

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	x
Nomenclatura	xiv
1. Introdução	1
2. Revisão da Literatura	
2.1. Motivação para o Desenvolvimento de Ligas Microligadas Alternativas ao HY-80	
5	
2.2. Requisitos Típicos da Família de Aços HY e Ligas Alternativas	8
2.3. Projeto Metalúrgico dos Aços da Família HY e Ligas Alternativas	10
2.3.1. HY-80	10
2.3.2. HSLA-80	11
2.3.3. ULCB	15
2.4. Vantagens Decorrentes da Substituição dos Aços da Família HY	22
2.5. Aspectos Relativos ao Processo Siderúrgico	23
2.5.1. Dessulfuração do Gusa e Metalurgia de Panela	23
2.5.2. Desgaseificação a Vácuo	23
2.5.3. Lingotamento Contínuo de Placas	24
2.5.4. Laminação Controlada	24
2.5.5. Envelhecimento	28

2.5.6. Têmpera e Revenimento	31
2.6. Comparação entre as Propriedades Obtidas em Chapas Grossas de Aços HY-80, HSLA-80 e ULCB	32
2.6.1. HY-80	32
2.6.2. HSLA-80	32
2.6.3. ULCB	40
2.7. Objetivos desta Tese	47

3. Procedimento Experimental

3.1. Preparação das Ligas Experimentais	48
3.2. Laminação de Desbaste e Usinagem dos Bloquetes para Laminação	48
3.3. Determinação do Diagrama TRC	49
3.4. Preparação dos Corpos de Prova de Laminação	49
3.4.1. Corpos de Prova para Determinação da Evolução do Tamanho de Grão Austenítico ao Longo dos Ensaios de Laminação a Quente	49
3.4.2. Corpos de Prova para Determinação das Propriedades Mecânicas	50
3.5. Ensaios de Laminação a Quente	51
3.6. Usinagem dos Corpos de Prova para análise Metalográfica e Ensaios Mecânicos ..	55
3.7. Ensaios de Envelhecimento	56
3.8. Análise Metalográfica	58
3.8.1. Introdução	58
3.8.2. Determinação do Tamanho de Grão Austenítico	58
3.9. Ensaios Mecânicos	60
3.9.1. Dureza Vickers	60
3.9.2. Ensaio de Tração	61
3.9.3. Ensaio de Impacto Charpy	62

4. Resultados e Discussão

4.1. Ensaio de Laminação a Quente	63
4.2. Análise Microestrutural	65
4.2.1. Microestrutura Austenítica	65
4.2.2. Microestrutura Bainítica	69
4.3. Diagramas TRC	69
4.4. Propriedades Mecânicas	72
4.4.1. Ensaio de Dureza	72
4.4.1.1. Amostras Envelhecidas	72
4.4.1.2. Amostras Laminadas	78
4.4.2. Ensaio de Tração	86
4.4.2.1. Limite de escoamento	86
4.4.2.2. Limite de Resistência	89
4.4.2.3. Razão Elástica	90
4.4.2.4. Alongamento Total	93
4.4.3. Ensaio de Impacto Charpy	97

5. Conclusões

5.1. Morfologia da Austenita durante a Laminação a Quente	101
5.2. Morfologia da Microestrutura Bainítica Final	102
5.3. Transformação da Austenita durante o Resfriamento Contínuo	102
5.4. Resposta ao Envelhecimento	103
5.5. Propriedades Mecânicas	103
5.6. Resumo das Conclusões	106

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

109

Referências Bibliográficas

112

Lista de Figuras

2.1: Susceptibilidade à ocorrência de trincamento na ZTA para vários aços utilizados na indústria naval militar [4].	6
2.2: Influência da composição química no comportamento da transformação de aços ULCB ao Mn-Mo-Nb contendo aproximadamente 0,02% C. Temperatura de austenitização: 950°C [40].	20
2.3: Esquema da laminação controlada empregado no processamento de aços HSLA-80 e ULCB [9,39].	25
2.4: Crescimento de partículas esféricas de ϵ durante o envelhecimento de uma liga Fe-1,23% Cu a 500, 600 e 700°C [53].	30
2.5: Endurecimento por precipitação de uma liga Fe-1,23% Cu a 500, 600 e 700°C [53].	30
2.6: Distribuição das propriedades mecânicas relativas a chapas grossas com 19 mm de espessura em aço A710 Classe 3 produzidas pela Lukens Steel. O envelhecimento foi efetuado entre 605 e 625°C [4].	35
2.7: Comparação dos valores de tenacidade determinados no ensaio de rasgamento dinâmico executado a -40°C em chapas com 25 mm de espessura em aço A710 Classe 3, pro-	

cessados ou não através de laminação controlada antes do tratamento de austenitização, têmpera e envelhecimento [4].	35
2.8: Influência da espessura do esboço e da taxa de resfriamento após laminação controlada na resistência mecânica de aço A710 Classe 1 produzido pela BHP. Temperatura de envelhecimento: 550°C. Legendas: LC = laminação controlada; RA = resfriamento acelerado; AR = resfriamento ao ar; E = envelhecido.	37
2.9: Efeito do envelhecimento (550°C, 30 minutos) sobre a tenacidade, determinada por ensaio Charpy executado a -85°C em amostras de aço A710 Classe 1 produzido pela BHP. Legendas: LC = laminação controlada; E = envelhecida. [9].	38
2.10: Efeito da temperatura de envelhecimento sobre a tenacidade e limite de escoamento de chapas de aço A710 Classe 1 com 25 mm de espessura, produzidas pela BHP [9].	39
2.11: Curvas de transição levantadas através de ensaios de rasgamento dinâmico em chapas grossas de aço A710 Classe 1 produzido pela BHP [9].	40
2.12: Limites de escoamento e de resistência de aços Mn-Mo-Nb (liga-base), Ti-B e V-B, na forma de chapas grossas com 18 mm de espessura e diferentes frações de bainita na microestrutura. Propriedades medidas a partir de ensaios de tração em corpos de prova transversais. O escoamento do material foi contínuo, ou seja, sem apresentar patamar no início do escoamento. O limite de escoamento foi medido a 0,2% de deformação [40].	42
2.13: Influência da temperatura de envelhecimento sobre os limites de escoamento ($\epsilon=0,2\%$) e de resistência de chapas grossas com 18 mm de espessura, feitas em aço ao Mn-Mo-Nb-B, mais Ti ou V. Notação: LE = limite de escoamento; LR = limite de resistência [40].	44

2.14: Tenacidade medida pelo ensaio Charpy em chapas grossas com 18 mm de espessura de aço ao Mn-Mo-Nb (liga básica) e aspecto da fratura observada. Corpos de prova longitudinais [40].	45
3.1: Corpo de prova de laminação a quente usado na determinação do tamanho de grão austenítico após esboçamento dos aços HSLA-80 e ULCB.	50
3.2: Dispositivo utilizado para a laminação a quente simultânea de amostras de aços HSLA-80 e ULCB, com espessura de 42 mm. O desenho não se encontra em escala. ..	51
3.3: Esquema da retirada dos corpos de prova para os ensaios mecânicos e metalográficos.	56
3.4: Dimensões do corpo de prova reduzido de tração, conforme norma ASTM A-370 [64].	56
3.5: Dimensões do corpo de prova reduzido para ensaio de impacto Charpy, conforme norma ASTM A370 [64].	57
4.1: Microestrutura austenítica das amostras reaquecidas a 1200°C, reveladas com ataque a base de cloreto férrico e ácido pícrico. Aumento: 100 x.	66
4.2: Microestrutura austenítica das amostras de aços HSLA-80 e ULCB reaquecidas a 1200°C e submetidas à laminação de desbaste com 50% de deformação a quente, reveladas com ataque a base de cloreto férrico e ácido pícrico. Aumento: 100 x.	66
4.3: Evolução do tamanho de grão austenítico ao longo da laminação a quente para o aço HSLA-80.	68
4.4: Evolução do tamanho de grão austenítico ao longo da laminação a quente para o aço ULCB.	68
4.5: Microestruturas bainíticas finais das amostras E2 de aços HSLA-80 e ULCB, reaqueci-	

das a 1200°C, submetidas a 83% de deformação por laminação controlada e temperatura de acabamento de 700°C, reveladas com ataque de nital. Aumento: 700 x.	70
4.6: Diagrama de transformação sob resfriamento contínuo (TRC) determinado para o aço HSLA-80 aqui estudado.	71
4.7: Diagrama de transformação sob resfriamento contínuo (TRC) determinado para o aço ULCB aqui estudado.	71
4.8: Evolução da dureza ao longo do tempo de envelhecimento verificada para os aços estudados neste trabalho. Temperaturas empregadas: 500, 600 e 700°C.	75
4.9: Variação da dureza ao longo do tempo de envelhecimento verificada para os aços estudados neste trabalho. Temperaturas empregadas: 500, 600 e 700°C.	76
4.10: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre a dureza Vickers das amostras de aço HSLA-80, no estado como laminado e após envelhecimento a 600°C por uma hora.	81
4.11: Efeito da deformação total sobre a dureza Vickers das amostras de aço HSLA-80, no estado como laminado e após envelhecimento a 600°C por uma hora.	81
4.12: Efeito da temperatura de acabamento sobre a dureza Vickers das amostras de aço 4SLA-80, no estado como laminado e após envelhecimento a 600°C por uma hora.	82
4.13: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre a dureza Vickers de amostras de aço HSLA-80 e ULCB, ambos no estado como laminado.	82
4.14: Efeito do grau total de deformação sobre a dureza Vickers de amostras de aço HSLA-80 e ULCB, ambos no estado como laminado.	83
4.15: Efeito da temperatura de acabamento sobre a dureza Vickers de amostras de aço	

HSLA-80 e ULCB, ambos no estado como laminado.	84
4.16: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre a dureza Vickers de amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	84
4.17: Efeito do grau de deformação total sobre a dureza Vickers de amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	85
4.18: Efeito da temperatura de acabamento sobre a dureza Vickers de amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	85
4.19: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre o limite de escoamento das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	87
4.20: Efeito do grau de deformação total sobre o limite de escoamento das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	88
4.21: Efeito da temperatura de acabamento sobre o limite de escoamento das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	88
4.22: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre o limite de resistência das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	90
4.23: Efeito do grau total de deformação a quente sobre o limite de resistência das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	91
4.24: Efeito da temperatura de acabamento sobre o limite de resistência das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	91
4.25: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre a razão elástica das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	93

4.26: Efeito do grau de deformação total a quente sobre a razão elástica das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	94
4.27: Efeito da temperatura de acabamento sobre a razão elástica das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	94
4.28: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre o alongamento total das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	96
4.29: Efeito do grau de deformação total sobre o alongamento total das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	96
4.30: Efeito da temperatura de acabamento sobre o alongamento total das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	97
4.31: Efeito da temperatura de reaquecimento sobre a resistência ao impacto Charpy a -20°C das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	99
4.32: Efeito do grau total de deformação a quente sobre a resistência ao impacto Charpy a -20°C das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	99
4.33: Efeito da temperatura de acabamento sobre a resistência ao impacto Charpy a -20°C das amostras de aço HSLA-80 envelhecido e ULCB como laminado.	100

Lista de Tabelas

2.1: Requisitos mecânicos para o aço HY-80 [9].	8
2.2: Evolução ao longo do tempo da composição química especificada para o aço HY-80 [9].	10
2.3: Composição Química típica das ligas HY-80/HY-100, porcentagem em peso [9].	11
2.4: Composições químicas típicas da família A710, porcentagem em peso. O material da Lukens Steel é produzido por têmpera e envelhecimento (Classe 3); o da BHP é obtido através de laminação controlada (Classe 1) [4,9,23].	12
2.5: Propriedades mecânicas típicas de chapas grossas de aço HY-80 [9].	32
2.6: Limites inferiores de resistência mecânica e ao impacto Charpy para aços da família A710. Os valores especificados de resistência ao impacto se aplicam para toda a faixa de espessuras [23].	33
2.7: Composição química dos aços ULCB estudados na Thyssen Stahl [40].	41
2.8: Composições químicas típicas dos aços ULCB produzidos na Nippon Steel para a produção de tubos petrolíferos conforme as normas API 5LB-X70 e X-80 [39,41].	46

2.9: Propriedades mecânicas de tubos petrolíferos UOE feitos em aços ULCB produzidos pela Nippon Steel. Espessura da chapa: X70, 22 mm; X80, 20 mm. Propriedades determinadas através de corpos de prova transversais [39,41].	46
2.10: Composição química e tenacidade, determinada pelo ensaio Charpy, de aços ULCB com limite de escoamento médio de 600 MPa na forma de chapas grossas com 20 mm de espessura, produzidas pela Thyssen Stahl [45].	47
3.1: Análises químicas confirmatórias das corridas estudadas.	48
3.2: Distribuições de deformação entre as fases de esboçamento e acabamento utilizadas na série de laminações piloto. As distribuições de deformação relativas às séries E e F são idênticas às condições B-2 e D-2, respectivamente.	53
3.3: Condições objetivadas a serem aplicadas nos esquemas de passes A e B em termos da deformação por passe e evolução de temperatura. Espessura inicial do corpo de prova igual a 42 mm; temperatura de reaquecimento igual a 1200°C; temperatura de acabamento igual a 750°C.	53
3.4: Condições objetivadas a serem aplicadas nos esquemas de passes C e D em termos da deformação por passe e evolução de temperatura. Espessura inicial do corpo de prova igual a 42 mm; temperatura de reaquecimento igual a 1100°C; temperatura de acabamento igual a 750°C.	54
3.5: Condições objetivadas a serem aplicadas nos esquemas de passes E e F em termos da deformação por passe e evolução de temperatura. Espessura inicial do corpo de prova igual a 42 mm.	54
4.1: Evoluções reais de temperatura e intervalos de tempo durante os ensaios de laminação a quente das séries A e B definidas no Procedimento Experimental.	63

4.2: Evoluções reais de temperatura e intervalos de tempo durante os ensaios de laminação a quente das séries C e D definidas no Procedimento Experimental.	64
4.3: Evoluções reais de temperatura e intervalos de tempo durante os ensaios de laminação das séries E e F definidas no Procedimento Experimental.	64
4.4: Evoluções reais de temperatura e intervalos de tempo durante os ensaios de laminação a quente da série G, que lista os ensaios duplicados ou em não-conformidade com o Planejamento Experimental proposto.	65
4.5: Dados de tamanho de grão austenítico determinados após o reaquecimento ou desbaste das amostras dos aços HSLA-80 e ULCB aqui estudados.	67
4.6: Dados sobre a evolução da dureza ao longo dos ensaios preliminares de envelhecimento para o aço HSLA-80.	73
4.7: Dados sobre a evolução da dureza ao longo dos ensaios preliminares de envelhecimento para o aço ULCB.	74
4.8: Dados sobre a dureza de amostras laminadas e envelhecidas a 600°C por uma hora de aço HSLA-80.	79
4.9: Dados sobre a dureza de amostras laminadas de aço ULCB.	80
4.10: Dados de limite de escoamento relativos às amostras de aço HSLA-80 envelhecido e aço ULCB como laminado.	86
4.11: Dados de limite de resistência relativos às amostras de aço HSLA-80 envelhecido e aço ULCB como laminado.	89
4.12: Dados de razão elástica relativos às amostras de aço HSLA-80 envelhecido e aço	

ULCB como laminado.	92
4.13: Dados de alongamento total relativos às amostras de aço HSLA-80 envelhecido e aço ULCB como laminado.	95
4.14: Dados de resistência ao impacto determinada pelo ensaio Charpy a -20°C relativos às amostras de aço HSLA-80 envelhecido e aço ULCB como laminado.	98

Nomenclatura

Letras Latinas

@	- a (<i>at</i>)
B_f	- temperatura de fim da formação da bainita durante o resfriamento da austenita
B_s	- temperatura de início da formação da bainita durante o resfriamento da austenita
C_{eq}	- carbono equivalente
C_v	- ensaio de impacto Charpy usando corpo de prova com entalhe em “V”
\bar{d}	- média da amostra
\bar{d}_v	- média das diagonais medidas no ensaio de dureza Vickers
d_γ	- diâmetro médio do grão austenítico
h	- espessura
L_T	- comprimento total da linha teste
M	- aumento
Mn_{eq}	- manganês equivalente
M_s	- temperatura de início da formação de martensita durante o resfriamento da austenita
n	- número de medidas
n_r	- número de medidas requerido
p	- precisão percentual associada ao tamanho de grão medido
p_r	- precisão percentual requerida
P_l	- número de intersecções da linha teste com o contorno de grão

P_v	- carga utilizada durante o ensaio de dureza Vickers
s	- segundo
T	- temperatura
T_{acab}	- temperatura de acabamento
T_{cga}	- temperatura de austenitização acima da qual ocorre crescimento excessivo de grão
T_{nr}	- temperatura de não-recristalização
T_{REQ}	- temperatura de reaquecimento
T_{27}	- temperatura usada no ensaio Charpy onde obtém-se energia absorvida igual a 27 J

Letras Gregas

α	- ferrita
Δt	- intervalo de tempo
ε	- precipitado de cobre na ferrita
γ	- austenita
σ	- desvio-padrão da amostra

Abreviações

Al.	- alongamento
Ar_1	- temperatura de fim de transformação ferrítica durante o resfriamento da austenita
Ar_3	- temperatura de início de transformação ferrítica durante o resfriamento da austenita
AT	- alongamento total
BLAR	- baixa liga e alta resistência
CP	- corpo de prova
def.	- deformação
DPH	- <i>diamond pyramidal hardness</i> , ou seja, dureza medida por pirâmide de diamante
DWTT	- <i>drop weight tearing test</i> , ou seja, ensaio de rasgamento por queda de peso

E, env.	- envelhecido
FATT	- <i>fracture appearance transition temperature</i> , ou seja, temperatura de transição determinada com base na aparência da superfície fraturada
HIC	- <i>hydrogen induced cracking</i> , ou seja, trincamento induzido por hidrogênio
HSLA	- <i>high strength low alloy</i> (ver BLAR)
HV	- dureza Vickers
HV _{5 kg}	- dureza Vickers medida com carga de 5 quilogramas
LC	- laminação controlada
LE	- limite de escoamento
Longit	- longitudinal
LQ	- laminado a quente
LR	- limite de resistência
MA	- martensita-austenita
max.	- máximo
min.	- minuto
mín.	- mínimo
RA	- resfriamento acelerado
Rasg.	- rasgamento
RE	- razão elástica
RH	- Ruhrstahl-Heraeus
RI	- resistência ao impacto
Temperat.	- temperatura
TG	- tamanho de grão
Transv.	- transversal
TRC	- transformação durante o resfriamento contínuo
ULCB	- <i>ultra low carbon bainite</i> , ou seja, bainita de ultra-baixo carbono
UOE	- processo de conformação de tubos de grande diâmetro
ZTA	- zona termicamente afetada

Siglas

ASTM	- American Society for Testing and Materials
BHP	- Broken Hill Proprietary Company LTD (Austrália)
COSIPA	- Companhia Siderúrgica Paulista
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
USIMINAS	- Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais