



Padrões tecnológicos e trajetórias de inovação em setores intensivos em escala: evidências da dinâmica tecnológica da indústria siderúrgica

José Antonio Gonçalves dos Santos¹

Resumo: este ensaio analisa os fundamentos teórico-conceituais que explicam a natureza e a dinâmica das inovações segundo a abordagem neo-schumpeteriana, com o objetivo de explicar a relação entre o padrão tecnológico de setores intensivos em escala e as trajetórias tecnológicas das firmas. O estudo destaca o papel crucial da inovação cumulativa, impulsionada pelo aprendizado tecnológico. Admite-se a conduta estratégica das firmas diante da incerteza, da diversidade e da irreversibilidade inerentes à concorrência. Apresenta-se o caso da indústria siderúrgica, cuja característica relevante da dinâmica tecnológica é o maior esforço orientado para inovações incrementais, quando comparado ao avanço das tecnologias radicais. Cada firma tem sua própria trajetória, a qual é definida em função da aprendizagem e da acumulação de competências tecnológicas. Entretanto, argumenta-se que os esforços de P&D das firmas são limitados, e isto porque dependem de um mesmo padrão tecnológico para os três segmentos de mercado da indústria, que são aços longos, aços planos e produtos trefilados). A partir de uma pesquisa bibliográfica, o estudo conclui que o padrão de aprendizado tecnológico da indústria siderúrgica comporta inovações de processo e de produto oriundas de dentro das firmas, a partir de conhecimentos científicos externos absorvidos de outros setores industriais e de instituições de pesquisa básica e aplicada.

Palavras-Chave: Inovação; concorrência; aprendizagem tecnológica.

Código JEL: L16, O14, R11.

Área Temática: 5. Inovação e mudanças técnica, organizacional e institucional. 5.6 Inovação, competências e competitividade

Technological patterns and innovation trajectories in scale-intensive sectors: evidence from the technological dynamics of the steel industry

Abstract: This essay analyzes the theoretical and conceptual foundations that explain the nature and dynamics of innovations according to neo-Schumpeterian thought. More specifically, the objective is to explain how a relationship is established between the technological pattern of scale-intensive sectors and the technological trajectories of the respective firms. In doing so, the strategic conduct of firms in the face of the uncertainty, diversity, and irreversibility inherent in the economic transformation resulting from the competitive process is acknowledged. As an example, the case of the steel industry is presented, whose relevant characteristic of technological dynamics is the greater effort oriented towards incremental innovations, when compared to the advancement of radical technologies. Each firm has its own trajectory, which is defined in terms of learning and the accumulation of technological competencies. However, it is argued that the R&D efforts of firms are limited, and this is because they depend on the same technological pattern for the three market segments of the industry (long steels, flat steels, and drawn products). Divided into five parts, the text presents the results of an exploratory study based on bibliographic information.

Keywords: Innovation; competition; technological learning.

¹ Professor de Economia do Departamento de Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB. E-mail; joseph.toni@gmail.com

1. Introdução

O conceito de inovação é fundamental para a compreensão da dinâmica econômica, e da competitividade das firmas. Segundo Dosi (1988), a inovação refere-se a pesquisa descoberta, experimentação, desenvolvimento, imitação e adoção de novos produtos, de novos processos de produção e novas formas organizacionais. O padrão dominante do processo de inovação dos setores de atividade assume um caráter definidor para mitigar os impactos do alto grau de complexidade e incerteza que caracteriza o ambiente de competição entre as firmas.

Busca-se neste trabalho, um argumento que conduza à compreensão da maneira pela qual os padrões tecnológicos de setores intensivos em escala são estabelecidos e como influencia nas trajetórias tecnológicas específicas das firmas, levando-se em conta a estrutura de mercado. O tema é discutido em uma perspectiva sistêmica e real das forças econômicas e tecnológicas que regem e condicionam as decisões dos agentes econômicos privados num ambiente concorrencial dinâmico.

O conteúdo do trabalho é teórico-conceitual e o seu escopo estabelece uma lógica de dinâmica econômica baseada em aprendizado tecnológico e competências tecnológicas. Ambos os elementos são considerados na literatura como essenciais para a explicação das características que qualificam a organização do arranjo produtivo. O aprendizado é o elemento a partir do qual as firmas constroem uma base de conhecimentos capazes de impulsionar os esforços tecnológicos orientados por rotinas e regras cruciais para o processo inovativo. As competências tecnológicas são os recursos organizacionais alternativos que podem ser adotados pelas firmas de acordo com as características da tecnologia que adota.

Uma das contribuições mais relevantes dessa literatura consiste em demonstrar que os setores industriais apresentam padrões tecnológicos distintos, que condicionam tanto a natureza das inovações quanto as estratégias tecnológicas das firmas. Esses padrões estão associados às fontes de conhecimento utilizadas, às oportunidades tecnológicas disponíveis e aos mecanismos de apropriação dos resultados da inovação.

Entre os diferentes regimes tecnológicos identificados na literatura, destacam-se os setores intensivos em escala, caracterizados por elevados investimentos em capital fixo, processos produtivos complexos e forte exploração de economias de escala. Nesses setores, o progresso técnico tende a ocorrer predominantemente por meio de inovações incrementais de processo, voltadas para a melhoria da eficiência produtiva e para a redução dos custos de produção.

A indústria siderúrgica constitui um exemplo emblemático desse tipo de dinâmica tecnológica. Trata-se de um setor industrial caracterizado por grandes plantas produtivas, elevada intensidade de capital e forte dependência de tecnologias de processo. Ao longo do tempo, o desenvolvimento tecnológico da siderurgia tem sido marcado por um padrão de inovação predominantemente incremental, baseado em melhorias graduais nos processos de produção e nas propriedades dos materiais produzidos.

A partir da década de 1990, a siderurgia tem sido objeto de estudo com foco em tecnologias associadas a novos materiais e melhorias nos processos de produção de aço e seus derivados. Posto isto, o questionamento que se pretende responder neste trabalho é: Como está constituído o padrão tecnológico da indústria siderúrgica?

Apesar da extensa literatura sobre inovação e mudança tecnológica, ainda existe uma lacuna analítica no que se refere à articulação entre padrões tecnológicos setoriais e trajetórias tecnológicas das firmas em setores industriais maduros, como a siderurgia. Grande parte dos estudos concentra-se em análises macroestruturais da mudança tecnológica ou em estudos empíricos sobre desempenho industrial, sem examinar de forma sistemática os mecanismos pelos quais as características tecnológicas dos setores condicionam os processos de inovação das firmas.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho é explicar a relação entre o padrão tecnológico de setores intensivos em escala e as trajetórias tecnológicas das firmas, com destaque para indústria siderúrgica, onde prevalecem inovações incrementais, comparado com as inovações radicais. Embora o ponto de partida da trajetória tecnológica do setor seja o século XIII, com a utilização de altos-

fornos, de acordo com Costa (2002), somente a partir da década de 1980 é que a produção de aço expandiu devido a inúmeras inovações tecnológicas em processos e produtos que solidificaram a demanda de produção de matérias primas.

O artigo possui caráter teórico-exploratório e baseia-se em revisão bibliográfica da literatura sobre economia da inovação e dinâmica tecnológica da siderurgia. A fundamentação teórica é o campo da Economia da Inovação de abordagem neoschumpeteriana. O escopo permite afirmar que o padrão tecnológico de uma determinada indústria e suas trajetórias tecnológicas estão diretamente associados a três condições: à capacidade de absorção de conhecimentos por parte das firmas, aos mecanismos de aprendizado tecnológico adotados pelas firmas e às características estruturais da indústria.

O presente ensaio resulta de um estudo bibliográfico exploratório, organizado em quatro tópicos, além desta introdução. O primeiro tópico apresenta o constructo teórico, a partir do conceito de inovação como elemento explicativo da dinâmica econômica capitalista, em que as firmas são os agentes centrais, conforme a abordagem econômica neo-schumpeteriana. O segundo tópico trata das diferenças setoriais apresentadas na taxonomia sugerida por Pavitt (1984) e Bell e Pavitt (1997). O terceiro tópico apresenta uma análise da dinâmica tecnológica da indústria siderúrgica, associada aos principais condicionantes das trajetórias tecnológicas das firmas. O quarto e último tópico apresenta as considerações finais.

2. Fundamentação Teórica

A abordagem evolucionista da inovação destaca que o progresso técnico resulta de adoção de tecnologias, aprendizado cumulativo, inovação em um processo de busca conduzidos pelas firmas em ambientes caracterizados por incerteza e competição dinâmica (Nelson, 2005). Diferentemente da perspectiva neoclássica, na qual a tecnologia é frequentemente tratada como uma variável exógena, a literatura neo-schumpeteriana enfatiza o caráter histórico e endógeno da mudança tecnológica.

Nesse contexto, as firmas desempenham um papel central no processo de inovação. Elas desenvolvem competências específicas ao longo do tempo por meio da acumulação de conhecimento produtivo, da experiência operacional e da interação com outros agentes econômicos. Essa base de conhecimento constitui o *background* tecnológico da firma, que influencia suas decisões estratégicas e suas capacidades de inovação.

Schumpeter (1987) considera a inovação como força motora da dinâmica capitalista que melhora o processo produtivo e altera as estruturas de mercado. As firmas inovam sob orientações estratégicas, visando ampliar vantagens competitivas em seu favor para se diferenciar dos seus concorrentes através de assimetrias tecnológicas que lhe proporcione apropriação de lucros extraordinários.

As firmas buscam permanecer e se expandir nos mercados num esforço cujo exercício configura o que Possas (1985, p. 163) chama de concorrência, ou seja, um “(...) processo de enfrentamento de vários capitais, inseparável do movimento global de acumulação do capital (...)”. Concordando com Schumpeter (1942, p. 112-113), pode-se afirmar que o processo concorrencial está arraigado em um movimento incessante de mutação industrial, provocando a *destruição* da antiga estrutura econômica e, ao mesmo tempo, realizando a *criação* de uma nova. Portanto, a concorrência abrange as interações entre os agentes econômicos em um processo *dinâmico ativo*, acelerando e direcionando o ritmo de aperfeiçoamento das forças produtivas através de mudanças estruturais extensivas à economia como um todo.

Na abordagem neo-schumpeteriana, a inovação consiste em busca, descoberta, experimentação, desenvolvimento, adoção, adaptação e imitação de novas tecnologias incorporadas em produtos, processos e organização da produção (Dosi, 1988). As firmas inovam com a finalidade de solucionar problemas. As firmas que não conseguem liderar processos de inovação buscam se adaptar à nova situação, fazendo uso de imitação das que o podem fazer (Nelson; Winter, 1982).

Aas inovações se distinguem em radicais e incrementais, conforme a natureza e intensidade do impacto que estas provocam. A inovação radical está relacionada a rupturas, descontinuidades no

processo econômico, com impactos de transformação estruturais. Caracteriza-se em novos produtos, novos processos e novas formas de organização da produção nunca explorados (Freeman, 1994; Dosi, 1988). As inovações radicais substituem padrões tecnológicos vigentes por outros superiores, com capacidade de provocar rupturas estruturais, a exemplo do que foi desempenhado pela máquina a vapor, criada na metade do século XVIII, e pela microeletrônica, desenvolvida a partir da década de 1950.

As inovações incrementais consistem no aperfeiçoamento de produtos, processos e formas organizacionais por parte das firmas através de melhorias e adaptações tecnológicas. Segundo Nelson, Peterhansl e Sampat (2004), os aperfeiçoamentos de vários produtos resultam de acompanhamento ao longo do seu uso.

A firmas em ambiente de oligopólio tomam como referência um *horizonte tecnológico* para nortear suas decisões estratégicas. Assim, Dosi (1988, p.1227) introduz os conceitos de *paradigma tecnológico* e *trajetória tecnológica* para entender as direções e ritmos das mudanças tecnológicas.

O paradigma tecnológico é um modelo ou padrão de solução para os problemas técnico-econômicos importantes selecionados com base em princípios e métodos derivados das ciências naturais, com regras específicas que permitam aquisição de conhecimento novo e resguardá-lo, sempre que seja possível, contra a rápida difusão para os competidores (Dosi, 1988, p.1227). São exemplos de paradigmas, o motor de combustão interna, a química sintética obtida a partir de petróleo e os semicondutores. (Dosi, 1988). O paradigma tecnológico pode ser entendido como um conjunto de princípios científicos e soluções técnicas que orientam a busca por inovações em determinado período histórico. Dentro de cada paradigma, o desenvolvimento tecnológico tende a seguir caminhos relativamente estáveis denominados trajetórias tecnológicas.

As trajetórias tecnológicas são caminhos gerados pelo progresso tecnológico e sua abrangência em virtude da busca incessante das firmas e setores por distintos conjuntos de inovações que os possibilite permanecer no mercado através de vantagens competitivas. As principais ilustrações são o motor de combustão interna, dentro da indústria automobilística, e o *chip*, na indústria microeletrônica, a biotecnologia aplicada a agricultura (Dosi, 1988).

As trajetórias tecnológicas surgem na medida em que as pressões competitivas se intensificam sobre as firmas no mercado, levando-as à busca seletiva por inovações, até que ocorra uma ruptura e simultâneo surgimento de um novo paradigma dado o esgotamento do antigo. Enquanto os paradigmas tecnológicos estabelecem formas sob as quais determinadas necessidades genéricas podem ser satisfeitas, no processo competitivo são selecionadas as que terão de prevalecer, causando mudanças nos preços relativos e demanda.

As trajetórias tecnológicas representam padrões cumulativos de progresso técnico ao longo do tempo. As trajetórias resultam de processos de experimentação, aprendizagem e seleção competitiva entre diferentes alternativas tecnológicas. À medida que as firmas acumulam conhecimento e experiência em determinadas tecnologias, tornam-se progressivamente mais especializadas nessas soluções, o que contribui para reforçar a continuidade das trajetórias tecnológicas existentes.

Esse processo está associado ao conceito de dependência de trajetória, segundo o qual as escolhas tecnológicas realizadas em determinado momento condicionam as possibilidades de desenvolvimento tecnológico no futuro. Dessa forma, a evolução tecnológica das firmas e dos setores industriais apresenta forte caráter cumulativo

O aprendizado tecnológico, de acordo com Lall (2005, p.29), consiste em reunir novas informações com propósitos de testar objetos, criar habilidades e rotinas operacionais e descobrir novos relacionamentos externos com outras organizações e instituições relacionados aos objetivos tecnológicos da firma. Dentro da firma, o conhecimento é construído com base na experiência cotidiana de produção, gestão, *marketing* e comercialização. Trata-se de um conhecimento tácito e não-codificado, que responde ao interesse específico das próprias unidades que o gera, sendo transferíveis apenas aos participantes da mesma experiência, sendo adquirido e transmitido informalmente por processos de aprendizagem conhecidos na literatura como *learnig by doing*,

learning-by-learning e learning by using.

As fontes externas se referem ao conhecimento científico, produzido formalmente via *learning by searching*, gerada formalmente por universidades, laboratórios de P&D e institutos de pesquisa. O conhecimento resultante da ciência é codificado, bem definido e sistematizado conforme normas universalmente aceitas, de modo que possa ser publicado sob diversas formas escritas, digitalizadas e orais. A firma pode adquirir conhecimento também via *learning by interacting*⁵, ou seja, por meio da interação com outros agentes do mesmo setor de atividade, tais como firmas, clientes e fornecedores. A forma predominante do conhecimento e, portanto, dos processos de aprendizagem, está associado, em parte, às características das firmas, dos setores e países em questão, não obstante ambas as formas sejam complementares qualquer que seja a base de conhecimento.

Esses processos de aprendizagem contribuem para a formação de competências tecnológicas específicas nas firmas, permitindo o desenvolvimento de melhorias em produtos e processos produtivos. Ao mesmo tempo, geram assimetrias tecnológicas entre empresas, que se refletem em diferenças de produtividade e competitividade.

3. Diferenças Setoriais

A dinâmica da inovação, entretanto, não é homogênea entre os diferentes setores da economia. Cada setor apresenta um conjunto particular de oportunidades tecnológicas, fontes de conhecimento e mecanismos de apropriabilidade que condicionam o comportamento inovativo das firmas. Essa heterogeneidade levou ao desenvolvimento de classificações dos regimes tecnológicos setoriais, entre as quais se destaca a taxonomia proposta por Pavitt (1984).

3.1. Taxonomia de trajetórias tecnológicas setoriais

Segundo Pavitt (1984), os setores industriais podem ser classificados em cinco grupos, de acordo com seus respectivos padrões de inovação: setores *dominados por fornecedores de tecnologias*, setores *intensivos em escala*, setores *fornecedores especializados* e setores *baseados em ciência*. O comportamento tecnológico de cada setor segue o padrão de inovações que adota, sendo este explicado pelas origens da tecnologia, pelas demandas dos usuários de produtos e processos, e pelas possibilidades de apropriação.

Os setores *dominados por fornecedores* incluem principalmente a agricultura, construção civil, serviços privados e as indústrias tradicionais de manufatura, onde predominam as inovações de processo. As firmas desses setores são pequenas e dependem da capacitação de engenharia, pesquisa e desenvolvimento tecnológico externo. As tecnologias são oriundas praticamente das indústrias de máquinas e equipamentos e de insumos. O foco das trajetórias tecnológicas nesse grupo de setores está centrado na redução dos custos unitários de produção. Os mecanismos de apropriação mais importantes são *marketing*, marcas e propagandas, estética, qualificação profissional *etc.* Esses setores se caracterizam também pelos baixos níveis de concentração dos mercados, de diversificação vertical das tecnologias de processo vis-à-vis a baixa intensidade tecnológica.

Os setores *intensivos em escala* são compostos pelas indústrias da construção naval, alimentos, material de transporte, metalurgia, veículos e cimento, por exemplo. São setores caracterizados por processos contínuos, apoiados em economias de escala. As firmas são, em geral, de grande porte e possuem domínio interno relativamente amplo dos conhecimentos necessários às inovações através de um intenso e processo de aprendizagem em termos de experiências operacionais, engenharia de projetos e sistemas de produção e produtos complexos. As inovações podem ser tanto de produtos quanto de processos, com prevalência estas últimas. Parte das inovações é gerada dentro das próprias firmas e outra parte provém de fornecedores. Os mercados apresentam alto grau de concentração como consequência da escala derivada de plantas, de firmas e do aprendizado tecnológico. As firmas apresentam tendência muito forte à integração vertical para diminuir o risco da intensidade de P&D materializada nos ativos específicos às suas inovações de processo. O êxito competitivo nesses setores é pouco influenciado por inovações específicas. A forma de apropriação dos resultados das inovações é de natureza técnica, tendo como mecanismos os segredos industriais e *know-how* de processo, as defasagens técnicas de imitação, as patentes e as economias dinâmicas

de aprendizado. As trajetórias tecnológicas desses setores orientam-se, sobretudo, para a redução de custos.

Os *fornecedores especializados ou padronizados* englobam firmas relativamente pequenas com capacitações tecnológicas em engenharia mecânica e de instrumentos de precisão adequadas à produção de máquinas, equipamentos, entre outros destinados aos demais ramos industriais. As inovações incorporadas nesses bens de capital resultam de conhecimentos desenvolvidos através de métodos internos associadas com conhecimentos operacionais acumulados pelos clientes, com quem interagem, muitas vezes por meio de cooperação técnica mútua, seja participando em projetos de desenvolvimento ou dirigindo novos projetos, seja através de *feedback*.

Os *setores baseados em ciência* estão diretamente inseridos no contexto do progresso técnico e científico de fronteira. Em relação à estrutura, tais setores comportam firmas de grande porte ligadas às indústrias química, farmacêutica, elétrica e eletrônica, podendo-se incluir as recentes áreas de biotecnologia e da nanotecnologia como variantes. As trajetórias tecnológicas desses setores conjugam inovações de produto para melhoria do desempenho e inovações de processo que reduzem custos, envolvendo combinações variadas e complexas de conhecimento público e privado através de gastos com P&D em laboratórios das próprias firmas, interação com instituições de pesquisa e por aquisição nos ofertantes especializados de máquinas, equipamentos e outros serviços de engenharia de produção. A liderança tecnológica decorre da apropriabilidade nas formas de *know-how* de P&D, patentes, segredo industrial e *know-how* de processo. Economias dinâmicas de aprendizado também protegem as firmas, pois criam barreiras à entrada de potenciais imitadores, facilitando o amortecimento da taxa de difusão das inovações. A diversificação tecnológica é principalmente concêntrica.

O quadro 1 apresenta um resumo da taxonomia apresentada.

Quadro 1 – Padrões tecnológicos da tipologia de Pavitt (1984) e o caso da indústria siderúrgica

Padrão tecnológico	Características principais	Fontes predominantes de inovação	Exemplos de setores	Relação com a indústria siderúrgica
Setores dominados por fornecedores	Baixa intensidade tecnológica interna; inovação incorporada em insumos e equipamentos adquiridos externamente	Fornecedores de máquinas e equipamentos	Agricultura, têxtil, construção	A siderurgia apresenta alguma dependência de fornecedores de equipamentos industriais, mas possui capacidades tecnológicas internas mais desenvolvidas
Setores intensivos em escala	Elevada intensidade de capital; produção em larga escala; sistemas produtivos complexos; predominância de inovações de processo	Engenharia de processo, aprendizagem produtiva e melhorias incrementais	Siderurgia, petroquímica, cimento, papel e celulose	A siderurgia constitui um exemplo típico desse padrão, pois depende de plantas industriais de grande porte, elevados investimentos em capital fixo e inovação focada em eficiência produtiva
Setores dominados por fornecedores especializados	Empresas inovadoras especializadas na produção de equipamentos e tecnologias industriais	Interação com usuários industriais e desenvolvimento de soluções tecnológicas específicas	Máquinas industriais, equipamentos de automação	Empresas desse grupo frequentemente atuam como fornecedoras de tecnologia para o setor siderúrgico
Setores baseados em ciência	Forte base científica; elevada intensidade de P&D; inovação associada à pesquisa científica	Laboratórios de P&D e universidades	Eletrônica, biotecnologia, indústria farmacêutica	A siderurgia apresenta menor intensidade de P&D científico, concentrando-se principalmente em inovação de processo

Fonte: elaboração própria a partir de Pavitt (1984) e literatura sobre regimes tecnológicos

A tipologia proposta por Pavitt (1984) permite compreender as diferenças estruturais existentes entre os padrões de inovação dos diversos setores industriais. No caso da indústria siderúrgica, suas características produtivas e tecnológicas a aproximam claramente do padrão

intensivo em escala, no qual o progresso técnico ocorre predominantemente por meio de melhorias incrementais nos processos produtivos, ampliação da eficiência operacional e exploração de economias de escala. Nesse tipo de regime tecnológico, a inovação tende a resultar de processos de aprendizagem associados à operação de sistemas produtivos complexos e da interação com fornecedores de equipamentos industriais. Dessa forma, as trajetórias tecnológicas das firmas siderúrgicas são fortemente condicionadas pela acumulação de competências produtivas e pela experiência tecnológica acumulada ao longo do tempo, reforçando o caráter cumulativo e *path-dependent* da mudança tecnológica nesse setor.

3.2. Aprendizado e tendências tecnológicas em setores intensivos em escala

No Brasil, prevalece a utilização imediata das tecnologias que deveriam constituir-se na competência ou *input* inicial para seu desenvolvimento tecnológico de longo prazo. Observa-se que é comum atribuí-lhes um caráter adaptativo de tecnologias adquiridas de fontes externas à firma.

Segundo Bell e Pavitt (1997), no Brasil o desenvolvimento dos setores intensivos em escala e de bens de capital não incorporou mudanças estruturais que os colocasse em posições tecnológicas avançadas para a emergência dos setores de instrumentos de precisão e de máquinas altamente especializadas e complexas ou, até mesmo, dos setores baseados em ciência.

A capacidade tecnológica, condição necessária à dinâmica capitalista, consiste no esforço tecnológico interno da firma para dominar, adaptar e aperfeiçoar novas tecnologias. Trata-se de um processo que requer uma evolução sequencial, cumulativa e subjacente às condições locais. O reflexo do entendimento de que a importação de tecnologia não substitui o esforço à geração de aptidões endógenas pode levar a uma maior conexão com os avanços científicos, com a organização da produção e com os mecanismos da própria aprendizagem (Lall, 2005).

Conclui-se que a análise dos fundamentos teóricos sobre inovação e tecnologia sugere que compreensão do padrão de inovação da siderurgia se aproxima mais da realidade a partir das características estruturais, institucionais e comportamentais da indústria.

4. Principais características do Setor Siderúrgico no Mundo e no Brasil

A indústria siderúrgica contribui para as economias nacionais e regionais dos países onde estão instaladas, principalmente por meio da geração de emprego e renda, da entrada de investimentos elevados em tecnologia e infraestrutura, das exportações e do estímulo ao desenvolvimento econômico sustentável, uma vez que possibilita a diversificação da economia, inovação e competitividade.

A siderurgia é um ramo da metalurgia, que consiste em atividades de processamento do aço e ferros fundidos, utilizados em diversos setores da construção civil e manufatura. Dentre os produtos derivados da siderurgia, destacam-se o aço bruto, laminados, planos, longos e semiacabados (CADE, 2022; IAB, 2025), barras de aço, chapas, bobinas, tubos, perfis e fios. Esses produtos são matérias primas para diversas indústrias, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico. Os principais consumidores desses produtos são as indústrias de bens de consumo duráveis, construção civil, petrolífera, construção naval, eletroeletrônica e de eletrodomésticos.

O aço é um produto homogêneo sem substitutos perfeitos devido a suas características específicas, como dureza; resistência à corrosão, aos impactos, às altas temperaturas e ao desgaste; durabilidade; ductibilidade; tenacidade; capacidade de reciclagem; vasta aplicabilidade e; economicidade da produção. Existe uma vasta variedade do aço, o que permite muitas aplicações (CADE, 2022).

A indústria siderúrgica mundial apresenta um crescimento significativo entre os anos de 1980 e 2024. Conforme o Anuário Estatístico do Instituto Aço Brasil (IAB, 2025), a produção teve um acréscimo de 38% naquele período. Nota-se que em 2024 a indústria produziu aproximadamente 1,9 bilhão de toneladas de aço bruto, o que representa um acréscimo de 36% ao que foi produzido em 2010 (1,43 bilhões de toneladas).

Pode-se observar que a produção está concentrada em poucos países. Os dez maiores

produtores, em ordem crescente, são a China, a Índia, o Japão, os Estados Unidos, a Rússia, a Coreia do Sul, a Alemanha, a Turquia, o Brasil e o Irã. A China, o maior produtor, contribuiu com 53% dessa da produção em 2024. O Brasil ocupa o 9º lugar, com 1,8% da produção (IAB, 2025).

A China é também o maior consumidor mundial de aço bruto desde 2010. Segundo o CADE (2022), em 2020, o país consumiu 995 milhões de toneladas, o que representa 56% do consumo total.

Ainda de acordo com o CADE (2022), durante os anos 2010 a 2020, a Índia é segundo maior produtor e consumidor de aço bruto no mundo. Enquanto o crescimento da produção foi de 45%, o do consumo foi em torno de 29%.

Os seis maiores países produtores e com consumo aparente de aço são países desenvolvidos: os Estados Unidos, o 4º maior produtor e o 3º maior consumidor; o Japão, 3º maior produtor e 2º maior consumidor; a Rússia, o 5º maior produtor e o 6º maior consumidor; e a Coreia do Sul, o 6º maior produtor e o 4º maior consumidor. Essa configuração permaneceu até 2024 (CADE, 2022; IAB, 2025).

Quanto à estrutura de mercado, o setor siderúrgico é caracterizado como oligopólio, com a existência de poucas empresas dominantes que controlam os seus preços e condições, e *intensivo em escala*, segmentado de acordo com seus três principais produtos: aços planos, aços longos e aços semiacabados. Uma fonte externa de concorrência do setor siderúrgico é a indústria de bens intermediários alternativos mais leves e mais baratos, como plásticos, alumínio (FINEP, 2003) e considerados substitutos próximos do aço.

A siderurgia possui quatro categorias de processo de produção: *input* e preparação de matérias-primas, produção do ferro e do aço, produtos semiacabados, laminados a quente e operações de acabamento e fundição. (Gorgulho *et al.*, 2025). A produção de aço envolve um conjunto de processos industriais que são intrinsecamente ligados: a siderurgia, fundição e soldagem (Gorgulho *et al.*, 2025).

O setor siderúrgico é fornecedor de insumos para outros setores da indústria automobilística, ferroviária, naval, cimento, de eletrodomésticos e de equipamentos e máquinas, que utilizam o aço como matéria prima, bem como para a construção civil.

4.1. O setor siderúrgico brasileiro

Segundo o Instituto Aço Brasil, em 2024 a indústria gerou um total de 117.439 empregos diretos e indiretos, incluindo funcionários próprios e terceiros (IAB, 2025).

Na América Latina, o Brasil é o maior produtor de aço e ocupa a nona posição como produtor global de aço. A produção de aço bruto no país, em 2024, foi de aproximadamente 34 milhões de toneladas. O Estado de Minas Gerais contribuiu com cerca de 10,2 milhões de toneladas, o que representa 30%. Os demais estados produtores são Rio de Janeiro, Espírito Santo, Ceará, São Paulo, Rio Grande do Sul, Paraná, Maranhão e Pernambuco. Os produtos mais exportados pelo Brasil durante os anos de 2024 e 2025 foram os semiacabados, que inclui placas, lingotes, blocos e tarugos.

A indústria siderúrgica divide-se em três segmentos básicos conhecidos como usina integrada, usina semi-integrada e usina não integrada. A usina integrada produz aço com alto-forno a carvão vegetal e carvão mineral (coque) para a redução do minério de ferro e ferro esponja. A usina semi-integrada produz o aço sem alto-forno, tendo como matéria prima a sucata e/ ou o ferro gusa produzido por outra unidade e reduzido por eletrodos. A usina não integrada produz exclusivamente ferro gusa a carvão vegetal.

O Setor siderúrgico brasileiro é formado por empresas produtoras estatais ou com capital público e por empresas privadas de capital nacional e estrangeiro. As empresas privadas dominam o setor, sendo 14 as principais: Aço Brasil, Aço Verde do Brasil, Aperam Arcelor Mittal Aços Longos, Arcelor Mittal Pecém, Arcelor Mittal Sul Fluminense, Arcelor Mittal Tubarão, CSN, Gerdau, SIMEC, Sinobras, Ternium Brasil, Usiminas, Vallourec e Villares Meta, distribuídas em quatro regiões do país, (IAB, 2025), como mostra o Quadro 2. Essas empresas operam 28 usinas distribuídas por 10 estados brasileiros.

Quadro 2- Empresas siderúrgicas instaladas no Brasil, por região, estado e município

Região	Estado	Município	Empresa
Norte	Pará	Marabá	Sinobrás
Nordeste	Maranhão	Açailândia	Aço Verde do Brasil
	Ceará	São Gonçalo do Amarante	Arcelor Mittal Pecém
		Maracanaú	Gerdau Aços Longos - Usina Cearense
	Pernambuco	Recife	Gerdau aços Longos - Açonorte
Sudeste	Minas Gerais	Timóteo	Aperam South América
		Juiz de Fora	Arcelor Mittal Aços Longos
		Monlevade	Arcelor Mittal Aços Longos
		Barão de Cocais	Gerdau Aços Longos
		Divinópolis	Gerdau Aços Longos
		Ouro Branco	Gerdau Aços Longos e Planos
		Ipatinga	Usiminas
		Barreiro	Vallourec Soluções Tubulares do Brasil
		Jeceaba	Vallourec Soluções Tubulares do Brasil
	Rio de Janeiro	Barra Mansa	Arcelor Mittal Aços Longos
		Resende	Arcelor Mittal Aços Longos
		Rio de Janeiro	Gerdau Aços Longos - Cosiguá
		Rio de Janeiro	Ternium Brasil
	São Paulo	Piracicaba	Arcelor Mittal Aços Longos
		Mogi das Cruzes	Gerdau Aços Especiais
		Pindamonhangaba	Gerdau Aços Especiais
		Araçariguama	Gerdau Aços Longos
		Cubatão	Usiminas
		Sumaré	Villares Metais
Sul	Rio Grande do Sul	Charqueadas	Gerdau Aços Especiais
		Riograndense	Gerdau Aços Longos
	Espírito Santo	Serra	Arcelor Mittal Aços Planos - Tubarão
	Paraná	Guaíra	Gerdau Aços Longos

Fonte: Instituto Aço Brasil (2025)

A indústria siderúrgica nacional tem características de estrutura de mercado do tipo oligopólio concentrado. O padrão de concorrência dentro do setor envolve ausência de alta rivalidade, concorrência baseada no comportamento dos investimentos em função das previsões do comportamento da demanda e não pelo preço, elevadas barreiras à entrada e rigidez de preços (Lima; Pessoti, 2011, p. 54).

5. O Padrão Tecnológico na Indústria Siderúrgica

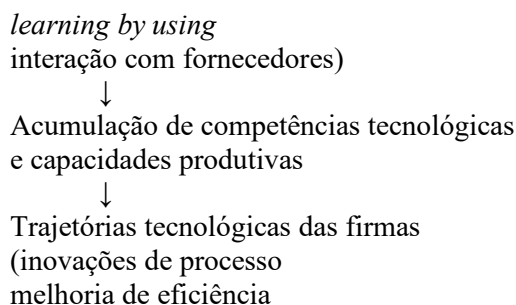
No presente trabalho, propõe-se a análise da dinâmica tecnológica da indústria siderúrgica com base no esquema apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura analítica da dinâmica tecnológica no setor siderúrgico

Regime tecnológico do setor
(oportunidades tecnológicas,
estrutura industrial,
fontes de conhecimento)



Processos de aprendizagem tecnológica
(*learning by doing*)



Os padrões tecnológicos de setores intensivos em escala, como a siderurgia, estão relacionados ao *background* tecnológico acumulado pelas firmas e pelo próprio setor. Esse *background* corresponde ao conjunto de conhecimentos produtivos, capacidades organizacionais, rotinas técnicas e experiências históricas que condicionam a forma como as empresas inovam e adotam novas tecnologias. Em setores intensivos em escala, tais capacidades tendem a se consolidar em torno de processos produtivos de grande porte, caracterizados por elevados investimentos em capital fixo, padronização produtiva e busca constante por ganhos de eficiência.

A literatura sobre mudança tecnológica, especialmente inspirada na corrente de pensamento neo-schumpeteriano e em abordagens como a de Dosi (1982, 1988), sugere que a inovação ocorre dentro de trajetórias tecnológicas delimitadas por paradigmas tecnológicos dominantes. Nesses contextos, o *background* tecnológico das firmas atua como um filtro cognitivo e organizacional que orienta as direções de busca por melhorias técnicas. Assim, empresas siderúrgicas não inovam de maneira aleatória; elas tendem a explorar soluções compatíveis com suas competências acumuladas, suas infraestruturas industriais e seus sistemas de produção já estabelecidos.

No caso da siderurgia, o paradigma tecnológico dominante historicamente tem sido estruturado em torno de processos de produção em larga escala, como o uso de altos-fornos integrados e rotas tecnológicas baseadas na redução do minério de ferro. Esses processos exigem plantas industriais de grande capacidade e elevados níveis de integração vertical, características que reforçam os padrões típicos dos setores intensivos em escala. Dentro desse padrão, a inovação tende a ocorrer principalmente na forma de melhorias incrementais de processo, voltadas para aumento de produtividade, redução de custos energéticos, otimização do uso de insumos e aprimoramento do controle operacional.

Esse contexto influencia diretamente as trajetórias tecnológicas específicas das firmas siderúrgicas. Empresas com *background* tecnológico associado a plantas integradas, por exemplo, direcionam seus esforços inovativos para aprimorar tecnologias relacionadas à eficiência dos altos-fornos, à automação do processo produtivo e ao tratamento metalúrgico do aço. Já firmas que operam com rotas alternativas - como aquelas baseadas em fornos elétricos a arco - desenvolvem trajetórias tecnológicas distintas, focadas na reciclagem de sucata, na eficiência energética e na flexibilidade produtiva.

Além disso, o caráter intensivo em escala da siderurgia cria fortes barreiras à mudança tecnológica radical. O alto custo de substituição de equipamentos e a longa vida útil das plantas industriais incentivam estratégias de inovação cumulativa, nas quais novas tecnologias são incorporadas gradualmente aos sistemas produtivos existentes. Dessa forma, o *background* tecnológico não apenas orienta as escolhas tecnológicas das firmas, mas também contribui para a persistência de determinadas trajetórias tecnológicas ao longo do tempo.

A dinâmica tecnológica da siderurgia resulta da interação entre três elementos principais: (1) os padrões tecnológicos típicos de setores intensivos em escala, (2) o *background* tecnológico acumulado pelas firmas e (3) as oportunidades e restrições impostas pelo paradigma tecnológico dominante. Essa interação molda as trajetórias tecnológicas específicas das empresas siderúrgicas, produzindo processos de inovação caracterizados por forte cumulatividade, elevada dependência de trajetória e predominância de melhorias incrementais em processos produtivos de larga escala

A indústria siderúrgica tem como característica estrutural mais significativa o elevado grau de concentração, típico de oligopólio. Nesse mercado, as barreiras à entrada são os bens de capital, a pesquisa e desenvolvimento e tecnologias devido a necessidade de elevados investimentos.

O mercado de aços longos é o que apresenta menores barreiras à entrada de novos concorrentes dentro do setor siderúrgico. Geralmente, as barreiras legais e regulatórias não oferecem significativos riscos à livre comercialização dos produtos. No entanto, ainda assim o elevado investimento inicial e a existência de barreiras tecnológicas são fatores capazes de inibir o ingresso de novos concorrentes (CADE, 2022).

No mercado de processamento e distribuição de aço não existem barreiras significativas à entrada. No segmento de relaminação a tecnologia necessária para a entrada é amplamente disponível no mercado por diversos fornecedores de equipamentos. Também não existe há barreiras de acesso a insumos, tecnologia ou infraestrutura para a entrada nesses mercados (CADE, 2022).

5.1. As trajetórias tecnológicas da indústria siderúrgica

O padrão de inovação de um setor industrial reflete a influência de um conjunto de fatores estruturais, comportamentais e institucionais. No caso da indústria siderúrgica, um exemplo de setor intensivo em escala, o progresso tecnológico se apoia em grandes plantas industriais, elevados investimentos em capital fixo e longos ciclos de maturação tecnológica. Nesse ambiente, as trajetórias tecnológicas das firmas são fortemente influenciadas pela necessidade de explorar economias de escala, pela complexidade dos processos metalúrgicos e pela cumulatividade do conhecimento técnico associado à operação das usinas. Dessa forma, a análise da dinâmica tecnológica da siderurgia oferece um contexto particularmente adequado para examinar como os padrões tecnológicos setoriais condicionam os processos de inovação e aprendizagem das firmas.

A trajetória tecnológica da indústria siderúrgica mundial iniciou com o surgimento dos primeiros altos-fornos, no século XIII, seguido do impulso devido à revolução industrial corrida no século XVIII e da análise química dos minérios e metais, uma tecnologia que passou a fornecer informações preciosas com desenvolvimento da termodinâmica. Outras mudanças significativas foram identificadas no setor. A mais importante ocorreu em 1826, com a patente de Neilson de pré-aquecimento do ar em tubos de ferro fundido, aquecidos externamente. A segunda é a resolução de problemas de trincamento dos tubos com os regeneradores de Cowper, na segunda metade do século XIX. A terceira são os processos Bessemer e Siemens-Martin de produção de aço líquido, também na segunda metade do século XIX. Atualmente, o aço é produzido com a tecnologia baseada no Processo Bessemer, de soprar ar através de ferro gusa fundido para oxidar o material e separar impurezas (Gorgulho *et al.*, 2025).

O Brasil recebeu de vários países o total de 6.422 depósitos de patentes de invenções em todas as categorias associadas ao processo siderúrgico, mencionados na sessão 5 do presente trabalho. O Japão é o principal depositante, sendo as empresas com maior número de depósitos a *Nippon Steel Corporation* e a *JFE Steel Corporation*. A China e o Brasil são os únicos países em desenvolvimento que possuem depósitos de patentes (Gorgulho *et al.*, 2025).

Apesar do número significativo de patentes, a exemplo dos depósitos no Brasil, a indústria siderúrgica mundial é uma atividade considerada pouco intensiva em pesquisa & desenvolvimento (P&D), característica que pode explicar a existência de poucas inovações tecnológicas radicais no setor e o deslocamento da fronteira tecnológica lento. Oliveira e Pinho (2006) observaram que é uma indústria é madura, com rupturas tecnológicas pouco frequentes. Os autores mencionaram que o conversor ao oxigênio e o lingotamento contínuo são as únicas inovações de processo consideradas radicais, desde a segunda metade do século XX, quando surgiram. O lingotamento contínuo foi amplamente difundido devido a sua capacidade de integração das etapas de produção. A tecnologia aproxima a aciaria da laminação a quente, eliminando a etapa em que os lingotes passam por fornos de rea aquecimento antes de serem encaminhados à operação de desbaste (Oliveira e Pinho, 2006, p.2).

As tecnologias de produto na siderurgia também são de natureza incremental e o avanço é lento. Essas tecnologias visam ao desenvolvimento de novas variedades de aço e ao aperfeiçoamento

dos produtos já existentes para aperfeiçoamento de propriedades como resistência a impactos e corrosão, facilidade e aderência de pintura de acordo com as demandas dos consumidores (Oliveira e Pinho, 2006, p.4).

O setor possui duas rotas tecnológicas principais para tratar as matérias primas para a produção do aço. A primeira é o uso de fornos a oxigênio (BOF) e a segunda é o uso de fornos elétricos (EAF). A primeira rota, mais representativa no Brasil, corresponde a 80% da produção nacional de aço bruto e a segunda rota, responsável por 60% de todo aço que é produzido no mundo (Costa *et al*, 2007).

O padrão de desenvolvimento tecnológico específico a esta indústria abrange tanto inovações de natureza radical quanto de caráter incremental e cumulativo em processos, equipamentos e produtos. Este padrão segue uma trajetória orientada pela compactação de processos com a tecnologia denominada *thin-slab* e os processos alternativos de produção de ferro gusa.

Figueiredo (2003, p. 51-56) destacou três inovações radicais estão associados ao processo produtivo da maioria das usinas de aço: (1) *processo de preparo das matérias-primas* para separar o “ferro dos elementos indesejáveis”, usando o carbono como agente redutor de tais impurezas (sílica e oxigênio); (2) *processo de redução ou de fabricação do ferro* à base de altos fornos – aproximadamente 1.500°C – para obter o ferro gusa; (3) *processo de lingotamento tradicional*, através do qual o ferro, derretido, é vazado em lingotes cujos moldes de vários formatos e tamanhos são construídos no setor de fundição das próprias usinas. O processo de lingotamento convencional ainda é utilizado na indústria, simultaneamente com o lingotamento contínuo.

As inovações utilizadas pela indústria siderúrgica resultam de P&D realizadas pelas próprias empresas do setor e de experiências operacionais com serviços externos de engenharia e conhecimentos científicos. O processo produtivo siderúrgico consiste em transformações físico-químicas adquiridos por meio de conhecimentos científicos da química, da física, e da matemática.

O padrão de desenvolvimento tecnológico da indústria depende também da sua interação com instituições públicas e privadas responsáveis pela realização de pesquisas básicas e aplicadas. A indústria siderúrgica adquire máquinas, equipamentos e instrumentos de precisão provenientes de fornecedores especializados para atender cada tipo de usina.

Contudo, nas atividades de inovações incrementais, as empresas desempenham um papel decisivo. A relação entre os fornecedores de processos e equipamentos (aciarias e alto forno, por exemplo) e os produtores de aço resultam em efeitos importantes para o desenvolvimento da indústria, da tecnologia de produto e da competitividade das empresas do setor, sejam por redução de custos ou por qualidade do produto. Desta forma, é crucial que as empresas criem competências tecnológicas que contribuam para realização de processos inovativos incrementais (Figueiredo, 2003).

O aprendizado tecnológico no setor siderúrgico ocorre em três momentos bem definidos. O primeiro se estende entre as fases do processo produtivo e as atividades de P&D. O segundo é durante a interação com os fornecedores de tecnologias e de conhecimento científico. O último é entre a atividade de P&D e as atividades realizadas nas indústrias de transformação.

Diante do exposto, verifica-se dois aspectos teóricos. O primeiro é que as firmas siderúrgicas têm relativa liberdade para tomar decisões em relação a qual trajetória tecnológica deve seguir. Isso é possível apenas no âmbito da escolha entre os três níveis de integração, e entre os segmentos aços planos, aços longos e produtos trefilados. Por seu turno, a diversificação dos produtos já se tornou uma característica estrutural e, por conseguinte, imperativa às firmas. O segundo aspecto diz respeito às rotinas, as quais são pouco alteradas ao longo do tempo.

Figueiredo (2003) identificou quatro tipos de competência tecnológica, essenciais ao desenvolvimento da indústria siderúrgica. Deste ponto de vista, a firma internaliza algumas ou muitas funções que poderia comprar no mercado, mas fazendo isso, incorre em problemas administrativos, financeiros e principalmente tecnológicos, os quais que podem ser irreversíveis. A *competência em atividade de investimentos* destina-se a tomar decisões e controlar a expansão da planta e engenharia de projetos. A *competência em processos e organização da produção* é orientada para adaptação dos

processos às condições locais e aperfeiçoar os componentes dos processos, bem como os métodos de organização da produção. A *competência em produtos* permite introduzir melhoramentos no produto visando à sua melhoria com base em padrões internacionais e para atender as necessidades dos clientes. A *competência em equipamentos* possibilita a própria empresa fazer manutenções e reformas necessárias nos equipamentos e máquinas pesados, ao invés de comprar esse serviço a fornecedores, o que aumenta os limites do conhecimento para vantagem competitiva.

Pinho e Oliveira (2002) destacaram a falta de competência inovativa, principalmente na indústria dos países periféricos, dada a dificuldade de combinar capacitações de produtos de aço, fornecedores de equipamentos e instituições públicas de pesquisa. Atribuem também ao fato de a apropriabilidade das inovações de processo ser relativamente baixa. Por outro lado, as inovações de produto possibilitam maior apropriabilidade, tendo em vista as oportunidades de elaborar novas especificações para o aço, bem como estabelecer relacionamentos especiais com clientes que promovam prêmios em preços.

No Brasil, a indústria siderúrgica possui as mesmas características estruturais da indústria a nível internacional. Instalada em 1940, a indústria internalizou tecnologias importadas por muitos anos. Conforme Paula (1998), mesmo tendo aprendido a tecnologia de operação e manutenção, adaptar e aprimorar processos produtivos e a tecnologia de produto, não foi capaz de desenvolver um aporte técnico próprio capaz de criar tecnologias de processo, o que é comum a praticamente todos os países de regiões periféricas. Os motivos básicos apontados são o significativo volume de recursos necessários aos investimentos, longo prazo de maturação destes e a incerteza tecnológica, bem como os riscos inerentes à elaboração de novos processos. A decisão tomada pelas empresas foi a de investir em inovações de produto, cujas atividades estão baseadas em P&D. Neste sentido, Oliveira (2004) conclui que, mesmo na condição de estatais, as empresas siderúrgicas brasileiras foram contempladas por programas de capacitação tecnológica na área produtiva para operação de equipamentos e, em alguns casos, para consolidação de estruturas formais de P&D.

O setor realiza inovações incrementais adaptativas ou otimizadoras. As empresas apresentam relativa maturidade tecnológica, comprovada por duas razões centrais: (1) queda nas importações de tecnologias externas, as quais encontram-se bastante reduzidas desde 1980; e (2) acumulação de competências tecnológicas possibilitadas principalmente pela descoberta do conhecimento incorporado nas tecnologias importadas, o que impulsionou o esforço tecnológico local apoiado na implantação de centros de P&D, mas com baixa intensidade dos esforços tecnológicos, os quais são evidenciados pela mudança tecnológica nas aciarias de todo o parque nacional, proporcionando a produção de aços de alto valor agregado e classe mundial (Oliveira, 2004).

Estudos recentes sobre a dinâmica tecnológica da siderurgia indicam que, embora a indústria permaneça caracterizada por inovações predominantemente incrementais, novas pressões associadas à sustentabilidade ambiental, à eficiência energética e à digitalização dos processos produtivos têm estimulado mudanças importantes nas trajetórias tecnológicas das firmas. Iniciativas voltadas à produção de aço com menores emissões de carbono, como o uso de hidrogênio no processo de redução do minério de ferro e a ampliação da reciclagem em fornos elétricos a arco, ilustram a emergência de novas oportunidades tecnológicas no setor.

A utilização de sucata resultante do consumo de aço como matéria prima em rota semi-integrada beneficia o meio ambiente, pois permite a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, além da redução das emissões de gases de efeito estufa, geradas na etapa de redução (produção do ferro-gusa) (IAB, 2024).

5.2. Concorrência na indústria siderúrgica

A capacidade competitiva é uma característica do setor siderúrgico, tendo como fator relevante de inserção no mercado externo os baixos custos de produção, em especial, os relativos a mão-de-obra e materiais, o que possibilita a obtenção de níveis elevados de eficiência produtiva e desempenho exportador. Além dessa vantagem frente os principais produtores em escala mundial, a siderurgia é favorecida por condições naturais, comparativamente superiores a outros países, tais como abundância de minério de ferro e condições geográficas que permitem a proximidade entre

usinas, matérias-primas e o mercado consumidor, o que assegura ao setor ganhos em escala e escopo.

A concorrência na indústria é explicada pela diferenciação dos produtos dentro dos mercados de aços planos, aços longos e trefilados, divididos conforme as aplicações de cada produto, e onde as firmas buscam tornar-se mais competitivas. Assim como acontece com outro produto, as aplicações referidas acima remetem à ideia de adaptação do aço a determinadas condições próprias de cada consumidor. Esta é uma causa de estratégia para as firmas, pois a necessidade de adaptações estimula o setor a contínuas modificações no desempenho do produto. As estratégias de concorrência são estabelecidas através da introdução de melhorias tecnológicas, bem como na qualidade do produto, redução de custos e economias de escala.

Os principais resultados que culminaram do processo de inovação cumulativa sustentado em aprendizado tecnológico, segundo Almeida (2004) as empresas do setor seguiram trajetórias distintas em seu processo de internacionalização, participação de investimento direto estrangeiro e criação de *jointventures*, estabelecimento de exportações como estratégia predominante para sua entrada em mercados internacionais.

Considerações Finais

O presente estudo analisou a relação entre a abordagem evolucionária da inovação e aprendizado tecnológico no âmbito da indústria siderúrgica brasileira no contexto das profundas mudanças econômicas ocorridas no país a partir das duas últimas décadas do século XX, que decorreram principalmente do paradigma tecnológico da microeletrônica e do processo de globalização.

O estudo contribui para a literatura ao evidenciar que as trajetórias tecnológicas das firmas siderúrgicas não podem ser compreendidas isoladamente das características estruturais do setor em que operam. O padrão tecnológico típico de setores intensivos em escala impõe limites e direções ao processo inovativo, favorecendo estratégias baseadas em aprendizagem cumulativa, aprimoramentos incrementais de processo e exploração de economias de escala. Nesse sentido, o background tecnológico das firmas constitui um elemento central para explicar a diversidade de trajetórias tecnológicas observadas na indústria.

A mudança tecnológica foi admitida como fator estrutural e elemento estratégico explicativo da lógica microeconômica de concorrência na indústria. Isso foi possível a partir da visão evolucionista neo-schumpeteriana sobre o vínculo entre inovações e racionalidade limitada numa perspectiva da dinâmica tecnológica para vantagens competitivas e evolução de firmas e indústrias. Ressaltou-se também que o processo de concorrência em setores industriais exige das firmas a acumulação de competências tecnológicas próprias que sejam capazes de contribuir para o domínio de conhecimentos específicos por meio de esforços tecnológicos geradores de aprendizagem. Para ilustrar, aplicou-se tal abordagem à indústria siderúrgica, a qual é comumente estudada com base em condições de mercado.

Os resultados coadunam com a abordagem da inovação na perspectiva neo-schumpeteriana. O processo de inovação exige das empresas aprendizado tecnológico contínuo. O padrão de aprendizado tecnológico da indústria siderúrgica comporta inovações de processo e de produto oriundas de dentro das firmas, a partir de conhecimentos científicos externos absorvidos de outros setores industriais e de instituições de pesquisa básica e aplicada. O setor siderúrgico é capaz de gerar seu próprio dinamismo tecnológico, sustentando-o ao longo do tempo, porém num ritmo relativamente lento da expansão da fronteira tecnológica e contínuo através do processo de inovações incrementais, propiciando o desenvolvimento técnico da indústria e a competitividade das firmas.

As inovações radicais responsáveis pelos saltos tecnológicos têm surgido esporadicamente. Esse aspecto reverte-se em um elemento facilitador da aprendizagem, principalmente nas indústrias nacionais instaladas em países periféricos como o Brasil. Trata-se de um setor de relevante importância econômica que, ao mesmo tempo, influencia e é influenciado por outras indústrias. A atividade inovadora da indústria automobilística depende de aços com especificações correspondentes com os projetos de *design* e desempenho de veículos novos ou aperfeiçoados. Em

contrapartida, a competição torna-se mais acirrada pela oferta de produtos substitutos que atendem certos atributos capazes de solucionar os problemas dos clientes, sem que estes esperem durante muito tempo. Internamente à indústria, a concorrência é influenciada pelo grau de concentração das firmas nos segmentos do mercado, os quais são definidos de acordo com o tipo de aço produzido (aços planos comuns e especiais, aços longos comuns e especiais e produtos trefilados). A apropriabilidade dos retornos das inovações está associada o relacionamento das firmas com seus clientes.

Cada firma tem uma trajetória de inovação que lhe é específica. Primeiro, as características estruturais e produtivas da indústria brasileira são muito parecidas às da indústria internacional, não apresentando sinais de mudanças criadoras endógenas. Segundo, apresenta baixo nível de intensidade em esforço tecnológico, o que inibe o surgimento de oportunidades inovativas, comprometendo a aprendizagem, tão importante para gerar e explorar suas capacitações tecnológicas. Por conseguinte, afeta as inovações geradoras de vantagens competitivas e mudanças estruturais. Terceiro, as tomadas de decisões estratégicas de pesquisa e desenvolvimento no âmbito das firmas são pouco exploradas e de caráter incremental. Apesar da diminuição sensível da entrada de tecnologia por importação, a indústria ainda depende dos avanços tecnológicos gerados na siderurgia de outros países.

Referências

ALMEIDA, Rinaldo Machado. Análise empírica dos fatores determinantes e das estratégias de internacionalização da siderurgia brasileira. 2004. 229 f. **Dissertação** (Mestrado em Administração) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/8004eacb-7f16-4a32-9310-bfbfc692410a/content>.

BELL, M.; PAVITT, K. Technological accumulation and industrial growth: contrasts between developed and developing countries. In.: ARCHIBUG, D.; MICHIE, J. **Technological, globalization and economic performance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997, p. 83-137.

COSTA, M. M. **Princípios de Ecologia Industrial Aplicados à Sustentabilidade Ambiental e aos Sistemas de Produção de Aço**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Schaeffer. 2002. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Pós-graduação em Engenharia, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/591239.pdf>.

CADE - Conselho Administrativo de Defesa Econômica. Indústria Siderúrgica. **Cadernos do Cade**, 2022. Disponível em https://cdn.cade.gov.br/Portal/centrais-de-conteudo/publicacoes/estudos-economicos/cadernos-do-cade/Caderno_Industria-Siderurgica.pdf. Acesso em 15 mar. 2026

COSTA, Verlaine Lia, Escorsim, Sérgio, COSTA, Deneive Leonor. Processo produtivo e produção de aço: a inserção do Grupo Gerdau S.A. no cenário mundial. In: **Anais do Congresso Internacional de Administração**, Ponta Grossa. 1, p.1-7, 2007.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories, **Research Policy**, v. 11, p. 147-162, 1982.

DOSI, G. Sources procedures and microeconomic effects of innovation. **Journal of Economic Literature**, v. XXVI, p. 1120-1171, September, 1988.

FIGUEIREDO, P. N. **Aprendizagem tecnológica e performance competitiva**. Rio de Janeiro: FGV, 2003.

FINEP. Relatório setorial preliminar. Brasília, 2003.

FREEMAN, C. **The economics of industrial innovation**. London: Francis Printer, 1982.

GORGULHO, Cristiane Fernandes; OLIVEIRA, Silvia Souza de.; LOBATO, Natalia Cristina Candian; MERLO, Panmela Pereira; BRUM, Mariana Coutinho. Metalurgia da **Transformação do Ferro e do Aço**: Panorama de patenteamento no Brasil com foco na sustentabilidade. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2025. 81 p. (Radar Tecnológico INPI). Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/radares-tecnologicos>.

IAB - Instituto Aço Brasil. **Anuário Estatístico 2024**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024. Disponível em https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/08/AcoBrasil_Anuario_2025-1.pdf. Acesso em 17 março 2026.

IAB - Instituto Aço Brasil. **Anuário Estatístico 2025**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2025/08/AcoBrasil_Anuario_2025-1.pdf. Acesso em 17 março 2026.

LALL, S. A mudança tecnológica e a industrialização nas economias de industrialização recente da Ásia: conquistas e desafios. In: KIM, L.; NELSON, R. R. (Org.). **Tecnologia, aprendizado e inovação**: as experiências das economias de industrialização recente. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2005, p. 25-99.

LIMA, A. S. de; PESSOTI, G. C. Análise do padrão de concorrência na indústria siderúrgica brasileira. RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico, Salvador, Ano 13, n. 23, julho. 2011.

NELSON, R. R. (Org.). **Tecnologia, aprendizado e inovação**: as experiências das economias de industrialização recente. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2005, p. 413-448.

NELSON, Richard R.; WINTER, S. G. **An evolutionary theory of economic change**. Cambridge: Harvard University Press, 1982.

NELSON, Richard A.; PETERHANSL, A.; SAMPAT, B. Why and How Innovations Get Adopted: a Tale of Four Models. **Industrial and Corporate Change**, v. 13, n. 5, p. 679-699, 2004.

OLIVEIRA, V. C. P de. **Reestruturação setorial e capacitação tecnológica na indústria siderúrgica brasileira**. Dissertação (Mestrado). Campinas, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

OLIVEIRA, V. P., PINHO, M. **Padrão de Inovação na Indústria Siderúrgica Brasileira**. In: Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica, 24, 2006. Gramado. ANPAD, 2006.

PAULA, G. M. **Privatização e estrutura de mercados na indústria siderúrgica mundial**, 1998, 324 p. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. **Research policy**, Amsterdam, v. 13, n. 6, p. 343-373, 1984.

PINHO, M.; OLIVEIRA, V. P. **Internacionalização e tecnologia em empresas líderes da siderurgia mundial**. São Carlos: GEEIN-UNESP, 2002. (Relatório do projeto Comportamento Tecnológico das Empresas).

POSSAS, M. L. **Estruturas de mercado em oligopólio**. São Paulo: Hucitec, 1985.

SCHUMPETER, J. A. (1942). **Capitalismo, socialismo e democracia**. Rio de Janeiro: Zahar, 1984.

VIANA, F. L. E. Indústria Siderúrgica. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 6, n. 173, julho. 2021. Disponível em <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2796/1896>. Acesso em 15 mar. 2026.