

PEDRO GUILHERME FRADE MORO

AÇO TWIP: PROPRIEDADES E IMPACTOS NA CADEIA SIDERÚRGICA.

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

SÃO PAULO
2011

PEDRO GUILHERME FRADE MORO

AÇO TWIP: PROPRIEDADES E IMPACTOS NA CADEIA SIDERÚRGICA.

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, graduação em Engenharia
Metalúrgica.

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Guilherme
Frederico Bernardo Lenz e Silva

SÃO PAULO
2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais,
Lucia e Lincoln, e a minha noiva,
Aline.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Guilherme Lenz, pelas horas investidas na revisão deste texto, pela orientação dada e, principalmente, pelo interesse em participar deste tema.

À meus pais, pela educação dada e por despertar meu interesse na busca de novos conhecimentos.

À Aline Barbosa, minha noiva pelo apoio e incentivo não apenas neste trabalho, mas em todas as minhas realizações.

Índice de Figuras

Figura 01: comparativo de limite de resistência (eixo y) em função da alongamento(eixo x) de diferentes aços. E dos aços TWIP (destacados em laranja e circulados).....	5
Figura 02: corpos de prova de aço TWIP submetidos a ensaio de tração sob diferentes deformações.....	5
Figura 03: diagrama de fase ferro-carbono. Nota-se neste diagrama o limite da fase austenítica, que ocorre a 740 graus célsius neste sistema. A morfologia resultante para temperaturas abaixo deste limite é uma mistura de ferrita e cementita.....	7
Figura 04: diagrama de fase do sistema Ferro-Manganês. Observa-se que, em comparação com o sistema ferro-carbono, o campo de estabilidade da austenita (γ) é muito maior do que aquele observado no sistema ferro-carbono, podendo chegar até a menos de 200 graus Célsius.....	8
Figura 05: Micrografia de aço TWIP deformado à quente (1100 graus). As regiões destacadas em azul são fase ferrítica. Linhas vermelhas são maclas de deformação. A região cinza é a matriz austenítica.....	9
Figura 06: Comparação entre cristal sem deformação (direita) deformação por escorregamento (esquerda) e por maiação(centro) em cristal cúbico de face centrada. No escorregamento, planos atómicos se deslocam em uma direção alternadamente. Já na maiação, cada átomo move-se a uma distância mais curta dos átomos adjacentes do que no escorregimento, mantendo uma interface coerente.....	10
Figura 07: Micrografia em microscópio eletrônico de transmissão de um aço TWIP exibindo discordâncias(figuras a e b) e maclas (figura c).....	11
Figura 08: Maclas de deformação em um aço TWIP (25% Mn e 3% Al) deformado a - 80 °C.....	11
Figura 09: Comparação entre as curvas tensão x deformação de um aço TWIP com adição de carbonetos de vanádio e um aço sem esta adição.....	15

Figura 10: micrografia de um aço TWIP submetido a adição de vanádio e precipitação de carbonetos. No centro da foto observamos um carboneto esférico de vanádio e uma macla atravessando-o.....15

Figura 11: Comparativo de amplitude de tensão com número de ciclos para falha entre três amostras de aço TWIP. A linha vermelha indica uma amostra submetida a 30% de deformação antes do ensaio de fadiga se iniciar, a linha azul indica uma amostra submetida a 10% de deformação antes do ensaio de fadiga se iniciar, a linha negra corresponde a amostra não deformada antes do ensaio. Setas nas amostras indicam que as mesmas não se romperam durante o teste.....16

Figura 12: Destaque de estruturas automotivas dedicadas a absorção de impactos, nas quais as propriedades mecânicas do aço TWIP são de grande interesse. Na figura (a), observamos as estruturas destinadas à absorção de impactos frontais(destacadas em amarelo, azul e verde), ao passo que na figura (b), observamos estruturas destinadas à absorção de impactos laterais (em azul e púrpura).....17

Figura 13: forno elétrico, com destaque para o tap hole.....25

Figura 14: Desenho esquemático de um forno elétrico a arco, contendo seus principais componentes.....27

Figura 15 energia dissipada em ensaio charpy em função de temperatura de revenimento. Pontos brancos são aço de baixo fósforo, pontos negros são aços de alto fósforo.....33

Figura 16: Esquema de máquinas de lingotamento contínuo do tipo curvo, que é o processo mais utilizado para o aço é o curvo. Neste processo pode ser observada a panela vertendo o metal líquido sobre o molde de cobre. Abaixo vemos os rolos que retiram o aço já solidificado na superfície.....34

Figura 17: Instalação de Lingotamento contínuo produzida pela Shanghai Muhong Mechanical and Electrical Equipment Co, Ltd.....35

Figura 18: curva de tensão real em função da deformação real para um aço TWIP 6C22Mn (0,6% de carbono e 22% de manganês). Observa-se queda na deformação máxima e na tensão necessária para chegar a deformação máxima conforme a temperatura aumenta. O aumento da deformação máxima verificado de 900 $^{\circ}\text{C}$ para 1000 $^{\circ}\text{C}$ e de 1100 $^{\circ}\text{C}$ para 1200 $^{\circ}\text{C}$ é devido ao fenômeno da recristalização.....36

Índice de Tabelas

Tabela 01: exemplos de composição química de aços TWIP em fração mássica. “Bal” significa que a quantidade do elemento em questão é dada pelo balanceamento químico após determinadas as demais composições.....	6
Tabela 02: comparativo de limite de escoamento e resistência em função de pré deformação em aços TWIP.....	16
Tabela 03: Produção e reservas mundiais de manganês observa-se que o Brasil possui a segunda maior reserva de manganês e a maior produção deste metal. Garantindo menor vulnerabilidade ao mercado internacional.....	18
Tabela 04: evolução da produção Brasileira de ferro-ligas no período de 1995 até 2004.....	20
Tabela 05: Capacidade dos diferentes processos de efetuar as diversas etapas envolvidas na metalurgia secundária.....	22
Tabela 06: custos associados à produção de aço carbono em forno elétrico a arco, a estimativa considera custos relativos a um produtor baseado no Japão. Custos estão em dólares americanos (USD). Os custos unitário consistem no custo da unidade em questão (tonelada, metro cúbico, GJ, MWhr e homens.hora) do insumo em dólares.....	42
Tabela 07: Estimativa de custos relativos à produção de um aço TWIP, a linha destacada em azul, corresponde a adição extra de ferro-manganês necessária para que o aço seja considerado TWIP.....	43
Tabela 08: Sumário com principais fatores e riscos ao processo produtivo e utilização do aço TWIP.....	44

Índice de equações

Equação 1: cálculo do carbono equivalente em função dos teores de elementos de liga.....	12
Equação 2: efeito do tamanho de grão no limite de escoamento de um material.....	13
Equação 3: efeito de teor e tamanho de precipitados no limite de escoamento.....	13
Equação 4: cálculo do fator K em função do diâmetro do eletrodo e da resistência.....	26
Equação 5: cálculo do fator K em função da tensão, do diâmetro do eletrodo e da corrente elétrica.....	26

Abreviações e Siglas

TWIP -	Twinning Induced Plasticity
TRIP -	Transformation Induced Plasticity
CCC -	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
POSCO -	Pohang Iron and Steel Company
VD -	Vacum degassing(Desgaseificação a Vácuo)
VOD -	Vacuum oxygen decarburization (descarburação à vácuo e oxigênio)
IGP -	Inert Gas purging (purga com gás inerte)
AOD -	Argon oxygen decarburization (descarburação à argônio e oxigênio)
VAD -	Vacuum Arc degassing (desgaseificação à vácuo sob arco)
LF -	Ladle furnace (forno-panela)
EEL -	Electron energy loss (espectroscopia por perda de energia de elétrons)
PEEL -	Parallel electron energy loss (espectroscopia por perda de energia de elétrons paralelos)
ASEA-SKF – ASEA Brown Bovery – Swenska Kullager Fabriken ¹	
Fe-Mn-AC – Ferro manganês de alto carbono	
Fe-Mn-BC - Ferro manganês de baixo carbono	
CAS-OB - Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling - Oxygen Blowing (ajuste de composição por borbulhamento de argônio e oxigênio em recipiente fechado)	
Nital – ácido nítrico diluído em álcool etílico.	
LD (conversor) – Linz und Donawitz ²	
DRI – Direct Reduced Iron (ferro produzido por redução direta)	

ASEA Brown Bovery (atual ABB) e SKF são as empresas responsáveis pelo desenvolvimento do processo ASEA-SKF.¹

Cidades austríacas nas quais o conversor LD foi desenvolvido²

Resumo

O Objetivo do presente trabalho é o levantamento de possíveis utilizações do aço TWIP e possíveis impactos que produção do mesmo poderia causar no processo produtivo siderúrgico atual.

O aço TWIP apresenta uma das melhores relações entre ductilidade e resistência mecânica, no entanto, sua composição química, especialmente devido ao teor de manganês, representa um desafio à produção do mesmo.

Por meio de um estudo das propriedades mecânicas e microestrutura deste aço, foram levantadas possíveis utilizações. Um estudo das etapas do processo produtivo forneceu os setores aonde a produção do aço TWIP poderia ser mais impactante.

Abstract

The present work's objective is to provide information about possible uses for the TWIP steel and possible impacts that it's production may have in the current steel industry's productive process

The TWIP steel has one of the best relations between ductility and mechanical resistance, however, its chemical composition, especially due to its high manganese content, represent a challenge to its production.

Through the study of this steel's mechanical properties and microstructure it was possible to gather possible uses. A study of the steel processing steps provided information of where it's production would majorly impact.

1 – Introdução

2 – Objetivo

3 – Revisão bibliográfica

3.1 – Introdução ao aço TWIP

- 3.1.1 – O aço TWIP e suas propriedades
- 3.1.2 - Utilização.

3.2 – Impactos da produção do Aço TWIP nos diferentes segmentos da indústria metalúrgica

- 3.2.1 – mineração.
- 3.2.2 - Ferro-Ligas
- 3.2.3 – Alto-forno
- 3.2.4 – Conversor LD
- 3.2.5 – Refino secundário
- 3.2.6 – Forno elétrico a Arco
 - 3.2.6.1 - O forno elétrico
 - 3.2.6.2 - produção de aço alto manganês via forno elétrico
- 3.2.7 – lingotamento contínuo.

4 - Discussão

- 4.1 – Usos e propriedades.
- 4.2 - processo produtivo
- 4.3 – Custos

5 Conclusão

6 Referência bibliográfica

1. Introdução

No decorrer do século XX, houve um grande desenvolvimento tecnológico em todas as áreas das ciências exatas. Este desenvolvimento exigiu e incentivou a criação de diversos materiais novos para atender a estas novas exigências. Um exemplo destes novos materiais é o aço TWIP¹: Este é um aço de excelentes propriedades mecânicas, desenvolvido especialmente para a indústria automobilística. As propriedades mecânicas deste aço são devidas ao alto teor de manganês presente no mesmo. No entanto, este alto teor exigiria ajustes na cadeia produtiva do aço, o que pode ser problemático, dado que a reaparelhagem de uma indústria siderúrgica exige um aporte substancial de capital.

¹ twinning induced plasticity – Plasticidade induzida por maclação

2 - Objetivo

O objetivo deste trabalho é expor as propriedades do aço TWIP e, com base nestas, apontar aplicações do mesmo e levantar os principais gargalos para a implementação da produção do aço TWIP na indústria.

Definidos os principais gargalos, serão propostas alternativas e soluções a serem estudadas mais detalhadamente em trabalhos posteriores, de modo a garantir o desenvolvimento tanto da indústria siderúrgica como das indústrias usuárias, tais como a automobilística.

3 – Revisão Bibliográfica

3.1- Introdução ao aço TWIP

3.1.1 – O aço TWIP e suas propriedades

Os aços com elevado teor de manganês não são uma invenção recente: o primeiro deles foi o aço Hadfield, cujo teor de manganês, conforme mencionado acima, é de 12% e foi inventado em 1882 por Sir Robert Hadfield. Esta classe de aços tem como principais características a alta tenacidade e ductilidade, grande capacidade de encruamento e, geralmente, boa resistência ao desgaste. O aço Hadfield, foi desenvolvido para aplicação em trilhos de trens e, posteriormente, aplicado durante a primeira Guerra Mundial na fabricação de capacetes para soldados. Ainda hoje, o aço Hadfield é utilizado na indústria mineral, na fabricação de elementos de máquinas que sofrem elevada abrasão, tais como peneiras vibratórias e britadores.[1][2]

O aço TWIP (“twinning induced plasticity”, ou plasticidade induzida por maclação) foi desenvolvido inicialmente pela siderúrgica coreana POSCO em 1994 e é um aço austenítico, cujo principal diferencial na composição química é a presença de um grande teor de manganês (da ordem de 15 a 30 %), muito maior do que a da maioria dos aços e maior até mesmo que a do conhecido aço Hadfield (que apresenta teores de Mn de 12%). Estes aços aliam alto limite de resistência com grande capacidade de deformação, conforme pode ser visto na figura abaixo.[1][3][4][5][6]

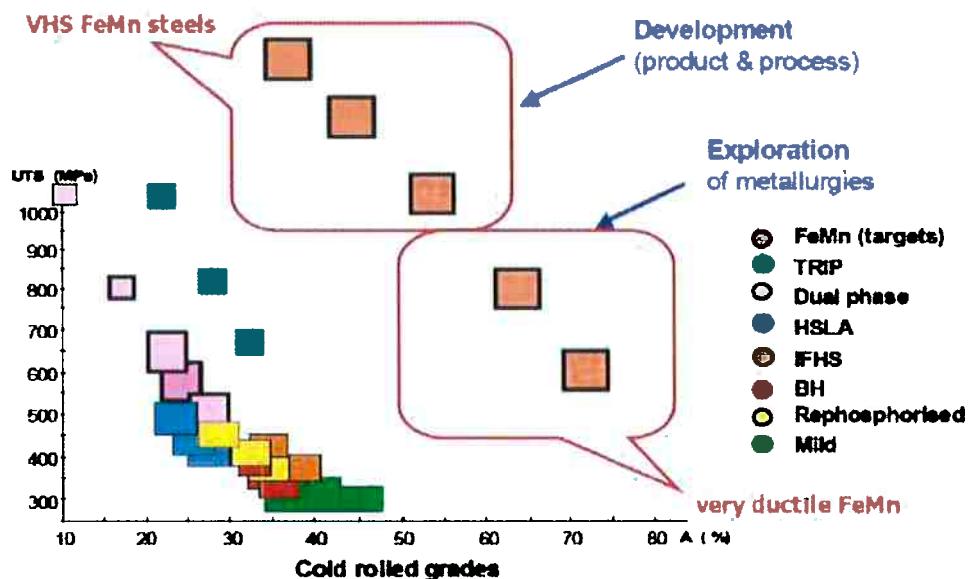


Figura 01: comparativo de limite de resistência (eixo y) em função da alongamento(eixo x) de diferentes aços. E dos aços TWIP (destacados em laranja e circulados). [5]

Os aços TWIP podem ser divididos em duas classes de acordo com seu comportamento mecânico: a primeira classe envolve aços de limite de resistência moderadamente altos (até 800 MPa) e grande alongamento máxima (de até 80%). A segunda classe, envolve aços de moderada alongamento máxima (de 30 a 50%), mas de alto limite de resistência (até 1700 MPa). As duas classes podem ser observadas na figura acima. Esta elevada resistência mecânica se verifica mesmo a temperaturas baixas. Em um caso extremo, observa-se que um aço com 30% Mn apresenta uma alongamento de 70% a uma temperatura de – 196 °C. [5] [7]



Figura 02: corpos de prova de aço TWIP submetidos a ensaio de tração sob diferentes deformações. [8]

Os aços TWIP não deformados apresentam microestrutura austenítica devido aos altos teores de manganês; que, por sua vez é um estabilizante da austenita. No entanto, ao ser submetido a deformação mecânica, o aço TWIP, sofre uma transformação em sua microestrutura na qual a austenita pode ser gradativamente transformada em martensita.[1][4][3]

Tabela 01: exemplos de composição química de aços TWIP em fração mássica. “Bal” significa Que a quantidade do elemento em questão é dada pelo balanceamento químico após determinada

As demais composições.[1]

Código da Liga	% C	%N	%Mn	%Al	%Si	%Nb	%Fe
6C22Mn	0,6	-	22,30	-	-	-	Bal
6C18MnNb	0,6	-	17,8	-	-	0,02	Bal
3C16MnAl	0,29	-	16,4	1,54		-	Bal
22Mn3Al3Si	0,01	-	21,3	3,02	3,00%	-	Bal

Bal = Balanço

Os diferentes elementos de liga, além do manganês apresentam grande importância no aço TWIP. O alumínio é utilizado e primordialmente para elevar a resistência a corrosão por meio da passivação e desfavorece a transformação de austenita em martensita durante deformação. O Silício, é utilizado para aumentar a resistência mecânica por meio do efeito de solução sólida, no entanto, este elemento favorece a formação de martensita. Cromo também pode ser adicionado para o aumento da resistência a corrosão, porém seu uso requer atenção pelo fato de este elemento ser um estabilizante da ferrita.[5]

A austenita é uma fase dúctil (em comparação com as demais fases) cujo cristal é cúbico de face centrada. Apresenta grande capacidade de solubilizar carbono (até 2% em peso), sendo que a presença deste elemento favorece a austenita em relação à ferrita. [9] [10] [11]

A austenita, no sistema ferro-carbono, é estável termodinamicamente apenas a temperaturas superiores a 740 °C. Conforme a temperatura é reduzida, ocorre a difusão do carbono para fora da matriz austenítica formando cementita (a fase termodinamicamente estável é a grafita, mas ela não ocorre nos aços comerciais) e a queda do teor de carbono provoca a formação de uma matriz ferrítica. [9] [10] [11] [12]

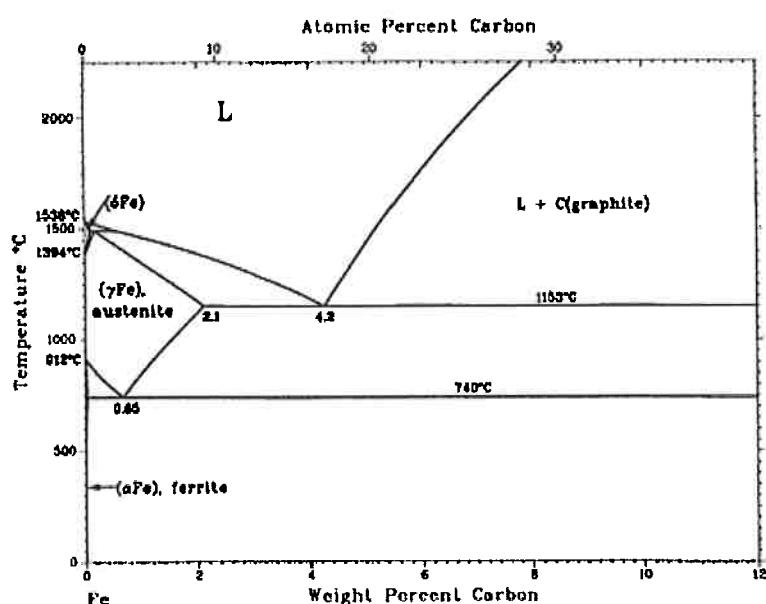


Figura 03: diagrama de fase ferro-carbono. Nota-se neste diagrama o limite da fase austenítica, que ocorre a 740 graus célsius neste sistema. A morfologia resultante para temperaturas abaixo deste limite é uma mistura de ferrita e cementita. [11]

No entanto, a austenita pode existir a temperatura ambiente como fase metaestável ou então sob alta concentração de elementos de ligas (como por exemplo o manganês) que estabilizam a fase austenítica. O manganês auxilia a manter o carbono em solução no interior da matriz austenítica, impedindo a formação da ferrita, conforme pode ser visto na figura n[úmero 4]. [9] [10] [11] [12]

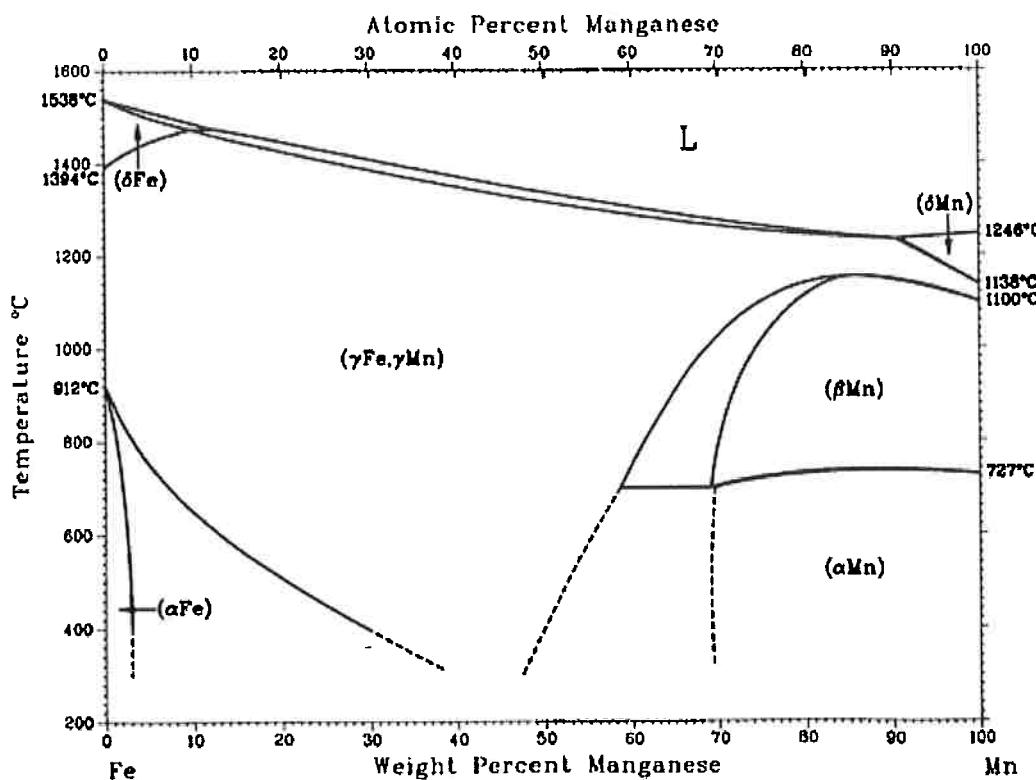


Figura 04: diagrama de fase do sistema Ferro-Manganês. Observa-se que, em comparação com o sistema ferro-carbono, o campo de estabilidade da austenita (γ) é muito maior do que aquele observado no sistema ferro-carbono, podendo chegar até a menos de 200 graus Célsius. [11]

A martensita consiste em uma fase supersaturada em carbono e de grande dureza, se comparada com as demais fases encontradas nos aços. Esta estrutura se forma a partir da austenita, por meio da deformação por cisalhamento e não por difusão como ocorre, por exemplo, na transformação ferrita - austenita. Esta deformação resulta em um cristal tetragonal de corpo centrado, isto é um cristal CCC, deformado. É possível que ocorra a formação de martensita no aço quando o mesmo é submetido a deformação e isto consiste no efeito TRIP. Embora a martensita seja uma fase frágil, no aço TRIP a morfologia da austenita retida, permite a manutenção da ductilidade mesmo após a transformação em martensita. Isto, por sua vez, não se verifica no aço TWIP. [10] [9]

A ferrita, por sua vez é uma fase cúbica de corpo centrado, é uma fase na qual a solubilidade do carbono é extremamente baixa. Nos aços ferríticos, o carbono presente permanece quase todo na forma de carbonetos metálicos. O manganês é um elemento que estabiliza a austenita, logo nos aços TWIP não deveria haver fase ferrítica. Todavia, pode ocorrer presença de fase ferrítica devido ao

fenômeno da segregação, que ocorre em temperaturas elevadas. Este fenômeno será abordado novamente na seção 3.2.7 sobre lingotamento contínuo.[10][9][13]

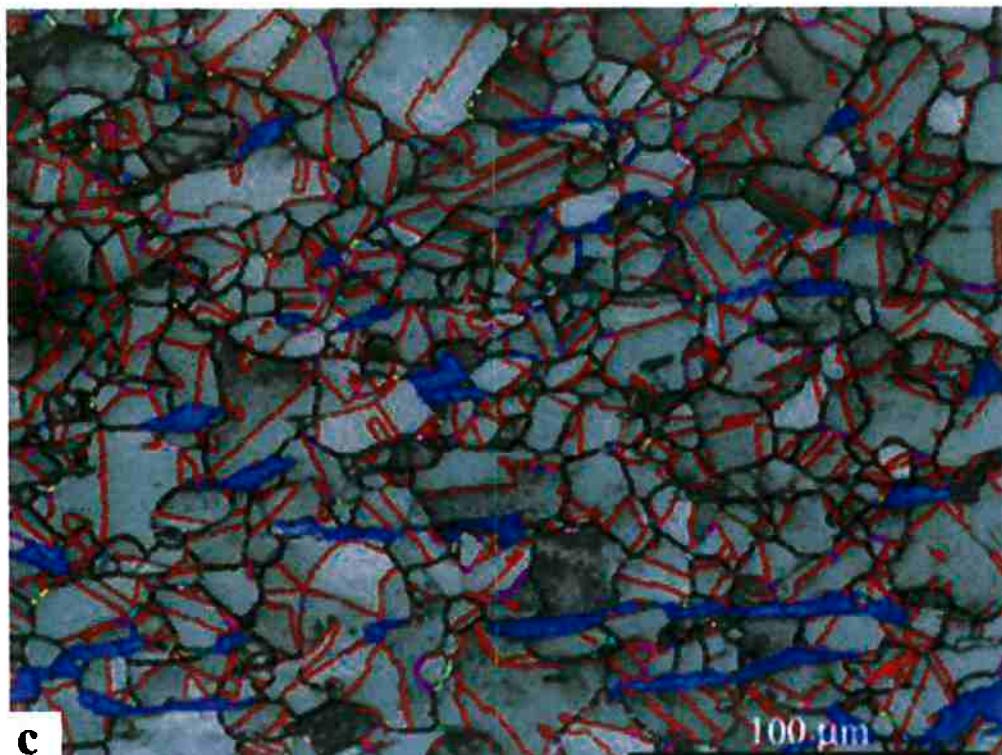


Figura 05: Micrografia de aço TWIP deformado à quente (1100 graus). As regiões destacadas em azul são fase ferrítica. Linhas vermelhas são maclas de deformação. A região cinza é a matriz austenítica. [1]

O efeito de maiação, ao qual o aço TWIP deve sua resistência mecânica, ocorre pela deformação por cisalhamento do cristal, esta deformação é distinta do escorregamento de discordâncias. A figura 06 exemplifica tanto o escorregamento como a maiação. A maiação e o escorregamento simples ocorrem alternadamente: aonde a dificuldade para escorregimento for maior que aquela para maiação, ocorrerá esta última; aonde a dificuldade para maiação for maior, ocorrerá escorregamento. [4] [14]

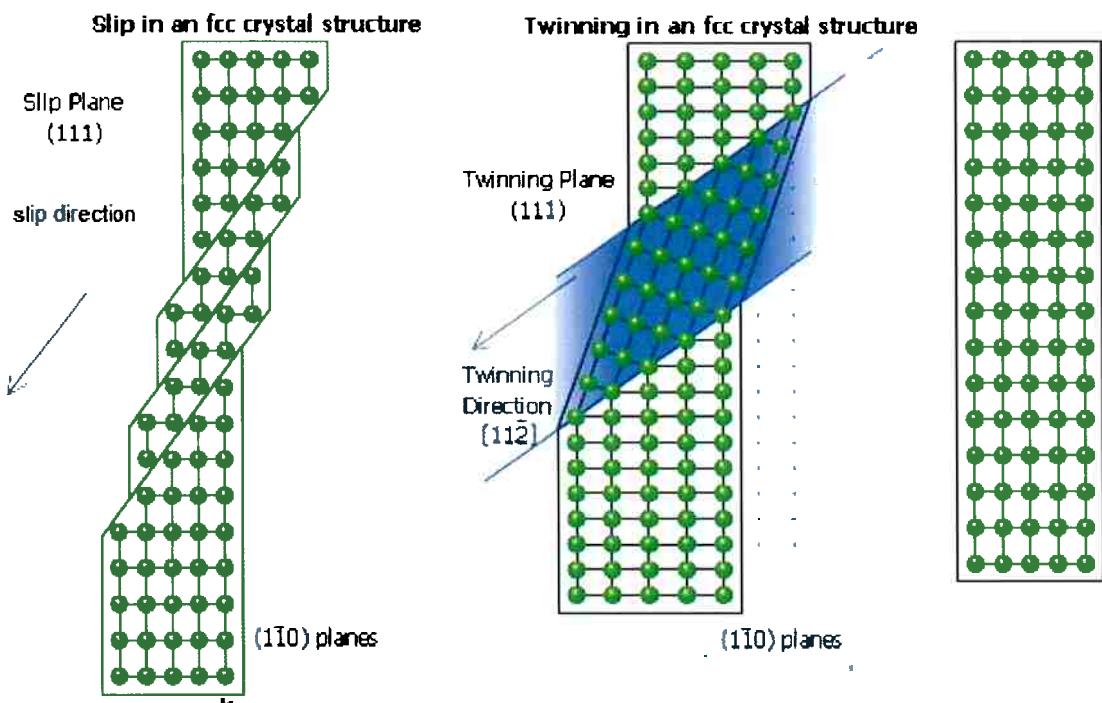


Figura 06: Comparação entre cristal sem deformação (direita) deformação por escorregamento (esquerda) e por maiação(centro) em cristal cúbico de face centrada. No escorregamento, planos atómicos se deslocam em uma direção alternadamente. Já na maiação, cada átomo move-se a uma distância mais curta dos átomos adjacentes do que no escorregamento, mantendo uma interface coerente[14]

Esta ocorrência alternada de escorregamento e maiação aumenta a resistência mecânica do metal por encruamento de uma maneira mais intensa do que se ocorresse apenas escorregamento, pois verifica-se que as maclas de deformação atuam como obstáculos ao escorregimento de discordâncias de modo similar aos contornos de grão. Além disso, a maiação é o efeito que afeta o encruamento de modo mais intenso para os aços austeníticos (que, conforme dito anteriormente, é o caso do TWIP). Supõe-se que este fato ocorre porque a maiação atua como obstáculo para as discordâncias em escorregamento, aumentando a capacidade de um aço de encruar. [4] [13] [15]

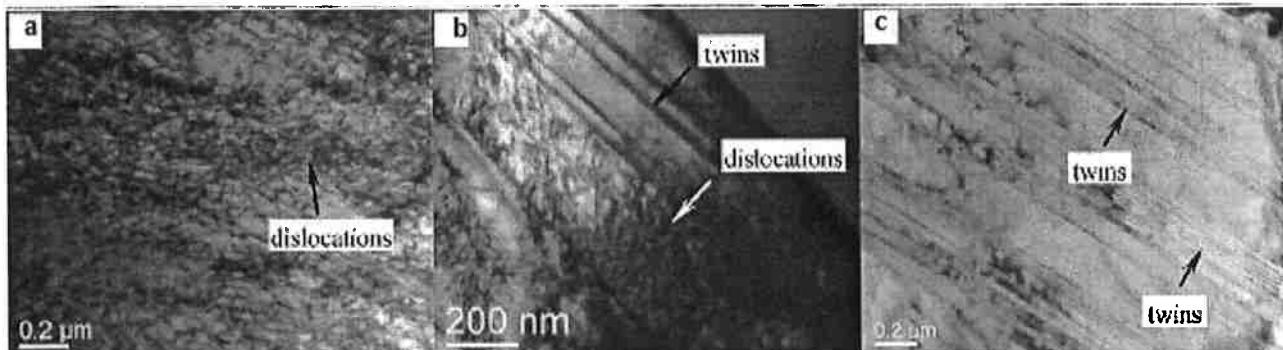


Figura 07: Micrografia em microscópio eletrônico de transmissão de um aço TWIP exibindo discordâncias (figuras a e b) e maclas (figura c) [4].

Estudos indicam que o efeito TWIP é dominante apenas com teores de manganês superiores a 25%, para teores entre 15 e 25%. Ocorre o efeito TRIP (Transformation Induced Plasticity, ou Transformação Induzida por Plasticidade) juntamente com o TWIP. Este aço apresenta grande tenacidade à fratura e capacidade de encruamento, muito maiores do que aquela observada nos aços de alta resistência tradicionais. No entanto, o elevado teor de manganês pode apresentar complicações para sua fabricação. [1][4]

As transformações mecânicas ocorridas em um aço TWIP são complexas: A maclação ocorre para temperaturas próximas a temperatura ambiente e também para temperaturas criogênicas (até 200 graus célsius negativos). A maclação, por outro lado, vai progressivamente deixando de ocorrer conforme a temperatura aumenta. A figura abaixo mostra maclas de deformação a baixas temperaturas. [16] [17] [5] [7]



Figura 08: Maclas de deformação em um aço TWIP (25% Mn e 3% Al) deformado a -80°C

Para temperaturas, da ordem de 150 a 200 °C, observa-se a ocorrência do efeito Portevin-Le Chatelier. Este efeito induz descontinuidades na curva de deformação em função do tempo do aço e é devida interação de discordâncias e átomos de soluto. A temperatura ambiente, ocorrem descontinuidades diferentes daquelas observadas no efeito Portevin-Le Chatelier, sendo que teoriza-se que estas descontinuidades são justamente devidas a presença de maclas no aço. [16] [18].

Além da temperatura, a tensão aplicada no material é determinante nos mecanismos de transformação mecânica: para tensões consideradas baixas (isto é, dentro do limite elástico ou então no início da fase plástica), a deformação ocorre principalmente por escorregamento de discordâncias, havendo pouca ou nenhuma maclação. Conforme a tensão aumenta, inicia-se a maclação primária, na qual se formam maclas de mesma orientação no interior dos grãos. Caso continuemos a aumentar a tensão, aparecerão as chamadas maclas secundárias, que interceptam as maclas primárias. Esta intersecção entre maclas é responsável por um aumento na taxa de encruamento. A maclação secundária pode ocorrer após ou durante a maclação primária. Em um estágio final, as maclas já existentes passam a impedir a produção de novas maclas, reduzindo a taxa de encruamento. [18] [15]

Além da maclação, o manganês também apresenta a propriedade de reagir com o enxofre da liga, formando um sulfeto estável e de alto ponto de fusão, muito maior que aquele do sulfeto de ferro: O ponto de fusão do sulfeto de manganês é de 1610 °C, ao passo que o ponto de fusão do sulfeto de ferro é de 1194 °C. A formação de um sulfeto de maior ponto de fusão uma redução na tendência de fragilização a quente. Estas inclusões normalmente são formadas durante a solidificação do aço e podem ser globulares (para aços acalmados ao silício), dendríticas (em aços desoxidados ao Al, mas sem excesso deste elemento), e angulares (em aços desoxidados ao Al com excesso deste elemento). [19][20] [21]

Conforme será observado, uma das utilidades previstas para aços TWIP é na construção de dutos de óleo. Isto, por sua vez, pode demandar soldagem dos tubos (caso dos tubos com costura). Sendo portanto interessante observar sua soldabilidade. Para o cálculo do carbono equivalente, o manganês apresenta um sexto do efeito do carbono propriamente dito, conforme equação abaixo: [22][20]

$$C_{eq} = \frac{C + \frac{Mn}{6}}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Equação 1: cálculo do carbono equivalente em função dos teores de elementos de liga

Os teores de manganês de um aço TWIP giram em torno de 20%, sendo assim, a soldabilidade de um aço TWIP, no que se diz respeito ao carbono-equivalente seria próxima a aquela observada em um ferro fundido. A baixa ductilidade a quente de um aço TWIP, pode também apresentar influências negativas na soldabilidade. [22] [20]

Outra questão que deve ser mencionada a cerca da soldabilidade dos aços ao Manganês está no fato de que o manganês é um material de fácil oxidação. Sendo assim, faz-se necessária a adoção de gases redutores para a proteção do fluxo. Obviamente, o consumível a ser utilizado deve ter um teor de manganês suficientemente alto para que não ocorra, por exemplo, formação de fase ferrítica, o que faria com que a solda seja um ponto de grande fragilidade em comparação com o restante do aço. [22] [20]

Entretanto, apesar das propriedades únicas, os aços com elevado teor de manganês em geral, apresentam baixa usinabilidade e limite de escoamento. Sendo que os aços TWIP não são exceção: seu limite de escoamento pode ser tão baixo quanto 400 Mpa. De modo análogo ao que ocorre nos demais materiais; as propriedades mecânicas de um aço TWIP podem ser modificadas por tratamentos termomecânicos e microestruturais, tais como o refino do tamanho de grão, adição de precipitados, etc. [23] [1]

Aços TWIP apresentam grande número de sítios de nucleação, sendo assim, apresentam rápida cinética de recristalização. Observa-se também que é possível atingir combinações superiores de resistência e ductilidade por meio de um tratamento de deformação a frio seguido de recuperação. Neste tratamento, ocorre redução da densidade total de discordâncias no metal, mas é mantida a estrutura de maclas de deformação do aço. [23] [18] [1]

A figura abaixo mostra a comparação entre as curvas de tensão em função da deformação de dois aços TWIP com o mesmo teor de carbono e manganês; no entanto um deles sofreu adição de vanádio (teor de 0,21%) para precipitação de carbonetos deste mesmo material. Os carbonetos formados são do tipo esféricos, conforme podem ser observados na figura 10. [23]

Os materiais comparados na figura abaixo apresentam tamanhos de grão distintos: O aço com adição de vanádio apresenta tamanho médio de grão de 1,7 micra enquanto o aço sem esta adição apresenta tamanho médio de 2,5 micra. Todavia, o efeito do tamanho de grão no limite de escoamento em um sistema FeMnC pode ser calculado pela fórmula: [23]

$$\Delta\sigma = 0,4\mu_\lambda(b/D)^{1/2}$$

Equação 2: efeito do tamanho de grão no limite de escoamento de um material

Onde:

μ_λ é o módulo de cisalhamento,
b é o vetor de burgers (em nm),
D é o tamanho de grão. [23]

Sendo assim, podemos verificar que esta adição de vanádio contribuiu para um aumento de 140 Mpa no limite de escoamento do aço. No entanto, o aumento teórico do limite de escoamento por precipitação (precipitados incoerentes) pode ser dado pela fórmula:

$$\Delta\sigma_{th} = M \cdot 0,81 \left(\frac{6f_v}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\mu_\gamma b}{\langle d \rangle}$$

Equação 3: efeito de teor e tamanho de precipitados no limite de escoamento

Onde:

M= 3 (fator de Taylor)
 f_v é a fração volumétrica de precipitados.
 μ_λ é o módulo de cisalhamento,
b é o vetor de burgers (em nm),
 $\langle d \rangle$ é o tamanho médio dos precipitados

Se todo o vanádio adicionado houvesse precipitado, teríamos um f_v de 0,32%. o que nos levaria a um aumento de 430 Mpa no limite de escoamento. Isto nos leva a conclusão que ainda há uma grande quantidade de vanádio em solução no aço.

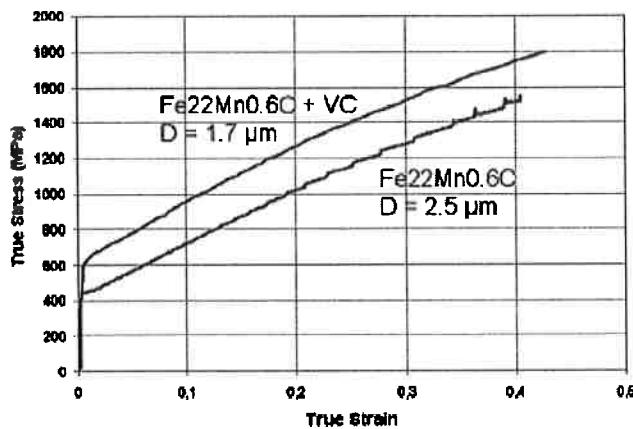


Figura 09: Comparação entre as curvas tensão x deformação de um aço TWIP com adição de carbonetos de vanádio e um aço sem esta adição. [23]

Na figura 10, podemos observar, conforme dito anteriormente, que houve formação de carbonetos esféricos. No entanto, além disso, observa-se que as maclas atravessam o precipitado, não sendo bloqueadas pelo mesmo. O que comprova os dados do gráfico anterior de que a precipitação não influencia o mecanismo de maclação, responsável pela alta resistência mecânica dos aços TWIP.

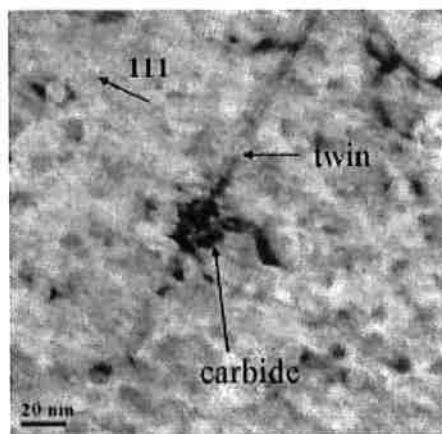


Figura 10: micrografia de um aço TWIP submetido a adição de vanádio e precipitação de carbonetos. No centro da foto observamos um carboneto esférico de vanádio e uma macla atravessando-o.

O alto limite de resistência do aço TWIP proporciona elevado limite de fadiga. Pois o limite de fadiga é uma função do limite de resistência. É interessante notar que o fenômeno da maclação, que é o principal fator determinante do elevado limite de resistência do aço TWIP, não ocorre para

as tensões verificadas em testes de fadiga, porém um aço TWIP tem limites da fadiga considerados elevados, conforme observado na figura 12. Ocorre, no entanto, aumento de espessura das maclas devido ao desaparecimento de discordâncias. O mecanismo exato que leva a alta resistência à fadiga deste aço ainda está sendo estudado. [7]

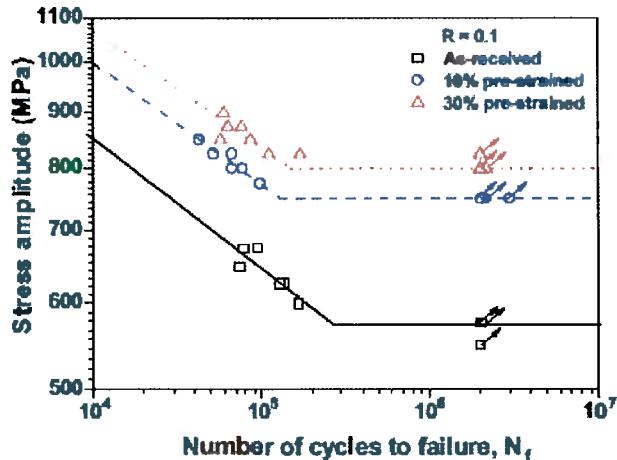


Figura 11: Comparativo de amplitude de tensão com número de ciclos para falha entre três amostras de aço TWIP. A linha vermelha indica uma amostra submetida a 30% de deformação antes do ensaio de fadiga se iniciar, a linha azul indica uma amostra submetida a 10% de deformação antes do ensaio de fadiga se iniciar, a linha negra corresponde a amostra não deformada antes do ensaio. Setas nas amostras indicam que as mesmas não se romperam durante o teste. [7]

Tabela 02: comparativo de limite de escoamento e resistência em função de pré deformação em aços TWIP[7]

Pré deformação (%)	limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)
0	471	1004
10	749	1129
30	1152	1357

3.1.2 - Utilização

Os aços TWIP apresentam grande ductilidade, tenacidade e capacidade de encruamento. Sendo assim, ao receber solicitação mecânica, este material se deforma, absorvendo a energia mecânica. Estas propriedades fazem deste material um excelente absorvedor de impacto.[1]

As propriedades acima mencionadas do aço TWIP, são de grande interesse para a indústria automobilística, uma vez que este aço tem maior capacidade de absorção de energia mecânica (o que é vital, em caso de colisão), permitindo que o mesmo seja utilizado na construção dos para-choques e demais partes do veículo que tem por função absorver o impacto de uma colisão. E devido a sua alta resistência, permite que as peças sejam menos robustas, o que contribui para a redução do peso do automóvel. Isto, por sua vez, é importante para a redução do consumo de combustível do automóvel. [24] [25]

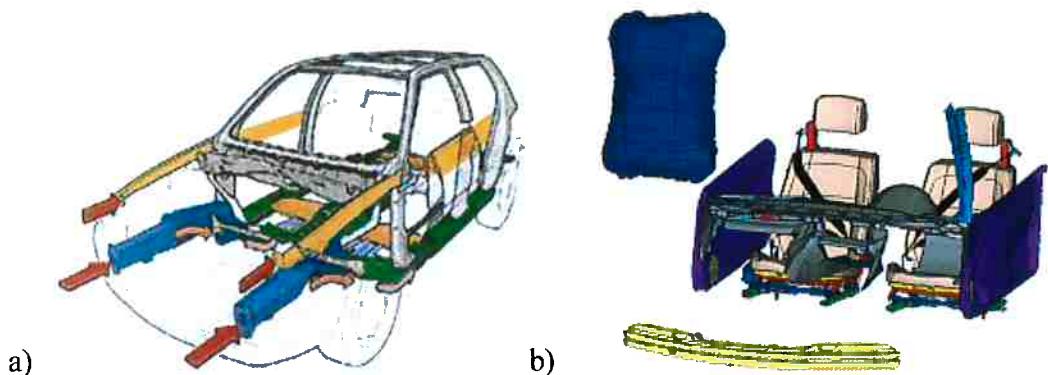


Figura 12: Destaque de estruturas automotivas dedicadas a absorção de impactos, nas quais as propriedades mecânicas do aço TWIP são de grande interesse. Na figura (a), observamos as estruturas destinadas à absorção de impactos frontais(destacadas em amarelo, azul e verde), ao passo que na figura (b), observamos estruturas destinadas à absorção de impactos laterais (em azul e púrpura).[5]

Este aço apresenta também moderada resistência a corrosão, sendo que tem sido estudado seu uso em substituição aos aços inoxidáveis austeníticos (ao Ni), em aplicações nas quais há a necessidade de resistência à corrosão, porém não tão elevada quanto aquela que um aço inoxidável poderia oferecer. Estuda-se também alternativas como a passivação do aço ao manganês para ampliar o leque de aplicações dos aços ao manganês sob meios corrosivos.[1][5]

Os aços com elevados teores de manganês, especialmente o TWIP, também têm sido propostos para aplicações criogênicas, uma vez que são capazes de apresentar boa ductilidade mesmo a baixas temperaturas, um exemplo deste tipo de aplicação é a construção de dutos em regiões de baixas temperaturas ambiente. No entanto, há a necessidade de se atentar para a baixa soldabilidade deste aço [1] [5]

3.2 – Impactos da produção do Aço TWIP nos diferentes segmentos da indústria metalúrgica

3.2.1- Mineração

A produção de um aço TWIP exigirá matérias-primas metalúrgicas similares àquelas exigidas para a produção da maior parte dos materiais ferrosos: minérios de manganês, minério de ferro e carbonáceos (carvão mineral, vegetal e coque) e sendo os principais. [26]

O minério de manganês pode ser do tipo óxido ou carbonato e é exigido para a produção da maior parte dos aços, devido a seu papel estabilizante do enxofre e de favorecer a formação de fase austenítica (nos aços em que isto é desejável). No entanto, no caso do aço TWIP, ele seria exigido em grandes quantidades para que se atinja o teor desejado para que o efeito TWIP ocorra. A produção deste aço, portanto, apresenta maior vulnerabilidade do que a dos demais aços a exposição ao preço internacional do minério de manganês, dado o alto teor deste elemento presente neste material. Para o caso de um produtor instalado no Brasil, este risco seria menor, dado que o país possui reservas significativas do minério, conforme será visto na tabela abaixo, um produtor instalado no mundo desenvolvido seria mais vulnerável. [26]

A tabela abaixo discrimina as reservas e produção mundiais de minério de manganês. Os dados relativos as reservas podem apresentar variação de uma fonte para outra, uma vez que as instituições envolvidas na atividade mineral utilizam critérios distintos para caracterizar quais depósitos minerais podem ser considerados como reservas e quais não o são.

Tabela 03: Produção e reservas mundiais de manganês observa-se que o Brasil possui a segunda maior reserva de manganês e a maior produção deste metal. Garantindo menor vulnerabilidade ao mercado internacional. [27]

Discriminação Países	Reservas (10 ³ t)		Produção (10 ³ t)		
	2007 (P)	%	2006 (R)	2007 (P)	%
Brasil	570.000	10,1	3.128	1.866*	16,6
Africa do Sul	4.000.000	70,6	2.300	2.300	20,4
Austrália	160.000	2,8	1.370	1.000	8,9
China	100.000	1,8	1.600	1.600	14,2
Gabão	160.000	2,8	1.350	1.550	13,8
Índia	150.000	2,7	811	650	5,8
México	9.000	0,2	133	130	1,2
Ucrânia	520.000	9,2	820	820	7,3
Outros Países	1.360	1.360	12,1
Total	5.669.000	100,0	12.872	11.276	100,0

Fontes: DNPM-DIDEM e Mineral Commodity Summaries – 2007. Nota: (p) dados preliminares; (r) dados revisados.

O minério de ferro é, em sua maior parte, constituído de hematita seguido pela magnetita, embora no Brasil apenas a primeira seja matéria prima de destaque. Historicamente, o preço e a disponibilidade do minério de ferro não são gargalos de destaque para a siderurgia e, embora esta tendência tenha sido revertida nos últimos anos, com o custo do minério de ferro tornando-se mais expressivo no custo final do aço; o aço TWIP não apresenta nenhuma exposição ao preço do minério de ferro, além daquela que os demais aços apresentam. Sendo assim, não haveria grandes questões adicionais na produção de aço TWIP devido ao minério de ferro. [28]

A principal fonte de material carbonáceo é o coque produzido a partir de carvão mineral coqueificável (esta faixa compreende os carvões betuminosos e sub-betuminosos, excluindo turfas e antracitos). O carvão mineral deve ser convertido em coque tanto para uso no alto forno como para uso nos fornos elétricos a arco, sendo que no primeiro devido a maior resistência mecânica do coque e no segundo por razões de segurança. O coque é um material de alto preço, sendo assim, um processo de produção de aço TWIP não deve produzir gasto elevado de coque, sob pena de ser considerado inviável. O carvão vegetal pode e, efetivamente já foi utilizado em operações de fornos elétricos a arco aonde vantagens foram reportadas em relação ao coque, devido a maior resistência elétrica e menor teor de cinzas. No entanto o baixo peso do carvão vegetal torna seu transporte caro. O coque de petróleo apresenta teor de impurezas menor do que o do coque mineral, com exceção do enxofre. Infelizmente, como o enxofre é considerado elemento indesejável no aço para a maioria das aplicações, o uso de coque de petróleo na siderurgia é restrito. [26]

3.2.2 – Ferro-Ligas

Ferro-ligas são ligas que contém ferro, carbono e obrigatoriamente mais um ou dois elementos de liga. O objetivo das ferro-ligas é adicionar o elemento de liga contido no mesmo no interior do banho. Por exemplo: uma liga ferro-cromo apresenta elevado teor de cromo e é produzida com o intuito de adicionar cromo ao banho. As ferro ligas são normalmente produzidas em fornos elétricos, nos quais ocorre a adição de minérios de ferro, do elemento que se deseja na ferro-liga e de coque. Algumas ligas, por outro lado, exigem uma etapa extra, de redução silicotérmica (ferro-manganês de baixo carbono) ou aluminotérmicas (ferro-molibdênio ou ferro-titânio). É possível também produzir ferro ligas em altos-fornos. Na secção abaixo será exemplificada a produção de ferro-manganês em alto forno. [29]

Tabela 04: evolução da produção Brasileira de ferro-ligas no período de 1995 até 2004. [29]

EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO CHANGES ON PRODUCTION

FERROLIGAS FEROALLOYS	Unidade/Uni.t											
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	% 04/03	% 04/05
Fe Mn AC	100.053	181.080	124.132	112.956	62.126	88.845	66.111	125.650	124.415	122.409	-1,6	13,3
Fe Si Mn	167.102	232.216	175.919	124.455	145.364	171.304	180.236	182.731	261.656	285.629	9,2	70,0
Fe Mn Mo/BC	22.154	33.400	28.398	24.583	23.134	32.432	29.806	29.755	52.317	57.562	10,0	100
Ferroligas a base de Manganês Manganese Ferroalloys	297.369	447.476	328.449	262.097	233.644	292.581	276.251	338.166	438.393	465.600	6,2	56,6
Fe Si 75%	240.066	234.007	210.438	158.660	198.646	188.735	159.345	145.910	156.824	177.245	13,0	-28,2
Fe Si 45%	3.758	2.831	1.745	9.818	4.167	1.200	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	ND	ND
Fe Ca Si	27.192	ND	N.D.	N.D.	ND	N.D.	N.D.	N.D.	ND	ND	ND	ND
Si Metálico	115.756	150.054	136.854	126.744	136.577	166.344	112.123	133.350	180.937	219.813	21,5	89,9
Ferroligas a base de Silício Silicon Ferroalloys	386.772	386.882	349.067	293.022	337.405	358.279	271.468	279.300	337.761	367.058	17,6	2,7
Fe Cr AC	67.646	65.324	67.429	56.956	71.291	124.227	76.951	118.701	160.816	156.222	-1,6	80,5
Fe Si Cr	5.129	4.622	7.056	6.824	11.910	7.790	5.899	10.522	8.151	11.560	41,6	125,4
Fe Cr BC	8.194	7.285	0	8.697	7.583	10.335	7.477	4.474	10.441	19.054	82,5	132,5
Ferroligas a base de Cromo Chromium Ferroalloys	100.969	77.231	74.485	72.507	90.784	142.352	90.327	133.697	179.406	188.836	5,3	77,7
Fe Ni AC	1.095	729	600	278	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe Ni BC	29.496	26.853	31.415	26.111	19.807	19.315	17.966	19.874	19.376	20.336	5,0	-31,1
Ferroligas a base de Níquel Nickel Ferroalloys	30.581	26.542	32.015	26.389	19.807	19.315	17.966	19.874	19.376	20.336	5,0	-31,1
Fe Si Mg	12.894	13.398	14.076	7.717	9.882	9.658	11.032	14.552	14.040	37.031	163,8	187,2
Fe Si Zr	609	0	1.046	1.170	0	0	0	ND	ND	ND	ND	ND
Fe Nb	23.185	21.522	25.475	30.973	28.557	27.359	37.411	36.450	37.303	35.863	-3,9	54,7
Fe Mo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe P/Fe B	695	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inoculante/inoculants Ligas Especiais/Special Alloys	19.237	19.384	18.471	10.817	18.642	20.232	14.884	11.100	18.300	31.986	74,8	66,3
Ferroligas Especiais Special Ferroalloys	56.680	54.306	59.058	87.451	88.566	92.439	79.750	87.402	108.202	150.750	39,2	168,0
TOTAL	872.361	895.422	843.084	721.376	762.206	802.966	735.762	859.439	1.063.142	1.222.582	12,9	46,1

Fonte/Source ABRAFE

Para o caso dos aços TWIP, a principal ferro-liga necessária seria o ferro-manganês, cuja produção será detalhada a diante na seção sobre o forno elétrico a arco. No Brasil, existem quatorze empresas produtoras de ferro-ligas. Sendo que destas 14, duas produzem ferro-manganês de alto carbono e apenas uma produz ferro manganês de baixo carbono. A capacidade produtiva anual de ferro manganês de alto e baixo carbono são de, respectivamente, 160 e 41 mil toneladas e o consumo médio destas ligas é de 3,5 e 0,6 kg de ferro-liga/tonelada de aço. [30] [7]

3.2.3– Alto-forno

Um alto-forno, é um forno em contra-corrente: a carga de minério e coque é adicionada pela abertura superior, faz-se a descarga de metal líquido pela extremidade inferior. O coque atua como fonte de energia e carbono para a redução da carga metálica. As maiores temperaturas, assim como a carga mais reduzida e a atmosfera mais redutora encontram-se na parte de baixo do Alto forno. Isto ocasiona um fluxo em contra-corrente, no qual o ar menos rico em CO segue para a parte

superior, aonde a carga apresenta-se menos reduzida, aumentando a eficiência deste forno.[31]

O alto-forno é utilizado majoritariamente para a produção de ferro-gusa. No entanto, é possível a produção de ligas de ferro com alto teor de manganês diretamente neste reator. No entanto, a presença de teores de manganês elevados no alto-forno aumenta dramaticamente o “coke rate”: no período pré segunda guerra mundial, produzia-se ferro-ligas de manganês, via alto forno. No entanto, isto exigia um “coke rate” de mais de 2 toneladas de coque por tonelada de liga. Sendo assim, não seria então vantajoso efetuar modificações em alto-forno para a produção do TWIP. [31] [6].

3.2.4– Conversor LD

Um conversor LD é um reator de batelada cilíndrico, revestido internamente por materiais refratários. Cujo objetivo primordial é promover a descarburação do ferro-gusa produzido em alto forno. Neste reator, uma das extremidades é fechada e a outra é aberta para que ocorra o carregamento, sendo que a carga é feita por esta boca. Ao mesmo tempo, após a carga esta mesma abertura recebe uma lança, responsável por soprar oxigênio no reator; o oxigênio reagirá com o carbono, produzindo monóxido de carbono. [32]

A presença de teores tão elevados de manganês pode ocasionar o efeito do “slopping of slag” (derramamento de escória) da boca do conversor, causando redução do rendimento metálico. Além disso, pode haver aumento do consumo de refratários. O aumento no consumo de refratários aumenta também o custo da produção de aço. Não apenas pelo custo do refratário propriamente dito, mas principalmente pelo fato de exigir paradas mais frequentes do conversor para reparos. Além disso, ocorre remoção do manganês para do metal para a escória no decorrer do processo em conversor. Isto consumiria todo o manganês necessário para a fabricação do aço TWIP. [32] [33].

3.2.5 – refino secundário

O refino secundário consiste em partir do metal produzido pelo conversor LD ou pelo forno elétrico e efetuar ajustes finos na composição química do mesmo, com a remoção de impurezas e adição dos elementos de liga necessários, sendo que as principais preocupações desta etapa são as inclusões e a desgasificação do material. Esta etapa surgiu como exigência da adoção do lingotamento contínuo na siderurgia, que exige uma composição química mais finamente ajustada

do que aquela exigida pelo lingotamento convencional e para possibilitar a produção de novas ligas de cujas faixas de composição química são mais estreitas do que aquelas produzidas antes da adoção do refino secundário. Isto, no caso de um aço TWIP, é especialmente importante, dado que este aço apresenta um teor de manganês muito mais elevado do que aquele que poderia ser adicionado no conversor.[34] [35]

O refino secundário envolve diversos processos e equipamentos, dentre eles podemos citar a desgaseificação a vácuo (VD), desgaseificação da vácuo e oxigênio (VOD), agitação com gás inerte por meio de ventaneiras ou tijolos porosos (IGP), descarburação com argônio e oxigênio (AOD), Desgaseificação a vácuo sob arco (VAD), forno panela (LF) e o ASEA-SKF. Estes processos objetivam efetuar dessulfuração, desoxidação, descarburação, aquecimento, adição de elementos de liga, desgaseificação, homogeneização e tratamento de inclusões. A tabela 05, abaixo, exemplifica as capacidades de cada um dos processos de efetuar os processos mencionados. [35]

Tabela 05: Capacidade dos diferentes processos de efetuar as diversas etapas envolvidas na metalurgia secundária. [35]

ETAPA:	PROCESSO:						
	VD	VOD	IGP	IM	VAD	LF	ASEA-SKF
Dessulfuração	Menor	Menor	Menor	SIM	SIM	SIM	SIM
Desoxidação	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Descarburação	Menor	SIM	Não	Não	Não	Não	SIM
Aquecimento	Não/SIM	SIM*	Não	Não	SIM	SIM	SIM
Adição de elementos de liga	Menor	SIM	Menor	Menor	SIM	SIM	SIM
Desgaseificação	SIM	SIM	Não	Não	SIM	Não	SIM
Homogeneização	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Remoção de inclusões	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Modificação de inclusões	Não	Não	Menor	SIM	SIM	SIM	SIM

Apenas pelas reações exotérmicas que ocorrem durante o tratamento*

Por ser esta a etapa na qual são feitas as adições de elementos de liga nas siderúrgicas integradas, o refino secundário tem grande interesse no estudo dos impactos relativos a produção do aço TWIP. O processo de adição de ferro-ligas ao banho metálico é bastante dependente da densidade da ferro-liga em questão: Obviamente, ferro-ligas de alta densidade tenderão a afundar no banho e as de baixa densidade flutuarão. O ferro-manganês, necessário para a produção do Aço TWIP se enquadra no segundo caso: trata-se de uma liga de baixa densidade. Devido a este fato, ele tende a flutuar e, consequentemente ficar próximo da escória, reagindo com a mesma, podendo haver perdas do material adicionado. O alto teor de manganês adicionado torna esta perda crítica. O refino secundário ataca este problema por meio da adição durante o vazamento do banho e também por meio de adição com agitação, garantindo melhor mistura da ferro-liga com o banho e minimizando sua perda para a escória. [35]

Outra forma de minimizar a perda de manganês para a escória é pelo uso de um equipamento CAS-OB (sigla em inglês para ajuste de composição sob borbulhamento de argônio e oxigênio em recipiente fechado). Este sistema consiste em um recipiente fechado no qual pode-se efetuar adições de elementos de liga e soprar oxigênio por uma lança superior e borbulhar argônio por orifícios inferiores e pela lança. Deste modo, é possível adicionar elementos e agitar o banho garantindo que os elementos de liga possam ser direcionados ao fundo e, consequentemente aumentar sua taxa de recuperação. [36]

Um fator importante a se considerar é que um maior teor de manganês envolveria também um maior ataque químico sobre os refratários dos equipamentos. O principal problema associado ao manganês está no óxido de manganês presente na escória, que reage com o refratório causando perda do mesmo. Os refratários Sílico-aluminosos são considerados suscetíveis ao ataque por manganês, não podendo ser utilizados em instalações que venham a lidar com corridas cuja composição inclua um alto teor de manganês. [37]

Por outro lado, há refratários disponíveis no mercado adequados para a siderurgia de aços ao manganês: Os refratários de óxido de magnésio são considerados resistentes ao ataque por parte do óxido de manganês. Sendo assim, uma instalação de refino secundário que venha a lidar com elevados teores de manganês, deve ou possuir refratários adequados, ou caso contrário, providenciar sua troca.[37]

3.2.6 – Forno elétrico a arco

3.2.6.1 – O forno elétrico:

Um forno elétrico a arco, conforme seu nome sugere, utiliza um arco elétrico para fornecer a energia necessária para a fusão da carga metálica. A carga atua como resistor, dissipando energia na forma de calor. O arco é gerado por eletrodos trifásicos de carbono ligados em triângulo (o uso de eletrodos monofásicos é possível, mas provou-se incapaz de competir comercialmente com os eletrodos trifásicos), este arco fica submerso quando a carga já está fundida e enterrado quando ainda há carga sólida. [36]

O forno elétrico é composto pela tampa, pelo anel de topo, anéis de vedação, porta de carga, tap-hole (Bica), equipamentos elétricos, mecanismo de rotação, base, sistema de refrigeração, o mecanismo de movimentação do topo, e o sistema de limpeza de gases.[39]

A tampa de um forno elétrico a arco é feita de placas de aço soldadas e deve ser dimensionada para suportar o peso do refratário e a tensão resultante da expansão do mesmo. As temperaturas na tampa, não são tão altas como nas paredes ou a base. O Anel de topo é a peça na qual os refratários são posicionados e a água de refrigeração é circulada. Os anéis de vedação envolvem os eletrodos do forno elétrico e evitam perda de calor para o ambiente. A porta de carregamento, é posicionada diametralmente oposta ao tap-hole e é por onde a carga será adicionada ao forno com o mesmo em operação (antes a isso, a carga é adicionada pelo topo. Esta região deve ser refrigerada a água. [39]

Os equipamentos elétricos fornecem energia ao forno e serão detalhados mais adiante. O mecanismo de rotação do forno envolve um motor e um elemento que transmitirá torque ao motor para que o mesmo seja rotacionado. Este elemento pode ser uma engrenagem (mais confiável) ou uma correia (rompe-se em sobrecarga, protegendo o motor e o forno). A base consiste em um sistema que apoia a tampa e os eletrodos. O sistema de refrigeração de um forno consiste em dutos que transportam água pelas regiões refrigeradas (portas e anéis de vedação por exemplo), a alta vazão de água (pode chegar a $80 \text{ m}^3/\text{h}$) garante que os setores refrigerados não superaquecerão. O mecanismo de movimentação de topo existe para movimentar o topo do forno e permitir o

carregamento do forno. O sistema de limpeza de gases, coleta os fumos produzidos pelo forno, filtra os mesmos, removendo material particulado, metais voláteis (zincos, por exemplo) [39]



Figura 13: forno elétrico, com destaque para o tap hole [40]

Um forno elétrico a arco é revestido internamente com materiais refratários de modo a minimizar a perda de calor para o ambiente e a fuga de corrente elétrica, além de resistir às altas temperaturas do banho metálico. Os setores do forno no qual o revestimento é mais crítico a base e as paredes do forno. [39]

Os refratários de um forno elétrico são, normalmente de magnesia, magnesia-cromita e doloma. Para o caso da fabricação de ligas de manganês com alto carbono, são usados refratários de carbono desde a base do forno até uma área considerada acima da zona de escória (isto é, uma área na qual a escória não chegará durante o processo de produção normal. Acima desta zona, os refratários são feitos de tijolos cerâmicos. [26] [39]

Os refratários devem apresentar, além das características mencionadas anteriormente, alta estabilidade química, uma vez que a escória produzida nas operações com fornos a arco são normalmente bastante reativas (conforme será mencionado adiante), e alta refratariedade (refractoriess) isto é, alta temperatura na qual ocorre amolecimento do material refratário e ele passa a se deformar sob a carga de seu próprio peso, mais o peso da carga a qual ele será submetido durante uma operação normal no forno. [39]

O carregamento da carga é feito por bateladas: o forno é aberto em sua parte superior, a carga é despejada no interior do forno, a tampa é fechada e retoma-se o processo de fusão da carga. A carga fundida ocupa menor volume no forno do que a carga sólida, uma vez que a carga sólida não é um bloco maciço de metal e sim várias partes juntas, contendo grandes espaços vazios entre si. Por isso, após fusão parcial da primeira carga, pode-se adicionar mais uma nova carga de metal. Este fato, permite que a resistência da carga varie menos no decorrer do processo, permitindo maior estabilidade de corrente. [38]

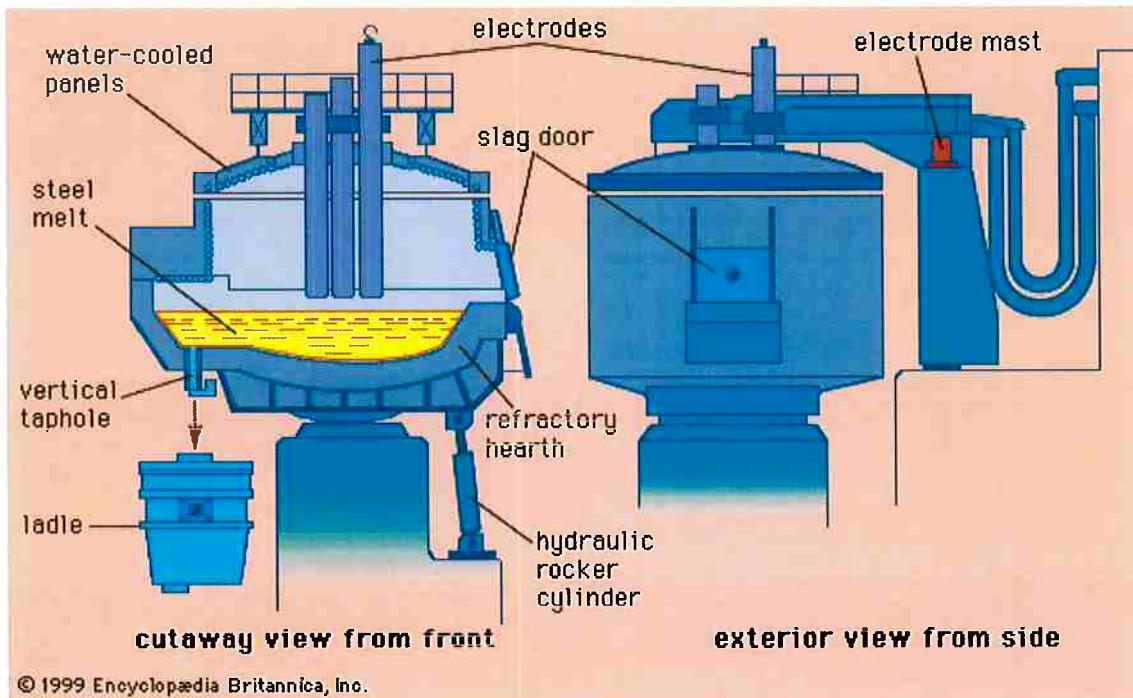


Figura 14: Desenho esquemático de um forno elétrico a arco, contendo seus principais componentes.[41]

O circuito elétrico de um forno elétrico é constituído por um transformador, responsável por converter a voltagem fornecida para a voltagem operacional, barramentos secundários, que conectam o lado de baixa voltagem do transformador aos cabos flexíveis; estes cabos, por sua vez, são responsáveis por conectar os barramentos à coluna de eletrodos, a flexibilidade é exigida devido ao fato de os eletrodos apresentarem movimento vertical (eles devem ser removidos do forno para carregamento). A coluna de eletrodos providencia suporte e capacidade de movimento para os eletrodos, deve também providenciar fácil substituição para eventuais eletrodos quebrados. Finalmente, os eletrodos propriamente ditos, que são feitos de carbono e tem a função de fornecer corrente elétrica à carga. [38]

O transformador necessário para a alimentação de um forno elétrico deve ser fabricado sob encomenda (isto é, não existem transformadores padronizados para a alimentação dos fornos elétricos). O transformador, em todos os casos, deve possuir capacidade de fornecer tensões a uma faixa mais larga do que a faixa de operação do forno (isto é, deve ser capaz de fornecer tensões superiores ao limite superior de operação e inferiores ao limite inferior de operação). A tensão de operação do forno, por sua vez depende de uma série de fatores como, por exemplo; a máxima corrente suportada pelos eletrodos, o fator de potência da instalação e, principalmente, a resistência

da carga. A resistência normalmente é calculada e acompanhada por meio de um fator K:

$$K = \pi * D * R$$

Equação 4: cálculo do fator K em função do diâmetro do eletrodo e da resistência

$$K = E * \pi * D / I$$

Equação 5: cálculo do fator K em função da tensão, do diâmetro do eletrodo e da corrente elétrica

Onde:
E - tensão eletrodo/terra
D - diâmetro do eletrdodo
R - resistência em ohms
K- Fator de resistência
I - corrente elétrica

Verifica-se na literatura especializada que as ferro-ligas de manganês possuem um fator K (e consequentemente resistência) menor do que o da maioria das demais ligas produzidas em fornos elétricos. A menor resistência leva a um fator de potência menor (pois a reatância se mantém constante, não importando a carga). O que pode exigir investimentos maiores em capacitores para a instalação que objetive produzir ligas de alto manganês. [38]

3.2.6.2- produção de aço alto manganês via forno elétrico:

O processo de produção de aço via forno elétrico envolve uma prática significativamente diferente daquela observada na produção de ferro-manganês e/ou via alto-forno e conversor LD. O forno elétrico a arco, neste caso, é carregado com sucata de aço e recebe adição de ferro-ligas e outros aditivos, conforme a necessidade. O fato do forno ser carregado com sucata e não com minério, permite que seja feito um controle mais preciso das impurezas presentes na liga e na composição, isto, por sua vez, permite que as etapas de refino sejam mais simples ou mesmo eliminadas. Em contrapartida, seriam necessárias adições maciças de ferro-ligas para atingirmos o teor de manganês necessário para que um aço seja efetivamente considerado TWIP. [34]

A produção de aço em forno elétrico a arco envolve diversos fenômenos físico-químicos, sendo que as principais são: A oxidação do carbono, oxidação do fósforo, a dessulfuração do banho metálico e a oxidação dos elementos de liga. [39]

A oxidação do carbono consiste na queima do carbono presente no banho metálico, promovendo a descarburação do mesmo. Além deste efeito, a oxidação provoca a formação de bolhas no banho, o que agita o mesmo e permite uma desgasificação e mistura de elementos de liga mais eficiente. O oxigênio da queima é transferido ao banho pela decomposição da wustita (FeO) em Ferro líquido e oxigênio (na forma de radical livre). O teor de oxigênio no banho disponível para a reação é determinado pela temperatura (diretamente proporcional), da atividade da wustita na escória e da difusão do oxigênio na escória, sendo esta última a etapa mais lenta. [39]

A oxidação do fósforo, consiste na reação do fósforo em solução no banho com a wustita e a cal de modo a formar fosfato de tetracálcio ($(\text{CaO})_4\text{P}_2\text{O}_5$) na escória. Este processo é favorecido por altos teores de FeO e CaO na escória e por baixos teores de sílica, uma vez que a sílica se combina com a Cal, diminuindo o teor deste material disponível para reação com o fósforo. Além disso, a desfosforação via oxidação é desfavorecida termodinamicamente a altas temperaturas, sendo assim, a oxidação do fósforo no forno a arco é limitada. [39]

A dessulfuração do aço é necessária devido ao fato de o enxofre formar inclusões de sulfeto de ferro (de baixo ponto de fusão), que tendem a se acumular nos contornos de grão, fazendo com que o metal falhe a tensões menores. A dessulfuração ocorre via interface metal-escória e normalmente é desfavorecida quando há oxigênio sendo adsorvido por esta camada, ocorrendo significativamente apenas após a queda do teor de oxigênio no banho para teores próximos a 0,02%. A dessulfuração ocorre por reação dos sulfetos de ferro com elementos que formam sulfetos mais estáveis que o sulfeto de ferro, como terras-raras, manganês e cálcio. Normalmente isto ocorre pela reação do sulfeto de ferro, com os óxidos de manganês e cálcio. A dessulfuração é favorecida por alta basicidade de escória e baixa atividade de óxido de ferro (caso a atividade desta substância seja elevada, os sulfetos de manganês e cálcio tornam-se menos estáveis). [39]

A adição de oxigênio no banho, por outro lado, pode favorecer a oxidação dos elementos de liga adicionados. manganês, silício, cromo e vanádio, por exemplo, são facilmente oxidáveis e caso o teor de oxigênio no banho seja elevado, estes elementos serão perdidos para a escória. [39]

O controle da sucata a ser carregada no forno, conforme mencionado acima, é importante para a determinação da qualidade do aço a ser produzido. Deve-se atentar principalmente para a presença de elementos não oxidáveis ou cuja oxidação ocorre apenas parcialmente. Pois o principal mecanismo de remoção de impurezas em um forno elétrico a arco é, justamente a oxidação, sendo

assim estes elementos, uma vez carregados, não poderão ser removidos. Para tal, as sucatas são classificadas em: 1- sucatas que contém elementos não oxidáveis tais como o Cu, Ni, W, entre outros. 2- sucatas que contém elementos parcialmente oxidáveis, tais como Cr ou P. 3- sucatas contendo apenas elementos totalmente oxidáveis como Al e Ti. 4- sucatas contendo elementos voláteis como Zn e Pb. Sendo que as sucatas do tipo 2 e 3 são consideradas como as melhores para o trabalho em forno elétrico a arco. A sucata do tipo 4, contendo metais voláteis, pode ser utilizada mas requer maior controle dos fumos produzidos. A sucata do tipo 1, deve ter seu teor rigidamente controlado no banho devido ao problema já exposto sobre a remoção dos elementos.[34]

A operação de um forno elétrico a arco para produção de aço também se utiliza de escórias diferentes, de acordo com o produto desejado. Esta escória pode ser do tipo oxidante ou redutora, de acordo com o produto desejado. A escória oxidante é utilizada na técnica de produção de escória única, já a redutora, é utilizada na técnica de escória dupla. Esta técnica, por sua vez, utiliza a escória oxidante em uma primeira etapa e, após esta, utiliza a escória redutora.[34]

A escória oxidante é utilizada para a produção de aços carbono e aços baixa liga, esta é uma escória com altos teores de óxidos de ferro e manganês. (13-20% de óxido de ferro e 10-15% de óxido de manganês), no entanto, as especificações desta escória não são rígidas e o aço produzido utilizando-se esta escória apresenta qualidade inferior a aquela produzida via escória redutora. [34]

A escória redutora, apresenta menores teores de óxido de ferro (0,5 a 1%) e é isenta de óxido de manganês, podendo, no entanto, receber uma adição de 1 a 2% de carbureto ou ferro-silício para auxiliar a redução. A principal função da escória redutora é aumentar a recuperação de elementos de liga no banho e maximizar a retirada de enxofre do mesmo. [34]

O forno elétrico a arco é mais indicado para uma adição de manganês do que um alto-forno ou então um conversor LD, boa parte da produção de ferro-ligas de manganês (cujo teor de manganês é de 72 a 80% de manganês, consideravelmente maior do que o teor do aço TWIP) é feita por esta via, o que é um bom indicativo da viabilidade da produção por este processo. [38]

No entanto, a produção de aços de alto teor de manganês apresenta problemas devido ao fato de este metal possuir uma volatilidade considerável. Embora o ponto de ebulação do manganês esteja a 2046 °C; o metal apresenta alta pressão de vapor a temperaturas próximas daquelas

atingidas em fornos elétricos. Por exemplo: 0,05 atm a 1600 °C). Isto pode ser um problema especialmente nos casos em que se desejam altos teores de cromo no aço, uma vez que é prática comum a redução da pressão parcial de monóxido de carbono, para a produção de aços com alto teor de cromo. Este fato contribui para o aumento da volatilização do manganês. [38]

Há dificuldades também relativas às condições de escória: O Óxido de manganês, quando em presença de sílica, pode formar dois silicatos de manganês ($MnSiO_3$ e Mn_2SiO_4), sendo que o manganês é muito mais difícil de ser reduzido da forma de silicato do que da forma de óxido, para que a redução do silicato ocorra, é necessário remover o óxido de manganês desta forma por meio da adição de dolomita. A adição de dolomita, por sua vez, apresenta o efeito indesejado de aumentar a viscosidade da escória, exigindo maiores temperaturas de processo para que a viscosidade da escória permaneça em níveis aceitáveis para o processo. No entanto, conforme mencionado acima. Uma temperatura de processo mais alta, leva a maior volatilização do manganês. [38] [34].

Devido ao alto teor de manganês dos aços TWIP, vamos considerar dois métodos para sua produção. O primeiro será produzí-lo pelo mesmo processo de produção de ferro-ligas de manganês. Em seguida, será analisado o processo de produção de um aço via adição de ferro-manganês. [26]

A produção de ferro ligas de manganês é feita por duas maneiras: uma delas é conhecida como “técnica da escória descartada”(em inglês “discharted slag practice”), e a outra como “técnica do alto teor de MnO” (“high MnO practice”). [26]

Nas duas técnicas, utiliza-se uma carga de minério de manganês, de ferro e coque. O coque deverá reduzir o minério e é sempre carregado primeiro. A carga de coque adicionada deve ser finamente controlada, pois caso haja pouco coque, o minério não será reduzido totalmente e caso haja muito, não apenas haverá desperdício de matéria-prima como também o teor de silício do produto final é grandemente aumentado. [39]

A primeira técnica consiste em redução de uma carga de minério de ferro e manganês em uma única etapa (com adição de coque), gera-se por este processo o ferro manganês de alto carbono (com 80% de Mn) e uma escória de teor de manganês de 15 a 20% que será descartada. A perda por volatilização é de 5% do manganês adicionado na carga, a formação de escória exige grande adição de dolomita para aumentar a basicidade da escória e exige alto consumo de carbono e

eleticidade.[26]

Já a segunda, também conhecida como técnica da ausência de fluxantes (“fluxless”). Neste processo, a carga de processo é misturada de forma a produzir uma escória de 30-50% de MnO, esta escória será reprocessada para a produção, em paralelo de ferro-silico-manganês, este reprocessamento garante que o teor da escória descartada seja de 5%. [26]

O produto gerado por estes processos é o ferro-manganês de alto carbono, cujo teor de carbono (até 7%) é incompatível com o teor exigido para que a liga seja considerada como aço. Para a fabricação de ferro-manganês de baixo carbono, utiliza-se outra liga de manganês (o ferro-silico-manganês, mencionado acima.) como redutor ao invés do carbono. Esta adição permite a produção de ligas cujo teor de carbono pode chegar a 0,5 %. No entanto, o ferro-silico-manganês não é um insumo barato (pode chegar a sete vezes o custo da dolomita, por exemplo), e este processo permite uma recuperação de manganês muito baixa. [42] [39] [43]

Uma alternativa para a produção de ligas de ferro-manganês com baixo teor de carbono, seria a utilização de pelotas auto-redutoras de manganês. Uma pelota auto-redutora de manganês consiste em um composto de minério de manganês, coque, elementos formadores de escória e um aglomerante (normalmente cimento Portland) que é adicionado a um disco de pelotização (similar ao da pelotização de minério de ferro) no qual as pelotas são formadas. O aglomerante tem a função de manter a coesão da pelota, os demais componentes têm função metalúrgica (isto é, atuam na produção do metal). [44]

Foi constatado que pelotas auto-redutoras de manganês podem produzir uma liga FeMn cujo teor de carbono é consideravelmente mais baixo do que aquele observado em ferro-ligas FeMn baixo carbono: a liga produzida por pelotas auto-redutoras chega a apresentar teor de carbono 5 vezes menor do que esta última. [44]

A produção de ferro-manganês por meio da adição de minério de manganês levanta uma preocupação que está no fato de que é comum que o minério de manganês esteja contaminado por fósforo. A presença de fósforo ocasiona a perda de ductilidade do aço (ver figura abaixo) o que, para um aço TWIP, cuja principal característica é justamente a ductilidade, é especialmente indesejável. Para a produção de ferro-ligas, a desfosforação é considerada uma operação de alto custo e, normalmente não é realizada. No caso dos aços TWIP, seria forçosamente necessário realizá-la ou

então buscar por matérias-primas de menor teor de fósforo. [26] [1]

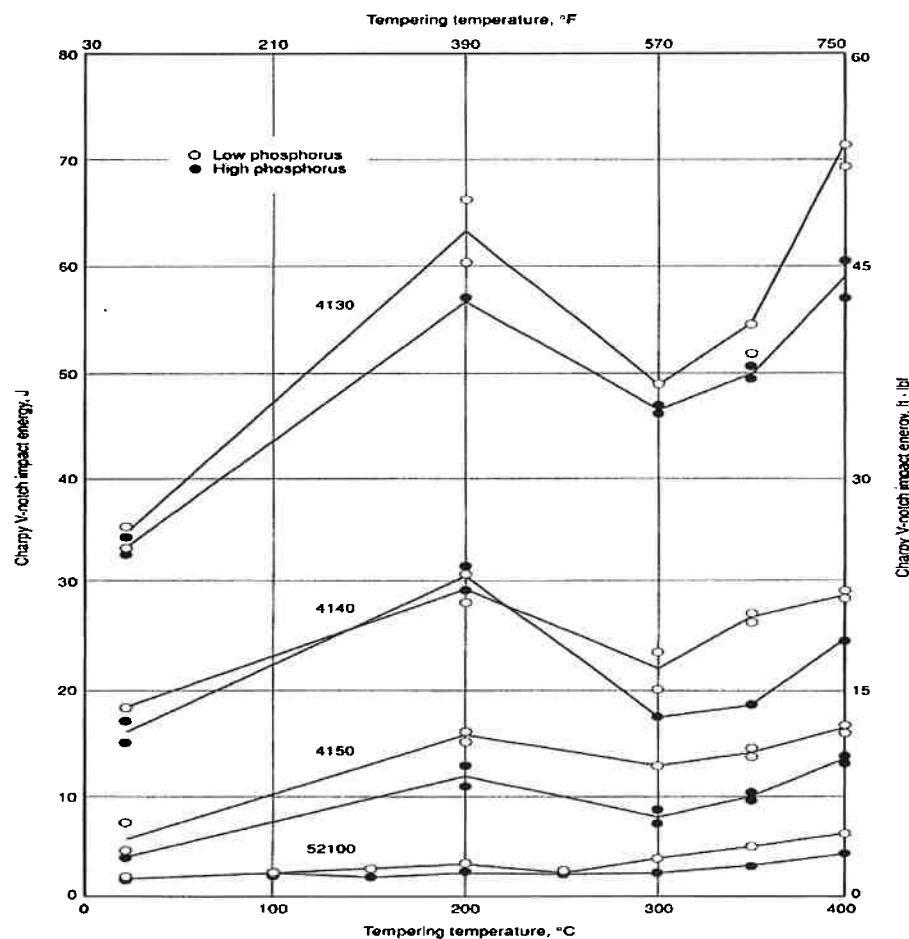


Figura 15 energia dissipada em ensaio charpy em função de temperatura de revenimento. Pontos brancos são aço de baixo fósforo, pontos negros são aços de alto fósforo. [1]

3.2.7– Lingotamento contínuo e laminação:

O processo de lingotamento consiste na solidificação controlada do aço líquido produzido na indústria siderúrgica. Este processo era tradicionalmente efetuado por meio do vazamento em moldes chamados de lingoteiras e posteriormente deixados ali para solidificação. Este processo é chamado de lingotamento convencional. Embora o lingotamento convencional ainda seja utilizado

industrialmente. Atualmente a maior parte da produção de aço é feita por lingotamento contínuo.[10][43]

O lingotamento contínuo é responsável por mais de 90% de todo o aço produzido no mundo. Este processo consiste em solidificar o aço em um molde de cobre, refrigerado a água. A refrigeração ocorre por aspersão de água e não apenas por contato com o molde porque ocorre contração durante a solidificação o que faz com que haja a formação de espaços vazios entre o molde e o aço nos trechos terminais do molde. Nestes trechos a transmissão de calor seria prejudicada. Após a solidificação de uma “casca” de espessura suficiente, o aço é resfriado pela aspersão direta de água. A espessura da casca é determinada pela pressão ferrostática a qual o mesmo está sendo submetido. O lingote possuindo casca sólida é removido do molde por meio de rolos que efetuam o suporte mecânico. [9][45]

Os rolos são divididos em rolos de suporte e rolos-guia. Os rolos de suporte são aqueles localizados mais próximos do molde e tem a função de fornecer o suporte mecânico ao material, são geralmente de três a seis pares, variando em função do metal a ser lingotado. Os rolos-guia, por sua vez, localizam-se nas porções terminais da máquina e tem a função de direcionar o metal em solidificação. [9] [45]

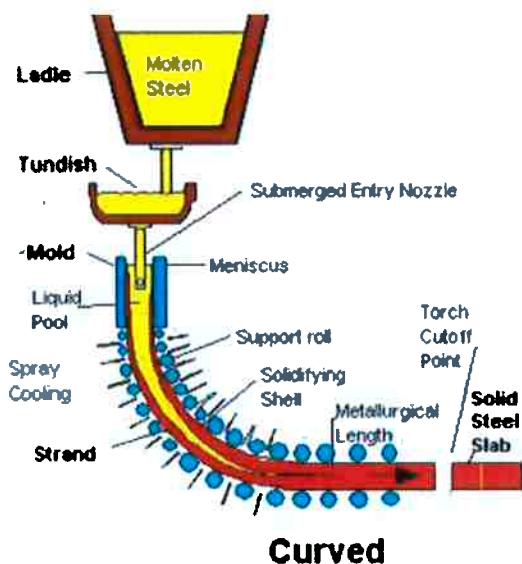


Figura 16: Esquema de máquinas de lingotamento contínuo do tipo curvo, que é o processo mais utilizado para o aço. Neste processo pode ser observada a panela vertendo o metal líquido sobre o molde de cobre. Abaixo vemos os rolos que retiram o aço já solidificado na superfície. [46]

Observa-se na figura 17 uma máquina de lingotamento contínuo. Esta máquina apresenta cinco veios, isto é, unidades nas quais o aço líquido é vertido e lingotado. Uma máquina padrão apresenta de 4 a 8 veios.

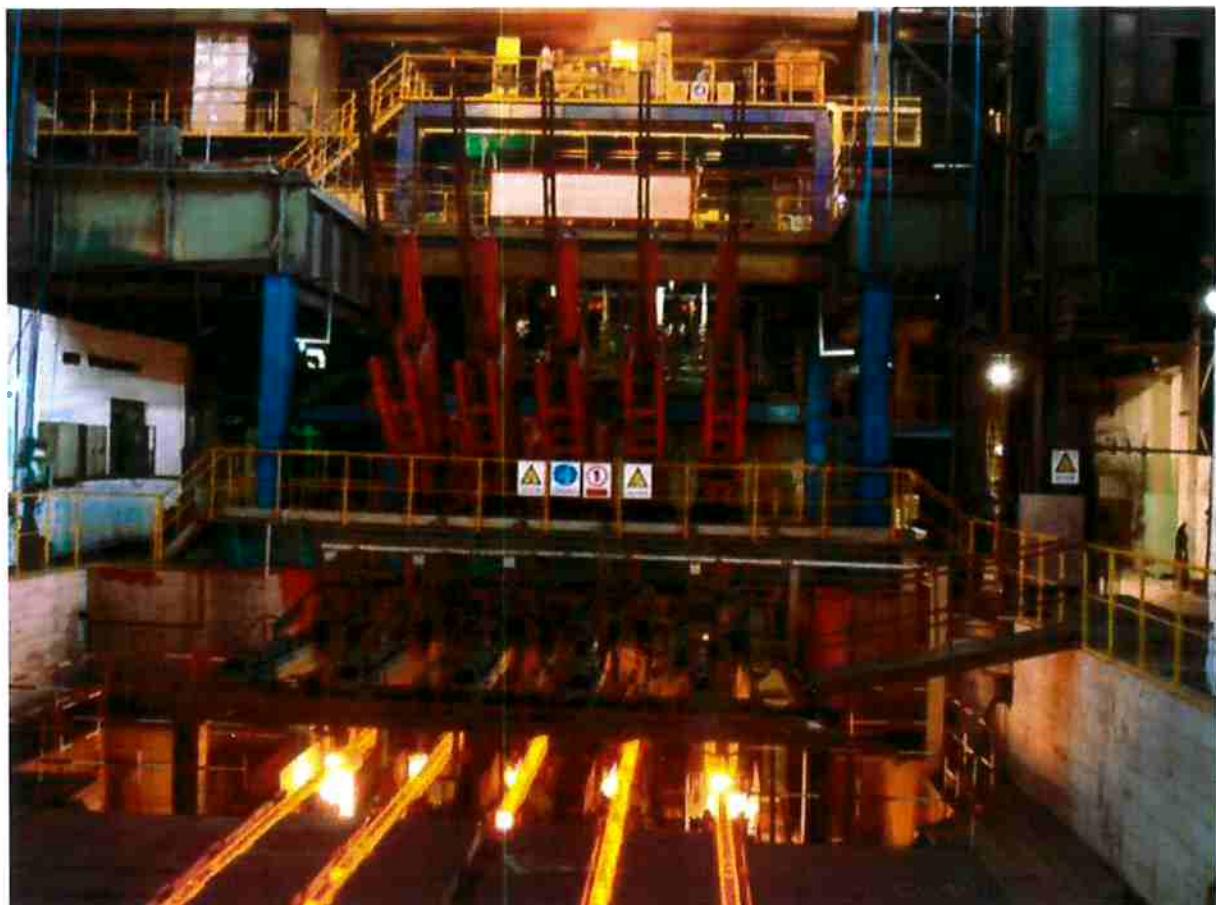


Figura 17: Instalação de Lingotamento contínuo produzida pela Shanghai Muhong Mechanical and Electrical Equipment Co, Ltd. [47]

Uma propriedade bastante importante tanto para o lingotamento contínuo como para a laminação é a ductilidade à quente. Foi constatado que a ductilidade a quente dos aços TWIP é menor que a da maioria dos aços austeníticos devido à formação de fase ferrítica a altas temperaturas. podendo ocorrer fratura intergranular (como principal mecanismo de falha) nas operações referidas. [1][48]

A Figura abaixo descreve o comportamento mecânico de um aço TWIP a temperaturas de 700 °C até 1300 °C, que são temperaturas na qual ocorre boa parte do trabalho a quente no processamento metalúrgico. Nesta faixa de temperatura, observa-se redução de alongamento

verdadeira conforme a temperatura aumenta desde os 700 graus até os 900 graus. Embora aumentos pontuais sejam observados a 1000 graus e depois outro a 1200, pode-se concluir que a capacidade de trabalho a quente do TWIP tende a decair com o aumento da temperatura. Fato este que provavelmente é devido ao fato de a deformação por maiação não ocorrer significativamente a temperaturas elevadas nos aços TWIP. [1] [17]

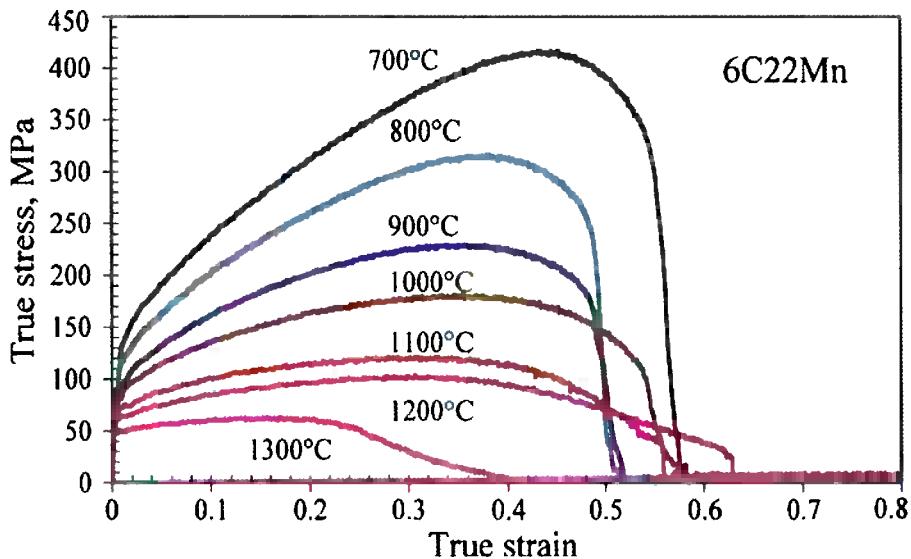


Figura 18: curva de tensão real em função da deformação real para um aço TWIP 6C22Mn (0,6% de carbono e 22% de manganês). Observa-se queda na deformação máxima e na tensão necessária para chegar a deformação máxima conforme a temperatura aumenta. O aumento da deformação máxima verificado de 900 °C para 1000 °C e de 1100 °C para 1200 °C é devido ao fenômeno da recristalização.

Observa-se também que os aços TWIP podem apresentar fragilização durante as operações de laminação à frio, o que não era esperado, dada sua ductilidade. Esta fragilização é provavelmente devido à segregação de manganês e carbono, que ocorre fortemente durante a solidificação. Esta segregação altera composição e energia de defeito de empilhamento de modo a ocorrer formação de fase martensítica, estimulado a fragilização. [49] [48]

A presença de elementos ferritizantes, pode provocar a nucleação de ferrita em contornos de grão o que também favorece a fragilização: a ferrita passa a ser submetida a tensões maiores do que a austenita no interior dos grãos, sendo assim, a coesão entre os grão fica prejudicada e aumentando a probabilidade de ocorrência de fratura intergranular.[1]

4. Discussão:

4.1 – Usos e propriedades.

Conforme foi observado anteriormente, o aço TWIP apresenta grande deformabilidade e capacidade de encurvamento. Este fato levou-o a ser cotado para a substituição dos materiais atualmente utilizados na produção de carrocerias de automóveis, visando a sua capacidade de absorção de impacto. No entanto, é possível que estas características sejam aplicadas em diferentes outras indústrias e aplicações nas quais a deformabilidade seja necessária. Além disso, sua capacidade de manter ductilidade mesmo à temperaturas tão baixas quanto -100 °C, provavelmente o cotará para aplicações nas quais seja necessário suportar tensão sob temperaturas criogênicas.

A restrição ao uso dos aços TWIP será para aplicações em altas temperaturas, dado o fato de que a elevada ductilidade deste material ocorre apenas para a temperatura ambiente e para as temperaturas criogênicas, um exemplo destas aplicações seria a indústria petrolífera, que atualmente se encontra em franca expansão em áreas de clima polar, tais como a Sibéria e o Alaska.

É possível que em um futuro próximo este aço seja empregado para aplicações de resistência à fadiga. Apesar de a maiação (o principal fenômeno responsável pela alta resistência do aço TWIP) não ocorrer para tensões baixas (características dos processos de fadiga). Este aço apresenta um limite de fadiga consideravelmente alto, conforme exibido na figura 12. Convém também frisar que o mecanismo de deformação do aço TWIP sob fadiga ainda é pouco conhecido, sendo assim é necessário um estudo mais detalhado do comportamento deste material antes que o mesmo possa ser recomendado para aplicações em fadiga. [7]

Outra restrição dos aços TWIP se deve também ao fato de os mesmos apresentarem limite de escoamento considerado baixo para um aço, os limites podem ser observados na Tabela 02. Assim como nos demais aços, este valor pode ser aumentado pelo refino do tamanho de grão ou então pela precipitação de carbonetos. No caso deste último método, é necessário que a precipitação não interfira com o processo de expansão das maclas, pois do

contrário o aço poderia perder sua capacidade de encruamento, que é sua principal vantagem sobre os demais aços. [23][1]

4.2 - Processo produtivo

Conforme foi visto anteriormente. O principal gargalo para a produção do aço TWIP é seu elevado teor de manganês, se comparado com os demais aços disponíveis no mercado. Para a indústria siderúrgica, isso impacta principalmente o setor de aciaria. Isto se deve ao fato de que as demais etapas da produção siderúrgica são muito menos flexíveis no que se diz respeito à composição química do material processado do que a aciaria. A aciaria é, normalmente, o setor de uma usina no qual ocorrem os maiores ajustes de composição química, sendo assim seria o setor mais bem preparado para se lidar com as adições maciças de manganês para que um aço adquira propriedades TWIP.

É necessário atentar também que instalações interessadas na produção de aço TWIP, mas que utilizem refratários de material suscetível ao ataque por manganês (tal como os refratários silício-aluminosos) deverão providenciar troca dos seus refratários por materiais mais adequados ao trabalho com altos teores de manganês. Isto, obviamente, impacta a empresa uma vez que esta troca exige investimentos.

A usina siderúrgica integrada que possua interesse na produção do aço TWIP, deveria consequentemente reaparelhar sua unidade de aciaria para lidar com a elevada quantidade de manganês necessária. Idealmente, isto seria feito pelo investimento em um equipamento do tipo CAS-OB (no caso da unidade que não o possua) que minimizaria a perda do manganês adicionado. Embora a adição de elementos de liga juntamente com o vazamento do banho possa também conseguir este efeito. As etapas do processo anteriores a aciaria (alto forno, pré tratamento de gusa, conversor LD) permaneceriam, em grande parte inalteradas.

A etapa de lingotamento contínuo exigiria uma adaptação à baixa ductilidade a quente dos aços TWIP. Para minimizar o risco do trincamento a quente, pode-se melhorar a capacidade de deformação a quente de um aço TWIP por meio da adição de alumínio em sua composição. A adição de até 6% de Al provoca um efeito benéfico nesta propriedade. Para teores acima disso ocorre decréscimo no limite de escoamento devido ao favorecimento à formação de ferrita de alta

temperatura. [5]

A produção de ferro manganês diretamente em alto forno é possível o que a primeira vista poderia incentivar uma pesquisa mais aprofundada sobre a possibilidade de produção de aço com alto manganês por esta via. Porém dado o elevado “coke rate” (mais de 2 toneladas de coque por tonelada de liga) sugere ser mais interessante produzir Ferro-gusa no alto forno e efetuar correções na composição do mesmo nas etapas posteriores do processo produtivo, uma vez que este método, no cenário atual seria considerado inaceitável devido ao elevado custo do coque metalúrgico e também ao fato de que este consumo geraria um “footprint” de gás carbônico extremamente elevado, mesmo para os padrões siderúrgicos, o que impactaria a imagem da organização. [38] [31]

A utilização de um alto-forno a carvão vegetal resolveria o problema do footprint, caso o carvão vegetal seja originário de áreas de reflorestamento. No entanto, como a produção de carvão vegetal é um setor bastante associado à utilização de mão de obra infantil e/ou escrava, seu uso ainda assim consistiria em fator sensível para a organização e o consumo ainda se manteria elevado, dado que o carvão vegetal possui menor teor de carbono fixo que o coque, o processo de produção de ferro-ligas diretamente via alto-forno dificilmente seria competitivo com os processos existentes hoje. [26]

As siderúrgicas semi-integradas poderiam produzir aços TWIP com investimentos menores do que as integradas. De fato, a siderurgia semi-integrada normalmente é mais bem adaptada à produção de aços alta-liga do que as siderúrgicas integradas. Dado que os fornos elétricos são equipamentos de alta flexibilidade. A produção de aço TWIP em uma usina semi-integrada deveria levar em consideração a perda de manganês devido à alta pressão de vapor do mesmo nas temperaturas de operação do forno e também a perda para a escória, no caso de banhos com alto teor de oxigênio. [34]

Este perda é especialmente sensível no caso de um aço TWIP de alto teor de manganês. Além das perdas, pode ocorrer também formação de inclusões de óxidos, estas inclusões quase sempre afetam negativamente diversas propriedades do aço, especialmente as mecânicas. Seria interessante efetuar um estudo posterior, com o objetivo de determinar temperatura e composição de escória ideais de operação do forno, de modo a minimizar a perda de manganês, sem prejuízo do tempo de produção da corrida. Provavelmente a produção de aço TWIP, exigiria o uso de escória

redutora contendo carbureto, de modo a aumentar a recuperação de elementos de liga da escória para o banho. [34]

Nota-se também que a baixa resistividade do manganês é um fator complicador para a operação do alto forno em uma indústria que não possua experiência na operação de cargas de manganês. Esta baixa resistividade pode ser corrigida pela utilização de capacitores de maior capacidade, aumentando o fator de potência da instalação. Outro método que pode ser utilizado é a substituição, do carbono utilizado na lança por carvão vegetal: o carvão vegetal possui uma resistividade mais elevada do que o coque, o que poderia auxiliar a elevar a resistividade da carga como um todo. [26]

A produção de aço TWIP utilizando o método de fabricação de ferro-ligas exigiria grandes ajustes no método, pois embora os equipamentos e métodos de produção de ferro-ligas certamente sejam adaptados aos altos teores de manganês envolvidos, geralmente o produto possui teores de impurezas (tais como o fósforo), incompatíveis com os teores exigidos em um aço. Além disso, o teor de carbono do produto é demasiado elevado e o tratamento para reduzí-lo (via oxidação com silício) é excessivamente caro. Tratamentos alternativos, como por exemplo uma oxidação em conversor LD levariam à perda de manganês e aos problemas já apontados anteriormente, como por exemplo o derramamento de escória. [38] [34]

A escória de um forno que utilize diretamente óxido de manganês como aditivo apresenta uma complicaçāo adicional, já que o Oxido de manganês, quando em presença de sílica, pode formar dois silicatos de manganês ($MnSiO_3$ e Mn_2SiO_4), cuja redução é mais desfavorecida do que a do óxido. A adição de dolomita permite a remoção do óxido do silicato, porém, aumenta a viscosidade da escória o que, por sua vez exige maiores temperaturas de processo para que a viscosidade da escória permaneça em níveis aceitáveis para o processo.

É possível que o uso de pelotas auto-redutoras e um maior controle da qualidade da matéria prima utilizada resolvam os problemas do alto teor de carbono e das impurezas, respectivamente. Já foi mostrado anteriormente que o uso de pelotas auto-redutoras pode produzir ligas de manganês cujo teor de carbono é compatível com o dos aços. Os efeitos de um maior controle da qualidade da matéria prima são conhecidos desde os primórdios da metalurgia. Um estudo mais aprofundado da auto-redução pode revelar uma nova rota de produção, não apenas para o aço TWIP, mas para os demais materiais ferrosos.

Vale também ressaltar que a indústria de insumos para a siderurgia também seria impactada. Conforme visto anteriormente, a produção brasileira anual de ferro-manganês é 160 mil toneladas de Fe-Mn-AC e 41 mil toneladas de Fe-Mn-BC. O mercado automotivo, que seria o principal consumidor de aço TWIP, atualmente é responsável por cerca de 25% de toda a demanda de aço no Brasil, o que corresponde a aproximadamente 6.250.000 toneladas/ano. O que, nos leva a uma estimativa de 22.500 toneladas de ferro-manganês consumidas pela indústria automotiva. Caso o aço TWIP seja adotado, este consumo seria substancialmente superior, dado que as ligas aplicadas no mercado automotivo hoje apresentam teores de manganês próximos a 1,5%. Sendo assim, a produção nacional de ferro-manganês é, no momento, insuficiente para o atendimento a esta nova demanda, sua produção deverá ser, forçosamente, aumentada ou então deveremos importar ferro-manganês para a produção de aço TWIP. [30] [7] [43]

4.3 – Custos

Com base no exposto acima, podemos avaliar os custos relativos à produção de um aço TWIP. Inicialmente, partiremos do princípio de que a unidade que possua interesse na produção de um aço TWIP, já esteja aparelhada para tal – isto é, não consideraremos o princípio o investimento em reaparelhagem. Para a produção de um aço carbono padrão em forno elétrico a arco, a seguinte estimativa de custos pode ser feita. [51]

Tabela 06: custos associados à produção de aço carbono em forno elétrico a arco, a estimativa considera custos relativos a um produtor baseado no Japão. Custos estão em dólares americanos (USD). Os custos unitário consistem no custo da unidade em questão (tonelada, metro cúbico, GJ, MWhr e homens.hora) do insumo em dólares. [51]

Item	Quantidade	Unidade	Custo unitário	Custo Total
Sucata de aço	1,132	T	330	373,56
Logística da sucata	1,132	T	5	5,66
Gusa/DRI	0	T	400	0
logística do Gusa/DRI	0	T	40	0
Oxigênio	14	m ³	0,085	1,19
Ferro-ligas	0,014	T	1650	23,1
Fluxantes	0,043	T	45	1,935
Eletrodos	0,001	T	8900	8,9
Refratários	0,005	T	650	3,25
Energia térmica	0,426	GJ	12,5	5,325
eletricidade	0,331	MWhr	100	33,1
Mão de obra	0,344	homens.hora	37	12,728
depreciação	1	-	8	8
Juros	1	-	11,5	11,5
Outros	1	-	8,6	8,6
Total				496,848

Para a produção de um aço TWIP, os custos obviamente não seriam os mesmos. Conforme visto anteriormente, a produção de aços com elevado teor de manganês exigiria as seguintes modificações em relação ao aço carbono: uma escória redutora (e não oxidante) e a adição de uma quantidade maior de ferro-manganês.

Suporemos um preço de US\$ 1.200/ton e teor de manganês de 78% para a ferro-liga: FeMn. É sabido que há perdas de manganês para a escória em qualquer processo produtivo. A indústria siderúrgica normalmente trabalha com um percentual de perdas de 5%.: [43] [51]

Tabela 07: Estimativa de custos relativos à produção de um aço TWIP, a linha destacada em azul, corresponde a adição extra de ferro-manganês necessária para que o aço seja considerado TWIP.

Item	Quantidade	Unidade	Custo unitário	Custo Total
Sucata de aço	1,132	t	330	373,56
Logística da sucata	1,132	t	5	5,66
Gusa/DRI	0	t	400	0
logística do Gusa/DRI	0	t	40	0
Oxigênio	14	m ³	0,085	1,19
Ferro-manganês(adicional)	0,306	t	1200	366,6396761
Ferro-ligas (base)	0,014	t	1650	23,1
Fluxantes	0,043	t	45	1,935
Eletrodos	0,001	t	8900	8,9
Refratários	0,005	t	650	3,25
Energia térmica	0,426	GJ	12,5	5,325
eletricidade	0,331	MWhr	100	33,1
Mão de obra	0,344	homens.hora	37	12,728
depreciação	1	-	8	8
Juros	1	-	11,5	11,5
Outros	1	-	8,6	8,6
Total				863,4876761

Além dos custos acima mencionados, seria necessário estimar também o custo de treinamento mão-de-obra, uma vez que a operação de um forno com este teor de manganês, envolve variáveis de processo distintas daquelas dos aços com menores teores de manganês. Por exemplo: foi discutido que a resistividade do manganês é significativamente menor do que a do restante da carga, isto exige que os operadores sejam preparados para lidar com esta diferença no processo. O custo do refratório também é um fator a se levar em consideração, dado que os refratários utilizados para a produção de aço ao manganês podem sofrer desgaste extra ou então ter custo distinto dos refratários utilizados para a produção de aço carbono. Por fim, é necessário também estimar o custo da remoção do carbono extra, pois a suposição considerou o uso de FeMn de alto carbono.

Os custos acima estimados consideram uma instalação localizada no Japão. A transposição dos custos calculados acima para a realidade brasileira se daria principalmente no custo da mão de obra e da energia. No entanto, o fator que mais contribui para o custo do aço TWIP, que é a adição de ferro-manganês, seria similar a aquele que é praticado no mercado internacional. Certamente o

custo de produção deste metal é mais elevado do que o de um aço carbono comum, no entanto, ainda é menor do que o de um aço inox 304, por exemplo (cujo preço oscila entre 3000 – 4000 dólares a tonelada) [52]

Sumarizamos então os fatores discutidos na tabela 08:

Tabela 08: Sumário com principais fatores e riscos ao processo produtivo e utilização do aço TWIP

	Principal fator de influência	Riscos envolvidos
Matérias primas	Principalmente ferro manganês	requer atenção, caso a industria nacional não seja capaz de suprir demanda
Processos	Aciaria e laminação	aciaria requer reaparelhagem, laminação requer treinamento devido ao possível trincamento à quente
Mercado	Principalmente automobilístico	Mercado grande, porém concentrado.
Custo do produto	Principalmente ferro manganês	flutuação de custo do ferro manganês
Investimento	reaparelhagem de instalações e possível treinamento de mão de obra	Siderúrgicas podem se manifestar refratárias ao investimento caso o mercado não seja favorável.

5– Conclusões:

A combinação de propriedades mecânicas do aço TWIP sugere que esta liga, apesar do alto custo de produção, encontrará aplicações em larga escala na indústria automotiva. Novos estudos podem ampliar o leque de utilização do aço a novos mercados, principalmente aqueles nos quais é requerida resistência mecânica a baixas temperaturas.

A produção do aço TWIP será, provavelmente, efetuada em siderúrgicas semi-integradas, ao invés de nas integradas, pois as instalações das semi-integradas são mais apropriadas à produção deste aço do que as integradas. O uso de pelotas auto-redutoras pode abrir uma nova rota, utilizando-se redução de minérios de ferro e manganês, mas isto depende da consolidação da tecnologia das pelotas auto-redutoras.

O principal fator de risco à produção comercial aço TWIP e o investimento necessário por parte das siderúrgicas no reaparelhamento de suas instalações e treinamento de pessoal. Em momentos nos quais as siderúrgicas estejam excessivamente pressionadas por custos, um investimento na produção pode se tornar proibitivo. O custo previsto da tonelada de Aço TWIP, por sua vez, não seria tão impactante para a indústria automotiva, dado que ele é inferior a de um aço inox, por exemplo.

6 – Referência bibliográfica:

- [1] – HAMADA, A. S.; KARJALAINEN, L.P. Hot ductility behavior of high Mn-TWIP steels. Materials Science and Engineering. A 528 . Páginas: 1819–1827. Elsevier. 2011
- [2] - ESTADOS UNIDOS. American Society for Metals International. ASM Metals handbook. Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys 2004. Vol 1. ASM International. 2004
- [3] - KIM, S. K. et al. The development of TWIP steel for automotive application. Posco Technical Report. Vol 10. Número 01. Posco. 2006
- [4] – HAO, Ding; HUA, Ding; DAN, Song. Strain hardening behaviour of a TRIP/TWIP steel with 18,8% Mn. Materials Science and Engineering A 528. páginas: 868–873 Elsevier. 2011
- [5] - HAMADA, A.S.; Manufacturing, Mechanical properties and corrosion behaviour of high-Mn TWIP Steels.Oulu. University of Oulu. 2007. ISBN 978-951-42-8584-4
- [6] – SUTOU, Y.; et al. High-strength Fe–20Mn–Al–C-based Alloys with Low Density. ISIJ International, Vol. 50. No. 6, pp. 893–899. ISIJ. 2010
- [7] - BOUAZIZ, O., et al. High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. Current Opinion in Solid State and Materials Science. Volume 15. Issue 4. 2011. Páginas 141-168
- [8] - http://www.butlersheetmetal.com/tinbasherblog/lamborghini-reventons-elastic-steel-and-panel-beaters_696.html – acessado em 24/10/2011 as 22:30 horas
- [9] – SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto .Aços e ligas especiais. Segunda edição. São Paulo: Editora Edgar Blücher. 2006
- [10] – ESTADOS UNIDOS. American Society for Metals International. ASM Metals handbook Metallography And Microstructures 2004. vol 09 ASM International.2004
- [11] – ESTADOS UNIDOS. American Society for Metals International. ASM Metals handbook Alloy Phase Diagrams 2004. vol 03. ASM International.2004

[12] - DE MOOR, Emmanuel, Et al. Austenite stabilization through manganese enrichment. Scripta Materialia 64, páginas 185 a 188. Science Direct. 2011

[13]- REED-HILL, Robert E. Princípios de metalurgia física. Segunda edição. Rio de Janeiro. Editora Guanabara dois S.A. 1982

[14] - <http://www.doitpoms.ac.uk/tplib/superelasticity/twinning.php> - Acessado em 06/12/2011

[15] – EFSTATHIOU, C. A.; SEHITOGLU, H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel Scripta Materialia 58, páginas 1479 a 1488. Science Direct. 2010.

[16] – CHATEAU, P.; et al. Kinematics of deformation bands in an austenitic FeMnC TWIP steel. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 240 012020. 2010.

[17] – Barat, P.; Sarkar, A.; Barat, Arnab. - Portevin-Le Chatelier Effect: a Poisson Process. Disponível em: <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0602/0602313.pdf>. Último acesso em 05/12/2011, 16:00.

[18] – SANTOS, Dagoberto B. et al. Effect of annealing on the microstructure and mechanical properties of cold rolled Fe-24Mn-3Al-1Ni-0.06C TWIP Steel. Materials Science and Engineering A 528 páginas 3545 até 3555, Elsevier, 2011

[19] –PLAUT, Ronald.Lesley – Production of high strength strip. Sheffield. University of Sheffield.1972

[20] – http://en.wikipedia.org/wiki/Manganese_sulfide – acessado em 15/10/2011 as 08:30 horas

[21] -http://en.wikipedia.org/wiki/Manganese_sulfide – acessado em 15/10/2011 as 08:30 horas

[22] – ESTADOS UNIDOS. American Society for Metals International. ASM Metals handbook Welding, Brazing, and Soldering 2004. vol 06. ASM International.2004

[23] – CHATEAU ,J. P.; DUMAY, A; ALLAIN ,S. and Jacques ,A - Precipitation Hardening of a FeMnC TWIP Steel by vanadium Carbides. Journal of Physics: Conference Series 240 012023. IOP Publishing. 2010

[24] - http://xnet3.uss.com/auto/tech/grades/TRIP_main.htm – acessado em 20.04.2011 as 17:50

[25] - <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=207> – acessado em 20.04.2011 – as 18:30

[26] - OLSEN, Sverre E.; LINDSTAD ,Tor.; TANGSTAD, Merete. Production of Manganese Ferroalloys. Trondheim. Tapir academic Press. 2007

[27] - <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/manganes.pdf> - acessado em 20/10/2011 as 11:33 horas

[28] – <http://www.metalica.com.br/noticias/siderurgia> - acessado em 08/12/2011 as 18:00 horas

[29] –ESTADOS UNIDOS. Envriornmental Protection Agency. 12.4 Ferroalloy Production. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch12/final/c12s04.pdf>

[30] - <http://www.abrafe.ind.br/abrafe.htm> - acessado em 10/09/2011 as 20:32 horas

[31] – STRASSBURGER, J. H. - Blast furnace-theory and practice. Volume 1. Nova York. Segunda edição. Gordon and Breach Science publishers, Inc. 1984.

[32] – JACKSON, A. Oxygen Steelmaking for steelmakers. Segunda Edição. Londres. Butterworth & Co. 1969

[33] - EL-FARAMAWY, H. et al. Demanganisation of high manganese pig iron to produce high manganese slag. Ironmaking & Steelmaking, Volume 31, Number 1, pp. 23-30(8), Ingenta Connect. 2004

[34] – GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. - Ironmaking And Steelmaking: Theory And Practice. Nova Déli. Prentice-Hall of India Private Ltd. pg 101 – capítulo 5.4.1

[35] – GOSH, A. Secondary steelmaking, principles and applications. Boca Raton. CRC Press. 2001

[36] - NILSSON, L.; ANDERSSON , K.; LINDQUIST , K. The CAS-OB process in the steelshop at SSAB Tunnplåt AB. Luleå works. Scandinavian journal of metallurgy , vol. 25, no2, pp. 73-79 (1 ref.). ISSN 0371-0459. CODEN SJMLAG. 1996

[37] – DA CRUZ, Carlos Roberto Valente. Refratários para siderurgia. Segunda Edição. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 1978

[38] – ROBIETTE, A. G. E. Eletric smelting process. London. Griffin. 1973.

[39]- EDNERAL, F. P. – Electrometallurgy of Steel and Ferro-Alloys Moscow. Mir Publishers. 1979.

[40] - <http://ae-bds.en.made-in-china.com/product/kMLJNzZHLoWe/China-Electric-Arc-Furnace.html> - acessado em 11/08/2011 – as 09:45 horas

[41] – <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/182618/electric-furnace>– acessado em 16/06/2011 as 08:28 horas.

[42] - RISS A, KHORDOROVSKY, Y. Production of ferroalloys. Moscow. Foreign Languages Publishing House.

[43]- <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=25&pageid=2081271947>- acessado em 04/10/2011 as 11:25 horas

[44] –BRAGA, R. S. – Auto redução de minérios Brasileiros de manganês.São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2005

[45] – IRVING, W. R . - Continuous casting of Steel. Primeira Edição. Londres. The institute of Materials. 1993

[46] - <http://resources.schoolscience.co.uk/Corus/14-16/images> - acessado em 20/10/2011 as 21:00 horas

[47] - <http://muhong.en.made-in-china.com/product/nqWQuJfUoTYM/China-Billet-Continous-Casting-Machine.html> - - acessado em 15/09/2011 as 10:00 horas

[48] – ESTADOS UNIDOS. American Society for Metals International. ASM Metals handbook Casting 2004. vol 15. ASM International.2004 ASM

[49] - SCOTT ,C.P.; BARGES ,P.; DRILLET , J. PEELS and the Design of New Steels for the Automotive Sector. CMC IRSID, Voie Romaine – BP 30320, F-57283 Maizières-lès-Metz Cedex, France

[51] – www.steelonsheet.com – acessado em 07/11/2011 as 20:30 h

[52]– www.worldsteelprices.com – acessado em 03/11/2011 as 10:00 h