

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ECONOMIAS DE ESCALA EM DUAS TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS: UM
ESTUDO DO SETOR SIDERÚRGICO**

Juliano Bezerra de Araújo

**Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de
Produção da Universidade Federal
de São Carlos, como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Silva Pinho

Agência Financiadora: FAPESP

SÃO CARLOS

2003

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

A663ee	<p>Araújo, Juliano Bezerra de. Economias de escala em duas tecnologias alternativas: estudo do setor siderúrgico / Juliano Bezerra de Araújo. -- São Carlos : UFSCar, 2004. 100 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2003.</p> <p>1. Organização industrial. 2. Economia de escala. 3. Indústria siderúrgica. 4. Tecnologia - produção. 5. Reestruturação industrial. I. Título.</p> <p>CDD: 658.51 (20^a)</p>
--------	---

*Aos meus pais, Genésio e Laurie,
por toda dedicação e carinho.*

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho de pesquisa contou com o maciço suporte de diversas pessoas e instituições, que destinaram muito de seu tempo e de seus esforços para suprir com informações e idéias a dissertação de mestrado.

Primeiramente, a FAPESP, que me beneficiou com uma bolsa de mestrado durante o andamento do trabalho, amenizando as restrições orçamentárias e trazendo maior conforto para o desenvolvimento da pesquisa. Através de seus recursos, foi possível adquirir equipamentos e livros, assim como dar continuidade a uma série de visitas as usinas siderúrgicas, etapa essa fundamental para a coleta de dados.

Ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar/DEP), venho a agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho. O companheirismo dos professores, funcionários e amigos, têm sido sempre freqüentes. Na Biblioteca Comunitária (COMUT/UFSCar), quero agradecer a Sheila Rizzo pela presteza e eficiência durante a fase de pesquisa bibliográfica.

As seguintes universidades, UNICAMP/DPCT (Departamento de Política Científica e Tecnológica) e USP/FEA (Departamento de Contabilidade), que me deram autorização para que freqüentasse disciplinas correlatas a minha temática de pesquisa.

Gostaria de agradecer a cooperação da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), que tornou possível a minha presença no curso “Siderurgia para não Siderurgistas”. O aprendizado nessa etapa da pesquisa foi essencial para amadurecer as idéias e concepções até o momento definidas para os estágios posteriores do trabalho.

As empresas COSIPA e Companhia Belgo-Mineira, que abriram suas portas para visitas as diferentes etapas dos seus processos. Seria injusto deixar de citar alguns nomes que, no primeiro momento, viabilizaram a minha visita. Na COSIPA, o engenheiro Carlos Eduardo Paes e a funcionária Eugenia Salgado Granja, e na companhia Belgo-Mineira, o senhor Marcelino Vieira Lopes. Aos demais profissionais

destas empresas, que me atenderam em minhas dúvidas e perguntas, um grande obrigado.

Finalmente, ao professor Dr. Marcelo Silva Pinho, minha mais sincera gratidão pela orientação sempre presente nos variados momentos, sempre fundamentais para o esclarecimento de dúvidas e para prosseguimento do trabalho. Fica aqui marcada a minha grande admiração por um profissional ímpar e excelente amigo. Ao longo dessa nova jornada que se inicia, um ponto de referência a quem vou sempre me espelhar.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. ECONOMIAS DE ESCALA E REESTRUTURAÇÃO INDUSTRIAL	6
1.1. Economias de Escala: Conceitos, Fontes e Medidas	6
1.1.1. Conceito e interpretação gráfica	7
1.1.2. Fontes de economias de escala	10
1.1.3. Mensuração de economias de escala	15
1.2. As Economias de Escala e o Processo Concorrencial na Produção Fordista	18
1.3. O Papel das Economias de Escala no Paradigma Tecnológico Emergente	23
2. PROCESSO DE PRODUÇÃO NA SIDERURGIA	27
2.1. Dois Processos de Produção Concorrentes	27
2.2. Produção Integrada a Coque	30
2.2.1. Processo de aglomeração de minérios	32
2.2.2. Processo de coqueificação	33
2.2.3. Altos-Fornos	36
2.2.4. Refino do aço líquido	39
2.2.4.1. Refino primário em conversor a oxigênio	39
2.2.4.2. Refino secundário dos aços	41
2.2.5. Lingotamento Contínuo Convencional	43
2.2.6. Laminação	44
2.2.6.1. Laminação a Quente	45
2.2.6.2. Laminação a Frio	49
2.3. Produção Semi-Integrada	50
2.4. Avanços Tecnológicos Recentes	52
2.4.1. Lingotamento de placas finas e laminação compacta	52
2.4.2. Processos alternativos de produção de ferro primário	55

3. ECONOMIAS DE ESCALA NA SIDERURGIA	58
3.1. Escalas Mínimas Eficientes dos Processos Siderúrgicos	59
3.2. Fontes de Economias de Escala na Siderurgia	66
3.2.1. Sinterização e coqueificação	66
3.2.2. Altos-Fornos	69
3.2.3. Refino e lingotamento do aço	75
3.2.4. Laminação a quente	80
3.2.5. Laminação a frio	82
3.2.6. Processo Semi-Integrado	83
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1.1.2.1: Fontes de economias de escala	11
QUADRO 2.2.4.2.1: Tipos de metalurgia de panela	42
QUADRO 2.2.4.2.2: Nível das funcionalidades do forno panela e do RH	43
QUADRO 2.2.6.2.1: Processos da laminação a fio	49
QUADRO 2.3.1: Evolução técnica dos fornos elétricos a arco	51
QUADRO 2.4.1.1: Custo de produção de bobinas laminadas a frio, março de 1999	53
QUADRO 2.4.1.2: Principais características dos equipamentos de <i>thin-slab-casting</i>	54
QUADRO 2.4.1.3: Melhor controle externo da produção nas unidades <i>Compact Strip Production</i>	55
QUADRO 2.4.2.1: Novas tecnologias de produção de ferro-primário	56
QUADRO 3.1: Evolução do tamanho das plantas integradas	58
QUADRO 3.1.1: Escala mínima eficiente para as diferentes etapas do processamento siderúrgico (milhões de toneladas por ano)	62
QUADRO 3.1.2: Custos Operacionais e de Capital para a Produção de Laminados a Quente (Lingotamento Contínuo Convencional e <i>Thin-slab-casting</i>)	65
QUADRO 3.2.1.1: Fontes de economias de escala nas operações de coqueificação e sinterização	67
QUADRO 3.2.2.1: Fontes de economias de escala nos altos-fornos	69
QUADRO 3.2.2.2: Dados operacionais de quatro altos-fornos de diferentes diâmetros internos	72
QUADRO 3.2.2.3: Principais características dos altos-fornos brasileiros a coque ..	72
QUADRO 3.2.3.1: Fontes de economias de escala nas operações de refino, e no processo de solidificação do aço	76
QUADRO 3.2.3.2: Tempo médio dos ciclos de operação do conversor LD	77
QUADRO 3.2.4.1: Fontes de economias de escala na laminação a quente	80
QUADRO 3.2.5.1: Fontes de economias de escala na laminação a frio	82

QUADRO 3.2.6.1: Fontes de economias de escala nas etapas de fusão e solidificação das usinas semi-integradas	83
QUADRO 3.2.6.2: Tipos de fornos elétricos a arco	84
QUADRO 3.2.6.3: Informações técnicas de fornos elétricos a arco	86
QUADRO 3.2.6.4: Fontes de economias de escala na etapa de laminação das usinas semi-integradas	87
QUADRO 4.1: Fontes de economias de escala para a rota integrada, a alto-forno, de produção de aço	90
QUADRO 4.2: Fontes de economias de escala para a rota semi-integrada de produção de aço	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Participação das aciarias elétricas em vários países e no mundo	2
FIGURA 2: Taxas médias de crescimento anual da produção mundial de aço bruto (1950 – 97)	3
FIGURA 1.1.1.1: Custos unitários e escala de produção	8
FIGURA 1.1.1.2: Curvas de custo de longo prazo: (a) Formato em “U” da teoria tradicional de custos; (b) Formato em “L”; (c) Formato híbrido; (d) Formato em queda ininterrupta	8
FIGURA 2.2.1: Alternativas tecnológicas para a produção de aço	30
FIGURA 2.2.2: Fluxograma de produção para usina integrada a coque ou para usina semi-integrada	31
FIGURA 2.2.1.1: Fluxograma do processo de sinterização	32
FIGURA 2.2.1.2: Diferentes equipamentos de pelotização	33
FIGURA 2.2.2.1: Desenho esquemático de um sistema de coqueria multi-câmara ..	34
FIGURA 2.2.2.2: Desenho esquemático de uma unidade de coqueificação	35
FIGURA 2.2.3.1: Esquema ilustrativo dos altos-fornos e suas partes principais	36
FIGURA 2.2.3.2: Desenho do corpo principal do alto-forno	38
FIGURA 2.2.4.1.1: Conversor LD com lança de oxigênio	40
FIGURA 2.2.4.1.2: Posições de Operação do Conversor	41
FIGURA 2.2.5.1: Desenho esquemático de uma máquina de lingotamento contínuo de placas	44
FIGURA 2.2.6.1.1: Laminador de chapas grossas	46
FIGURA 2.2.6.1.2: Laminador de tiras a quente	47
FIGURA 2.2.6.1.3: Exemplo de seqüência de passes para a produção de barras redondas	48
FIGURA 2.2.6.1.4: Esquema de uma laminação de perfis médios	48
FIGURA 2.2.6.2.1: Fluxograma do processo de laminação de tiras a frio	50
FIGURA 3.1: Gráfico da evolução do tamanho das plantas integradas nos EUA, CE e Japão	59

FIGURA 3.2.2.1: Economias de escala nos altos-fornos nacionais	73
FIGURA 3.2.2.2: Número de altos-fornos desativados e recém construídos no mundo entre os anos 1985 e 1995, segundo o diâmetro interno das instalações	75
FIGURA 3.2.3.1: Desenvolvimento do tamanho e do formato do conversor LD	78
FIGURA 3.2.6.1: Forno de carcaça dupla	85
FIGURA 4.1: Distribuição do custo operacional das mini-usinas em alguns países .	92

RESUMO

Uma característica importante da produção industrial capitalista está relacionada com a exploração das economias de escala de forma generalizada pelas firmas com a finalidade de desfrutar de resultados econômicos melhores. Esse foi o caso do setor siderúrgico, que para satisfazer às suas necessidades de eficiência operacional, passou a adotar equipamentos e instalações sucessivamente maiores em suas plantas industriais. Essa trajetória foi mais intensa para as usinas integradas, que apresentam tamanho superior ao das “mini-usinas”. Este trabalho procura investigar o papel das economias de escala no processamento siderúrgico, por meio de um abrangente levantamento bibliográfico junto à literatura especializada e da apreciação *in loco* das diferentes etapas que compõem o processo. Além disso, numerosas entrevistas com metalurgistas de diversas áreas destas empresas foram realizadas. Os resultados obtidos indicaram, entre outras conclusões, que a maior parte das usinas semi-integradas atualmente em operação não explora integralmente o potencial de economias de escala associado ao processo, sendo dimensionadas em escala sub-ótima. Com um cenário de demanda mais dinâmico, é de se esperar uma exploração mais ativa deste tipo de economia, prevalecendo a trajetória de aumento das escalas para ambas as rotas tecnológicas, usinas integradas e semi-integradas.

Palavras-chave: Economia de Escala. Indústria Siderúrgica. Usinas Integradas.
Usinas Semi-Integradas. Tecnologia de Produção.
Reestruturação Industrial.

ABSTRACT

An important characteristic of the capitalist industrial production is related to the exploration of the scale economies in a widespread way by firms with the purpose of enjoying better economical results. This was the case of the steel industry, which, in order to meet the increasing needs of operational efficiency started to adopt larger and larger equipment and facilities in their industrial plants. This path was more intense in the integrated plants, which present larger size than the “mini-mills”. This work investigates the role of the scale economies in the metallurgical processing, through extensive bibliographical research in specialized literature and visits to different companies. Besides, numerous interviews with metallurgists from several areas of these industries have been done. The results indicated, among other things, that most of the semi-integrated plants now in operation do not fully explore the potential of scale economies associated to the process, for having been constructed in sub-optimal scale. In a more dynamic demand scenery, a better exploration of this economy is expected, where it would prevail the path of increasing scales for both technological routes, the integrated and the semi-integrated plants.

INTRODUÇÃO

A proposta desse estudo é analisar o impacto das economias de escala sobre o setor siderúrgico. Economias de escala são reduções no custo médio geradas pelo aumento da escala de produção. Advêm de um planejamento adequado de longo prazo, em que todos os fatores de produção são ajustados à realidade do planejamento estratégico da empresa.

A influência das economias de escala no processamento siderúrgico reflete-se, antes de qualquer coisa, no tamanho crescente de suas unidades produtivas. Durante muito tempo, novas usinas adotaram equipamentos e instalações sucessivamente maiores para satisfazer às necessidades de eficiência operacional.

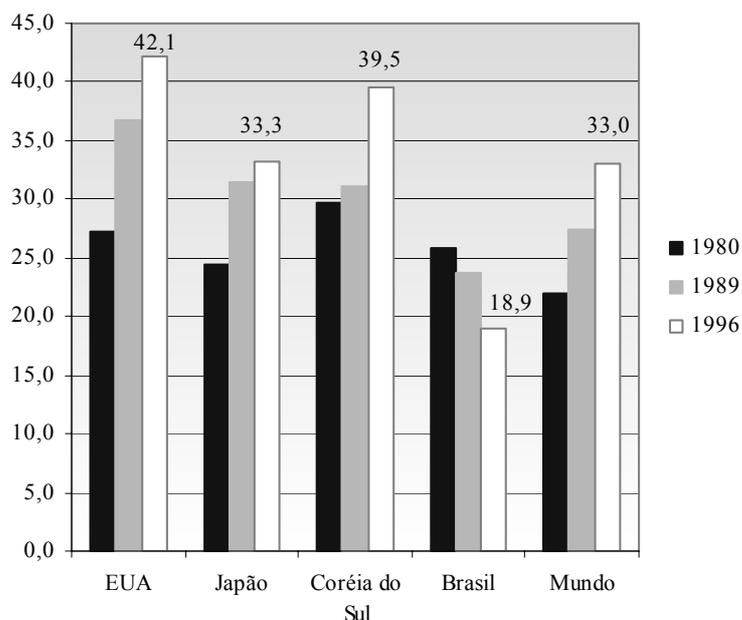
Essa trajetória de valorização das escalas de produção foi intensa para as usinas integradas. As unidades produtivas com melhor resultado econômico passaram a empregar altos-fornos com escala mínima eficiente da ordem de 2,4 milhões de toneladas. Ao considerar as demais etapas do processo, o tamanho mínimo destas plantas ultrapassou, segundo alguns autores, o patamar de 7 milhões de toneladas por ano (Tarr, 1977).

No caso das usinas semi-integradas, o volume de produção permaneceu restrito a uma faixa inferior, não passando comumente do limite de 1 milhão de toneladas por ano. Um equipamento essencial para as mini-usinas, o forno a arco elétrico, é capaz de trabalhar a níveis de produção mais baixos, da ordem de 500 mil toneladas por ano (Fischer *et alii*, 1988).

Apesar disso, o desempenho das usinas semi-integradas tem assumido importância cada vez maior dentro do setor siderúrgico. O seu crescimento vem sendo favorecido pela difusão de inovações tecnológicas baseadas na compactação dos processos industriais, que levam a economias de mão-de-obra, energia e principalmente, capital. Frequentemente orientadas a mercados regionais, o que viabiliza o suprimento de matéria-prima e o escoamento da produção a menores distâncias, as chamadas mini-usinas têm ampliado a participação na produção mundial de aço¹ (Figura 1).

¹ A siderurgia nacional não responde a esta tendência de elevação da participação das aciarias elétricas por alguns motivos específicos, entre eles, a grande disponibilidade de minério de ferro com qualidade inigualável a baixo custo e o suprimento escasso de sucata.

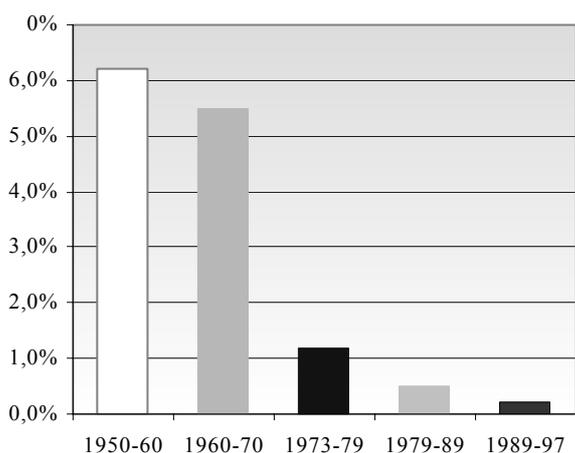
De qualquer maneira, a disponibilidade de insumos metálicos a custo competitivo representa um limite para a ampliação adicional da parcela do processo semi-integrado na siderurgia mundial. A menos que algum dos substitutos da sucata em desenvolvimento venha a se provar competitivo, não é de se esperar elevação significativa dessa parcela.



Fonte: IISI.

FIGURA 1: Participação das aciarias elétricas em vários países e no mundo.

De todo modo, um fator que condicionou a evolução das plantas semi-integradas foi o cenário de estagnação da demanda de aço pelo mundo. Entre 1973 e 1997, o escasso dinamismo do mercado determinou que a produção mundial de aço bruto crescesse a uma taxa média de apenas 0,6% ao ano (Figura 2). Tal situação inibe a realização de pesados investimentos e de elevados saltos na oferta de produto. É mais seguro, nesse contexto, aplicar menores quantidades de capital e proporcionar menores acréscimos de capacidade. Sendo as usinas semi-integradas a alternativa de custo de capital mínimo no caso de novos investimentos (Pinho, 1993), o quadro, de certo modo, favoreceu este processo na disputa com a produção integrada. Por outro lado, pode-se especular que a evolução precária do mercado tenha induzido as empresas do setor a implantarem usinas semi-integradas de porte menor do que aquele que prevaleceria em outras circunstâncias.



Fonte: *Adaptado de Pinho, 2001: 89.*

FIGURA 2: Taxas médias de crescimento anual da produção mundial de aço bruto (1950 – 97).

O propósito central desta dissertação é levantar, sistematizar e analisar informações sobre as economias de escala técnicas existentes nos dois principais processos de produção siderúrgica, de maneira a permitir uma comparação entre essas duas tecnologias alternativas. Mais especificamente, procura-se encontrar evidências que dêem sustentação à hipótese de que as escalas inferiores das usinas semi-integradas não decorrem apenas de uma menor propensão a economias de escala, sendo fruto também das circunstâncias prevalecentes no mercado siderúrgico nas últimas três décadas do século XX. A busca de minimizar os efeitos da adição de oferta sobre o mercado teria prevalecido mesmo que às custas de alguma perda de eficiência que seria obtida com escalas maiores. Nesse contexto, os tamanhos efetivamente observados para as usinas semi-integradas tendem a subestimar a propensão a economias de escala nesse processo. O porte relativamente grande de algumas usinas semi-integradas instaladas em mercados mais dinâmicos constitui evidências indireta que reforça essa hipótese.

Em outras palavras, cabe realizar uma análise detalhada dos dois processos, de modo a verificar se realmente existem propensões a economias de escalas distintas entre as tecnologias empregadas nas duas indústrias ou se a propagação de unidades de menor porte foi uma opção estratégica encontrada por investidores para minimizarem seus riscos de perdas num contexto de mercado estagnado.

As informações referentes às evidências da ocorrência de economias de escala no processo siderúrgico foram obtidas de duas formas. Primeiramente, um esforço de pesquisa foi feito junto à literatura especializada para compreender quais são as

conseqüências da elevação de capacidade para os índices de produtividade e rendimento, identificando as possíveis fontes causadoras de melhores resultados e os tipos de *inputs* de produção que são economizados. Nesse momento da pesquisa, procurou-se vasculhar a bibliografia sobre os processos siderúrgicos em busca de indícios das inúmeras fontes de economias de escala apontadas genericamente na literatura teórica de economia industrial.

Posteriormente, uma série de entrevistas com metalurgistas buscou aproveitar a vasta experiência deles ao setor siderúrgico. Além disso, foram visitadas duas usinas representativas de cada uma das rotas tecnológicas. A apreciação *in loco* do processo e a discussão com engenheiros especialistas em cada etapa permitiu testar a veracidade das hipóteses levantadas na fase anterior da investigação. As duas empresas visitadas foram a Usina José Bonifácio de Andrada e Silva, pertencente à Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) e localizada em Cubatão (SP) e a unidade de Juiz de Fora (MG) da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira. A primeira empresa opera uma planta integrada e a segunda, uma planta semi-integrada. As instalações da usina instalada em Juiz de Fora, pertencente ao grupo Arcelor (Belgo-Mineira), incluem uma aciaria elétrica e uma laminação combinada de fio-máquina e barras, ambas com uma capacidade instalada de 1 milhão de toneladas de produto por ano. Também existe uma unidade de trefilaria, com produção máxima de 226 mil toneladas por ano. Com relação à COSIPA, suas instalações são mais extensas possuindo a configuração típica das usinas integradas. Compõem a sua planta de Cubatão (SP) áreas de redução, aciaria, laminação a quente e laminação a frio.

O texto desta dissertação é composto por três diferentes capítulos. No primeiro, é abordado o papel das economias de escala no processo de reestruturação industrial. A discussão conceitual e teórica das economias de escala também é realizada detalhadamente, apresentando conceitos que serão utilizados durante o trabalho. Métodos para a mensuração das economias de escala também foram abordados no capítulo 1. As três abordagens mais comumente usadas são apresentadas e analisadas.

No capítulo 2 são analisadas as duas rotas tecnológicas do processamento siderúrgico, usinas integradas e semi-integradas, descrevendo cada uma das operações que as compõem. O detalhamento do funcionamento dos equipamentos e instalações fornece subsídios para a compreensão das economias de escala, permitindo identificar

apropriadamente as fontes geradoras dos rendimentos crescentes de escala. As mudanças tecnológicas mais recentes são discutidas logo a seguir, abordando as principais tecnologias emergentes na siderurgia mundial.

O capítulo 3 introduz as escalas mínimas eficientes e as fontes de economias de escala dos processos siderúrgicos. São apresentados os diversos *inputs* de produção que são economizados com a expansão da capacidade produtiva das plantas, assim como as fontes de economias de escala e as etapas do processamento em que são encontrados.

Por fim, as principais conclusões da dissertação são sintetizadas no último capítulo.

Capítulo 1

ECONOMIAS DE ESCALA E REESTRUTURAÇÃO INDUSTRIAL

Uma característica importante da produção industrial capitalista está relacionada com a exploração das economias de escala de forma generalizada pelas firmas com a finalidade de desfrutar de resultados econômicos melhores. Áreas como a economia e a engenharia ratificam o importante papel que as economias de escala exercem ao abordar assuntos como estrutura de mercado, redução de custos e maximização de eficiência das empresas.

O presente capítulo foi dividido em quatro partes que procuram tratar de maneira abrangente o conceito das economias de escala e suas inter-relações com os movimentos tecnológicos e as tendências organizacionais, incluindo uma breve revisão dos principais métodos existentes para se estimar a relação entre custo e tamanho.

A primeira seção traz uma discussão conceitual e teórica das economias de escala. Antes de serem apresentados os elementos geradores de economias de escala, são apontados conceitos que indicam quando os retornos crescentes de escala estão presentes e como podem ser classificados. Uma última parte trata dos métodos mais comumente usados para estimar as economias de escala.

Na segunda seção, o foco de análise muda para o processo de produção fordista, enfatizando o papel das economias de escala nos esquemas de produção em massa, métodos organizacionais que dominaram a produção industrial no século XX.

A terceira seção trata da reestruturação industrial e do papel das economias de escala no paradigma técnico-produtivo emergente, que põe em xeque alguns dos pilares nos quais se assentava o modo fordista de produção. Novas tecnologias, particularmente a microeletrônica e as tecnologias da informação, têm levado a uma série de desenvolvimentos no processo de produção, ocasionando maior flexibilidade, que é muito importante para se reduzir a incerteza associada a demanda (Alcorta, 1994).

1.1. Economias de Escala: Conceitos, Fontes e Medidas

Como foi comentado, a presente seção descreve conceitos fundamentais a cerca das economias de escala. Em primeiro lugar, é apresentada as condições que levam a

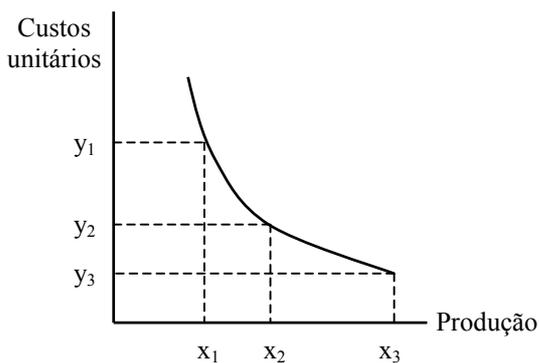
obtenção de rendimentos crescentes de escala, fazendo uso de diferentes gráficos para ilustrar positivamente os conceitos envolvidos. Em seqüência, uma série de fontes de economias de escala foram compiladas e resumidas. Por último, alguns métodos de mensuração das economias de escala são descritos.

1.1.1. Conceito e interpretação gráfica

A maximização dos lucros envolve uma minimização de custos, o que equivaleria a dizer que uma firma maximizadora dos lucros produz pelo seu custo mínimo, dado o preço de mercado. Ao considerar o horizonte de planejamento ou a situação de longo prazo a empresa escolherá entre todas as possíveis combinações de fatores de produção, aquela que minimize seus custos totais. Formalmente, a obtenção de rendimentos crescentes de escala sobre a produção total ocorre quando as empresas conseguem ampliar a produção, combinando insumos (z_1, z_2, \dots) e satisfazendo a seguinte condição: $F(az_1, az_2, \dots) > aF(z_1, z_2, \dots)$, para $a > 1$ (Eaton & Eaton, 1999). As economias de escala se traduzem concretamente na diluição dos custos fixos entre mais unidades, na redução dos custos e despesas de construção, no abatimento dos custos na compra de materiais e serviços e, além disso, na obtenção de melhorias e de cortes de custos no processo produtivo.

Portanto, ao aumentar o volume de produção de um bem no período, os custos unitários de produção são reduzidos, proporcionando economias de escala. Esta redução pode se dar pela possibilidade de utilização de métodos produtivos mais automatizados ou mais avançados, mas também pode estar relacionada a ganhos em propaganda, marketing, P&D, financiamento, enfim, fatores relacionados às decisões de longo prazo da empresa e que compõem os *inputs* de produção (Szwarcfiter, 1997).

Graficamente, as economias de escala podem ser descritas como uma queda do custo médio de longo prazo à medida que se expande a escala de produção, queda esta motivada por ganhos em qualquer das etapas de produção e comercialização (ver figura 1.1.1.1).

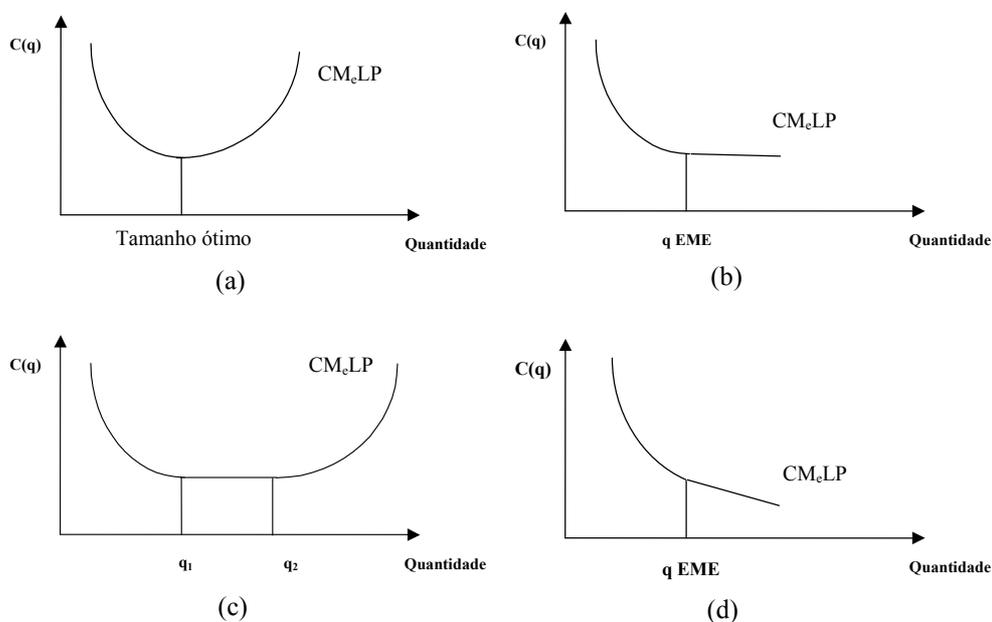


Fonte: Pratten, 1991: 13.

FIGURA 1.1.1.1: Custos unitários e escala de produção.

Na figura acima, as economias de escala estão ilustradas quando a produção cresce de x_1 para x_2 . Ao aumentar o volume de produção, os custos unitários médios de produção caem de y_1 para y_2 . A escala na qual os custos unitários médios param de cair é chamado de escala mínima eficiente (EME).

Uma ilustração mais plena dos tipos de comportamento das curvas de custo médio de longo prazo (CMeLP) está exposta na figura 1.1.1.2. Nestas quatro curvas, diferentes tendências a economias de escala são apresentadas, refletindo diretamente a diversidade de funcionamento dos setores da economia.



Fonte: Adaptado de Looty e Szapiro, 2002.

FIGURA 1.1.1.2: Curvas de custo de longo prazo: (a) Formato em "U" da teoria tradicional de custos; (b) Formato em "L"; (c) Formato híbrido; (d) Formato em queda ininterrupta.

Cada uma das curvas está sujeita a diferentes rendimentos crescentes de escala. No primeiro caso, a curva (a) postula um custo médio de longo prazo (CMeLP) em formato de “U”, assumindo implicitamente a hipótese forte de que a tecnologia é completamente inflexível, uma vez que qualquer aumento da produção acima do tamanho mais eficiente, por menor que seja, leva a um crescimento substancial dos custos (Looty e Szapiro, 2002). Nessa situação, a escala mínima eficiente alcançou o *status* de tamanho ótimo de planta, visto que qualquer variação na produção acarretaria resultados piores para o rendimento da empresa. A curva (b), por sua vez, ao invés da escala ótima, evidencia a escala mínima eficiente, onde o nível de planta representa a menor quantidade de produto possível para que o CMeLP seja minimizado. Dessa forma, fica claro que não existem deseconomias de escala na faixa relevante de produção. Na curva (c), um determinado intervalo da produção (entre os níveis q_1 e q_2) está sujeito a fatores de economias e deseconomias de escala da mesma proporção, determinando, pois, uma faixa de custos constantes por unidade produzida. Acima de q_2 , deseconomias de escala passam a predominar, elevando o custo médio de produção, como na curva (a). Por fim, a curva (d) apresenta o caso em que as empresas conseguem produzir cada vez mais e a custos decrescentes, embora a expansão seja limitada, em algum momento, por restrições de mercado. Esta situação, em princípio, será indutora dos chamados monopólios naturais.

Segundo Bain (1956), as economias de escala podem ser classificadas em duas categorias: reais ou pecuniárias. Reais são aquelas em que à medida que cresce a escala de produção são necessários menos *inputs* para a fabricação da mesma quantidade de produto. Já no caso das pecuniárias, os preços dos fatores de produção decrescem com o aumento das quantidades produzidas e não a quantidade consumida de insumos por unidade de produto.

Enquanto as economias de escala reais podem decorrer de diversos fatores, as pecuniárias, são normalmente derivadas da maior capacidade de barganha ou do menor risco decorrente do grande porte da firma. Uma firma operando em grandes volumes pode adquirir seus insumos a preços mais baixos, conseguindo impor aos seus fornecedores termos que atendam seu interesse. Isso pode ocorrer com a aquisição de insumos físicos, mas também com serviços, entre esses se destacando os serviços financeiros.

1.1.2. Fontes de economias de escala

Uma série de fatores capazes de gerar economias de escala e que são conseqüências das decisões tomadas pelas empresas em seus planejamentos estratégicos de longo prazo são apresentados no quadro 1.1.2.1.

A discussão precedente sobre fontes de economias de escala, seguindo a literatura, enfatizou aquilo que pode ser chamado de retornos crescentes de escala “estáticos”, isto é, aqueles que se impõem numa situação em que o leque de opções tecnológicas é dado. Pratten (1991), no entanto, envereda por direção diferente e indica que outro importante gerador de economias de escala em um sistema produtivo é o progresso técnico, por quatro motivos principais. Primeiro, a criação de novos conhecimentos pode ser diluída em volumes de produção superiores em situações em que a demanda esteja em mesmo compasso de crescimento. Os efeitos da aprendizagem que geram melhorias no rendimento da produção podem estar relacionados com a invenção e a introdução de novas técnicas. Em terceiro lugar, para se construir novas plantas com capacidades maiores pode ser necessário inventar e usar novas técnicas. Por último, as firmas têm que adotar mudanças nas técnicas de produção através do tempo.

QUADRO 1.1.2.1: Fontes de economias de escala.

Fontes geradoras de economias de escala	Descrição
Indivisibilidade dos investimentos	Os investimentos não podem ser decompostos proporcionalmente a escala de produção. Um exemplo seria o gasto com pesquisa e desenvolvimento de um novo produto que é diluído em volumes superiores de produção.
Indivisibilidade técnica	A capacidade produtiva não se expande de forma constante. Como nem sempre é possível comprar equipamentos com um tamanho exato para produzir a quantidade de produto exatamente necessária, possíveis subutilizações do equipamento podem servir para uma futura expansão produtiva.
Economias geométricas	A capacidade do equipamento ou instalação aumenta mais rapidamente que os custos incorridos. No caso dos tanques de estocagem, a capacidade aumenta na proporção do volume, enquanto os gastos são calculados pela superfície de material empregado.
Economias de especialização ou ganhos de especialização	Economias de especialização podem surgir com a elevação do nível de produção, pois a firma teria a opção de empregar funcionários com conhecimentos específicos e utilizar máquinas dedicadas a tarefas simples. Com uma maior divisão do trabalho, melhor será a produtividade e, por conseguinte, menores serão os custos.
Economias advindas do uso de recursos em grandes volumes	A empresa que tem muitas máquinas iguais pode adquirir peças de reposição em melhores condições, ou ainda, empregar um <i>staff</i> de manutenção menor.
Técnicas superiores para organizar a produção	Técnicas superiores para organizar a produção elevam a produtividade e diminuem o ciclo de produção
Efeito de aprendizagem	Conhecimentos tácitos (ativos intangíveis), avanços produtivos decorrentes de investimentos em P&D, bem como economias resultantes de campanhas de <i>marketing</i> voltadas a mercados conhecidos são alguns dos efeitos de aprendizagem que geram economias de escala.
Economias associadas com a integração vertical	A integração vertical pode possibilitar economias nos custos de transporte e de estocagem, bem como a diminuição dos custos de transação da empresa.

Fonte: Adaptado de Pratten (1991) e de Loopty e Szapiro (2002).

Note que os acréscimos de produtividade decorrentes das fontes de economias de escala ilustradas acima se devem a ganhos reais no processo, não cabendo nesse ponto, considerações acerca das economias de escala pecuniárias. Como foi já mencionado anteriormente, as economias de escala são reais quando o consumo padrão dos fatores de produção é reduzido com o aumento da produção.

Os dois primeiros tipos de fontes geradoras de economias de escala do quadro 1, indivisibilidade técnica e de investimentos, são tratados por Besanko *et alii* (1996) como os tipos mais comuns, tendo como principal característica, a diluição de custos de equipamentos fixos. A origem dos ganhos de escala está ligada à impossibilidade de se utilizar determinados *inputs* de produção em uma medida inferior a um tamanho mínimo.

No caso dos rendimentos crescentes de escala gerados pelas economias geométricas, a capacidade dos equipamentos ou das instalações aumenta mais rapidamente que os custos incorridos. Scherer e Ross (1990) ao abordarem esse fenômeno salientaram que existe suficiente evidência empírica para afirmar que o aporte de capital necessário para a instalação de mais capacidade eleva-se na proporção de aproximadamente dois terços do aumento do volume de produção. Essa correlação é conhecida como regra dos dois terços, sendo muito utilizada por engenheiros para calcular os gastos necessários para o dimensionamento de novas instalações.

Os ganhos gerados pelas economias de especialização, ou ganhos de especialização, como foi mencionado por Loopty e Szapiro (2002), são uma das fontes mais tradicionais de economias de escala, tendo sido ressaltadas já por Adam Smith em seu importante trabalho, *A Riqueza das Nações*, de 1776. A intensificação da divisão do trabalho eleva a produtividade da mão-de-obra e das máquinas, melhorando o rendimento do processo e, por conseguinte, reduzindo o custo de produção. Ocorre, porém, que a obtenção desses benefícios requer um mercado e uma unidade produtiva suficientemente grandes para sustentarem os custos de um conjunto de trabalhadores e equipamentos especializados.

A economia advinda do uso de recursos em grandes volumes também proporciona ganhos expressivos no rendimento do processo, fazendo cair o consumo de mão-de-obra especializada, de matéria-prima e de capital, já que os recursos monetários

aplicados em estoques são minimizados. Tarefas como a manutenção de máquinas e instalações, o ajuste inicial do processo, o dimensionamento do estoque de materiais, são algumas das funções que são aperfeiçoadas com a utilização de recursos em grandes volumes.

As técnicas superiores para organizar a produção constituem outra fonte de economias de escala. Com a aplicação de novas técnicas gerenciais, o patamar de produção pode ser expandido até um limite máximo, vindo a reduzir o tempo não produtivo da planta. Um exemplo de técnica de manufatura que traz grandes ganhos as empresas é a Tecnologia de Grupo, cujo objetivo é separar peças e máquinas para depois agrupá-las de acordo com suas similaridades. Uma possível aplicação encontra-se na definição dos *layouts* de produção, onde células de trabalho ou agrupamentos por tipo de máquina vêm a facilitar o fluxo interno.

As economias advindas da aprendizagem também atuam decisivamente na formação de melhores resultados de custo, trazendo ganhos de produtividade conforme o *output* de produção é acumulado. Os conhecimentos adquiridos ao longo do tempo pelo quadro de funcionários são aplicados constantemente na produção, seja patrocinando progresso técnico, ou promovendo cortes de gastos (Pratten, 1991).

Por último, está a integração vertical como fonte de economia de escala. Ao se integrar alguns processos de produção, o consumo de alguns recursos cai, como no caso do setor siderúrgico, em que os sucessivos estágios de produção do aço foram interligados para se evitar a perda de calor. Custos de transporte também podem ser reduzidos ao compactar a planta de produção.

Em contrapartida, outros fatores podem atuar como bloqueadores dos rendimentos crescentes de escala e gerar acréscimos no custo unitário dos produtos devido à perda de eficiência produtiva com o aumento nos níveis de produção da empresa. Conforme as vendas aumentam, deseconomias de escala podem emergir². Os rendimentos decrescentes de escala podem acontecer nos seguintes casos. Primeiro, o suprimento de um fator de produção é fixo ou o custo de um fator aumenta assim que a

² Rocca (1967) enfatiza que a existência de indivisibilidade dos fatores ou do próprio processo de produção vem a impedir que sejam utilizadas as quantidades ótimas de cada fator, obrigando assim que seja expandido o volume de produção a uma dada quantidade desses fatores. Quando ocorre a impossibilidade de fazer variar alguns fatores na proporção requerida, os rendimentos decrescentes de escala surgem.

demanda pelo fator cresce. Segundo, a eficiência no uso de um fator de produção declina conforme a quantidade usada pela firma cresce (Pratten, 1991).

Ao aumentar a escala de produção é vital para a empresa manter a eficiência de suas operações, caso contrário os ganhos previstos em se produzir maiores quantidades de produto são anulados. A utilização plena da capacidade da planta também é uma condição básica para a obtenção de vantagens de custo decorrentes das economias de escala (Chandler, 1991). Se o volume realizado cair abaixo da capacidade, então os custos efetivos por unidade tendem a crescer rapidamente e as vantagens potenciais de custo não podem ser completamente realizadas.

Por isso, é fundamental a perfeita coordenação das atividades da empresa para que a capacidade da planta seja explorada em sua totalidade, pois a incorporação de tecnologias de automação nos processos produtivos só se justifica economicamente quando viabiliza uma redução dos custos unitários do produto através da produção de grandes volumes. Pensando em termos do tamanho mais eficiente de planta, seu dimensionamento deve refletir a elasticidade de demanda, o que significa que produtos com demanda futura mais incerta devem ter um planejamento estratégico de vendas que leve em conta variações que possivelmente penalizem os rendimentos crescentes de escala. Uma planta construída a uma escala que pode produzir mais do que o mercado poderia absorver pode ter custos unitários maiores do que uma planta menor cuja produção está mais proximamente calibrada com a demanda de mercado³.

De acordo com Bastos (1999), as tecnologias de automação eram denominadas rígidas pelo fato de se constituírem de máquinas especializadas, com pequeno alcance em termos tanto da variabilidade de tamanho dos lotes como do espectro de produtos fabricados. Durante a fase de projeto, linhas de produção longas e complexas eram estruturadas para a produção de um único produto. Muitas vezes nem era possível introduzir posteriormente pequenas melhorias. Eram, portanto, linhas adequadas somente a uma orientação específica: o da produção em grande escala. Embora englobando grande diversidade de bases técnicas e pautas de produtos, Ferraz *et alii*

³ Chandler (1991) alerta que no paradigma fordista as tecnologias de automação empregadas para a obtenção das economias de escala freqüentemente são rígidas e não toleram mudanças de projeto nos produtos. Nesse contexto, a variação das preferências dos consumidores pode causar uma subutilização crônica da capacidade.

(1995) destacam os setores produtores de *commodities* como aqueles em que os baixos custos unitários têm que ser garantidos por meio de ganhos de escala⁴.

1.1.3. Mensuração de economias de escala

Como em muitos temas de investigação empírica, vários métodos para estimar a relação entre custo e tamanho existem. Os três métodos mais comumente usados são a estimação econométrica da curva de custo, a abordagem de engenharia (*Engineering Estimate*) e a técnica “*survivor*” (Rogers, 1993).

O primeiro método de estimação das economias de escala, as curvas de custo econométricas, utilizam dados de produção e de custo para as unidades econômicas relevantes a fim de estimar o inter-relacionamento existente através de métodos estatísticos. A grande vantagem do método econométrico está em utilizar dados reais e não informações hipotéticas de custo.

As maiores dificuldades com relação à mensuração das economias de escala segundo esse método são as seguintes: “Primeiro, os dados da contabilidade de custos podem ser incompletos ou inconsistentes entre as diferentes firmas ou entre os diferentes períodos de tempo (...) Segundo, os dados colhidos podem não satisfazer as considerações relativas à construção das funções de custo, que impõem uma produção homogênea, um dado estado de tecnologia e de preços e uma eficiência produtiva” (Devine, P.J. *et alii*, 1985).

Com referência ao setor siderúrgico, a indisponibilidade de dados confiáveis para todas as etapas que compõem a cadeia de produção e a não padronização dos sistemas de apuração de custos entre as diferentes plantas produtivas dificultam adicionalmente um tratamento numérico apropriado. Sem estas informações centrais, o “verdadeiro custo” associado às diferentes escalas de produção ficaria mascarado ou exagerado.

⁴ O grupo de *commodities* reúne as indústrias de processo contínuo que elaboram produtos homogêneos em grande tonelagem e que, adicionalmente, devido às características do seu sistema de comercialização têm preços determinados em bolsas internacionais de mercadorias. Correspondem em geral a bens intermediários de fácil armazenagem e transporte dos quais insumos metálicos, química básica, celulose e papel são os principais exemplos. São geralmente intensivos em recursos naturais e energéticos (Ferraz *et alii*, 1995).

Por outro lado, ambas as abordagens *survivor* e *engineering* usam o conceito de escala mínima eficiente⁵, que corresponde ao nível da planta na qual todas as economias de escala possíveis são exauridas e representa, portanto, a menor quantidade de produto possível de ser obtida de forma que o CMeLP seja minimizado (Looty e Szapiro, 2002).

A técnica *survivor* propõe que apenas plantas de tamanho satisfatório sobreviveriam a uma competição com outras plantas e continuariam a aumentar sua participação sobre o mercado. Plantas fora desse nível de produção estariam seriamente comprometidas e em desvantagem. Por conseguinte, o ponto central da abordagem corresponde a examinar a distribuição de tamanho das plantas em uma indústria ao longo do tempo para ver quais têm mantido ou elevado sua participação, com a finalidade de se achar o tamanho mais apropriado (Rogers, 1993).

A técnica *survivor* foi empregada por Rogers (1993) para examinar as economias de escala na indústria siderúrgica norte-americana, mais especificamente em usinas convencionais totalmente integradas com capacidade superior a 1 milhão de toneladas por ano. Os resultados mostraram-se condizentes com pesquisas anteriores, que utilizaram outros métodos. A escala encontrada como a mais adequada fixou-se na medida de 6 milhões de toneladas.

Dois grandes inconvenientes aparecem na tentativa de utilizar o método *survivor* para investigar as economias de escala na siderurgia. Primeiramente, a grande variedade de mercados geográficos e de produtos faz com que o tamanho eficiente de usina em uma situação não o seja necessariamente em outra, o que dificulta a análise e define uma faixa relativamente ampla para a escala mínima eficiente. Em segundo lugar, a necessidade de se estimar a escala de operação mais adequada para cada fase do processamento siderúrgico, torna o método *survivor* infactível.

O método conhecido como *engineering* é fundamentado na estimação do tamanho mais eficiente das plantas em uma dada indústria por especialistas, representados por engenheiros seniores, especializados em planejar e projetar novas

⁵ A definição de tamanho ótimo de planta não se distancia do conceito de escala mínima eficiente. Rogers (1993) afirma que: “o tamanho ótimo é definido como a menor planta (em *output* ou capacidade) para a qual as economias de escala tenham, para todos os propósitos, sido finalizadas”.

unidades de produção. Nesse processo, para inferir as unidades de produção com custos mínimos, os profissionais têm que acumular quantidades consideráveis de dados.

Scherer e Ross (1990) destacam a importante análise realizada com o método *engineering* a respeito das economias de escala em plantas para uma amostra substancial de indústrias feita por Joe S. Bain. Em seu trabalho, após ter enviado questionários detalhados para as 20 maiores empresas durante o ano de 1947, Bain conseguiu obter os tamanhos mais eficientes de planta, posteriormente utilizados para compará-los com as dimensões do mercado nacional norte-americano.

A abordagem *engineering* também foi empregada por David G. Tarr (1977), durante a década de 70, para cumprir um estudo focado no setor siderúrgico⁶ com o objetivo de encontrar as escalas mínimas eficientes das diferentes fases do processamento. Importantes resultados foram encontrados, entre eles, a revelação de que a tendência de aumento do tamanho dos altos-fornos não mais era justificada, uma vez que seus similares de menor porte, a partir de um patamar de produção, eram na mesma medida eficientes.

A abordagem de engenharia soma algumas desvantagens que merecem ser enfatizadas. Entretanto, nenhuma das desvantagens mostra-se desproporcionalmente séria e as estimativas da escala mínima eficiente, quando contempladas de forma cuidadosa e executadas pormenorizadamente, representam, provavelmente, a melhor fonte de informação na questão escala *vs.* custo. Os pontos negativos destacados por Scherer e Ross (1990) vinculados à técnica *engineering* foram colocados da seguinte forma: “(1) A grande demanda de informações e de tempo para a investigação não pode ser atendida na totalidade das vezes, implicando, possivelmente, em decisões e pareceres distanciados da realidade do setor; (2) A tendência de alguns engenheiros de não valorizar a sensibilidade das escalas das plantas à alteração de preços de inputs vinculados à produção; (3) A necessidade de aplicação somente em plantas construídas

⁶ Os resultados coincidentes da pesquisa de Tarr e Rogers assinalam uma importante colocação acerca dos dois métodos. A técnica *survivor* e o método *engineering* são complementares entre si e ambas as abordagens, se aplicadas em conjunto, passariam a produzir resultados mais consistentes sobre as economias de escala no setor. Isto porque a abordagem *engineering* vem a indicar por que uma planta é eficiente, mas com uma estimativa do tamanho de planta apenas hipotética. Em contraste, a técnica *survivor* vem a apresentar quais tamanhos de planta são hegemônicos no mercado, mas não explicando por quê.

com tecnologia atual e não passada sugere uma situação fictícia em que todas as plantas devam estar atualizadas tecnologicamente para se obter sucesso”.

1.2. As Economias de Escala e o Processo Concorrencial na Produção Fordista

O evento da segunda revolução industrial, ao final do século XIX, foi conduzida pelo desenvolvimento de uma base tecnológica genérica, que incluía: novas técnicas de geração e transmissão de energia, aprimoramento do processamento metalúrgico e melhor logística de transporte. Empresários passaram a organizar e construir instalações de produção para grandes volumes, projetadas para utilizar recursos inflexíveis em uma seqüência fixa de trabalho com a finalidade de fabricar produtos padronizados a baixos custos. A produção de mercadorias passou de trabalhadores qualificados, que planejavam e executavam todas as dimensões, para trabalhadores sem maiores conhecimentos, que utilizam máquinas automáticas e obedecem a um *staff* especializado, responsável pela definição e planejamento do trabalho (Doll *et alii*, 1990).

Como resultado da regularidade no processamento das mercadorias, do volume elevado de produção e da maior velocidade de fluxo de materiais foi possível intensificar a obtenção de economias de escala pelas empresas, que passaram a investir mais em instalações e equipamentos, tornando-se intensivas em capital.

Nas novas indústrias, a expansão da produção passou a derivar de uma drástica mudança na proporção de capital e trabalho. Novos processos de produção foram inventados ou os existentes foram amplamente melhorados. Surgiram atividades industriais que, já em sua origem, caracterizam-se pela alta relação capital-trabalho.

Estas plantas industriais optaram por uma nova estratégia, que diz respeito à produção de grandes volumes de bens padronizados. Segundo Boyer *et alii* (2000), a estratégia de volume consiste em distribuir custos entre o maior número possível de mercadorias. A produção em massa de um único modelo, por um período longo, demanda um mercado em crescimento e homogêneo. Isto explica porque essa estratégia, ao menos em sua acepção mais pura, é viável somente durante fases curtas, como o Modelo T de Henry Ford.

O termo fordismo é usado para designar um sistema de organização da produção em que economias dos custos são obtidas com a fabricação de produtos padronizados para mercados de grandes volumes em expansão. Podem ser destacados os seguintes traços característicos ou princípios constitutivos do modelo fordista: (1) racionalização taylorista e especialização do trabalho; (2) desenvolvimento da mecanização através de equipamentos altamente especializados; (3) produção em massa de bens padronizados; (4) salários incorporando ganhos de produtividade para compensar a precarização do trabalho (Hirata *et alii*, 1991).

Assim, as grandes plantas operando em sua escala eficiente segundo o molde fordista de produção usufruem de uma vantagem impressionante de custo sobre as plantas menores, que não atingiram a mesma escala e não têm fôlego financeiro suficiente para incrementar a sua produção. Isto porque são necessários pesados investimentos em instalações, distribuição e gerenciamento para se conseguir obter retornos crescentes de escala.

Chandler (1990) destaca três conjuntos de investimentos inter-relacionados para se beneficiar das vantagens de custo destas tecnologias de produção de alto volume. O primeiro é o investimento em instalações produtivas suficientemente grandes para explorar a potencialidade tecnológica das economias de escala e escopo. O segundo é o investimento em marketing nacional e internacional e em redes de distribuição, de modo que o volume de vendas possa acompanhar o novo ritmo de produção. Finalmente, para beneficiar-se completamente destes dois tipos de investimento os empreendedores também têm que investir em gerenciamento: eles tiveram que recrutar e treinar gerentes, não apenas para administrar as instalações e mão-de-obra expandidas na produção e distribuição, mas também para planejar e alocar recursos na produção e distribuição futuras. Foram estes três investimentos prolongados em produção, distribuição e gerenciamento que moldaram as empresas industriais modernas e permitiram a elas obter retornos crescentes de escala.

Uma barreira crítica à entrada de novos fabricantes em um mercado é, portanto, o custo irrecuperável (*sunk-cost*), como menciona Pratten⁷ (1991). Como o montante necessário para ingressar nesses mercados é suficientemente elevado e a demanda, muitas vezes, é restrita para investimentos subsequentes em produção, a estrutura de mercado que se desenvolve nessas situações torna-se oligopolizada, com poucas empresas sendo responsáveis pela maior fatia do mercado⁸. Em algumas indústrias, as capacidades que as plantas deveriam atingir para usufruir os benefícios de escala eram tão grandes que um pequeno número delas poderia atender a demanda nacional ou mesmo global. Em muitas instâncias, a primeira companhia a construir a planta de escala mínima eficiente e a recrutar o time de gerenciamento permanecia como líder da indústria por décadas.

Logo, como destaca Bain (1956), as empresas que desfrutam de economias de escala possuem uma importante barreira à entrada de novos concorrentes, devido à impossibilidade de uma entrada marginal nesse mercado. Operações de empresas em escalas reduzidas apresentariam um custo médio de longo prazo excessivamente elevado. O autor destaca ainda a importância da condição de entrada para se entender corretamente como funciona a mecânica concorrencial entre diferentes firmas instaladas em um dado setor e, por conseguinte, como se dá a formação de preços nestes mercados oligopolizados.

Os primeiros empreendedores do moderno capitalismo industrial, segundo Chandler (1990), ao criarem empresas que buscam as vantagens das economias de escala, adquiriram poderosas vantagens competitivas, não competindo mais primariamente por preço. Ao invés disso, competem por fatia de mercado e lucros através da efetividade funcional e estratégica. Procederam efetivamente melhorando produtos, processos de produção, marketing, e compras, e estrategicamente movendo-se para mercados em expansão e retirando-se mais rapidamente que seus competidores de

⁷ Quando os custos irrecuperáveis necessários para se entrar em um negócio não são relevantes e, além disso, as contrapartidas das empresas instaladas são inexistentes, um mercado dito contestável é gerado, em que as firmas no setor vão temer uma ameaça de entrada.

⁸ Em indústrias mais intensivas em mão-de-obra, como a gráfica, móveis, etc., a grande firma integrada tem poucas vantagens competitivas, existindo muitas firmas pequenas que continuam a prosperar, e nelas a competição continua a ser baseada no preço e na habilidade de mover rapidamente com a variação da demanda (Chandler, 1990).

outros que vinham a declinar. Os empreendedores adquiriram vantagens competitivas poderosas, as vantagens dos primeiros entrantes. Para competir com eles, os rivais têm que construir plantas de tamanho parecido e fazer investimentos na distribuição e, em algumas indústrias, na pesquisa. Eles também têm que recrutar e treinar uma hierarquia gerencial.

Todavia, construir uma planta de tamanho eficiente e alcançar economias de escala comparáveis pode significar que o total de capacidade da indústria exceda a demanda existente. Isso significa que se os últimos entrantes fossem manter uma capacidade de utilização suficientemente grande para sustentar custos unitários competitivos, muito provavelmente teriam que colher consumidores das empresas instaladas há mais tempo.

Os últimos entrantes têm uma tarefa desafiadora. “Enquanto os gerentes de produção dos últimos entrantes estavam aprendendo as características peculiares de uma tecnologia nova ou grandemente aprimorada e enquanto sua força de vendas estava sendo recrutada e treinada, os gerentes dos primeiros entrantes já trabalharam nas falhas dos processos de produção. Eles já têm prática em assegurar a pronta entrega. Eles sabem como atender as necessidades especiais dos clientes e como prover demonstrativos, crédito ao consumidor, serviços pós-venda e manutenção (...) os primeiros entrantes já investiram parte dos elevados lucros provenientes das operações de baixo custo em campanhas de marketing massivas” (Chandler, 1990).

Em suma, o entrante retardatário em uma indústria intensiva em capital não dispõe das mesmas oportunidades das empresas que souberam identificar uma oportunidade de negócio e investiram previamente na sua concepção. Uma importante barreira à concorrência potencial toma forma, já que os últimos entrantes teriam de cumprir uma série de etapas até alcançar seus objetivos estratégicos, que porventura já foram cumpridos pelas firmas instaladas.

Outro ponto importante que deve ser levado em conta antes de se tomar a decisão de entrar ou não em um mercado diz respeito à possível reação da firma estabelecida. São possíveis diversos tipos de reação, que oscilam desde uma reação do volume de produção, acomodando a entrada, até a retaliação por meio de uma guerra de

preços. Segundo Bain (1956), a reação mais provável é a redução tanto da quantidade produzida quanto do preço praticado pela firma estabelecida.

Lyons (1980), ao analisar os fatores que interferem na entrada de novas empresas em uma indústria e conseqüentemente influenciam no regime de concorrência, identificou quatro diferentes tipos de barreiras: (1) Quanto maiores os tamanhos mínimos de planta em relação à extensão dos mercados, maiores serão as dificuldades de atrair consumidores para desfrutar de economias na produção; (2) Quanto maior for a adição de capacidade à indústria, maior será a redução de preço dos produtos, independentemente da elasticidade de demanda, e mais intenso será o regime de retaliações entre as empresas; (3) Necessidades de capital maiores por produto, aliadas a incertezas do mercado, deterão a entrada de novas firmas devido ao crescimento do custo de capital; (4) Quanto maiores as quantidades de capital por produto, maiores serão as dificuldades em atrair trabalhadores de outras firmas. A análise deste autor corrobora substancialmente a contribuição pioneira de Labini (1956), mesmo assumindo hipóteses comportamentais tão fortes.

Dessa forma, as empresas operando em estruturas de mercados tipicamente fordistas podem se resguardar de possíveis competidores através das vantagens geradas pelas economias de escala, incluindo-se aqui os efeitos de diluir os custos irrecuperáveis do departamento de P&D em grandes volumes de produção. Em seqüência, uma vez que o investimento em produção e distribuição foi grande o suficiente para explorar economias de escala, e uma vez que a hierarquia gerencial adequada foi formada, a empresa industrial cresce – ela adiciona novas unidades, subtraindo mais ainda as chances de que novos fabricantes venham a ingressar nesses mercados.

Às novas firmas pequenas resta, como é colocado por Pratten (1991), posicionar-se em nichos de mercado para se perpetuarem. A falta de conhecimento do mercado e de uma base de clientes impede que as empresas menores se lancem na mesma escala que as firmas existentes. Por isso, as pequenas empresas em todas as indústrias fazem produtos únicos ou produtos para o qual existem poucas firmas em qualquer lugar produzindo substitutos próximos.

1.3. O Papel das Economias de Escala no Paradigma Tecnológico Emergente

Os tradicionais mercados de produtos padronizados, inerentes ao paradigma industrial baseado na produção em massa, são postos em cheque, já que uma crescente tendência à segmentação dos mercados consumidores é constatada. O resultado mais importante deste fenômeno consiste na dificuldade de as firmas se organizarem segundo os moldes fordistas de produção.

O aumento da instabilidade econômica e da volatilidade dos mercados colocou em questão a exclusividade das economias de escala como elemento definidor do desempenho competitivo das indústrias, passando também a ter peso crescente aspectos relacionados às economias de escopo e a capacidade de resposta à demanda.

Problemas como a baixa utilização das máquinas devido aos tempos de *set-up*, estoques elevados para todos os estágios, elevados *lead-times* de produção, dificuldades para introduzir novos produtos, performance precária nos prazos de entrega, controle de qualidade precário ou elevados níveis de refugo induziram as empresas a desenvolver uma nova forma de automação, que fosse mais flexível. Diferentemente da antiga forma de automação rígida, as novas formas de automação exigidas coadunam-se mais satisfatoriamente com volumes médios ou pequenos de produção e com graus médios ou elevados de variedade. A antiga forma de automação rígida era mais consistente com grandes volumes de produção e com pequenas variedades de partes fabricadas, sendo incompatível com volumes de produção médios e pequenos.

Para que a especialização flexível se tornasse viável como trajetória tecnológica, as novas formas de automação tiveram que incorporar certo grau de flexibilidade aos equipamentos, tornando economicamente eficiente a produção em pequenas séries. Em um ambiente econômico caracterizado, a partir dos anos 70, por maior grau de volatilidade, esses atributos das novas tecnologias seriam elementos a favorecer as pequenas e médias empresas (PMEs) nos processos competitivos (Bastos, 1999).

Como sugere Dina (1987), a flexibilidade aplicada ao sistema produtivo oferece às empresas os seguintes atributos: produzir elementos diferentes, talvez até ao mesmo tempo; aceitar mudanças ou melhoramentos do produto; prestar-se à produção de versões ou variantes diversas em proporções diferentes. Além disso, o sistema produtivo

pode ser reutilizado em sua maior parte (e sem intervalos excessivamente longos de readaptação) no caso de mudanças radicais do produto.

A flexibilidade vista acima é típica das economias de escopo e é fundamental para reduzir a incerteza associada à demanda. O crescimento da renda e o conseqüente aumento da sofisticação das pautas de consumo geraram demanda por uma maior variedade de produtos com maior qualidade. Isto não é válido apenas para as indústrias produtoras de bens de consumo, mas também para as indústrias intermediárias, onde a demanda por mercadorias diferenciadas está crescendo mais rapidamente do que as não diferenciadas (Alcorta, 1994).

Talaysum *et alii* (1987) definem economias de escopo como aquelas que estão presentes se uma única planta pode produzir uma certa variedade de produtos a custos inferiores do que uma combinação de plantas separadas, cada uma produzindo um único produto a dado nível de produção. Mais formalmente, existem retornos crescentes de escopo para a planta produzindo produtos A e B se $C(A, B) < C(A, O) + C(O, B)$, onde A e B são os níveis dados de produção para cada produto e C são suas respectivas funções de custo.

Os retornos crescentes de escopo advém da produção de um número de produtos na mesma unidade de produção⁹ a partir dos mesmos insumos e pelos mesmos processos. Os custos unitários de cada produto individual são reduzidos conforme se aumenta, por exemplo, o número de produtos na mesma fábrica. Além disso, tais economias existem também porque as redes de distribuição e marketing, mesmo que para produtos específicos, poderiam ser utilizados para lidar com mais de um produto, bem como o laboratório e o *staff* incumbido das tarefas de pesquisa e desenvolvimento. Instalações e capacidades organizacionais são ainda menos específicos em produto e as oportunidades para explorar economias de escopo são maiores que na produção e distribuição (Chandler, 1990).

O fator-chave que permitiu a exploração de economias de escopo nos últimos tempos foi a difusão da microeletrônica. Os microprocessadores (*chips*) permitiram que se reduzisse sensivelmente o custo de processamento e armazenamento de informações.

⁹ Dependendo do contexto, o termo “unidade de produção” pode ser entendido na discussão sobre as economias de tamanho como linha de produção, fábrica (planta) ou empresa. Naturalmente, os fatores determinantes das economias de custo variam em cada um desses âmbitos (Alcorta, 1994).

Antes, era impensável para algumas indústrias um nível de flexibilidade que viabilizasse a exploração de economias de escopo. Isso é particularmente válido na produção de bens de consumo duráveis, liderados pela indústria automobilística. Nesses termos, a microeletrônica ocupa no presente paradigma técnico-econômico, uma posição semelhante aquela do petróleo e da petroquímica no paradigma da produção em massa do Pós-Segunda Guerra Mundial (Bastos, 1999).

Como as novas tecnologias empregadas na produção de mercadorias têm permitido a produção de lotes menores, diferentemente dos antigos sistemas de produção em massa, passou a se discutir a tendência de queda das escalas ótimas de produção. O *desaling* seria um dos efeitos das recentes tecnologias na manufatura.

Alcorta (1994) é uma referência importante e com postura crítica no debate sobre as tendências de queda ou crescimento das escalas de produção nas empresas modernas. No geral, as evidências disponíveis sugerem que a introdução de novas tecnologias não está levando a uma queda nas escalas das plantas, mas até mesmo a uma elevação. O autor reconhece uma redução nos tamanhos dos lotes fabricados, mas conclui que uma das conseqüências das novas tecnologias seria precisamente permitir às grandes empresas produzirem uma maior variedade de produtos em pequenos lotes dentro da mesma planta. Portanto, a redução do lote mínimo não se propaga para os tamanhos de planta e menos ainda, de empresa, sujeitos às indivisibilidades dos investimentos em automação e P&D.

Apesar do declínio do custo dos computadores e seu crescimento em performance, o custo dos equipamentos flexíveis de produção é ainda mais alto do que das antigas tecnologias. Ademais, por causa do ritmo rápido de mudanças técnicas, plantas e equipamentos estão se tornando obsoletos mais rapidamente do que antes. Se os custos de capital são tão grandes que superam as reduções em todos os custos de produção e necessitam ainda, da maior taxa de utilização, então a alternativa óbvia é aumentar o nível de produção de qualquer variedade de produto que o mercado aceite. Alcorta (1994) afirma que “os maiores níveis de produção nas plantas das indústrias estudadas sugerem que esse é o modo pelo qual as plantas estão se ajustando para os custos de capital que escalam”.

Em resumo, as novas tecnologias são mais rápidas, eficientes, confiáveis e podem operar por mais longas horas, resultando na expansão da capacidade. Por meio da redução dos tempos de *set-up* e aumento da variedade, essas novas tecnologias conferem uma expansão ainda maior da capacidade. Assim, “as economias de escopo reforçam as economias de escala no nível de planta” (Szwarcfiter, 1997)¹⁰.

No caso da siderurgia, isso implica considerar especialmente os efeitos sobre a estratégia de investimentos do contexto de estagnação da demanda – estudado detalhadamente em Pinho (2001) – e de um conjunto de mudanças tecnológicas não vinculadas diretamente à difusão da microeletrônica. Este último ponto constitui um dos pontos de partida desta dissertação, que, por meio da comparação das economias de escala técnicas atualmente encontradas nas duas principais rotas tecnológicas empregadas no setor, procura contribuir para a discussão do *downscaling* na siderurgia. Antes de abordar este assunto, porém, é necessário descrever, em certo grau de detalhe, as duas tecnologias alternativas, o que é feito no próximo capítulo.

¹⁰ O debate sobre a evolução das escalas normalmente é pautado pelas referências às novas tecnologias e a mudança do paradigma tecnológico. Pinho (1997) sugere que essa discussão deve ser encaixada num quadro de referência mais amplo: o da reestruturação industrial. Assim procedendo, seria inevitável considerar elementos não estritamente tecnológicos na discussão, como as tendências específicas dos mercados e as dinâmicas competitivas setorialmente peculiares. A hipótese inicial para esta dissertação reflete esse ponto de vista.

Capítulo 2

PROCESSO DE PRODUÇÃO NA SIDERURGIA

O capítulo 2 é composto por quatro seções que tratam unicamente dos processos de produção na siderurgia. Primeiramente, são apresentados os diferentes processos de produção na siderurgia, com especial atenção a produção integrada a coque e a produção semi-integrada. Os dois tópicos subseqüentes abordam as diversas etapas do processamento destas duas tecnologias, explicando resumidamente o funcionamento dos principais equipamentos. Por último, os avanços tecnológicos mais recentes são listados e descritos de maneira breve.

2.1. Dois Processos de Produção Concorrentes

Examinando a história da indústria siderúrgica, pode-se assinalar dois momentos distintos: o processo de constituição da base técnica no quadro da revolução industrial e o movimento de renovação desta base técnica durante o século XX. Durante a revolução industrial, a grande mudança consistiu na passagem de um processo de fabricação de ferro baseado na utilização do carvão vegetal para a siderurgia a coque. Passou a ser aplicado o alto-forno a coque, que dispunha de maior capacidade produtiva devido as suas dimensões superiores. Como afirma Ferreira (1993), “(...) no final do século XVIII e início do século XIX, surgiriam as primeiras grandes concentrações industriais com base na atividade siderúrgica, localizada ao redor das reservas de carvão mineral e de minério de ferro na Europa e, sobretudo, na Inglaterra”.

O contínuo movimento de renovação da base técnica do setor siderúrgico prolonga-se até os tempos atuais. Diversas inovações foram implementadas, transformando amplamente os métodos produtivos empregados. O desenvolvimento das tecnologias de forno a arco elétrico e de lingotamento contínuo propiciou uma divisão do setor siderúrgico em duas vias principais, de acordo com as suas rotas tecnológicas: usinas integradas e semi-integradas.

Ferreira (1993) chama o processo integrado de produção de “Rota Clássica” por apresentar processos técnicos que foram difundidos e empregados há muito tempo. Esta é rota tecnológica – baseada no alto-forno como equipamento central para a produção

de ferro-gusa e em métodos de aciaria e de laminação adaptados à produção em massa – dominante no plano mundial.

Usinas integradas também podem utilizar métodos alternativos para a produção de aço, como é o caso do processo de redução direta. Nestas instalações, ao invés da produção de ferro-gusa, fabrica-se o ferro-esponja (modernamente conhecido como ferro diretamente reduzido, cuja sigla em inglês é DRI) ou ferro briquetado a quente (HBI)¹¹. O ferro-esponja é consumido, geralmente, em fornos elétricos a arco como substituto da sucata, com a vantagem de conter menor teor de enxofre e fósforo. Assim, o uso do DRI-HBI permite a produção de aços com menor grau de contaminantes e, conseqüentemente, de maior valor agregado¹².

Uma rota alternativa à das usinas integradas que se tornou hegemônica no segmento de aços não-planos é a das usinas semi-integradas ou mini-usinas¹³. O crescimento das chamadas mini-usinas acelerou-se a partir dos anos 60, embora a origem do segmento remonte à década de 1930, quando a empresa norte-americana *Northwestern Steel and Wire Company* começou a utilizar forno elétrico para produzir aço (Barnett e Crandall, 1986: 18).

Sua ascensão nas últimas décadas foi beneficiada pela difusão de inovações tecnológicas baseadas na compactação dos processos industriais, como a substituição do lingotamento convencional pelo lingotamento contínuo, que dispensou o uso de equipamentos como, lingoteiras, fornos-poço e a laminação de desbaste primária. Reduções do quadro de pessoal, do consumo de energia e principalmente, do aporte de capital, viabilizaram a implantação de novas usinas semi-integradas. Com o passar do tempo, as usinas semi-integradas assumiram a configuração padrão de um forno elétrico, uma máquina de lingotamento contínuo e um laminador de aços longos, o que,

¹¹ Esses dois produtos são muito similares, sendo que o último é produzido para utilização em outras siderúrgicas, e o primeiro, para consumo interno, face aos problemas de periculosidade no transporte.

¹² “A redução direta é mais difundida nos países em desenvolvimento, seja pela abundância de gás natural ou de carvão mineral não-coqueificável, seja pela escassez de sucata. Em 1996, 93,3% da produção mundial de ferro-esponja foram provenientes desses países. Na verdade, um exame mais detalhado permite deduzir que a produção de pré-reduzidos é uma peculiaridade da siderurgia latino-americana. Também em 1996, o continente produziu 36,3% do ferro-esponja mundial, sendo que a Venezuela isoladamente fabricou 16,0% da produção mundial. Nesse ano, a produção mundial conjunta do HBI-DRI foi de 33,3 milhões de toneladas, ao passo que a do ferro-gusa atingiu 521,2 milhões” (Paula, 1998).

¹³ Essas usinas são consideradas semi-integradas pela ausência da etapa de redução e alcunhadas de mini-usinas justamente por seu porte relativamente pequeno.

aliado à especialização em uma faixa relativamente estreita de produtos, potencializou a eficiência técnica na sua operação, minimizando os custos de produção (Barnett e Crandall, 1986). Pinho (1993) ressalta que a maior simplicidade da rota de produção adotada pelas usinas semi-integradas implica em menores requisitos de mão-de-obra e de capital por unidade de produto, permitindo a apropriação de vantagens locacionais, quando da sua instalação em regiões que não comportem novas siderúrgicas integradas.

Em resumo, a combinação de técnicas simplificadas de produção e de produtos especializados tem proporcionado às usinas semi-integradas, economias de escala a um nível relativamente baixo de produção. Combinando uma estratégia de localização regional, com suprimento local de matéria-prima e com proximidade do mercado consumidor, as mini-usinas passaram a desfrutar de importantes vantagens competitivas frente às usinas integradas em várias faixas do mercado siderúrgico.

O mercado tradicional das usinas semi-integradas é o de laminados longos, embora a produção de laminados planos não seja mais exclusividade das usinas integradas. A principal barreira enfrentada pelas mini-usinas para a entrada no mercado de aços planos vem a ser o elevado nível de impureza das sucatas, que comprometem as propriedades mecânicas do metal. Além disso, as escalas de produção da laminação a quente de aços planos na tecnologia convencional também constituem uma barreira.

Um fator relevante tanto para a operação das usinas siderúrgicas semi-integradas quanto para a operação das usinas integradas é a disponibilidade de insumos – a preços competitivos. Nesse sentido, os energéticos cruciais em cada um dos processos – carvão na produção integrada e eletricidade para as mini-usinas – são elementos básicos a considerar. Soares (1987), *citado por* Pinho (1993), evidencia que as usinas semi-integradas, dispensando a etapa extremamente energético-intensiva que é a redução, apresentam um consumo de energia (2300 Mcal/ton em uma usina típica) muito inferior ao da rota clássica (5500 Mcal/ton), mas em compensação, dependem do insumo energético mais nobre e custoso que existe, a energia elétrica. As usinas integradas, de sua parte, se suprem em 80% de carvão mineral, a mais barata das fontes de energia.

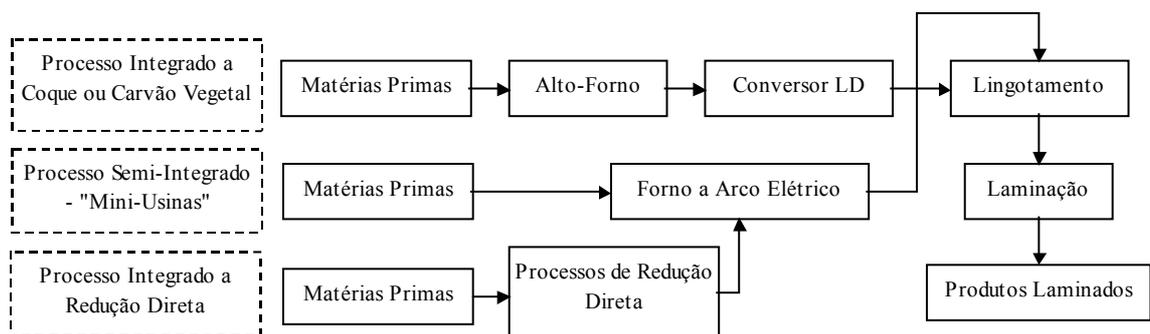
Um indicador positivo do bom desempenho das mini-usinas é a sua expansão produtiva no mercado mundial (ver figura 1), mesmo em um cenário de demanda estagnada, com forte concorrência externa. Enquanto em 1987 as usinas semi-integradas

detinham 26,60% da produção mundial de aço, em 1997, já eram responsáveis por 33,10% (Andrade *et alii*, 1999).

O principal contratempo enfrentado pelas usinas semi-integradas no âmbito mundial é escassez da oferta de sucata. A tendência é de que haja um desequilíbrio cada vez mais acentuado entre a oferta e a demanda.

2.2. Produção Integrada a Coque

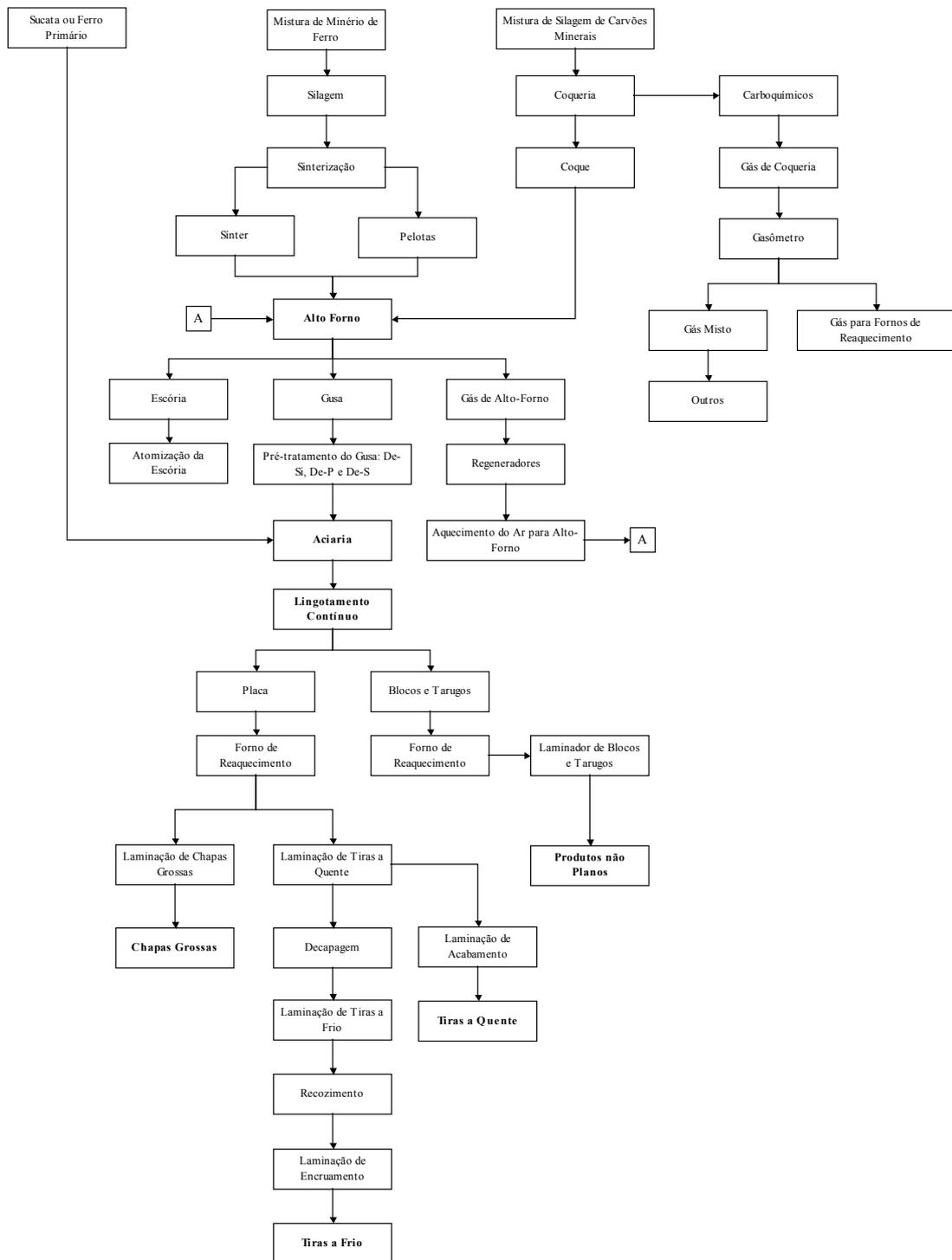
Nessa seção, serão analisadas as duas rotas tecnológicas do processamento siderúrgico, usinas integradas e semi-integradas, descrevendo detalhadamente cada uma das operações que as compõem. Enquanto as usinas integradas apresentam uma etapa destinada a redução do minério de ferro, as usinas semi-integradas iniciam o seu processamento na aciaria, utilizando sucata ferrosa como insumo básico.



Fonte: *Adaptado de Ferreira, 1993: 242.*

FIGURA 2.2.1: Alternativas tecnológicas para a produção de aço.

Embora as usinas integradas possam operar segundo a técnica de redução direta, a descrição do processo será feita com base nas usinas integradas a coque, muito mais importantes como se viu na seção anterior. O fluxograma a seguir, traz todas as operações e produtos intermediários que integram o roteiro de produção de uma usina siderúrgica.



Fonte: Adaptado de Mourão et alii, 1993.

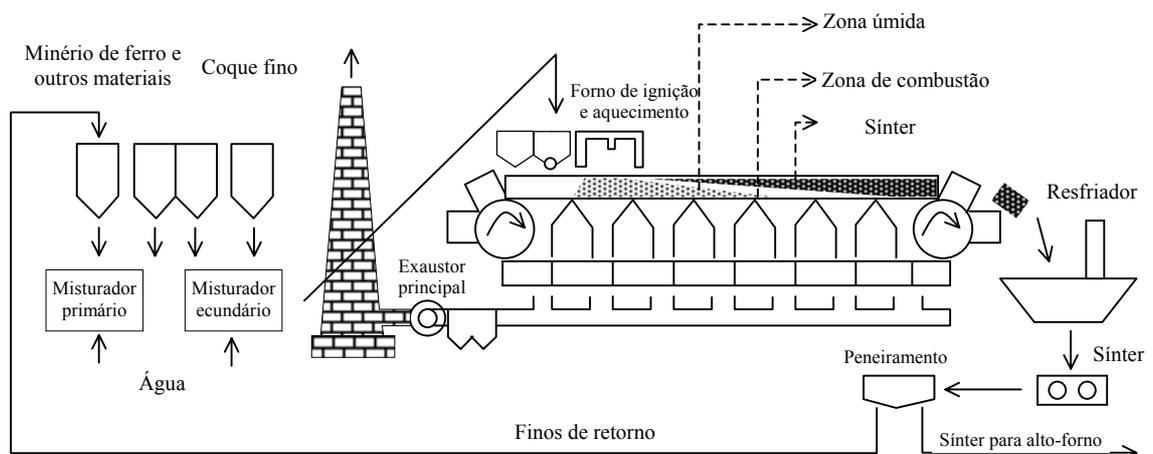
FIGURA 2.2.2: Fluxograma de produção para usina integrada a coque ou para usina semi-integrada.

Nas seções subseqüentes, são descritas cada uma das etapas do processo integrado.

2.2.1. Processo de aglomeração de minérios

O processo de aglomeração dos minérios¹⁴ é importante para prover uma melhor uniformidade a carga, favorecendo a manutenção de uma faixa granulométrica estreita, com isenção de finos e com uma resistência mecânica suficiente para poder ser processado adequadamente durante a etapa de redução no alto-forno. Existem dois métodos principais para a aglomeração dos minérios: (1) Sinterização; e (2) Pelotização.

O processo de sinterização utiliza o princípio de fusão incipiente para aglomerar a carga de material, promovendo uma mistura de finos, porém não tão finos, de minério de ferro, de coque ou carvão vegetal, de fundentes, de sínter de retorno e de água. Um desenho esquemático do processo de sinterização foi montado na figura 2.2.1.1.



Fonte: Adaptado de Mourão et alii, 1993.

FIGURA 2.2.1.1: Fluxograma do processo de sinterização.

¹⁴ “O minério de ferro é tratado antes de ser utilizado com a finalidade de aglomerar os finos de minério para o alto-forno. Geralmente, a sinterização é instalada na própria usina, enquanto a pelotização é operada por mineradoras. No caso do minério de ferro granulado (*hump*), é utilizado diretamente no alto-forno, não requerendo tratamento prévio. Como esse tipo de minério é cada vez mais escasso, a utilização de sínter e das pelotas foi aumentado ao longo do tempo” (Paula, 1998).

Mourão *et alii* (2003) comentam que a combustão do coque ou do carvão vegetal contido na carga fornece calor ao processo, levando a formação de uma zona de combustão, que antecede a constituição do sinter. Muita atenção deve ser dispensada ao controle da permeabilidade da carga para que a vazão de ar seja homogênea e apropriada. Assim, é comum adicionar água a composição para obrigar as partículas finas a ficarem aderidas as mais grossas e facilitar a passagem dos gases.

Outro método de aglomeração de minérios aplicado pelas usinas é o processo de pelletização. Nesse caso, a força que promove a união dos finos de minério e a separação dos resíduos sólidos é a força capilar do conjunto material-água, em que a água exerce o papel de ligante. Algumas substâncias, como cal, também são acrescentadas a mistura para conferir maior plasticidade à pelota e facilitar o andamento do processo. A pelota crua pode ser formada em três tipos diferentes de equipamentos (ver figura 2.2.1.2).

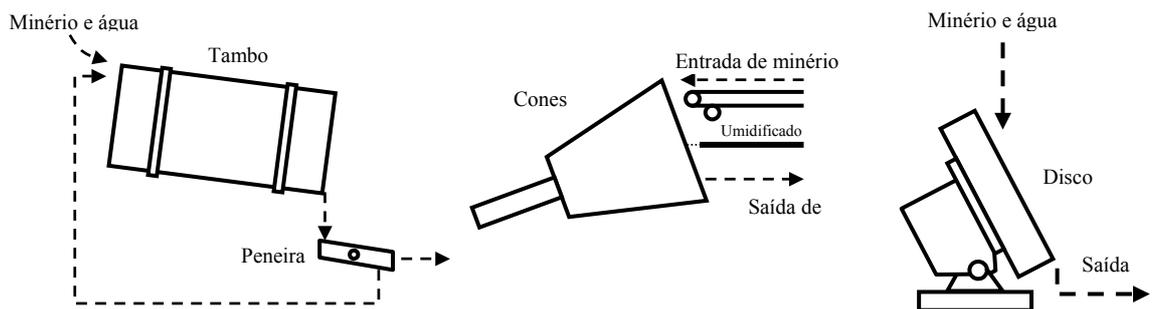
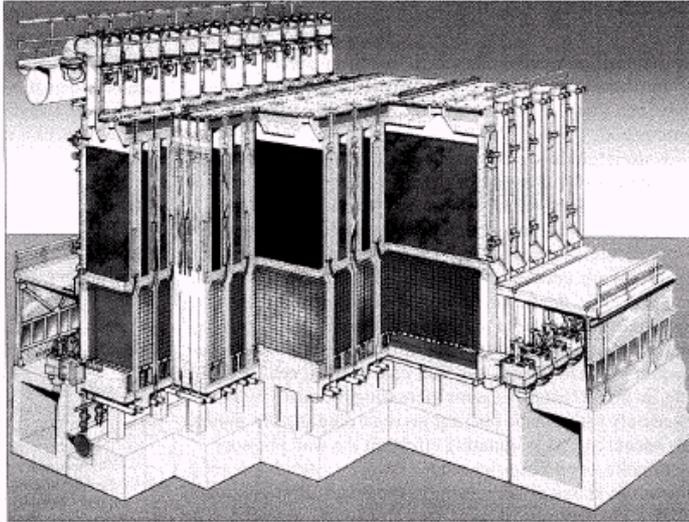


FIGURA 2.2.1.2: Diferentes equipamentos de pelletização.

2.2.2. Processo de coqueificação

O processo de coqueificação acontece a temperaturas superiores a 1000°C e pode ser considerado como uma operação de destilação do carvão mineral, tendo como produto principal o coque metalúrgico. Um desdobramento do processo é a formação de hidrocarbonetos longos e simples, que compõem o que é chamado de “gás de coqueria”, um excelente combustível utilizado para aquecimento, na própria coqueria e parcialmente no alto-forno e nos fornos de aquecimento (Mourão *et alii*, 2003).

O tipo mais comum de forno de coqueificação é o multi-câmara ou *multi chamber system*¹⁵ (figura 2.2.2.1). Esta unidade é caracterizada pela presença de inúmeras câmaras horizontais que funcionam como fornos. Cada forno é aquecido através de dutos laterais. Junto às câmaras de coque estão os regeneradores, que retiram calor dos gases queimados e, após a sua reversão, os cedem para o ar de combustão.

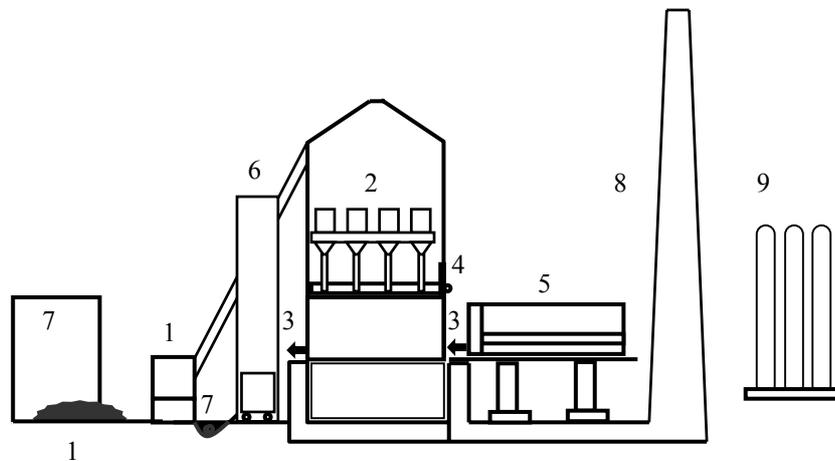


Fonte: Ameling *et alii*, 1998.

FIGURA 2.2.2.1: Desenho esquemático de um sistema de coqueificação multi-câmara.

A produção de coque segue diferentes estágios. A primeira fase do processo tem início com a preparação do carvão nos silos de mistura e pesagem. Em seguida, o carvão é carregado nas câmaras de coqueificação, que devem ser seladas. Após sofrer a ação do calor, o material é descarregado nas calhas de resfriamento para depois ser transportado até a área de armazenamento, próxima às unidades de redução. Os gases gerados pela destilação do carvão são captados e transportados para a planta de subprodutos do coque, conhecida como setor carboquímico. O desenho esquemático de uma unidade de coqueificação pode ser visto na figura 2.2.2.2.

¹⁵ As coquearias desse tipo existentes na Alemanha operam em escalas situadas entre um mínimo de 500 mt/ano e um máximo de 2 Mt/ano (Ameling *et alii*, 1998).



- | | |
|------------------------------------|----------------------------|
| (1) Preparação do carvão | (2) Carregamento do forno |
| (3) Porta das câmaras de combustão | (4) Tubulação de ascensão |
| (5) Sistema para empurrar o coque | (6) Resfriamento do carvão |
| (7) Manipulação do coque | (8) Descarte de gases |
| (9) Planta de carboquímicos | |

Fonte: *Adaptado de Ameling et alii, 1998.*

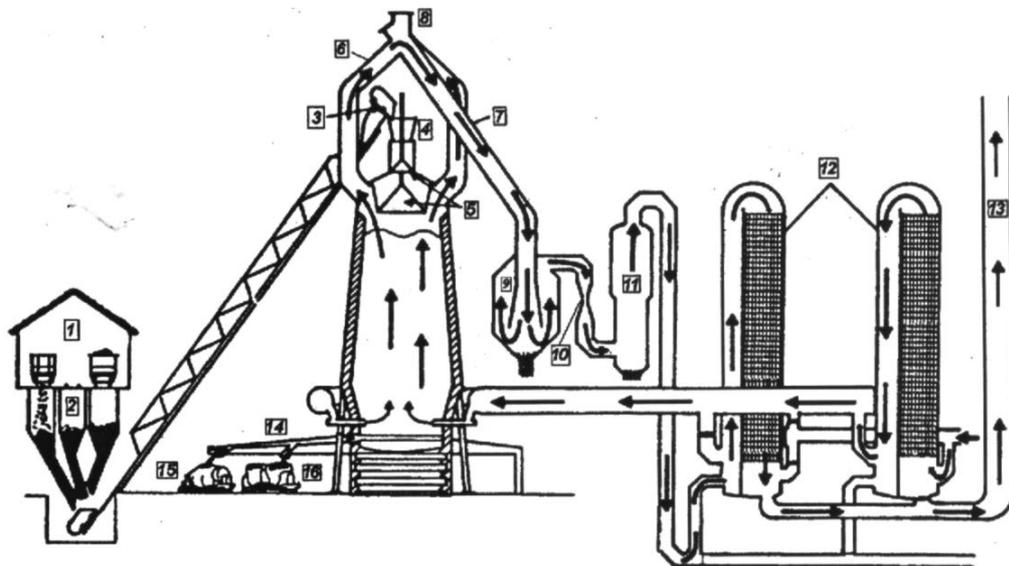
FIGURA 2.2.2.2: Desenho esquemático de uma unidade de coqueificação.

Algumas variações entre as várias plantas de coqueificação do tipo multi-câmara fazem parte do contexto internacional. A principal distinção concentra-se no tipo de carregamento dispensado ao carvão mineral. Enquanto que na figura 10 o carregamento do carvão mineral é feito pela ação da gravidade, outras plantas têm como prática compactar o carvão mineral antes de colocá-lo no interior do forno¹⁶. A principal vantagem desta tecnologia concentra-se na melhor intercambiabilidade entre as partículas, que facilita a troca de calor. Esse tipo de unidade é conhecido como *stamped charging system*. Apesar disso, Ameling et alii (1998) afirma que esse tipo de forno não é tão eficiente quanto o tradicional, com carregamento pela ação da gravidade. A performance inferior é um resultado do menor volume interno do forno e da captação inadequada dos gases.

¹⁶ Araujo (1997) explica que “na compactação, a mistura de carvões é colocada na câmara de compactação (montada na empurradora de coque e cujas dimensões são um pouco inferiores às da câmara de coqueificação), em camadas de 450 a 500 mm e comprimidas pela queda de vários aríetes. Atingida a altura suficiente, as paredes laterais são retiradas e o bolo empurrado para a câmara de coqueificação”.

2.2.3. Altos-Fornos

Cumpridas as operações de sinterização e coqueificação, os materiais partem em direção ao alto-forno. Esta instalação trabalha de forma contínua, utilizando dois tipos possíveis de agentes redutores, coque ou carvão vegetal. A esmagadora maioria das usinas integrada trabalha com altos-fornos a coque¹⁷. Nesta etapa de produção é obtido o ferro primário, ou ferro-gusa, que ainda contém muitas impurezas em sua composição e um teor de carbono demasiado alto para se obter as propriedades desejadas de um material como o aço. Um esquema ilustrativo das principais partes que compõem um alto-forno pode ser visto na figura 2.2.3.1.



- | | | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| (1) Casa dos Silos | (2) Silos com Balanças | (3) Sistema de Transporte |
| (4) Tremonha de Recebimento | (5) Calha Rotativa | (6) "Uptakes" |
| (7) "Downcommer" | (8) Válvulas "Bleeders" | (9) Coletor de Pó |
| (10) Lavagem do Gás | (11) Desumidificador | (12) Regeneradores |
| (13) Chaminé de Descarga | (14) Canal Principal | (15) Carros Torpedos |
| (16) "Potes" para a Escória | | |

Fonte: Mourão *et alii*, 2003.

FIGURA 2.2.3.1: Esquema ilustrativo dos altos-fornos e suas partes principais.

¹⁷ O coque é, de longe, o principal combustível/redutor empregado nos altos-fornos. A siderurgia a carvão vegetal constitui, portanto, uma subfileira (ou fileira diferente) muito marginal em termos de produção mundial, e sua existência limita-se praticamente a algumas regiões do terceiro-mundo, principalmente o Brasil, dotadas de recursos florestais abundantes e pobres em carvão metalúrgico (Ferreira, 1993: 242).

O processamento pelo alto-forno tem início com o transporte das matérias-primas, que partem dos pátios de estocagem e dos processos anteriores (coqueria e sinterização) para a “casa dos silos” (1). Na seqüência, estes materiais são pesados em silos especiais (2) para que sejam colocados nas esteiras transportadoras (3), que as depositarão na tremonha de recebimento no topo do alto-forno (4).

Durante a fase (5) acontece o carregamento do alto-forno e a selagem dos gases. As instalações mais modernas utilizam um sistema chamado “calha rotativa”, que permite grande flexibilidade no direcionamento da carga no interior do forno. A alta produtividade do alto-forno depende de uma “permeabilidade adequada” dos componentes depositados no leito do forno durante essa etapa¹⁸. Mourão *et alii* (2003) afirmam que “(...) a distribuição da carga tem importância fundamental para a operação do alto-forno, uma vez que ela é um dos fatores determinantes da eficiência das trocas térmicas e das reações de redução, além de afetar diretamente o formato e a posição da zona coesiva e da carga térmica sobre a parede do forno”. A proteção da parede interna do alto-forno e, dessa forma, a durabilidade dos revestimentos de refratários, pode ser expandida caso a distribuição de carga seja adequadamente calculada para que o fluxo interno de gases se altere entre as regiões centrais e periféricas e garanta melhor equilíbrio térmico entre as partes. Fluxo excessivo de gases na região central do alto-forno favorece a formação de resíduos sólidos sobre as paredes internas, que protegem o revestimento, mas diminuem a produtividade do vaso. Por outro lado, fluxo gasoso periférico melhora a performance global, porém eleva a carga térmica na parede.

A etapa de redução do minério de ferro situa-se logo após a fase 5 e acontece no interior do corpo do alto-forno, como está demonstrado na figura 2.2.3.2. O corpo principal do alto-forno é composto pela goela, cuba, ventre, rampa e cadinho. Em cada uma dessas regiões do reator toma curso um tipo diferente de reação química, existindo fluxos intensos de materiais e gases.

¹⁸ “Distribuição de carga consiste em se obter, por meio dos equipamentos instalados no topo do forno, uma distribuição radial de tamanho de partícula na carga, adequada ao escoamento gasoso desejado. Aproveita-se a grande diferença de permeabilidade entre as camadas de carga metálica e de coque para se obter variações na relação entre as espessuras das respectivas camadas. Deste modo, regiões onde a camada de coque é mais espessa que a camada de sinter tendem ser mais permeáveis ao fluxo gasoso do que regiões onde ocorre o inverso. Dentro das próprias camadas, regiões onde se concentram partículas de maior tamanho também tendem a ser mais permeáveis” (Mourão *et alii*, 2003).

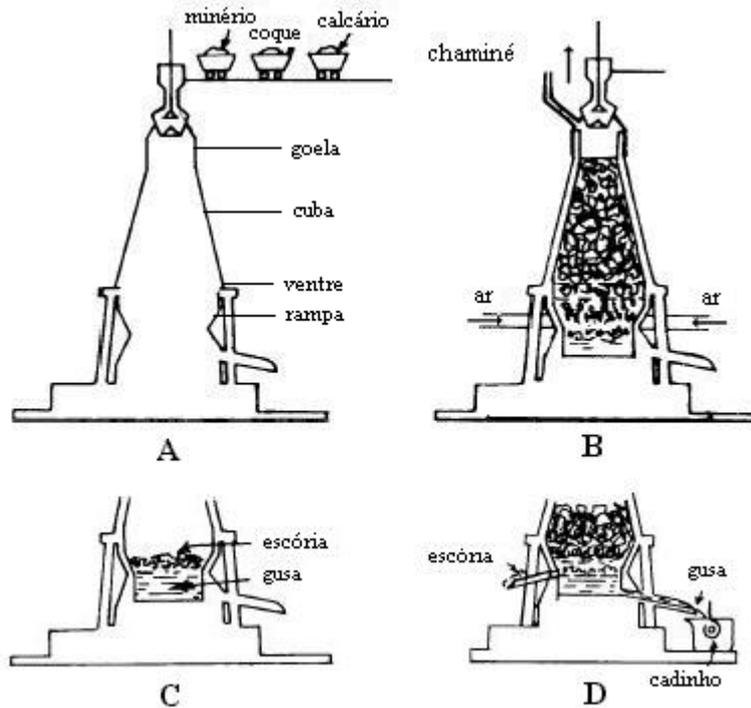


FIGURA 2.2.3.2: Desenho do corpo principal do alto-forno.

Pela figura 2.2.3.2 é possível identificar dois momentos importantes do funcionamento do alto-forno, a queima do coque, na região das ventaneiras, e o escoamento dos produtos. A saída do gusa e da escória é feita pelos canais de escoamento (14) até o carro torpedo (15) e o “pote” de escória (16).

Continuando a descrever o conjunto do alto-forno, os equipamentos (6) e (7), “*uptakes*” e “*downcommer*”, respectivamente, têm a função de direcionar o ar sujo e quente¹⁹ para o coletor de pó (9), onde as partículas de pó mais grossas se depositam, acumulam e são descarregadas sobre um vagão ferroviário. O gás então flui para a lavagem em um equipamento tipo “*venturi*” (10), onde são removidas as partículas mais finas na forma de lama. O estágio final de tratamento do gás, desumidificador (11), tem a função de reduzir o teor de umidade do gás.

Logo após os desumidificadores estão os regeneradores (12), responsáveis pelo pré-aquecimento do ar a ser injetado nas ventaneiras do alto-forno. Normalmente os fornos são equipados com 3 ou 4 regeneradores de forma cilíndrica. Para aquecer o empilhamento de tijolos refratários é injetado um gás misto, proveniente do próprio

¹⁹ Válvulas “*bleeders*” (8) existem no topo do alto-forno para permitir a liberação de gases em situações de emergência, quando a pressão interna ultrapassa os limites de operação.

alto-forno e da coqueria, que é queimado na câmara de combustão. Após transmitir calor ao empilhamento de tijolos refratários, a entrada de ar frio é liberada. Nesse momento, a temperatura do gás é elevada até 1000°C, podendo chegar a 1250°C. Enquanto um dos regeneradores executa a função de aquecer o ar frio, outro está sendo aquecido, sendo por esse motivo, um equipamento de funcionamento dinâmico, dividido em diferentes ciclos de operação.

Por fim, estão as chaminés de descarga (13), responsáveis pelo descarte dos gases formados durante a queima.

2.2.4. Refino do aço líquido

A etapa de refino do aço líquido tem como objetivo apurar a composição do metal em consonância com as características desejadas do produto final, removendo elementos desnecessários quando preciso, ou então, adicionando outros para atingir a configuração desejada. O processo de refino é vital para o acerto da composição química do aço.

O refino do aço líquido pode ser classificado como sendo primário, quando toma curso no interior do equipamento de fusão, ou secundário, quando é realizado fora do equipamento de fusão. O processo de refino primário mais empregado atualmente é o conversor a oxigênio, embora os fornos elétricos também tenham uma participação grande na produção mundial de aço. Em 1996, os dois juntos responderam por 93% da produção mundial. Os fornos Siemens-Martin e Bessemer tornaram-se sinônimo de atraso tecnológico. Ainda são adotados apenas em economias com estruturas de preços bem específicas, como Rússia, Índia, China e Ucrânia (Paula, 1998). Os processos de refino secundário, por sua vez, podem contar com vários equipamentos.

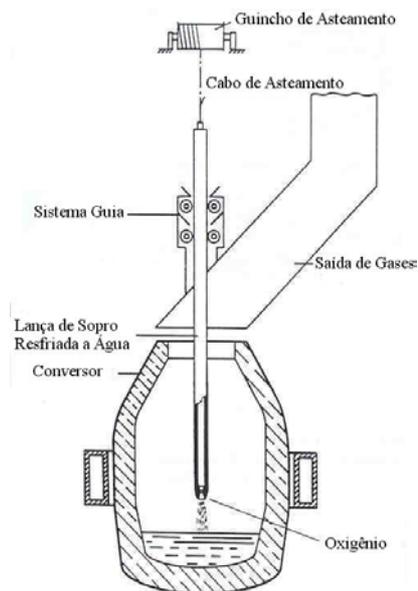
2.2.4.1. Refino primário em conversor a oxigênio

O processo L.D.²⁰ é o mais empregado para a fabricação de aço líquido em conversores a oxigênio, tendo sido utilizado pela primeira vez em 1952. Devido às suas

²⁰ As cidades austríacas onde foram construídas as primeiras plantas a operar conversores desse tipo chamam-se Linz e Donawitz. Das iniciais de ambas cidades deu-se origem ao nome desse tipo particular de processo, L.D. (Stein-Versen, 1992).

características de alta produtividade, custos favoráveis e grande flexibilidade metalúrgica, podendo fabricar economicamente a maior parte dos tipos de aços, apresentou rápido crescimento na produção mundial. Atualmente, o processo LD responde por aproximadamente 60% da produção mundial de aço. (Wallner e Fritz, 2002). No Brasil, as aciarias a oxigênio (LD) tiveram grande aceitação, sendo provenientes delas 80,7% das 25,7 milhões de toneladas de aço bruto produzidas. A baixa disponibilidade de sucata no mercado nacional é um dos fatores que favorece a adoção da rota integrada (Henrique e Almeida, 2002).

Uma apresentação esquemática do conversor LD, contendo as partes principais que compõem o aparelho, pode ser vista na figura 2.2.4.1.1.



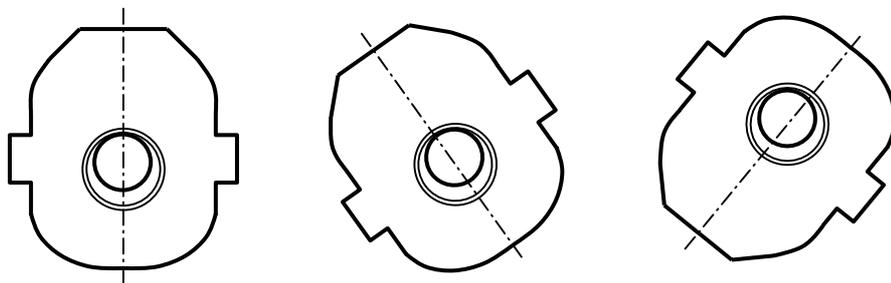
Fonte: Stein-Versen, 1992.

FIGURA 2.2.4.1.1: Conversor LD com lança de oxigênio

O conversor L.D. é composto por uma lança refrigerada que injeta oxigênio a alta velocidade no interior do recipiente, além de um sistema de exaustão, responsável pela retirada dos gases formados durante as reações de refino. As principais matérias-primas utilizadas na fabricação do aço, junto com o oxigênio, são: gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço, ferro fundido, minério de ferro, cal e fluorita. A proporção dos componentes na carga do conversor depende da composição do metal líquido e da sua

temperatura, da qualidade do produto a ser produzido, do volume das adições de cal, minério, carepa e, em parte, das dimensões do conversor (Mourão *et alii* 1997).

O processo de produção de aço pelo conversor L.D. é dividido em diferentes fases: (1) Carregamento da carga sólida; (2) Carregamento do gusa líquido; (3) Sopro; (4) Vazamento e; (5) Vazamento da escória. Araujo (1997) explica que todas essas etapas do ciclo operacional exigem que o conversor LD seja basculado em diferentes posições (figura 2.2.4.1.2).



Operação do Conversor Carregamento do Conversor Vazamento do Conversor

Fonte: Stein-Versen, 1992.

FIGURA 2.2.4.1.2: Posições de Operação do Conversor.

2.2.4.2. Refino secundário dos aços

Chama-se de refino secundário aquele que é realizado fora do equipamento de fusão (Forno Elétrico a Arco ou Conversor a Oxigênio), destinando-se à remoção de impurezas prejudiciais às propriedades mecânicas e às características desejadas para o aço, as quais por limitações do processo de fusão não puderam ser eliminadas anteriormente. As operações de refino secundário incluem os seguintes processos: (1) desoxidação; (2) dessulfuração; (3) desgaseificação, ou remoção de hidrogênio e nitrogênio; (4) acerto de composição química do aço; (5) descarburização e; (6) alteração da morfologia das inclusões remanescentes.

Além do ajustamento preciso das características físico-químicas do aço, o refino secundário promove um aumento expressivo no rendimento dos processos de fusão pelos conversores e fornos elétricos, diminuindo em muito o tempo de corrida desses

equipamentos. Podem ser contadas diversas conseqüências positivas aos estágios primários de refino: aumento da produtividade da unidade de fusão, redução da necessidade de resopro no conversor, ajuste preciso da temperatura e racionalização da produção de aço bruto (<http://www.vacmetal.com>).

Mourão *et alii* (2003) enfatizam que “para cada um dos processos de refino secundário (...) existem diversas instalações que podem ser utilizadas”. A escolha do tipo de instalação depende das necessidades específicas de refino do aço a ser fabricado, bem como da produtividade desejada, do volume de aço a ser produzido e por último, das condições de investimento e de retorno projetadas. No quadro 2.2.4.2.1 estão separados os tipos de metalurgia de panela²¹.

QUADRO 2.2.4.2.1: Tipos de metalurgia de panela.

Tipos de Metalurgia de Panela	Função	Descrição
Forno Panela	Remover ou modificar inclusões, controle de temperatura, acerto de composição química, desoxidação e dessulfuração.	Suas principais vantagens são: investimento reduzido, grande flexibilidade nos diversos tipos de processos e maximizador da produção de aço bruto pelos conversores.
Tanque de Vácuo	Desgaseificação, desoxidação, dessulfuração, descarburização (em condições específicas) e acerto de composição química (pequenas quantidades de adições de ferro ligas).	Panela é posicionada dentro de um tanque, que tem a pressão reduzida. Processos dependentes da pressão atmosférica podem progredir.
ASEA – SKF	Permite obter os mesmos resultados que são conseguidos utilizando-se um forno panela e um tanque de vácuo.	Possui duas estações, uma de aquecimento (similar a um forno panela comum) e outra de vácuo.
VOD	Controle de temperatura (aquecimento químico), acerto de composição química, desoxidação, dessulfuração e descarburização.	É utilizada principalmente para a produção de aços inoxidáveis.
RH	Desgaseificação, desoxidação, dessulfuração, descarburização (em condições específicas) e acerto de composição química.	Recomendado para os casos em que a panela possui uma grande capacidade, permite submeter porções do aço à ação do vácuo.

Fonte: *Adaptado de Mourão et alii, 2003.*

As usinas nacionais, ao projetarem suas estações de refino secundário, optaram pela instalação de equipamentos que lhes garantissem elevados padrões de segurança

²¹ “Após o processamento do aço no equipamento de fusão, invariavelmente o aço líquido é transferido para um recipiente chamado de panela, que não cumpre apenas o papel de transporte do aço líquido para o equipamento seguinte no roteiro de processamento, mas também o de reator metalúrgico nas operações de refino secundário. Deste modo, o refino secundário do aço líquido (...) é chamado de metalurgia de panela” (Mourão *et alii*, 2003).

operacional, de qualidade e de produtividade, sem esquecer do melhor rendimento econômico. Nesse sentido, três tipos de instalações foram amplamente aplicadas: Forno Panela, RH e Estação de Borbulhamento de Argônio, que serve para retirar as inclusões remanescentes no aço (Silva, 2002).

A grande vantagem do forno panela é a versatilidade de operação durante o processo de refino, podendo realizar inúmeras tarefas. Somente os processos de descarburagem e de remoção dos gases hidrogênio e nitrogênio não estão incluídos entre as suas funcionalidades. As instalações RH, por sua vez, são complementares aos fornos panelas, podendo cumprir essas outras funções. Uma comparação entre as funções exercidas por esses dois equipamentos pode ser encontrada no quadro subsequente.

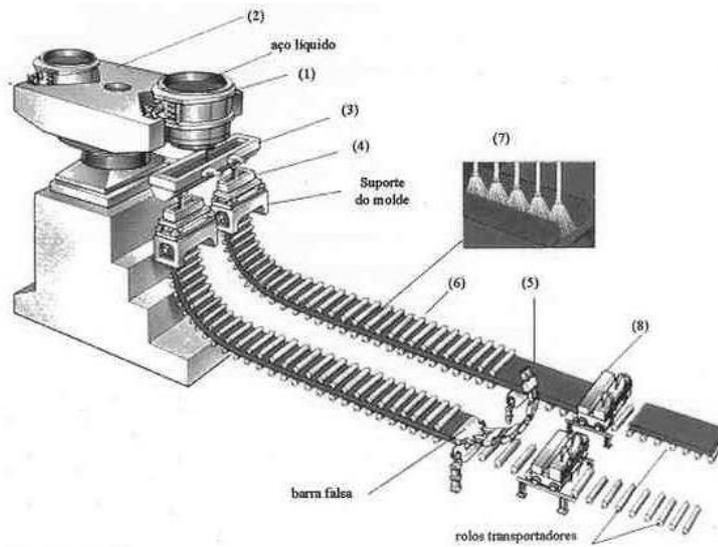
QUADRO 2.2.4.2.2: Nível das funcionalidades do forno panela e do RH.

Funcionalidades	Forno Panela	RH (Ruhrstahl – Heraeus System)
Adição de Ligas	Excelente	Bom
Controle da Temperatura	Excelente	Bom
Controle da Composição	Bom	Bom
Remoção do H	Impossível	Excelente
Descarburagem	Impossível	Excelente
Remoção do N	Impossível	Possível
Dessulfuração	Bom	Possível
Desoxidação	Bom	Bom

Fonte: *Adaptado de Presern, 1992.*

2.2.5. Lingotamento Contínuo Convencional

O lingotamento contínuo é a última etapa da cadeia de processamento que trabalha com o aço ainda líquido. Os produtos do lingotamento incluem blocos, tarugos e placas, sendo estas produzidas quase que em sua totalidade por plantas integradas com conversores a oxigênio. A seguir está o desenho ilustrativo de uma máquina de lingotamento contínuo.



Fonte: Susaki, 2002.

FIGURA 2.2.5.1: Desenho esquemático de uma máquina de lingotamento contínuo de placas.

O primeiro estágio do processo de lingotamento contínuo convencional corresponde ao aço líquido contido na panela (1) que permanece posicionada sobre a torre de operação (2). Em seguida, o aço líquido é transferido para o distribuidor (3), que tem duas funções básicas: (a) armazenar o aço líquido, para permitir a troca da panela, e; (b) remover inclusões (Al_2O_3 , MnO , SiO_2 , entre outros). Deste, o aço líquido é vazado continuamente para o molde²² (4), que oscila verticalmente. Uma vez formado o veio (5) de aço, com a casca solidificada, ele é conduzido pelos rolos de contenção (6), que suportam a pressão do núcleo de aço líquido. Durante esse trajeto, o resfriamento prossegue por meio de bancos de spray de água e ar (7). No final, o veio é cortado pelas máquinas de corte (8).

2.2.6. Laminação

A etapa de laminação é responsável pela transformação de seções grandes, retangulares ou redondas, em seções menores. Existem diversos critérios para a classificação dos laminadores, sendo os mais usuais a condição de trabalho, laminadores

²² “É a parte mais importante do lingotamento contínuo, pois é ela quem define a transformação do aço líquido em sólido, conferindo também a forma final do produto (espessura, largura – seção redonda ou quadrada)” (Mourão *et alii*, 2003).

a quente e a frio, ou a morfologia dos produtos a serem fabricados, planos ou longos, que incluem perfis, trilhos, arame, entre outros produtos. Outra maneira de classificar os tipos de laminadores é de acordo com sua função de produção, podendo ser separados em laminadores desbastadores ou de acabamento.

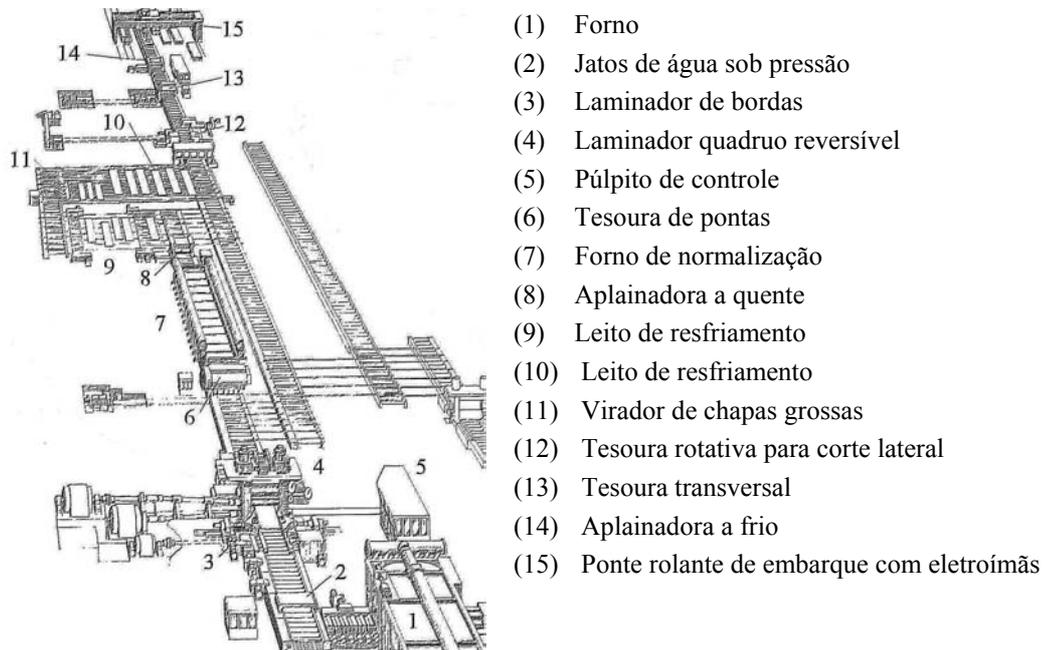
Os laminadores desbastadores, todavia, vêm sendo cada vez menos adotados pelas usinas siderúrgicas em função da difusão do lingotamento contínuo. Para ambos os tipos de produtos, longos ou planos, vários autores projetam a tendência de substituir as técnicas de laminação primária por aparelhos de lingotamento contínuo capazes de produzir produtos semi-acabados com as dimensões próximas à do produto final (Blondelot, 1997; Susaki, 2002). Dessa maneira, somente caberia à instalação de laminação, tanto das usinas integradas como a das mini-usinas, adequar as propriedades físicas e mecânicas do produto, sem grandes reduções das dimensões²³.

2.2.6.1. Laminação a Quente

Durante a realização da laminação a quente, a temperatura de trabalho é superior ao ponto de recristalização do metal, permitindo que a resistência à deformação plástica do metal seja abrandada. A laminação a quente pode ser separada em três grupos principais: (1) laminador de chapas grossas; (2) laminador de tiras e chapas finas e; (3) laminador de barras e perfis.

As chapas grossas são laminados planos com espessura superior a 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ "), sendo este limite um pouco flexível. Possui uma gama de utilizações, tais como indústria naval, estruturas metálicas, vagões, reservatórios, caldeiras e tubulações (Araujo, 1997). Através da figura 2.2.6.1.1 é possível visualizar todas as partes que integram um laminador de chapas grossas.

²³ Astier (1995), ao considerar as tendências tecnológicas para a produção de aço, indica que “a evolução da laminação a quente esta cada vez mais relacionada ao lingotamento contínuo, especialmente no caso do lingotamento próximo a espessura final (*near-net-shape*)”, reafirmando que a laminação primária perdeu proeminência dentro das usinas modernas.



Fonte: *Adaptado de Araujo, 1997.*

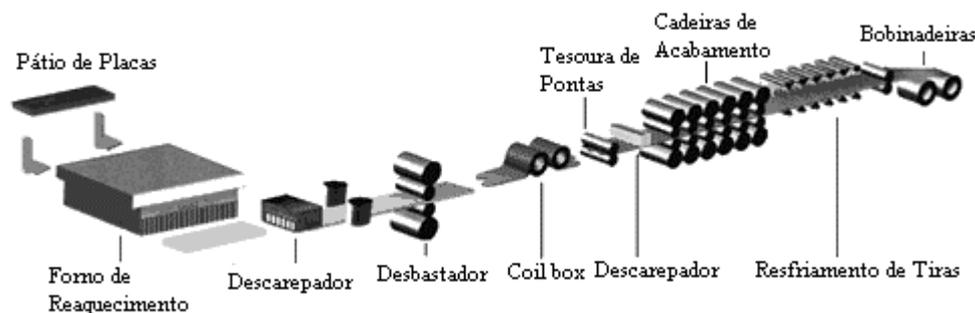
FIGURA 2.2.6.1.1: Laminador de chapas grossas.

O processo de laminação de chapas grossas tem início com a entrada das placas nos fornos de reaquecimento (1), onde a sua temperatura é ajustada para a deformação a quente. Logo em seguida, a placa segue para o quebrador de carepa²⁴, que remove as impurezas da peça através de jatos de água (2). Na continuação, a placa começa a ser trabalhada pelos cilindros de laminação (3 e 4) e, por fim, a chapa recebe as adequações necessárias para ser entregue ao cliente (5 a 15).

Para o laminador de tiras e chapas finas²⁵ o processo de produção é mais extenso, contando com operações suplementares. Como ilustra a figura 2.2.6.1.2, o laminador de tiras e chapas finas apresenta uma linha complementar, responsável pela redução sucessiva da espessura da peça até limites mais baixos (até 0,3 mm) que os definidos para as chapas grossas.

²⁴ “Carepa é uma camada de ferro oxidada no interior dos fornos de laminação devido à combustão. Na realidade, ela se forma pelo excesso de ar em que se trabalha na combustão. Dessa forma sobra oxigênio livre do volume de combustão, este reage com um metal (aço da placa) e forma essa camada superficial (<http://meusite.mackenzie.com.br/carlosmonezi>)”.

²⁵ A diferença entre tiras e chapas finas é puramente dimensional. Tiras apresentam uma largura máxima de aproximadamente 0,35 m. A partir deste ponto, o produto plano pode ser classificado como chapa fina (Araujo, 1997).



Fonte: <http://meusite.mackenzie.com.br/carlosmonezi>.

FIGURA 2.2.6.1.2: Laminador de tiras a quente

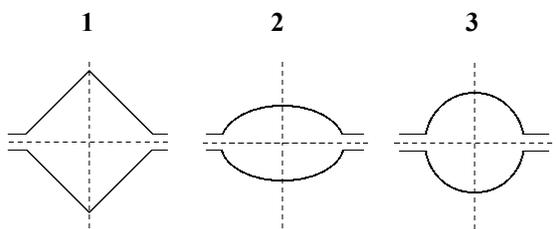
Os equipamentos iniciais, assim como na laminação de chapas grossas, desempenham funções específicas. A placa de metal que ingressa é aquecida até a temperatura de trabalho e sofre a ação de agentes (descarepador) para remover o óxido que se formou sob a superfície da peça. Logo depois, é encaminhado o laminador esboçador, onde operam laminadores quádrus²⁶, contínuos ou reversíveis. As espessuras das peças ao final desse estágio de produção encontram-se no intervalo de 25 a 30 mm (Bradaschia, 1986).

Posteriormente ao esboçamento da placa, inicia-se outra etapa de redução gradativa da espessura da peça, só que pela linha de acabamento, que tipicamente opera seis cadeiras de laminação quádruas não reversíveis em tandem. Essa instalação de processamento em linha, com trens de laminação de desbaste e de acabamento, apresenta elevada produtividade, com uma utilização satisfatória da capacidade instalada e com um mínimo de perda de energia.

Com relação aos produtos não planos, que utilizam blocos e tarugos como matéria-prima, o processo é mais compacto e simples, contando com cilindros de laminação projetados para a produção de barras, perfis e outros aços longos. Este tipo característico de laminação é sempre realizado a quente, não sendo adequado o trabalho a frio (Bradaschia, 1986).

²⁶ “O laminador quádruo é utilizado para o trabalho a quente e a frio com produtos planos”. Operam-se dois cilindros maiores que servem de encosto para os cilindros de trabalho, que são menores (Mourão, 2003).

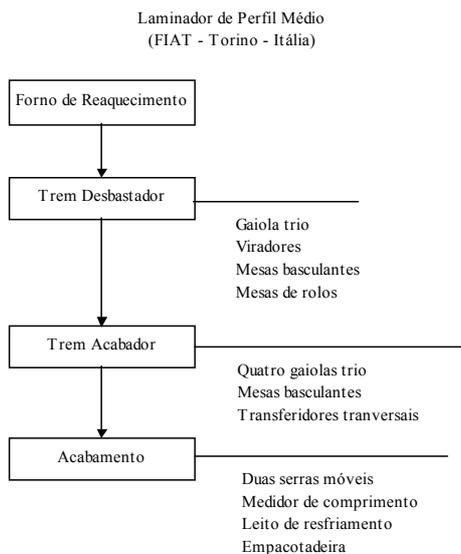
Como no caso dos produtos planos, a seqüência dos passes de laminação depende da confiabilidade do material, da capacidade do laminador e das especificações do produto final. Já a formação de um determinado perfil somente é obtida através da combinação de diferentes seções transversais. Na figura 2.2.6.1.3 está uma seqüência de passes para a formação de barras circulares. Para alcançar essas diferentes seções, os cilindros de laminação apresentam um perfil com diversas ranhuras ou passagens, que se adaptam à seqüência de formas a que a peça deve ser submetida sem comprometer a qualidade do produto (Mourão *et alii*, 2003).



Fonte: Mourão *et alii*, 2003.

FIGURA 2.2.6.1.3: Exemplo de seqüência de passes para a produção de barras redondas.

O laminador de aços longos realiza operações de desbastamento e de acabamento, sendo os primeiros passes destinados unicamente a diminuição da seção do bloco ou tarugo. Um esquema do fluxograma de produção de perfis médios pode ser visto na figura 2.2.6.1.4.



Fonte: *Adaptado de* Bradaschia, 1986.

FIGURA 2.2.6.1.4: Esquema de uma laminação de perfis médios.

2.2.6.2. Laminação a Frio

O processo de laminação a frio consiste de várias operações, como decapagem, laminação a frio, limpeza eletrolítica, recozimento, laminação de acabamento e acabamento final, o que torna a fabricação longa e a produtividade baixa, mesmo com a tendência atual de integrar todas essas etapas em uma única linha de produção²⁷ (Astier, 1995). Uma descrição resumida das operações que integram a laminação a frio está no quadro 2.2.6.2.1.

QUADRO 2.2.6.2.1: Processos da laminação a fio.

Processo	Descrição
Decapagem	Processo de remoção dos óxidos superficiais da peça por imersão em ácidos inorgânicos ou por ação mecânica
Laminação a frio	Deformação plástica proporciona redução da espessura da peça, com agravamento das tensões internas devido ao encruamento do material.
Recozimento	Visa recuperar a ductilidade da peça e remover tensões internas oriundas do laminador de tiras a frio.
Laminação de acabamento	Material proveniente do recozimento sofre um passe muito leve de laminação, 1% por exemplo, para conferir melhores propriedades mecânicas a peça.
Acabamento final	Estágios finais do processo: aplainamento e linhas de corte

Fonte: Mourão *et alii*, 2003

Por sua vez, o fluxograma da figura 2.2.6.2.1 permite identificar as diversas operações que integram o processo de laminação a frio.

²⁷ Para Araujo (1997), a vantagem dos laminadores inteiramente contínuos está na eliminação do manuseio dos componentes nas entradas e saídas das instalações e na redução do tempo de processamento de uma bobina. Em vez dos 12 dias usuais, conseguiu-se baixar para 1 hora. Todas essas vantagens operacionais, aliadas aos melhores parâmetros de qualidade da peça acabada, tornaram o laminador reversível indicado somente para os casos em que a flexibilidade de ordens de produção é muito importante e o capital disponível para investimentos é restrito.

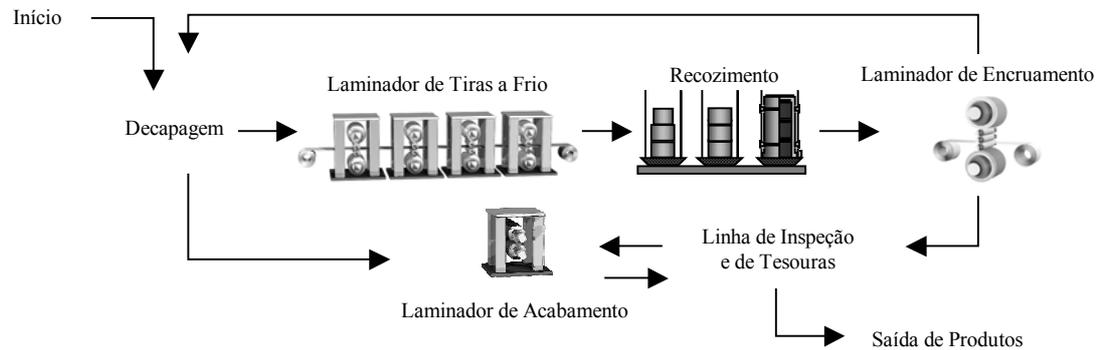


FIGURA 2.2.6.2.1: Fluxograma do processo de laminação de tiras a frio.

2.3. Produção Semi-Integrada

A produção semi-integrada é caracterizada pelo emprego de aciarias elétricas em sua cadeia produtiva, sendo os fornos elétricos a arco as instalações de maior proeminência no cenário mundial. Estas instalações são formadas por um transformador, circuitos auxiliares, eletrodos de grafita, corpo ou carcaça, lanças supersônicas de combustão, sistemas de despoejamento e equipamentos de carga e descarga do forno. Araujo (1997) classifica os fornos elétricos a arco em dois tipos, corrente alternada e corrente contínua. Os fornos elétricos a arco de corrente alternada são utilizados há mais tempo, ao passo que os fornos de corrente contínua ganharam uso a partir da década de 80. A principal distinção entre ambos está no posicionamento dos eletrodos. Nos fornos de corrente alternada, o arco voltaico se faz entre um dos três eletrodos e o material carregado. Já no forno de corrente contínua, o arco é vertical, fazendo uso de um único eletrodo.

Algumas vantagens acompanham o emprego do forno a arco de corrente contínua, iniciando com o menor consumo de eletrodos. O gasto de eletrodos é inferior a 2 kg/t, comparado com os 5 kg/t do forno convencional. O consumo de energia é 8 kWh/t inferior. A única desvantagem para os fornos de corrente contínua está no investimento inicial, que é 35% superior. Contudo, esse acréscimo de capital no momento da construção é facilmente contornado pelo ganho no consumo dos eletrodos, em um período inferior a dois anos (Araujo, 1997).

Uma inovação não muito recente que vem sendo amplamente utilizada durante a queima do material, é a injeção de oxigênio, que ajuda a esquentar a corrida, fundir mais rapidamente o material sólido e a promover a descarburização do metal. A proporção de oxigênio durante a fusão depende, entre outros fatores, da composição da carga. Quanto maior a quantidade de ferro gusa na mistura, mais intensa será a injeção de oxigênio. Outros progressos permitiram que o tempo do ciclo do processo (*tap-to-tap*) fosse minimizado e que o consumo de insumos fosse abatido²⁸. A fim de sintetizar a evolução técnica dos fornos ao arco elétrico, informações sobre o tempo de corrida, consumo de eletricidade e desgaste dos eletrodos foram agrupadas no quadro 2.3.1.

QUADRO 2.3.1: Evolução técnica dos fornos elétricos a arco.

Parâmetro	1965	1995
Tempo de corrida	160 minutos	45 minutos
Consumo de eletricidade	630 kWh/t	300 – 350 kWh/t
Consumo dos eletrodos	6,5 Kg/t	1,5 Kg/t

Fonte: Dollé, 1995.

Os fornos elétricos são alimentados basicamente por sucata, obtendo sua matéria-prima de três fontes possíveis: sucatas geradas na própria usina, geradas por indústrias que consomem aço e as sucatas provenientes de produtos descartados. Muitas empresas no Brasil usam também o ferro gusa como matéria-prima, como é o caso da Usina de Juiz de Fora (MG) da Belgo-Mineira, pertencente ao grupo Arcelor.

Além dos avanços técnicos citados, outras vantagens fazem dos fornos elétricos instalações de destaque: (1) reduzido impacto ambiental; (2) ajuste mais fácil do volume de produção aos altos e baixos do mercado; (3) investimento inicial é inferior; (4) podem se instalar perto de sua fonte de matéria-prima, o que lhes proporciona maior flexibilidade e; (5) menores custos de produção. Por estes motivos, a produção mundial

²⁸ Entre as principais mudanças, tem-se: aumento da potência dos fornos, o desenvolvimento de um sistema de resfriamento das paredes do vaso com painéis resfriados a água, a técnica de escória espumante e o uso de queimadores oxi-combustível, que em conjunto chegam a configurar um novo tipo de forno de ultra-alta potência (UHP). O pré-aquecimento da sucata e, mais ainda, a difusão do uso da metalurgia da panela – compartilhando o escopo do refino antes executado exclusivamente no forno elétrico – também beneficiaram o desempenho das aciarias elétricas (Pinho, 1993: 5).

de aço com forno elétrico está crescendo, especialmente nos Estados Unidos, onde há um sistema razoavelmente eficiente de coleta e distribuição de sucata (Trevisani Jr., 2000).

2.4. Avanços Tecnológicos Recentes

A tendência tecnológica mais geral é a de promover a integração dos vários processos em que atualmente se divide a atividade siderúrgica, tornando o funcionamento das usinas cada vez mais contínuo. Associada a essa tendência, a compactação das máquinas e dos equipamentos, juntamente com a própria planta industrial, vem sendo perseguida com sucesso (Pinho, 1993).

Esta seção destaca os principais avanços tecnológicos em difusão no setor, sendo estes, os processos alternativos de produção de ferro primário e as tecnologias de lingotamento de placas finas e de laminação compacta.

2.4.1. Lingotamento de placas finas e laminação compacta

Uma inovação de grande relevo se refere à possibilidade de produção de laminados planos por usinas semi-integradas, impulsionada pelo grande esforço de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de lingotamento em espessura próxima a do produto final. As restrições que as tecnologias convencionais de laminação impunham em termos de tamanho mínimo puderam ser suplantadas, proporcionando um custo fixo por tonelada e um consumo enérgico compatíveis com os imperativos de preços do mercado (Pinho, 1993).

A grande transformação causada pela tecnologia *thin-slab-casting* (lingotamento de placas finas) decorre da possibilidade de fabricação de produtos planos a partir da aciaria elétrica, mesmo a quantidades inferiores²⁹. No quadro 2.4.1.1 estão separadas as informações de custo para as usinas integradas e para uma mini-usina da Nucor que aplica a tecnologia *thin-slab-casting*.

²⁹ Máquinas convencionais de lingotamento contínuo que foram projetadas para produzir placas de 200 até 300 mm de espessura têm sido modificadas para produzir placas mais finas, com altura de até 80 mm. Contudo, como explica Hendricks (1995), parece que esse tamanho é o limite das plantas convencionais modificadas, novas reduções de tamanho das placas implicam em novos conceitos e equipamentos.

QUADRO 2.4.1.1: Custo de produção de bobinas laminadas a frio, março de 1999 (em US\$ / tonelada)

	EUA	Japão	Alemanha	Austrália	Coréia	Brasil	Nucor
Matérias-Primas	114	96	105	88	103	109	132
Carvão	25	26	25	20	27	41	-
Minério de Ferro	57	50	60	40	53	34	-
Sucata	31	21	20	27	23	34	132
Outros Materiais	169	162	160	156	147	132	149
Custo Salarial	159	162	152	117	60	66	50
Salário-Hora	37,5	40	38	23	12	10	35,5
Produtividade (hora-homem por tonelada)	4,2	4,1	4,0	5,1	5,0	6,6	1,4
Custos Operacionais	442	420	417	361	310	307	330
Custos Financeiros	40	60	40	42	48	70	42
Depreciação	30	40	30	30	30	35	34
Juros	10	20	10	12	18	35	8
Custos Totais	482	480	457	403	358	377	372

Fonte: Paula, 1999: 19.

Como foi visto no quadro 2.4.1.1, os ganhos da tecnologia *thin-slab-casting*, expressos na coluna referente à empresa Nucor, são elevados, especialmente em função do reduzido custo salarial. A baixa incorporação de mão-de-obra decorreu da substancial compactação do processo³⁰. Enquanto uma usina integrada a coque requeria 4,3 homens-hora para a produção de uma tonelada de bobina laminada a frio, na Nucor era necessário apenas 1,3 homem-hora. Assim, o custo salarial da Nucor era de apenas US\$ 43 por tonelada, contra US\$ 152 por tonelada para as usinas integradas a coque norte-americanas.

Sobre a designação *thin-slab-casting* (lingotamento de placas finas), diferentes nomes foram criados pelas empresas detentoras da tecnologia, sendo os mais importantes: *Compact Strip Production* (CSP), *In-Line Strip Production* (ISP), *Conroll*, *Tippins Strip Production* (TSP), *Flexible Thin Slab Rolling* (FTSR) e *Casting Press*

³⁰ O custo salarial da Nucor era, inclusive, inferior ao da siderurgia brasileira, pois apesar de pagar US\$ 10 por hora, demandava-se 7,0 homens-hora para a produção de uma tonelada de bobina a frio, perfazendo um custo salarial de US\$ 70 por tonelada.

Rolling (CPR) (Paula, 1998). A seguir estão características de alguns equipamentos de *thin-slab-casting*.

QUADRO 2.4.1.2: Principais características de alguns equipamentos de *thin-slab-casting*.

Siderúrgica (Localização)	Tecnologia	Veios	Capacidade (10 ³ toneladas)	Espessura Mínima (mm)
Arverdi, Cremona (Itália)	ISP	1	750	1,2
Nová Hut (República Tcheca)	TSP	1	1000	1,5
Armco, Mansfield (EUA)	Conroll	1	1100	1,7
Nucor, Berkeley (EUA)	CSP	1	1200	1,2
Thyssen, Duisburg (Alemanha)	CPR	1	1800	0,8 a 1,0
Algoma (Canadá)	FTSR	2	2000	1
Tricô Steel, Decatur (EUA)	Sumimoto	2	2200	1,0

Fonte: *Adaptado de* Paula, 1998: 31.

O processo CSP é uma destas tecnologias que vem potencializando novas reduções de custo para as plantas que fabricam aços planos, tendo sido desenvolvida pela SMS Schloemann-Siemag. Essa tecnologia combina lingotamento de placas finas e laminação em um arranjo compacto de planta, permitindo, por esse motivo, a produção direta de laminados. Ao utilizar essa tecnologia é possível minimizar o consumo de energia, pelo melhor aproveitamento do calor, e compactar a etapa de laminação, devido à adoção de técnicas de lingotamento a espessuras próximas da especificação final.

Rohde e Flemming (1995) apontaram dois princípios fundamentais para o sucesso econômico da produção compacta de tiras (CSP), que pode ser expandida para as demais tecnologias de lingotamento de placas finas. Em primeiro lugar, a minimização absoluta do número de estágios do processo, tornando a cadeia de produção mais compacta e gerando menores custos. A segunda vantagem veio a ser a minimização do consumo de energia. Esses princípios originaram um menor custo de investimento e uma melhor flexibilidade³¹. A seguir estão algumas facilidades de

³¹ Outra vantagem deste tipo de processo é a simplificação das atividades de programação da produção, potencializada pela simplificação dos equipamentos e dos métodos de controle (Susaki, 2002). Segundo esse autor, “considerando-se a enorme variedade de composição química e de largura das placas, as demandas de entrega just-in-time e a necessidade de se minimizar o capital imobilizado, representado

planejamento e controle do processo CSP frente às técnicas de lingotamento contínuo convencionais.

QUADRO 2.4.1.3: Melhor controle externo da produção nas unidades *Compact Strip Production*.

	Lingotamento Contínuo Convencional	<i>Compact Strip Production</i>
Estoque Intermediário	Grande	Nenhum
Tempo de Expedição	Mais de 3 semanas	Menor que 1 semana
Custos de Planejamento/Administração	Alto	Muito baixos
Custos de Transporte	Elevado	Baixo

Fonte: *Adaptado de* Hendricks, 1995.

Em vista do que foi exposto e das evidências de que certas plantas já trabalham com escalas superiores a 2 milhões de toneladas, o desenvolvimento das tecnologias de lingotamento a espessuras finas promete afetar a estrutura do setor siderúrgico. Aparentemente, o limite para essa expansão demonstra ser o capital já investido em plantas convencionais e a qualidade da superfície e da estrutura interna dos lingotes.

2.4.2. Processos alternativos de produção de ferro primário

O objetivo dos processos alternativos de produção de ferro primário, também conhecidos como processos de fusão-redutora, é substituir o alto-forno. Com diversidade interna bem expressiva, as tecnologias de fusão-redutora se caracterizam por dispensarem, integralmente ou de forma ao menos parcial, a preparação prévia das cargas de minério de ferro e carvão mineral. Com isso, há um decréscimo substancial dos custos de capital associados à construção de coqueiras e sinterizações, equipamentos que, ademais, provocam impacto ambiental bastante negativo. A fusão-redutora apresenta também escala mínima bem inferior a um alto-forno e requisitos menores de mão-de-obra para sua operação (Pinho, 2001: 163).

Outros propósitos da utilização de métodos alternativos para a produção de ferro primário podem ser colocados da seguinte forma: utilizar uma grande variedade de carvões e chegar a um consumo energético comparável ao de um alto-forno moderno;

pelas placas em estoque, e a pressão exercida pelo volume de gusa líquido em trânsito nos carros-torpedo, a coordenação entre processos e a programação da produção é tarefa das mais complexas”.

utilizar, se possível, uma ampla variedade de minérios, com um mínimo de preparação; apresentar alta produtividade; produzir ferro primário com qualidade e consistência para conversores a oxigênio ou para fornos a arco elétrico (Saab *et alii*, 1996).

Sob o aspecto econômico, a produção de ferro primário, não importa o processo, é intensiva em energia e altamente dependente do custo das matérias-primas metálicas, tornando a localização do empreendimento fundamental para o seu sucesso. O melhor lugar é aquele onde o minério e o redutor têm custos menores, desde que o custo de frete do produto não anule essas vantagens.

A exemplo do que acontece com os equipamentos de *thin-slab-casting*, o nome comercial dos processos alternativos de produção de ferro primário varia conforme o proprietário da tecnologia. No quadro 2.4.2.1 estão as novas tecnologias de produção de ferro-primário.

QUADRO 2.4.2.1: Novas tecnologias de produção de ferro-primário.

Tecnologias	Proprietário	Minério de Ferro	Combustível	Produto	Investimento (US\$ por tonelada/ano)
Corex	Vöest-Alpine (Áustria)	Pelota ou Granulado Pelota	Carvão Granulado	Gusa Líquido	300 a 400
Tecnored	Caemi (Brasil)	Auto-Redutora	Coque	Gusa Líquido	130
Circofer	Lurgi (Alemanha)	Finos de Minério	Finos de Carvão	DRI/HBI	200
AISI-DOE	AISI e DOE (EUA)	Pelota (70%) + Finos	Finos de Carvão	Gusa Líquido	160
Hismelt	CRA (Austrália)	Finos de Minério	Finos de Carvão	Gusa Líquido	150
DIOS	JSM (Japão)	Sinter-feed	Finos de Carvão	Gusa Líquido	250
Romelt	MISA(Rússia)	Finos de Minério	Finos de Carvão	Gusa Líquido	n.d.
Iron Carbide	Iron Carbide (EUA)	Finos de Minério	Gás Natural	Carbeto de Ferro	210 a 220
Finmet	CVG - VAI(Venezuela)	Sinter-feed	Gás Natural	DRI/HBI	220 a 300
Fastmet	Midrex (Japão)	Pelota Auto-Redutora	Gás Natural, Óleo Comb., Carvão Pulverizado	DRI/HBI	220

Fonte: *Adaptado de Paula, 1998: 34.*

Merecem maior destaque os processos de fusão redutora (*smelting-reduction processes*) e os processos de auto-redução. No primeiro caso, destaca-se o processo

COREX. Nesse tipo de equipamento, o minério de ferro é submetido à redução e o produto metálico é fundido, obtendo-se ferro no estado líquido. O processo COREX tem como principal conceito a divisão do alto-forno em dois: um reator realiza a redução quase total do minério, no estado sólido, e este material reduzido é carregado em reator que realiza a fusão do ferro metálico. A energia para o processo é fornecida pela queima de carvão no mesmo reator de fusão, gerando ainda o gás redutor a ser usado no reator de redução. Basicamente, isto equivale a dividir ao meio um alto-forno, com a vantagem de evitar-se a formação da zona coesiva, pois não há região de temperaturas intermediárias entre as de redução e de fusão. O primeiro módulo COREX entrou em operação em 1989, na ISCOR, África do Sul, com capacidade de 400 mt/ano. Atualmente, existem em operação dois módulos na África do Sul, dois na Coreia do Sul e um na Índia (Mourão *et alii*, 2003).

Os processos de auto-redução são aqueles que empregam aglomerados nos quais minério de ferro é disposto conjuntamente com material carbonáceo que terá a função de redutor dos óxidos. Os processos que empregam a auto-redução são processos baseados no uso do carbono sólido como redutor, podendo-se empregar virtualmente qualquer tipo de material carbonáceo, não necessitando de coque. Dois processos apresentam-se como mais promissores: o processo TecnoRed, desenvolvido no Brasil, e o processo Fastmet.

Capítulo 3

ECONOMIAS DE ESCALA NA SIDERURGIA

Os processos que fazem parte da cadeia de produção na siderurgia estão sujeitos a economias de tamanho de forma marcante. Como foi mencionado no capítulo 2, durante a segunda revolução industrial, com a passagem de um processo de fabricação de aço baseado na utilização do carvão vegetal como agente redutor, para outro, assentado no uso do coque siderúrgico, tornou-se ao mesmo tempo possível e atraente usar novos altos-fornos, caracterizados por dimensões superiores e maior capacidade produtiva. Estava deflagrada uma trajetória de valorização das grandes escalas no setor siderúrgico como meio de tornar os custos de produção progressivamente menores.

A evolução da escala de produção na siderurgia em tempos mais recentes pode ser resumida no quadro 3.1. Nesta tabela, as informações da siderurgia mundial foram separadas por países, anos e tamanhos de planta.

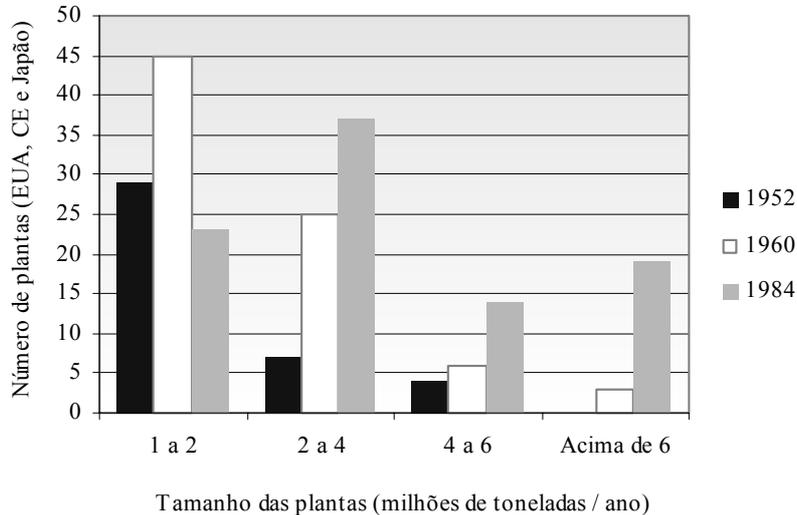
QUADRO 3.1: Evolução do tamanho das plantas integradas.

Tamanho da Planta (milhões de toneladas)	1952			1960			1984			Totais		
	EUA	CE	Japão	EUA	CE	Japão	EUA	CE	Japão	1952	1960	1984
1 a 2	20	7	2	23	16	6	12	9	2	29	45	23
2 a 4	7			18	4	3	17	18	2	7	25	37
4 a 6	4			6			3	8	3	4	6	14
Acima de 6				3			3	4	12	0	3	19
Total	31	7	2	50	20	9	35	39	19	40	79	93

Fonte: *Adaptado de Adams, 1986.*

As mesmas informações foram utilizadas na figura 3.1, sintetizando a evolução do tamanho das plantas integradas nesses países. Vislumbra-se uma trajetória de elevação do tamanho de planta, melhor elucidada pelo Japão, com a maior quantidade de plantas com escala operacional superior a 6 milhões de toneladas. Outros países, como os Estados Unidos, preservaram uma grande quantidade de plantas na faixa de 2 a 4 milhões de toneladas. De todo modo, com o propósito de desfrutar das vantagens

oferecidas pelas economias de escala, a siderurgia mundial passou por uma longa trajetória de crescimento dos patamares de produção.



Fonte: *Adaptado de Adams, 1986.*

FIGURA 3.1: Gráfico da evolução do tamanho das plantas integradas nos EUA, CE e Japão.

Neste capítulo, aborda-se o resultado atual desse processo em duas seções com orientações diferentes. Na primeira, resenham-se as principais fontes encontradas na literatura de economia industrial sobre as economias de escala na siderurgia. Seguindo o procedimento que é mais usual neste campo do conhecimento, a ênfase recai sobre a quantificação das escalas mínimas eficientes em cada uma das principais etapas e variantes das tecnologias de produção siderúrgica. Na segunda e mais extensa seção deste capítulo, foco e fontes são distintas. Apoiando-se em literatura de caráter mais técnico e, sobretudo, em entrevistas e visitas realizadas na pesquisa de campo, persegue-se o objetivo de detalhar as principais fontes dessas economias de escala térmicas que são tão características da indústria siderúrgica.

3.1. Escalas Mínimas Eficientes dos Processos Siderúrgicos

Uma das etapas da produção de aço que é particularmente suscetível às economias de escalas são os altos-fornos. As escalas mais eficientes dos altos-fornos apresentaram comportamentos distintos em dois momentos da história do processamento siderúrgico. Primeiramente, ao longo da década de 50, devido à posição

de destaque alcançada pela indústria siderúrgica dos EUA, acreditava-se que os altos-fornos já tinham atingido o limite de tamanho para exploração das economias de escala. Naqueles tempos, altos-fornos recém construídos tinham uma produção média de 500.000 toneladas por ano. Posteriormente, a trajetória tecnológica dos altos-fornos rompeu com as técnicas vigentes e as plantas construídas no Japão alcançaram novos patamares. O tamanho médio e conseqüentemente a produção média por alto-forno apresentaram uma tendência de crescimento ao longo do tempo, atingindo volumes muito superiores aos encontrados nos EUA. Gold (1974) afirma que em 1971, o Japão tinha altos-fornos em operação que superavam o tamanho-padrão, anteriormente definido, em aproximadamente três vezes. As firmas japonesas, construindo maiores unidades de redução, puderam desfrutar de menores custos de investimento por capacidade instalada e de custos operacionais inferiores aos das plantas tradicionais³².

Nessa direção, a operação de altos-fornos mais modernos e maiores assumiu papel de destaque na siderurgia, especialmente no Japão, permitindo que diversos avanços tecnológicos fossem introduzidos. Tanaka (1987) enumerou alguns dos desenvolvimentos tecnológicos projetados e implementados sobre os altos-fornos: “Durante as duas últimas décadas ocorreram significativas mudanças no design de altos-fornos. Estas incluem aumento do volume do alto-forno e pressão de operação; nova estrutura e design de resfriamento; melhor distribuição de carga; avanços nos sensores, instrumentos e controles; e a introdução de técnicas para diminuir a energia consumida e economizar trabalho”.

Uma outra evidência do crescimento do tamanho dos altos-fornos encontra-se na experiência alemã. Paula (1998) indica que o número de altos-fornos existentes na Alemanha Ocidental regrediu de 104 para 31 ao longo do período de 1970 a 1993, ao mesmo tempo em que a produção média anual elevou-se de 323 para 836 mil toneladas. Como conseqüência dessa racionalização, verificou-se a retração do volume de

³² No entanto, Gold (1974) revela que por trás desse objetivo de alavancar os patamares de produção, encontrava-se o imperativo de atender à rápida expansão da demanda de aço, cujos preços eram bastante favoráveis. Por isso, considera-se que uma importante força que impeliu aumentos de escala tenham sido os dados de mercado e não apenas os de processo. Outra razão, não menos importante, foi o acordo firmado entre os principais produtores japoneses, que limitava o número total de altos-fornos do setor e, conseqüentemente, impedia reajustes em suas parcelas de mercado. Ao tomarem tais medidas, a reposição dos antigos altos-fornos por outros de maior capacidade tornou-se uma prioridade.

empregos, sendo que o número de metalúrgicos alocados na área de alto-forno e preparação de minérios diminuiu de 14.629 (em 1976) para 6.744 (em 1991).

Diversas estimativas quanto à escala mínima eficiente dos altos-fornos estão presentes na literatura, sendo todas de maior magnitude do que as praticadas pelas empresas na década de 60. No quadro 3.1.1 foram separadas algumas projeções relevantes para a escala mais econômica de operação dos altos-fornos.

QUADRO 3.1.1: Escala mínima eficiente para as diferentes etapas do processamento siderúrgico (milhões de toneladas por ano).

Etapa	Unido <i>citado por Fischer et alii</i> (1988)	Pratten <i>citado por Fischer et alii</i> (1988)	Gold (1974)	Pratten <i>citado por Tarr</i> (1977)	Scherer <i>citado por Tarr</i> (1977)	Tarr (1977)	Tarr (1980)
Altos-Fornos	1,0 a 4,0		2,5 a 3,5			2,4	
Aciaria a Oxigênio	Até 10,0	9,0				6,0	
Lingotamento Convencional				4,6	3,6		
Lingotamento Contínuo	0,5 a 2,0			1,0	3,0		
Laminadores de Chapas a Quentes	0,5 a 3,0						
Laminadores de Tiras a Quente	1,0 a 6,0	4,0					4,5 a 5,0
Laminadores de Tiras a Frio	0,1 a 2,5						
Laminadores de Perfis	0,3 a 1,5						
Laminadores de Barras	0,01 a 1,0						
Laminadores de blocos	0,1 a 1,0						

O volume de produção das instalações aumentou para níveis bem acima dos praticados no passado, assumindo níveis próximos aos do quadro 3.1.1. No entanto, não ultrapassou níveis específicos, por limitações que derivam de razões internas ou externas a firma. Altos-fornos “gigantes” não são comprovadamente mais eficientes que outros de menor tamanho. Acima dos patamares referidos, conforme o crescimento dos altos-fornos prosseguia, as economias de escala obtidas decaíam rapidamente. Gold (1974), na busca por evidências, presenciou o caso particular de um alto-forno que elevou a sua produção em 85% e, mesmo assim, teve uma redução de apenas 5% no consumo de coque, em parte ofuscado pelo maior consumo de óleo combustível. Tarr (1977) acrescentou que a operação de altos-fornos gigantes está sujeita a condições mais severas. A manutenção das instalações se torna mais onerosa e os retornos crescentes de escala parecem esgotados. Evidências de custo da Nippon Kokkan, Kawasaki e uma planta da Alemanha revelaram que virtualmente todas as economias de escala são alcançadas com altos-fornos menores que os considerados gigantes.

Dessa forma, as usinas siderúrgicas, na procura por escalas mais eficientes para a etapa de redução, têm optado pela operação de dois altos-fornos de menor porte, ao invés da construção de uma instalação gigante. Como foi visto no quadro 3.1.1, dois altos-fornos operando à escala mínima eficiente implicariam em uma produção de ferro primário de aproximadamente 5,5 milhões de toneladas por ano, correspondendo dessa forma, à escala mais eficiente para a etapa de redução do minério de ferro³³.

A etapa posterior ao alto-forno numa usina integrada moderna, a aciaria a oxigênio, também deve operar segundo uma escala que não seja insatisfatória e economicamente inviável. Estimativas para a escala mínima eficiente estão colocadas no quadro 3.1.1. Todas as estimativas para a escala mínima eficiente da aciaria a oxigênio mostraram-se de grande magnitude, com valores que partem de 6 milhões de

³³ Esse foi o caso da empresa holandesa, Hoogovens IJmuiden, que optou pela desativação de dois dos seus quatro altos-fornos para racionalizar a produção de ferro-gusa. Em 1981, os quatro altos-fornos em operação totalizavam uma produção de 4,6 milhões de toneladas e apresentavam um volume interno total de 8.575 m³. Atuando em várias áreas do alto-forno, a produção e a produtividade puderam ser consideravelmente aumentadas, sendo que a produção passou para o patamar de 5,4 milhões de toneladas e o volume interno total caiu para a 6100 m³. Esta quantidade produzida, com somente dois alto-fornos, corresponde a uma produtividade de 2,4 t/m³/dia, muito superior a anterior, de 1,5 t/m³/dia. Toxopeus et alii (1996) destacaram as seguintes melhorias como fundamentais no programa de racionalização da produção dos altos-fornos pela Hoogovens IJmuiden: “(1) disponibilidade aumentada, por equipamentos melhorados; (2) renovações, aumento de capacidade e revestimento à prova de falhas (fool-proof); (3) consistência na qualidade de carga e coque; (4) controle da casa de corrida; (5) injeção de carvão pulverizado e enriquecimento com oxigênio; (6) distribuição de carga”.

toneladas por ano, segundo Tarr (1977), e alcançam a elevada quantidade de 10 milhões de toneladas (Fischer *et alii*, 1988).

Em função do caráter conexo da cadeia de produção de aço, quaisquer alterações em um dos setores componentes de uma complexa rede industrial integrada implicam reajustes adaptativos em setores adjacentes para que a produção da usina esteja em sintonia em todas as fases, isto é, não existam gargalos ao longo da cadeia de produção. Dessa forma, a operação de dois altos-fornos e a entrada de sucata na aciaria, no percentual de 27% da composição final, requer uma produção pela aciaria de aproximadamente 6,5 a 7,5 milhões de toneladas por ano, segundo a experiência japonesa. Estes valores estão congruentes com os estimados pelo quadro 3.1.1 e compõem, até o momento, o valor para a escala de produção da planta.

O forno a arco elétrico, utilizado prioritariamente por usinas semi-integradas, possui a característica de conseguir operar a níveis de produção muito inferiores às demais fases da produção de aço, sem prejuízos advindos de uma escala ineficiente. Tarr (1984), *citado por* Fischer *et alii* (1988), afirma que o forno a arco elétrico pode operar a uma escala mínima eficiente da ordem de 500 mil toneladas por ano.

Depois de produzido, o aço precisa ser solidificado (lingotado). Como já foi mencionado, existem dois métodos alternativos: lingotamento convencional (utilizando-se lingoteiras) e o lingotamento contínuo. A substituição do lingotamento convencional pelo lingotamento contínuo continua a progredir no setor siderúrgico, eliminando lingoteiras, fornos-poço e a laminação de desbaste primária.

A partir do quadro 3.1.1 é possível observar a grande diferença na intensidade das escalas mínimas eficientes entre os dois processos usuais. O lingotamento contínuo promoveu uma compactação do processo de solidificação do metal líquido, permitindo que a produção viesse a se situar no intervalo de 0,5 a 3,0 milhões de toneladas por ano.

Uma tecnologia atual que tem se mostrado muito eficiente e vem permitindo novos ganhos é a técnica de lingotamento contínuo próximo a espessura final do produto. Essa tecnologia segue o princípio geral da trajetória de compactação do processo siderúrgico, qual seja o de reduzir ao mínimo o número de etapas que compõem o processo, melhorando assim, o rendimento energético e a produtividade do trabalho. No quadro 3.1.2 estão dados de custo para os dois tipos de lingotamento contínuo.

QUADRO 3.1.2: Custos Operacionais e de Capital para a Produção de Laminados a Quente (Lingotamento Contínuo Convencional e *Thin-slab-casting*).

	Lingotamento contínuo convencional	Lingotamento de placas finas	
Espessura do lingote (mm)	225	45	
Capacidade (milhões de toneladas por ano)	2,0	0,8	0,4
Investimento (milhões de dólares)	500	120	80
Custo operacional (dólares por 10 ³ x tonelada produzida)			
Custo das perdas do processo	14	8	8
Custo da força de trabalho	13,2	18	30
Custo do consumo de eletricidade	4,4	1,6	1,6
Recuperação de capital	50	30	40
Custo total	100,5	74,6	98,1

Fonte: *Adaptado de Agarwal e Loreth, 1990.*

Como está no quadro 3.1.2, o processo de lingotamento de placas finas (*thin slab casting*) teve seus maiores avanços sobre as práticas convencionais em termos da diminuição das perdas de processo, do consumo de eletricidade e da maior facilidade para a recuperação de capital, já que o investimento inicial para a sua instalação é de menor intensidade. Como consequência, para ambas as plantas os custos operacionais seriam menores³⁴. De todo modo, a comparação entre os custos de produção segundo a nova tecnologia em duas escalas diferentes mostra que também ela está sujeita a retornos crescentes. O custo de produção diminui cerca de 24% quando a capacidade duplica de 400 mt para 800 mt/ano. Ainda assim, Agarwal e Loreth (1990) afirmam que não serão mais necessárias grandes instalações, superiores a 2 milhões de toneladas por ano, para produzir aços planos. As mini-usinas poderão participar desse segmento de mercado, que vem a ser o mais dinâmico e de maior demanda.

Chegando à última fase do processamento, a laminação, diferentes tendências para a escala mínima eficiente são encontradas, dependendo do tipo de produto a que se

³⁴ “A uma produção de 800.000 toneladas métricas por ano, custos totais são aproximadamente US\$75 por tonelada métrica ou uma incrível vantagem de US\$26 por tonelada métrica de ganho sobre as práticas convencionais (Agarwal e Loreth, 1990)”.

destina. No geral, a produção de laminados planos está reservada às usinas maiores, enquanto os produtos não-planos, como aços estruturais, são produzidos por plantas menores (ver quadro 3.1.1).

É nítida a distinção entre as escalas de produção mais eficientes para os dois tipos de produto. Enquanto os laminados não-planos situam-se em um intervalo muito inferior, que vai até 1,5 milhões de toneladas por ano, os laminados planos apresentam um comportamento totalmente distinto. Suas escalas mínimas eficientes seguem até o patamar estimado pela Unido em 6 milhões de toneladas por ano, como é o caso dos laminadores de tiras a quente.

3.2. Fontes de Economias de Escala na Siderurgia

Esta seção tem por objetivo identificar quais são as principais fontes dos substanciais retornos de escala de ordem técnica observados na siderurgia. Além dos elementos explicativos do fenômeno, a abordagem das economias de escala dentro do setor, analisou os desdobramentos dos ganhos de rendimento sobre os principais *inputs* de produção: capital, mão-de-obra, energia e matéria-prima. As quedas dos custos de produção foram traduzidas como sendo resultado da melhoria do desempenho de algum desses ingredientes do processo.

As informações foram condensadas em tabelas que demonstram o tipo de equipamento ou conjunto de equipamentos sujeitos a economias de escala, bem como a fonte causadora desse melhor rendimento. Os diferentes processos siderúrgicos foram agrupados tendo em vista o grau de afinidade que existe entre as suas operações.

3.2.1. Sinterização e coqueificação

Foram obtidas diversas informações relevantes sobre as economias de escala nas operações de sinterização e coqueificação, as quais contribuíram para a elaboração do quadro abaixo. Os dados presentes nessa tabela indicam quais os tipos de insumos que são mais bem aproveitados com a expansão da capacidade, bem como as fontes de economias de escala que estão por trás desse melhor resultado econômico.

QUADRO 3.2.1.1: Fontes de economias de escala nas operações de coqueificação e sinterização.

Equipamentos		Fontes de Economias de Escala		
		Indivisibilidades	Economias Geométricas	Efeito de Aprendizagem
Conjunto da Sinterização		Mão-de-obra	Energia	
Coqueificação	Conjunto da Coqueificação	Capital e Mão-de-obra	Capital e energia	Capital, energia e mão-de-obra
	Planta de Carboquímicos		Capital	

Fonte: Entrevista com os Engenheiros Eduardo Maurell Lobo Pereira e Ivanir Torres de Lima (COSIPA).

No processo de sinterização foram identificados ganhos relacionados a duas fontes características de economias de escala: indivisibilidades técnicas e economias geométricas. Para o caso das indivisibilidades técnicas, o destaque fica por conta do menor uso de mão-de-obra. Segundo informações obtidas em entrevista junto à área técnica da superintendência de redução da COSIPA³⁵, elevando-se o patamar de produção em uma taxa de 50%, a contrapartida seria uma queda da ordem de 20 a 30% da necessidade de mão-de-obra por unidade de produto. Os motivos concentram-se nos tipos de funções desempenhadas por esses funcionários, que independem da escala de produção. O Eng. Ivanir Torres de Lima, da área de suporte técnico dessa mesma empresa, explica que “uma máquina de sínter trabalha com um único operário na sala de controle e mais 6 na produção. Quando se aumenta o tamanho da instalação, este número praticamente não se altera, tendo dessa forma um ganho intrínseco no custo de mão-de-obra”.

As economias geométricas manifestam-se no conjunto da sinterização através da atenuação do consumo de energia elétrica. Quanto maior o tamanho das máquinas e dos equipamentos, menor deve ser o consumo de energia elétrica, excetuando-se os momentos de partida da linha, em que considerável montante de tempo e recursos são gastos.

Passando para as instalações de coqueificação, economias de escala advindas de indivisibilidades técnicas, de economias geométricas e de efeitos de aprendizagem são

³⁵ Esta seção se beneficiou imensamente de entrevistas com os engenheiros Eduardo Maurell Lobo Pereira e Ivanir Torres de Lima e de visitas guiadas à usina José Bonifácio, da Cosipa, em Cubatão (SP).

aparentes. A existência de indivisibilidades técnicas manifesta-se pela melhor utilização da mão-de-obra e do capital investido. Certas partes do conjunto de coqueificação, como os sistemas automatizados, apresentam especificações menos rígidas e independem do *output* da instalação. Isto significa dizer que para uma variação não abrupta da capacidade da planta, os custos que foram imobilizados podem ser pagos mais facilmente através de escalas maiores. O mesmo vale para a mão-de-obra utilizada, cuja aplicação na linha de produção não é diretamente proporcional ao volume produzido.

No caso específico das economias geométricas, quedas no consumo padrão de energia e capital acompanham o aumento de tamanho das baterias de coqueificação. Como a capacidade de produção da bateria de coqueificação aumenta na proporção do volume e o capital investido depende da área superficial da câmara, maiores fornos tornam-se mais econômicos. Além disso, é reconhecido que os fornos maiores têm a perda de calor minimizada.

Para a planta de carboquímicos, economias de capital surgem no momento da sua instalação. Como são formadas integralmente por recipientes com a função de armazenamento e de transporte de gases, economias geométricas vêm a surgir, amparadas pela regra dos dois terços.

Efeitos de aprendizagem também desempenham um papel de destaque nas baterias de coqueificação, tendo importante papel na função de normalização da produção. Segundo informações colhidas na visita, a capacidade operacional da linha sofre saltos superiores a 20% conforme os funcionários aperfeiçoam seus conhecimentos específicos sobre o processo e as instalações envolvidas. Capital, mão-de-obra e energia deixam de penalizar o custo de produção, uma vez que o corpo técnico responsável vêm a adquirir um denso conhecimento sobre os parâmetros do processo.

Evidências da existência de economias de escala nas instalações de coqueificação também são encontradas na literatura. Segundo Ameling *et alii* (1998), “fornos de maior capacidade apresentam as seguintes vantagens: menores custos específicos de investimento, menores custos específicos de operação, menor espaço físico e menor perda de calor”. Conseqüentemente, economias de capital, energia e

mão-de-obra cercam a elevação do patamar de produção, proporcionando rendimentos crescentes de escala.

3.2.2. Altos-Fornos

Continuando a analisar as fontes de economias de escala, chegou a vez de tratar das diferentes partes que compõem os altos-fornos. Através do quadro 3.2.2.1 pode-se ver que as economias de escala são geradas por três tipos de fontes, indivisibilidades técnicas, economias geométricas e efeitos de aprendizagem.

QUADRO 3.2.2.1: Fontes de economias de escala nos altos-fornos.

Equipamentos		Fontes de Economias de Escala		
		Indivisibilidades	Economias Geométricas	Efeito de Aprendizagem
Alto-Forno	Silos e sistema de transporte		Capital e energia	
	Alto-forno	Mão-de-obra	Capital, energia e matéria-prima	Capital, energia, mão-de-obra e matéria-prima
	Regeneradores	Energia		

Fonte: Entrevista com os Engs. Eduardo Maurell Lobo Pereira e Ivanir Torres de Lima (COSIPA).

As indivisibilidades técnicas podem gerar ganhos de mão-de-obra e de energia. No caso da mão-de-obra, o melhor rendimento é motivado pelo aproveitamento mais intenso dos postos de trabalho fixos. Os ganhos de energia, por sua vez, estão localizados nos regeneradores. Como não é possível operar um único equipamento de grandes dimensões e é preciso ter, no mínimo, 3 regeneradores ligados ao alto-forno para que o suprimento de ar quente seja mantido continuamente, indivisibilidades técnicas passam a surgir da tentativa de aproveitar ao máximo a energia armazenada nos empilhamentos de tijolos refratários.

É prática comum adicionar um quarto regenerador para elevar a temperatura de sopro, criando um sopro paralelo que aproveita mais intensamente o calor armazenado nos empilhamentos de cerâmica deste equipamento. Caso exista disponibilidade de recursos, um regenerador adicional levará a redução do *coke rate*, fornecendo gases a temperaturas ultra-elevadas (superior a 1300°C).

As economias geométricas atuam em quase todo o conjunto do alto-forno, sendo os silos de armazenamento, os sistemas de transporte e o corpo do alto-forno os casos onde os ganhos de escala são mais relevantes. Economias de matéria-prima, energia e capital são os resultados do aumento da escala de produção dessas instalações.

No sistema reservado à movimentação de gases e subprodutos, como o pó de alto-forno, ganhos expressivos de capital são motivados, principalmente, pelas características geométricas das instalações, que são compatíveis com a regra dos dois terços. Situação semelhante acontece para a casa dos silos, já que a capacidade de armazenagem aumenta mais rapidamente que os custos de instalação. Já no caso das esteiras de alimentação, onde os ingredientes que compõem a carga do alto-forno são despejados, melhores rendimentos da energia elétrica empregada passam a surgir da redução do consumo de energia em motores maiores.

As economias geométricas que incidem sobre o corpo do alto-forno estão presentes nos ganhos de capital, de matéria-prima e de energia que acontecem no momento da sua construção ou depois, quando da sua operação. Três motivos principais contribuem para a redução do custo unitário em altos-fornos de maior capacidade: (1) a evolução mais rápida do volume interno em comparação com a área superficial, como é defendida pela regra dos dois terços, o que reduz o investimento por m^3 interno do forno; (2) menor consumo de refratário; (3) melhor rendimento energético, devido à menor dissipação de energia.

Com relação à regra dos dois terços, como já foi comentado, é uma regra muito difundida entre os engenheiros e aplicada à exaustão para o projeto de novos equipamentos que têm como limitador de capacidade o volume interno de um vaso. Investimentos por m^3 progressivamente inferiores acompanham o estabelecimento de altos-fornos maiores. Scherer e Ross (1990), ao analisarem o funcionamento dos altos-fornos, sustentam que a quantidade produzida tende, até certos limites físicos, a ser proporcional ao volume da unidade, enquanto o total de materiais e esforços de fabricação, que incluem os custos de investimentos, utilizados para a sua construção, dependem da superfície externa do vaso.

O consumo de matéria-prima, mais precisamente o consumo de refratários na casa de corrida, segue a mesma tendência de redução com a expansão da escala de produção. Para deixar sair o gusa líquido, é aberto um furo de corrida de 40 a 80 mm de

diâmetro com uma perfuratriz ou com uma lança de oxigênio. Depois do vazamento, o furo de corrida é novamente fechado com uma mistura, cuja composição básica inclui argila, quartzito e algum ligante. Para altos-fornos maiores, o consumo dessa mistura permanece comparativamente inferior, apresentando um custo por tonelada de gusa inferior. Outros insumos importantes que estão sujeitos a economias de escala são os refratários que revestem o interior dos fornos, já que a produção destes equipamentos depende do volume interno e o consumo de refratários depende da área superficial. Fornos com um grande volume interno têm um custo de instalação menor, o que se reflete em um melhor rendimento econômico do capital empregado.

Por último, existe o melhor rendimento energético associado a menor dissipação de calor das grandes instalações. A menor área de contato com o ambiente externo propicia uma queda no consumo de coque³⁶. Como os gastos associados ao consumo de coque constituem uma parte expressiva do custo de produção, este é um ponto particularmente relevante.

Além desses pontos destacados pelo Eng. Pereira, outras características também contribuem para o aumento de produtividade dos grandes altos-fornos. Como é tratado por Araujo (1997), o acréscimo da pressão interna de operação dos altos-fornos possibilita que o tempo de contato entre os gases e a carga prolongue-se, provocando uma melhor distribuição dos gases e conseqüentemente, um melhor rendimento das reações de redução do minério de ferro. Com isso, um menor consumo de coque pode vir a acontecer, motivando quedas expressivas no custo de produção, já que é um insumo de grande valor.

Um levantamento realizado por Tarr (1977) em quatro altos-fornos da *Kawasaki Steel Corporation*, com volumes internos na faixa de 2.004 m³ a 4.197 m³, mostra dados relevantes a respeito da pressão interna de operação e do *coke rate*. Com está no quadro 3.2.2.2, fica perceptível a redução do consumo específico de coque por tonelada de ferro primário em função do aumento do tamanho interno dos altos-fornos. As características geométricas das instalações contribuíram para uma queda do *coke rate*.

³⁶ Queda no consumo de outro combustível que venha a ser utilizado em paralelo também acontece, como no caso da COSIPA, que emprega gás natural em seus altos-fornos

QUADRO 3.2.2.2: Dados operacionais de quatro altos-fornos de diferentes diâmetros internos.

	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2	Alto-Forno 3	Alto-Forno 4
Diâmetro Interno (m)	9,8	11,2	11,8	13,8
Volume Interno (m³)	2004	2626	3016	4197
Pressão Interna (kg/cm²)	2,24	2,61	2,93	3,61
Coke Rate (kg/tonelada)	469	469	465	437

Fonte: Tarr, 1977.

No cenário nacional, a produtividade dos altos-fornos brasileiros comportou-se de forma semelhante, obtendo-se ganhos conforme a capacidade era expandida. Soares (1987) destacou a excelente performance do alto-forno número 1 da CST, atualmente o maior do Brasil e um dos dez maiores existentes no mundo, com uma capacidade de produção próxima a 3,5 milhões de toneladas por ano. Informações mais detalhadas sobre os altos-fornos nacionais seguem no quadro abaixo.

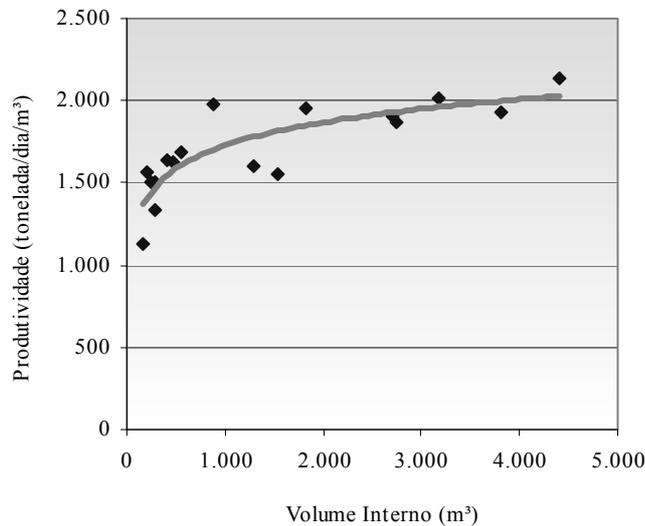
QUADRO 3.2.2.3: Principais características dos altos-fornos brasileiros a coque.

Usina	Alto-Forno	Volume Interno (m³)	Capacidade (10³tonelada/ano)	Produtividade (tonelada/dia/m³)
Ferro-Brasileiro	3	172	70	1,13
Belgo-Mineira	1 a 3	214	120	1,56
Aliperti	2	240	130	1,50
Barão de Cocais	2	290	140	1,34
Acesita	1	296	160	1,50
Belgo-Mineira	5	406	240	1,64
Mannesmann	1	478	280	1,63
Acesita	2	558	340	1,69
Usiminas	1 e 2	885	630	1,98
CSN	1	1301	750	1,60
CSN	2	1527	850	1,55
Cosipa	1	1820	1280	1,95
Usiminas	3	2700	1850	1,90
Açominas	1	2749	1850	1,87
Cosipa	2	3180	2300	2,01
CSN	3	3815	2650	1,93
CST	1	4415	3400	2,14

Fonte: Soares, 1987.

Nota: Os Altos-Fornos das Usinas Ferro-Brasileiro, Belgo Mineira (1 a 3) e Aliperti já foram descontinuados.

O quadro 3.2.2.3, retratando as economias de escala nos altos-fornos da siderurgia brasileira, comprova a tendência marcante de melhor rendimento das grandes instalações³⁷, assim como a figura 3.2.2.1.



Fonte: Soares, 1987.

FIGURA 3.2.2.1: Economias de escala nos altos-fornos nacionais.

A partir destas informações, é possível mensurar que quando o volume interno dos altos-fornos passa de 1000 m³ para 4000 m³, a produtividade tende a crescer em aproximadamente 16%. Esse aumento da produtividade em termos físicos se soma à redução do custo de investimento por unidade de capacidade instalada para gerar uma produtividade do capital em termos monetários ainda mais ascendente.

O aumento das escalas de produção dos altos-fornos ajuda também a, minimizar os custos associados à disponibilização das matérias-primas. Segundo Gold (1974), “os problemas de logística interna da planta são substancialmente simplificados por ter menos altos-fornos (...) as plantas para a produção de aço requerem uma complexa rede de esteiras transportadoras e outras instalações de transporte para mover grandes quantidades de materiais e gases a partir dos leitos de minérios, plantas de sinterização e baterias de coque para cada alto-forno e, deste ponto, para as etapas subseqüentes”.

³⁷ A curva ajustada aos dados efetivos de produtividade dos altos-fornos não correspondem rigorosamente à contrapartida das curvas teóricas de retornos crescentes de escala. As curvas teóricas são traçadas para uma tecnologia dada, isto é, representam os níveis de custo de operações com escalas diferentes mas tecnologias iguais. Naturalmente, dados concretos não obedecem essa restrição, referindo-se a equipamentos com “tecnologias” distintas entre si. Isso explica porque alguns altos-fornos de porte modesto – como os da Usiminas – apresentam muito bom desempenho.

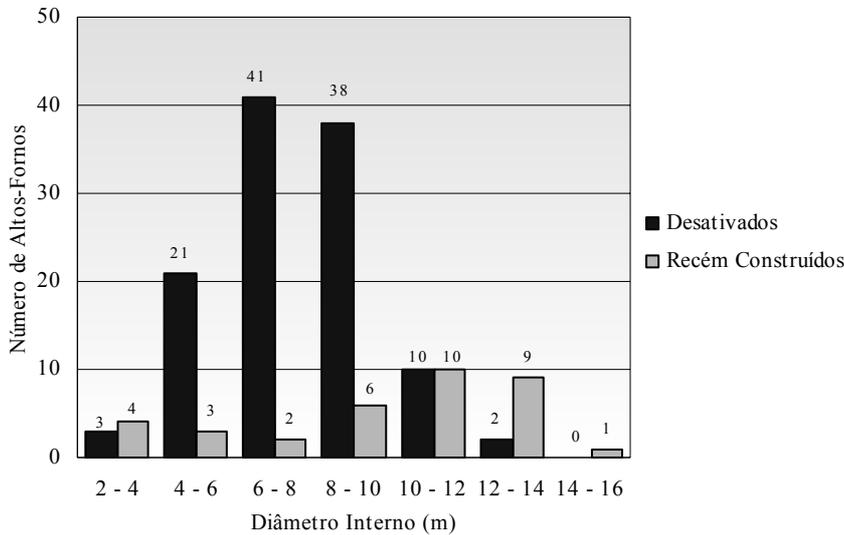
O processamento siderúrgico exige que sejam percorridas grandes distâncias para que as matérias-primas cheguem ao alto-forno. Essas distâncias, entretanto, poderiam ser muito superiores e apresentar um complexo gerenciamento se, ao invés de um único alto-forno, existissem outros de menor tamanho. Nesse caso, mais esteiras transportadoras, tubulações, entre outros equipamentos, teriam que ser adquiridos sem a contrapartida da elevação do patamar de produção.

As economias de escala na etapa de redução também podem advir dos efeitos de aprendizagem. Nos altos-fornos, assim como no caso das instalações de coqueificação, o início de operação não acontece de forma perfeita, havendo acréscimos contínuos de produtividade conforme a produção torna-se mais conhecida e mais adaptada aos seus funcionários. Para o processo de pesagem, a capacitação técnica do quadro de funcionários tem influência decisiva sobre o consumo de matéria-prima. Empresas que querem situar-se favoravelmente no mercado de produtos siderúrgicos devem manter corpo técnico especializado para compor as cargas adequadamente, a fim de gerar um produto de melhor qualidade e formar uma escória de fluidez adequada. Isto, porque um dos princípios fundamentais do funcionamento dos altos-fornos é a composição das suas cargas com quantidades adequadas de minério de ferro (Fe_2O_3), coque e fundentes. Deve existir uma mensuração correta da proporção dos ingredientes a serem colocados no alto-forno para que a formação do gusa ocorra em um “ambiente perfeito”, onde os parâmetros de operação sejam atendidos.

A tarefa de distribuir a carga no interior do alto-forno constitui mais uma operação que está sujeita aos efeitos de aprendizagem. As instalações mais modernas utilizam um sistema chamado “calha rotativa”, que permite grande flexibilidade no direcionamento da carga no interior do forno. Como se viu no capítulo 2, a alta produtividade do alto-forno depende de uma “permeabilidade adequada” dos componentes a serem depositados no leito do forno.

Todos os fatores geradores de economias de escala nos altos-fornos que foram vistos, ajudam a explicar a tendência contínua de substituição de altos-fornos menores por novos de maior tamanho. No plano mundial, entre os anos de 1985 e 1995, 115 altos-fornos com uma capacidade de 75,2 milhões de toneladas por ano foram fechados, enquanto 34 novos foram construídos, adicionando uma capacidade de 56,4 milhões de toneladas por ano. Isso significa que foram substituídos altos-fornos com porte médio

de 650 mil toneladas por outros em torno de 1,7 milhões de toneladas por ano (Hille *et alii*, 1997).



Fonte: Hille *et alii*, 1997.

FIGURA 3.2.2.2: Número de altos-fornos desativados e recém construídos no mundo entre os anos 1985 e 1995, segundo o diâmetro interno das instalações.

3.2.3. Refino e lingotamento do aço

Como foi explicado anteriormente, o processo de refino do aço líquido é dividido em dois estágios, primário e secundário, contando com diversos equipamentos para executar funções distintas. Por esse motivo, a análise das fontes de economias de escala será feita para aqueles equipamentos de refino com uso amplo na siderurgia nacional, sendo eles: conversores LD, forno panela, RH, estação de borbulhamento de argônio e AHF. Os efeitos do aumento da escala de produção para o lingotamento contínuo convencional também serão estudados.

QUADRO 3.2.3.1: Fontes de economias de escala nas operações de refino, e no processo de solidificação do aço.

Equipamentos	Fontes de Economias de Escala		
	Indivisibilidades	Economias Geométricas	Ganhos de Especialização
Conversor LD	Capital, energia e mão-de-obra	Matéria-prima, capital e energia	
Forno Panela, RH, EBA e AHF	Capital e mão-de-obra		Capital e energia
Lingotamento Contínuo	Capital, energia e mão-de-obra	Matéria-prima, capital e energia	

Fonte: Entrevista com os Engs. Danilo di Napoli Guzela e Antonio Malynowskyj.

Iniciando com o refino primário, o rendimento superior das instalações de maior porte provém de duas fontes características de economias de escala: as indivisibilidades técnicas e as economias geométricas. No primeiro caso, como foi confirmado pelo Eng. Antonio Malynowskyj³⁸, algumas operações acontecem independentemente da capacidade de processamento do conversor, mais especificamente, as tarefas de amostragem e de análise laboratorial do metal. A execução dessas tarefas envolve um tempo fixo que não está relacionado à escala de produção, seja no processo automático, via sub-lança, ou manual. Como regra básica, quanto maior o nível de produção, menor será o peso dessas operações sob o custo final de produção.

Outro tipo de indivisibilidade técnica evidenciada durante a visita corresponde ao *staff* fixo e especializado para a manutenção da linha e acompanhamento técnico da produção. A sólida formação desses funcionários permite que o processo de refino tenha prosseguimento, mas, ao mesmo tempo, transmite uma parcela de custos fixos que perdurarão independentemente do patamar de produção.

A logística interna de transportes é mais uma indivisibilidade técnica que exerce grande influência sobre o dimensionamento dos conversores LD, tendo sido mencionada, com atenção, pelo Eng. Malynowskyj. Ao operar maiores equipamentos, ao invés de outros menores e em maior número, o tempo de espera para a entrada de novas cargas pode ser abatido, proporcionando reduções no consumo de energia. Além

³⁸ Esta seção se beneficiou imensamente de entrevistas com os engenheiros Danilo di Napoli Guzela e Antonio Malynowskyj e de visitas guiadas à usina José Bonifácio, da Cosipa, em Cubatão (SP).

do mais, o custo do investimento é abatido consideravelmente, devido à maior simplicidade das instalações e dos equipamentos de transporte.

Por fim, uma importante indivisibilidade técnica tem origem nas operações de carga e de descarga do metal, que provoca ao conversor LD uma ociosidade cíclica no conversor. Reduzir o impacto destes instantes em que o equipamento está sendo basculado, significa aproveitar ao máximo o tempo útil, gerando ganhos de produtividade. No quadro 3.2.3.2 estão os tempos médios dos ciclos de operação do conversor LD.

QUADRO 3.2.3.2: Tempo médio dos ciclos de operação do conversor LD.

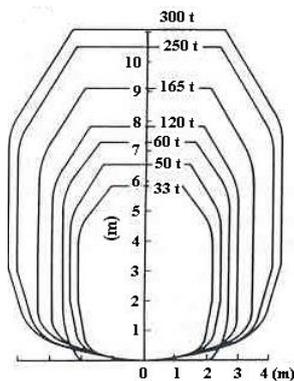
Operação	Tempo médio (minutos)
Carga	5
Sopro	14
Fim do Sopro e Vazamento	6
Vazamento	5,5
Retirada da Escória	2,5

Fonte: Araujo, 1997.

Dessa forma, uma maneira perseguida pelas empresas para melhorar o nível de produção sempre foi elevar a capacidade dos conversores. Contudo, devido à dificuldade em viabilizar um contato adequado entre a carga do metal e o fluxo de oxigênio que é ejetado da lança, essa meta foi adiada por um certo tempo, até o advento da introdução de lanças especiais. Wallner e Fritz (2002) afirmam que as lanças com uma quantidade de 3 a 6 furos no bocal de sopro permitem manter uma injeção adequada de oxigênio, independentemente do tamanho do conversor.

Embora as indivisibilidades técnicas tenham um papel importante na formação do custo de produção, as economias geométricas exercem maior influência e proporcionam maiores ganhos quando exploradas intensamente. A primeira razão para o melhor rendimento dos conversores LD de grande capacidade está relacionada às economias de capital, que como em outras etapas do processo siderúrgico, brotam da regra dos dois terços.

Como no caso dos altos-fornos, a quantidade de materiais e esforços que são empenhados na sua construção, eleva-se na proporção da área superficial, enquanto que a capacidade de produção vem a ser proporcional ao volume interno do recipiente. Logo, ao aumentar o volume interno do conversor, o custo de instalação por unidade de capacidade instalada assume uma trajetória descendente.



Fonte: Stein-Versen, 1992.

FIGURA 3.2.3.1: Desenvolvimento do tamanho e do formato do conversor LD.

O melhor rendimento metálico que acompanha a elevação de capacidade dos conversores é a razão pela qual economias de energia e de matéria-prima são alcançadas. Como foi explicado pelo Eng. Malynowskyj, o rendimento metálico superior acontece por causa da menor incidência de projeções de metal líquido para fora em conversores de volume interno maior, que contêm de forma mais satisfatória a carga que é arrastada pelo sopro. Além disso, por permitir uma proporção mais elevada de carga sólida na mistura, o desempenho do equipamento pode ser impulsionado, reduzindo o tempo de trabalho e elevando sua produtividade.

No caso das estações de refino secundário, economias de escala também surgem de algumas indivisibilidades técnicas, levando a reduções no consumo de capital e de mão-de-obra. Certas operações, como análise laboratorial, e a existência de um *staff* especializado, fazem inserir uma parcela indivisível de custos sobre o produto.

Uma fonte distinta de economia de escala que atua no refino secundário é a economia de especialização. Esses ganhos surgem da instalação de unidades dedicadas à execução de tarefas particulares, como é o caso do forno-panela. A elevação das escala

de produção viabiliza o emprego de mão-de-obra e máquinas especializadas, fonte dos melhores índices de produtividades (Pratten, 1991).

No passado, as operações de refino eram realizadas em um único recipiente, mas com o passar do tempo, uma tendência à especialização levou ao aparecimento de instalações específicas para cada tipo de tratamento, deixando para o conversor LD a função principal de promover a descarburização. Com isso, menos investimentos tornaram-se necessários, já que a disponibilidade dos equipamentos foi incrementada pelo melhor rendimento operacional. Em adição, o consumo de energia também foi diminuído, já que o tempo de permanência do metal líquido na estação de trabalho é inferior.

Passando para o estágio de lingotamento contínuo, indivisibilidades técnicas têm papel importante como fontes de economias de escala, reduzindo os gastos relacionados a capital, energia e mão-de-obra. O grande aparato tecnológico que foi desenvolvido para aprimorar o controle técnico fez aumentar a incidência de custos fixos, que já eram elevados. Esta é uma tendência irremediável, já que as vantagens da automação incluem entre outras, melhoria na eficiência do equipamento, melhoria na produção horária e redução nas perdas metálicas (Mourão *et alii*, 2003).

As indivisibilidades técnicas presentes na máquina de lingotamento contínuo são tamanhas que o equipamento pode ser melhor aproveitado com a implantação de dois ou mais leitos de solidificação do aço. Segundo o Eng. Malynowskyj, os rendimentos são tão intensos, que atualmente as novas plantas de lingotamento contínuo não deixam de empregar dois veios de solidificação em lugar de um único, usando outras partes do conjunto mais intensamente, como o distribuidor e o grande aparato de controle.

Economias advindas de grandes dimensões também contribuem para o incremento da produtividade nesse equipamento, minimizando o consumo de matéria-prima, energia e capital. Dois motivos principais estão por trás desse tipo de economia que acontece progressivamente com a expansão da capacidade. O primeiro deles está embutido na melhor qualidade dos lingotes, que geram menores perdas. Na verdade, isso não acontece necessariamente pela presença de meios mais eficientes de controle e sim pela simplificação do *layout* de produção, que facilita o acompanhamento da qualidade do produto e das eventualidades que acontecem no dia-a-dia de trabalho. É

mais simples monitorar a produção em único equipamento de lingotamento contínuo de grandes dimensões do que controlar o funcionamento de várias instalações menores.

Em segundo lugar, existe o transporte interno de materiais, que assim como acontece nas fases anteriores de refino do metal líquido, é favorecido pela adoção de máquinas maiores. Consideráveis abatimentos de custos são feitos nos novos investimentos em instalações dedicadas à manipulação de materiais. A simplificação das rotinas internas de gerenciamento dos recursos produtivos também favorecem o controle do aparato produtivo.

3.2.4. Laminação a quente

Durante o processo de laminação a quente existem duas fontes principais de economias de escala, as indivisibilidades técnicas e as economias de tamanho, embora os efeitos de aprendizagem também tragam ganhos de produtividade, só que em menor medida. Da instalação de laminação a quente, duas partes mostraram-se mais sujeitas aos rendimentos crescentes de escala: fornos de aquecimento e laminadores esboçadores em associação com o trem acabador.

QUADRO 3.2.4.1: Fontes de economias de escala na laminação a quente.

Equipamentos	Fontes de Economias de Escala		
	Indivisibilidades	Economias de Geométricas	Efeitos de Aprendizagem
Fornos de Aquecimento	Capital, energia e mão-de-obra	Capital e energia	
Laminadores Esboçadores e Trem Acabador	Capital, energia e mão-de-obra	Capital e energia	
Conjunto do Laminador de Tiras a Quente			Mão-de-obra, matéria-prima, capital e energia

Fonte: Entrevista com o Eng. Roberto Gomes Collela³⁹.

As indivisibilidades técnicas atuam decisivamente gerando economias de capital, energia e mão-de-obra. Como a laminação a quente conta com serviços auxiliares, que incluem mão-de-obra especializada e instalações anexas, elevar o patamar de produção

³⁹ Esta seção se beneficiou imensamente de entrevistas com o engenheiro Roberto Gomes Collela e de visitas guiadas à usina José Bonifácio, da Cosipa, em Cubatão (SP).

significa aproveitar mais intensamente o capital reservado para sua construção e operação.

Uma indivisibilidade técnica que vem sendo explorada intensamente para melhor aproveitar os recursos consumidos na sua concepção diz respeito às unidades técnicas de automação. Com a adoção de rigorosos critérios de qualidade, a instalação de modernos equipamentos de controle tornou-se obrigatória. Como consequência, a elevação da capacidade de produção tornou-se indispensável para atender a ambos os critérios econômico e de qualidade.

Com relação a duas etapas da laminação de tiras a quente, o laminador esboçador e o trem acabador, indivisibilidades técnicas surgem no uso de alguns recursos, como mão-de-obra especializada e equipes prestadoras de serviços. Utilizando grandes unidades de laminação, os custos adicionais destes recursos podem ser amortizados mais facilmente.

Economias geométricas nos fornos de aquecimento também redundam em ganhos de capital e de energia. A economia de capital provém do menor custo de construção dos fornos de grande porte, amparado pela regra dos dois terços. Além disso, é melhor o rendimento energético das grandes instalações, que, conseguindo dissipar menos calor e acomodar maior quantidade de placas, melhoram sua produtividade.

Para os laminadores esboçadores e o trem acabador, o porte das instalações também é importante a fim de promover uma redução do consumo de energia e dos investimentos iniciais. Maiores pressões de passe e velocidades de laminação mais rápidas são conseguidas com a expansão da capacidade, proporcionando assim rendimentos crescentes de escala. Com relação aos postos de trabalho, reduções no consumo-padrão também são esperados, já que a quantidade de mão-de-obra varia em faixas estreitas.

Outra fonte de economias de escala dos laminadores de tiras e chapas a quente é o efeito de aprendizagem. Como não são todos os estágios da planta que têm um sistema automatizado para o controle da produção, muitas operações dependem da habilidade do operário. Conforme explicação do Eng. Collela, “o treinamento dos funcionários dessa divisão atinge períodos de até cinco anos, quando, então, os critérios de qualidade, produtividade e segurança estão em conformidade com o plano técnico”.

3.2.5. Laminação a frio

As informações colhidas com o Eng. Jackson Soares de Souza Reis da COSIPA⁴⁰ confirmaram a existência de propensões a economias de escala no laminador de tiras a frio, em especial nas cadeiras de laminação e nos fornos de recozimento. No quadro 3.2.5.1 estão apresentadas as fontes de economias de escala para essas duas etapas.

QUADRO 3.2.5.1: Fontes de economias de escala na laminação a frio.

Equipamentos	Fontes de Economias de Escala	
	Indivisibilidades	Economias geométricas
Cadeira de laminação	Capital e mão-de-obra	Capital e energia
Recozimento	Capital e mão-de-obra	Capital e energia

Fonte: Entrevista com o Eng. Jackson Soares de Souza Reis.

Iniciando com as indivisibilidades técnicas, os recursos capital e mão-de-obra podem ser melhor aproveitados com a expansão da capacidade. No caso da mão-de-obra, a sua necessidade praticamente não se altera com a quantidade produzida, existindo postos fixos de trabalho e equipes auxiliares para prestar assistência técnica.

Os ganhos de capital são pronunciados nas instalações de recozimento e nas cadeiras de laminação. As cadeiras de laminação, com seu grande número de parâmetros de controle, tiveram que ser cada vez mais automatizadas para atender aos rigorosos parâmetros de qualidade do mercado mundial⁴¹.

Economias geométricas também exercem um papel decisivo na obtenção de vantagens competitivas, especialmente nos fornos de recozimento e nas cadeiras de laminação. Ganhos de capital acontecem progressivamente para as plantas de maior tamanho, pois como foi dito pelo Eng. Jackson, “o investimento inicial por capacidade instalada é inferior, comparativamente, para as plantas maiores”. Outra vantagem reside

⁴⁰ Esta seção se beneficiou imensamente de entrevistas com o engenheiro Jackson Soares de Souza Reis e de visitas guiadas à usina José Bonifácio, da Cosipa, em Cubatão (SP).

⁴¹ Para demonstrar como a instalação de um laminador a frio exige pesados investimentos, uma empresa nacional, a Usiminas, que antecipou e implementou um audacioso Plano de Investimento e Modernização na Usina Intendente Câmara em Ipatinga, envolvendo praticamente todas as unidades produtivas, reservou a quantia de 439 milhões de dólares para a instalação de uma linha contínua de decapagem e laminação a frio, integrada a uma planta de recozimento contínuo (http://abmbrasil.locaweb.com.br/cim/download/Sergio_Leite_de_Andrade.doc).

na possibilidade de utilizar melhor a energia, já que “motores elétricos de corrente alternada, com maior potência, têm melhor rendimento operacional, redundando em menor consumo de eletricidade por tonelada produzida”.

No caso específico dos fornos de recozimento, um melhor aproveitamento da energia gasta para aquecer o metal pode surgir de unidades com maior número de “silos” e de produção mais uniforme. Para os fornos contínuos de grande porte, a energia utilizada para reaquecer o metal é ainda menor, sendo a perda de calor minimizada.

3.2.6. Processo Semi-Integrado

Como se viu no capítulo 2, a usina semi-integrada típica compreende uma aciaria elétrica com lingotamento contínuo convencional conjugado a uma unidade de laminação de aços longos. Nesta seção, são abordados justamente aqueles equipamentos empregados nessa configuração que atualmente não são encontrados comumente na “rota clássica”: os fornos elétricos a arco e as unidades de laminação de aços não planos.

QUADRO 3.2.6.1: Fontes de economias de escala nas etapas de fusão e solidificação das usinas semi-integradas.

Equipamentos	Fontes de Economias de Escala		
	Indivisibilidades	Economias de Geométricas	Ganhos de Especialização
Forno Elétrico	Capital e mão-de-obra	Capital, energia e matéria-prima	
Forno Panela	Capital e mão-de-obra		Capital e energia
Lingotamento Contínuo de Tarugos	Capital e mão-de-obra	Capital	

Fonte: Entrevista com o gerente de manutenção, Sr. Marcelino Vieira Lopes, e com o Eng. Assistente, Sr. Chafí Miguel Bara Júnior da Belgo-Mineira (Juiz de Fora, MG).

Iniciando a análise das economias de escala nos processos de fusão e solidificação do metal⁴², três fontes características são encontradas: indivisibilidades

⁴² Esta seção se beneficiou imensamente de entrevistas com Sr. Marcelino Vieira Lopes, e com o Eng. Assistente, Sr. Chafí Miguel Bara Júnior, além de visitas guiadas à usina da Belgo-Mineira em Juiz de Fora (MG).

técnicas, economias de tamanho e ganhos de especialização. As indivisibilidades técnicas atuam em todas as etapas, gerando ganhos de capital e mão-de-obra.

Mencionando os ganhos de mão-de-obra provocados pelas indivisibilidades, a principal razão para os melhores rendimentos encontra-se nos muitos postos de trabalho fixos e nas equipes auxiliares, que independem do nível de produção. Além disso, algumas operações, como a análise laboratorial do metal, são realizadas para qualquer *output* de produção, sendo por esse motivo, melhor amortizadas por plantas de capacidade superior. Para enxergar com mais clareza as fontes de economias de escala nas fases de fusão e solidificação de uma planta semi-integrada deve-se analisar o quadro 3.2.6.1.

Ainda com respeito às indivisibilidades técnicas, os ganhos de capital no forno elétrico, forno panela e lingotamento, decorrem principalmente do melhor aproveitamento de instalações auxiliares, como os sistemas de monitoração e controle da produção. Já que o caro aparato tecnológico instalado nos equipamentos para fornecer maior destreza nas operações de trabalho e para garantir melhores níveis de qualidade aos produtos é necessário a qualquer planta siderúrgica semi-integrada e faz parte do modo corrente de produção, aumentando-se a escala minimiza-se a incidência de seus custos fixos no preço final do produto.

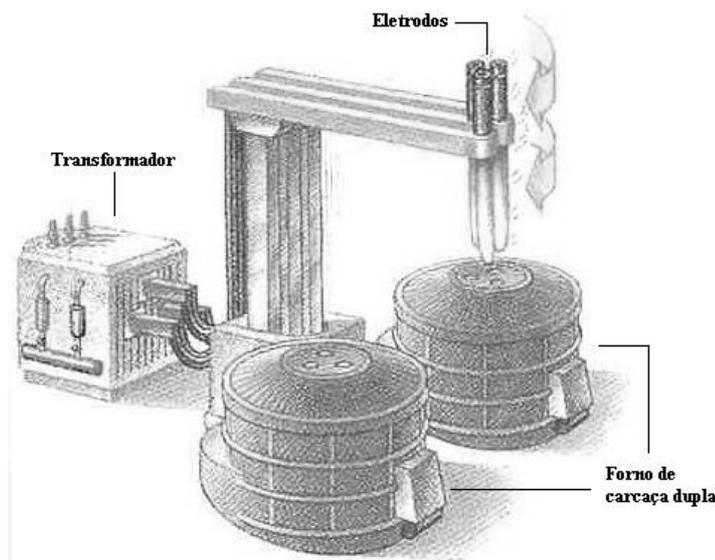
No caso específico dos fornos elétricos, o desenvolvimento de melhorias vêm motivando o aparecimento de economias de escala, associadas as indivisibilidades técnicas. Esse é o caso dos fornos de carcaça dupla e os fornos de carregamento contínuo, que conseguiram progredir na direção de diminuir o *power-off*. No quadro 26 foram agrupadas algumas informações sobre esses tipos de fornos.

QUADRO 3.2.6.2: Tipos de fornos elétricos a arco.

Tipo de Forno	Características
Forno a arco com uma única carcaça (<i>Single-Shell Furnace</i>)	Esse tipo de forno é carregado por cima e apresenta um baixo índice de utilização (<i>power – off</i>), com taxas de 70 a 75%. É empregado principalmente em corrente alternada, AC.
Forno a arco com duas carcaças (<i>Double-Shell Furnace</i>)	O forno de carcaça dupla é a resposta tecnológica à necessidade de aumentar a eficiência elétrica, reduzindo o tempo não produtivo (<i>power – off</i>). Utiliza-se corrente contínua.
Fornos de carregamento contínuo	Essa nova geração de fornos faz com que o processo aproxime-se de um modo contínuo de produção, tendo melhor aproveitamento técnico dos insumos de produção.

Fonte: Bascugli *et alii*, 1997.

No caso específico do forno de carcaça dupla, não é mais preciso esperar que o forno seja carregado para então o eletrodo começar a trabalhar. Enquanto o metal é fundido em uma carcaça, a outra é preenchida e pré-aquecida para, depois, ser processada. Bascugli *et alii* (1997) explica que isto resulta em uma redução de 6 a 10 minutos no *power-off* da instalação.



Fonte: Mourão *et alii*, 2003.

FIGURA 3.2.6.1: Forno de carcaça dupla.

Fenômeno semelhante acontece nos fornos de carregamento contínuo. Economias de escala são potencializadas pela melhor utilização de equipamentos como, eletrodos e transformadores. O fluxo não intermitente de sucata e fundentes, pré-aquecidos, proporciona um menor consumo de energia, já que o fluxo de gases cede calor à matéria-prima. No quadro 3.2.6.3 estão alguns dados técnicos dos diferentes tipos de fornos. A existência de ganhos de produtividade é sensível para as instalações mais modernas, em vista do menor consumo de energia e do melhor aproveitamento da capacidade instalada. Portanto, a trajetória tecnológica das instalações prosseguirá no sentido de melhor aproveitar as indivisibilidades técnicas do processo.

QUADRO 3.2.6.3: Informações técnicas de fornos elétricos a arco.

Tipo de Forno	Usina	Consumo de Energia (kWh/tonelada)	Consumo de Eletrodo (kg/tonelada)	Produção por ano (10 ³ x tonelada/ano)	Produtividade (tonelada / hora)
<i>Single - Shell</i>	L.M.E. (DC)	447	1,47	0,55	106
	Chaparral Stell (AC)	420	1,9	0,86	110
<i>Double - Shell</i>	Arbed	401	—	1,4	—
Carregamento Contínuo	Nakornthai (AC)	340	1,7	1,5	229

Fonte: *Adaptado de Bascugli et alii, 1997.*

Há também importantes economias geométricas. Economias de capital são progressivamente maiores para a aciaria elétrica, amparadas pela regra dos dois terços, que torna o forno elétrico e o forno panela mais econômicos para grandes dimensões. Há também ganhos expressivos de matéria-prima associados a economias geométricas. O melhor rendimento de matéria-prima é uma consequência da redução do consumo de refratários. Como o consumo deste material é uma função da área superficial, a evolução mais intensa do volume interno faz com que sua participação no custo de produção seja sucessivamente reduzida.

Durante a etapa de fusão da sucata no forno elétrico, reduções no consumo de energia também podem vir a acontecer. Maiores transformadores permitem elevar o patamar de produção, melhorando a produtividade da instalação através de reduções de grande monta no consumo de energia elétrica por tonelada de material processado.

Outro tipo de economia de escala que acontece no processo de refino do metal líquido são os ganhos associados à especialização das tarefas de produção. Como no caso das usinas siderúrgicas integradas, a instalação de fornos panelas vem a aumentar a disponibilidade dos equipamentos a montante, tornando os investimentos em novas instalações de refino secundário mais atraentes. O Eng. Chafi Miguel Bara Júnior comenta que o tempo necessário para que o capital gasto na construção do forno panela seja recuperado deixa de ser um obstáculo, em vista dos benefícios resultantes da sua instalação.

Durante a laminação de aços longos, indivisibilidades técnicas, economias geométricas, técnicas superiores para organizar a produção e ganhos da especialização atuam como fontes geradoras de economias de escala (quadro 3.2.6.4). Para as

indivisibilidades técnicas, assim como acontece na aciaria elétrica, seus ganhos estão associados ao melhor aproveitamento dos sistemas de automatização da produção e das despesas destinadas a manutenção de equipes especializadas ao monitoramento e ao diagnóstico de falhas especiais de processo⁴³.

QUADRO 3.2.6.4: Fontes de economias de escala na etapa de laminação das usinas semi-integradas.

Equipamentos	Fontes de Economias de Escala			
	Indivisibilidades	Economias Geométricas	Técnicas superiores para organizar a produção	Ganhos de Especialização
Forno Reaquecimento	Capital e mão-de-obra	Capital e energia		
Tratamento Térmico				Capital, energia, mão-de-obra e matéria-prima
Laminador Desbastador e Acabador	Capital e mão-de-obra	Capital e energia		
Conjunto da Laminação de Aços Longos			Capital, energia, mão-de-obra e matéria-prima	

Fonte: Entrevista com o analista de processos, Sr. Alfredo Pires Martins.

Outro ponto de destaque na incorporação de ganhos crescentes de escala é o sistema interno de transporte de vergalhões, barras e fio-máquina, via pontes rolantes e empilhadeiras para o estoque ou a expedição. Com o aumento da escala de produção, custos fixos específicos são diluídos em uma maior quantidade de produto.

Por meio das economias de geométricas existentes no forno de reaquecimento e no laminador desbastador e acabador, reduções no consumo de energia e de capital acontecem. O melhor rendimento energético, no caso dos fornos de reaquecimento, tem origem no invólucro do forno, que leva a um custo de instalação inferior e uma menor dissipação de calor durante o seu funcionamento. As economias alcançadas no laminador desbastador e acabador, por sua vez, provêm do melhor rendimento energético das instalações elétricas e do melhor aproveitamento de capital, decrescente em função do aumento da capacidade de processamento.

⁴³ Embora seja um processo mais simples, demandando menores investimentos, esse tipo de instalação é ainda considerado como sendo intensivo em capital. Prova do elevado custo de aquisição de uma linha de laminação de aços longos é o preço pago pela Açominas por um novo laminador de fio-máquina, um investimento de US\$ 76 milhões, com capacidade de produção anual de 550 mil toneladas (<http://www.relatoriogerdau.com.br/investimentos.html>).

Uma fonte distinta de economia de escala que está presente na laminação de aços longos corresponde às técnicas superiores de organização da produção. De acordo o Sr. Alfredo Pires Martins, a empresa Belgo-Mineira vem buscando melhores condições de programação da produção junto aos seus clientes e as plantas industriais, para que o tempo de *set-up* seja cada vez menos relevante. Seguindo o raciocínio básico de que quanto maior a produção, mais tempo as máquinas poderão operar com a mesma regulagem, os custos associados à perda de tempo no reinício da produção devem ser minimizados.

Por último, estão os ganhos auferidos com o tratamento térmico do aço na unidade de laminação. A especialização dessa tarefa pela empresa Belgo-Mineira trouxe resultados de custo positivos para a etapa de refino secundário da aciaria. Ao instalar uma estação de trabalho para o tratamento térmico do metal conformado, menor quantidade de vanádio e níquel, entre outros elementos de ligas, tem que ser acrescentadas ao banho no forno panela, aumentando também, a sua disponibilidade. É de se esperar, dessa forma, que quanto maior a utilização de máquinas dedicadas ao tratamento térmico, melhores sejam os índices de produtividade do forno panela.

Capítulo 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da seção 3.2 foram apresentadas as fontes de economias de escala para ambas as rotas tecnológicas de produção de aço. Economias de capital, mão-de-obra, energia e matéria-prima estão presentes tanto para as usinas integradas quanto para as usinas semi-integradas, tendo origem, principalmente, em indivisibilidades técnicas e em economias geométricas, ainda que sejam significativos também os efeitos de aprendizagem e os ganhos derivados do aproveitamento do maior potencial para especialização.

A tendência atual de introdução de novos dispositivos microeletrônicos para aperfeiçoar o controle do processo, promovendo a racionalização de determinados recursos produtivos e a flexibilização parcial da produção, como nas atividades de laminação, também funciona como um elemento gerador de economias de escala. A difusão de novas tecnologias vem contribuindo para a elevação do aporte de capital, e, nesse sentido, a dissertação colheu evidências em favor da argumentação de Alcorta (1994), crítica em relação aos impactos de *downscaling* associados à difusão das tecnologias digitais.

Tanto as operações de redução quanto às de refino e de conformação do metal desfrutam de retornos crescentes em capital, mão-de-obra, energia e matéria-prima. Um resumo das informações obtidas está reunido no quadro 4.1.

QUADRO 4.1: Fontes de economias de escala para a rota integrada, a alto-forno, de produção de aço.

Equipamentos		Indivisibilidades Técnicas	Economias Geométricas	Efeitos de Aprendizagem	Ganhos de Especialização
Conjunto da Sinterização		2	3		
Coqueificação	Conjunto da Coqueificação	1 e 2			
	Bateria de coqueificação	2	1, 2 e 3	1, 2 e 3	
	Planta de Carboquímicos		1		
Alto-Forno	Silos e sistema de transporte		1 e 3		
	Corpo do Alto-forno	4	1, 2 e 3	1, 2, 3 e 4	
	Regeneradores	3			
Conversor LD		1, 2, 3 e 4	1, 2 e 3		
Refino Secundário	Forno Panela, RH, EBA e AHF	1 e 2			1 e 3
Lingotamento Contínuo		1, 2, 3 e 4	1, 2 e 3		
Laminação a Quente	Fornos de Aquecimento	1, 2 e 3	1, 2 e 3		
	Laminadores Esboçadores e Trem Acabador	1, 2 e 3	1, 2 e 3		
	Conjunto do Laminador de Tiras a Quente			1, 2, 3 e 4	
Laminação a Frio	Cadeira de laminação	1 e 2	1 e 3		
	Recozimento	1 e 2	1 e 3		

Nota: (1) Capital; (2) Mão-de-obra; (3) Energia; (4) Matéria-Prima.

Dados apresentados por Ahlbrandt *et alii* (1996:36) indicam que o coque responde por 14% dos custos de produção de aço bruto na siderurgia integrada norte-americana. Ainda mais importante é o custo de capital, que chega a 26% do custo total mesmo quando estimado com base em parâmetros relativamente conservadores – depreciação em 12,5 anos e taxa de retorno anual de 8%. Por mais substantivos que sejam, esses números provavelmente subestimam a participação desses dois itens de custo no Brasil, onde o carvão é mais caro e o custo de capital, mais alto. Capital, carvão e energia elétrica – esta empregada mais intensamente nas etapas de laminação – são os itens fundamentais de custo na produção integrada que, de acordo com a discussão do capítulo 3, estão sujeitos a retornos de escala mais significativos. À importância desses elementos na estrutura de custos e entre os itens sujeitos a

economias de escala corresponde, por outro lado, a preponderância das etapas de redução – especialmente as coqueiras e, muito especialmente, os altos-fornos – e de laminação a quente de aços planos como focos dos retornos de escala na siderurgia. O aumento de 16% na produtividade física dos altos-fornos quando seu volume interno quadruplica de 1.000 m³ para 4.000 m³ é, como se viu, a evidência mais eloqüente, mas certamente não a única, dessa enorme propensão a economias de escala desse processo.

As economias de escala também foram analisadas para as usinas semi-integradas. As evidências colhidas pela pesquisa sugerem uma maior propensão a economias de escala técnicas neste processo do que sugere a literatura setorial.

As fontes de economias de escala encontradas incluem indivisibilidades técnicas, economias geométricas, economias de especialização e técnicas superiores para se organizar a produção. Assim como acontece nas usinas integradas, ganhos de capital, mão-de-obra, energia e matéria-prima proporcionam melhores índices de produtividade dos fatores de produção e rendimentos dos insumos.

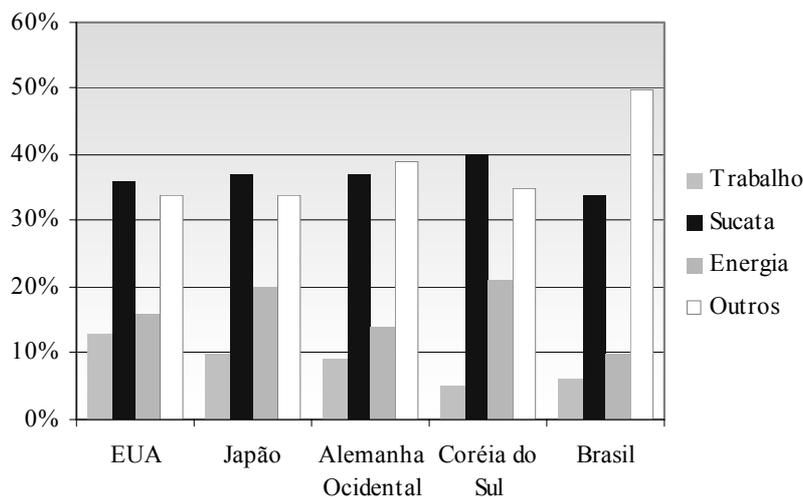
O quadro abaixo resume as informações a respeito dos retornos crescentes de escala na rota tecnológica semi-integrada. Para a etapa de fusão do aço pelo forno elétrico, por exemplo, os ganhos obtidos com o aumento de escala têm origem basicamente em indivisibilidades técnicas e economias geométricas. De acordo com as informações do quadro, é possível notar que o insumo sob maior influência das economias de escala é o capital, vindo a aparecer em todas as principais etapas do processo. Ainda com relação aos fornos elétricos, outro recurso que merece destaque é o suprimento de energia elétrica. Em vista do seu elevado custo de aquisição, instalações mais econômicas têm sido adotadas pelas usinas semi-integradas.

QUADRO 4.2: Fontes de economias de escala para a rota semi-integrada de produção de aço.

Equipamentos		Indivisibilidades Técnicas	Economias Geométricas	Ganhos de Especialização	Técnicas Superiores para se Organizar a Produção
Forno Elétrico		1 e 2	1, 3 e 4		
Forno Panela		1 e 2		1 e 3	
Lingotamento Contínuo		1 e 2	1		
Laminação	Forno de Reaquecimento	1 e 2	1 e 3		
	Tratamento Térmico			1, 2, 3 e 4	
	Laminador Desbastador e Acabador	1 e 2	1 e 3		
	Conjunto da Laminação de Aços Longos				1, 2, 3 e 4

Índice Nominativo: (1) Capital; (2) Mão-de-obra; (3) Energia; (4) Matéria-Prima.

O gráfico 4.1 foi elaborado com o objetivo de identificar os principais itens de custo, e assim ajudar a identificar as etapas do processo em que as economias de escala podem afetar mais significativamente a formação do custo total dos produtos. A categoria de custo “outros” envolve os gastos com depreciação, juros e outras contas secundárias.



Fonte: Barnett e Crandall (1986:26).

FIGURA 4.1: Distribuição do custo operacional das mini-usinas em alguns países⁴⁴.

⁴⁴ Embora os dados sejam antigos, ainda representam a verdadeiramente a distribuição do custo operacional nas mini-usinas.

Como se vê, mesmo nas usinas semi-integradas o custo de capital é muito significativo, superando quase sempre, até mesmo, o também elevado custo de energia. Nesse sentido, é importante para a eficiência dessas usinas explorar os ganhos de escala que suas tecnologias tradicionalmente oferecem.

Mais do que isso, há indícios de que os avanços tecnológicos recentes neste processo reforçam sua propensão a economias de escala. A adoção de técnicas de carregamento contínuo de sucata e a instalação de fornos de carcaça dupla vieram a incrementar os investimentos iniciais das plantas produtivas e a elevar os índices de produtividade (quadro 3.2.6.3).

Como resultado, os parâmetros do processo sofreram melhoras sensíveis, proporcionando menores gastos de energia, ciclos mais curtos de corrida e queda dos custos de operação. Evidência vigorosa dessas economias de escala na produção semi-integrada de planos é a redução de 24% no custo de produção quando se duplica de 400 mt/ano para 800 mt/ano a capacidade em usinas com esse perfil (Agarwal e Loreth, 1990).

Com tudo isso, a tendência parece ser que as escalas de novas usinas semi-integradas convirjam para o patamar das maiores usinas desse tipo atualmente existentes, isto é, algo em torno de 2 milhões de toneladas anuais (www.abmbrasil.com.br). Efetivamente, já existem exemplos de usinas semi-integradas desse porte, seja na produção de aços longos, a empresa *Northwestern Steel and Wire Co.* opera uma planta com capacidade instalada de 1,8 milhões de toneladas anuais, ou na produção de planos, como é o caso da *Trico Steel*, com capacidade instalada de 2,2 milhões de toneladas anuais (Barnett e Crandall (1986), Paula (1998)).

Toda a discussão precedente dá sustentação a hipótese de que a maior parte das usinas semi-integradas atualmente em operação não explora integralmente o potencial de economias de escala associado ao processo, sendo dimensionadas em escala sub-ótima. Por outro lado, não restam dúvidas de que neste processo a propensão a economias de escala é menor do que na produção integrada. Isso ocorre justamente porque as usinas semi-integradas dispensam as duas etapas mais intensivas em capital da rota clássica de produção: redução (altos-fornos) e laminação a quente. Nestes estágios do processo a obrigatoriedade de grandes escalas surge das economias

geométricas e das indivisibilidades técnicas no uso do capital, que implicam enormes escalas mínimas eficientes para toda a planta integrada.

De todo modo, inúmeros fatores geram retornos crescentes de escala no processo semi-integrado. Com um cenário de demanda mais dinâmico é de se esperar uma exploração mais ativa deste tipo de economia. Pinho (2001:190) argumenta que a existência de alguns mercados – definidos tanto em termos espaciais quanto de linhas de produtos – com dinamismo muito maior proporciona um quadro em que se pode antever uma expansão moderada do consumo global de aço durante a primeira década do século XXI. Wödlinger (1998:36) previa uma expansão do mercado mundial de aço a uma taxa de 1,8% ao ano, três vezes mais do que entre 1973 e 1997.

Portanto, o mais provável é que tenha continuidade a tendência prevaiente nos últimos anos: redução das escalas médias do setor siderúrgico, por conta da maior participação do processo semi-integrado, mas com aumento das escalas nesta tecnologia.

Referências Bibliográficas

ACS,-ZOLTAN-J. *Review of: Small Business Enterprise: An Economic Analysis.* **Journal-of-Economic-Literature**, v. 32, 4, pp. 1920-22, december, 1994.

ADAMS, W. & H. MUELLER. "The Steel Industry". In: ADAMS, W. **The Structure of American Industry**, New York: Macmillan, 1986.

AGARWAL, J.C. & LORETH, M.J. *Economic Analysis of Thin Section Casting.* **I&SM**, 39, november, 1990

AHLBRANDT, R.S. **The Renaissance of American Steel: lessons for managers in competitive industries.** New York: Oxford University Press, 1996.

ALCORTA, L. *The Impact of New Technologies on Scale in Manufacturing Industries: Issues and Evidence.* **World Development**, v. 22, n. 5, pp. 755-769, 1994.

AMELING, D. *et alii.* *Coke Making Technology 2000 – State-of-the-Art and New Structures.* **MPT International**, n. 5, pp. 46-56, 1998.

ANDRADE, M. *et alii.* Reestruturação na Siderurgia Brasileira. *Análise Setorial*, **BNDES**, 1999.

ANDRADE, M. *et alii.* Siderurgia Brasileira: Desempenho em 2000 e Perspectivas para 2001. *Mineração e Metalurgia*, **BNDES**, n. 43, fevereiro, 2001.

ARAUJO, L.A. **Manual de Siderurgia.** São Paulo: Editora Arte & Ciência, v.1 e 2, 1997.

ASTIER, J. *The Impact of Minimills in the USA.* **Ironmaking and Steelmaking**, v. 25, n. 1, 1998.

ASTIER, J.E. *Tendências Tecnológicas na Produção de Aço.* **Metalurgia & Materiais**, pp. 206-215, março, 1995.

AULT,D.E. & MEISEL,J.B. *An Investigation into the Effects of Technology and Economies of Scale on International Trade in Basic Steel: 1955-76.* **Rivista-Internazionale-di-Scienze-Economiche-e-Commerciali**, 28, 5, pp 461-86, may, 1981.

AYLEN, J. *Choice of Process Route in Steelmaking.* **The Institute of Metals**, january, 1990.

AYRES, R.U. *Metals Recycling: Economic & Environmental Implications.* **INSEAD Working Papers: 97/59/EPS/TM**, june, 1997

BACON, N. *et alii.* *Among the Ashes: Trade Union Strategies in the UK and German Steel Industries.* **British Journal of Industrial Relations**, v. 34, march, 1996.

- BAIN, J. **Barriers to New Competition**. Cambridge: Harvard University Press, 1956.
- BALD, W. *Innovative technologies for strip production*. **MPT International**, 4, 1999.
- BARNETT, D.F. & R. W. CRANDALL. **Up from the Ashes: The Rise of the Steel Minimill in the United States**, Washington, D.C.: The Brookings Institution, 1986.
- BASTOS, R.L.A. *As Novas Tecnologias de Automação: Desenvolvimento, Atributos e Implicações de sua Adoção em Termos de Escalas*. **Ensaio FEE**. Porto Alegre: v. 20, 1999.
- BIRAT, J.P. *Scenarios for the Technological Evolution of the Steel Industry*. **La Revue de Métallurgie – CIT**, novembre, 1995.
- BLONDELLOT, E. *Nova Tecnologia para Produção de Produtos Longos*. **Metalurgia & Materiais**, pp. 351-354, julho, 1997.
- BRADASCHIA, C. **Siderurgia para não Siderurgistas: Programa de Educação Continuada**. São Paulo: ABM, 1986.
- BRASCUGLI, G. *et alii*. *Evolution of the Electric Arc Furnace Steelmaking Route*. **MPT International**, n. 2, pp. 62-94, 1997.
- CHANDLER Jr, A.D. **Scale and Scope: The Dynamics of Industrial Capitalism**. Cambridge, Harvard University Press, 1990.
- COELHO, F.D. *The Re-Emergence of Small Enterprises. Industrial Restructuring in Industrialized Countries*. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 12, Brasília: IPEA, maio, 1996.
- CONFERENCE REPORT. *Scrap – a Raw Material in Worldwide Demand for Steelmaking*. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 17, n. 2, 1990.
- CONFERENCE REPORT. *9th International Minimill Conference*. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 23, n. 4, 1996.
- CRANDALL, R.W. *From Competitiveness to Competition*. **Resources Policy**, v. 22, pp. 107-118, 1996.
- DINA, A. **A Fábrica Automática e a Organização do Trabalho**. Petrópolis: Editora Vozes, 1987.
- DOLL, W.J. *et alii*. *The Evolution of manufacturing systems: Towards the Post-Industrial Enterprise*. **OMEGA: International Journal of Management Science**, v. 19, n. 5, pp. 401-411, 1991.
- DOLLÉ, G. *L'Évolution du Four Électrique à Arc*. **La Revue de Métallurgie – CIT**, novembre, 1995.

- DOSI, G. *Sources, Procedures and Microeconomic Effects of Innovation*. **Journal of Economic Literature**, v. 26, pp. 1120-1171, september, 1998.
- EATON, B.C. & EATON, D.F. **Microeconomia**. São Paulo: Editora Saraiva, 1999.
- ETIENNE, A. & P. NILLES. *Continuous Casting Today – Status and Prospects*. **MPT International**, n. 6, pp. 56-67, 1991.
- FAURE, H.A. *Nouvelles Technologies de Production de la Fonte et de l'Acier*. **La Revue de Métallurgie – CIT**, janvier, 1994.
- FAURE, H.A. *Situação Atual e Perspectivas para a Fabricação de Aço: 2º Congresso Internacional*. **Metalurgia & Materiais**, pp. 177-179, abril, 1997.
- FERRAZ, J.C. *et alii*. *Competitividade, Padrões de Concorrência e Fatores Determinantes*. In: **Made in Brazil: Desafios Competitivos para a Indústria**, Rio de Janeiro: Editora Campus, pp. 1-51, 1995.
- FERREIRA, C.G. *A Evolução das Normas Técnicas de Produção na Siderurgia – Principais Tendências Históricas*. **Nova Economia**, Belo Horizonte: v. 31, n. 11, setembro, 1993.
- FISCHER, B. *et alii*. **Capital-Intensive Industries in Newly Industrializing Countries: The Case of the Brazilian Automobile and Steel Industries**. Tübingen: J.C.B. Mohr., 1988.
- FLEMMING, G. *Extension of product range and perspectives of CSP technology*. **MPT International**, v. 1, 2000.
- FLEMMING, G. *et alii*. *CSP – The advanced technology for mini-mills leading into the next century*. **MPT International**, v. 3, 1997.
- FLORIDA, R. & KENNEY, M. *Restructuring in Place – Japanese Investment, Production Organization, and the Geography of Steel*. **Economic Geography**, v. 68, April, 1992.
- FRITZ, E. & F. WALLNER. *Fifty Years of Oxygen Converter Steelmaking*. **MPT International**, n. 6, pp. 38-43, 2002.
- GOLD, B. *Evaluating Scale Economies: The Case of Japanese Blast Furnaces*. **Journal of Industrial Economics**, v. 23, n. 1, september, 1974.
- GREIS, P. & R. STEIN-VERSEN. *Modern Casters and Future Trends in Casting Technology*. **MPT International**, n. 4, pp. 94-95, 2000.
- HENDRICKS, C. *Strip casting technology – a revolution in the steel industry?*. **MPT International**, n.3, pp. 42-49, 1995.
- HENRIQUE, C. & H. ALMEIDA. *Meio Século de Eficiência: Processo LD ainda é a melhor rota tecnológica para a fabricação de aço no Brasil*. **Metalurgia & Materiais**, pp. 230-232, abril, 2002.

HILLE, H. *et alii*. *Technical and Economical Examination of the Development of Blast Furnace Capacities*. **MPT International**, n. 4, pp. 66-79, 1997.

HIRATA, H. *et alii*. *Alternativas Sueca, Italiana e Japonesa ao Paradigma Fordista: Elementos para uma Discussão Sobre o Caso Brasileiro*. **Seminário Interdisciplinar sobre Modelos de Organização Industrial, Política Industrial e Trabalho**. ABET, pp. 157-177, 1991.

HOLLEIS, G. *Global Trends in the Iron and Steel Industry*. **La Revue de Métallurgie – CIT**, Janvier, 1994.

HUALLACHAIN, B.O. *The Restructuring of the United-States Steel Industry – Changes in the location of Production and Employment*. **Environment and Planning**, v. 25, September, 1993.

HUDSON, R. *et alii*. *Restructuring Production in the West-European Steel Industry*. **Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie**, v. 85, 1994.

LABINI, P.S. **Oligopólio e Progresso Técnico**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1980.

LOOTY, M. & SZAPIRO, M. *Economias de Escala e Escopo*. In: KUPFER, D. & HASECNLEVER, L. **Economia Industrial**, Rio de Janeiro: Editora Campus, pp. 43-69, 2002.

LYONS, B. A. *New Measure of Minimum Efficient Plant Size in UK Manufacturing Industry*. **Economica**, v. 47, pp. 19-34, 1980.

MARCUS, P.F. & KIRSIS, K.M. **World Steel Dynamics – Cost Monitor**, n.13, Paine Webber, 1991.

MARTEN, H.F. *New process for economical strip production*. **Metals and Materials**, july, 1989.

MARTINS, A.A.R. Refino Secundário. **Metalurgia & Materiais**, pp.256-258, abril, 2002.

MOUHOUD, E.M. **Changement Technique et Division Internationale du Travail**. Paris: Econômica, 1992.

MOURÃO, M.B. *et alii*. **Siderurgia para não Siderurgistas: Programa de Educação Continuada**. São Paulo: ABM, 2003.

NYSTROM, R. *et alii*. Avanços em lingotamento de tiras finas com o processo DSC. **Metalurgia & Materiais**, julho, 1997.

PAULA, G.M. **Privatização e Estrutura de Mercado na Indústria Siderúrgica Mundial**. Rio de Janeiro, 1998. Tese de Doutorado – Instituto de Economia, UFRJ.

PAULA, G.M. **Dimensões da Estratégia de Internacionalização: o caso de quatro grupos siderúrgicos (mini-mills)**. Oxford: Centro de Estudos Brasileiros, mimeo, 1999.

PINHO, M. **Tecnologia e Competitividade na Indústria Brasileira de Aços não-Planos Comuns**. Campinas, 1993. Dissertação de Mestrado. Instituto de Economia – Unicamp.

PINHO, M. **Grupos Econômicos da Indústria Brasileira e a Política Econômica: Estrutura, Estratégia e Desafios – Grupo Gerdau**. Campinas: Instituto de Economia - Unicamp, outubro, 1995.

PINHO, M. *Política Antitruste e Mudança Tecnológica: Uma análise da indústria de aços longos comuns*. **Anais do XVII Enegep – Encontro Nacional de engenharia de Produção**, Gramado: ABEPRO, outubro, CD-ROM, 1997.

PINHO, M. **Reestruturação Produtiva e Inserção Internacional da Siderurgia Brasileira**. Campinas, 2001. Tese de Doutorado – Instituto de Economia, Unicamp.

PRATTEN, C.F. **The competitiveness of small firms**. University of Cambridge, 1991

PRESERN, V. *Recent Trends and the Future of Vacuum in Steel Making*. **Vacuum**, v. 43, n. 5-7, pp. 373-379, 1992.

ROCCA, A.C. **Economias de Escala na Função Produção**. São Paulo, 1967. Tese de Doutorado – Faculdade de Economia e Administração, USP.

ROGERS, R.P. *The Minimum Optimal Steel Plant and the Survivor Technique of Cost Estimation*. **Atlantic-Economic-Journal**, v. 21, 3, pp. 30-37, september, 1993.

ROHDE, W. & FLEMMING, G. *Current state, capabilities and further developments of the CSP technology*. **MPT International**, 4, 1995.

SAAB, M.W. & SAMPAIO, R.S. *Metodologia de avaliação econômica dos novos processos de produção de ferro primário*. **Metalurgia & Materiais**, fevereiro, 1996.

SCHERER, F.M & DAVID ROSS. **Industrial market structure and economic performance**. 3 ed. Boston: Houghton Mifflin, 1990.

SCHORSCH, L.L. *Why Minimills Give the US Huge Advantages in Steel*. **McKinsey Quarterly**, 1996

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção do Ponto de Vista da Engenharia de Produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SILVA, M.J. *Campo de Prova: O aumento da competitividade e da demanda por aços mais nobres revoluciona a laminação de produtos siderúrgicos*. **Metalurgia & Materiais**, novembro, 1991.

SILVA, M.J. *Veias Abertas: Aciaria revoluciona a fusão e o refino, produzindo aços cada vez mais nobres*. **Metalurgia & Materiais**, pp. 206-210, abril, 2002.

SOARES, R.C. *et alii*. *Estágio Atual de Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Siderúrgica Brasileira e Perspectivas Futuras*. **Metalurgia – ABM**, vol. 43, n. 351, pp. 71-83, fevereiro, 1987.

STEIN-VERSEN, R. *40 Years LD Steel*. **MPT International**, n. 4, pp. 70-84, 1992.

SUSAKI, K. *Lingotamento Contínuo de Placas*. **Metalurgia & Materiais**, pp. 259-260, abril, 2002.

SZWARCFITER, C. & P. R. DALCOL. *Economias de Escala e de Escopo: Desmistificando Alguns Aspectos da Transição*. **Produção**, v.7, n.2, ABEPRO, pp. 117-129, 1997.

SZWARCFITER, C. **Crise do Fordismo e seus Desdobramentos na Organização da Produção**: Um Estudo Exploratório. Rio de Janeiro, 1995. Dissertação de Mestrado – PUC-Rio.

TALAYSUM, A.T. *et alii*. *Uncertainty Reduction through flexible manufacturing*. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v.34, n.2, may, 1987.

TANAKA, F.J. *Production, technology and Structural Adjustment Aspects of the International Iron and Steel Industry*. **SEAFISI Conference**, may, 1987.

TARR, D.G. *The Minimum Optimal Scale Steel Plant in the Mid – 1970s*. **FTC Working Paper**, 3, March, 1977.

TARR, D.G. *The Minimum Efficient Size Steel Plant*. **Federal Trade Commission**, 1980

TOXOPEUS, H. *et alii*. *Otimização e racionalização de alto-fornos*. **Metalurgia & Materiais**, fevereiro, 1996.

TREVISANI Jr., P. *Disputa Quente: Fornos elétricos concorrem com usinas integradas e respondem por quase 50% da produção anual de aço nos EUA*. **Metalurgia & Materiais**, abril, 2000.

WALTERS, A.A. *Production and Cost Functions: An Econometric Survey*. **Econometrica**, v. 31, n. 1, pp. 01-66, Jan/Apr, 1963.

WÖDLINGER, R. *et alii*. *The Steel World After the Asian Crisis*. **MPT International**, june, 1998.