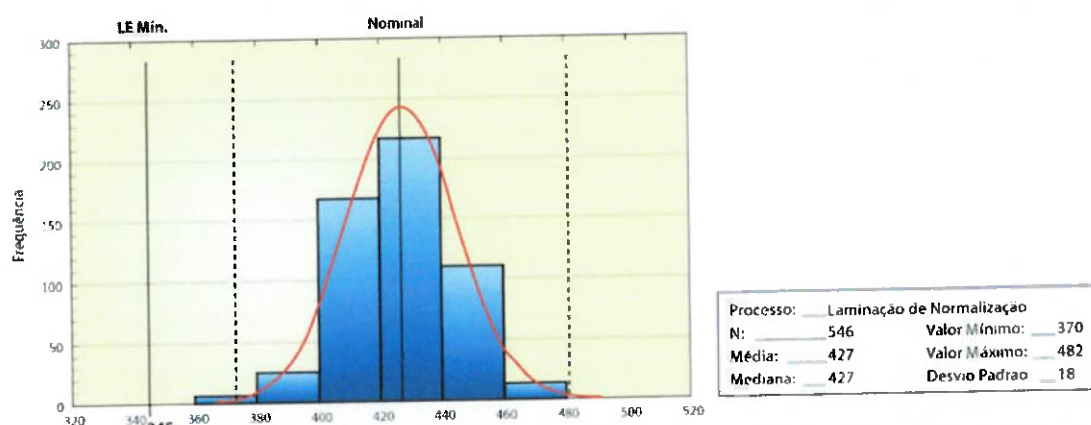


Figura 28. Histograma dos resultados de limite de escoamento das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 16,01 a 40 mm.

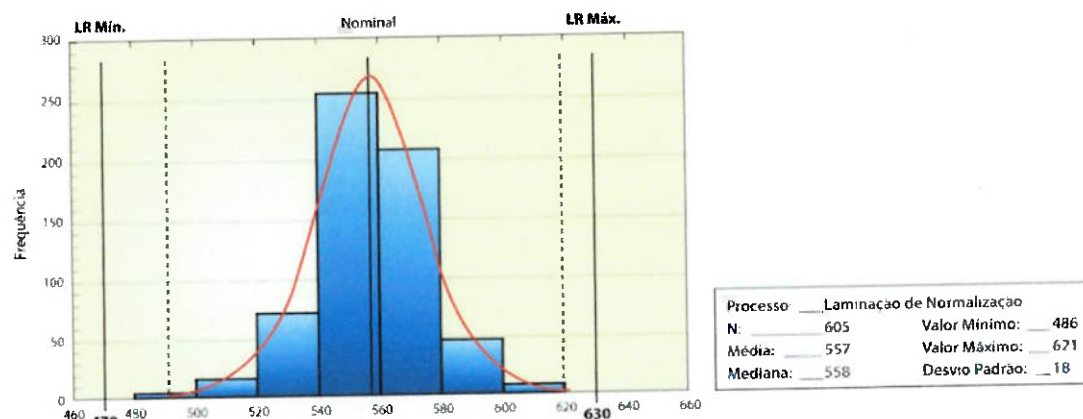


Figura 29. Histograma dos resultados de limite de resistência das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.

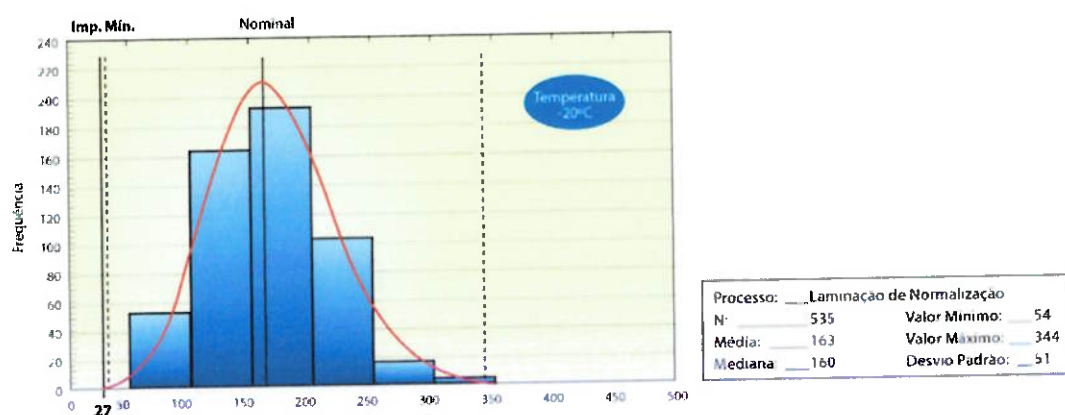


Figura 30. Histograma dos resultados de energia absorvida no impacto Charpy das chapas grossas fornecidas como laminação de normalização pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.

Como citado anteriormente, essa especificação “+N” permite que o fabricante de aços forneça as chapas grossas normalizadas no forno ou na laminação ⁽¹⁾.

A COSIPA produz chapas grossas normalizadas no forno de tratamento térmico para atender a essa especificação desde o desenvolvimento desse produto, utilizando o projeto de liga desse estudo. Apesar desse grau de especificação existir apenas a partir de 2004, o mesmo substituiu o grau de especificação, cuja nomenclatura era “J2G3”, que já eram produzidas desde 1993.

Portanto, o histórico desse material mostra que esse projeto de liga produzido através de normalização em forno de tratamento térmico atende aos requisitos exigidos pela especificação. Os resultados dos ensaios mecânicos das chapas grossas fornecidas pelo processo de normalização no forno são apresentados nas Figuras 31, 32, 33 e 34.

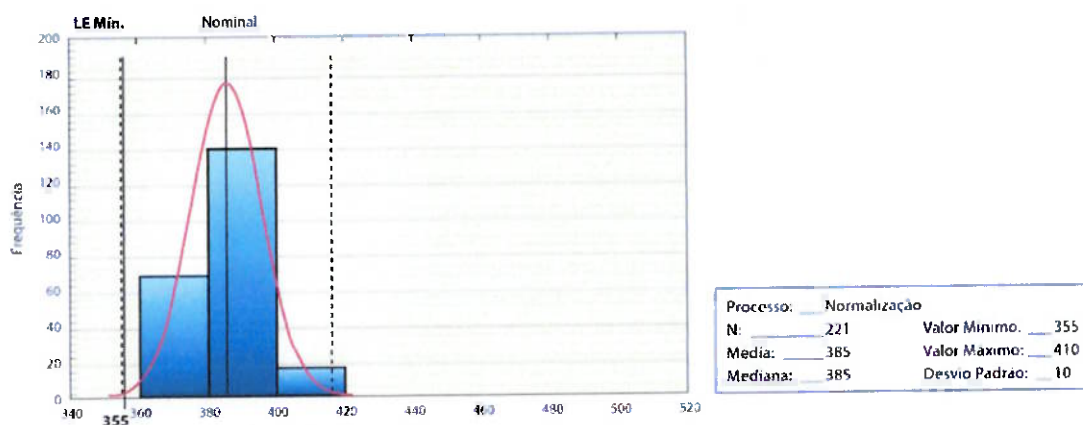


Figura 31. Distribuição estatística do limite de escoamento das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 16 mm.

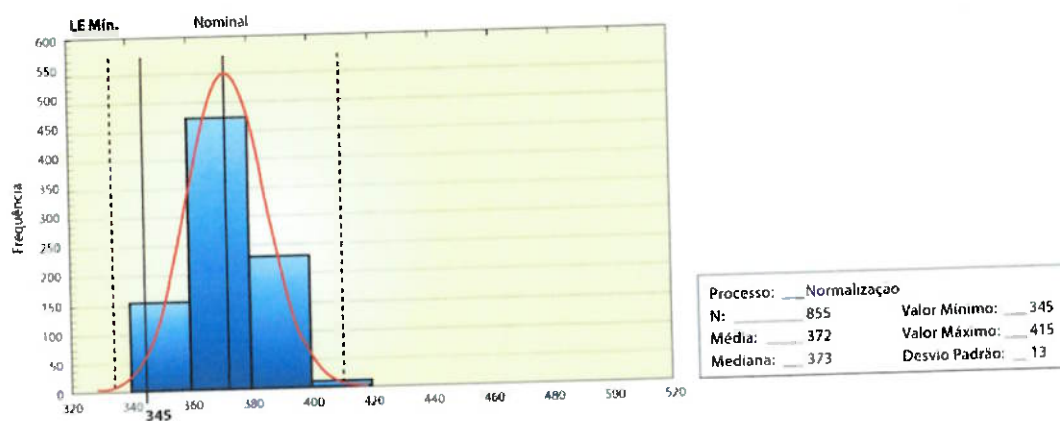


Figura 32. Distribuição estatística do limite de escoamento das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 16,01 a 40 mm.

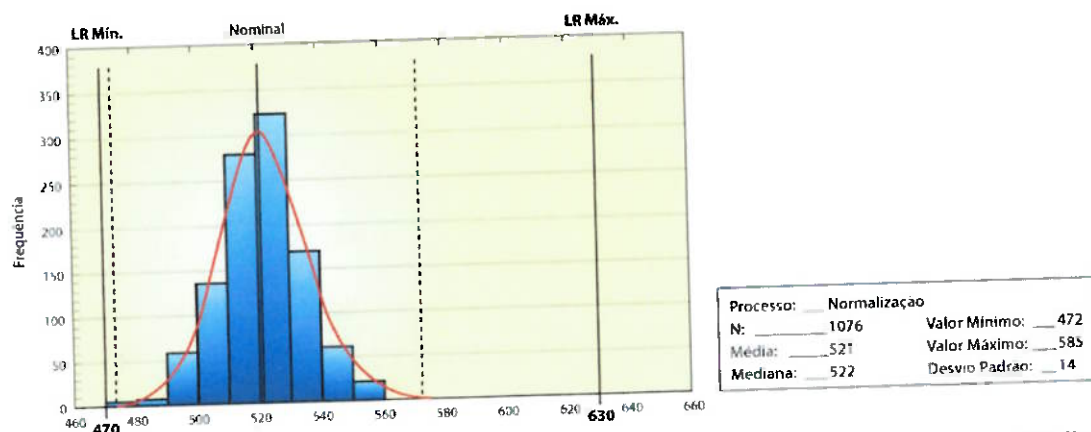


Figura 33. Distribuição estatística do limite de resistência das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.

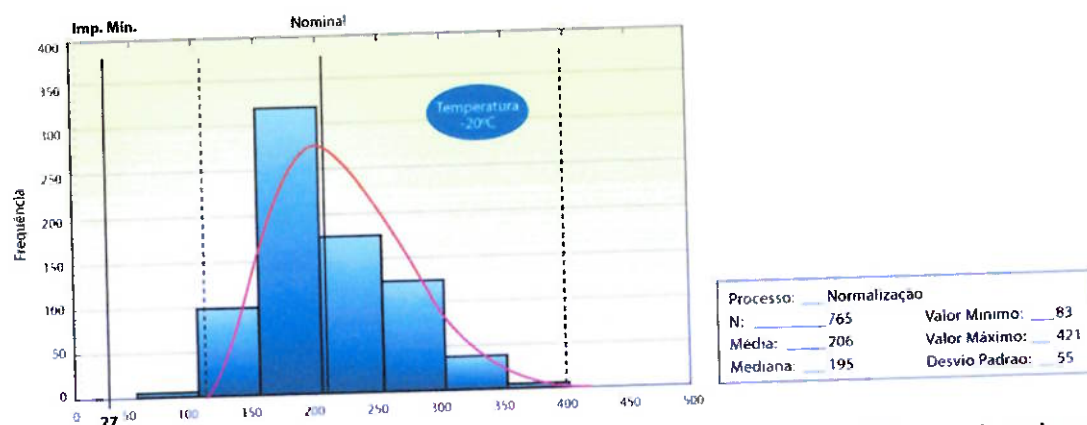


Figura 34. Distribuição estatística da energia absorvida no impacto Charpy das chapas grossas normalizadas no forno pela COSIPA, em 2007, segundo especificação EN10025-2 S355 J2+N, para espessuras de 12,70 a 40 mm.

A dispersão dos valores de limites de escoamento é maior no material de laminação de normalização que nos aços normalizados, a não ser que faça um controle restrito da composição química e dos parâmetros de laminação com estreitos limites ⁽¹⁵⁾. Nesse estudo, a temperatura de acabamento objetivada na laminação de normalização tem uma tolerância de mais ou menos 30°C. Estudos realizados na Usinor concluem que a temperatura de acabamento deve variar apenas mais ou menos 20°C ⁽²¹⁾. Está claro que quanto menor a dispersão, mais homogêneo o material, no entanto, industrialmente, controles excessivos dos parâmetros de processo diminuem a produtividade e dificultam o atendimento de outros requisitos como de forma.

As médias dos limites de escoamento e resistência do material fornecido na condição de laminação de normalização são superiores aos obtidos pelo processo de normalização convencional, independentemente da espessura da chapa grossa. As Figuras 35 e 36 mostram uma comparação entre os resultados médios de limite de escoamento e limite de resistência de chapas grossas normalizadas no forno e no laminador.

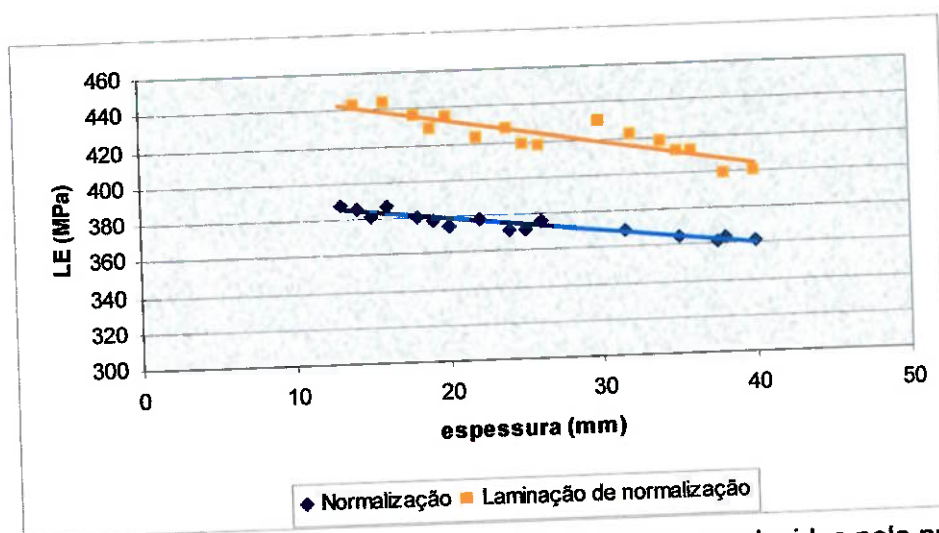


Figura 35. Diferença entre limite de escoamento de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e pelo processo de normalização no forno de tratamento térmico em função da espessura.

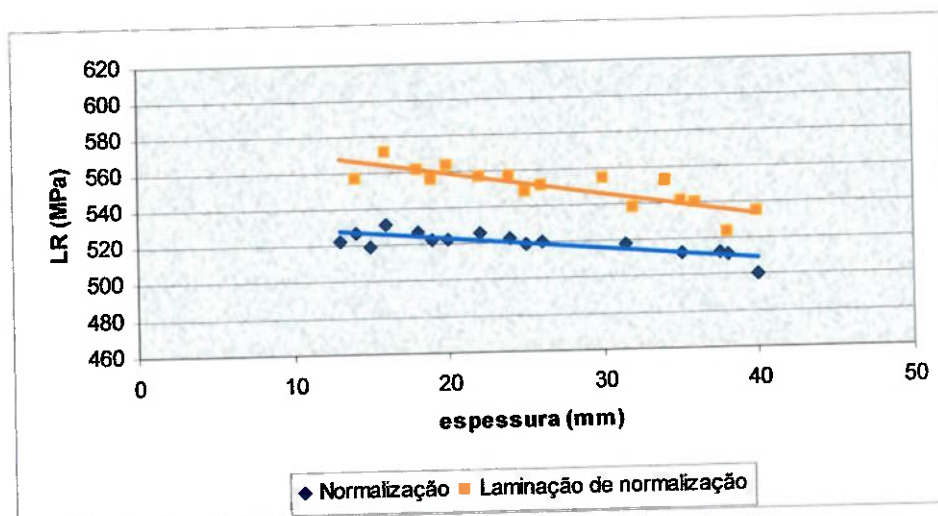


Figura 36. Diferença entre limite de resistência de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e pelo processo de normalização no forno de tratamento térmico em função da espessura.

No caso da tenacidade, as chapas grossas normalizadas no forno de tratamento térmico apresentaram valores de energia absorvida médio no ensaio de impacto Charpy superior às chapas grossas de laminação de normalização. A Figura 37 mostra uma comparação entre os resultados de energia absorvida médio no ensaio de impacto Charpy de chapas grossas normalizadas no forno e no laminador. O refino de grão é o fator determinante na tenacidade do material ⁽⁷²⁾. Além do grão ferrítico fino, a baixa ou nenhuma influência do endurecimento por precipitação de Nb(C,N) e TiN na chapa normalizada, contribui para o aumento da tenacidade ⁽¹⁰⁾.

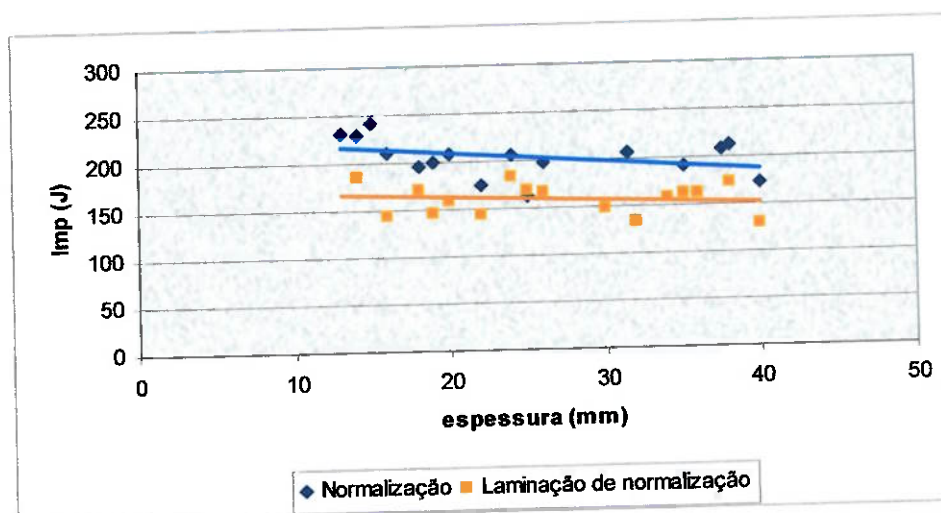


Figura 37. Diferença entre energia absorvida no impacto Charpy de chapas produzidas pelo

processo de laminação de normalização e pelo processo de normalização no forno de tratamento térmico em função da espessura.

Assim, a normalização em forno de tratamento térmico, em comparação ao processo de laminação de normalização, reduz ligeiramente a resistência e aprimora a tenacidade do material, independente de sua espessura.

As propriedades obtidas nas chapas normalizadas no forno de tratamento térmico são muito similares às propriedades das chapas de laminação de normalização e posteriormente normalizadas convencionalmente, conforme apresenta a Tabela 14.

Tabela 14 - Diferença entre os resultados dos ensaios de tração e impacto de chapas normalizadas no forno e produzidas pelo processo de laminação de normalização submetidas à normalização no forno de tratamento térmico.

	Laminação de normalização + normalização no forno	Normalização no forno	Diferença	Diferença (%)
LE médio (MPa)	363	375	12	3,21%
LR médio (MPa)	506	521	16	3%
RE médio	0,72	0,72	0	0%
A médio (%)	32	29	-2	-8%
IMP. Médio 20°C (J)	227	206	-21	-10%

A diferença encontrada nas propriedades mecânicas das chapas de laminação de normalização que foram submetidas à normalização em forno em relação ao material laminado convencionalmente e normalizado em forno, apesar de não significativa, pode ser explicada pelo fato de que até os materiais normalizados

no forno sofrem ligeira perda de resistência mecânica ao serem re-normalizados, em função da alteração da morfologia da perlita presente na microestrutura do material (73).

Alguns cuidados devem ser tomados para que o processo de laminação de normalização seja adequado. Conforme especificação do estudo em questão, EN10025-2 S355J2, laminação de normalização é um processo no qual a deformação final ocorre numa certa faixa de temperatura conduzindo para uma condição do material equivalente ao obtido depois da normalização, então os valores especificados de propriedades mecânicas são atendidos mesmo depois de um processo de normalização ⁽¹⁾.

De fato, nas definições de laminação de normalização encontradas nas maiores das normas internacionais, como EN10025-2, ABS, BV, DNV, GL, LR ^(1, 2, 3, 4, 5, 6), citam a importância da redução final do processo de laminação ocorrer em temperatura similar à especificada para realização do tratamento térmico de normalização no forno e acima da A_{r3} . No entanto, não citam que para a obtenção de propriedades mecânicas equivalentes as obtidas com o processo de normalização convencional, os parâmetros de laminação devem ser controlados.

Chapas grossas foram laminadas apenas visando à temperatura de acabamento de 900°C, com tolerância de mais ou menos 30°C. Demais condições de processo não foram estabelecidas. Similar às demais experiências, após a laminação de normalização, foram retiradas amostras, as chapas foram normalizadas no forno de tratamento térmico e re-amostradas. As chapas apresentaram resultados de limite de escoamento, limite de resistência e impacto conforme Figura 38.

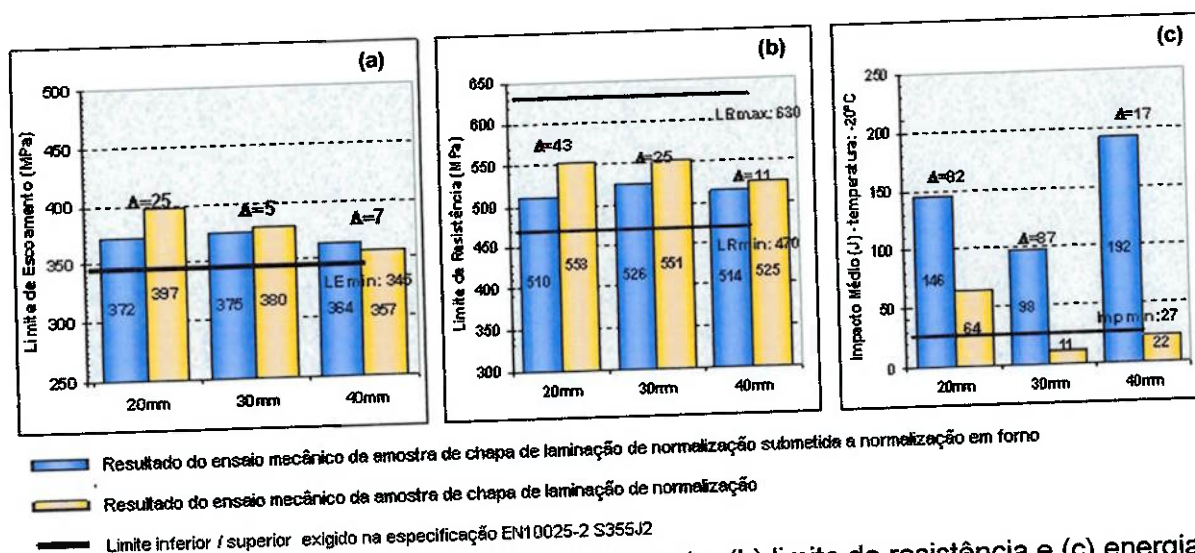


Figura 38: Diferença entre (a) limite de escoamento, (b) limite de resistência e (c) energia absorvida no impacto Charpy de chapas produzidas pelo processo de laminação de normalização e depois de submetidas à normalização no forno de tratamento térmico especificando apenas a temperatura de acabamento.

Os resultados mostram que definir apenas a temperatura de acabamento é insuficiente. Os valores, em alguns casos, insatisfatórios de impacto mostram que o processo não é controlado, pois o operador do laminador apenas visa atender à temperatura de acabamento final especificada. Para obter chapas com grãos finos de ferrita e, conseqüentemente, material com boa tenacidade, é necessário que o esquema de laminação e temperatura sejam controlados para que ocorra a recristalização. O operador do laminador, nesse caso, espera o último passe para atender a temperatura de acabamento especificada, não permitindo que haja uma redução mínima necessária para que ocorra a recristalização que produziria uma microestrutura similar ao do material tratado por normalização.

Outra dificuldade do processo de laminação de normalização é atingir homogeneidade térmica da placa. A placa apresenta um perfil característico de temperatura ao longo de sua espessura decorrente do processo de laminação realizado em temperaturas decrescentes. No caso, a temperatura no núcleo da placa é superior à de sua superfície. Fato que é ainda mais nítido em placas pesadas. Isto

ocorre devido à maior velocidade de resfriamento na superfície da placa em relação ao núcleo da mesma.

Outro fator que pode ocasionar heterogeneidade térmica ao longo do comprimento ou largura do esboço é alguma falha no reaquecimento da placa ⁽²⁴⁾. Os resultados mostrados na Tabela 15 são provenientes de chapas que apresentaram problemas no encharque de suas placas no forno de reaquecimento. Na saída do forno de reaquecimento, visivelmente, observava faixas ao longo do comprimento das placas, caracterizando gradiente de temperatura. Portanto, a experiência não foi considerada satisfatória.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios mecânicos realizados nas amostras de chapas de laminação de normalização que tiveram problemas de encharque no forno de reaquecimento.

Chapa	Energia absorvida (J) (Temp.: -20°C)			Energia absorvida (J) (Temp.: -40°C)			LE	LR	RE	A
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3				
1	53	45	35	15	13	15	400	555	0,72	26
2	45	27	71	18	16	16	389	541	0,72	28
3	58	58	71	31	43	38	384	539	0,71	26
4	247	199	22	16	16	16	420	538	0,78	27
5	78	70	29	22	13	16	383	539	0,71	25
6	22	25	25	13	13	9	375	541	0,69	27
7	62	29	50	25	19	16	368	530	0,69	27
8	78	54	19	9	9	13	367	530	0,69	27
9	125	66	103	36	54	43	438	565	0,78	32
10	58	66	78	25	22	36	401	539	0,74	25
11	82	86	116	62	62	50	405	543	0,75	26
12	134	62	70	29	62	54	379	534	0,71	28
13	16	50	16	13	13	9	378	545	0,69	28
14	152	138	143	90	66	107	388	554	0,7	36
Mínimo	16	25	16	9	9	9	367	530	0,69	25
Médio	86	70	61	29	30	31	391	542	0,72	28
Máximo	247	199	143	90	66	107	438	565	0,78	36
Desvio Padrão	61	47	40	22	22	27	20	10	0,03	3

Os dados apresentados na Tabela 15 mostraram grande variação nas propriedades mecânicas das chapas, caracterizando heterogeneidade na microestrutura do material.

Assim, os ensaios mecânicos realizados nas chapas grossas mostraram que é possível atender os requisitos exigidos pela especificação EN 10025-2 S355J2+N através do processo de laminação de normalização utilizando o projeto de liga e o esquema de laminação objetivado nesse estudo.

Verificou-se que as propriedades mecânicas do material produzido através de laminação de normalização submetido a normalização no forno continuam atendendo a especificação em questão.

Ao comparar as chapas grossas produzidas pelos processos de laminação de normalização e normalização no forno de tratamento térmico constatou-se uma diferença entre os resultados mecânicos e a microestrutura das mesmas, apesar de ambas atenderem as exigências da especificação.

6. CONCLUSÃO

O processo estudado foi a laminação de normalização de aço carbono manganês microligado ao nióbio e titânio de chapas grossas de espessura de 12,70 a 50,80mm para aplicação estrutural.

Nesse estudo, o material selecionado foi laminado a quente visando atender aos requisitos exigidos pela especificação EN10025-2 S355J2 +N.

- ✓ É possível atender os requisitos químicos e mecânicos exigidos pela especificação EN10025-2 S355 J2+N através da laminação de normalização, utilizando o mesmo projeto de liga usado para atendê-la por meio do processo de normalização no forno de tratamento térmico;
- ✓ Caso haja algum problema durante a laminação de normalização e algum parâmetro especificado de processo não seja cumprido, é possível recuperar e aproveitar a chapa, através de normalização em forno, já que é o mesmo projeto de liga utilizado para ambos os processos. Ou seja, os requisitos exigidos pela especificação continuaram sendo atendidos;
- ✓ Os parâmetros de processo selecionados, em termos de temperatura e redução, foram suficientes para o atendimento aos requisitos exigidos pela especificação;

Nesse estudo foram objetivados os seguintes parâmetros de processo: temperatura de encharque no forno de reaquecimento de 1250°C; tempo de permanência mínimo no forno de 210 minutos; temperatura de início do primeiro passe da laminação de 1080° a 1140°C; redução mínima na fase

final de laminação de 0,12%; temperatura final dos últimos passes de laminação de 870° a 930°C.

- ✓ As propriedades mecânicas e microestruturas obtidas pelos processos de normalização no forno e laminação de normalização não são iguais, apesar de ambas atendem às exigências das especificações. Uma das causas é o resfriamento acelerado da chapa no processo de laminação de normalização, através da utilização de descamação (jatos de água de alta pressão) e água na desempenadeira a quente;
- ✓ Baseado em cálculos empíricos, segundo equações de Grozier e Bucher, para estimar o limite de resistência, sugerem que a fração volumétrica de perlita foi o mecanismo que mais contribuiu para o aumento da resistência do material de laminação de normalização em relação ao normalizado em forno;
- ✓ O requisito exigido pelas especificações alemãs, no qual permite uma variação na resistência de no máximo 60 MPa, caso a chapa de laminação de normalização for submetida a normalização posterior, foi atendido.

7. SUGESTÕES

- ✓ Checar a influência da utilização da refrigeração da desempenadeira a quente e a descamação no processo de laminação de normalização, de forma a microestrutura ficar mais parecida com a obtida no processo de normalização no forno;
- ✓ Alterar os parâmetros de processo: temperatura de acabamento, redução e espessura de espera;
- ✓ Verificar o comportamento do material mais fino e grosso;
- ✓ Verificar a possibilidade de substituir o processamento termomecânico, quando a especificação permitir, pela laminação de normalização. Nesse processo, a temperatura relativamente alta, aumenta a produtividade do laminador, pois reduz o tempo de espera e reduz as solicitações mecânicas do laminador. Atualmente, experiências estão sendo realizadas no sentido de substituir a laminação termomecânica para especificação ASTM A572T1_50 com solicitação de impacto Charpy para o processo de laminação de normalização e os resultados estão sendo satisfatórios.

REFERÊNCIAS*

- 1)BRITISH STANDARD. **BS EN 10025-2**: hot rolled products of structural steels: part 2 - technical delivery conditions for non-alloy structural steels. Londres, 2004.
- 2)AMERICAN BUREAU STANDARD. **ABS: Part 2**: Rules for materials and welding. Houston, 2007.
- 3)BUREAU VERITAS. **BV**: Rules on materials and welding for the classification of marine units. Paris, 2005.
- 4)DET NORSKE VERITAS. **DNV: Part 2**: Rules for classification of ships / high speed, light craft and naval surface craft. Hovik, 2007.
- 5)GERMAN LLOYD. **GL II**: Rules for classification and construction materials and welding. Hamburg, 2005.
- 6)LLOYD'S REGISTER. **LR**: Rules for the manufacture, testing and certification of materials. Londres, 2007.
- 7)INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Estatísticas. [S.l], 2007. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br>>. Acesso em: 22 nov. 2007.
- 8)USIMINAS. Mercado: Análise de Mercado. [S.l], 2007. Disponível em: <<http://www.usiminas.com.br/mercado>>. Acesso em: 22 nov. 2007.
- 9) COSIPA. Fluxo de Produção , Empresa, Laminação a Quente. [S.l], 2007. Disponível em: < <http://www.cosipa.com.br>>. Acesso em: 22 nov. 2007.
- 10)BODNAR, R.L.; FLETCHER, F.B.; MANOHAR, M.. The Physical Metallurgy of Normalized Plate Steels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RAILROAD TANK CARS, 3., 2004, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: TMS, 2004. p. 89-108.
- 11)ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A 131/131 M** : specification for structural steel for ships. Baltimore, 2007.

- 12)CBMM. Informações Técnicas : Hsla. [S.l], 2007. Disponível em:
<<http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/norHSLa/nHSLa.htm>>. Acesso em: 22 nov.2007.

- 13)EDESC LECTURE NOTE. Manufacturing Process. [S.l], 2007. Disponível em:
<<http://www.kuleuven.be/bwk/materials/Teching/master/wg02/10200.htm>>. Acesso em 22 de novembro de 2007.

- 14)ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A 841/A 841M-03A**: standard specification for steel plates for pressure vessels, produced by thermo-mechanical control process (TMCP). Baltimore, 2007.

- 15)KÖETHE, A. et al. Recrystallization-controlled Rolling of C-Si-Mn-Ti-V-N HSLA Steel Plate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESSING, MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF MICROALLOYED AND OTHER MODERN HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEELS; Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburg:, 1991. p. 461-485

- 16)MEYER, L. History of Niobium as a Microalloying Element. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NIOBIUM , 2001. Orlando. **Proceedings...** Orlando: TMS/Niobium, 2001. P. 359-377.

- 17)BLUE SCOPE STEEL. Controlled Rolling. [S.l], 2007.
Disponível em: <<http://www.bluescopesteel.com.au>>. Acesso em: 22 nov.2007.

- 18)DEARDO, A.J.. Niobium in modern steels. **International Materials Reviews**, vol. 48, n. 6, p. 371-402, Dez. 2003.

- 19) DEBOER, H. SCHIEVER, U. Experience gained in the manufacture of V-HSLA. **Thyssen Technische Berichte**, v.21, n.2, p. S 135-146, 1990.

- 20)BLECK, W; MASSIP, A; MEYER, L; MUSCHENBORN, W. How to improve mechanical properties of high strength steels for the automotive industry. In: WORLD MATERIAL CONGRESS MICROALLOYED HSLA STEELS. , 1988, Chicago. **Proceedings...** Chicago: ASM International, 1988, p. 337-344.

- 21)CHABOUND, M. et al. A new computer system for normalizing rolling of custom size plates. In: International Conference On Steel Rolling, 4., 1987, Deauville. **Proceedings...** Deauville: IRSID, 1987. p.10.1-.10.6.

22)DEBOER, H.; HELLER, T.; MÜSGEN, B.. Erfahrungen mit dem normalisierenden Walzen vo Warmbreitband. **Stahl und Eisen**,. p. 45-50, May. 1991

23)STEEL UNIVERSITY. Hot rolling : plate rolling. [S.l], 2007. Disponível em: <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=205&pageid=2081272183> . Acesso em: 22 nov. 2007.

24)GORNI, A.A. et al. Produção de Chapas Grossas Normalizadas Diretamente da Calor de Laminação. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 34., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABM, 1997. p.479-498.

25)ROBERTS, W. et al. Prediction of microstructure development during recrystallization hot rolling of Ti-V steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY AND APPLICATIONS OF HSLA STEELS., 1984, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: ASM, 1984. p.35-52.

26)_____. Recent innovations in alloy design and processing of microalloyed steels. HSLA steels, Technology and application. , In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY AND APPLICATIONS OF HSLA STEELS., 1984, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: ASM, 1984. p. 33-41.

27)LESLIE, W. C. **The Physical Metallurgy of Steels**. Techbooks, India, 1991.

28)KERN,A. et al. Production and properties of thermomechanically rolled hig strength steel plates with minimum yield strengths up to 700 MPa. **Ironmaking and Steelmaking**, vol.32, n.4, 2005, p.331-336.

29)GINZBURG, V. **Metallurgical design of flat rolled steels**. Nova York: Marcel Dekker, 2005. 744p.

30)RITMANN, R.; KLAUS, F. Niobium containing steels for spiral and electric resistance welded line pipe production. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NIOBIUM , 2001. Orlando. **Proceedings...** Orlando: TMS/Niobium ,2001. p. 571-586.

31)FERRER, M.F.. **Estudo das transformações de fase de aços TRIP ao Si-Mn microligado com Nb**. 2003. 195f. Dissertação (Doutorado em engenharia), Universidade de São Paulo, 2003.

- 32) SELLARS, C.M. Modelling microstructural development during hot rolling. **Materials Science and Technology**, v.6, n.11, p.1072-1081, nov. 1990.
- 33) PADILHA, A.F.; SICILIANO JUNIOR, F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. São Paulo: ABM, 1996. 158p.
- 34) COTTERILL, P.; MOULD, P.R.. **Recrystallization and grain growth in metals**. Surrey University. Londres, 1976.
- 35) LI, J.C.M.. Possibility of subgrain rotation during recrystallization. **Journal of Applied Physics**. v.33, n.10, p. 2958-2965. 1962.
- 36) JOHNSON, W.A. ; MEHL, R.F. Reaction kinetics in process of nucleation and growth. **Trans. AIME**, 135, p. 416-458, 1939.
- 37) GLADMAD, T.; DULIET, D.. **Grain size control in steels. In: Conference on recrystallization in the control of microstructure**. Londres, 1973, p.167-176.
- 38) DEARDO, A.J.. Modern thermomechanical processing of microalloyed steel: a physical metallurgy perspective. In: INTERNATIONAL CONFERENCE MICROALLOYING, 1995, Pittsburgh. **Proceedings...** Warrendale: Iron and Steel Society, 1995. p. 15-33.
- 39) GARCIA, C.I. et al. A new microalloyed, multi-phase steel for high strength forging applications. In: SAE INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, 1991. Detroit. 1991. p.395-400. (Paper 910143)
- 40) _____. New steel for lighter, liability-free components. **Soc. Manufacturing Engineers**. Paper MF92-139. 1992
- 41) CAMEY, K. **Influência do teor de nitrogênio no crescimento de grãos austeníticos de aços microligados no reaquecimento de placas**. 1990. 112f. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais), Universidade Federal de São Carlos, 1990.
- 42) AKBEN, M.G.; WEISS, I.; JONAS, J.J.. **Dynamic precipitation and solute hardening in a V microalloyed and two Nb steels containing high levels of Mn**. Acta Metallurgica. 1980.

43) MARTIN, J.W., DOHERTY, R.D. **Stability of microstructure in metallic systems**. 2.ed. Cambridge University Press, 1997.

44) DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. 20.ed. McGraw-Hill: Guanabara Dois, 1976.

45) LOURENÇO, N.J.. **Estudo da deformação de um aço microligado ao vanádio na região de transição de fase**. 2001, 131 f. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, 2001.

46) LIU, W. **Precipitation of Ti(C,N) in austenite: experimental results, analysis and modeling**. Dissertação (Doutorado). 1987.

47) IRVINE, K.J.; PICKERING, F.B.. Low carbon steels with ferrite-pearlite structures. **ISIJ**, vol.201, p.944-959. Nov. 1963.

48) ANDREWS, K.W. Empirical Formulae for the calculation of some transformation temperatures. **Journal of the Iron and Steel Institute**. Vol. 203, part7, July 1965.

49) BRANCO, V.P.V.. **Análise crítica do setor de resfriamento de chapas laminadas a quente do aço LN28**. 2004. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

50) PLAUT, R. **Conformação Mecânica. Curso MBA em Siderurgia**. Cubatão, 2007.

51) SPIM JR, J. A. **Tópicos Avançados em Tratamentos Térmicos dos Aços**. São Paulo: ABM, Nov. 2007. (Programa de Educação Continuada - ABM).

52) CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas ferrosas**. 2.ed. São Paulo: ABM, 1987.

53) KRAUSS, George. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. Colorado: ASM International, 1989.

54) ASM. **Metals handbook: heat treating**. Materials Park: ASM, 1997. v.4. 1012 p. (ASM Metals Handbook, v.4).

- 55)ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A 941**: terminology relating to steel, stainless steel, related alloys, and ferroalloys. Baltimore, 2007.
- 56)GROZIER, J.D.; BUCHER, J.H.. Correlation of fatigue limit with microstructure and composition of ferrite-pearlite steels. **Journal of Materials**, vol.2, 1967, p.393-407.
- 57)ZRNÍK, J. et al. Effect of thermomechanical processing on the microstruture and mechanical properties of Nb_Ti Microalloyed steel. **Materials Science and Engineering A**, vol.319-321, dez. 2001, p.321-325
- 58)SIWECKI, T.; HUTCHINSON, B.; ZAJAC, S.. Recrystallization controlled rolling of HSLA steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE MICROALLOYING, 1995, Pittsburgh. **Proceedings...** Warrendale: Iron and Steel Society, 1995. p. 197-211.
- 59)ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E 415**: standard test method for optical emission vacuum spectrometric analysis of carbon and low-alloy steel. Baltimore, 2007.
- 60) SIWECKI, T.; et al. **Characteristics of TiV steels with special emphasis on obtaining attractive properties following normal, high-finishing - temperature rolling**. Stockholm: Institute for Metallforskning, 1984. 1v.. s p. (IM-1858/Feb. 1984).
- 61)BRITISH STANDARD. **BS EN 10025-1**: hot rolled products of structural steels-Part 1 - General Technical delivery conditions. Londres, 2004.
- 62)ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E 112**: standard test methods for determining average grain size. Baltimore, 2004.
- 63)_____. **ASTM E 562**: standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. Baltimore, 2005.
- 64) _____. **ASTM E 3**: standard guide for preparation of metallographic specimens. Baltimore, 2007
- 65) _____. **ASTM E 407**: standard practice for microteching metals and alloys. Baltimore, 2007

66) GORNI, A.A.. Cálculo da temperatura de não recristalização para aços microligados, em função da interação entre a precipitação e recristalização da austenita. **Revista Escola de Minas**. 1999, p.21-25.

67) REED-HILL, R.E. **Princípios de metalurgia física**. Editora Guanabara dois S.A.. Rio de Janeiro. 1982

68) COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editor Edgard Blücher. 1965

69) CALLISTER JUNIOR, W.D. **Materials science and engineering an introduction**. 2.ed. EUA: Editora WILEY, 1991.

70) IRVINE, K.J.; PICKERING, F.B.; GLADMAN, T. Grain-refined C-Mn steels. **ISIJ**. v. 205, n.2, p161-182, 1967.

71) MATSUDA, S.; OKUMURA, N.. Effects of distribution of TiN precipitate particles on the austenite grain size of low carbon low alloy steels. **Trans. Iron Steel Inst. Jpn**, vol.18, n.4, p198-205, 1978

72) TORRES, J.A.O. et al. Influência dos tratamentos térmicos de alívio de tensões e normalização nas propriedades mecânicas do aço classe ASTM A516-70 para vaso de pressão. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, vol.1, nº3, jan-mar 2005, p45-49.

73) TSUKADA, K. et al. [1,2% Cu Bearing Steel for Fitting Pipe with High Strength and High Toughness] **Nippon Kokan Technical Report Overseas**, n. 32, p.1-11, 1981.

* De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.