

2 História do aço

O aço é muito importante na vida moderna. Automóveis, aviões, navios, linhas de transmissão de energia elétrica, tubulações de água, redes integradas de telefonia, etc., são feitos de aço. Nas casas o aço está presente em larga escala, dos talheres às painéis, passando pelos vergalhões que garantem a estabilidade das construções. Ainda, além da presença direta nos bens duráveis, o aço é vital na construção das máquinas e equipamentos que tornam possível à humanidade, gozar dos benefícios e facilidades conferidos pelos bens de consumo modernos. Desta maneira, fica inconcebível qualquer tentativa de imaginar o mundo moderno sem a presença de um grama de aço. Mais, pode-se dizer que o poderio econômico de uma nação está direta e intimamente ligado com o consumo per capita de aço.

2.1 As Primeiras Aplicações

A primeira vez que o homem fez contato com elemento ferro, foi sob a forma de meteoritos, daí a etimologia da palavra siderurgia, cujo radical latino *sider* significa estrela ou astro⁽⁰⁴⁾. O ferro, encontrado em meteoritos, contém normalmente 5 – 26% níquel, enquanto que o ferro produzido artesanalmente continha apenas traços deste elemento, logo, sempre foi muito fácil diferenciar os artefatos feitos a base de ferro oriundo de meteoritos. Os mais antigos artefatos de ferro que se tem notícia são dois objetos encontrados no Egito, um na Grande Pirâmide de Gizé, construída aproximadamente em 2900 A.C., e outro na tumba de Abidos, construída aproximadamente em 2600 A.C.

Muitos anos transcorreram até que o ferro vindo das estrelas fosse também o ferro vindo da terra. Evidências arqueológicas indicam que, o *know-how* do beneficiamento de minério de cobre ajudou acidentalmente no desenvolvimento das técnicas antigas de redução de minério de ferro. Acredita-se que algumas

fogueiras construídas a base de pedras de minério de ferro, promoviam o contato de partículas suficientemente quentes de carbono com partículas de óxido de ferro, dando início ao processo de redução, resultando em uma massa escura, não fundida, mas em contra-partida permitindo a sua deformação plástica através de técnicas de forjamento, produzindo utensílios de diferenciadas propriedades mecânicas. O registro mais antigo de um processo de redução de minério de ferro foi encontrado na parede de uma tumba egípcia, datando de aproximadamente 1500 A.C.⁽⁰⁵⁾. A simplicidade do processo chama a atenção: um simples buraco no solo, contendo minério e um combustível desconhecido, onde a chama era controlada através de foles acionados com o movimento dos pés.

Certamente outros avanços ocorreram, apesar da falta de registros, mas acredita-se que a grande difusão dos utensílios de aço ocorreu por volta do século XIII A.C., quando no Império Hitita, região onde hoje se situa a Turquia, o ferro foi introduzido em utilizações militares em detrimento ao uso do bronze. Após localizarem um grande depósito de minério de ferro, os Hititas desenvolveram técnicas de forjamento, transformando seus armamentos e construindo um verdadeiro império mantido por várias décadas.

No século VI A.C., Nabucodonosor fez construir os portões da Babilônia com pilares e vigas cobertas de cobre e reforçadas com estruturas de ferro⁽⁰⁶⁾.

Por volta do século V A.C. os chineses, que já haviam inventado a roda, começaram a fabricar o ferro carburado, mais tarde chamado ferro-gusa. Em 221 A.C., o império chinês foi capaz de dominar praticamente todos os reinos circundantes, graças às suas apuradas técnicas de produção de ferro. Estas são provas irrefutáveis de como o uso do ferro tem alterado a história ao longo dos tempos.

Vários processos de obtenção do ferro foram desenvolvidos ao longo do tempo e usados longamente nas distintas regiões, como o forno de redução africano (século VI A.C.), o buraco de redução, usado em vários países do mediterrâneo, o forno de exaustão natural, desenvolvido pelos gregos, entre outros. Estes tipos de fornos, foram utilizados ao longo dos séculos e na idade média até o século VIII, quando uma pequena forjaria da Catalunha criou a forja Catalã, um conceito que pode ser considerado como um dos maiores avanços na tecnologia de redução de minério de ferro. A primeira forja Catalã tinha uma cúpula feita de pedras, de seção circular, de aproximadamente 1 metro de altura

por 0,76 metros de diâmetro conhecida como cuba, com um bocal inferior conectado a um fole para o suprimento de ar aquecido. O minério era alimentado sobre uma camada de carvão, e sobre ele outra camada de carvão era alimentada, em procedimento muito semelhante ao atualmente usado. A forja Catalã produzia cerca de 160 kg de ferro em cinco horas, enquanto que as técnicas anteriores produziam neste mesmo intervalo de tempo, no máximo 23 kg. A forja Catalã dominou a produção de ferro até o século XV⁽⁰⁶⁾.

Estes fornos foram sendo continuamente melhorados, dando origem sempre a novos processos. Os grandes avanços puderam ser sentidos nos aumentos das alturas de chaminé e colunas de carga, provavelmente como consequência de possíveis aumentos de pressão de sopro através da utilização de foles hidráulicos. Estas melhorias deram origem aos fornos *wolf oven*, *blasofen*, *stuckofen*, *blauofen* e finalmente o *flussofen*, considerado como o primeiro alto-forno, que evoluiu gradativamente para o processo que vem dominando o cenário da produção de ferro gusa nos últimos séculos, o moderno alto-forno.

A partir da segunda metade do século XV, começa-se a produzir ferro pelo ‘refino’ do ferro-gusa, e com a crescente utilização da força motriz da água, se difundiu o uso de cilindros laminadores e trefilações a fio. No início do século XVIII, o consumo de aço conhece um grande avanço, começando também os problemas ecológicos. Dentro das minas, o trabalho era feito à luz de velas e o minério de ferro era retirado em cestas puxadas por cordas⁽⁰⁴⁾. A partir de 1600, várias leis no Reino Unido foram criadas visando a preservação das florestas, obrigando a retirada de operação de vários altos-fornos. Concomitante a isto, a produção de ferro nas colônias norte americanas fora fortemente apoiada, devido a abundância de madeira e minério de ferro. O primeiro alto-forno construído em 1622 na América do Norte, em Falling Creek, Virginia, nunca chegou a entrar em operação, pois os índios nativos americanos massacraram o chefe de obras John Berkeley e todos os trabalhadores, além de destruírem todo o trabalho realizado. Somente em 1645, um novo alto-forno nos Estados Unidos foi construído, e daí efetivamente operado.

2.2 O Uso do Coque

O coque é o material resultante do processo de coqueificação do carvão, que consiste basicamente no aquecimento à altas temperaturas, em ausência de ar, de uma massa de carvão com características aglutinantes, liberando assim um certo número de produtos voláteis e gerando um resíduo sólido, poroso, carbonoso e de alta resistência mecânica. No processo de redução de minério de ferro via alto-forno, o coque é responsável pelo fornecimento de carbono e energia necessários para reduzir quimicamente, direta ou indiretamente o minério, e produzir o ferro gusa. Devido à sua resistência, o coque é responsável por sustentar a coluna de carga do forno e gerar a permeabilidade necessária para os gases fluírem no leito.

A utilização de coque como combustível deu-se no início do século XVIII com o inglês Abraham Darby, que após alugar um alto-forno a carvão vegetal em 1708, começou a produzir o ferro-gusa a partir do coque em 1709. Durante 10 anos, coque era misturado a carvão vegetal, numa proporção crescente, até que em 1718 o gusa era totalmente produzido a partir do coque como combustível. Inicialmente, o uso de coque como combustível não se difundiu significativamente por dois motivos: devido ao alto enxofre (o ferro produzido era quebradiço) e a não publicação por Darby de seu uso durante muitos anos, apesar de não tentar fazer segredo sobre a utilização de coque. O resultado foi que até 1750 somente 3 fornos utilizavam este material como combustível, e não por coincidência, todos os 3 fornos eram operados pela família Darby. Somente a partir de 1784, graças aos bons resultados dos trabalhos de pudlagem feitos por Henry Cort, houve uma ampla difusão da utilização do coque¹.

O uso de coque permitiu aumentos significativos de produção. Por ser mais resistente, o coque permitia carregar maior quantidade de minério, resultando na construção de fornos maiores, além do que o leito formado pelo

¹ À Henry Cort se deve dois grandes avanços: o próprio forno de pudlagem e a laminação em pacotes. Em 1783 Cort patenteou os primeiros laminadores para a fabricação de perfis redondos e barras. O resultado das invenções de Cort sobre a indústria inglesa foi de tal ordem que, em 1797, a Inglaterra passou a exportar, e logo depois, atingiu a supremacia mundial na produção de ferro.

coque otimizou a permeabilidade do leito para os gases, permitindo-se soprar mais e melhorar os índices de produção.

2.3 Outras Evoluções

A partir das primeiras utilizações com sucesso dos altos-fornos à coque, as maiores evoluções, que resultaram em saltos de escala de produção, economia de combustível, índices de produtividade, podem ser consideradas^(05,06, 07):

- 1780 – Os foles passaram a ser acionados por engrenagens movidas a vapor;
- 1828 – Uso de ar pré-aquecido nas ventaneiras
- 1832 – Aproveitamento do poder calorífico dos gases de topo no pré-aquecimento do ar;
- 1857 – Desenvolvimento dos trocadores de calor tipo *Cowpers*;
- 1870 – Otimização dos sistemas de carregamento através do uso de elevadores à água, skips, etc.
- 1880 – Primeiro sistemas de limpeza de gases com a utilização de um *dustcatcher*
- 1880 – Difusão de técnicas para proteção do revestimento interno dos fornos (refratários, tubos de refrigeração, painéis refrigerados, etc.)
- 1910 – Utilização de sopradores tipo turbo, ao invés de foles
- 1910 – Primeira máquina de sinterização
- 1917 – Primeira máquina para construção de tijolos refratário de qualidade
- 1944 – Primeira patente para a injeção de finos pelas ventaneiras
- 1950 – Otimização do sistema de controle dos fornos
- 1951 – Enriquecimento de ar com oxigênio puro

2.4

A experiência no Brasil

No Brasil, a produção de ferro iniciou logo após ao descobrimento. Em 1554, o Padre Anchieta reportava à corte a ocorrência de ferro e prata. Em 1587, Afonso Sardinha iniciou a industrialização de ferro no Brasil. A produção aumentava até que, em 5 de janeiro de 1785, D. Maria, rainha de Portugal, proibiu terminantemente qualquer existência de fábricas na colônia, devida à febre do ouro, que exigia a dedicação exclusiva de todos os recursos ao enriquecimento da Metrópole. Somente após a ascensão de D. João VI ao trono, é que as fábricas seriam novamente permitidas.

Mas o grande passo foi dado por força da Carta Régia de 4 de dezembro de 1810. Por ordem de José Bonifácio de Andrada e Silva - o 'Patriarca da Independência', o geólogo e metalurgista Wilhelm von Eschwege, que havendo trabalhado sob as ordens dele na fábrica de Foz D'Alge em Portugal, de 1803 a 1807, chegou ao Brasil em 1810. Eschwege construiu perto de Congonhas do Campo, MG, na 'Fábrica de Ferro' de propriedade da Sociedade Patriótica, organizada pelo Conde de Palma, então governador de Minas Gerais, um baixo forno tipo Sueco e obteve aos 17 de dezembro de 1812, a primeira corrida de ferro gusa (ou ferro coado como era chamado à época) no Brasil.

Em 1905 o Brasil possuía 2 altos-fornos, 1 deles inoperante devido à concorrência internacional, produzindo 2100 toneladas anuais de gusa e cerca de 100 forjas produzindo mais 2000 toneladas de ferro em barras⁽⁰⁶⁾. Hoje, 'apenas' 100 anos depois, a produção de ferro gusa no Brasil é da ordem de 25 milhões de toneladas anuais, sendo 75% produzido pelas usinas integradas (70% via altos-fornos à coque e 5% via altos-fornos à carvão vegetal) e os 25% restantes sendo produzidos por usinas independentes à carvão vegetal.

2.5

A Siderurgia Moderna

Os anos 50 e 60 foram responsáveis por um grande *boom* na produção mundial de aço. Nesta época, a demanda por aço crescia a uma taxa de aproximadamente 6% ao ano, devido principalmente ao crescimento da procura

por bens de consumo em geral, como eletrodomésticos, carros, etc. Para suprir esta demanda, a melhor opção econômica e tecnológica, eram os ‘grandes’ altos-fornos, construídos com capacidades de produção da ordem de 4 à 6 milhões de toneladas de ferro gusa líquido/ano, para em seqüência proceder a etapa de refino do aço. Estas usinas, conhecidas como integradas, apresentam todas as etapas de produção e de beneficiamento do aço, ou seja, redução do minério, refino do aço e laminação. Ainda hoje as usinas são chamadas de integradas, quando apresentam este esquema de produção. O processo utilizado para o refino do aço, em 1950, era principalmente os fornos Siemens-Martin, processo desenvolvido por Karl Wilhelm Siemens em 1868. Porém, uma inovação radical aconteceu no início da década de 50, quando a siderúrgica austríaca Voest-Alpine desenvolveu os conversores a oxigênio, também conhecido como conversores LD, nome ligado à primeira planta que operou com este tipo de equipamento em 1952, a Linz e Donavitz na Áustria⁽⁰⁸⁾. Os conversores a oxigênio, são até hoje técnica e economicamente atraentes para largas escalas de produção. A carga dos fornos LD é basicamente constituída de gusa líquido, complementado por carga sólida (10 à 30%), como sucata ou gusa sólido.

Com o aumento do *market-share* das aciarias a oxigênio, um excedente gradual de sucata foi sendo gerado, tendo em vista que os conversores a oxigênio aceitam menos carga sólida do que os antigos fornos Siemens-Martin, fazendo com que o preço da sucata tivesse quedas significativas. Esta queda de preço da sucata chegou à níveis em que, o custo de refusão se mostrava muito mais atraente do que o custo da redução de minério de ferro via alto-forno.

Este fator aliado a uma maior flexibilidade de produção dos fornos elétricos, menores custos de investimento, variáveis ambientais, e mais importante, margens achatadas de lucro, fizeram surgir o conceito das mini-usinas. As mini-usinas são assim chamadas por não apresentarem a etapa de redução do minério de ferro, fabricando o aço a partir da rota forno elétrico-forno panela.

Credita-se o desenvolvimento dos fornos elétricos a Sir Humphrey Davy no ano de 1800, mas é mais apropriado creditar-se este feito a Sir Willian Siemens, que em 1878 patenteou, construiu e operou e fornos de acordo com os princípios de arcos diretos e indiretos. Nesta época, a disponibilidade de energia elétrica era escassa, o custo elevado e a tecnologia dos eletrodos de carbono

estava apenas engatinhando. Assim, fornos elétricos acabaram sendo incubados por algumas décadas até que a indústria de energia, assim como a de eletrodos de carbono, evoluíssem o suficiente.

Atualmente, a produção de aço pelas mini-usinas continua crescendo em relação às aciarias a oxigênio, ainda que em países como o Brasil esta tendência não seja seguida. Como a quantidade de sucata disponível não é suficiente para atender a demanda de aço, estima-se que por mais 30 anos, a rota alto-forno/conversores LD deverá sobreviver.

Outro aspecto importante, surgido devido ao voraz advento das mini-usinas, à oferta limitada de sucata de baixa contaminação química e à baixa atratividade econômica e ambiental dos altos-fornos, foi a busca de alternativas para a produção de ferro primário⁽⁰⁹⁾. Neste contexto, pode-se evidenciar o desenvolvimento dos processos comerciais de redução direta, como o HYL I e III, Midrex, SL-RN, etc. Estes processos procedem a redução parcial do óxido de ferro, na forma de pelotas ou granulado, através da utilização de um redutor sólido ou gasoso. O produto final, conhecido como DRI, sigla em inglês para ferro diretamente reduzido ou *Direct Reduced Iron*, é disponibilizado aos fornos elétricos para a produção de aço de alta qualidade, como os produtos planos, com baixos teores de enxofre, nitrogênio e contaminantes, mas com perdas de produtividade, rendimento e aumento no consumo de eletricidade.