

CAPÍTULO QUATRO:

Metais de engenharia: Aço

Capítulo 4:

4.1 – INTRODUÇÃO

A maior parte dos recursos que a humanidade explora provêm da crosta terrestre, que possui uma composição química aproximada conforme descrita no gráfico da figura 4.1. Este gráfico mostra a média de vários resultados de determinação da composição química a partir da estimativa da quantidade relativa das rochas presentes na e da composição química média destas rochas. Pela figura (obtida na internet) pode-se notar que dois metais estão entre os cinco elementos mais abundantes à disposição de nossa civilização: o alumínio e o ferro.

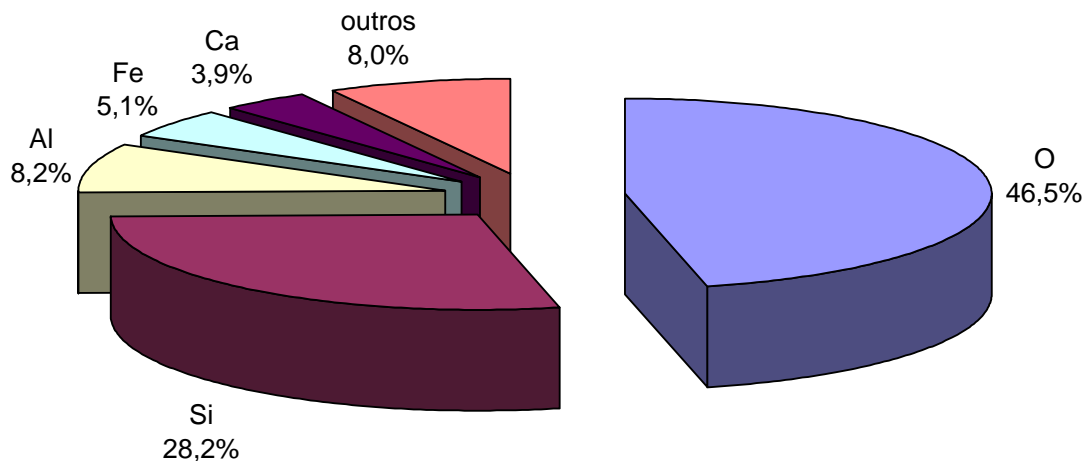


Figura 4.1 – Composição química aproximada da crosta terrestre (obtida na internet).

Porém não é apenas a abundância que faz com que um material seja largamente utilizado. As suas características físicas, químicas, mecânicas e mesmo econômicas são condições essenciais para tornar a utilização deste material competitiva em comparação com os demais. Não por acaso estas são as características do ferro, que, na forma de aço, é o material mais produzido e utilizado pela humanidade.

Nos seus primeiros artefatos, a humanidade começou a utilizar materiais não metálicos, tais como: ossos, pedras, barro cozido, madeira, fibras, couros, etc. Neste estágio, a falta de conhecimento tecnológico limitou a utilização dos metais. Os primeiros metais a serem explorados e utilizados foram exatamente àqueles encontrados na natureza no seu estado puro, tais como o ouro, a prata e o cobre. Porém estes metais eram raros não possuíam resistência mecânica importante.

Posteriormente, com o avanço do conhecimento humano, aprendeu-se que instrumentos obtidos a partir de misturas de metais diferentes eram melhores dos que os produzidos a partir de metais puros, principalmente em termos de

resistência mecânica. Estas misturas são conhecidas como ligas metálicas, ou simplesmente ligas. O bronze foi a primeira liga de “sucesso”, em termos de utilização e fabricação, apesar de suas limitadas propriedades mecânicas em relação aos materiais de hoje em dia.

As épocas entre o “descobrimento” e utilização destes materiais pelo homem deu nome a diferentes ciclos da civilização humana: idade da pedra, do ouro, da prata, do cobre, do bronze e, finalmente, do ferro.

A relativa abundância de fontes naturais de ferro e a flexibilidade de obtenção de propriedades mecânicas nas ligas ferrosas, incluindo resistência mecânica e tenacidade, impulsionou o desenvolvimento tecnológico de artefatos de ferro, mesmo em tempos relativamente remotos. Inicialmente encontrado em meteoritos ferrosos, posteriormente produzido por processos rudimentares, tais como os ilustrados na figura 4.2, tal como citado por Araújo (1997), e finalmente por processos semi-industriais. Desta forma, o ferro teve aumentado continuamente o seu grau de importância na sociedade humana.



Figura 4.2 – Ilustrações artísticas: (a) produção rudimentar de ferro pelos Assírios; (b) tratamento térmico do ferro na Roma antiga, Araújo (1997).

Mas a grande impulsão no grau de importância do ferro e dos metais em geral, ocorre somente na época da revolução industrial, no século 19, quando ocorre o desenvolvimento de novas formas de produção de ferro, desta vez em caráter industrial, e o desenvolvimento do aço. O gráfico da figura 4.3 ilustra resumidamente a evolução no uso dos materiais ao longo da civilização humana, sendo obtido a partir dos dados apresentados por Ashby (1993), em seu livro de seleção de materiais.

Até o início do século passado o aço praticamente não possuía nenhum rival em termos de material de engenharia: não existiam métodos economicamente viáveis para a produção de alumínio ou de outros metais estruturalmente

importantes. Por outro lado, os poucos materiais poliméricos conhecidos eram de origem natural e os materiais cerâmicos existentes se limitavam aos obtidos a partir de argilas¹, já fabricados a milhares de anos.

Com o desenvolvimento do aço e de seus tipos, paralelamente com o desenvolvimento de um processo industrial economicamente viável para a obtenção do alumínio, incrementa-se rapidamente a importância dos metais para a humanidade. O ápice foi atingido logo após o final da 2ª grande guerra mundial (1939-1945), quando o desenvolvimento dos polímeros industriais e posteriormente das cerâmicas de engenharia começaram a tomar o espaço em inúmeras aplicações, onde estes são mais eficientes do que os metais.

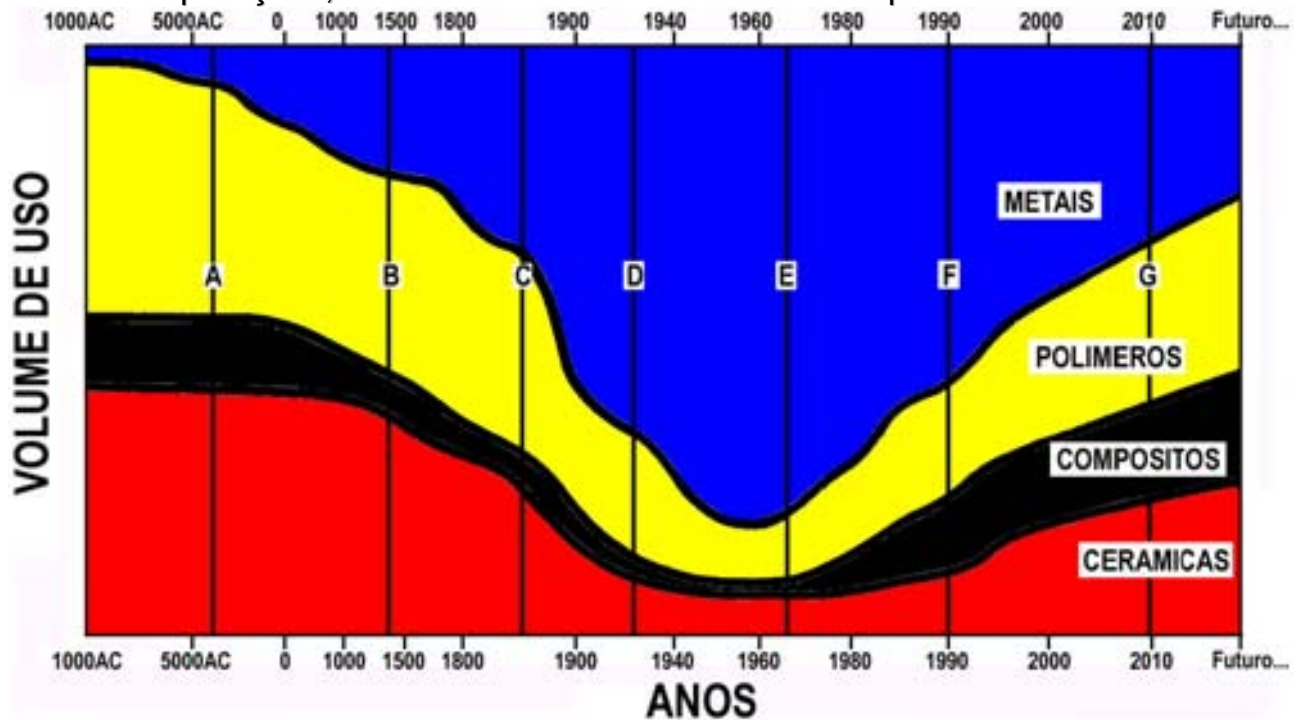


Figura 4.3 – Evolução da importância relativa das diferentes classes de materiais: metais, cerâmicos, polímeros e compósitos², baseado em Ashby (1993).

Apesar do volume percentual de uso dos metais estar lentamente diminuindo nos dias de hoje, têm-se desenvolvido novos tipos de ligas metálicas para aplicações especiais e mesmo inexistentes anteriormente. Paralelamente, novos processos mais produtivos, baratos, eficientes e de menor impacto ambiental estão sendo disponibilizados. Por isso, o nível de tecnologia existente hoje nos aços, tanto em termos de produto quanto em termo de produção, muito difere do nível tecnológico de meio século atrás. A tabela 4.1 detalha os materiais desenvolvidos ao longo das linhas de tempo de A a G.

¹ Materiais cerâmicos obtidos a partir de uma mistura de minerais com água (barro), moldados na sua geometria final e “queimados” (aquecidos) até manterem a sua forma final com certa resistência mecânica e fragilidade.

² Os materiais compósitos são materiais produzidos a partir da mistura ou associação de dois materiais distintos, como por exemplo: palha e barro (tijolos), fibra de vidro e resina poliéster (utilizados, por exemplo, na confecção das coberturas de telefones públicos – os “orelhões”).

Tabela 4.1 – Utilização e desenvolvimentos de materiais ao longo das eras.

<p>A – Antes de Cristo</p>	<p>Compósitos 13% Metais 8% Polímeros 38% Cerâmicos 41%</p>	<p>Metais: ouro, prata, cobre, bronze Polímeros: madeira, peles, fibras vegetais Cerâmicos: pedra, olaria, vidros Compósitos: tijos com fibras, papel</p>
<p>B – De 0 a 1800</p>	<p>Compósitos 7% Metais 22% Polímeros 34% Cerâmicos 37%</p>	<p>Metais: ferro, ferro fundido Polímeros: colas Cerâmicos: cimentos, refratários Compósitos: nenhum desenvolvimento</p>
<p>C – Século XIX</p>	<p>Compósitos 6% Metais 36% Polímeros 34% Cerâmicos 24%</p>	<p>Metais: aços Polímeros: borracha Cerâmicos: cimento portland Compósitos: nenhum desenvolvimento</p>
<p>D – 1ª metade do século XX</p>	<p>Compósitos 3% Cerâmicos 7% Polímeros 13% Metais 77%</p>	<p>Metais: aços ligados, ligas leves, super ligas Polímeros: baquelite, nylon, polietileno, policarbonato Cerâmicos: carbonitreto de metais Compósitos: nenhum desenvolvimento</p>
<p>E – De 1950 a 1980</p>	<p>Cerâmicos 8% Compósitos 3% Polímeros 18% Metais 71%</p>	<p>Metais: ligas de titânio e zircônio, aços bifásicos, aços microligados (HRBL), ligas Al-Li Polímeros: poliestireno, polipropileno, acrílicos, epóxies, poliésteres, etc. Cerâmicos: pirocerâmicas, fibras Compósitos: plástico reforçado com fibras de vidro</p>
<p>F – Últimos 20 anos</p>	<p>Compósitos 13% Cerâmicos 11% Polímeros 19% Metais 57%</p>	<p>Metais: novos graus de aço, super ligas, metais resistentes a altas temperaturas Polímeros: polímeros de alta rigidez, fibras de alta resistência e rigidez, plásticos resistentes à temperatura (silicones) Cerâmicos: cerâmicas de engenharia, supercondutores, novas fibras cerâmicas Compósitos: plástico reforçado com fibras, compósitos de matrizes metálicas e cerâmicas, compósitos de fibra de carbono</p>
<p>G – Futuro próximo</p>	<p>Compósitos 16% Cerâmicos 23% Polímeros 28% Metais 33%</p>	<p>Basicamente um incremento na qualidade e produtividade, além de novas descobertas e desenvolvimentos. Tendência de utilização equilibrada das classes de materiais.</p>

Apesar da grande diversidade e flexibilidade de propriedades dos materiais metálicos, os polímeros e cerâmicas de engenharia possuem propriedades diferentes e muitas vezes únicas em relação aos metais, que os tornam mais adequados para muitas aplicações. A correta aplicação de materiais metálicos, poliméricos ou cerâmicos poderá tornar uma estrutura ou sistema viável e competitivo, quando existir uma combinação ótima de propriedades e custo.

A diminuição na importância da utilização de materiais metálicos, inicialmente rápida, tende a ser cada vez menor e gradual até se atingir um nível de estabilidade. Este nível de estabilidade deverá ocorrer quando as três classes de materiais forem utilizadas harmoniosamente aproveitando-se de maneira adequada as suas diferentes propriedades.

A redução no nível percentual na utilização global dos metais não indica uma decadência nesta indústria e especialmente na siderurgia. Pelo contrário, hoje em dia existe uma grande busca da melhora das propriedades dos materiais metálicos, especialmente no que diz respeito ao processo de produção dos mesmos. Esta melhora é motivada por aspectos técnicos e econômicos semelhantes aos que motivam a busca de novos materiais cerâmicos e poliméricos.

O gráfico da figura 4.4, por exemplo, ilustra a evolução da produção mundial de aço, com base em dados disponíveis em diversas fontes, principalmente no IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia). Referenciando-se ao gráfico da figura 4.3, pode-se notar que é exatamente quando o percentual global de uso dos metais cai, em 1950, é que a produção de aço tem a sua maior taxa de crescimento.

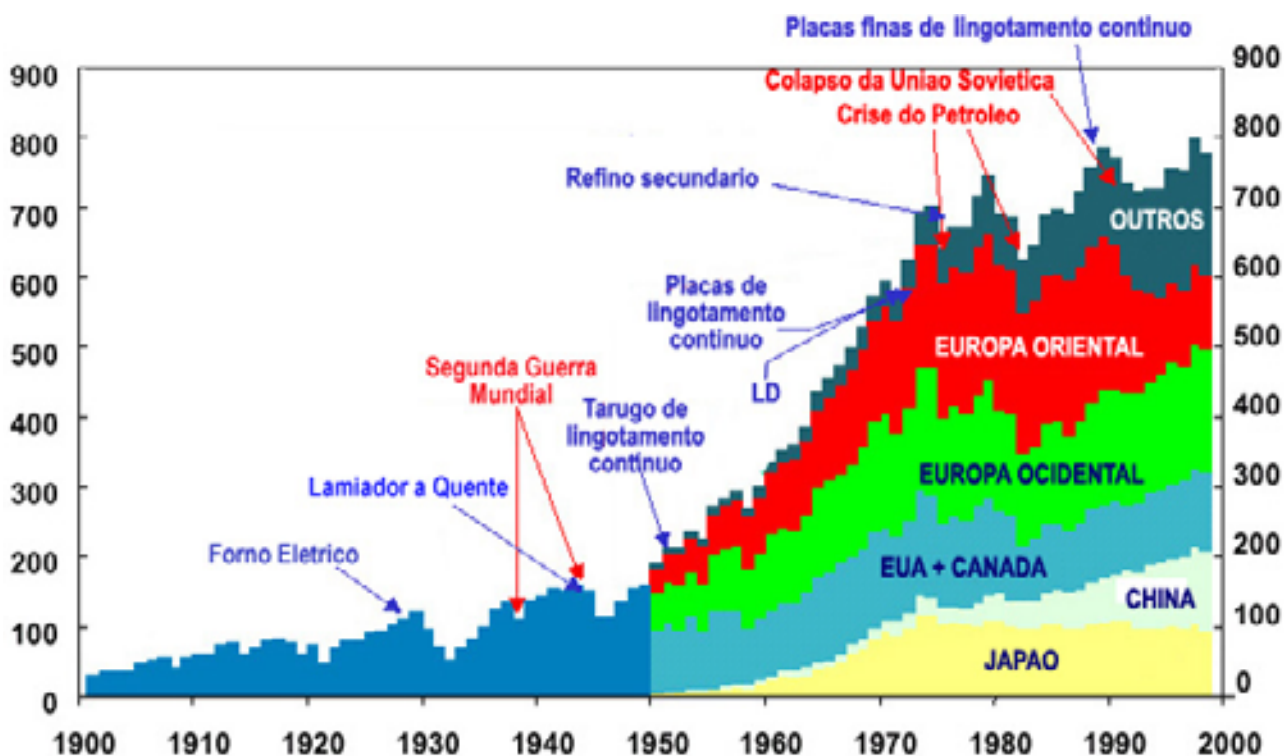


Figura 4.4 – Evolução da produção mundial de aço ao longo do século 20.

Atualmente vemos um nível de incremento na produção de aços somente na China e em outros países fora da Europa, América do Norte e Japão. Neste grupo estão inclusos alguns países incluindo o Brasil, cuja produção anual para 2004 é esperada ser da ordem de 32 milhões de toneladas, segundo o IBS.

No caso do Brasil, existem diversos planos de expansão da capacidade de produção para até 45 milhões de toneladas nos próximos 5 anos. Em termos de consumo per capita, a situação seria aquela mostrada na tabela 4.2, onde o Brasil apresenta-se em posição relativamente modesta, em relação aos países listados.

Tabela 4.2 – Consumo per capita aparente de produtos siderúrgicos em alguns países ao longo do ano de 2000 (A Siderurgia em números: *pocket yearbook* – IBS³, 2002).

País	Consumo kg / (habitante×ano)
Coréia do Sul	846
Japão	635
Itália	562
Alemanha	506
Estados Unidos	472
Espanha	466
Rússia	196
México	148
Chile	129
Argentina	91
Ucrânia	54
Brasil	108

Os principais produtores brasileiros de aço estão listados na tabela 4.3, segundo dados obtidos pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia para o ano de 2001.

Tabela 4.3 – Produção de aço bruto em 2001 por empresa (A Siderurgia em números: *pocket yearbook* – IBS, 2002).

Empresa	Produção em 2001 (10 ³ ton)	Empresa	Produção em 2001 (10 ³ ton)
Acesita	786	COSIPA	2460
Açominas	2355	CSN	4048
Aços Villares	602	CST	4784
Siderúrgica Barra Mansa	392	Gerdau	3471
Belgo Mineira	2688	Vallourec & Mannesman Tubes	500
		USIMINAS	4620

³ Instituto Brasileiro de Siderurgia.

4.2 – Conceito de aço

O ferro é encontrado na natureza sob a forma de minerais, como a hematita. É um dos elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre (5%) e um dos metais de mais fácil obtenção, em termos da tecnologia atualmente existente. Este elemento apresenta, no estado puro, características, tais como: maleabilidade (maciez), boa condutividade térmica, baixa resistividade elétrica, brilho, propensão à oxidação, densidade relativamente alta e ponto de fusão 1535°C.

No estado puro, o ferro tem poucas aplicações, na maior parte das vezes este elemento é utilizado na forma de aço, que é uma mistura do ferro com carbono e outros elementos químicos. A definição do aço, segundo Chiaverini (Aços e Ferros Fundidos, ABM), não é simples. Este autor oferece a seguinte definição para aço:

“Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”.

Por outro lado, a ABNT, por meio da norma NBR 6215 (Produtos Siderúrgicos – Terminologia), define o termo “aço” como sendo:

“Aço – liga ferrosa passível de deformação plástica que em geral apresenta teor de carbono entre 0,008 e 2% na sua forma combinada e/ou dissolvida e que pode conter elementos de liga adicionados ou residuais”.

Pode-se tentar conceituar aço como sendo um material constituído em sua grande parte pelo elemento químico ferro, mas que contém quantidades variáveis de outros elementos químicos, que podem ter duas origens básicas:

- oriundos dos processos de fabricação (residuais) e que oferecem certas características benéficas ou malélicas ao aço, de acordo com a sua aplicação;
- adicionados intencionalmente (de liga) e que produzem um efeito desejado no aço, como por exemplo, aumento da dureza, aumento na resistência mecânica, aumento na resistência à corrosão, melhora da capacidade de corte, adequação à tratamentos químicos, etc.

O aço pode apresentar uma grande variedade de propriedades, graças a sua composição química, a tratamentos mecânicos e térmicos. Devido a esta grande diversidade, é comum subdividir, definir e reclassificar o aço em categorias de acordo com suas características de composição química e de comportamento mecânico.

Existem diversas associações normativas no mundo que se esforçam para elaborar um sistema de classificação compatível com a aplicação de aços adaptado à região e campo de atuação destas normatizadoras, de acordo com o mostrado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Alguns exemplos de entidade normatizadoras no mundo (Metals Reference Book, ASM, 3th edition, 1993).

País	Entidade	Sigla	Exemplo	Afiliação/ migração
Alemanha	Deutsches Institut fur Normung e.V.	DIN	DIN 17100	EN
América	Pan American Standards Commission	COPANT	COPANT 1590-1992	
Argentina	Instituto Argentino de Racionalizacion de Materiales	IRAM		ISO e COPANT
Brasil	Associação Brasileira de Normas Técnicas	ABNT	NBR 6650	ISO e COPANT
Canadá	Canadian Standards Association	CSA	CSA GH.1.7.3	
Coréia	Korean Bureau of Standards	KBS	KS D3452	
Estados Unidos	American National Standards Institute	ANSI	ANSI H35.2	
Estados Unidos	American Society for Testing and Materials	ASTM	ASTM A36	
Europa	European Committee for Iron and Steel Standardization	ECISS		EN
Europa	Comisión of the European Communities	CEC ou CCE	EURONORM EN 10025	
França	Association Francaise de Normalization	AFNOR	NF A 35-550	EN
Grã Bretanha	British Standards Institution	BSI	BS 1449 P1	EN
Internacional	International Organization for Standardization	ISO	ISO 3522	
Japão	Japanese Industrial Standards Committee	JIS	JIS G3101	
México	Dirrección General de Normas	DGN	NOM C-189	
Rússia	Gosudarstvennyi Komitet Standartow	GOST	GOST 13819	

Além disso, existem várias outras organizações de caráter específico, tais como: SAE (automobilística); ASME (vasos de pressão); API (ind. do petróleo); ABS (ind. Naval); DNV (ind. Naval); AECMA(material aeroespacial); AMS(material aeroespacial);AWS(mat. para soldagem).

Graças à versatilidade de suas características (propriedades), ao seu custo relativamente baixo⁴, à existência de fontes e fornecedores em todo o mundo e à existência de um enorme histórico técnico-científico de projeto e utilização, o aço encontra larga aplicação em diversos ramos industriais ou comerciais, tal como descrito a seguir.

- Aços estruturais:
 - construção civil (edifícios, pontes, etc.);
 - naval e para estruturas “off-shore”;
 - tubulações;

⁴ Atualmente o preço base do aço é cerca de 3 a 4 vezes menor do que o custo base do alumínio.

- trilhos;
- etc.
- Aços para uso geral:
 - revestimento;
 - móveis e instalações públicas;
 - linha branca (fogões, geladeiras, etc.);
 - serralheria;
 - etc.
- Aços para conformação:
 - automobilística;
 - autopeças;
 - estamparias;
 - botijões.
 - etc.
- Aços para construção mecânica:
 - Máquinas;
 - arames e fios;
 - molas;
 - usinagem fácil;
 - etc.
- Aços para fundidos ou sinterizados:
 - peças;
 - utensílios e móveis;
 - ferramentas e matrizes;
 - etc.
- Aços especiais:
 - motores e transformadores;
 - resistentes a altas temperatura;
 - resistentes a baixas temperaturas;
 - etc.

Os itens a seguir apresentam os principais grupos de aços, de acordo com as suas aplicações, dando-se destaque às aplicações para construção civil e aplicações arquitetônicas. Nestes itens pode-se notar a flexibilidade e adaptabilidade do aço aos mais diversos requisitos necessários a estas aplicações.

As propriedades limite de escoamento e limite de resistência, obtidas por meio de ensaios de tração, passarão a ser referenciadas nas descrições a seguir. No anexo II está apresentada uma pequena revisão sobre estes ensaios, podendo ser utilizada como referência para identificar os dados apresentados nos itens a seguir.

4.2.1 – Aços estruturais

O termo “aços estruturais” designa uma larga variedade de aplicações de aços, onde o ponto em comum é a necessidade de uma certa resistência mecânica mínima, trabalhabilidade⁵, disponibilidade (tanto em quantidade quanto em dimensões) e baixo custo. Estes aços podem ser utilizados para aplicações das mais gerais, tais como: construção civil (edifícios, pontes, casas, coberturas, etc.), tubulações, estruturas “off-shore”, indústria naval, uso geral/comercial, etc.

Apesar da necessidade de resistência mecânica a que a aplicação sugere, para grande parte destas aplicações o nível de resistência normal de aços carbono-manganês é suficiente para muitas das aplicações estruturais. Em algumas aplicações específicas, como por exemplo para a indústria naval ou tubulações de pressão, existem requisitos mais restritos sobre as características do material, especialmente no que diz respeito à associação das propriedades resistência, soldabilidade e tenacidade.

Em geral, para esta classe de aços, a soldagem é o processo de fabricação básico utilizado na montagem das estruturas. Portanto, a capacidade de ser soldado facilmente⁶ é a grande propriedade que os aços estruturais devem possuir. Alguns dos diferentes tipos de aços estruturais serão descritos a seguir.

4.2.1.1 – Aços estruturais para construção civil



Figura 4.5 –
Edifício
Alfacon –
Alphaville –
SP, Catálogo
Construção
Metálica
Cosipa.

Para a maioria das aplicações na construção civil, os aços-carbono comuns, simplesmente laminados, sem quaisquer tratamentos térmicos ou adições de elementos de liga, além do carbono e do manganês, são plenamente satisfatórios e constituem porcentagem considerável dentro do grupo de aços estruturais para construção civil.

Em alguns casos, o nível de resistência mecânica, aliada à necessidade de apresentar uma boa soldabilidade, leva à utilização de aços microligados.

Existem vários aços normatizados para a construção de estruturas metálicas no mundo, estando os mesmos especificados em várias normas técnicas, tais como:

⁵ O termo trabalhabilidade designa a facilidade geral de trabalho com o material e está normalmente associado à capacidade do material ser conformado e/ou soldado para formar um componente ou estrutura.

⁶ A soldabilidade de um aço está associada tanto à facilidade na execução prática da operação de solda quanto à homogeneidade das características da região soldada, em relação ao restante da estrutura.

- ABNT - Brasil (por exemplo: NBR 5000, NBR 5004, NBR 5008, NBR 5920, NBR 5921, NBR 6649, NBR 6650);
- AFNOR - França;
- DIN - Alemanha (por exemplo: DIN 1623, DIN 17100);
- BS - Inglaterra (por exemplo: BS 4360);
- ISO EN - Internacional (por exemplo: EN 10025 S235, S275, S355);
- JIS - Japão (por exemplo: JIS G3101, JIS G3106, JIS G3125, JIS G3136);
- IRAN - Argentina (por exemplo: IRAM-IAS U500-42);
- ASTM - Estados Unidos (por exemplo: A36, A242, A572, A588 e A607).

Os principais requisitos para os aços estruturais estão citados a seguir.

- ductilidade (capacidade de deformação plástica) – aços com teores de carbono mais baixos e laminados a quente (chapas grossas ou bobinas) garantem a ductilidade necessária, além de produzir uma boa homogeneidade ao longo das peças, esta mesma ductilidade garante a trabalhabilidade em operações de corte, furação, dobramento e outras, a que podem ser submetidos os elementos estruturais;
- soldabilidade – é uma característica muito importante para um aço estrutural, visto que é costumeira a soldagem de componentes estruturais, deve-se buscar um nível de carbono, ou de carbono-equivalente⁷ suficientemente baixo de modo que as operações de solda ou corte a chama (oxiacetilênica) não produzam alterações localizadas de propriedades mecânicas no material ou mesmo defeitos (trincas) no mesmo;
- resistência mecânica – aços-carbono com teores de carbono até 0,20% e com outros elementos (Mn, Si e Al) apresentam um nível de resistência mecânica compatível com a maioria das necessidades de projeto de estruturas metálicas, maiores níveis de resistência normalmente são obtidos sem acréscimos nos teores de carbono, seja por laminação controlada ou seja pela adição de elementos microligantes, ou ambos;
- resistência à corrosão- muitas empresas siderúrgicas desenvolveram, famílias de aços com resistência à corrosão a longo prazo, tais aços recebem pequenas adições de elementos químicos que favorecem a formação de uma capa de óxido protetora que naturalmente inibe o processo de corrosão dos aços, estes aços possuem uma resistência à corrosão a longo prazo maior do que as dos aços comuns (vide item 1.2.1.2), e menor do que a dos aços inoxidáveis, porém com um custo muito menor do que estes últimos;
- resistência à chama ou a incêndios - mais recentemente criou-se a necessidade de qualificar as estruturas metálicas para aplicações onde exista a possibilidade de incêndios, nestes casos deve-se garantir uma mínima estabilidade das propriedades mecânicas do aço para a estrutura não entre

⁷ Calculado, por exemplo, pela fórmula: $C_{eq} = \%C + (\%Mn/6) + (\%Mo + \%Cr + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15$

em colapso, isto é feito pela adição de elementos de liga adequados que atuam no sentido de manter a resistência mecânica do aço, mesmo mantido sob temperaturas elevadas durante um determinado período de tempo;

A diferença prática entre estes aços, que têm maior importância entre os arquitetos/projetistas/engenheiros civis é sua resistência mecânica, expressa principalmente pelo seu limite de escoamento. Em termos metalúrgicos as diferenças são mais profundas e mais sutis e que não cabem aqui, agora, fazer seu detalhamento.

Os aços a seguir estão podem ser citados como exemplo das diferenças entre os diferentes tipos (qualidades) de material para aplicações estruturais (LE = Limite de Escoamento em MPa; LR = Limite de Resistência em MPa e AI = Alongamento percentual em uma das bases de medida 5 para 50mm ou 20 para 200mm).

Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas principais normatizadas para aços estruturais ASTM*.

Aço ASTM	Limite de Escoamento, MPa	Limite de Resistência, MPa	Alongamento, % (base de medida, mm)
A36	≥ 250	400 a 550	≥ 21 (50)
A242 T2	≥ 345	≥ 480*	≥ 19 (50)
A514	≥ 690	760 a 895	≥ 16 (200)
A570	208 a 380	340 a 480	≥ 10 (200)
A572	290 a 450	415 a 550	≥ 12 (200)
A588	345	435	≥ 19 (50)
607	310 a 480	410 a 590	≥ 14 (200)

* – No caso de faixas de propriedades com espessura, está sendo informada as propriedades para a faixa de espessura menor.

Estes aços podem ser produzidos tanto na forma de aços planos quanto na forma de não planos. No caso dos aços planos, estes são transformados ou em um perfil estrutural (tipo “I”, “H”, “U”, etc.) ou em tubos com costura⁸. Estes elementos são utilizados, posteriormente para a fabricação de estruturas, normalmente sendo montados por soldagem ou então unidos por parafusos. O centro empresarial do aço, localizado em São Paulo, é um exemplo de uma construção onde foram utilizados tais elementos estruturais, conforme ilustrado na figura 4.6.

⁸ O termo “tubo com costura” designa a categoria de tubos obtidos por meio do dobramento de chapas de aço na forma cilíndrica (tubular) e pela sua união (“costura”) por meio de uma solda longitudinal. Os processos de soldagem mais utilizados a solda por resistência elétrica (ERW) ou por arco submerso (SAW).



Figura 4.6 – Centro Empresarial do aço: a esquerda vista externa e a direita detalhe interno. Foram empregadas formas estruturais (vigas e tubos) obtidos a partir de aços planos estruturais, Catálogo Construção Metálica.

Os elementos estruturais também podem ser produzidos diretamente nas siderúrgicas, sob a forma de laminados não planos. Nestes casos o elemento estrutural apresenta características ligeiramente diferentes dos elementos produzidos de aços planos, sendo que a inexistência de cordões de solda e faixas dimensionais mais restritas as principais diferenças. A geometria e dimensões destes perfis são similares às dimensões mais comuns dos perfis produzidos de aços não planos, assim como as suas aplicações. Adicionalmente, também podem ser produzidos tubos estruturais sem costura⁹ obtidos diretamente por laminação.

Atualmente no Brasil existe uma maior comercialização do aço ASTM A36, devido às próprias exigências do mercado nacional. Porém esta tendência está se revertendo, aos poucos, especialmente pelo aumento na demanda por aços com resistência à corrosão atmosférica e, secundariamente, por aços de maiores níveis de resistência mecânica.

Os aços resistentes à corrosão atmosférica possuem uma durabilidade, sob condições normais de uso, de cerca do quádruplo dos aços estruturais comuns. O mecanismo pelo qual estes aços obtêm sua resistência à corrosão está descrito a frente, no momento é importante saber que estes aços aliam a resistência mecânica necessária à aplicação a que se destinam e a capacidade de resistir à corrosão atmosférica¹⁰. Duas aplicações estão exemplificadas na figura 4.7: construção civil de estruturas e aplicações como objetos de embelezamento, ambas as obras apresentam resistência à corrosão atmosférica a longo prazo.

⁹ Tubos sem costura são tubos que não possuem regiões de união ao longo do seu perímetro, sendo obtidos diretamente pelas siderúrgicas pelo processo de fundição ou, no caso dos tubos estruturais, por laminação (processo Manesmann).

¹⁰ Esta resistência se deve sob ciclos de molhamento e secamento da estrutura e a uma atmosfera que não apresente substâncias químicas nocivas em demasia (por exemplo meios úmidos).



Figura 4.7 – À esquerda estação ferroviária Largo 13 de maio em São Paulo e à direita monumento no campus da USP, Catálogo COS AR COR Cosipa.

Outra forma de se obter aços com grande resistência à corrosão é a utilização de chapas de aço com revestimentos metálicos ou não metálicos. Destes, o mais comum é o aço galvanizado, ou seja, com uma camada superficial de zinco. Esta camada dá uma maior proteção à corrosão atmosférica e a outros ambientes mais agressivos. Apesar desta vantagem em relação aos aços resistentes à corrosão atmosférica, os aços galvanizados possuem um custo maior e estão limitados em faixas de espessura que não são utilizados como elementos estruturais importantes. Porém estes aços encontram enorme campo de aplicação em vigas e estruturas treliçadas leves, além de telhas e paredes metálicas.

Também podem ser utilizadas misturas de zinco com outros metais para revestir o aço, destas a mais comum é a mistura zinco-ferro, obtida após tratamento das tiras de aço recobertas com zinco. Depois do próprio ferro, os metais que são misturados ao zinco mais comumente para recobrir os aços são o alumínio e o níquel. Além disso, outros metais podem ser utilizados para fazer o revestimento de aços, tais como o alumínio, o chumbo e o estanho. Mas estes revestimentos são geralmente empregados em aços destinados a outras aplicações: indústria automobilística, química e alimentícia, respectivamente.

Recentemente, porém, houve um aumento significativo da produção de tiras de aço pré-acabadas com revestimentos não metálicos. Estes revestimentos podem possuir uma grande variedade de cores e texturas, podendo ser utilizadas em aplicações que requeiram resistência à corrosão e um bom aspecto superficial. Tais revestimentos são aplicados sobre aços já galvanizados e formulados especialmente para vários requisitos de manufatura ou uso final, LLEWELLYN, D.T (1992).

4.2.1.2 – Aços estruturais para outras aplicações

Como este curso se destina a apresentar as aplicações estruturais do aço, não serão aprofundadas as demais aplicações estruturais deste material que não para a construção civil ou como elemento arquitetônico, mas sim citadas sucintamente a seguir.

Aço para construção naval

Os aços destinados à construção naval são os aços estruturais com as maiores faixas de espessuras produzidos pelas siderúrgicas. Estes aços precisam possuir uma boa soldabilidade, boa tenacidade (resistência à fratura), boa ductilidade, inclusive ao longo da espessura, e uma resistência mecânica mínima. Porém, os principais requisitos para estes aços recaem sobre a sua resistência à fratura, especialmente nas juntas soldadas.

As principais especificações para esta classe de aços, conhecidos como “aços navais” estão estabelecidas por organizações, conhecidas como Sociedades Certificadoras, sendo as mais importantes:

- American Bureau of Shipping - ABS;
- Bureau Veritas - BV;
- Det Norske Veritas - DNV;
- Germanischer Lloyd;
- Lloyd’s Register of Shipping;
- Nippon Kaiji Kyokai – NKK;
- Registro Italiano Navale.

De uma forma geral, a ABS especifica os aços com base no método de fabricação do aço: composição e tratamento térmico. Por outro lado, as certificadoras europeias tendem a especificar as propriedades mecânicas do material. Atualmente os aços para construção naval foram separados em categorias, comuns a estas classificadoras e cada qual orientada para um subtipo de aço e uma filosofia de especificação (ou pelo processo ou pelas propriedades mecânicas).

Estas organizações definem, além das características mecânicas dos aços, os métodos de inspeção e liberação de materiais (não só aços) e estruturas utilizadas na indústria naval e offshore¹¹.

Aços para tubulações

O meio mais econômico e conveniente para o transporte de fluídos é através de um duto. No caso da indústria petroquímica, geralmente os campos de petróleo e gás se localizam muito distantes dos centros consumidores, tornando-se necessário o transporte destes produtos a longas distâncias, através de oleodutos e de gasodutos. Existem impressionantes exemplos de gasodutos na América do Norte, na Europa e na Rússia, que se estendem por milhares de quilômetros. Atualmente existem dois grandes gasodutos na América do Sul que se encontram

¹¹ Todas as estruturas localizadas em alto mar ou, literalmente, fora da costa.

em consolidação ou construção: o gasoduto Bolívia-Brasil e o gasoduto Cruz del Sur (também conhecido como Argentina-Brasil). A figura 4.8.a ilustra o grande potencial no uso de todos.

Para a construção deste tipo de dutos é necessário um aço que apresente características mecânicas muito fechadas no produto final (o tubo), segundo as normas da comissão 5 da American Petroleum Institute (API). Isto somente pode ser conseguido quando se projeta um aço sabendo as alterações de propriedades mecânicas que o mesmo vai apresentar na sua conformação na forma de um tubo¹², conforme ilustrado na figura 4.8.b. Adicionalmente, além da boa soldabilidade, o comportamento do material sob soldagem deve ser semelhante em todos os tubos de um gasoduto¹³, daí os requisitos sobre a composição química, da qual depende a soldagem, são bem fechados também.

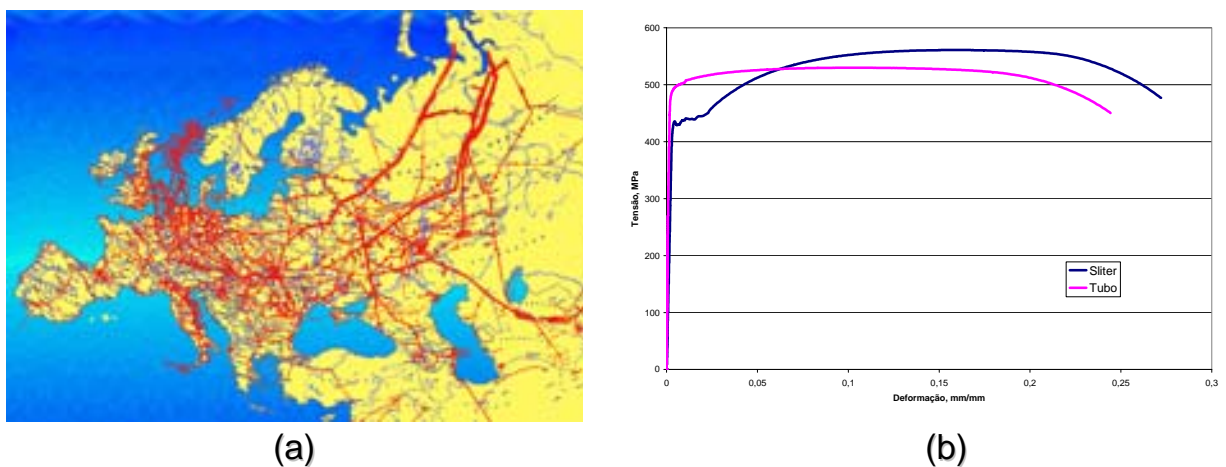


Figura 4.8 – (a) Rede de gasodutos na Europa e (b) variação entre as propriedades mecânicas de uma chapa de aço em bobina para um tubo de 65mm de diâmetro, Morais et. al. (2004).

Quando o duto deve passar por regiões com clima mais frio, também são feitas grandes exigências sobre a tenacidade do material a baixas temperaturas, o que pode somente ser obtido com um controle de composição química e do processo de laminação do aço praticamente tão difíceis quanto para os materiais navais. Além disso, em algumas aplicações a presença de gases tóxicos e fragilizantes (H_2S , principalmente) aumenta o grau de requisitos sobre a composição química e limpidez destes aços.

Aços para trilhos

Os trilhos são materiais sujeitos a condições de serviço relativamente severas: além dos choques e esforços de flexão variados, também ocorre o

¹² A conformação mecânica (alteração da geometria) de um aço quando realizada a frio produz um aumento do seu limite de escoamento e perda de ductilidade: uma chapa plana transformada em tubo vai apresentar um aumento do seu limite de escoamento em dependência da geometria final do tubo. Ver mais detalhes no item 1.2.

¹³ Um gasoduto pode ter milhares de km ou toneladas de tubos de aço que possuem, em ordem de grandeza, 10m de comprimento.

desgaste destes componentes. Para suportar os esforços descritos tanto o peso, quanto a composição química dos trilhos tem sido alterados de acordo com os seguintes pontos:

- a quantidade de desgaste causado pela fricção entre a roda e o trilho geralmente determina a vida de serviço do trilho, portanto é desejável uma maior resistência ao desgaste possível para o trilho;
- devido à necessidade de confiabilidade da linha férrea, é necessário que o trilho apresente uma boa resistência à fratura, assim como resistência à fadiga devido aos esforços repetitivos a que os trilhos são submetidos;
- para evitar o choque contínuo das rodas com os trilhos, o número de juntas foi diminuído por meio da soldagem de trilhos (formando linhas retas de até 200m), assim o aço dos trilhos deve apresentar uma soldabilidade aceitável;
- como as velocidades de viagem das composições têm aumentado, a linearidade dos trilhos tem se tornado cada vez mais importante como característica destes produtos, assim um controle dimensional apurado é cada vez mais exigido.

Em geral, os aços para trilhos apresentam teores de manganês e carbono mais elevados para a obtenção das propriedades mecânicas desejadas.

4.2.2 – Aços para uso geral

Os aços podem ser utilizados para as mais diversas finalidades: produção de utensílios domésticos, móveis, bens de consumo, automóveis, peças, máquinas, etc. De acordo com o grau de exigência da aplicação estes materiais podem possuir requisitos mais severos ou apresentarem características mais genéricas que, aliadas ao seu baixo custo, permitem que estes sejam utilizados em diversas aplicações. Destacam-se, nesta categoria, os aços SAE J403 10XX¹⁴, que possuem o menor custo dentre os aços, pois apenas são requisitados/garantidos o teor de alguns poucos elementos químicos.

Uma exceção neste item são os aços para uso como revestimento de edifícios: embora não sejam aços estruturais, estes apresentam características especiais (resistência à corrosão) que os habilitam para esta finalidade.

4.2.2.1 – Aços de uso geral para revestimento

Sem dúvida alguma, a maior parte das aplicações estruturais dos aços sem deve à construção civil, principalmente como elemento estrutural. Mas existem também aplicações do aço na construção civil apenas como elemento protetivo ou puramente estético, sem função estrutural. Exemplos destas aplicações estão ilustradas na figura 4.9.

¹⁴ Onde XX é um número que designa o conteúdo médio em carbono deste aço, maiores detalhes no anexo III.



Figura 4.9 – Frente de dois edifícios utilizando aço inoxidável como elemento protetivo e embelezador: à esquerda edifício com a frente formada por tubos de aço inoxidável e à direita outro edifício onde foi utilizado chapas aço inoxidável com a mesma função, Catálogo Acesita.

4.2.3– Aços para conformação

Estes aços não são utilizados como fornecidos pelas siderúrgicas, sofrendo um processo de conformação em uma forma final que servirá como produto final. Nestes casos, o aço deve apresentar uma capacidade de conformação tão alta quanto for a necessidade de conformação para a obtenção do produto final. Alguns exemplos estão mostrados na figura 4.10.



Figura 4.10 – A esquerda vários tipos de botijões de aço utilizados no armazenamento de gás liquefeito de petróleo (GLP) e a direita uma roda de aço destinada a automóveis, catálogo CST.

Em alguns casos a resistência mecânica destes aços é um fator indesejável em relação à limitação que impõe sobre a capacidade de conformação do material, como na fabricação de latinhas de bebidas, onde aços com limite de escoamento máximo de 170MPa são normalmente requisitados para viabilizar a operação. Outra grande aplicação deste tipo de material é na indústria automobilística, na fabricação de peças estampadas, especialmente a lataria externa dos automóveis, tal como mostrado na figura 4.11.



Figura 4.11 – Exemplos de peças de aço de alta conformabilidade, Catálogo Arcelor.

4.2.4– Aços para construção mecânica

Estes são aços destinados à fabricação de componentes, peças, moldes ou matrizes para a indústria mecânica. Em geral são necessárias uma alta dureza e resistência mecânica para que as peças fabricadas com estes aços não se deformem em serviço.

Na fabricação das peças não é normalmente utilizada operações de soldagem, assim sendo, devido aos requisitos de propriedades mecânicas, os teores de carbono e de elementos de liga destes aços é bem elevado. Existem subgrupos de aços para construção mecânica, sucintamente descritos a seguir.

Aço carbono ou aço ligado

Aço destinado à fabricação de peças ou componentes mecânicos utilizado geralmente após tratamento térmico. Dependendo da aplicação, é fabricado com rigorosos controles quanto às qualidades superficiais, dimensionais e metalúrgicas.

Aço para beneficiamento

Aço para construção mecânica de composição química adequada à têmpera e ao revenimento, que são operações para aumentar ainda mais a resistência mecânica e dureza do material (ver item 1.2.3).

Aço para cementação - Aço de baixo teor de carbono, ligado ou não, destinado ao processo de carbonetação superficial.

Aços de usinagem fácil

Aço que contém adições propositais de enxofre, chumbo, fósforo e outros que assegurem melhoria na sua usinabilidade¹⁵ e conseqüentemente na sua produtividade. Nestes casos a resistência mecânica e a tenacidade não são características primordiais do material.

Aço ferramenta

Aço adequado à confecção de ferramentas de corte ou conformação.

- Aços para trabalho a frio - Aço destinado à fabricação de ferramentas para trabalho a frio.
- Aços para trabalho a quente - Aço destinado à fabricação de ferramentas para trabalho a quente.
- Aço-rápido - Aço para ferramentas capaz de suportar elevadas temperaturas resultantes de usinagem em altas velocidades de corte, sem perder a dureza.

Aço para mola

Aço dotado de propriedades adequadas à fabricação de molas, caracterizado por elevado limite elástico e grande resistência à fadiga, o que assegura uma grande capacidade de absorver deformações elásticas sem apresentar trincas pelo uso.

4.2.5 – Outros aços

Existem vários outros tipos de aços especiais, para aplicações mais específicas e cujos requisitos são específicos para estas aplicações. Não é objetivo deste curso abordar estes aços. Recomenda-se ao leitor interessado consultar a bibliografia disponível sobre estes materiais.

¹⁵ Capacidade do metal ser trabalhado em equipamentos mecânicos - tais como: torno, fresa, furadeiras, etc. - sem se fraturar e apresentando um corte estável e com bom acabamento superficial.

4.3 – Visão geral do processo de obtenção do aço

Neste item está descrito, de uma forma geral, o processo de fabricação do aço, em uma Usina Integrada¹⁶. A figura 4.12 mostra um fluxo de produção de aço¹⁷.

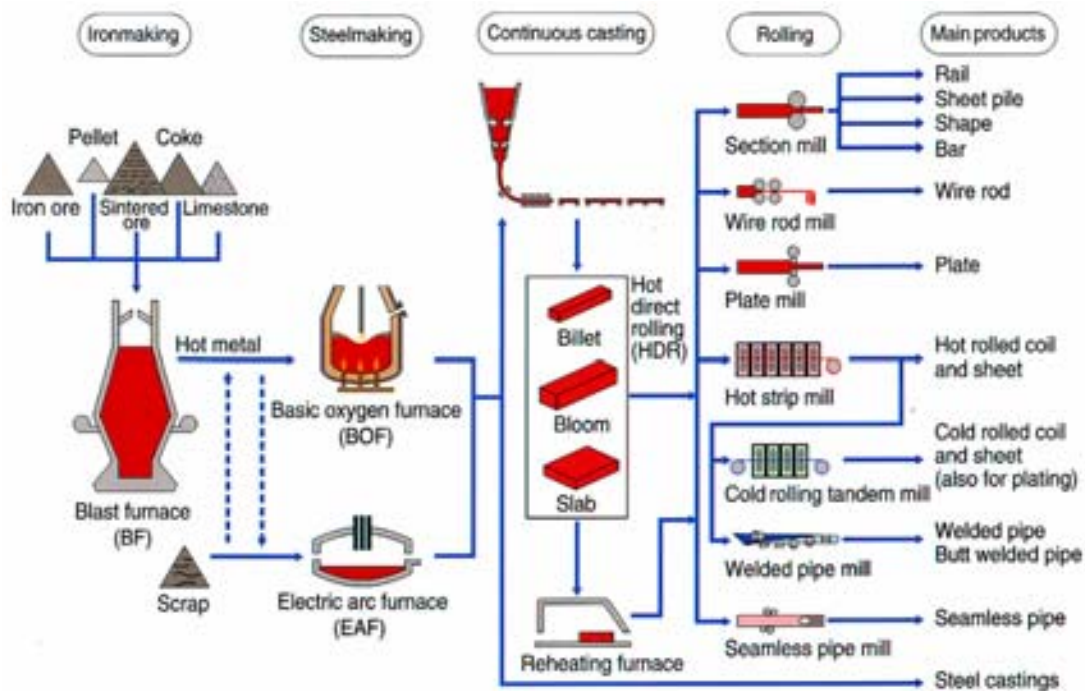


Figura 4.12 – Fluxos de produção para a obtenção de produtos finais de aço a partir de suas matérias-primas, 21st Century Foundation / Kawasaki Steel.

4.3.1 – Extração mineral e beneficiamento: a preparação das matérias-primas – Minério de ferro

Os principais tipos de minério de ferro são: a hematita, a magnetita, a limonita e a siderita. Entre estes, a hematita, que constitui a maioria dos minérios brasileiros, é o mais importante devido a relativa abundância e alto teor de ferro. No Brasil, a hematita ocorre em grandes massas compactas ou friáveis de elevado teor de ferro (até 69%Fe), ou como uma rocha metamórfica conhecida com Itabirito, constituída de camadas de hematita e sílica (SiO_2).

A extração mineral ou lavra é o ponto de partida para a produção do aço. Após a avaliação dos bens minerais contidos no solo, de uma determinada região, inicia-se o processo de exploração, caso exista viabilidade técnica e econômica

¹⁶ Usinas Integradas operam as três principais etapas do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. Podem ser integradas a coque, quando dispõem de alto-forno a coque ou integradas a carvão vegetal, quando utilizam o carvão vegetal como agente redutor (uma das matérias-primas). Exemplos de Usinas integradas: Cosipa (SP), Usiminas (MG), CST (ES), CSN (RJ), Açominas (MG) e Belgo Mineira (MG).

¹⁷ Segundo contido no curso "Iron and Steel Processing" da 21st Century Foundation / Kawasaki Steel, disponível no endereço: <http://www.kawasaki-steel-21st-cf.or.jp/index2.html>.

para tal. A exploração é feita através de detonações e escavações que realizam o desmonte do estério e minério. Uma vez reduzidos a blocos menores, o estério e o minério manuseados através pás carregadeiras e caminhões: o que é estério vai para os depósitos de rejeito e o que é minério vai para pilhas de alimentação das instalações de beneficiamento.

O beneficiamento é a fase de preparação do minério para a classificação química e granulométrica exigida pelo processo siderúrgico.

No beneficiamento o minério passará pelos britadores, que quebram as rochas em partes menores, e pelas peneiras, que classificam (separam) o material em partes de acordo com o seu tamanho. Os produtos resultantes deste processo são os granulados e os finos de minério. O minério mais fino passa por uma fase de concentração, que diminui as impurezas e aumenta o teor de ferro, atingindo características ideais para o processo de aglomeração. A água é utilizada em todas as fases de concentração, por isso existem procedimentos de limpeza e reaproveitamento desta água, para não agredir o meio-ambiente. O excedente é bombeado para barragens de decantação, depois de limpa, a água retorna aos rios.

Após o beneficiamento, uma parte do material é o produto final: o minério bitolado, que vai direto para os altos-fornos das siderúrgicas. A parte mais fina do minério deverá passar pela fase de concentração para alcançar as especificações exigidas. Após o beneficiamento o minério deverá seguir para pátios de estocagem e homogeneização, onde aguardarão até serem transportados para as Siderúrgicas ou até portos para serem embarcados para o mercado externo.

4.3.2 – Aglomeração de minérios: preparando as matérias-primas

4.3.2.1 – Sinterização

A sinterização tem como objetivo o aproveitamento de materiais finos que não podem ser utilizados no processo siderúrgico, aglomerando-os em partículas grandes e adequadas ao carregamento e operação nos equipamentos de redução, principalmente altos-fornos.

Conforme ilustrado pela figura 4.13, o processo consiste em misturar e homogeneizar um conjunto de matérias-primas de fina granulometria (tamanho): minérios de ferro, fundentes e adições com um certo teor de combustível. O material é armazenado em silos e descarregado em uma esteira, constituída por grelhas móveis e uma pequena camada de material mais grosso. Ao final é depositada uma fina camada superficial de carvão, adicionada para auxiliar no início do processo.

A queima do coque, na parte superior da camada, é iniciada através de maçaricos. Por baixo das grelhas é feita sucção de ar que faz com que a zona de fusão progrida, aos poucos, em direção à grelha consumindo o combustível da mistura, elevando localmente a sua temperatura (para algo entre 1.000 e 1.300°C) e provocando uma fusão incipiente da mistura. A combustão segue através do interior do leito até chegar ao fundo deste, nas grelhas, onde termina a queima. A