

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS

ESCOLA BRASILEIRA DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA E DE EMPRESAS

MESTRADO EXECUTIVO EM GESTÃO EMPRESARIAL

***MARIA INÊS GARDONYI CARVALHEIRO***

***TRAJETÓRIA DE ACUMULAÇÃO DE CAPACIDADES TECNOLÓGICAS NO SETOR  
MINERAL: A EXPERIÊNCIA DE UMA EMPRESA BRASILEIRA NO BENEFICIAMENTO  
DE COBRE***

Projeto de dissertação do Curso de Mestrado Executivo em Gestão Empresarial, da Escola  
Brasileira de Administração Pública e de Empresas da Fundação Getulio Vargas

Professor Orientador: Dr. Paulo N. Figueiredo

Rio de Janeiro

Novembro | 2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas/FGV

Carvalho, Maria Inês Gardonyi

Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas no setor mineral: a experiência de uma empresa brasileira no beneficiamento de cobre / Maria Inês Gardonyi Carvalho. – 2019.

125 f.

Dissertação (mestrado) - Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, Centro de Formação Acadêmica e Pesquisa.

Orientador: Paulo N. Figueiredo.

Inclui bibliografia.

1. Minérios de cobre. 2. Cobre - Indústria. 3. Inovações tecnológicas 4. Política industrial - Brasil. 5. Aprendizagem organizacional. I. Figueiredo, Paulo N. II. Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas. Centro de Formação Acadêmica e Pesquisa. III. Título.

CDD – 338.2743



MARIA INÊS GARDONYI CARVALHEIRO

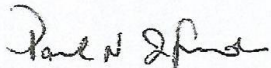
**“TRAJETÓRIA DE ACUMULAÇÃO DE CAPACIDADES TECNOLÓGICAS NO SETOR MINERAL: A EXPERIÊNCIA DE UMA EMPRESA BRASILEIRA NO BENEFICIAMENTO DE COBRE”.**

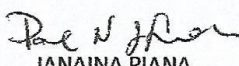
DISSERTAÇÃO apresentado(a) ao Curso de MESTRADO PROFISSIONAL EXECUTIVO EM GESTÃO EMPRESARIAL do(a) ESCOLA BRASILEIRA DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA E DE EMPRESAS para obtenção do grau de MESTRE(a) em ADMINISTRAÇÃO.

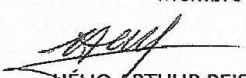
Data da defesa: 12/12/2019

**ASSINATURA DOS MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA**

**Presidente da Comissão Examinadora: Prof<sup>o</sup>/a PAULO CESAR NEGREIROS DE FIGUEREDO**

  
PAULO CESAR NEGREIROS DE FIGUEIREDO  
Orientador

  
JANAINA PIANA  
Membro

  
HÉLIO ARTHUR REIS IRIGARAY  
Membro



Instrução Normativa nº 01/19, de 09/07/19 - Pró-Reitoria FGV

Em caso de participação de Membro(s) da Banca Examinadora de forma não-presencial\*, o Presidente da Comissão Examinadora

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo ao longo desta jornada

À minha irmã Cristina, grande inspiração e parceira de todas as horas

Aos meus colegas da Vale que generosamente apoiaram a realização desta pesquisa

Ao Professor Paulo, pelo apoio e paciência ao longo da elaboração do trabalho

Aos meus colegas do mestrado, não poderia estar em melhor companhia nesta jornada!

## RESUMO

**Objetivo** - Esta dissertação se relaciona ao tema da acumulação de capacidades tecnológicas em nível de empresas que atuam na indústria de recursos naturais (mineração) em economias emergentes. O objetivo principal do trabalho é investigar como a trajetória de acumulação de capacidade de empresa de mineração que atua no Brasil no período entre 1992 e 2018 foi influenciada pela combinação de dois fatores: (i) condições organizacionais que incluem elementos ligados à evolução da estratégia corporativa da empresa, comportamento da liderança e sua resposta à janelas de oportunidade que se apresentaram ao longo do tempo e (ii) esforços de desenvolvimento de mecanismos de aprendizagem. Secundariamente, a pesquisa mostra as implicações para a performance competitiva.

**Metodologia** - Trata-se de um estudo de caso individual em profundidade na área de processamento mineral de cobre de uma empresa brasileira de mineração entre 1992 e 2018.

**Resultados** - A pesquisa evidenciou que há variações ao longo da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre com evolução de uma posição de seguidora tecnológica à posição intermediária/avançada de inovação baseada principalmente em adaptações e/ou criação novas tecnologias a partir de atividades baseadas em engenharia e atividades de P&D básico/aplicado realizadas internamente ou em parceria. No período inicial de análise, o estabelecimento de parcerias permitiu “pular etapas” e acumular mais rapidamente capacidades tecnológicas e se aproximar da fronteira tecnológica. No período subsequente, evidenciou-se um certo truncamento no desenvolvimento de capacidades de inovação em níveis intermediários/avançados. O último período analisado apresentou um padrão de *path follower*, ou seja construção e ampliação de capacidades tecnológicas a partir de adaptações/melhorias de tecnologias existentes realizadas a partir de atividades baseadas em engenharia, testes e experimentações e atividades de P&D básico e aplicado. Neste último período de análise evidenciou-se que a redução nos orçamentos (e equipes) voltadas para as atividades de P&D afetou o desenvolvimento de tecnologias disruptivas, com atraso no desenvolvimento destas tecnologias e indícios de entrada em um processo (fase de lock-in). As variações encontradas na trajetória de acumulação tecnológica são explicadas pela forma através da qual são combinados diferentes mecanismos de aprendizagem. Houve a geração de implicações para a performance competitiva da empresa em termos de performance operacional.

**Limitações** – Este estudo apresenta limitações relativas ao seu escopo e abrangência, principalmente em função da estratégia de pesquisa adotada (estudo de caso único em profundidade), que limita tanto a quantidade quanto a qualidade das evidências coletadas e sua análise.

**Aplicabilidade** – O trabalho também apresenta algumas contribuições para os gestores empresariais relativos a (i) articulação de diferentes atores envolvidos no processo de construção de capacidades para inovação e (ii) como diferentes mecanismos de aprendizagem podem ser combinados ao longo do processo de construção de capacidades para inovação.

**Contribuições para a sociedade** - Os resultados da pesquisa geram contribuições para o entendimento do relacionamento intra-empresarial entre acumulação de capacidades tecnológicas e os mecanismos de aprendizagem e que como os mesmos podem ser combinados ao longo do processo de construção de capacidades para inovação. Estes resultados também contribuem para o entendimento da mineração como uma indústria que oferece oportunidades para realização de inovação.

**Palavras-chave:** Capacidade tecnológica. Aprendizagem tecnológica. Performance Competitiva. Mineração.

**Categoria do artigo:** Dissertação de Mestrado

## ABSTRACT

**Purpose** -This dissertation relates to the issue of accumulation of technological capabilities at the firm level in the natural resources sector (mining) in the context of emerging economies. The purpose of the research is to explore variations of technological capabilities accumulation path of a Brazilian mining company, between 1992 and 2018. In particular, to explore how such path was influenced by the combination of two factors: (i) organizational conditions, including elements related to corporate strategy, leadership behavior and windows of opportunity and (ii) development of learning mechanisms. Secondly, implications generated for the competitive performance of the company are examined.

**Methodology** - The research design is operated from a single in depth case study within the copper mineral processing technology area of a Brazilian mining company between 1992 and 2018.

**Findings** - The research found variations in the technological capabilities accumulation path in the copper mineral processing from a position of technological follower path that achieves intermediate/advanced position in innovation and production. Such path was based in engineering activities and basic/applied R&D activities performed on a stand alone basis or through partnerships. During the initial period of analysis, the establishment of partnerships allowed for stage skipping and rapid accumulation of technological capabilities towards the technological frontier. In the subsequent period, there was a truncation in the development of technological capabilities in intermediate/advanced innovation. The last period of analysis showed a path follower pattern, with construction and enlargement of technological capabilities based in in engineering activities, tests, experimentations and basic/applied R&D activities. During this last period, reduction on budgets (and teams) dedicated to R&D activities impacted the development of disruptive technologies, resulting in delays in the development of such technologies and with indications of a stagnation process, (lock in). The variations found in the technology accumulation path are explained by the way in which different learning mechanisms were combined. The variations found in the technology accumulation path generated implications for the competitive performance.

**Research Limitations** – The research design (in depth single case study) presents limitations in terms os scope and reach of the analysis.

**Practical Implications** - The research generate contributions to managers on (i) how to articulate different individuals/areas within their organizations which are involved in the creation of technological capabilities for innovation and (ii) how different learning mechanisms can be combined during the process.

**Social Implications** – The research findings generate contributions to the understanding of intra-firm relationship between accumulation of technological capabilities and the underlying learning mechanisms; and how they can be combined during different phases of the process. In addition, contribute to the understanding of mining industry as an industry that offers opportunities for innovation.

**Keywords:** Technological Capability. Learning Capability. Competitive Performance. Mining.

**Paper category:** Master’s thesis

## INDICE

1.Introdução.....	12
2. Motivação e relevância da pesquisa .....	15
2.1 Problema de pesquisa .....	15
2.2 Justificativa do tema .....	16
3. Referencial teórico .....	21
3.1 Acumulação de capacidades tecnológicas em empresas de economias emergentes ( <i>latecomers</i> ) .....	21
3.2 Janelas de oportunidade e comportamento da liderança das empresas no desenvolvimento de estratégias para acumulação de capacidades tecnológicas .....	25
3.3 Aprendizagem tecnológica e fontes para acumulação de capacidades tecnológicas .....	26
3.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas para a performance competitiva da empresa .....	30
3.5 Modelo analítico predominante na literatura de acumulação de capacidades tecnológicas e foco da pesquisa .....	31
3.5.1 Operacionalização dos construtos da pesquisa .....	32
3.5.1.1 Acumulação de capacidades tecnológicas .....	32
3.5.1.2 Mecanismos de aprendizagem tecnológica .....	34
3.5.1.3 Implicações da acumulação de capacidade para a performance competitiva .....	37
4. Contexto empírico da pesquisa.....	38
4.1 Processamento de minérios de cobre: idéias básicas e foco da pesquisa .....	38
4.2 A Vale : panorama geral e desenvolvimento do negócio cobre .....	41
4.3 Evolução do modelo de gestão de tecnologia .....	53
4.4 Principais tendências tecnológicas da indústria de mineração .....	56
5. Desenho e método da pesquisa .....	59
5.1 Procedimentos para coleta de dados .....	60
5.2 Procedimentos para análise das evidências empíricas .....	62
6. Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas processamento mineral de cobre.....	66
6.1 Período Inicial (1992 – 2000) : Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas no processamento de minérios de cobre .....	68
6.1.1 Condições organizacionais e estratégia para o negócio cobre entre 1992 e 2000 .....	69
6.1.2 Acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 1992 e 2000.....	70

6.1.3 O papel dos mecanismos de aprendizagem na acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 1992 e 2000 .....	72
6.1.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas no período entre 1992 e 2000 ...	74
6.2 Período de Crescimento (2001 – 2011): Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre.....	75
6.2.1 Condições organizacionais, estratégia para o negócio cobre e janelas de oportunidade para o período entre 2001 e 2011 .....	76
6.2.2 Acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 2001 e 2011 .....	78
6.2.3 O papel dos mecanismos de aprendizagem na acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 2001 e 2011 .....	85
6.2.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas no período entre 2001 e 2011 .....	88
6.3 Período de Consolidação (2012 – 2018): Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre .....	89
6.3.1. Condições organizacionais: estratégia para o negócio cobre entre 2012 e 2018 .....	90
6.3.2 Acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 2012 e 2018 .....	91
6.3.3 O papel dos mecanismos de aprendizagem na acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre entre 2012 e 2018 .....	94
6.3.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas no período entre 2012 e 2018 ....	95
7. Discussão das evidências .....	97
7.1 Trajetórias de acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral na Vale: cobre versus minério de ferro .....	103
8. Conclusões e implicações .....	107
9. Referências Bibliográficas .....	114
Anexo 1 – Etapas processamento mineral cobre .....	121
Anexo 2 - Lista de entrevistas realizadas .....	123
Anexo 3 – Roteiro de entrevista .....	124



## Lista de Figuras

Figura 1 – Modelo analítico que prevalece na literatura de acumulação de capacidades tecnológicas e foco da pesquisa .....	32
Figura 2 – Rotas de processamento e extração para minério de cobre .....	39
Figura 3 – Evolução da produção brasileira de cobre (mil t de cobre contido) .....	40
Figura 4 – Mapa de atuação da Vale .....	41
Figura 5 – Evolução global de investimentos (excluindo aquisições) e gastos de P&D entre 2011 e 2018 .....	47
Figura 6 – Evolução modelo de gestão de tecnologia .....	55
Figura 7 - Evolução global de investimentos (excluindo aquisições) e gastos de P&D da Vale entre 2001 e 2011 .....	77
Figura 8 – Fluxograma de processo da usina do Sossego .....	81
Figura 9 – Fluxograma de processo da usina do Salobo .....	85
Figura 10 - Evolução global de investimentos (excluindo aquisições) e gastos de P&D da Vale entre 2012 e 2018 .....	90
Figura 11 – Evolução da trajetória de acumulação de capacidades na área de processamento mineral de cobre .....	100

**Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Escala para mensuração de capacidades tecnológicas .....	33
Tabela 2 – Mecanismos de aprendizagem .....	36
Tabela 3– Principais otimizações realizadas no circuito de cominuição do Sossego entre 2004 e 2011 .....	80

**Lista de Quadros**

Quadro 1 –Histórico do desenvolvimento de projetos de cobre da Vale na região de Carajás .....	52
Quadro 2 – Análise dos dados coletados através de entrevistas :capacidade tecnológica .....	63
Quadro 3 - Períodos de Análise da Pesquisa .....	64
Quadro 4 – Evolução da estratégia corporativa e estratégias de inovação .....	100

## 1. Introdução

Este trabalho tem por objetivo examinar a acumulação de capacidades tecnológicas no nível de empresa, suas fontes (mecanismos de aprendizagem) e de que forma condições organizacionais (que incluem elementos ligados à estratégia, comportamento da liderança e janelas de oportunidade) atuam como fatores moderadores. Secundariamente, são examinados os impactos para a performance competitiva das empresas. A partir de trabalhos pioneiros de Penrose (1959) e Chandler (1962), inúmeros autores se dedicaram ao entendimento de como se dá o processo de criação de capacidades para inovação e de como estas capacidades se traduzem em fonte de vantagem competitiva sustentável para as empresas. Inicialmente, o foco dos estudos estava voltado para empresas de economias avançadas. Mas a partir do final dos anos 1970 surgiram inúmeros trabalhos que procuravam analisar esta questão considerando a perspectiva de empresas de economias emergentes (i.e. *latecomers*), desconstruindo num primeiro momento a ideia então prevalente de que a estas empresas cabia tão somente um papel de seguidoras das empresas líderes mundiais através da aquisição de tecnologias. A partir dos anos 1990, surgiram inúmeros estudos com foco no processo de acumulação de capacidades por parte de empresas de economias emergentes; estes estudos destacam aspectos como fonte, velocidade, trajetórias e implicações deste processo de acumulação para diferentes empresas e setores (Kim, 1998; Kim, 1997).

Ainda é relativamente pequeno o número de trabalhos voltados para o entendimento desse processo de acumulação de capacidades tecnológicas pelas empresas no contexto de indústrias voltadas para recursos naturais (e ainda mais reduzido o número daqueles relativos a mineração). Exceções a essa regra são os trabalhos de Figueiredo (2014) e de Piana (2016) sobre a indústria de papel e celulose e sobre a mineração de ferro no Brasil, respectivamente. Neste sentido, este trabalho pretende analisar o processo de acumulação de capacidades tecnológicas pela empresa Vale S.A. no âmbito das tecnologias associadas ao processamento de minérios de cobre. Trata-se de um estudo de caso em

profundidade que procura analisar como se deu o processo de acumulação de capacidades e em que medida ele pode ser explicado pela aprendizagem tecnológica (expressa em mecanismos de aprendizagem).

Lall (1992), Bell e Pavitt (1995) e Bell e Figueiredo (2012) criaram diferentes tipologias e taxonomias para caracterizar níveis de construção de capacidades tecnológicas por empresas de economias emergentes. Neste trabalho, para operacionalização do construto acumulação de capacidades tecnológicas será utilizada uma escala de mensuração de capacidades tecnológicas baseada naquela desenvolvida por Piana (2016), na qual os níveis de capacidade tecnológica estão associados com o grau de novidade e complexidade das atividades tecnológicas. A partir de Bell (1984) e Bell e Figueiredo (2012), aprendizado é entendido como uma série de processos e mecanismos através do qual o aprendizado individual é convertido em aprendizado organizacional. O framework desenvolvido para operacionalização do construto aprendizado procura identificar processos e mecanismos para aquisição e conversão de conhecimento.

Para além do papel dos mecanismos de aprendizagem, a literatura apontada também a existência de outros elementos tais como o papel da liderança, a articulação da estratégia de corporativa e de inovação como importantes para explicar as diferenças de trajetória tecnológica (Tidd, Pavitt, Bessant 2005). A literatura registra um prolongado debate a respeito dos impactos da criação de capacidades para inovação na performance competitiva das empresas. Por um lado, autores ligados a literatura de gestão estratégica consideram a capacidade para inovação como fonte de vantagem competitiva sustentável para as empresas (Peteraf, 1993, Eisenhart e Martin, 2000; Teece et al, 2007). Outros autores que analisam a questão a partir da perspectiva de empresas de economias emergentes destacam que a capacidade das empresas de implementar atividades de inovação e atingir performance distintiva reflete a natureza e profundidades de suas capacidades tecnológicas (Lall,

1992; Bell e Pavitt, 1993). Este trabalho pode de alguma forma contribuir (ainda que de forma modesta) para este debate.

## 2. Motivação e relevância da pesquisa

### 2.1 Problema de pesquisa

A questão central que este trabalho se propõe a investigar é se existem variações na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da empresa Vale S.A. (“Vale”, “empresa”, “companhia”)<sup>1</sup> na área de produção de cobre. A partir de Bell & Figueiredo (2012), trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas em empresas no contexto de economias emergentes (ie *latecomers*) refere-se ao caminho percorrido pela empresa para se aproximar ou alcançar a fronteira tecnológica. Especificamente, o foco da pesquisa é (i) a acumulação de capacidades tecnológicas pela empresa Vale nas áreas de beneficiamento<sup>2</sup> de minérios de cobre e (ii) esforços da companhia para o desenvolvimento de depósitos de cobre na região de Carajás<sup>3</sup>. O objetivo principal é investigar como esta trajetória de acumulação de capacidade foi influenciada pela combinação de dois fatores, a saber: (i) condições organizacionais que incluem elementos ligados à evolução da estratégia corporativa da empresa, comportamento da liderança e sua resposta à janelas de oportunidade (i.e. demanda, tecnologias, institucional e fatores idiossincráticos) que se apresentaram ao longo do tempo e (ii) esforços de desenvolvimento de mecanismos de aprendizagem e esforços de construção de capacidades para inovação, entendida aqui a partir de processos conscientes, não automáticos, ativos e deliberados, através dos quais habilidades e conhecimentos técnicos são adquiridos por indivíduos e pela organização (Bell & Figueiredo, 2012). De forma secundária, se procura avaliar os impactos desta trajetória de capacidades tecnológicas na performance competitiva da empresa (Figueiredo, 2014). Estes objetivos estão sintetizados abaixo:

---

<sup>1</sup> Em 2007 a empresa alterou seu nome de Companhia Vale do Rio Doce para Vale S.A. Ao longo destes documento a empresa será tratada por Vale, mesmo nos períodos anteriores a 2007.

<sup>2</sup> Ao longo do trabalho, processamento e beneficiamento de minério serão utilizados como sinônimos para descrever uma série de operações realizadas com o objetivo modificar a granulometria, a concentração relativa dos minérios presentes ou a sua forma.

<sup>3</sup> Projetos e operações de cobre da empresa em outros países (Chile e Indonésia, por exemplo), bem como produção de cobre como subproduto das operações de níquel da Vale no Canadá não são objeto desta pesquisa.

(A) Até que ponto tem havido acumulação de capacidades tecnológicas da Vale (no beneficiamento de minérios de cobre no período entre 1992 e 2018?

(B) Investigar de que forma esta trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da Vale no beneficiamento de minérios de cobre foi afetada tanto pelos esforços para desenvolvimento de mecanismos de aprendizagem quanto pela evolução da estratégia corporativa da empresa para o desenvolvimento do negócio cobre.

De forma secundária, também se procura investigar como essa acumulação de capacidades afetou a performance competitiva da empresa em termos de desempenho operacional.

## **2.2 Justificativa do tema**

Dobra et al (2018) sintetizam o extenso debate relativo ao papel da mineração no desenvolvimento econômico, industrial e tecnológico dos países. De um lado existe a perspectiva denominada “*boom and bust*”, cujo foco reside na análise do desenvolvimento econômico a partir do desenvolvimento de recursos naturais (Hirschman, 1958) e no impacto desestabilizadores dos choques de oferta e demanda de commodities sobre emprego e renda. Por outro lado, existe a perspectiva “*resource curse*” (ou praga holandesa) que se desenvolveu nos anos 1960 e 1970 (período de elevação dos preços de commodities de forma geral) para explicar os entraves ao desenvolvimento econômico de países ricos em recursos naturais (Mikesell, 1997). Sachs e Warner (2001) indicaram que o desenvolvimento de um setor exportador de recursos naturais (i) acaba por retardar o desenvolvimento de outros setores da economia como a indústria e (ii) apresentam baixo teor de conhecimento envolvido em suas atividades e (iii) possuem oportunidades limitadas para o desenvolvimento tecnológico. Entretanto, mais recentemente autores como Pérez (2010), analisam o contexto de países latino-americanos e



entendem que a abundância de recursos naturais e as capacidades tecnológicas acumuladas para sua exploração permitem a estes países obter vantagens comparativas no comércio internacional, especialmente em relação aos países do Leste Asiático. Especificamente no caso brasileiro, Furtado & Urias (2013) destacaram o papel positivo que os investimentos realizados para atender a ampliação da produção de minério de ferro acarretou em termos de geração direta e indireta de valor adicionado e de demanda sobre outros setores da economia. Neste sentido, este trabalho pode contribuir de alguma forma para o melhor entendimento do papel da mineração no desenvolvimento econômico, industrial e tecnológico dos países.

É prevalente tanto na literatura quanto entre os formuladores de políticas públicas (e mesmo entre o público em geral) a visão de que as indústrias de recursos naturais são caracterizadas por baixa intensidade tecnológica quando analisadas a partir de classificações padrão como por exemplo aquela estabelecida pela OECD. No caso da mineração, em função do alto grau de especificidade (i.e. nenhum depósito mineral é idêntico a outro) se torna especialmente difícil a análise desta atividade a partir deste tipo de classificação padrão. Historicamente, as inovações na indústria mineral tiveram como motor principal os desafios impostos pela geologia (notadamente o declínio de teores e a crescente complexidade mineralógica), desafios que tornaram necessário buscar a manutenção de níveis satisfatórios de custos de produção e produtividade de forma a atender a demanda por diferentes tipos de minério (Peterson et al., 2001, Scott-Kemmis, 2013). Posteriormente, fatores como questões ambientais, saúde e segurança, responsabilidade social e falta de mão de obra adquiriram importância crescente e passaram a representar novos desafios a serem superados pela indústria (Barnett and Bell, 2011). A busca da superação destes desafios fez com que a mineração se tornasse uma atividade cada vez mais intensiva em conhecimento, com aumento das atividades de P&D e inovação. Esta indústria se torna uma articuladora do fluxo de conhecimento de diferentes campos científicos

e de soluções técnicas advindas de diversas indústrias, permitindo a criação de elos que facilitam a geração e o fluxo de conhecimento entre diferentes atividades econômicas e entre estas atividades e diferentes organizações de ensino e pesquisa (Furtado e Urias, 2013; Scott-Kemmins 2013). O desenvolvimento de ligações entre as empresas mineradoras e fornecedores de equipamentos e serviços de mineração passou a ser tão (ou mais importante) que as ligações com as indústrias consumidores dos minérios/metals (Urzua, 2013; Scott-Kemmis, 2013), num processo caracterizado pela emergência de *knowledge intensive mining services* (“KIMS”) em países como Austrália, África do Sul e Suécia (Scott-Kemmis, 2013). Mais recentemente as tecnologias digitais (tais como *machine learning*, inteligência artificial, internet das coisas e *big data*), aliada a biotecnologia e nanotecnologia abriram caminho para enfrentar os desafios colocados pelas crescentes pressões sociais e ambientais para indústria de mineração, aumentando a produtividade e reduzindo os impactos sociais e ambientais (Pietrobelli et al 2018; Katz e Pietrobelli, 2018). Este trabalho busca dar uma contribuição (ainda que modesta) para o debate sobre a caracterização das indústrias de recursos naturais (a mineração, em especial) como atividade cada vez mais intensiva em conhecimento, na qual o incremento de atividades de P&D e inovação são cada vez mais importantes para manutenção da competitividade das empresas.

A partir do final dos anos 1970 começaram a surgir estudos sobre acumulação de capacidades tecnológicas inovadoras por empresas em economias emergentes, destacando aspectos como fonte, velocidade, trajetórias e implicações deste processo de acumulação para diferentes empresas e setores. Kim (2003) definiu trajetórias tecnológicas como a direção do avanço tecnológico observado em diferentes indústrias e setores; esse processo tende a se dar a partir de um processo de inovações incrementais no qual tipicamente emerge uma tecnologia dominante. Trajetórias tecnológicas alternativas podem surgir (e mesmo co-existir) com a

tecnologia dominante (Kemp et al., 1998). Empresas de economias emergente tanto podem seguir a trajetória de desenvolvimento tecnológico das empresas líderes, quanto podem explorar essa fluidez da fronteira tecnológica de forma a desenvolver novas trajetórias que permitam alcançar a posição de liderança (Bell e Figueiredo, 2012). Ainda segundo estes autores, os vários estudos que descrevem a trajetória de capacidade tecnológica dessas empresas indicam que existem diferenças consideráveis tanto em relação ao aprofundamento das capacidades quanto a velocidade com que estas empresas iniciam suas operações até acumular capacidades próximas a fronteira tecnológica.

Adicionalmente, Lall (1992) e Bell e Pavitt (1993) apontam o papel fundamental dos mecanismos de aprendizagem nesse processo de acumulação de capacidades tecnológicas. A literatura aborda esta relação entre acumulação de capacidades e mecanismos aprendizagem tanto sobre a perspectiva de firmas individuais quanto da interdependência entre estas e outras organizações (tais como universidades, clientes e fornecedores, subsidiárias e matriz). É importante destacar também que a literatura (especialmente a de gestão da inovação em empresas em economias desenvolvidas) aborda mais frequentemente os processos de gestão de capacidades existentes e não em como são geridos os processos de construção destas capacidades. Os trabalhos de Dutrènit (2000) e Figueiredo (2001) fornecem importantes contribuições sobre como se dá esta integração entre diferentes formas de conhecimento e capacidades, em especial no que diz respeito aos mecanismos de conhecimentos em diferentes partes da organização e de capacidades criadas a partir diferentes mecanismos de aprendizagem. A partir do entendimento das diferenças de trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas, este estudo pretende contribuir para que os gestores empresariais (da Vale e outras empresas) tenham um melhor entendimento sobre a importância de (1) aprimorar a articulação dos vários atores dentro da organização envolvidos no processo de construção de capacidades

para inovação e (2) combinar diferentes mecanismos de aprendizagem em diferentes momentos do processo de construção de capacidades para inovação (fase inicial, de consolidação e fronteira tecnológica).

Adicionalmente, o trabalho buscar entender similaridades e diferenças relativas ao papel dos mecanismos de aprendizagem para explicar as variações de acumulação de capacidade tecnológica na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da Vale no processamento de minérios de cobre em relação as conclusões do estudo de Piana (2016) relativos ao minério de ferro. O trabalho também procura contribuir para o entendimento do papel de outros elementos importantes no processo de construção de capacidades tecnológicas para inovação, notadamente o papel da liderança e a articulação da estratégia para inovação com a estratégia corporativa da empresa. Estratégias de inovação envolvem elementos de escolha deliberada, mas que também apresenta elementos de aprendizado que refletem situações inesperadas, que por sua vez impactam a estratégia (Pavitt, 1990, Freeman e Soete, 1997).

Por fim, este trabalho pretende contribuir para o melhor entendimento das implicações que a trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas para inovação tem sobre a performance competitiva das empresas (performance operacional).

### 3. Referencial teórico

A partir da literatura de acumulação de capacidades tecnológicas para inovação e de aprendizagem organizacional, a base conceitual utilizada para o desenvolvimento deste trabalho se apoia na revisão de literatura relativa ao processo de acumulação de capacidades tecnológicas em empresas de economias emergentes (i.e. *latecomers*), os processos de aprendizagem tecnológica como fonte para acumulação de capacidades tecnológicas e as implicações da acumulação de capacidade tecnológica para a performance competitiva das empresas. Também são examinados o papel que janelas de oportunidade e lideranças têm na construção e manutenção das capacidades tecnológicas das empresas, na medida em que as estratégias de inovação envolvem não só elementos de escolha deliberada, mas também elementos de aprendizado derivado de mudanças e oportunidades do contexto (por exemplo, ciclos econômicos) e situações inesperadas que acabam por influenciar a definição de estratégias (Pavitt, 1990, Freeman e Soete, 1997).

#### 3.1 Acumulação de capacidades tecnológicas em empresas de economias emergentes (*latecomers*)

A partir dos trabalhos de Katz (1987) e Dahlman *et all* (1987), vários estudos empíricos foram realizados para entender o processo de acumulação de capacidades tecnológicas por empresas de economias emergentes, fornecendo rico material para entender a trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas para inovação (por exemplo, aspectos relativos a sua natureza e velocidade), bem como as implicações para a performance competitiva destas empresas. Exemplos destes trabalhos podem ser encontrados em Kim (1997) relativo a indústria automobilística na Coreia, Dutrènit (2000) relativo a indústria de vidro no México e Figueiredo (2001) sobre siderurgia no Brasil. Vale destacar que este processo de desenvolvimento de tecnologias tem uma natureza tácita e envolve vários aspectos de

aprendizado individual e organizacional e que estão de certa forma imersos no tecido organizacional e no contexto no qual são desenvolvidos (Bell e Pavitt, 1995). Os autores também diferenciam o desenvolvimento de capacidades para produção e para inovação (Bell e Pavitt, 1993). De acordo com o Manual de Oslo da OCDE (2007), inovações tecnológicas incluem tanto a introdução de novos produtos e processos quanto aprimoramentos tecnologicamente significativos nos mesmos.

Conforme sintetizado por Amann e Catwell (2012), o desenvolvimento de capacidades tecnológicas pelas empresas apresenta as seguintes características básicas: (1) o processo de aprendizado pela empresa é consciente, custoso e feito de forma proposital, não sendo portanto nem automático nem passivo e envolve elementos de conhecimento tácito e vão além do “aprender-fazendo”; (2) processo de aprendizado tende a ser cumulativo, dependente de uma trajetória, num processo de crescimento a partir de uma base estabelecida de capacidades e rotinas organizacionais (Nelson e Winter, 1982; Bell e Pavitt, 1993); (3) o processo de aprendizado é específico com relação a diferentes tecnologias e setores; (4) o desenvolvimento de capacidades envolve esforços em vários níveis da empresa; (5) a progressão de capacidades básicas para aquelas cada vez mais sofisticadas envolve a transição entre obtenção de capacidades operacionais de “saber fazer” (ie *know-how*) para um entendimento mais profundo dos princípios da tecnologia utilizada (ie *how-why*), permitindo assim que a empresa desenvolva suas capacidades a partir de interdependência de conhecimentos necessários para avançar na escala de desenvolvimento tecnológico, diversificando sua base tecnológica de forma a estar melhor preparada tanto para utilizar know-how existente quanto para enfrentar (e eventualmente aproveitar-se) de mudanças tecnológicas não previstas. Neste sentido, os autores enfatizam que o desenvolvimento tecnológico deixa de estar atrelado a conceito de operar na fronteira tecnológica e (6) o processo de aprendizado tecnológico não ocorre de

forma isolada, mas sim é resultado de uma série de externalidades centradas na produção de conhecimento e de vínculos com outros atores (por exemplo, outras empresas, universidades e institutos de pesquisa, órgãos governamentais, entre outros). Os autores destacam que muitas vezes estes vínculos têm um caráter informal e muitas vezes são dependentes de proximidade geográfica associada a clusters de indústrias.

A literatura indica que existem diferentes caminhos através dos quais as empresas de economias emergentes podem se aproximar da fronteira tecnológica internacional. Bell e Figueiredo (2012) indicam que existem dois tipos de catch-up : (i) catch-up de produção, através do qual as empresas de economias emergentes reduzem a distância entre as tecnologias que utilizam na produção e àquelas tecnologias utilizadas pelas empresas líderes na fronteira de produção internacional e (ii) catch-up tecnológico, no qual as empresas de economias emergentes reduzem a distância que as separa das empresas líderes globais em inovação via geração de capacidades para criar e gerenciar as tecnologias que utilizam, podendo ainda desenvolver atividades de inovação na fronteira tecnológica internacional. De acordo com os autores, a acumulação de capacidades para inovação não tem necessariamente pontos fixos de chegada até a fronteira tecnológica existente e o desenvolvimento de capacidades para inovação permite que as empresas desenvolvam tecnologias, produtos ou processos distintos daqueles desenvolvidos pelos líderes globais. Desta forma, as empresas de economias emergentes podem explorar esta relativa fluidez da fronteira tecnológica. A partir da análise de indústria coreanas, Lee e Lim (2001) identificaram três trajetórias de acumulação de capacidade tecnológica que permitiram as empresas realizar o catch-up com a fronteira tecnológica : (i) trajetória de seguidores (*path-following*), (ii) trajetória de pular etapas (*stage-skipping*) e (iii) criação de nova trajetória (*path-creating*). A partir do desenvolvimento de capacidades tecnológicas para inovação de forma a se aproximar da fronteira tecnológica, o

comportamento das empresas de economias emergentes passa a ser similar àquele das empresas líderes globais de economias desenvolvidas. O foco agora está em como utilizar, manter e expandir suas capacidades tecnológicas para inovação, num processo de recriação e reconstrução de novas e distintivas posições de vantagem competitiva.

Figueiredo (2014) e Dutrènit (2004) destacam que a literatura voltada para a de gestão estratégica considera que o desenvolvimento de capacidades para inovação conduz a geração de vantagens competitivas para as empresas. A partir de trabalhos de Penrose (1959) e Chandler (1962), este debate a respeito da criação de capacidades para inovação como fonte de vantagem competitiva sustentável para as empresas está refletida tanto nos autores afiliados a corrente da visão baseada em recursos (“RBV”, “*resource based view*”) (Peteraf, 1993) quanto para a corrente de capacidades dinâmicas (Teece, 2007; Eisehart e Martin, 2000). Por outro lado, a perspectiva literatura voltada para acumulação de capacidades tecnológicas para inovação por empresas de economias emergentes considera que a capacidade de inovação (e atingimento de performance superior) está relacionada a natureza e profundidade das capacidades tecnológicas (Lall, 1992; Bell e Pavitt, 1993); de forma que as capacidades da empresa permitem que as atividades de inovação sejam implementadas com diferentes graus de novidade e complexidade, com importantes reflexos sobre a performance operacional e financeira das empresas. Neste trabalho, a operacionalização do construto implicações para performance competitiva das empresas será realizada a partir de Figueiredo (2014) e considera desempenho operacional.

Lall (1992), Bell e Pavitt (1995) e Bell e Figueiredo (2012) criaram diferentes tipologias e taxonomias para caracterizar níveis de construção de capacidades tecnológicas por empresas de economias emergentes. Neste trabalho, para operacionalização do construto acumulação



de capacidades tecnológicas será utilizada uma escala de mensuração de capacidades tecnológicas baseada naquela desenvolvida por Piana (2016) a partir de Figueiredo (2001), Bell e Figueiredo (2012) e Urzúa (2013). Nesta escala os níveis de capacidade tecnológica estão associados com o grau de novidade e complexidade das atividades tecnológicas, incluindo 4 níveis distintos para produção e inovação: (i) nível 1 – produção básica/avançada: capacidade de usar tecnologias existentes com grau de eficiência e qualidade local (básica) ou em níveis globais (avançada); (ii) nível 2 – inovação básica: capacidade de implementação de atividades tecnológicas com base em pequenas adaptações e melhorias de tecnologias existentes; (iii) nível 3 – inovação intermediária: capacidade para implementar atividades inovadoras de natureza incremental a partir de mudanças mais complexas normalmente baseada em engenharia e experimentações realizadas internamente ou em parceria; (iv) nível 4 – inovação avançada/liderança mundial: capacidade para implementar atividades inovadoras de natureza similar aos líderes globais dentro de uma trajetória tecnológica existente (avançada) ou capacidade de implementar atividades inovadoras em tecnologia com grau de novidade mundial, com impacto disruptivo no modelo de negócios, no ambiente de negócio e ou que abrem novos segmentos na fronteira tecnológica (liderança mundial).

### **3.2 Janelas de oportunidade e comportamento da liderança das empresas no desenvolvimento de estratégias para acumulação de capacidades tecnológicas**

A noção de janelas de oportunidade no contexto de catch-up tecnológico foi introduzida por Perez e Soete (1998) e expandido por Lee e Malerba (2017), incorporando as seguintes dimensões: (i) tecnológica, caracterizada pela emergência de inovações radicais, (ii) demanda, inclui mudanças na demanda potencial, nas necessidades e uso pelos consumidores e ciclos de negócio (i.e. fases de crescimento e retração e (iii) institucional, relativa a alterações em políticas públicas (legislação, regulamentação, incentivos fiscais) e infraestrutura para

educação e pesquisa. Figueiredo e Cohen (2019) consideram uma quarta dimensão ligada a problemas idiossincráticos relativos a especificidades locais e idiossincrasias do conhecimento inerentes às indústrias intensivas em recursos minerais. Especificamente, estes problemas envolvem questões relativas a questões geológicas (redução de teores, maior complexidade mineralógica), meio ambiente, saúde e segurança que representam desafios para manutenção de níveis satisfatórios de custo e produtividade (Barnett e Bell, 2011).

A literatura aponta que a liderança (*top management* e outros níveis gerenciais) tem um papel importante no estabelecimento e manutenção do processo de construção de capacidades inovativas pelas empresas (Leonard-Barton, 1995 e Pavitt, 1990). Estratégias de inovação envolvem elementos de escolha deliberada, mas que também apresenta elementos de aprendizado que refletem situações inesperadas, que por sua vez impactam a estratégia (Pavitt, 1990, Freeman e Soete, 1997).

### **3. 3 Aprendizagem tecnológica e fontes para acumulação de capacidades tecnológicas**

A partir da literatura de acumulação de capacidades tecnológicas em economias emergentes, a premissa adotada nesta pesquisa é que a aprendizagem tem um papel fundamental no processo de acumulação de capacidades tecnológicas inovadoras em nível de empresas (Lall, 1992; Bell e Pavitt, 1993, Bell e Figueiredo, 2012). A partir de Dutrènit (2006) e Figueiredo (2010), a perspectiva adotada neste trabalho é a de que não existe progressão linear de acumulação de conhecimento a partir de uma base mínima até a gestão de conhecimento pelas empresas como uma capacidade estratégica. Conforme apontado por Dutrènit, na medida em que o estoque de conhecimento se amplia, surgem diferentes desafios relativos ao gestão de conhecimento, envolvendo diferentes processos organizacionais de conversão de conhecimento individual em organizacional, a coordenação de diferentes estratégias de

mecanismos de aprendizagem por diferentes áreas e/ou unidades de negócio e a gestão do processo de criação de conhecimento propriamente dito. Este entendimento se torna ainda mais relevante num contexto de decomposição organizacional do processo de inovação (Schmitz e Strambach, 2009), que inclui a descentralização intra-organizacional do processo de inovação (por exemplo, matriz e subsidiárias ou corporação e áreas de negócio) e inter-organizacional (conceito de inovação aberta popularizado por Chesbrough, 2003).

Bell (2009) aponta a complementariedade de diferentes fontes para construção de capacidades para inovação relativas a geração de conhecimento tanto através de atividades formais de P&D (nas empresas e em instituições de pesquisa) quanto por meio de conhecimento gerado a partir de atividades de experimentação, design e engenharia (pelas próprias empresas ou em parceria com outras organizações e empresas ligadas as atividades de produção da companhia). O framework desenvolvido por Jensen et al (2007) e Lundvall e Lorenz (2007) apresenta uma conciliação de dois mecanismos para geração de conhecimento (i) *science, technology, and innovation* (“STI”) e (ii) *learning by doing, using, and interaction* (“DUI”). Os autores sugerem que empresas que utilizam uma combinação destas duas estratégias de geração de conhecimento tem maior probabilidade de desenvolver produtos inovadores. Este framework STI/DUI foi utilizado em estudos de diferentes indústrias de economias avançadas, mas foi pouco utilizado para análise de indústrias de recursos naturais em economias emergentes.

Leonard-Barton (1995) identificou quatro atividades de aprendizagem relacionadas a criação e controle do conhecimento para operações existentes e futuras das empresas: (i) capacidade de resolução de problemas associada a produtos existentes, (ii) implementação e integração de novas metodologias e ferramentas que permitam melhorar as operações internas, (iii) processos de experimentação (formais e informais) que permitam desenvolver novas capacidades e (iv)

utilização ou contratação de *expertise* externa à empresa. O conhecimento, as habilidades dos empregados e os sistemas técnicos físicos existentes constituem reservatórios de conhecimento; enquanto os sistemas de gestão, valores e normas das empresas representam mecanismos de controle e direcionamento do conhecimento acumulado. Para Leonard-Barton, a combinação destas diferentes dimensões representa uma vantagem estratégica que é construída pelas empresas ao longo do tempo, e que não é facilmente imitada ou transferida. A autora destaca o importante papel que os gestores têm no desenho de organizações preparadas para a criação, absorção de conhecimento por seus empregados e pela organização como um todo. De forma análoga, Kim (1998) ao examinar a trajetória de desenvolvimento tecnológico da Hyundai identificou que o processo de aprendizagem estava organizado num fluxo circular envolvendo quatro etapas: (i) preparação interna para aquisição de conhecimento externo, incluindo atividades como revisão de literatura, socialização de conhecimento tácito existente, identificação de alternativas de tecnologia disponíveis, contratação de engenheiros ou consultores técnicos, organização de times de projeto, entre outras; (ii) aquisição do conhecimento externo, incluindo atividades como negociação de termos e condições para aquisição de tecnologia, organização de treinamentos; (iii) efetiva assimilação do conhecimento, de forma a permitir uma absorção ativa e integração da tecnologia através de adaptações, learning by doing, conversão de conhecimento e socialização do mesmo e (iv) melhorias subsequentes de forma a criar uma base de conhecimento para um novo ciclo de aprendizagem. Os esforços internos têm um papel fundamental tanto na criação de uma base de conhecimento necessária para aquisição de tecnologias externas quanto na efetiva absorção do que foi adquirido externamente (Bell e Figueiredo, 2012).

Os mecanismos de aprendizagem podem ser caracterizados como (i) mecanismos internos à empresa (i.e. relativos aos processos de aquisição, assimilação, conversão e reprodução de

conhecimentos por indivíduos através de processos internos à organização) e (ii) mecanismos externos à empresa (i.e. aqueles relativos a aquisição de conhecimento tácito e/ou explícito de fontes e atores externos a empresa)(Bell e Figueiredo, 2012). Mecanismos de aprendizagem intra-organizacionais e inter-organizacionais, podem ser caracterizados em termos de variedade (i.e. forma como os mecanismos de aprendizagem ocorrem internamente a empresa e em parceria entre a empresa e outras organizações), impactos (i.e. refere-se às novas atividades tecnológicas que a empresa passou a realizar e que foram expressas através dos mecanismos de aprendizagem, incluindo qualquer tipo de atividade que contribua para reforço ou acumulação de novas capacidades tecnológicas), parceiros (refere-se às organizações envolvidas em conjunto com a empresa incluindo universidades, centros de pesquisa, fornecedores, clientes, entre outros) e direção e origem (i.e. curso predominante dos fluxos de conhecimento e envolvem a empresa e parceiros). A operacionalização do construto aprendizagem será realizada através dos diferentes mecanismos de aprendizagem utilizados pelas empresas para construir capacidade tecnológica.

Por fim cabe destacar que a literatura também aponta outros fatores relevantes no processo de acumulação de capacidades tecnológicas pelas empresas, em especial o papel da liderança e da inter-relação entre a estratégia corporativa e a inovação. Tidd, Pavitt e Bessant (2005) destacam a importância de entender as ligações existentes entre as várias áreas funcionais das empresas envolvidas no processo de construção de capacidades tecnológicas para inovação e em especial (i) a localização da(s) área(s) dentro da empresa voltadas ao desenvolvimento de tecnologia, (ii) o papel que estas áreas têm na alocação de recursos corporativos e (iii) a relação entre a estratégia para inovação e a estratégia corporativa. Dutrénit (2006) mostrou como a instabilidade da estratégia para desenvolvimento de tecnologias influenciou os processos de aprendizagem e acumulação de conhecimento, fornecendo *insights* importantes para análise da

trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da Vale na área de processamento mineral de cobre. A autora reforça a perspectiva de Leonard-Barton de que a construção de capacidades tecnológicas é um processo dinâmico e não linear e aponta também o impacto negativo que fatores externos (como, por exemplo, instabilidades macroeconômicas) pode afetar (i) a conversão de conhecimento individual em conhecimento da organização, (ii) a coordenação de diferentes estratégias de aprendizagem e (iii) a continuidade do processo de criação de conhecimento. Bell and Figueiredo (2012) enfatizam o importante papel desempenhado pela liderança no processo de construção de capacidades tecnológicas.

### **3.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas para a performance competitiva da empresa**

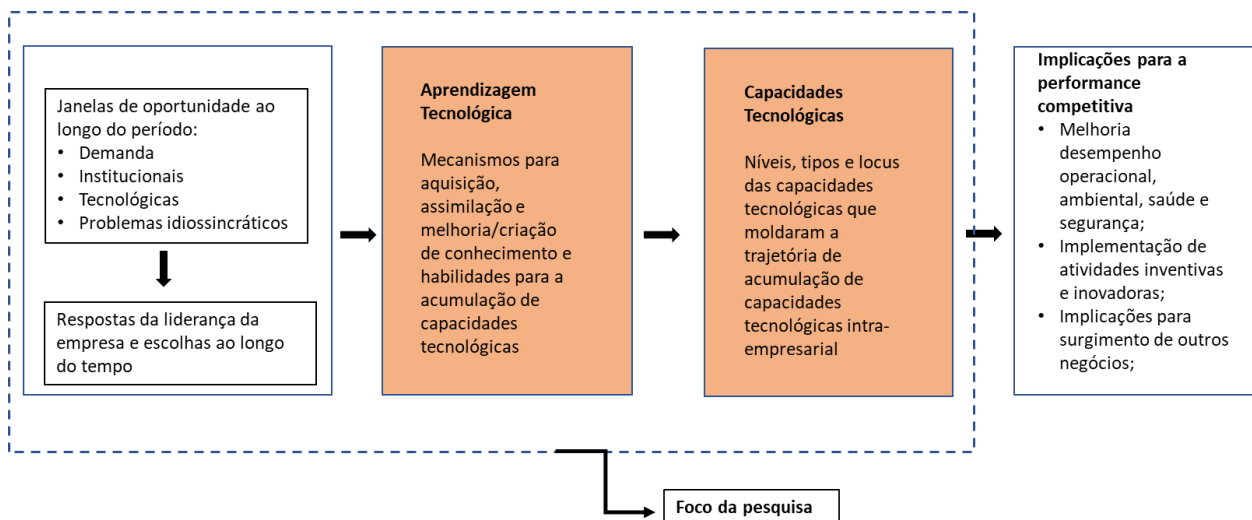
As implicações da acumulação de capacidades tecnológicas em empresas *latecomers* são abordadas pela literatura a partir de vários prismas. Uma das implicações mais estudadas diz respeito ao catch-up (tecnológico ou de produção) em relação aos líderes globais (Bell e Figueiredo, 2012). Outros estudos abordam as implicações em termos de (i) desempenho operacional e ambiental, (ii) desempenho inovativo e (iii) crescimento das empresas (Figueiredo, 2014). O desempenho operacional se refere a parâmetros técnicos, tais como produtividade e qualidade de produto; Figueiredo (2001) destaca a importância que a melhoria no desempenho operacional tem para as empresas de economias emergentes, uma vez que as mesmas iniciam suas atividades operacionais com níveis de desempenho abaixo dos padrões mundiais. O alcance destes padrões mundiais requer que estas empresas melhorem seu desempenho mais rapidamente do que as empresas que operam na fronteira tecnológica (Figueiredo, 2011). Com relação aos padrões de crescimento das empresas, a partir de Penrose (1959) e Chandler (1962) uma série de autores como Torres-Vargas (2006) e Figueiredo (2014) demonstram o crescimento da empresa a partir da análise da direção do crescimento de

mercados e produtos, a partir de três categorias principais: (i) integração horizontal, que ocorre a partir do aumento de instalações existentes, criação de novas instalações (crescimento orgânico) ou a partir de processos de fusão e aquisição de empresas já existentes para aumentar a produção de portfólio de produtos existentes; (ii) integração vertical (*upstream*, *downstream*), que ocorre quando a empresa inicia a produção de máquinas, matérias primas ou outros componentes que anteriormente eram fornecidos por outras empresas e (iii) diversificação, que pode ocorrer de forma direta (quando a empresa inicia a produção de novo produto para novos mercados) ou indireta (quando novas empresas surgem a partir de pesquisas realizadas em parceria pela empresa e outras organizações (universidades, competidores, fornecedores, etc).

### **3.5 Modelo analítico que prevalece na literatura de acumulação de capacidades tecnológicas e foco da pesquisa**

Conforme indicado anteriormente, o foco da pesquisa está no exame da acumulação de capacidades tecnológicas a partir de esforços para desenvolvimento de mecanismos de aprendizagem e da evolução da estratégia corporativa da empresa para o desenvolvimento do negócio cobre. Também foram analisadas, de forma secundária, as implicações para performance competitiva da empresa com relação ao seu desempenho operacional. A Figura 1 abaixo, apresenta o relacionamento das variáveis e o foco da pesquisa a partir de um modelo analítico que prevalece na literatura de acumulação de capacidades tecnológicas. A partir de Bell e Figueiredo (2012) e Figueiredo e Piana (2019), este trabalho adotou o modelo descrito na Figura 1, abaixo como a base de orientação para a pesquisa.

Figura 1 – Modelo analítico que prevalece na literatura de acumulação de capacidades tecnológicas e foco da pesquisa



Fonte: adaptado de Bell e Figueiredo (2012) e Figueiredo e Piana (2019 ainda não publicado)

Segundo Bell e Figueiredo (2012), a literatura de acumulação de capacidades aborda vários outros fatores que influenciam o processo de acumulação de capacidades tecnológicas, incluindo entre outros: (i) fatores em nível de empresa, como tamanho e tempo de existência da empresa, propriedade nacional ou internacional, orientação de mercado (exportação versus atendimento mercado doméstico), estrutura de governança das cadeias de valor, (ii) fatores em níveis de indústria, como os sistemas setoriais de inovação, natureza da tecnologia, (iii) fatores econômicos e globais (incluindo incentivos macroeconômicos, para competição ou para fatores de produção) entre outros.

### 3.5.1 Operacionalização dos construtos da pesquisa

#### 3.5.1.1 Acumulação de capacidades tecnológicas

Para análise de acumulação de capacidades tecnológicas inovadoras no processamento mineral foi utilizada uma estrutura adaptada de Piana (2016) representada na Tabela 1, abaixo. A



métrica de mensuração de capacidades tecnológicas foi desenvolvida considerando duas trajetórias de desenvolvimento tecnológico: capacidade de produção e capacidade de inovação.

A escala desenvolvida por Piana foi adaptada de forma a refletir de forma mais adequada as evidências empíricas coletadas, principalmente em função de (i) período de análise mais curto (26 anos na presente pesquisa versus 70 anos em Piana), (ii) menor abrangência de áreas tecnológicas analisadas (processamento mineral de cobre versus prospecção e pesquisa mineral, lavra e processamento de minério), (iii) menor número de unidades/operações de processamento de cobre (2 usinas de processamento de cobre versus quatro sistemas de produção que contam com 10 unidades formados por mais , incluindo 10 usinas de processamento de minério de ferro).

Tabela 1 – Escala para mensuração de capacidades tecnológicas

Tipos e Níveis de Capacidades Tecnológicas	Processamento mineral de cobre
Nível 4 – Inovação avançada / liderança mundial na inovação	Capacidade para realizar atividades inovadoras e/ou criar novas tecnologias em processamento mineral à base de P&D básico e/ou aplicado realizado internamente ou em parceria com grau de novidade mundial e que provam impacto disruptivo no modelo de negócios, no ambiente competitivo.
Nível 3 – Inovação intermediária	Capacidade para realizar adaptações e/ou criar novas tecnologias de processamento mineral a partir de atividades baseadas em engenharia e experimentações realizadas internamente ou em parceria.
Nível 2 – Inovação básica	Capacidade para realizar pequenas adaptações/melhorias internamente ou em parceria em tecnologias de processamento mineral.
Nível 1 – Produção: básica e avançada	Capacidade de realizar atividades operacionais de processamento mineral baseadas em tecnologias dominantes, mas sem alcançar níveis de eficiência e qualidade globais (capacidade de produção básica) e com o alcance de eficiência e qualidade globais (capacidade de produção avançada).

Fonte: Elaboração da autora; adaptado de Piana (2016)

Com relação a escala acima, vale destacar que a mesma foi adaptada de modelos originais à indústria de mineração a partir de evidências fornecidas pelos entrevistados e materiais técnicos sobre a indústria de mineração. A validação da métrica foi feita a partir de discussão juntos aos entrevistados, bem como evidências coletadas e conhecimento adquirido pela pesquisadora ao longo de sua atuação profissional no setor de mineração.

### **3.5.1.2 Mecanismos de aprendizagem tecnológica**

Neste trabalho, a operacionalização da aprendizagem foi realizada através de mecanismos de aprendizado utilizados pelas empresas para adquirir, assimilar e gerar/melhorar conhecimentos para criação de capacidades tecnológicas. Os mecanismos de aprendizagem podem ser classificados em mecanismos intra-organizacionais (i.e. aqueles que ocorrem internamente à empresa) e inter-organizacionais (i.e. àqueles que envolvem a empresa e outras organizações). Ambos apresentam características de variedade e impactos gerados na acumulação de capacidades tecnológicas. Variedade se refere a forma de utilização dos mecanismos de aprendizagem para adquirir, assimilar, combinar, gerar e transferir conhecimentos que contribuem para a acumulação de capacidades. Os impactos se referem a novas atividades tecnológicas que a empresa passou a realizar com base nos mecanismos de aprendizagem; podem incluir atividades relativamente simples ligadas às atividades de produção existentes ou então às atividades bastante complexas que geram inovações de liderança mundial. Os mecanismos inter-organizacionais também apresentam características relativas aos parceiros e à origem e direção dos fluxos de conhecimento envolvidos. Parceiros se refere ao tipo de organização envolvidas no mecanismo de aprendizagem em conjunto com a empresa, incluindo fornecedores, competidores, institutos de pesquisa, entre outros. A origem diz respeito a identificação das fontes do fluxo de conhecimento, incluindo fornecedores, competidores, universidades e institutos de pesquisa, entre outros (Dantas, 2006). Com relação a direção, ela se refere ao curso predominante de conhecimento entre a empresa e seus parceiros, podendo ser unidirecional (do parceiro para a empresa), bidirecional (em ambos os sentidos) e unilateral reversa (da empresa para o parceiro) (Dantas e Bell, 2011).

A Tabela 2, abaixo, apresenta a consolidação dos mecanismos de aprendizagem, suas características com relação aos quesitos de variedade, identificação de parceiros, direção e

origem dos fluxos de conhecimento entre a empresa e outras organizações e impactos para a acumulação de capacidades tecnológicas.

Com relação a variedade de mecanismos de aprendizagem, vale destacar que foi considerada neste trabalho uma ampla gama de mecanismos: (i) contratação de expertise: contratação de profissionais/especialistas para produção, P&D, processos organizacionais, gerenciais ou para desenvolvimento de novos projetos; (ii) treinamentos (internos ou em parceria com universidades, institutos de pesquisa e fornecedores, entre outros): concepção e/ou participação em treinamentos, visitas técnicas, cursos, aulas e seminários para operação de tecnologias, utilização de novos processos, incorporação de novas técnicas e para realização de atividades inovadoras; (iii) assistência técnica e consultoria : prestação e/ou recebimento de assistência técnica, consultoria ou auditoria em matérias-primas, produtos, processos, softwares, equipamentos, sistemas, máquinas, laboratórios e tecnologias; (iv) testes e experimentações: realização de atividades no chão de fábrica ou no campo, baseado em tentativa e erro, para realização de melhorias incrementais em matérias primas, produtos, processos, software, sistemas, equipamentos, máquinas e tecnologias; (v) desenvolvimento e engenharia/desenvolvimento baseado em engenharia (internos ou em parceria com universidades, institutos de pesquisa e fornecedores, entre outros): realização de atividades de engenharia, engenharia reversa e projetos para concepção e desenvolvimento de matérias-primas, produtos, processos, software, sistemas, equipamentos, máquinas e tecnologias; (vi) arranjos organizacionais: criação de estruturas gerenciais que dão suporte ao desenvolvimento de atividades inovadoras; (vii) P&D aplicado :foco no curto prazo e pode ser realizado individualmente ou em parceria com universidades, institutos de pesquisa, fornecedores, outras empresas concorrentes, entre outros): realização de atividades de pesquisa e desenvolvimento para criação de matérias-primas, produtos, processos, software, sistemas, equipamentos,

máquinas e tecnologias e (viii) P&D básico :foco no longo prazo e pode ser realizado individualmente ou em parceria com universidades, institutos de pesquisa, fornecedores, outras empresas concorrentes, entre outros; realização de atividades de pesquisa e desenvolvimento para explorar novos campos científicos, criação de conhecimento científico e tecnológico capaz de gerar tecnologias disruptivas que permitem a entrada em novas trajetórias tecnológicas e/ou criação de novos negócios. A análise das evidências empíricas mostrou que nem todos estes mecanismos de aprendizagem foram utilizados em todos os períodos.

Tabela 2 – Mecanismos de aprendizagem

<b>Tipo de mecanismo de aprendizagem</b>	<b>Variedade</b>		<b>Impactos</b>	
<b>Intra-organizacionais</b> (i.e. ocorrem internamente à empresa)	Treinamentos, visitas técnicas, participação em seminários, cursos e aulas, desenvolvimento de engenharia/desenvolvimento baseado em engenharia, P&D		Relativo a novas atividades tecnológicas que a empresa passou a realizar e que foram substanciadas por mecanismos de aprendizagem.  Vale destacar que se considera que a atividade tecnológica inclui qualquer tipo de atividade que contribui para o reforço ou acúmulo de novas capacidades tecnológicas pela empresa.	
<b>Tipo de mecanismo de aprendizagem</b>	<b>Variedade</b>	<b>Parceiro</b>	<b>Direção e origem</b>	<b>Impactos para acumulação de capacidades tecnológicas</b>
<b>Inter-organizacionais</b> (i.e. envolvem a empresa e outras organizações)	Relativo ao formato de parcerias entre a empresa e outras organizações para realização dos mecanismos de aprendizagem.  Exemplos: contratação de consultorias técnicas, treinamentos, desenvolvimentos de engenharia, atividades de pesquisa e desenvolvimento.	Empresa e outras organizações parceiras que estão realizando os mecanismos de aprendizagem.  Exemplos: fornecedores, competidores, universidades, entre outros.	Direção: curso predominante dos fluxos de conhecimento entre a empresa e outros parceiros; pode ser unidirecional e bidirecional.  Origem: fonte do fluxo de conhecimento, incluindo a empresa, fornecedor, competidor, universidade, instituto de pesquisa.	Relativo a novas atividades tecnológicas que a empresa passou a realizar e que foram substanciadas por mecanismos de aprendizagem.  Vale destacar que se considera que a atividade tecnológica inclui qualquer tipo de atividade que contribui para o reforço ou acúmulo de novas capacidades tecnológicas pela empresa.

Fonte: Adaptado de Piana (2016)

### **3.5.1.3 Implicações da acumulação de capacidade para a performance competitiva das empresas**

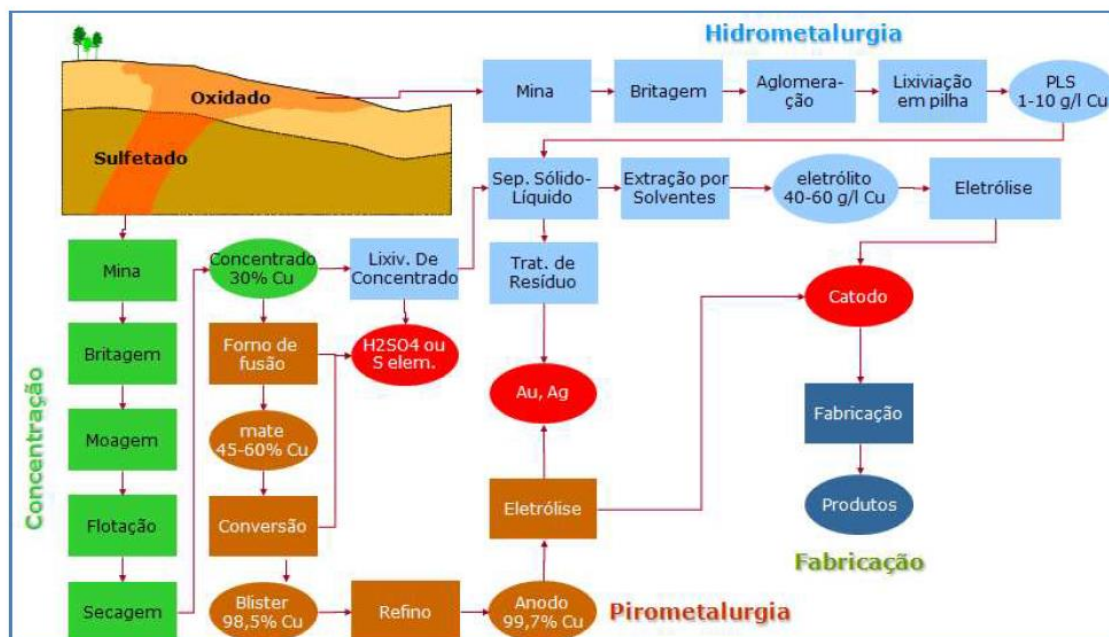
A partir de Figueiredo (2014), a operacionalização de implicações para a performance competitiva da empresa geradas a partir da acumulação de capacidades tecnológicas foi avaliada em termos de melhoria de desempenho de indicadores operacionais e ambientais. Exemplo de indicadores operacionais incluem aumento da recuperação mássica (ie % de recuperação do material inicial em relação a quantidade de minério na saída da mina), aumento produtividade da mão de obra (produção/hora), aumento recuperação metalúrgica (% dos minérios descartados no rejeito do processo). Os indicadores ambientais incluem diminuição de consumo de energia (kWh), redução de consumo de água e de resíduos, entre outros.

## **4. Contexto empírico da pesquisa**

### **4.1 Processamento de minérios de cobre: ideias básicas e foco da pesquisa**

O cobre nativo (metal puro) é raramente encontrado na crosta terrestre. A calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) é o mineral de cobre mais comum, sendo também a principal fonte mineral de cobre. Os minerais podem se dividir basicamente em sulfetados, oxidados, carbonatados e silicatados. Os minerais portadores de cobre são encontrados em pequenas concentrações nos minérios de cobre; a maioria dos minérios apresenta teor próximo de 0,5%, sendo difícil encontrar minérios com teores acima de 1% ou 2% de cobre. Dependendo do tipo de minério de cobre encontrado na natureza, o beneficiamento e o seu tratamento metalúrgico terão rotas diferentes de processamento. De forma geral existem dois meios para extração do cobre: o processo pirometalúrgico (aplicado para minerais sulfetados) e o processo hidrometalúrgico que pode ser utilizado para os minerais oxidados e também para os sulfetados (por exemplo, calcocita,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Os minerais oxidados (típicos da África) e oxidados de baixo teor (típicos do Chile) são tratados através de processos hidrometalúrgicos como lixiviação em pilha, extração por solventes, eletrorecuperação. A Figura 2, abaixo, apresenta as rotas para processamento de minério de cobre.

Figura 2 – Rotas de processamento e extração para minério de cobre



Fonte: Adaptado de Manual de Processo Produtivo – Cobre, Vale/ 2006

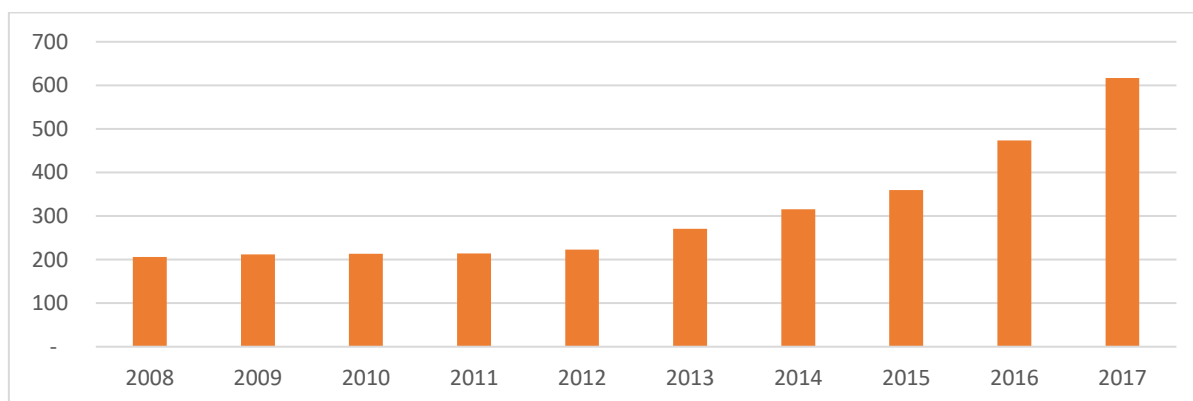
A cadeia de valor da mineração engloba um conjunto de atividades classificadas em (i) extrativas, envolvendo pesquisa, prospecção, planejamento e lavra, (ii) de processamento, incluindo processamento mineral, fundição e refino e (iii) outras atividades de adição de valor, transporte e armazenamento. O foco deste trabalho está na atividade de processamento do minério bruto procedente da etapa de lavra, que passa por uma série de operações envolvendo: (i) etapa de cominuição: britagem e moagem, (ii) etapa de peneiramento (separação por tamanho) e classificação (ciclonação, classificação em espiral), (iii) concentração gravítica, magnética, eletrostática, flotação, entre outras, (iv) desaguamento, com espessamento e filtragem, (v) secagem e (vi) disposição de rejeitos (Luz e Lins, 2004). Após as etapas de processamento mineral, os concentrados (que apresentam tipicamente 30% de cobre contido) são enviados para refinarias para continuidade do processo de refino do minério tais como matte

(45 – 60% de cobre), blister de cobre (98,5% de cobre), anodo e catodo (99,9% de cobre). Estas etapas do processamento mineral de cobre estão descritas de forma detalhada no Anexo 3.

### Produção de cobre no Brasil e na Vale

De acordo com o International Copper Study Group (“ICSG”), em 2018 a produção global das minas de cobre em operação alcançou 20,6 milhões de toneladas. Deste total, cerca de 80% do cobre primário (proveniente de minérios) é produzido através do beneficiamento de minérios sulfetados, redução e refino. Os restantes 20% são produzidos através de processos hidrometalúrgicos de lixiviação e a partir de extração por solventes (SX) e eletrorecuperação (EW). O Chile é o maior produtor mundial, respondendo por cerca de um terço da produção mundial (ICSG 2018). O Brasil tem uma participação relativamente modesta representando cerca de 3% da produção mundial. A evolução da produção brasileira de cobre ao longo dos últimos dez anos está apresentada na Figura 3, abaixo. A Vale responde por aproximadamente 75% da produção brasileira e destina praticamente 100% de sua produção para o mercado externo. A participação da empresa no mercado global de concentrado de cobre chegou a alcançar 4% em 2014, mas se reduziu para cerca de 2% em 2018. (Vale 2014, 2018).

Figura 3 – Evolução da produção brasileira de cobre (mil t de cobre contido)



Fonte: Agência Nacional de Mineração - Anuários Minerais



## 4.2 A Vale: panorama geral e desenvolvimento do negócio cobre

A Vale é uma das maiores empresas globais de mineração diversificada, com operações e atividades de exploração mineral no Brasil em mais 10 países. A empresa é a maior produtora mundial de minério de ferro, pelotas de minério de ferro e níquel. A empresa também produz minério de manganês, ferroligas, carvão térmico e metalúrgico, cobre, subprodutos de metais do grupo da platina (“PGM”), ouro, prata e cobalto. A Figura 4 abaixo apresenta o mapa de atuação da Vale em 2019.

Figura 4 - Mapa de atuação da Vale em 2019



Fonte: Vale (2019)

A empresa foi criada pelo governo brasileiro em 1942 como parte do esforço de guerra para apoiar os aliados e se consolidou já na década de 1970 numa posição de liderança na exportação de minério de ferro. Como parte dos esforços para ampliar a produção de minério de ferro e diversificação dos investimentos em outros minérios, duas iniciativas se destacaram nas três décadas iniciais de existência da empresa: (i) a implantação, em 1965, do Centro de Pesquisa Mineral (atualmente denominado “Centro de Desenvolvimento Mineral” ou “CDM”) e (ii) a criação em 1972 da Docegeo, subsidiária integral da Vale voltada para as atividades de pesquisa geológica, exploração mineral e aproveitamento de jazidas minerais no Brasil e no exterior. A

Docegeo permaneceu como a principal unidade de pesquisa mineral até sua incorporação à Vale em 2003.

O CDM existe até hoje a partir do início dos anos 2000 consolidou um modelo de trabalho denominado célula de criação de valor que permite avaliar rapidamente depósitos encontrados pela área de pesquisa mineral, acelerando os desenvolvimento daqueles que se mostrassem mais promissores do ponto de vista do desenvolvimento de negócios para a Vale (fonte: entrevista Diretor CDM). Desta forma, o CDM é responsável por uma ampla gama de atividades que integra pesquisa mineral, desenvolvimento de tecnologia e até as etapas de estruturação de negócio e desenvolvimento de novos projetos. Com o início da implantação em 2003 da metodologia de desenvolvimento de projetos denominada FEL (“*Front End Loading*”)<sup>4</sup>, o CDM ficou responsável pelos estudos conceituais e de pré-viabilidade (FEL1), fornecendo informações relevantes para as etapas seguintes de desenvolvimento do projeto, sua implantação e operação. O estudos de FEL 1 apresentam uma avaliação do negócio e dos principais riscos envolvidos no seu desenvolvimento, incluindo estimativa de recursos e reservas da área pesquisada, as características do minério (localização, qualidade e concentração), tipo de tecnologia (ou rota de processo) que deverá ser empregada para extração, planejamento da lavra, estimativas de custos de operação, de investimentos de capital para implantação do projeto e investimentos correntes ao longo da vida da operação, aspectos sócio-ambientais, destinação de rejeitos e descomissionamento (fechamento) das operações. O CDM ocupa uma área de 350 mil m<sup>2</sup> com laboratórios de processo, plantas piloto, laboratórios químicos e mineralógicos e é considerado

---

(3) A metodologia FEL (Front End Loading) foi desenvolvida pelo Independent Project Analysis – IPA com o objetivo de garantir um planejamento ótimo do projeto. Segundo Barshop (2004), FEL é um processo através do qual uma companhia traduz suas oportunidades de negócio em projetos de capital. A meta é alinhar objetivos do projeto com a necessidade do negócio e desenvolver o mais eficiente projeto (design) e planejamento de execução para atingir os objetivos do empreendimento. A fase de desenvolvimento do projeto se subdivide em três etapas (FEL 1, FEL2 e FEL3) e entre cada etapa existem portões de avaliação no qual se define a continuidade ou não do desenvolvimento projeto.

um dos principais centros de pesquisa e desenvolvimento mineral na América Latina. Em 2018, o CDM empregava cerca de 150 profissionais, entre técnicos e engenheiros.

Os primeiros depósitos de cobre na região de Carajás foram descobertos pela Docegeo no final dos anos 1970. Em 1977 foi descoberto o depósito do Salobo, o primeiro grande depósito de cobre descoberto pela Docegeo na região de Carajás. Ao longo das próximas duas décadas houve intenso debate sobre a caracterização geológica daquela região e o seu potencial para a descoberta de depósitos de óxido de ferro cobre ouro (*iron oxide copper gold deposits* na denominação internacional ou “IOGC”) de classe mundial (i.e. depósitos com grande volume de recursos e alto teor de minério).<sup>5</sup> O período imediatamente anterior a privatização da empresa foi marcado pela aceleração dos trabalhos de pesquisa mineral na região de Carajás; a partir de levantamento geofísico realizado pela Docegeo nos anos de 1995 e 1996, foram selecionados os alvos para pesquisa e exploração mineral. Vale destacar que no caso dos alvos mapeados de cobre, este trabalho de aprofundamento da pesquisa e exploração foi realizado em alguns casos através de joint ventures com outras empresas mineradoras. Deste trabalho resultou na descoberta de uma série de depósitos de cobre na região de Carajás, incluindo o Sossego (descoberto em 1997 através de parceria com a Phelps Dodge) e novas áreas como o Alemão, Cristalino e 118 (descobertos pela Docegeo). A partir destas descobertas (e como parte da preparação para a privatização), a Vale e o BNDES assinaram em março de 1997 um Contrato de Risco Mineral (“Contrato de Risco”) que contemplava o investimento de cerca de US\$ 410 milhões para conclusão de projetos de exploração geológica e de desenvolvimento de recursos minerais na

---

<sup>5</sup> De acordo com Relatório Anual de 2010 da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPMR), “...a província mineral de Carajás hospeda pelo menos quatro depósitos de óxido de ferro cobre ouro (*iron oxide copper gold deposits* na denominação internacional ou “IOGC”) de classe mundial, denominados Salobo, Sossego, Cristalino e Igarapé Bahia/Alemão, além de outros menores, como por exemplo, os depósitos de Águas Claras e 118. Depósitos do tipo IOGC passaram a ser uma tipologia geológica distinta a partir da descoberta em 1975 dos depósitos de Olympic Dam na Austrália.”

região. De acordo com o Contrato de Risco, o BNDES e a Vale teriam participação proporcional em quaisquer benefícios financeiros obtidos a partir do desenvolvimento desses recursos. O Contrato de Risco previa o pagamento pelo BNDES de compensação à Vale através do pagamento de royalties e comissão de agente promotor aplicáveis as receitas oriundas da venda de ouro, prata, platina e cobre produzidas nas áreas objeto dos investimentos em pesquisa geológica e desenvolvimento de projetos.

Em maio de 1997, a empresa foi privatizada pelo governo brasileiro como parte de um amplo programa de privatizações que incluiu também empresas estatais dos setores de siderurgia, portos e ferrovias. O período imediatamente após privatização da empresa foi marcado por expressiva redução de custos, investimentos e de gastos com atividades de pesquisa e desenvolvimento. Conforme relatado pelo Diretor do CDM, “... *a nova liderança da empresa definiu num primeiro momento uma diretriz estratégica de foco no minério de ferro e de preparação dos ativos de metais básicos para a venda*”. Esta nova orientação estratégica se refletiu em redução dos orçamentos de investimento e de gastos em pesquisa e desenvolvimento. Foi relatado que nesta fase a orientação da liderança foi no sentido de que o CDM deveria buscar fontes próprias de financiamento de suas atividades, através da prestação de serviços para clientes externos. Esta situação difícil começou a se reverter a partir da indicação de um novo diretor para o CDM, que por ser um profissional bastante respeitado pela liderança da empresa que conseguiu promover a reorganização das atividades de exploração e P&D através da centralização de atividades e equipes da Docegeo e do CDM, ampliando a troca de informações entre elas. Esta visão executiva forte por parte da liderança do CDM, aliada a retomada do planejamento estratégico corporativo desenvolvido no período anterior a privatização com apoio de consultoria internacional, foram os elementos fundamentais para reversão da visão do papel do CDM (e das atividades de P&D)

e para a consolidação do modelo de modelo de célula de criação de valor, se tornou um diferencial da Vale em relação a outras mineradoras.

A partir do início dos anos 2000, teve início um novo período de revisão da estratégia corporativa da empresa que passou a ter como eixos centrais a consolidação da posição de liderança no mercado transoceânico de minério de ferro e a internacionalização e diversificação do portfolio de commodities da companhia, com destaque para os metais básicos (cobre e níquel). Neste sentido, o Relatório Anual da Vale para o ano de 2001 registra “... *a demanda global por cobre vem crescendo rapidamente desde o início dos anos 90. De 1993 a 2001, o consumo mundial de cobre aumentou de 10.967.000 toneladas para 15.281.000 toneladas por ano. Embora esse crescimento tenha sido afetado de maneira negativa pela recessão econômica de 2001, temos expectativa de fortalecimento do crescimento como tendência de continuidade para toda a próxima década, impulsionada pelas indústrias de computadores, telecomunicações e aparelhos elétricos. Acreditamos que nossos projetos de cobre (Sossego, Salobo, 118, Alemão e Cristalino) todos situados na região de Carajás, possam se colocar entre os mais competitivos do mundo em termos de custo de investimentos e de valor por tonelada de minério.*” O mesmo Relatório aponta também o foco dado a exploração mineral no Brasil e no cobre, registrando a alocação de orçamentos de aproximadamente US\$ 40 milhões em 2001 e 2002 (versus cerca de US\$ 25 milhões em 1998 e 1999).

O início dos anos 2000 foi marcado por uma série de aquisições de empresas que consolidaram a posição da empresa na produção de minério de ferro no Brasil (Samitri em 2000, Ferteco em 2001, Caemi em 2003). Em 2006, a aquisição da empresa canadense Inco representou uma plataforma importante para a consolidação do negócio de metais básicos (cobre e níquel) como segundo negócio mais importante da companhia. Este processo acelerado de crescimento

geográfico e de ampliação de áreas de negócio gerou ao mesmo tempo a necessidade de padronização de processos e atividades (centralização), assim como aumentou a complexidade das operações e resultou em descentralização em certas áreas.

Em junho de 2004 entra em operação a primeira operação de cobre da companhia. A empresa apresenta um ambicioso plano de crescimento com significativos investimentos em crescimento orgânico até 2012 que incluiria o desenvolvimento e implantação dos projetos Salobo, Cristalino, Alemão e 118 e permitiria alcançar a meta de produção de 1 milhão de toneladas/ano de cobre ao final do período. Neste período também foi anunciado o investimento de US\$ 58 M para implantação da Usina Hidrometalúrgica de Carajás (“UHC”) com capacidade de produção de 10.000 toneladas de catodos de cobre por ano; a UHC era uma usina em escala semi-industrial que tinha por objetivo comprovar a viabilidade da produção industrial através de uma rota hidrometalúrgica, apoiando desta forma a construção de uma usina maior para processamento de minério de cobre de outros depósitos na região de Carajás, notadamente do Salobo.

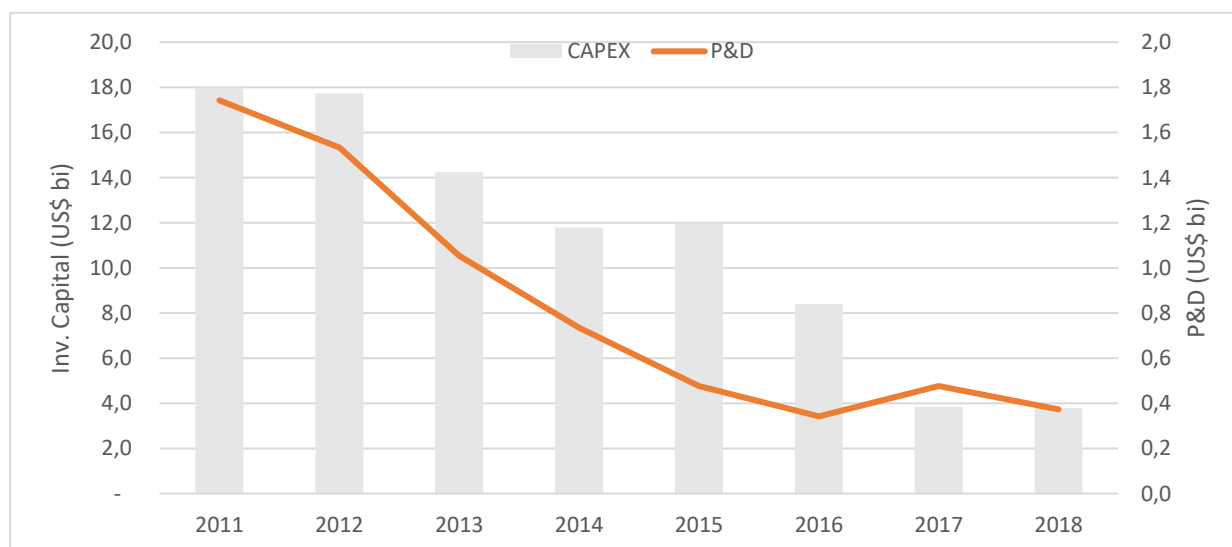
A partir de 2012, com o fim do mais recente superciclo de commodities<sup>6</sup>, têm início um período de redução dos orçamentos de investimento de capital em novos projetos e operações, bem como nos orçamentos voltados para as atividades de P&D (incluindo exploração mineral, desenvolvimento de tecnologias e desenvolvimento de estudos de pré-viabilidade, viabilidade e engenharia detalhada. Cabe destacar que o foco das atividades de P&D se volta para o apoio às atividades voltadas para busca de melhoria operacional. Neste sentido, o Relatório 20F da

---

<sup>6</sup> De acordo com a literatura econômica, os superciclos de preços de commodities são períodos são caracterizados por fases de *boom* e *bust* (i.e. fase de aumento de preços, seguida por fase de queda acentuada) e são motivados principalmente pela demora da oferta em responder a choques positivos e persistentes de demanda. Eventualmente, a expansão da oferta, aliada a redução da taxa de crescimento da demanda, acarreta a queda dos preços. A literatura identifica quatro superciclos de commodities desde o início dos anos 1900; o ciclo atual teve início no final dos anos 1990 e sua fase de declínio dos preços de commodities se iniciou a partir de 2011. Este superciclo mais recente foi impulsionado pelo rápido crescimento econômico da China e de outros países emergentes. (Fonte: Bank of Canada, 2016).

empresa relativo ao ano de 2017 registra “... a partir de 2012, a empresa inicia um ciclo de redução de investimentos, em linha com a estratégia corporativa de manter a disciplina do capital e focando apenas em nossos projetos de nível mundial. Estamos desenvolvendo poucos projetos com foco no crescimento orgânico, porém com uma expectativa de maiores taxas de retorno. No período entre 2012 e 2018, a estratégia da empresa para o negócio cobre se volta para melhoria da eficiência e utilização dos ativos existentes, enquanto são avaliadas oportunidades de estender as operações de Sossego e Salobo”. O investimento total em novos projetos de capital se reduz de US\$ 17,7 bilhões em 2011 para US\$ 3,8 bilhões em 2018. Com relação às atividades de P&D, os orçamentos globais se reduzem de US\$ 1,5 bilhão em 2012 para US\$ 373 milhões em 2018. A Figura 5, abaixo, apresenta a evolução dos orçamentos de investimento e de atividades de P&D ao longo deste período. Vale destacar que os gastos com P&D reportados pela Vale contemplam (i) exploração mineral, (ii) gastos com estudos conceituais, pré-viabilidade e viabilidade e (iii) desenvolvimento de novos processos, inovação e adaptação tecnológica. Ao longo deste período, os gastos relativos a este último componente corresponderam a aproximadamente 15- 20% do total dos gastos em P&D.

Figura 5 – Evolução global de investimentos (excluindo aquisições) e gastos de P&D entre 2011 e 2018



Fonte: Relatórios Anuais da Vale

### O negócio cobre na Vale

A entrada da Vale no negócio cobre se deu a partir do desenvolvimento de depósitos de cobre descobertos na região de Carajás, notadamente Sossego e Salobo. O Quadro 1, abaixo, sintetiza a cronologia de desenvolvimento dos principais projetos de cobre da Vale na região de Carajás.

Os primeiros depósitos de cobre foram descobertos no final da década de 1970 e ao longo da próxima década foram feitas algumas campanhas de exploração mineral para melhor entendimento das áreas descobertas. Em 1985, a partir da operação de uma planta piloto para testes de processamento do minério do Salobo foi identificado a questão da presença de deletérios importantes (urânio, flúor e cloro) que tornavam difícil a comercialização deste concentrado. Em especial, o flúor tem grande impacto nos circuitos de processamento dos smelter, o que faz que com concentrados com alto teor deste elemento sejam rejeitados. A partir da identificação desta questão dos deletérios, a empresa perseguiu durante muitos anos uma alternativa de desenvolvimento de um projeto Salobo verticalizado, com a construção de um smelter e processamento a partir de rotas hidrometalúrgicas. Por não ter nenhuma experiência em cobre a empresa buscou parceiros que tivessem experiência no negócio cobre. A primeira parceria foi estabelecida em 1993 com a formação da Salobo Metais, uma joint venture com a mineradora Anglo American. Equipes da Vale e da Anglo desenvolveram uma série de testes e experimentações em planta piloto montada no CDM. Mas em função da complexidade técnica e dos altos investimentos requeridos para implantação do projeto verticalizado, a liderança Vale hesitava em tomar a decisão de prosseguir com a solução desenhada com a Anglo; a parceria na Salobo Metais foi desfeita em 2002.



Outra parceria importante foi estabelecida em 1997 com a mineradora canadense Phelps Dodge (atualmente Freeport, importante produtor de cobre); desta parceria resultou a descoberta do depósito do Sossego em 1997. Ao longo dos próximos 3 anos, Vale e Phelps realizaram importantes esforços de pesquisa para desenvolvimento de uma rota para processamento do minério do Sossego. Apesar dos bons resultados da parceria, por razões financeiras a Phelps decide encerrar a parceria em 2001; a partir daí, a Vale prossegue sozinha no desenvolvimento da rota de processo do Sossego.

Ainda no final dos anos 1990 foi estabelecida parceria com TeckCominco, empresa canadense com grande experiência na mineração de cobre e que tinha uma unidade de engenharia e desenvolvimento de tecnologia (denominado Cominco Engineering Services ou CSEL). A CSEL havia desenvolvido uma rota hidrometalúrgica alternativa para processamento de concentrados de cobre e níquel sulfetado, que permitiria a produção de catodos de metal. Vale e Teck fizeram um acordo para teste de rota hidrometalúrgica CSEL; os testes foram conduzidos primeiro em escala piloto por técnicos de ambas as empresas nos laboratórios da Teck em Vancouver, Canadá. Posteriormente, foi implantada no Sossego uma planta em escala industrial (a Usina Hidrometalúrgica de Carajás, UHC) para validação da tecnologia CSEL.

A partir do *know how* de concentração obtido a partir dos estudos realizados em parceria com a Phelps Dodge, aliado a alteração nas condições de mercado de concentrado de cobre que levou que a mudança de que contaminantes que anteriormente eram considerados proibitivos passaram a ser tratados como uma questão econômica de pagamento de penalidades a Vale abandonou a visão de um projeto Salobo verticalizado. A partir de 2003 são realizados estudos que permitem resolver as questões técnicas e comerciais relativas ao concentrado do Salobo e em 2005 é assinado o primeiro contrato comercial para venda do material a um smelter europeu (Aurubis).

A partir do início dos anos 2000, o cenário de crescimento da demanda por commodities em geral (e em especial, commodities minerais) impulsionada principalmente pelo crescimento da economia chinesa e de outras economias emergentes forneceu os elementos para ampliação da estratégia de diversificação mineral e internacionalização da empresa para além do minério de ferro e do Brasil. Para o negócio cobre, a estratégia de crescimento estava alicerçada no desenvolvimento do pipeline de projetos de cobre na região de Carajás, bem como na realização de aquisições estratégicas que permitissem que a empresa se tornasse um player importante nesta commodity, com uma meta de atingir um volume de produção de 1 milhão de toneladas/ano de cobre em 2012. Neste sentido, a empresa dá andamento ao desenvolvimento de seus projetos de cobre na região de Carajás, começando com a entrada em operação em 2004 do Sossego (primeiro projeto de cobre da empresa) e do Salobo (fases I e II em 2012 e 2014, respectivamente e fase III início investimentos em 2018). Seguem-se esforços para desenvolvimento dos demais projetos, como Cristalino, Alemão, 118, entre outros. Em 2006 a empresa realiza a aquisição da Inco (empresa canadense líder na produção de níquel), principal aquisição estratégica da empresa no segmento de metais básicos e que permitiu alcançar posição de liderança na produção mundial de níquel, bem como a ampliação do volume de produção de cobre como subproduto do níquel. Também foram realizadas outras aquisições de ativos de menor porte no Chile (Tres Valles)<sup>7</sup> e na Zâmbia (Konkola North/ Lubambe<sup>8</sup>); entretanto estas aquisições não obtiveram os resultados esperados e estes ativos foram alienados em 2013 e 2017, respectivamente. Vale destacar também as tentativas fracassadas de aquisição do grupo Paranapamena, líder na produção de cobre refinado no Brasil e que detinha um smelter/refinaria de cobre e três plantas para a produção

---

<sup>7</sup> Tres Valles : capacidade de produção de até 18.000 tpa de cobre catodo; enfrentou inúmeros problemas operacionais e foi alienado no final de 2013.

<sup>8</sup>Konkola North/Lubambe: adquirido em 2009 através de joint venture African Rainbow Minerals (ARM), mineradora sul-africana, mina subterrânea com capacidade de produção 40 ktpa de concentrado de cobre. Também enfrentou problemas operacionais desde a entrada em operação em 2012; foi alienada no final de 2017.

de produtos *downstream* de cobre. A aquisição da Paranapanema “...*facilita o desenvolvimento de projetos de cobre da Vale cujos minérios registram a presença de impurezas. A adaptação do smelter/refinaria para o processamento desses concentrados, viável do ponto de vista técnico e econômico, melhorará as condições econômicas para tratamento destes concentrados, viabilizando desse modo a expansão mais rápida da produção do metal pela Vale ao longo dos próximos anos*” (Vale, 2010).

A estratégia atual da empresa é melhorar a eficiência e utilização dos ativos existente na região de Carajás, enquanto são avaliadas oportunidades de estender as operações de Sossego e expandir as de Salobo. A partir de 2016, as apresentações da empresa registram planos para desenvolver um plano plurianual de expansão de cobre, com Salobo III sendo o primeiro projeto aprovado no final de 2018 (com adição de ~30 a 40 ktpa de cobre), seguido num horizonte de médio prazo dos projetos Cristalino (80 ktpa a partir de 2023), Alemão (60- 70 ktpa a partir de 2024) aliada a entrada em operação de mini minas em Carajás (operadas por terceiros), permitiria manter a usina atualmente em operação no Sossego e atingir até 2023 a meta de produção de 500 ktpa de cobre. O plano estratégico também inclui outros projetos e oportunidades a serem desenvolvidos, incluindo Paulo Afonso, Polo, Furnas, Sossego Under Ground, Visconde, Bacaba, Mata e 118; se o plano for cumprido, a companhia prevê alcançar a produção de cerca de 800 ktpa num horizonte de longo prazo.

Cabe destacar que a criação e ampliação de capacidades tecnológicas para o processamento mineral de cobre se deu a partir dos esforços da empresa para desenvolver seu portfolio de projetos na região de Carajás. Desta forma (e também em função de limitações de temporais e de orçamento) o foco deste trabalho é o desenvolvimento dos projetos de cobre na região de Carajás, não sendo abordados os projetos e operações em outras geografias.

Quadro 1 - Histórico do desenvolvimento de projetos de cobre da Vale na região de Carajás

Depósito/Projeto	Principais marcos temporais	Observações
Salobo	<p>1977 descoberta do depósito pela Docegeo</p> <p>1985 planta piloto Salobo, identificação dos deletérios (radionuclídeos, flúor e cloro)</p> <p>1993 constituição da Salobo Metais ( JV com a Anglo American) e planta piloto no CDM</p> <p>1998/1999 estudos de verticalização do projeto e avaliação de rotas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. Teste em escala piloto de tecnologia CSEL em Vancouver, Canadá</p> <p>2002: encerramento da parceria com a Anglo American</p> <p>2000/2004: instalação UHC (planta escala industrial) para validação da tecnologia CSEL</p> <p>2005/2007: solução técnica e comercial para venda do concentrado e abandono da idéia de verticalização do projeto</p> <p>2008/2018: implantação do projeto original (Salobo I) e expansões <i>brownfield</i> (Salobo II e Salobo III):  2012 : início operação Salobo fase I (12Mtpa, ~100 ktpa concentrado de cobre);  2014: início operação Salobo fase II (adicional 12Mtpa, ~200 ktpa concentrado de cobre)  2018 out: aprovação do Salobo fase III (30-40 ktpa concentrado de cobre); previsão de entrada em operação em 2022</p>	<p>Primeiro depósito de cobre de classe mundial descoberto pela Vale. Em função da complexidade do minério, foram estudadas várias rotas para processamento do minério (rotas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas);  Desenvolvido inicialmente em parceria com a Anglo American.; desenvolvimento bastante longo e truncado:  (i) esforço inicial para de avaliação de rotas alternativas de processamento do minério, com várias interrupções no desenvolvimento do projeto;  (ii) avaliação de rota hidrometalúrgica (tecnologia CSEL Teck Cominco, fronteira do conhecimento na época), com testes em escala piloto e montagem de planta em escala industrial para validação da tecnologia;  (iii) após resolução técnica e comercial das questões relativas a comercialização do concentrado, projeto passa a ser desenvolvido apenas pela Vale  35 anos para desde a descoberta do depósito e o início da produção</p>
Sossego	<p>1997 descoberta do depósito pela Phelps Dodge (atual Freeport)</p> <p>2001 Vale adquire participação da Phelps</p> <p>2002 início da implantação do projeto</p> <p>2004 Entrada em operação e primeiro embarque de concentrado de cobre;</p>	<p>Primeiro projeto de cobre implantado pela Vale</p> <p>Fase inicial de desenvolvimento rota de processo foi desenvolvida em parceria a Phelps Dodge</p> <p>7 anos entre a descoberta do depósito e o início da produção;</p>
Outros projetos na região de Carajás	<p>Alemão , Cristalino , 118, Sossego UG , Paulo Afonso, Polo, Furnas, Bacaba, Visconde, Mata</p>	<p>A maioria destes depósitos foi descoberta a no final dos anos 1990, início dos anos 2000</p> <p>A estratégia de desenvolvimento destes projetos tem por objetivo tanto a reposição de reservas em função de exaustão dos depósitos atualmente em produção quanto o crescimento da produção de cobre</p>

### **4.3 Evolução do modelo de gestão de tecnologia**

Até a privatização em 1997, as atividades de P&D eram desenvolvidas pelo CDM, essencialmente em um modelo de inovação fechada. A partir da privatização, teve início um processo de reorganização que incluiu tanto descentralização como centralização de atividades. O início dos anos 2000 foi marcado por uma série de aquisições de empresas que consolidaram a posição da empresa na produção de minério de ferro no Brasil (Samitri em 2000, Ferteco em 2001, Caemi em 2003). Em 2006, a aquisição da empresa canadense Inco forneceu a plataforma para a consolidação do negócio de metais básicos (cobre e níquel) como segundo negócio mais importante da companhia. Este processo acelerado de crescimento geográfico e de ampliação de áreas de negócio gerou ao mesmo tempo a necessidade de padronização de processos e atividades (centralização), assim como aumentou a complexidade das operações e resultou em descentralização em certas áreas.

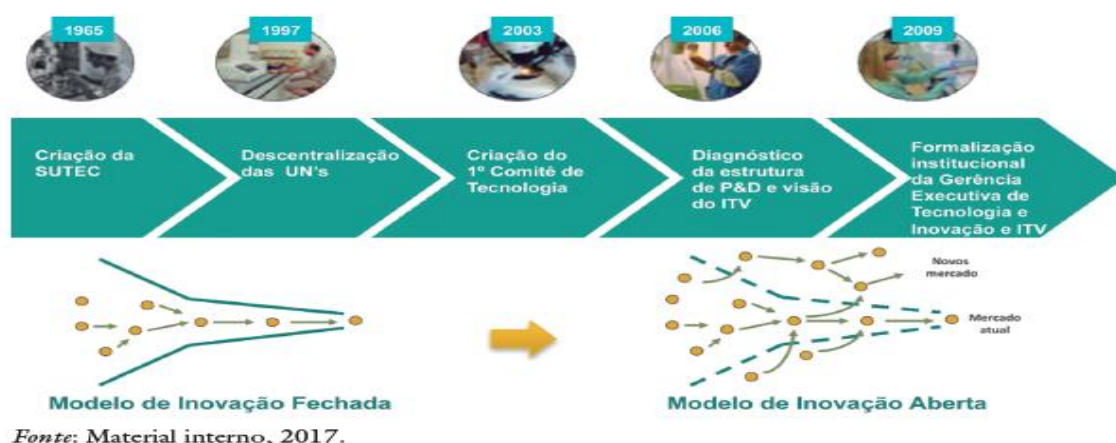
Com relação às atividades de P&D, começou a amadurecer em 2006 a ideia da criação de um centro de pesquisa voltado para as atividades de longo prazo, que haviam deixado de ser priorizadas em função da privatização. Como resultado deste processo, foi criado em 2009 o Instituto Tecnológico Vale (ITV), responsável pela gestão de tecnologia e propriedade intelectual da Vale, além da articulação de parcerias de projetos de P&D com a comunidade acadêmica e instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICT). O modelo proposto a partir da criação do ITV é de que as atividades de P&D seriam articuladas a partir de duas frentes : (1) as necessidades mais ligadas às demandas das áreas operacionais (tipicamente mais imediatas ou com foco no curto prazo) seriam executadas de forma descentralizada pelos diferentes centros e laboratórios de pesquisa existentes e (2) as atividades de P&D que exigem tecnologias não maduras e endereçando sobretudo o médio e o longo prazos seriam executadas através do ITV. Para desenvolvimento das atividades de P&D mais voltadas para o atendimento das atividades

voltadas para o atendimento das demandas das áreas operacionais, a empresa possui além do CDM, outros dois grandes laboratórios: o Centro de Tecnologia de Ferrosos (CFT, localizado no Brasil) e o Vale Technical Services Limited (VTSL, localizado no Canadá e voltado pesquisas ligadas ao níquel). Ao ITV cabe o desenvolvimento de tecnologias mais complexas, com horizonte de desenvolvimento de médio e longo prazos, a partir de um modelo de inovação aberta com o estabelecimento de parcerias com universidades, institutos de pesquisa e órgãos governamentais de P&D. Melo (2017) aponta que a elaboração conjunta de editais com Fundações de Amparo à Pesquisa dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Pará foi um importante instrumento de consolidação deste papel do ITV. O autor também indica que foi partir da criação do ITV que a empresa passou a trabalhar em conjunto com Capes e CNPq utilizando o sistema de bolsas de pesquisa disponíveis no sistema nacional de ciência e tecnologia para execução de suas atividades e de projetos de pesquisa de interesse da Vale. Em 2019 o ITV contava com cerca de 30 profissionais, entre pesquisadores e pessoal administrativo. De forma a manter seu propósito original de ser uma ponte entre a empresa e a comunidade acadêmica, o foco do ITV é a atração de pesquisadores seniores, com destaque na academia mas que tenham também contato com o ambiente empresarial. A Figura 6, abaixo, apresenta um resumo da evolução do modelo de gestão de tecnologia na Vale.

Foi relatado que a consolidação deste modelo de gestão de tecnologia articulado a partir do ITV enfrentou dificuldades do ponto de vista externo e interno. Na perspectiva externa, houve dificuldade inicial grande para atrair pesquisadores em função de dificuldades de entendimento do modelo proposto, bem como pela ausência de estabilidade no emprego (Melo, 2017). Na perspectiva interna, também houve dificuldade na articulação das atividades P&D voltadas para o longo prazo com as necessidades da empresa identificadas a partir do planejamento estratégico. As atividades e projetos de P&D eram avaliadas e priorizadas por meio de um Comitê de Tecnologia, que contava com a participação do ITV, de representantes dos demais centros de

pesquisa e de diretores das áreas operacionais e algumas áreas corporativas (principalmente tecnologia da informação e energia). Foi relatado que os conflitos internos relacionados à alocação dos orçamentos voltados para as atividades de P&D se tornaram ainda mais agudos nos períodos de redução dos orçamentos relativos às atividades de P&D (conforme indicado em 4.2, acima). A redução de orçamento impactou os centros de pesquisa, tanto com relação a manutenção do quadro de profissionais quanto em relação aos investimentos na formação dos mesmos (incluindo cursos, treinamentos, participação em congressos e seminários, entre outros). A partir desta redução de orçamentos e de equipes alocada, foi relatado que as atividades de P&D passaram a se concentrar nas necessidades imediatas ou de curto prazo voltadas para o atendimento de demandas das operações. Por exemplo, foi relatado que em função da redução de orçamento, em 2012 o CDM reduziu em cerca de 50% a equipe de profissionais da área de processamento mineral. As atividades de P&D que exigem tecnologias não maduras e endereçando o médio e o longo prazos foram especialmente afetadas. Foram mantidos alguns projetos de P&D básico e aplicado, entre eles se destaca o projeto de biolixiviação para recuperação de cobre da lagoa de rejeitos do Sossego desenvolvido em parceria com a USP e com apoio financeiro do BNDES.

Figura 6 – Evolução modelo de gestão de tecnologia



Fonte: Mello (2017)

Foi apontado que existem indícios de retomada do foco nestas atividades que exigem tecnologias maduras, através de articulação dos centros de pesquisa (CDM, ITV, VTSL, entre outros) com outras áreas corporativas e áreas de operação para montagem de mapas de tecnologia específicos. Foram retomadas as reuniões do Comitê de Tecnologia para discussão e priorização dos projetos e iniciativas das atividades de P&D. Também foi relatado que o ITV tem feito esforços para ampliação da rede de parceiros externos, com a definição de critérios para seleção e acompanhamento destas parcerias.

#### **4.4 Principais tendências tecnológicas da indústria de mineração**

Inicialmente cabe destacar que a introdução de novas tecnologias nas atividades de mineração deve ser analisada à luz das características específicas desta atividade, notadamente em relação ao alto grau de especificidade (i.e. nenhum depósito mineral é idêntico a outro). A implantação de um projeto de mineração é intensa em investimento de capital e opera grandes volumes. Esse grande investimento de capital condiciona as estratégias tecnológicas, uma vez que os custos de investimento são significativos e necessitam de um longo prazo para serem integralmente amortizados. Desta forma no setor de *commodities* há uma dificuldade na difusão de novas tecnologias, tendo em vista que essas deveriam ter como pré-requisito a complementaridade e compatibilidade com os processos de produção adotados inicialmente. Na medida em que os produtos produzidos possuem pouca diferenciação, os preços têm papel fundamental na competição e neste sentido esse padrão de competição confere às inovações um viés de redução de custos, com aumento de escala produtiva, otimização de processos produtivos e redução de impactos ambientais (Tigre, 2006).

Tipicamente, as mudanças tecnológicas na indústria de mineração foram impulsionadas pelos desafios geológicos (i.e. cenários de crescente complexidade mineralógica e de redução de



teores) para atendimento da demanda por diferentes minérios com níveis de custos e produtividade satisfatórios. Mais recentemente, outros desafios ligados às questões ambientais, de saúde e segurança, escassez de mão de obra e de responsabilidade social também tem representado motivadores importantes para as atividades de inovação e introdução de novas tecnologias pelo setor mineral (Barnett & Bell, 2011). O desenvolvimento da tecnologia da informação a partir do final da década de 1990 também forneceu a base para a introdução de inovações ligadas ao processamento de dados nas várias etapas do processo de produção mineral, incluindo as atividades de processamento mineral.

A partir de Bergerman (2019) e de relatório da consultoria internacional Deloitte (2019), tendências tecnológicas aplicáveis a várias etapas da produção mineral incluem : (i) aumento da maturidade no uso de algoritmos, *machine learning* e inteligência artificial para reduzir variabilidade nos processos e mitigação de riscos; (ii) sistemas de controle e otimização de processos: indústria 4.0, com automação cada vez mais intensiva, com novos sensores e instrumentos que trazem informação em tempo real; (iii) digitalização da cadeia de suprimentos: criação de uma cadeia de valor mais interconectada e capaz de dar resposta mais rápidas e (iv) dispositivos móveis e tecnologia wearable: computação incorporada em dispositivos de uso diário (uniformes, exoesqueletos, veículos e ferramentas de trabalho).

Especificamente na área de processamento mineral, as principais tendências incluem: (i) utilização da biotecnologia e melhorias na metalurgia permitiram a melhoria da viabilidade de muitos projetos minerais (Urzua, 2013); (ii) monitoramento de tecnologias para manutenção e aumento de vida útil dos equipamentos; (iii) desenvolvimento de softwares específicos para atividades de engenharia e geologia; (iv) sonares e fluxômetros: utilizados para medir o fluxo de materiais em movimento em caminhões e correias transportadoras (incluindo ferramentas como

SONARTRAC e CIDRA); (v) monitoramento da cominuição de minérios: utilização de ferramentas (por exemplo sistema split-online) que permitem análise de imagens digitais de contínua e automática de forma a avaliar a qualidade do processo de cominuição; (vi) pré-concentração ou concentração seletiva: representa uma nova forma de analisar o processo de concentração, com a utilização de ferramentas e softwares que permitem melhorar a integração entre cada uma de suas etapas (britagem, moagem e concentração). Bergerman (2019) destaca também a tendência de compartilhamento de usinas de beneficiamento mineral, concentrando o beneficiamento de vários depósitos em uma só usina.

## 5. Desenho e método da pesquisa

O desenvolvimento deste trabalho está baseado na revisão da literatura e em evidências empíricas coletadas a partir de entrevistas (incluindo profissionais da empresa, profissionais atuando em outras empresas de mineração, pesquisadores e professores) e da análise de documentos (principalmente apresentações da própria empresa, arquivos técnicos e relatórios anuais). Adotou-se uma perspectiva qualitativa para abordar as questões de pesquisa relativa a trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas, ao papel dos mecanismos de aprendizagem e para as implicações para a performance competitiva da empresa.

De acordo com Creswell (2010) a pesquisa qualitativa pode ser definida como “[...] forma de investigação na qual os pesquisadores fazem uma interpretação do que enxergam, ouvem e entendem”. Para May (2004), as entrevistas enriquecem a compreensão do pesquisador acerca de opiniões, experiências, atitudes e sentimentos das pessoas. Godoy (2008) afirmam que a flexibilidade das entrevistas semiestruturadas permitem ao pesquisador descobrir informações que nem sequer tenham sido consideradas pertinentes quanto ao tema.

O desenho de pesquisa foi baseado em um estudo de caso único e em profundidade, com evidências empíricas coletadas para um período de aproximadamente 25 anos. Também vale notar que a unidade de observação se refere (1) às atividades tecnológicas (i.e. processamento de minérios de cobre) e não a empresa Vale como um todo e (2) ao desenvolvimento dos projetos de cobre na região de Carajás. Este desenho traz implicações para sua validade externa (i.e. escopo ou domínio para o qual poderiam ser generalizados os resultados), mas de acordo com Yin (2005), a opção por um estudo de caso única é válida quando a questão de pesquisa envolve a investigação do processo através do qual se efetivou determinado fenômeno ou do porquê ele ocorreu de determinada forma e não de outra. A escolha da empresa foi feita de forma intencional

em função de (i) empresa brasileira de mineração, com produção de minério de ferro (líder mundial), cobre, níquel, carvão e manganês; (ii) representatividade da produção de cobre da empresa no contexto brasileiro, sendo responsável por aproximadamente 75% da produção nacional (DNPM, 2017); (iii) buscar entender similaridades e diferenças relativas ao papel dos mecanismos de aprendizagem para explicar as variações de acumulação de capacidade tecnológica na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da Vale no processamento de minérios de cobre em relação as conclusões do estudo de Piana (2016) relativos ao minério de ferro.

### **5.1 Procedimentos de coleta de dados**

A coleta de dados desta pesquisa envolve a análise de documentos e a realização de entrevistas. Com relação a análise de documentos, foram examinados documentos públicos da própria empresa, incluindo (principalmente) apresentações feitas a investidores relativas ao desempenho operacional e financeiro da empresa, seu plano estratégico e principais projetos em execução/planejados, bem como relatórios anuais, demonstrações financeiras anuais e relatórios de sustentabilidade. Também foram examinados arquivos técnicos relativos ao processamento de minérios de cobre e aos projetos de cobre da Vale na região de Carajás. Também foram utilizadas como fontes de pesquisa relatórios e apresentações relativas às atividades de mineração no Brasil provenientes de outras fontes como a Agência Nacional de Mineração (ANM), o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM), o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social –BNDES. Especificamente com relação ao Salobo, uma fonte importante de consulta foram os relatórios técnicos sobre o projeto produzidos pela empresa Wheaton Precious Metals.

Com relação às entrevistas, foram realizadas 24 entrevistas semi-estruturadas de caráter aberto de forma que o entrevistado tivesse a oportunidade de abordar outros temas além das questões incluídas no roteiro. As entrevistas foram realizadas com profissionais da Vale (de nível gerencial e operacional), profissionais que trabalharam na empresa, pesquisadores e professores das instituições de ensino e pesquisa que interagem com a empresa e profissionais que trabalham em empresas competidoras. O grupo de entrevistas contemplou profissionais de nível gerencial e operacional em atuação na Vale nas áreas de gestão de tecnologia e inovação, do departamento de pesquisa mineral e centro de desenvolvimento de pesquisa mineral (CDM), das diretorias de operação das minas de Salobo e Sossego, da área de comercialização de cobre e de áreas corporativas (acompanhamento de performance, relações com investidores e gestão tecnologia). A partir deste grupo inicial de entrevistados, foi utilizada a técnica de bola de neve para buscar sugestões de outros demais entrevistados. Cabe destacar que a atuação profissional da autora nas áreas de desenvolvimento de negócios e gestão de participações da própria Vale foi um elemento importante para identificação (e acesso) a este grupo inicial de entrevistados. O Anexo 1 apresenta a relação das entrevistas realizadas.

A realização das entrevistas foi feita a partir de um roteiro que buscou focar as questões relativas a: (i) trajetória de acumulação de capacidades (capacidade acumulada ao longo do tempo e características desta trajetória), (ii) a aprendizagem tecnológica e os mecanismos de aprendizagem, (iii) outros fatores relevantes no processo de acumulação de capacidades tecnológicas pelas empresas, em especial o papel da liderança e da inter-relação entre a estratégia corporativa e a inovação e (iv) impactos sobre a performance competitiva. O Anexo 2 apresenta o roteiro das entrevistas semi-estruturadas.

Para coleta de dados relativos a acumulação de capacidades tecnológicas para inovação na área de beneficiamento de minérios de cobre, a pesquisa buscou dados relativos a engenharia química, biotecnologia e informações de melhoria de qualidade. A coleta de dados relativas aos mecanismos de aprendizagem buscou levantar evidências para identificação e caracterização de mecanismos internos e externos, buscando evidências sobre por que, quem, como e quando estes mecanismos foram utilizados. Também se buscou evidências sobre a relação destes mecanismos de aprendizagem com o desenvolvimento de capacidades tecnológicas para inovação. A coleta de dados relativos a outros fatores relevantes no processo de acumulação de capacidades tecnológicas procurou levantar evidências sobre a articulação da estratégia corporativa e a estratégia para inovação nessas áreas, a alocação de recursos humanos e financeiros e o papel da liderança. Para a busca de evidências relativas a performance competitiva, foram levantadas evidências da relação de influência da acumulação de capacidades tecnológicas acumuladas e as implicações ao longo do tempo em termos de desempenho operacional.

## **5.2 Procedimentos para análise das evidências empíricas**

Os dados coletados nas entrevistas com gestores receberam tratamento qualitativo, durante o qual, seguindo a lógica de Vergara (1998), foram estruturados e codificados de forma a permitirem uma conclusão objetiva. O exame das evidências empíricas, coletas ao longo das entrevistas com especialistas, profissionais e pesquisadores, seguiu o padrão proposto na sistemática de construção de quadros analíticos, conforme os procedimentos sugeridos em Miles e Huberman (1994). A construção de quadros analíticos pelo método qualitativo aqui adotado indica que as conclusões e os modelos devem ser continuamente revisados (Huberman, 1994).

O processo de análise dos dados coletados foi estruturado a partir das seguintes etapas : (i) transcrição, codificação e preparação dos dados coletados; (ii) seleção, simplificação e

transformação dos dados originais provenientes das entrevistas e análise documental; este processo vai envolver a construção de tabelas que permitam identificar diferentes variáveis e como as mesmas evoluíram ao longo do tempo; (iii) apresentação e organização dos dados de forma a permitir tirar conclusões; (iv) identificação de padrões, delineamento de conclusões e possíveis explicações e fluxos de causa e efeito.

Para análise dos construtos, foram realizadas as seguintes atividades: (i) transcrição das entrevistas, (ii) organização das entrevistas dos trechos que representavam os construtos (capacidade tecnológica, aprendizagem tecnológica, condições organizacionais e implicações), (iii) organização dos dados secundários também foram tratados de forma análoga, com marcação dos trechos de relatórios, publicações internas, etc para representar os diferentes construtos e (iv) criação de tabelas com os trechos extraídos das entrevistas e/ou dados secundários que representavam as atividades desenvolvidas, o período e a fonte. O Quadro 2, abaixo exemplifica a construção destas tabelas de análise.

Quadro 2 – Análise dos dados coletados através de entrevistas: capacidade tecnológica

Atividade	Período	Fonte
Adaptação moinho SAG para o Sossego	2000-2002	Entrevista Halen Carvalho Entrevista Evandro Silva
Otimização circuitos de cominuição Sossego	2004 - 2011	Entrevista Halen Carvalho Entrevista Maurício Bergerman
Adaptação moinho HPGR para o Salobo	2005- 2006	Entrevista Evandro Silva Entrevista Halen Carvalho

A análise dos dados se deu a partir de um recorte em três períodos ao longo do período analisado: período inicial (entre 1992 e 2000), período de crescimento (entre 2001 e 2011) e período de consolidação (entre 2012 – 2018). A definição dos períodos foi feita a partir de Piana (2016) e

levou em consideração os principais marcos da empresa e mudanças nos níveis de capacidade tecnológica na Vale na área de processamento mineral de cobre. O quadro 3, abaixo, sintetiza os períodos de análise.

Quadro 3 – Períodos de análise da Pesquisa

Fatores de definição dos recortes dos períodos	Período entre 1992 -2000 Período Inicial	Período entre 2001 -2011 Período Crescimento	Período entre 2012 -2018 Período Consolidação
Condições Organizacionais (estratégia corporativa para o cobre, comportamento da liderança e janelas de oportunidade)	Privatização da Vale (1997);  Estratégia voltada para diversificação geográfica e portfolio de commodities (incluindo cobre);  Consolidação do modelo denominado célula de valor, com centralização das atividades de pesquisa mineral, desenvolvimento de projetos e de novas tecnologias para o processamento mineral de cobre num único centro (CDM);	Internacionalização da empresa (2006 aquisição da Inco, empresa canadense de níquel);  Estratégia de aceleração do crescimento em metais básicos através de aquisições e/ou crescimento orgânico (principalmente com o desenvolvimento dos projetos de cobre na região de Carajás);  Criação do ITV – Instituto Tecnológico Vale;	Disciplina na alocação capital, com redução expressiva dos orçamentos de P&D;  Aumentar a competitividade dos ativos cobre existentes, aliada ao desenvolvimento de novos depósitos de cobre para utilizando a capacidade de processamento existente;



Mudanças na capacidade tecnológica no processamento mineral de cobre	<p>1991/1992:P&amp;D aplicado e básico em bio hidrometalurgia;</p> <p>1993-1998 planta piloto Salobo no CDM;</p> <p>1997- 1998 teste tecnologia hidrometalúrgica CSEL;</p>	<p>2001/2002 Rota processo Sossego: moinho SAG, testes flotação;</p> <p>2005/2006: circuito moagem Salobo (SAG vs HPGR);</p> <p>2008 – 2010: UHC – Usina Hidrometalúrgica de Carajás;</p> <p>2004- 2011: otimizações circuito cominuição Sossego;</p>	<p>2014 – 2017: Salobo II e Salobo III (adaptações de tecnologias de processamento mineral, atividades baseadas em engenharia);</p> <p>2012 2018: melhorias operacionais Sossego e Salobo, <i>ore sorting</i> (planta piloto no Sossego) e biolixiviação;</p>
Principais Mecanismos Aprendizagem utilizados	<p>Estabelecimento de parcerias estratégicas : AngloAmerican, TeckCominco, Phelps Dodge)</p> <p>Realização de atividades de engenharia, P&amp;D aplicado e básico, treinamentos, visitas técnicas</p>	<p>Realização de atividades de engenharia, PD&amp; aplicado e básico</p> <p>Ampliação rede parceiros externos, a partir da criação do ITV</p>	<p>CDM : foco resolução de problemas operacionais, gradualmente retornando atividades de P&amp;D aplicado e básico;</p> <p>Revisão do modelo de gestão de tecnologia: desenvolvimento de mapas de tecnologia, reformulação do Comitê Gestor de Tecnologia</p>

## **6. Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre**

Os esforços da Vale para o desenvolvimento dos depósitos de cobre na região de Carajás fornecem os elementos essenciais para análise de sua trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas para o processamento de minérios de cobre. Especialmente importante na construção desta trajetória no período analisado foi o desenvolvimento dos projetos Salobo e Sossego. O Salobo foi o primeiro depósito descoberto pela companhia e levou mais de três décadas para ser implantado e iniciar a produção de concentrado de cobre. O Sossego foi a primeira operação de cobre da companhia; o projeto foi desenvolvido em 7 anos a partir da descoberta do depósito mineral.

A análise da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas para o processamento de minérios de cobre da Vale foi analisada nesta pesquisa a partir de três fases distintas:

- (i) fase inicial entre os anos de 1992 e 2000: o período foi marcado pela realização de atividades de baseadas em engenharia e experimentações, adaptações e melhorias de tecnologias existentes que tinham por objetivo de desenvolver os depósitos de cobre existentes na região de Carajás, permitindo assim a entrada da empresa na produção de cobre. Em função da complexidade do minério do Salobo, foram iniciadas atividades de P&D básico e aplicado nas áreas de biolixiviação e de testes de rotas hidrometalúrgicas (tecnologia CSEL, fronteira tecnológica da indústria no período analisado). O estabelecimento de parcerias com outras empresas mineradoras teve um papel importante na construção da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas verificada no período;
- (ii) fase de crescimento entre os anos de 2001 e 2011: ao longo do período a empresa iniciou sua atuação como produtora de concentrado de cobre, o que permitiu a construção (e

consolidação) de capacidades ligadas às atividades operacionais de processamento mineral, baseada em tecnologias existentes. Também se verificou o aprofundamento de atividades ligadas a níveis básicos e intermediários de inovação, através da intensificação dos esforços para a implantação de novos projetos de cobre na região de Carajás, a partir de atividades baseadas em engenharia e em experimentação e adaptações de tecnologias existentes. O período foi marcado pelo abandono dos esforços de desenvolvimentos de atividades de P&D voltadas para o desenvolvimento de rotas hidrometalúrgicas, o que representou um truncamento do desenvolvimento das atividades de P&D básico e aplicado;

- (iii) fase de consolidação entre os anos de 2012 e 2018: neste período se verificou a consolidação de capacidades de inovação em nível intermediário, principalmente a partir de atividades baseadas em engenharia e experimentação. A forte redução dos orçamentos voltados para as atividades de P&D, acarretou uma redução nas atividades voltadas para P&D básico e aplicado, o que acarretou em certa estagnação no desenvolvimento de atividades inovadoras ao longo de boa parte do período, sinalizando uma possível entrada em uma fase de *lock in*. Entretanto, alguns dos entrevistados (Keyla Gonçalves – Gerente Processamento Mineral e Patrice Mazzoni – Gerente de tecnologia) apontam nos anos finais do período de análise foram retomados alguns projetos (por exemplo, projeto de biolixiviação para viabilizar o processamento de minérios de baixo teor), o que poderia sinalizar a retomada destas atividades pela empresa. Em função do corte do período de análise, ainda não foi possível confirmar esta retomada. Também cabe destacar que elementos obtidos a partir das entrevistas realizadas apontam para um relativo atraso vis-à-vis a área de minério de ferro no desenvolvimento e implementação de novas tecnologias tais como machine learning, inteligência artificial, dispositivos móveis e wearables que foram detalhadas anteriormente no item 4.4 .

Os itens 6.1, 6.2 e 6.3, abaixo, descrevem para cada um destes períodos as condições organizacionais vigentes, os principais marcos de acumulação tecnológica na área de processamento mineral de cobre, o papel que os mecanismos de aprendizagem tiveram para desenvolvimento destas capacidades e as implicações geradas para a performance da empresa.

### **6.1 Período Inicial (1992- 2000): Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas no processamento de minérios de cobre**

Em função da complexidade do minério do Salobo, caracterizado por altos teores de cobre e ouro, mas também pela presença de deletérios (principalmente urânio, flúor e cloro), a empresa empreendeu ao longo deste período grandes esforços para desenvolvimento de capacidades tecnológicas que permitissem o desenvolvimento de uma rota de processamento do minério, avaliando alternativas de rotas pirometalúrgicas tradicionais, bem como rotas hidrometalúrgicas (descritas no item 4.1., acima).

Ao longo deste período inicial, empresa demonstrou capacidade de realizar atividades tecnológicas que possibilitaram o desenvolvimento de atividades inovadoras a partir de desenvolvimentos baseados em engenharia, P&D aplicado e P&D básico. Um elemento chave foi o estabelecimento de parcerias com outras empresas mineradoras (notadamente Anglo American e Phelps Dodge), o que permitiu a realização de uma estratégia de *stage-skipping* para permitir o *catch up* com a fronteira tecnológica (tecnologias relativas às rotas hidrometalúrgicas), entendida no período como necessária para o sucesso no desenvolvimento do negócio cobre. Mas este processo foi truncado, principalmente em função de fatores organizacionais relativos a alterações da estratégia da empresa para o desenvolvimento do negócio cobre.

A seção 6.1.1 aborda de forma mais detalhada a evolução das condições organizacionais que possibilitaram a revisão da estratégia da empresa para o negócio cobre. A seção 6.1.2 os principais marcos da trajetória de acumulação de capacidades na área de processamento de cobre. A seção 6.1.3 aborda o papel desempenhado pelos mecanismos de aprendizagem neste processo de acumulação de capacidade tecnológica. A seção 6.1.4 aborda as implicações geradas para performance da empresa como resultado deste processo de acumulação de capacidades tecnológicas. Vale destacar que para este período inicial a coleta de evidências relativas à trajetória de acumulação de capacidades na área de processamento mineral de cobre (bem como do papel desempenhado pelos mecanismos de aprendizagem neste processo) foi mais difícil em função da dificuldade de contatar profissionais que estiveram envolvidos nas atividades desenvolvidas no período.

#### **6.1.1. Condições organizacionais e estratégia para o negócio cobre entre 1992 e 2000**

No início da década de 1990 a empresa era controlada pelo governo brasileiro e tinha como foco o desenvolvimento dos ativos de minério de ferro no Brasil, bem como o desenvolvimento de outros negócios (alumínio, logística e energia). Apesar das primeiras descobertas de depósitos de cobre na região de Carajás terem ocorrido no final dos anos 1970, o desenvolvimento destas áreas e a entrada no negócio cobre só passou a fazer parte da estratégia da empresa a partir do final do início dos anos 1990. Em 1997 a empresa foi privatizada. O período imediatamente após a privatização foi marcado por forte redução de custos e investimentos (incluindo também os orçamentos ligados às atividades de P&D). Este período também foi marcado pela conceituação e início de implantação de um novo modelo de trabalho do CDM (principal centro de pesquisa voltado para as atividades de P&D relativas ao processamento mineral); este novo modelo (denominado célula geração de valor), buscava a centralização de atividades de exploração,

desenvolvimento de tecnologia e desenvolvimento de negócio de forma a avaliar mais rapidamente os depósitos encontrados pela área de pesquisa mineral, acelerando o desenvolvimento daqueles que se mostrassem mais promissores do ponto de vista do desenvolvimento de negócios para a Vale. Conforme indicado em 4.2, a indicação de um novo diretor para o CDM teve um papel importante na aprovação deste novo modelo junto a liderança da empresa. Foi relatado que a adoção deste novo modelo de trabalho centralizado de trabalho, permitiu acelerar a construção de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral, na medida em que permitiu a formação de grupos de projeto compostos por profissionais com diferentes expertises profissionais (incluindo geólogos, engenheiros de mina, engenheiros de processo, engenheiros metalúrgicos, entre outros).

Conforme indicado no item 4.2, acima, a empresa não tinha nenhuma experiência em operações de cobre e neste sentido buscou o estabelecimento de parcerias com outras mineradoras para entrada (e desenvolvimento) de um novo negócio voltado para exploração de seus depósitos de cobre. No início do período foi constituída a Salobo Metais, joint venture entre a Vale e a mineradora Anglo American para desenvolvimento do projeto Salobo. Outra parceria importante foi estabelecida em 1997 com a Phelps Dodge para realização de atividades de exploração mineral na região de Carajás, que culminou com a descoberta do depósito do Sossego.

### **6.1.2 Acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 1992 e 2000<sup>9</sup>**

Conforme indicado anteriormente, os esforços de construção de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre estão associados ao desenvolvimento de dois projetos de cobre

---

<sup>9</sup> Ao longo do processo de realização de entrevistas, foi possível coletar evidências relativas a períodos anteriores a 1992; àquelas evidências consideradas relevantes foram incluídas no período inicial analisado.

na região de Carajás, o Sossego e o Salobo. Neste sentido, os principais esforços para desenvolver uma rota para processamento para o minério de cobre do Salobo incluíram:

- (i) implantação de usina piloto no Salobo: entre 1984 e 1987, a partir de trabalho conjunto realizado por técnicos da Vale e consultores externos (Fundação Gorcex e Tractebel) foi instalada e operada uma planta piloto no Salobo. A operação da planta piloto envolveu uma série de atividades ligadas a adaptação e melhoria de tecnologias existentes, bem como por atividades baseadas em engenharia e experimentações. Ao final da operação da campanha desta planta piloto foi feita uma análise química completa do concentrado do Salobo que evidenciou que se tratava de um minério não convencional calcopirítico com a presença de deletérios como urânio, flúor e cloro;
- (ii) formação de JV com Anglo American para o Salobo: em 1993, a empresa estabelece uma joint venture com a mineradora Anglo American (empresa de mineração com larga experiência na produção de cobre) para desenvolver o projeto Salobo. Entre 1993 e 1998, foi instalada uma planta piloto no CDM para realização de testes e experimentações para desenvolvimento da rota de produção do concentrado do Salobo. A planta foi operada por técnicos das duas empresas e foram realizados estudos relativos às etapas de cominuição, flotação (variabilidade e recuperação), entre outros. A operação desta nova planta piloto aprofundou a capacidade de desenvolver atividades ligadas a adaptação e melhoria de tecnologias existentes, bem como por atividades baseadas em engenharia e experimentações;
- (iii) capacitação em bio hidrometalurgia/tecnologia CESL: Em função das características do minério do Salobo, a partir de 1991, teve início a capacitação de pesquisadores no CDM em bio hidrometalurgia, com o desenvolvimento de atividades de P&D básico para avaliar alternativas para processamento de minério sulfetado de baixo teor. Em 1997/1998,

pesquisador do CDM desenvolveu projeto de biolixiviação do minério do Salobo, com retirada do cobre e recuperação de ouro. Projeto foi apresentado em congresso na Austrália e neste mesmo congresso foram feitos os primeiros contatos com pesquisadores da TeckCominco (na época o segundo produtor mundial de cobre) para avaliação da tecnologia CESL, rota hidrometalúrgica para processamento de minérios de cobre. Deste trabalho resultou a realização entre 1999 e 2000 de teste em escala de demonstração da tecnologia CESL nos laboratórios da TeckCominco em Vancouver. Os esforços de desenvolvimento da tecnologia CESL foram interrompidos por mais de 5 anos, sendo retomados apenas em 2007 com a construção da Usina Hidrometalúrgica de Carajás (“UHC”).

Com relação ao desenvolvimento do Sossego, após a descoberta do depósito mineral teve início uma fase de realização de testes no CDM com participação de equipes da Vale e da Phelps Dodge para desenvolvimento da rota de processamento do minério do Sossego. Por se tratar de um concentrado limpo, minério calcopirítico de alto teor de cobre e baixos níveis de deletérios, sem maiores dificuldades para processamento e comercialização, a conceituação da rota de processamento se deu de forma mais rápida com base principalmente na experiência da Phelps Dodge na produção de concentrados de cobre. Em 2000 foi concluído o estudo de pré-viabilidade do projeto Sossego, já refletindo esta rota de processo inicialmente definida.

### **6.1.3 O papel dos mecanismos de aprendizagem na acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 1992 e 2000**

Os principais mecanismos de aprendizagem relatados como importantes para desenvolvimento de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre neste período estão descritos a seguir:



### Realização de visitas técnicas e treinamentos

A participação em cursos de formação e em seminários e cursos foram importantes elementos de capacitação dos profissionais da Vale na área de processamento mineral de cobre ao longo deste período. Foi relatado que houve grande incentivo da empresa para realização de cursos e treinamentos por parte dos profissionais envolvidos nos grupos de projeto voltados para o desenvolvimento das rotas de processamento do minério do Salobo. No final dos anos 1990 foram feitas visitas técnicas ao Chile para conhecer as experiências de bio lixiviação em pilha. A partir destas visitas foram realizados testes no CDM, com apoio de consultores externos e de profissionais da Anglo American. Também cabe destacar que foi a partir da participação de um técnico da Vale em congresso realizado na Austrália que se estabeleceu o contato com a empresa TeckCominco, que resultaria na parceria para teste da tecnologia CSEL.

### Desenvolvimentos com base em atividades de engenharia

Principais exemplos verificados ao longo do período incluem incluem (1) montagem de planta piloto no Salobo na primeira metade dos anos 1985, (2) montagem e operação de planta piloto no CDM entre 1993 e 1998 para realização de testes para processamento do minério do Salobo,

### Consultorias, assistência técnica e realização de testes

A montagem e operação de planta piloto no Salobo foi realizada com participação de técnicos da Fundação Gorceix e da empresa de engenharia Tractebel.

Ao longo do período foram realizados testes da tecnologia CSEL em planta piloto nos laboratórios da Teck no Canadá; para acompanhamento dos testes, foi formado um grupo de trabalho composto por 6 engenheiros da Vale que se revezavam em duplas no acompanhamento dos testes realizados em Vancouver, com uma sistemática de

elaboração de relatórios e reuniões de acompanhamento dos resultados tanto com os técnicos da Teck quanto com outros profissionais da Vale no Brasil;

#### Estabelecimento de parcerias com outras empresas

Conforme descrito no item 6.1.2, acima, ao longo do período foram estabelecidas parcerias importantes com Anglo American, Phelps Dodge e Teck Cominco para desenvolvimento de capacitações tecnológicas na área de processamento mineral de cobre. Na visão dos entrevistados, a parceria com a Phelps foi a mais aberta, com o estabelecimento de fluxos bidirecionais de troca de conhecimento entre as equipes de ambas as empresas. No caso da parceria com a Anglo American, havia um maior distanciamento e os fluxos de troca de conhecimento se deram de forma mais unidirecional (da Anglo para a Vale). No caso da Teck, também houve intensa troca de conhecimento entre as equipes, num fluxo inicialmente mais unidirecional (da Teck para a Vale), se tornando posteriormente mais bidirecional.

Também foi relatado que ao longo de todo o período houve intenso intercâmbio de conhecimentos entre os profissionais da Vale alocados no desenvolvimento dos projetos Salobo e Sossego. Esta troca também permitiu a aceleração dos estudos para desenvolvimentos de outros projetos de cobre na região de Carajás, notadamente o Cristalino.

#### **6.1.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas no período entre 1992 e 2000**

A acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre ao longo deste período foi um elemento importante para construção da base de conhecimento necessária para a entrada em um novo negócio (cobre); o que só se materializaria no período subsequente com a entrada em operação do Sossego em 2004. Especialmente o período do final da década de 1990 foi marcado pelo desenvolvimento de atividades de P&D básico e aplicado realizados

internamente e em parceria com outras empresas (Anglo American no caso da bio lixiviação em pilha e Teck Cominco no caso da tecnologia hidrometalúrgica CSEL).

## **6.2 Período de Crescimento (2001 – 2011) : Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre**

Neste período entre 2001 e 2011 (período de crescimento), a empresa permaneceu desenvolvendo de atividades inovadoras a partir de desenvolvimentos baseados em engenharia, P&D aplicado e P&D básico de forma mais intensa do que no período anterior. Também cabe destacar que as capacidades tecnológicas passaram a ser acumuladas de forma mais distribuída entre os parceiros externos (principalmente universidades, centros de pesquisa, fornecedores de equipamentos e reagentes). A empresa abandona as parcerias estabelecidas anteriormente com outras mineradoras (Anglo American e Phelps Dodge) e prossegue sozinha no desenvolvimento dos projetos para implantação das operações de Sossego e Salobo.

A seção 6.2.1 aborda de forma mais detalhada a evolução das condições organizacionais que possibilitaram a revisão da estratégia da empresa para o negócio cobre. A seção 6.2.2 apresenta como a empresa desenvolveu sua capacidade intermediária e avançada de inovação, a partir principalmente da criação e/ou adaptações de novas tecnologias de processamento mineral baseadas em engenharia e experimentações realizadas internamente ou em parceria (fornecedores de equipamentos e universidades). Também se verificou (a partir da operação do Sossego) a consolidação de capacidade de níveis básicos para níveis mais avançados de produção, com o desenvolvimento de melhorias operacionais baseadas em tecnologias dominantes, alcançando níveis de eficiência e qualidade globais. A seção 6.2.3 aborda o papel desempenhado pelos mecanismos de aprendizagem neste processo de acumulação de

capacidade tecnológica. A seção 6.2.4 aborda as implicações geradas para performance da empresa como resultado deste processo de acumulação de capacidades tecnológicas.

### **6.2.1. Condições organizacionais, estratégia para o negócio cobre e janelas de oportunidade para o período entre 2001 a 2011**

O período entre 2001 e 2011 foi marcado pela intensificação dos esforços de internacionalização e diversificação do portfolio de commodities da companhia, incluindo cobre e níquel. A estratégia da empresa era buscar, através de aquisições ou crescimento orgânico, o desenvolvimento de suas capacidades de mineração, logística e energia. Como reflexo desta estratégia, ao longo do período houve forte crescimento do valor dos investimentos e do número de projetos capital (projetos *greenfield* e expansões *brownfield*). Ao longo da primeira metade do período, a empresa chegou a desenvolver simultaneamente cerca de 30 grandes projetos de investimento de capital. A Figura 7, abaixo apresenta a evolução dos investimentos de capital (excluindo aquisições) ao longo do período. Com relação a atividade de pesquisa mineral, a empresa chegou a atuar em 26 países<sup>10</sup> (versus 6 países no período anterior).

Com relação a estratégia para o cobre, a empresa registra em 2001 a expectativa de crescimento da demanda pelo metal ao longo da próxima década, impulsionado pelas indústrias de computadores, telecomunicações e aparelhos elétricos. O desenvolvimento dos recursos de cobre na região de Carajás continua a ser indicado como um dos eixos da estratégia de entrada e crescimento do negócio cobre na companhia. (Vale 2001). Conforme relatado anteriormente, a estratégia de aceleração do crescimento no negócio metais básicos (cobre e níquel) foi

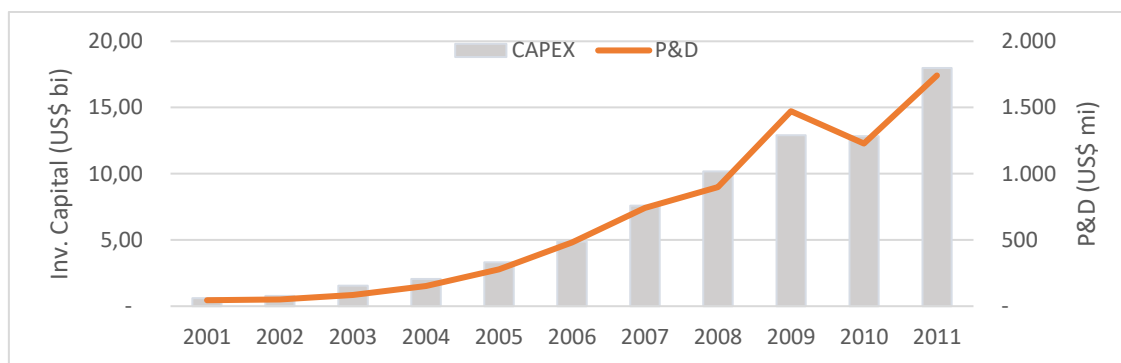
---

<sup>10</sup> Nos anos iniciais da década de 2000, a empresa continuou a buscar parcerias com outras mineradoras para o desenvolvimento de suas atividades de exploração mineral voltadas para depósitos de cobre; neste sentido, destacam-se as parcerias estabelecidas com a Codelco e com a Antofagasta em 2001 e 2002.

alavancada com a aquisição, em 2006, da mineradora canadense Inco (segunda maior produtora global de níquel). A criação do ITV em 2009 permitiu também uma melhor articulação dos esforços de desenvolvimento de tecnologia com os objetivos estratégicos da companhia de diversificação de seu portfolio de commodities minerais. Também se verificou a ampliação da rede de parcerias com instituições de pesquisa, comunidade acadêmica e instituições ligadas ao sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação (CAPES e CNPq). A Figura 7, abaixo, apresenta a evolução dos gastos com P&D neste período.

Ao longo do período, a empresa amplia fortemente os gastos relativos às atividades de P&D. Cabe destacar que os valores reportados pela Vale com relação a suas atividades de P&D englobam: (i) atividades de exploração mineral, (ii) gastos com estudos conceituais, pré-viabilidade e viabilidade de projetos e (iii) desenvolvimento de novos processos, inovação e adaptação tecnológica. Ao longo do período entre 2001 e 2011, os gastos relativos aos dois primeiros itens representaram cerca de 80-85% dos gastos totais de P&D<sup>11</sup>.

Figura 7 - Evolução dos Gastos Globais da Vale em P&D e investimentos de capital (excluindo aquisições) entre 2001 e 2011



Fonte: Relatórios Anuais da Vale (Relatórios 20F)

<sup>11</sup> Este valor representa a média calculada a partir de informações publicadas nos relatórios anuais da companhia para o período em questão.

### 6.2.2 Acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 2001 e 2011

Ao longo deste período grande parte dos esforços para desenvolvimento de capacidades tecnológicas estava associado a entrada da companhia no negócio cobre (com o início a entrada em operação do Sossego, em 2004), em linha com o aumento da demanda e dos preços do metal. Os esforços para desenvolvimento dos projetos Sossego e Salobo continuaram ser elementos centrais para uma acumulação mais intensa de capacidades tecnológicas. O período também foi marcado pela ampliação do leque de parceiros envolvidos nas atividades de inovação, especialmente fornecedores de equipamentos, fornecedores de insumos (floculantes e reagentes), universidades e centros de pesquisa.

A trajetória de acumulação de capacidades para processamento mineral de cobre neste período apresentou um padrão de *path follower*, ou seja na construção e ampliação de capacidades tecnológicas a partir de adaptações/melhorias de tecnologias existentes. Um dos entrevistados destacou que “*a incorporação do HPGR no circuito de cominuição do Salobo só foi possível após um longo trabalho de convencimento interno das equipes envolvidas no desenvolvimento do projeto. As empresas de mineração são muito conservadoras, ninguém quer ser o primeiro, todo mundo quer ser o primeiro segundo (path follower), em função do longo prazo para desenvolvimento e do alto investimento requerido para desenvolvimento de novas tecnologias. E com a Vale, não foi diferente.*” (fonte: entrevista Evandro Silva).

#### Sossego

No caso do Sossego, a parceria com a Phelps Dodge foi desfeita em 2001 e a Vale prosseguiu sozinha no desenvolvimento do projeto, a partir principalmente de atividades baseadas em engenharia e experimentação para adaptação de tecnologias já existentes que resultaram na

utilização pioneira no Brasil de moinho SAG no circuito de cominuição do projeto. A usina do Sossego iniciou sua operação em 2004. A Figura 8, abaixo apresenta um esquema resumido da rota de processamento desenvolvida para o projeto Sossego. O sistema tem capacidade para processar 15 milhões de toneladas de minério, produzindo aproximadamente 470.000 t de concentrado de cobre, com teor de cobre de cerca de 30%. A etapa de cominuição é composta por uma britagem primária, um moinho SAG de 38' e dois moinhos de bolas. A etapa de concentração por flotação é realizada por um circuito rougher, composto por duas linhas com 7 células de 160 m<sup>3</sup> cada, uma remoagem em 2 vertmills, concentração cleaner, em seis colunas e uma etapa scavenger do cleaner, composta por uma linha com 6 células de 160 m<sup>3</sup>. Os principais marcos relativos ao desenvolvimento de capacidades tecnológicas associados ao processamento do minério do Sossego incluem:

- (i) desenvolvimento circuito de cominuição (britagem/moagem): entre 2000 e 2002 foi desenvolvido o circuito de cominuição, considerando a utilização pioneira no Brasil de um moinho semi- autógeno ("SAG"). Para dimensionamento do moinho SAG foram feitas visitas técnicas a outras empresas/operações que já tinham o equipamento em funcionamento, com apoio dos fornecedores do equipamento. Foram feitas visitas ao Chile, com apoio da Eletrometal, visitas ao Canadá (Norquest), além de trabalhos realizados com apoio de fornecedores de equipamento (Metso e Bradquem). Para dimensionamento do circuito de cominuição, foi realizada no ano 2000 uma extensa campanha de testes em escala piloto no Centro de Investigaciones Mineras y Metalurgicas (CIMM). Foram avaliadas diferentes configurações e condições operacionais com amostras dos depósitos de Sossego e Sequeirinho. A configuração do moinho SAG em circuito fechado com britador de pebbles foi selecionada e os equipamentos foram dimensionados para processar 41.000 t/d. A partir dos testes realizados na planta piloto, ficou claro que o desempenho do moinho SAG é fortemente impactado pela quantidade de material próximo do tamanho

crítico do moinho. Também foram realizados estudos de variabilidade com amostras de furos de sonda que permitiram a avaliação do comportamento do circuito por meio de simulações com o software JKSimMet.

- (ii) testes de flotação realizados no CDM e no Cetec -MG : realizados entre 2003 e 2004 resultaram na validação de um esquema de utilização combinada de 2 reagentes , com adição de sulfureto de cobre durante fase de flotação *rougher/scavenger*;
- (iii) otimizações dos circuitos de cominuição: após o comissionamento do circuito, observou-se que algumas variáveis estavam contribuindo para vazões horárias abaixo das esperadas; em função disso, foram realizadas uma série de otimizações e adequações do moinho SAG, incluindo mudança na área aberta, tamanho e disposição das aberturas das grelhas, perfil dos revestimentos e mudanças no plano de fogo da mina. Estas otimizações foram realizadas a partir uma série de estudos e experimentações baseadas em adaptações de tecnologias existentes, atividade de experimentação e engenharia e foram descritas detalhadamente por Bergerman et al (2007). As principais otimizações estão sumarizadas na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Principais otimizações realizadas no circuito de cominuição do Sossego entre 2004 e 2011

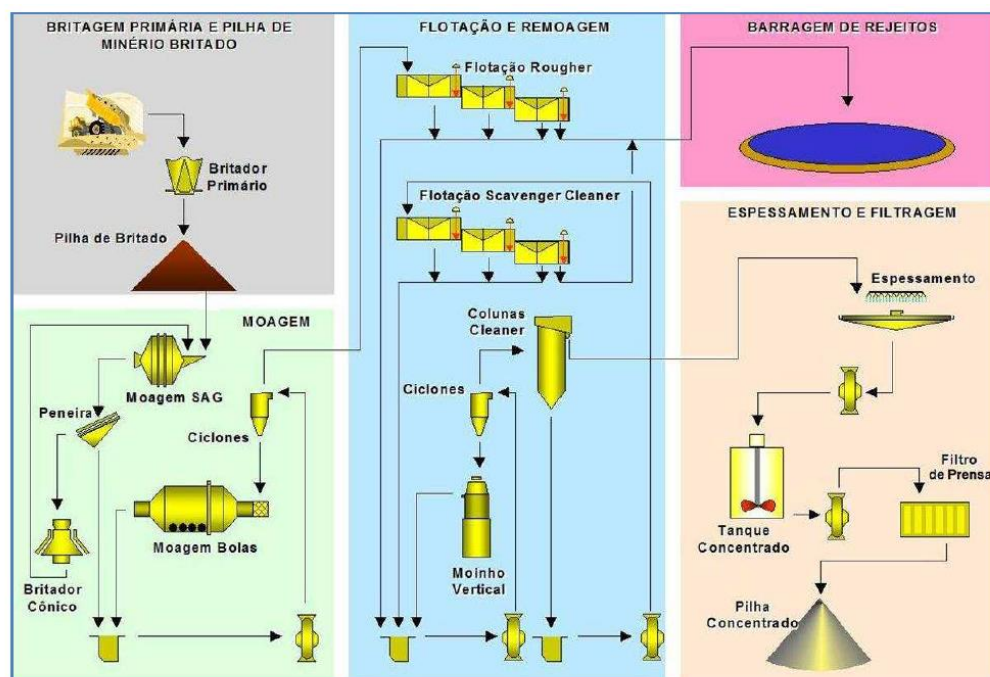
Item/ Período	Descrição	Principais ganhos
Modificações nos perfis das grelhas e dos revestimentos realizadas entre 2004 e 2006	Após o início da operação da usina verificou-se intensa acumulação de material próximo do tamanho crítico, chamado de pebbles, no interior do moinho SAG. Foram realizadas uma série de modificações no projeto das grelhas de forma a aumentar a área aberta das grelhas e a abertura dos <i>pebble ports</i> , de forma a reduzir o acúmulo de material próximo do tamanho crítico no interior do moinho;	Aumento da vazão medida do SAG para 1.450 t/h em 2005 e 1600 t/h em 2006
Otimização da ciclonagem desenvolvidas ao longo de 2007	Otimização da ciclonagem, com o controle de enchimento do moinho e abertura do circuito de rebitagem no moinho SAG;	N/D
Integração mina/usina atividades desenvolvidas em 2007 e 2008	Simulações realizadas com a utilização de softwares especializados demonstraram o efeito significativo e deletério ao desempenho do moinho SAG (e conseqüentemente de todo o circuito de moagem do Sossego), do engrossamento da granulometria de alimentação.	Com estas modificações, obteve-se em 2007 uma vazão medida do SAG de 1.731 t/h; também se obteve um aumento médio na vazão da usina



	A partir daí, teve início um trabalho conjunto das equipes de mina e usina visando adequar a operação de desmonte na mina, de forma que a distribuição granulométrica ótima identificada em 2007 como ótima passasse a ser um valor de referência e de rotina. A mina realizou adequações na malha de desmonte e nas razões de carga utilizadas, assim como na utilização de perfuratrizes. Também foi instalado um analisador on line de granulometria de alimentação no SAG (equipamento fornecido pela empresa Slip engineering), de forma monitorar a granulometria de alimentação do moinho.	da ordem de 10% em 2008 (em relação ao ano anterior).
Troca intercalada de grelhas (2009)	De forma a minimizar o impacto com uma diminuição brusca de área aberta quando se realiza a troca das grelhas, foi implementada uma estratégia de troca alternada de grelhas;	Aumento da vazão horária média do SAG para 1.766t/h.
Otimizações nos revestimentos e estratégias de operação e manutenção	Implantação de otimizações no revestimento do moinho SAG, incluindo a utilização de grelhas duplas, revestimentos de borracha, redução do número de placas do cilindro e a reciclagem de placas altas como baixas, além de rígido controle operacional do enchimento do moinho. Estas modificações acarretaram, principalmente, o aumento da massa processada por cada jogo de revestimento do moinho SAG e a diminuição no número de quebras;	Os principais ganhos incluem redução de custos de operação e a redução do número de paradas do moinho para manutenção e/ou troca de revestimentos.

Fonte: Elaboração da autora baseada em Bergerman et al (2007).

Figura 8 – Fluxograma de processo da usina do Sossego



Fonte: da Silva, A. (2011)

### Salobo

No caso do Salobo, a parceria com a Anglo American foi desfeita em junho de 2002, passando a Vale a deter 100% de participação na Salobo Metais. A partir do *know how* de concentração obtido a partir dos estudos realizados em parceria com a Phelps Dodge, aliado a alteração nas condições de mercado de concentrado de cobre que levou que a mudança de que contaminantes que anteriormente eram considerados proibitivos passaram a ser tratados como uma questão econômica de pagamento de penalidades, a Vale abandonou a visão de um projeto Salobo verticalizado. A Figura 9, abaixo, apresenta um esquema resumido da rota de processamento desenvolvida para o projeto Salobo. Entre os esforços para desenvolver rotas de processamento do minério de cobre do Salobo, se destacam:

- (i) estudos realizados no CDM entre 2003 e 2004 relativos às etapas de cominuição, flotação (variabilidade e recuperação), entre outros que permitiram o desenvolvimento do circuito básico de processamento do minério;
- (ii) visitas técnicas e testes para avaliar o comportamento do concentrado do Salobo e sua aceitação por parte de smelters. De acordo com engenheiro sênior “ *a Vale trouxe consultores chilenos, especialistas em metalurgia para a realização junto com técnicos da Vale de testes para avaliar o comportamento do concentrado do Salobo. Também foram realizadas visitas técnicas a vários smelters para avaliar os fatores limitantes para a comercialização do concentrado do Salobo, especialmente flúor e radionuclídeos. Um dos consultores chilenos indicou que havia tecnologia disponível para lidar com a questão do flúor, mas havia também a destinação do ácido resultante deste processo.*” (fonte: entrevista com Eugênio Oliveira). Como resultado destes testes, em 2005 foi assinado o primeiro contrato com um *smelter* europeu para comercialização do concentrado do Salobo;

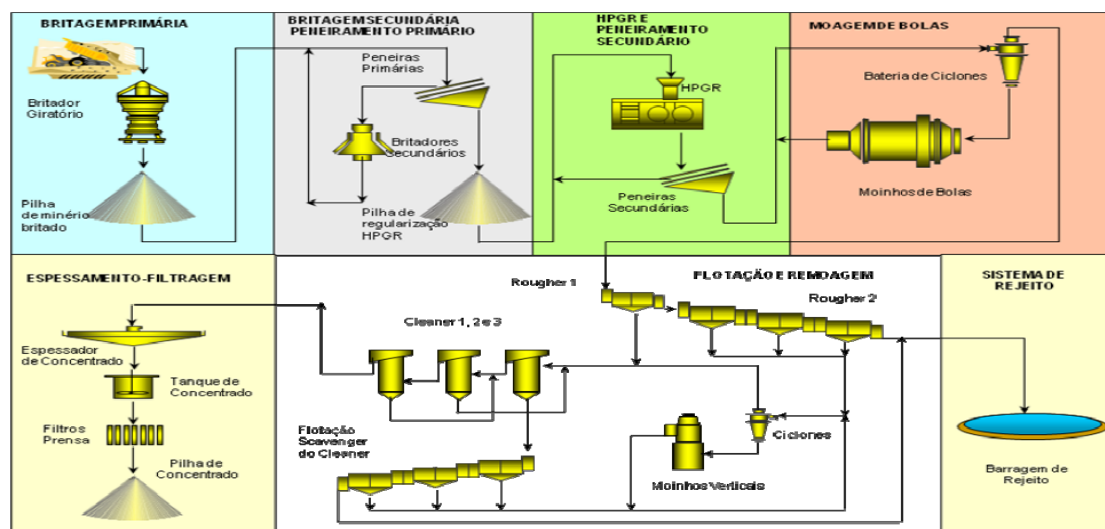
(iii) capacitação em hidrometalurgia/tecnologia CESL: após uma interrupção de mais de 5 anos, os esforços de desenvolvimento da tecnologia CESL foram retomados em 2007 com a construção da Usina Hidrometalúrgica de Carajás (“UHC”). A UHC foi a primeira planta em escala industrial construída para operar a tecnologia CSEL; era uma planta com capacidade de produção de 10.000 tpa de catodos de cobre a partir do processamento de concentrados de minério de cobre da região de Carajás que operou entre 2008 e 2010 e permitiu a validação da tecnologia em escala industrial. Do ponto de vista da acumulação de capacidades tecnológicas, foram relativamente pequenos os ganhos decorrentes da operação da UHC. De acordo com engenheiro de processo que participou da fase de testes realizada nos laboratórios da Teck em Vancouver “*a operação da UHC foi feita pelo time de operação do Sossego e não contou com a participação do time que acompanhou os testes da planta piloto em Vancouver. Também foi pequena a participação do especialistas do CDM. O time de operação do Sossego era inexperiente. Além disso, o viés da operação da UHC deveria ter sido para teste de uma nova tecnologia e não para produção; mas na visão do time de operação do Sossego, a planta só dava prejuízo.*” (fonte: entrevista Geysa Pereira). Outro engenheiro sênior relatou que “*após a aquisição da Inco, a empresa realizou, com apoio de especialistas em hidrometalurgia do centro de pesquisa do Canadá, uma auditoria na UHC; a auditoria apontou que a área de tecnologia é que deveria ter sido responsável pela operação da planta, uma vez que a operação não tinha conhecimento nem maturidade necessárias para realizar esta operação.*” (fonte: entrevista Vânia Andrade). A operação da UHC foi descontinuada em 2010, a planta foi sucateada e seus equipamentos foram vendidos através de leilão. Uma engenheira sênior relata que “*este insucesso da UHC estigmatizou a tecnologia CSEL (e outras rotas hidrometalúrgicas) para a liderança da empresa*” (fonte: entrevista Geysa Pereira);

(iv) testes flotação Salobo realizados no CDM e no Cetec -MG entre 2003- 2004:

permitiram a melhoria na recuperação de cobre e maior estabilidade no processo de flotação;

(v) estudos de *trade off* para a solução a ser adotada no circuito moagem Salobo realizados entre 2005 e 2006 foram realizados estudos para avaliação de alternativas de utilização de High Pressure Grinding Roles (HPGR) versus moinho SAG no circuito de cominuição do Salobo. Estes estudos foram realizados em parceria com o fornecedor de equipamento (Polysius) e empresas de engenharia (Aker Kvaerner). Utilização do HPGR pelo Salobo foi pioneira no Brasil. O equipamento era utilizado na Europa para moagem de calcário para produção de cimento e a primeira tentativa de adaptação em uma operação de cobre nos EUA foi bastante difícil em função do alto consumo de revestimentos, acarretando encurtamento da vida útil do equipamento e exigindo paradas para trocas constantes de revestimentos. De acordo com um engenheiro sênior que participou dos estudos para utilização do HPGR no Salobo “... *essa dificuldade inicial criou má fama do equipamento para os mineradores de cobre. No caso da Vale, os primeiros testes do HPGR foram feitos para o projeto Cristalino, mas como o projeto foi postergado, a solução não foi desenvolvida. Mas foi feita apresentação do resultado destes testes para o Cristalino em reunião da equipe do CDM e daí se vislumbrou a possibilidade de utilização para o circuito de moagem do Salobo*”(fonte: entrevista Evandro Silva). Foi realizada uma visita técnica a operação de Cerro Verde no Peru, pioneira na utilização do HPGR naquele país.

Figura 9 – Fluxograma de processo da usina do Salobo



Fonte: Rosa et al, 2007

### 6.2.3 O papel dos mecanismos de aprendizagem na acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 2001 e 2011

Ao longo deste período se intensificou o uso de mecanismos inter-organizacionais baseados em desenvolvimento de engenharia e atividades de P&D. Também se verificou alteração no modelo de gestão de tecnologia, o que resultou em mudanças importantes nos arranjos organizacionais associados ao desenvolvimento das atividades inovativas. Os principais mecanismos de aprendizagem relatados como importantes para desenvolvimento de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre neste período estão descritos a seguir.

#### Contratação de expertise

Para montagem da equipe que seria responsável pela operação do Sossego, a Vale recorreu a contratação de técnicos e engenheiros chilenos com experiência nas áreas de lavra e processamento mineral para treinar as equipes da Vale e também para apoiar a operação da

planta nas fases iniciais de entrada em produção. Por exemplo, foi relatada a contratação de um geólogo sênior que havia trabalhado como representante da Phelps Dodge no desenvolvimento do projeto Sossego.

#### Realização de visitas técnicas e treinamentos

As visitas técnicas de profissionais da Vale à outras mineradoras de cobre no Chile teve um papel fundamental tanto na preparação para entrada em operação do Sossego. Também foi muito importante a realização de treinamentos realizados pelos técnicos e engenheiros do Sossego. Neste sentido, um engenheiro sênior relata que “ *os operadores da sala de controle do Sossego ficaram três meses em treinamento em operações da Codelco (ou outra empresa chilena). Também foram realizados treinamentos realizados por uma universidade chilena com duração de cerca de 6 meses para as equipes os técnicos contratados para operar a mina e a usina. A partir destes treinamentos, foram desenvolvidos material didático e manuais de operação da mina e usina.* ” (fonte: entrevista Halen de Carvalho).

As visitas técnicas realizadas à outras mineradoras chilenas também um elemento importante para utilização do moinho SAG no circuito de cominuição do Sossego. As visitas técnicas realizadas a vários *smelters* para realização de testes de aceitabilidade do concentrado do Salobo também foram fundamentais para resolução de questões técnicas relativas ao tratamento dos deletérios e para assinatura do primeiro contrato para comercialização deste concentrado com o smelter Auribis.

#### Desenvolvimentos com base em atividades de engenharia

As adaptações do moinho SAG no circuito de cominuição do Sossego e do HPGR no caso do Salobo, são exemplos de aquisição e integração de conhecimento a partir de mecanismos de aprendizagem de desenvolvimentos baseados em engenharia. Outros exemplos incluem o desenvolvimento de uma série de otimizações implementadas a partir de atuação conjunta do CDM e das áreas de operação/manutenção do Sossego para resolução de problemas da operação

relativos aos problemas ligados a baixa taxa de operação do moinho SAG (descritos no item 6.2.1, acima).

#### Consultorias, assistência técnica e a realização de testes:

Para apoiar a entrada em operação do Sossego, um engenheiro sênior relata que *“foi contratada uma consultoria americana para apoiar os seis primeiros meses de operação, com consultores seniores nas áreas de equipamentos de mina e processamento mineral. Sempre que tínhamos alguma dificuldade, estes consultores eram acionados.”* Também foram utilizadas de forma intensa consultorias de fornecedores de equipamentos, revestimentos e corpos moedores (Metso, Bradquem entre outros) para desenvolvimento das soluções de engenharia (e posterior operação) do moinho SAG no Sossego. A utilização de prensas de rolo (HPGR) no circuito de cominuição do Salobo foi desenvolvida a partir de parceria com fornecedor de equipamentos (Polysius).

#### Atividades de P&D aplicado:

A principal atividade de P&D aplicado foi realizado parceria com a empresa canadense Teckcominco para teste de rota hidrometalurgica para processamento de minério de cobre (tecnologia CSEL). Uma primeira fase foram realizados testes em escala piloto nos laboratórios da Teck no Canadá. Posteriormente foi construída e operada pela Vale uma planta em escala industrial (UHC).

#### Atividades de P&D básico:

Ao longo período foram realizadas atividades de P&D básico através de parcerias com centros de pesquisa no Brasil, EUA, Canadá e Austrália. Entre os exemplos estão os estudos realizados com o Australian Mineral Industries Research Association (AMIRA)<sup>12</sup> incluindo : (i) estudo de caso para tratamento do minério oxidado do Salobo, (ii) estudos voltados para avaliação da

---

<sup>12</sup> A AMIRA é uma organização baseada na associação de empresas mineradoras e fornecedores de equipamentos e insumos que atua no desenvolvimento projetos de pesquisa de forma colaborativa. A AMIRA recruta pesquisadores ao redor do mundo para resolver problemas da indústria e para conduzir oportunidades de pesquisas que levem ao desenvolvimento de uma base de investigação mais forte na indústria de mineração. (AMIRA, 2015).

hidrodinâmica das células de flotação através da utilização de sondas; estes estudos foram inicialmente realizados para avaliação de operação de potássio em Taquari Vassouras, mas os resultados foram posteriormente replicados em estudos hidrodinâmicos no Sossego e (iii) estudos de geometurgia, análise de dados e planejamento de amostragem.

#### **6.2.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas no período entre 2001 e 2011**

A acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre ao longo deste período se caracterizou pelo alcance de capacidades ligadas às atividades de produção de nível básico para avançado. A partir da entrada em operação da primeira operação de cobre da companhia (em 2004), foram realizadas uma série de atividades ligadas a melhoria dos níveis de eficiência operacional, consolidando assim capacidades tecnológicas ligadas às atividades de produção de nível básico para avançado.

Os frutos desenvolvimento de atividades de P&D básico e aplicado realizado internamente e em parceria com outras empresas (Anglo American no caso da bio lixiviação em pilha e Teck Cominco no caso da tecnologia hidrometalúrgica CSEL) foram relativamente modestos. No caso da biolixiviação, na avaliação de uma engenheira sênior *“não foi possível montar uma base de expertise no CDM em função das constantes reduções de orçamento e equipe alocados para o desenvolvimento desta capacitação”* (fonte: entrevista Geysa Pereira). No caso da tecnologia CSEL, também não houve a consolidação desta expertise na Vale. Um entrevistado relata que *“a falta de visão da liderança com relação a importância dos esforços para desenvolvimento de tecnologia se traduziu em reduções de orçamentos e no tamanho das equipes. Também não havia o entendimento adequado com relação ao tempo necessário para o desenvolvimento de tecnologias de caráter disruptivo, como era a tecnologia CSEL”*(fonte: entrevista Geysa Pereira).



Outras implicações decorrentes da acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre para performance competitiva da empresa estão relacionadas a melhorias na recuperação de cobre e maior estabilidade no processo de flotação do Salobo. Também podem ser destacadas as otimizações no circuito de cominuição do Sossego (descritas em 6.2.2, acima), que permitiram a obtenção de ganhos de produtividade e reduções de custo de operação.

### **6.3 Período de Consolidação (2012–2018): Trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre**

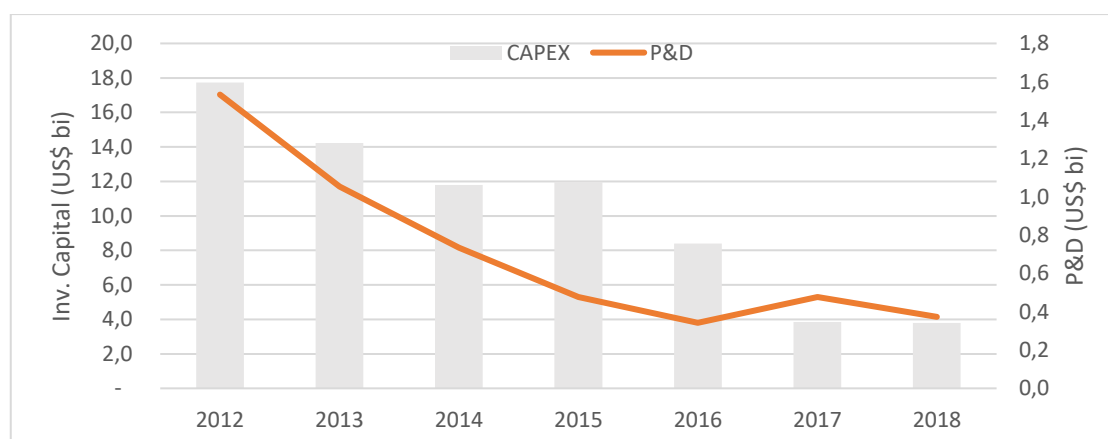
Em função da piora nas condições financeiras da empresa, foram realizados cortes expressivos nos orçamentos relativos as atividades de exploração mineral, desenvolvimento de tecnologia e desenvolvimento de projetos. Isto se refletiu em redução nos esforços em atividades inovadoras, especialmente àquelas voltadas para o longo prazo. A empresa continuou a realizar atividades inovadoras a partir de desenvolvimentos baseados em engenharia, P&D aplicado e P&D básico, mas com menor grau de esforço.

A seção 6.3.1 aborda de forma mais detalhada a evolução das condições organizacionais que possibilitaram a revisão da estratégia da empresa para o negócio cobre. A seção 6.3.2 apresenta o processo de acumulação de capacidades tecnológicas no período. A seção 6.3.3 aborda o papel desempenhado pelos mecanismos de aprendizagem neste processo de acumulação de capacidade tecnológica. A seção 6.3.4 aborda as implicações geradas para performance da empresa como resultado deste processo de acumulação de capacidades tecnológicas.

### 6.3.1. Condições organizacionais : estratégia para o negócio cobre entre 2012 e 2018

Com fim do superciclo de commodities, tem início ciclo de redução nos orçamentos de investimentos em novos projetos e nas atividades de P&D. A Figura 10, abaixo, mostra a evolução dos orçamentos de investimento de capital e atividades de P&D no período. Com relação a estratégia, o foco continua a ser a consolidação da posição de liderança no minério de ferro e níquel, aliada a estratégia de maximizar o valor dos negócios de cobre, carvão e fertilizantes. O foco passa a estar no desenvolvimento de portfólio com foco no crescimento orgânico, com menor número de projetos, porém com uma expectativa de maiores taxas de retorno com foco no crescimento orgânico. Neste sentido, o relatório anual relativo ao ano de 2017 registra “... o orçamento de investimentos para 2017 aprovado pelo nosso Conselho de Administração é de US\$1,846 bilhão para execução de projetos, refletindo uma diminuição de 41,8% em comparação ao orçamento de investimentos de 2016, e US\$2,702 bilhões para manutenção das operações atuais e projetos de reposição, refletindo uma diminuição de 9,8% em comparação a 2016. Este é o sexto ano consecutivo em que reduzimos nossas despesas de capital, mantendo a disciplina do capital e focando apenas em nossos projetos de nível mundial.”

Figura 10 – Evolução dos gastos globais da Vale em P&D e investimentos de capital (excluindo aquisições) entre 2012 e 2018



Fonte: Relatórios Anuais da Vale (Relatórios 20F)

Com relação ao negócio cobre, a estratégia para os ativos de cobre na região de Carajás é melhorar a eficiência e utilização dos ativos, enquanto são avaliadas oportunidades de estender as operações de Sossego e expandir as de Salobo. Em 2014 entra em operação o Salobo II, expansão de capacidade do Salobo para 200 mil tpa de concentrado de cobre. A partir de 2016, as apresentações da empresa registram planos para desenvolver um plano plurianual de expansão de cobre, com a meta de atingir 500 mil tpa de cobre; o projeto Salobo III foi o primeiro projeto aprovado e teve sua implantação iniciado no final de 2018. O Salobo III é uma expansão *brownfield* que engloba uma terceira linha de concentradores e usará a infraestrutura existente de Salobo para produzir ~30 a 40 ktpa de cobre. O plano estratégico também contempla o desenvolvimento de outros projetos num horizonte de médio prazo, incluindo os projetos Cristalino (80 mil tpa a partir de 2023), Alemão (60- 70 mil tpa a partir de 2024), a entrada em operação de mini minas em Carajás (operadas por terceiros) de forma a permitir a manutenção da usina de processamento de minérios de cobre atualmente em operação no Sossego. Também estão contemplados no plano estratégico outros projetos e oportunidades a serem concluídos no longo prazo, incluindo Paulo Afonso, Polo, Furnas, Sossego UG, Visconde, Bacaba, Mata e 118; a implantação destes projetos permitiria alcançar a produção de cerca de 800 mil tpa no longo prazo. Cabe destacar que, conforme apontado no item 4.2 acima, a empresa já anunciou no passado planos ainda mais ambiciosos de crescimento no cobre (ie. meta anunciada em 2004 de atingir produção de 1 milhão de toneladas/ano de produção de cobre até 2012); mas estes planos não se concretizaram.

### **6.3.2 A trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre entre 2012 e 2018**

Ao longo deste período grande parte dos esforços para desenvolvimento de capacidades tecnológicas para processamento mineral de cobre esteve associado aos esforços para ampliação

da capacidade do Salobo e de outros projetos de cobre na região de Carajás, através principalmente de inovações com base em atividades de engenharia e realização de testes e experimentações. A trajetória de acumulação de capacidades para processamento mineral de cobre neste período apresentou um padrão de *path follower*, ou seja na construção e ampliação de capacidades tecnológicas a partir de adaptações/melhorias de tecnologias existentes. A forte redução dos orçamentos voltados para as atividades de P&D, acarretou uma redução nas atividades voltadas para P&D básico e aplicado, o que acarretou em redução dos esforços de desenvolvimento de tecnologias disruptivas ao longo de boa parte do período analisado. Entretanto, alguns entrevistados (Keyla Gonçalves – Gerente Processamento Mineral e Patrice Mazzoni – Gerente de tecnologia) apontam a retomada, nos anos finais do período de análise, de projetos voltados para atividades de P&D básico e aplicado (por exemplo, projeto de biolixiviação para viabilizar o processamento de minérios de baixo teor). Em função do corte do período de análise em 2018, não é possível afirmar se esta redução de esforços representa um atraso no desenvolvimento destas tecnologias (como sugerido pelas entrevistadas) ou o início de uma fase de estagnação na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas (fase de lock in).

Os principais marcos de evolução das capacidades para processamento mineral de cobre estão descritas a seguir:

- (i) o desenvolvimento dos projetos de expansão de capacidade do Salobo (ie Salobo II e Salobo III) tiveram como base adaptação de tecnologias de processamento mineral com base em atividades de engenharia, testes e experimentações realizadas internamente e/ou em parceria. Exemplos destas atividades incluem o desenvolvimento de uma nova célula de flotação a ser implantada em Salobo III, através de parceria com fornecedor de equipamento. A nova célula vai permitir uma melhoria na recuperação de cobre;

- (ii) entre 2015 e 2017 foram desenvolvidos, em parceria o centro de pesquisa do Canadá, projetos de melhoria operacional do Salobo, incluindo: (a) iniciativas para aumento da recuperação de cobre e processamento pilhas de minério de transição no Salobo e (b) teste de esquemas alternativos de reagentes, com adição de um estágio de deslamagem com ciclone, removendo componentes oxidados da pilha de minério de transição, de forma a permitir a redução no consumo de reagentes;
- (iii) melhorias operacionais Sossego desenvolvidas a partir de otimizações nos revestimentos, estratégias de manutenção e integração mina/usina. Foram implantadas algumas otimizações no revestimento do moinho SAG, tais como a utilização de grelhas duplas, revestimentos de borracha, redução do número de placas do cilindro e a reciclagem de placas altas como baixas, além de rígido controle operacional do enchimento do moinho. Estas modificações acarretaram, principalmente, o aumento da massa processada por cada jogo de revestimento do moinho SAG, a diminuição no número de quebras e, conseqüentemente, redução no tempo de parada para manutenção.

Também foram relatados que estão em andamento alguns projetos baseados em atividades de P&D básico e aplicado, incluindo (i) projeto de biolixiviação para viabilizar o processamento de minérios calcopirítricos de baixo teor (realizado em parceria com a UNESP-Araraquara) e (ii) projeto de *ore sorting* (i.e. pré-concentração do minério antes da entrada na alimentação da usina de processamento). O horizonte de desenvolvimento e implantação destes projetos está fora do período de análise desta pesquisa, não sendo possível avaliar no momento a materialização de seus resultados tanto em termos de capacitação tecnológica quanto de performance operacional.

### **6.3.3 O papel dos mecanismos de aprendizagem na acumulação de capacidades no processamento mineral de cobre entre 2012 e 2018**

O período foi marcado pela consolidação dos mecanismos de aprendizagem desenvolvidos no período anterior. Foram encontrados indícios de ampliação de que a combinação de diferentes mecanismos de aprendizagem (especialmente uma melhor articulação dos mecanismos intra-organizacionais) permitiu a consolidação de capacidades tecnológicas adquiridas, principalmente, através de atividades baseadas em engenharia.

#### P&D básico e aplicado

Foi reportado uma melhoria no trabalho desenvolvido em conjunto com o ITV para seleção e avaliação de parcerias com universidades e instituições de pesquisas para a realização de atividades de P&D básico e aplicado. No período se destacaram os projetos de melhoria no sistema de cominuição do Sossego (realizado em parceria com a USP) e projeto de biolixiviação para viabilizar o processamento de minérios calcopirítricos de baixo teor (desenvolvido em parceria com a UNESP – Araraquara). Também foi reportado que está em desenvolvimento um projeto de *ore sorting* (pré-concentração, com separação de minérios de baixo teor e alimentação da usina com minério de mais alto teor); estão sendo realizados testes em planta piloto no Sossego e está prevista a implantação em 2020 de uma nova planta piloto no Salobo. O projeto de *ore sorting* está sendo desenvolvido a partir da conjugação de esforços de profissionais ligados ao CDM e às áreas de operação e manutenção do Salobo.

#### Treinamentos externos e internos, visitas técnicas, participação em congressos, seminários e cursos

Nos anos iniciais do período, em função de cortes de orçamento para as atividades de P&D, foi reportado uma redução na realização destas atividades. Foi reportado que a partir de 2013, a empresa tem realizado (sob a coordenação do CDM) encontros de tecnologias organizados como congressos

internos com apresentação de trabalhos e painéis técnicos de discussão, com participação de especialistas de todas as áreas de operação. Foram realizados encontros deste tipo em 2014, 2016 e 2018. Foi reportado que no encontro de 2018 foram apresentados mais de 300 trabalhos.

#### Desenvolvimento baseado atividades de engenharia

Foram reportados a ampliação da atuação conjunta do CDM com as áreas de operação/manutenção do Sossego e do Salobo. Com relação ao Sossego, estas atividades baseadas em engenharia resultaram em aumento da vazão do moinho SAG.

#### **6.3.4 Implicações da acumulação de capacidades tecnológicas no período entre 2012 e 2018**

A trajetória de acumulação de capacidades para processamento mineral de cobre neste período apresentou um padrão inicialmente de *path follower*, ou seja, de construção e ampliação de capacidades tecnológicas a partir de adaptações/melhorias de tecnologias existentes. A partir da entrada em operação do Salobo I (capacidade de 100 mil tpa) e do Salobo II (expansão de capacidade para 200 mil tpa) foram realizadas uma série de atividades baseadas em engenharia que acarretaram a melhoria dos níveis de eficiência operacional do Salobo. Ao longo do período, também continuaram a ser realizadas atividades de otimização do moinho SAG do Sossego (incluindo, entre outras iniciativas, redução do número de placas do cilindro e a reciclagem de placas altas como baixas, maior controle operacional do enchimento do moinho); estas novas otimizações ampliaram os ganhos de produtividade e redução de custos.

A trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas neste período foi impactada pela redução dos orçamentos voltados para as atividades de P&D básico e aplicado, com consequente redução dos esforços de desenvolvimento de tecnologias disruptivas ao longo de boa parte do período analisado. Entretanto, em função do corte do período de análise em 2018, não é possível afirmar se esta redução

de esforços representa um atraso no desenvolvimento destas tecnologias (como sugerido em algumas entrevistas) ou o início de uma fase de estagnação na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas (fase de lock in).



## 7. Discussão das evidências

Conforme indicado na literatura, as evidências coletadas comprovam que o desenvolvimento de capacidades tecnológicas no processamento de cobre pela Vale está ligado às especificidades dos depósitos minerais explorados pela empresa. Neste sentido, em função das características do minério, o processamento de minérios do Sossego foi realizado a partir da implantação de tecnologia conhecida, que foi sendo aperfeiçoada ao longo dos anos (de operação assistida com apoio de consultores externos, para criação de capacidade interna para resolução de problemas, para melhorias operacionais e inovações incrementais). Já o processo desenvolvimento de tecnologia para processamento do minério do Salobo foi longo e truncado, uma vez que a empresa não tinha nenhuma experiência em cobre e buscou desenvolver (através de parcerias) uma série de rotas alternativas, incluindo rota hidrometalúrgica que representava na época a fronteira tecnológica (tecnologia CSEL da Teckcominco). Os grandes esforços realizados (principalmente nas duas fases iniciais do período analisado) resultaram na construção de estoque de um conhecimento relativo à tecnologia CSEL. De forma análoga, também foram realizados esforços para desenvolvimento de capacitação em biolixiviação (através de atividades de P&D básico), mas até o momento não se evidenciaram resultados em termos de inovação tecnológica.

O estabelecimento de parcerias com outras empresas mineradoras também foi um mecanismo chave para o sucesso no desenvolvimento de capacidades tecnológicas no processamento de cobre. As parcerias estabelecidas tiveram grau de sucesso variável do ponto de vista de acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre. A parceria estabelecida com a Phelps Dodge resultou no aporte de *know how* de concentração inicialmente para o projeto Sossego, mas que foi internalizado e aplicado pelas equipes do CDM para o desenvolvimento de outros projetos na região de Carajás (notadamente Cristalino, Alemão e 118). Os primeiros três anos desta parceria foram fundamentais para consolidação de capacidades de inovação de nível básico por parte da Vale.

A parceria com Phelps foi caracterizada por fluxos bidirecionais de troca de conhecimentos. A parceria com a Anglo American também foi fundamental no desenvolvimento e consolidação destas capacidades; mas foi caracterizada por fluxos mais unidirecionais de troca de conhecimentos. A parceria com a TeckCominco para teste de tecnologia hidrometalúrgica também foi marcada por fluxos bidirecionais de troca de conhecimentos entre as equipes, mas acabou não resultando na consolidação desta capacidade pela Vale.

O sucesso na implantação do Sossego, aliada a revisão da estratégia para o negócio cobre, foi um catalizador importante para a tomada de decisão de investimento no Salobo e para o desenvolvimento dos demais projetos na região de Carajás.

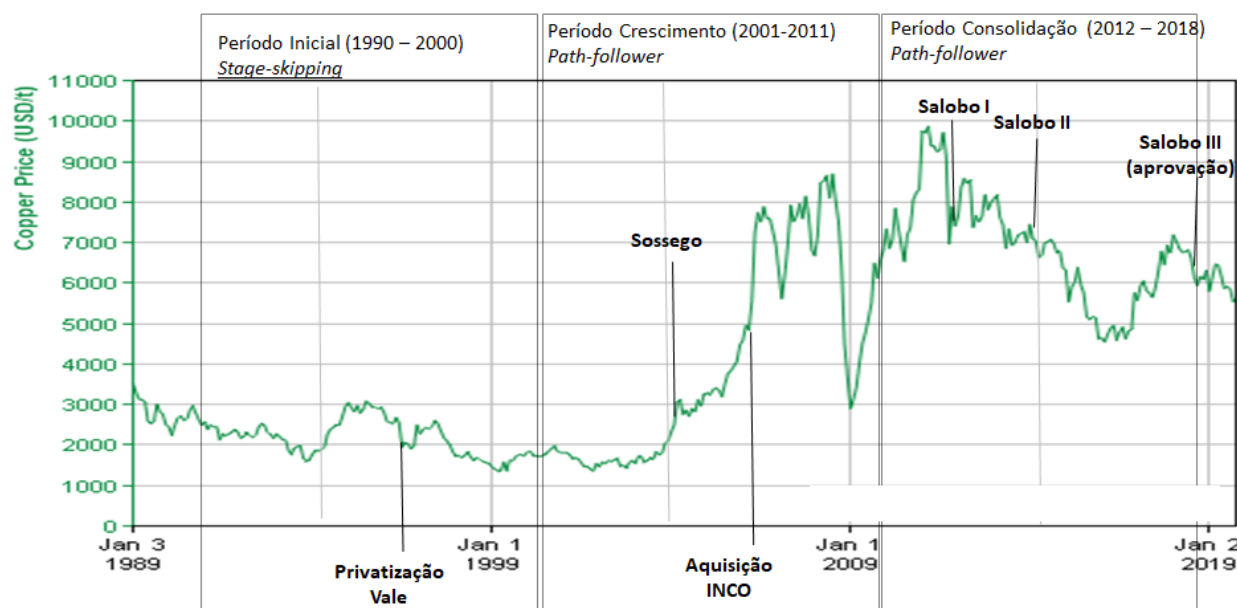
As evidências também demonstraram que a combinação de diferentes mecanismos de aprendizagem foi importante para consolidar ou acelerar as capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre. Os principais mecanismos externos utilizados para desenvolvimento de capacidades para inovação e desenvolvimento de tecnologia se deram a partir do estabelecimento de parcerias externas com players de cobre já consolidados (JVs com Anglo American e Phelps Dodge) e tentativa de aquisição de tecnologia já consolidada (compra do smelter da Caraíba Metais para processamento do concentrado do Salobo). Parcerias com fornecedores de equipamentos e insumos também foram fundamentais para consolidação das capacidades tecnológicas, especialmente através de atividades baseadas em engenharia e P&D aplicado. A ampliação da rede de parceiras com universidades e institutos de pesquisa também foi fundamental para o desenvolvimento de atividades de P&D básico (por exemplo, biolixiviação). Ao longo deste período se intensificou o uso de mecanismos inter-organizacionais baseados em desenvolvimento de engenharia e atividades de P&D. Também se verificou alteração no modelo de gestão de tecnologia, o que resultou em mudanças importantes nos arranjos organizacionais associados ao desenvolvimento das atividades inovativas. A utilização de

mecanismos intra-organizacionais também teve papel fundamental na construção destas capacidades, principalmente através de (i) estabelecimento de parcerias para desenvolvimento de projetos conjuntos do CDM com as áreas operacionais, (ii) treinamentos e capacitação das equipes técnicas internas, através da participação em congressos e visitas técnicas a operações de outras empresas, (iii) formação técnica e acadêmica das equipes internas; (iv) parcerias e convênios com universidades e institutos de pesquisa para desenvolvimento de cursos de especialização para times internos (exemplos : convênio com USP, programas de bolsas de mestrado do ITV).

As evidências também apontaram que alterações na visão da liderança da empresa com relação à estratégia para desenvolvimento do negócio cobre acarretou atraso no desenvolvimento de capacidade tecnológicas na área de processamento mineral de cobre na fase inicial do período analisado. Também se evidenciou que em determinados períodos (notadamente no final da fase de crescimento e em toda a fase de consolidação) os cortes expressivos nos orçamentos e equipes dedicados às atividades de P&D resultaram em algum comprometimento na construção e consolidação de capacidades de inovação avançada. Entretanto, em função do corte do período de análise em 2018, não é possível afirmar se esta redução de esforços representa um atraso no desenvolvimento destas tecnologias (como sugerido em algumas entrevistas) ou o início de uma fase de estagnação na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas (fase de *lock in*).

A Figura 11, abaixo, apresenta de forma resumida os principais marcos de evolução da trajetória de acumulação de capacidades pela Vale na área de processamento mineral de cobre. A pesquisa evidenciou uma trajetória de seguidora tecnológica para um posição intermediária/avançada de inovação baseada principalmente em adaptações e/ou criação de novas tecnologias de processamento mineral de cobre a partir de atividades de engenharia e atividades de P&D básico e aplicado.

Figura 11 – Evolução da trajetória de acumulação de capacidades na área de processamento mineral de cobre



Fonte: Elaboração da autora e dados de preço de cobre obtidos a partir de [www.infomine.com](http://www.infomine.com)

O Quadro 4, abaixo, apresenta um quadro consolidado com os principais marcos relativos a evolução da estratégia para o negócio cobre, bem como as implicações para a trajetória de acumulação de capacidades e os principais mecanismos de aprendizagem que apoiaram este desenvolvimento.

Quadro 4 - Evolução da estratégia corporativa e estratégias de inovação

Fase/Issues	Período Inicial: 1990 a 2000 <i>Fast adopter</i> , construção de capacidades de inovação básica/intermediária/avançada	Período Crescimento: 2001 a 2011 Fase de crescimento e consolidação capacidades produção e inovação básica/intermediária	Período Consolidação: 2012 a 2018 Consolidação de capacidades inovação intermediária/avançada, mas com alguns indícios <i>lock-in</i>
Janelas de oportunidade relativas ao negócio cobre	Privatização da empresa acarretou mudança da liderança e na estratégia da companhia;  Em função da queda de teores, a partir de 1998 as rotas hidrometalúrgicas para processamento de cobre ganham força	Super ciclo commodities representou oportunidade de crescimento do negócio de metais básicos, via aquisição de empresa canadense de níquel (Inco) e crescimento orgânico com implantação do pipeline de projetos de cobre e níquel	Com fim do super ciclo de commodities, houve uma redução importante nos orçamentos de investimentos em novos projetos e nas atividades de P&D
Condições organizacionais/ evolução da	<u>Antes da privatização:</u>	Aceleração do processo de crescimento em metais básicos (níquel e cobre), através de	Disciplina na alocação de capital;

<p>estratégia corporativa para o negócio cobre que influenciaram os mecanismos de aprendizagem</p>	<p>empresa de minério de ferro, focada na exploração de ativos no Brasil;</p> <p>estratégia : desenvolvimento dos ativos de minério de ferro no Brasil e de outros negócios (alumínio, logística e energia). Cobre não era foco;</p> <p>modelo de trabalho do CDM atividades de P&amp;D descentralizadas, com fragmentação de especialidades (exploração, desenvolvimento de tecnologia e desenvolvimento de negócio)</p> <p><u>Preparação para privatização:</u> aceleração pesquisa mineral na região de Carajás e descoberta de Sossego, Cristalino e outros depósitos de cobre na região de Carajás;</p> <p><u>Após privatização:</u> Início da estratégia diversificação geográfica e foco em múltiplas commodities. Cobre passa a ser foco da estratégia;</p> <p>Intensificação do foco em pesquisa mineral; consolidação de novo modelo de trabalho do CDM (célula geração de valor), incluindo atividades de exploração, desenvolvimento de tecnologia e desenvolvimento de negócio)</p>	<p>aquisições (principalmente INCO em 2006) e crescimento orgânico;</p> <p>Intensificação dos esforços de internacionalização e diversificação para outras commodities (pesquisa mineral em 26 países)</p> <p>Meta de atingir 1 Mtpa de cobre contido em 2012.</p>	<p>Aumentar competitividade dos ativos de cobre existentes;</p> <p>Desenvolvimento de depósitos de cobre na região de Carajás para reposição reservas e aumento do volume de produção, utilizando capacidade de processamento e infraestrutura existentes;</p> <p>Meta é alcançar 500 ktpa mil tpa em 2023, com potencial de alcançar 800 ktpa no longo prazo</p>
<p>Atividades tecnológicas que modelaram a evolução da trajetória de acumulação de capacidades</p>	<p>1991/1992: início capacitação em bio hidrometalurgia para avaliar alternativas para processamento de minério sulfetado de baixo teor =&gt; visitas técnicas ao Chile para avaliar experiências de bio lixiviação em pilha =&gt; início testes biolixiviação no CDM, com apoio de técnicos da Anglo American</p> <p>1993-1998: planta piloto Salobo no CDM =&gt; parceria com a Anglo American, consultores externos, fornecedores de equipamentos e de reagentes =&gt;</p>	<p>2000-2002 Sossego: desenvolvimento baseado em atividades de engenharia e experimentação: circuito de cominuição com moinho SAG (1º no Brasil)</p> <p>2003 – 2004: operação assistida para start up do Sossego, com apoio de consultores externos</p> <p>2003- 2004 testes flotação realizados no CDM e no Cetec - MG =&gt; incorporação esquema de utilização combinada de 2 reagentes =&gt; adição de sulfureto de cobre durante fase de flotação rougher/scanvenger;</p>	<p>2014 – 2017 expansão Salobo II e Salobo III: adaptações de tecnologias de processamento mineral baseadas em engenharia e experimentações realizada internamente e em parceria com fornecedores de equipamentos e reagentes;</p> <p>2015/2017: melhorias operacionais Salobo=&gt; desenvolvidas em parceria Sheridan Park Research Centre (SPRC)</p>

	<p>desenvolvimento da rota para produção do concentrado do Salobo</p> <p>1997 -2000: desenvolvimento rota de processamento minério do Sossego</p> <p>1997/1998: desenvolvimento por pesquisador do CDM de projeto de biolixiviação para minério sulfetado Salobo, c/ retirada do cobre e recuperação de ouro. Projeto foi apresentado em congresso na Austrália e nesta também foram feitos contatos com pesquisadores da CESL (rota hidrometalúrgica) =&gt; início contatos da Vale com TeckCominco (detentora da tecnologia CSEL)</p> <p>1997 -1999: teste tecnologia CSEL (parceria com Teckcominco)</p>	<p>2005 – 2006 estudos de trade off solução circuito moagem Salobo (HPGR versus moinho SAG, parceria com Polysius - fornecedor de equipamento e Aker Kvaerner- ). Utilização do HPGR pelo Salobo foi pioneira no Brasil;</p> <p>2008-2010 operação da UHC para teste de rota hidrometalúrgica para tratar minérios sulfetados</p> <p>2004 – 2011 otimizações circuito cominuição (incluindo modificações das grelhas e revestimentos, otimizações ciclonagem, controle de enchimento do moinho, integração mina/usina)</p>	<p>e operação =&gt; projeto para aumento da recuperação de cobre e processamento pilhas de minério transição=&gt; teste de esquemas alternativos de reagentes =&gt; teste de adição estágio de deslamagem com ciclone, removendo componentes oxidados da pilha de minério de transição, c/ redução consumo de reagentes</p> <p>2012 – 2018 melhorias operacionais Sossego (incluindo otimizações nos revestimentos, estratégias de manutenção e integração mina/usina)</p> <p>Projetos em andamento: Biolixiviação, ore sorting (planta piloto no Sossego) =&gt; representa</p>
<p>Estratégia de inovação baseadas em mecanismos de aprendizagem</p>	<p><u>Inter-organizacionais:</u> Estabelecimento de parcerias estratégicas com players de cobre (TeckComico, Anglo American e Phelps Dodge); Contratação de consultorias</p> <p>Desenvolvimento e atividades de engenharia</p> <p>Joint ventures com outras empresas (Anglo American, no Salobo e Phelps Dodge , no Sossego)</p> <p>P&amp;D aplicado, assistência técnica, testes e experimentações: realizados em parceria com fornecedores de equipamentos</p> <p><u>Intra-organizacionais:</u> Treinamentos externos e internos, visitas técnicas, participação em congressos/seminários/cursos</p> <p>Desenvolvimento baseado atividades de engenharia e P&amp;D</p>	<p><u>Inter-organizacionais:</u> Sossego (circuito cominuição/moinho SAG): visitas técnicas a mineradoras de cobre no Chile, testes em escala piloto no Centro de Investigaciones Mineras y Metalurgicas (CIMM) no Chile</p> <p>Sossego (melhorias operacionais): fornecedores de equipamentos, revestimentos);</p> <p>UHC</p> <p>Salobo: HPGR (parceria com Polysius - fornecedor de equipamento e Aker Kvaerner).</p> <p>Parcerias com centros de pesquisa no Brasil, EUA, Canadá e Austrália</p> <p>AIMARA : estudos de caso (minério oxidado do Salobo/ geometalurgia, análise de dados e planejamento de amostragem, hidrodinâmica células de flotação com sondas que estavam sendo</p>	<p><u>Inter-organizacionais:</u> P&amp;D aplicado, assistência técnica, testes e experimentações: realizados em parceria com fornecedores de equipamentos</p> <p>Parcerias com universidades UFOP, UFMG, USP e UNESP - Araquara, entre outros</p> <p><u>Intra-organizacionais:</u></p>

	CDM e áreas de operação/manutenção: atuação conjunta para resolução de problemas da operação;	desenvolvidas em outro projeto da AIMARA)  <u>Intra-organizacionais:</u> Treinamentos externos e internos, visitas técnicas, participação em congressos/seminários/cursos  Desenvolvimento baseado atividades de engenharia e P&D,  CDM e áreas de operação/manutenção : atuação conjunta para resolução de problemas da operação;	Treinamentos externos e internos, visitas técnicas, participação em congressos/seminários/cursos  Desenvolvimento baseado atividades de engenharia e P&D  CDM e áreas de operação/manutenção: atuação conjunta para resolução de problemas da operação Sossego e Salobo;
--	---	---	--

Fonte: Elaboração da autora

### 7.1 Trajetórias de acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral na Vale: cobre versus minério de ferro

Piana (2016) analisou a trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da Vale na área de processamento mineral no período entre 1942 e 2015. De acordo com Piana (2016), esta trajetória progrediu de capacidades tecnológicas de produção básica para capacidades tecnológicas de inovação de liderança mundial, a partir de uma entrada precoce em uma trajetória de *path creation*, ou seja uma trajetória distinta daquela mapeada pelos líderes globais. Mas a partir de 2013, a trajetória evolui

para uma possível entrada em processo de estagnação na fronteira internacional de inovação (*lock-in*).

O trabalho de Piana (2016) indica que no período inicial de análise (entre 1942 e 1997) a trajetória de acumulação de capacidades evoluiu do nível de produção básica em direção à produção avançada. Neste período a empresa avança rapidamente de uma posição de compradora e usuária de tecnologias existentes para uma posição de liderança na criação e aplicação de tecnologias inovadoras disruptivas para processamento mineral (notadamente a concentração eletromagnética), com utilização de mecanismos de P&D básico e criação de centro de pesquisa (CDM). Já no cobre, o período inicial (entre 1990 e 2000) foi marcado pela inserção da empresa já numa fase de construção de capacidades de inovação básica/intermediária/avançada (*stage skipping*), dada a maior complexidade de processamento dos minérios dos depósitos de cobre da Vale na região de Carajás. No caso do cobre, o estabelecimento de parcerias com outras mineradoras foi fundamental para o desenvolvimento da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas; no caso do minério de ferro, estas parcerias tiveram um papel mais secundário. De certa forma, pode-se dizer que nesta fase inicial o cobre se beneficiou de certa forma do estoque de conhecimento e do centro de pesquisa criados para o minério de ferro.

Para o minério de ferro, a fase subsequente do período analisado por Piana (1998 a 2010) foi marcada pela expansão de capacidade de produção, com as atividades de desenvolvimento baseado em engenharia, testes e experimentações em parceria com fornecedores tendo um papel fundamental no desenvolvimento de soluções inovadoras para esta ampliação de capacidade (com destaque para o processamento à unidade natural no sistema Norte). As atividades de P&D básico e aplicado passaram a ser feitas também em um centro de pesquisa dedicado ao minério de ferro (CTF) e centros de pesquisa no Canadá adquiridos após a aquisição da mineradora de níquel Inco. No caso do cobre,



este período subsequente denominado de crescimento (entre 2001 e 2011) foi marcado pelo início da produção de cobre na Vale. A solução técnica e comercial para o processamento do minério do Salobo levou ao abandono dos esforços para desenvolvimento de projeto verticalizado e dos esforços de rota hidrometalúrgica (tecnologia CSEL). Também no cobre as atividades baseadas em engenharia e experimentação desenvolvidas em parceria com fornecedores também tiveram papel fundamental para entrada na Vale no negócio cobre com a implantação do Sossego e para ampliação desta capacidade através do desenvolvimento do projeto para implantação do Salobo. De forma análoga ao minério de ferro, a ampliação da rede de parcerias com universidades e fornecedores foi fundamental para aprofundamento das atividades de P&D básico e aplicado.

Para o minério de ferro, o último período de análise de Piana (2010 a 2015) foi caracterizado pela sustentação da capacidade de inovação em nível de liderança mundial; mas a partir de 2013 as evidências sugerem uma possível entrada em processo de estagnação (lock-in), com redução dos mecanismos de aprendizagem de P&D e redução do quadro de pesquisadores. Também no cobre último período analisado (2012 – 2018) se verificou acentuada redução nos orçamentos voltados para as atividades de P&D básico e aplicado (com redução das equipes dedicadas a estas atividades); esta redução acarretou um certo atraso e mesmo alguns indícios de possível entrada num processo de estagnação da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas para processamento mineral. Nos anos finais deste período de análise foram retomados projetos voltados para atividades de P&D básico e aplicado (por exemplo, projeto de biolixiviação para viabilizar o processamento de minérios de baixo teor). Entretanto, conforme discutido em 6.3.2, em função do corte do período de análise ser 2018, não é possível confirmar se estes projetos representam de fato a superação dos indícios de início de uma fase de estagnação na trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas (fase de lock in). Também cabe de destacar que as evidências coletadas neste trabalho sugerem que existe certa defasagem do cobre em relação ao minério de ferro em relação a introdução de novas trajetórias

tecnológicas (notadamente na utilização mais intensiva de ferramentas de inteligência artificial, algoritmos e *machine learning* para reduzir a variabilidade de processos e mitigação dos riscos).

A despeito das diferenças de horizonte temporal utilizados neste trabalho (1990 a 2018) em relação àquele adotado por Piana,(2016) a comparação das trajetórias de acumulação de capacidades de processamento mineral de cobre e minério de ferro sugere elementos importantes que poderão ser aprofundados em novas pesquisas.

## 8. Conclusões e implicações

Com relação a **questão (A) Até que ponto tem havido acumulação de capacidades tecnológicas da Vale no beneficiamento de minérios de cobre no período entre 1992 e 2018?**

A pesquisa evidenciou que há variações ao longo da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre com evolução de uma posição de seguidora tecnológica à posição intermediária/avançada de inovação baseada principalmente em adaptações e/ou criação novas tecnologias de processamento mineral a partir de atividades baseadas em engenharia e atividades de P&D básico e aplicado realizadas internamente ou em parceria. No período inicial, o estabelecimento de parcerias com outras empresas permitiu “pular etapas” e acumular mais rapidamente capacidades tecnológicas na área de processamento mineral de cobre se aproximando da fronteira tecnológica. Mas em função de alterações na estratégia para o desenvolvimento do negócio cobre, a consolidação de capacidades ligadas a P&D básico e aplicado ligado as áreas de biolixiviação e rotas hidrometalúrgicas foi de certa forma truncado, na medida em que os grandes esforços iniciais (tanto com relação a orçamentos quanto a equipes) não se traduziram na consolidação desta capacitação por parte da empresa. Nos períodos subsequentes evidenciou-se uma trajetória de seguidora tecnológica para inovação em níveis intermediários e avançados, com ampliação na rede de parcerias externas e intensa realização de atividades baseadas em desenvolvimento de engenharia e testes e experimentações. O último período analisado apresenta uma consolidação dos esforços anteriores e se evidencia uma certa defasagem em relação a introdução de novas trajetórias tecnológicas (notadamente na utilização mais intensiva de ferramentas de inteligência artificial, algoritmos e *machine learning* para reduzir a variabilidade de processos e mitigação dos riscos). Entretanto foram apontadas o desenvolvimento de iniciativas ligadas à atividades de P&D básico (biolixiviação) e aplicado (planta piloto de *ore-sorting* a ser instalada no Sossego), mas ainda em estágio inicial de maneira

que ainda não foi possível evidenciar a consolidação destas capacidades e nem a apuração de seus benefícios.

**Com relação a questão B: Investigar de que forma esta trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas da Vale no beneficiamento de minérios de cobre foi afetada tanto pelos esforços para desenvolvimento de mecanismos de aprendizagem quanto pela evolução da estratégia corporativa da empresa para o desenvolvimento do negócio cobre.**

As evidências coletadas sugerem que a variação da trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas é explicada em grande parte pela forma com que foram utilizados e combinados diferentes mecanismos de aprendizagem. No período inicial, as evidências indicam que o estabelecimento de parcerias com outras empresas mineradoras com experiência na produção e comercialização de cobre teve um papel fundamental na acumulação de capacidades tecnológicas no processamento mineral de cobre. Nos períodos subsequentes (períodos de crescimento e consolidação), o estabelecimento e ampliação de mecanismos de aprendizagem (notadamente àqueles inter-organizacionais através do estabelecimento de parcerias com fornecedores, universidades e institutos de pesquisa) teve papel importante no avanço para níveis de capacidade de inovação mais avançados.

Também se sugere que ao longo do período analisado, as trajetórias de acumulação de capacidades tecnológicas foram influenciadas, em maior ou menor grau, por condições organizacionais. Alterações na estratégia corporativa para o desenvolvimento de novos negócios (notadamente, metais básicos), bem como alterações no modelo de gestão de tecnologia tiveram implicações relevantes para a trajetória de acumulação de capacidades tecnológicas no período analisado. Com relação a estratégia corporativa para o desenvolvimento do negócio cobre, evidenciou-se que de certa forma a aquisição de uma empresa produtora de níquel estabeleceu uma competição de

recursos para desenvolvimentos de projetos de ambos os negócios, acarretando atraso no desenvolvimento no pipeline de projetos de cobre na região de Carajás. Também cabe notar que oscilações na visão da liderança da companhia em relação ao papel dos investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias para apoiar a sustentabilidade de seus negócios se traduziram em alguns momentos num foco para atividades de curto prazo (voltadas principalmente para solução de problemas operacionais), retardando (e em alguns casos acarretando a perda) de capacidades de inovação em níveis mais avançados. Exemplos desse retardamento (e mesmo perda) podem ser encontrados no desenvolvimento de capacidades ligadas à biolixiviação e hidrometalurgia para processamento de cobre.

Foi identificado um padrão que sugere que o avanço para níveis de capacidade de inovação mais avançada pode ser afetado por diferentes combinações de mecanismos de aprendizagem. Por exemplo, a ampliação da rede de parcerias externas ocorrida principalmente no período de crescimento, permitiu a aceleração da construção de capacidades para inovação de nível básico e intermediário especialmente através de atividades com base em engenharia, adaptações e melhorias de tecnologias existentes. A intensificação da utilização de mecanismos intraorganizacionais (principalmente através da realização de treinamentos, visitas técnicas e desenvolvimentos baseado em atividades de engenharia ) permitiu a consolidação de capacidades de produção avançadas. Entretanto cabe destacar que foi evidenciada alguma dificuldade na conversão de conhecimento individual em conhecimento organizacional (ver item 6.2.4, acima). Conforme discutido nos itens 6 e 7.1, acima, também se evidenciou falta de homogeneidade na capacidade inovadora entre diferentes áreas operacionais, notadamente entre as operações de cobre e de minério de ferro e com relação a implementação de novas tecnologias tais como *machine learning*, inteligência artificial, dispositivos móveis e *wearables*.

No que tange às implicações geradas pela acumulação de capacidades tecnológicas para a performance competitiva da empresa, as variações encontradas ao longo do período analisado permitem identificar elementos que explicam a melhoria da performance competitiva da empresa, tanto em relação a redução de custos de operação, quanto em relação a melhorias de produtividade.

Este estudo representa uma contribuição de como a aplicação de metodologia de caráter qualitativo pode ajudar a compreender os mecanismos de acumulação de capacidades tecnológicas para inovação, fornecendo assim subsídios importantes para gestores empresariais. Os resultados da pesquisa sugerem que o desenvolvimento de capacidades tecnológicas requer esforços deliberados e intencionais de aprendizagem. Neste sentido, o fortalecimento destes mecanismos para aquisição de conhecimento tem um papel importante para absorção e incorporação dos projetos de P&D nas atividades de produção da empresa, de forma contínua e sustentável. Também se evidenciou que o fortalecimento de mecanismos de aprendizagem voltados para codificação e compartilhamento de conhecimentos podem contribuir para uma maior homogeneidade do conhecimento acumulado entre operações. Foram relatadas dificuldades na conversão de conhecimento individual em conhecimento organizacional, acarretando perda de conhecimento. Também foi relatado de forma indireta que há falta de homogeneidade no desenvolvimento de capacidade tecnológicas inovadora entre diferentes áreas operacionais (notadamente entre as áreas operacionais ligadas ao minério de ferro e àquelas ligadas ao negócio cobre). Por fim, evidenciou-se que o enfraquecimento (notadamente a partir de 2012) de atividades de P&D de longo prazo e dos arranjos já estabelecidos para sustentação destas atividades (principalmente através do CDM, ITVs e Sheridan Park) levou a execução de atividades de inovação voltadas para tecnologias existentes, com indícios de entrada em um processo de lock-in. Vale destacar que foi relatado que em período mais recente (fora do horizonte de análise da pesquisa) estaria em curso uma retomada da discussão do papel central que

as atividades de P&D de longo prazo e dos arranjos organizacionais estabelecidos para realização destas atividades teriam na sustentabilidade dos negócios da empresa.

Este estudo apresenta algumas contribuições para a pesquisa em acumulação de capacidades tecnológicas no contexto de economias emergentes, na medida em que evidenciou que na área de processamento mineral de cobre houve uma entrada através de uma estratégia de *stage skipping* (“pulando etapas”), numa trajetória similar àquelas evidências no estudo de Figueiredo (2016) sobre a indústria de papel e celulose no Brasil. No período subsequente, ocorreu de um certo truncamento e posterior retomada que permitiu a acumulação de níveis de produção mais básicos até níveis de inovação mais avançados, numa trajetória de *path following*, similar as evidências encontradas em trabalhos sobre a evolução tecnológica de empresas asiáticas na indústria eletrônica e automobilística (Kim, 1997 e 1998).

O estudo também apresenta algumas contribuições para a pesquisa de aprendizagem tecnológica, na medida em que sugere que os fornecedores têm um papel importante no desenvolvimento de capacidades tecnológicas desde a construção de capacidades iniciais até a construção de capacidades mais avançadas, conforme apontado no estudo de Urzua (2013). Também se evidenciou que na medida em que a empresa avança para níveis de capacidade de inovação mais avançados, começam a surgir arranjos colaborativos e redes de conhecimento envolvendo diferentes parceiros (fornecedores, universidades, etc) para desenvolvimento de atividades de P&D, com fluxos de conhecimento bi-direcionais. O estudo também apresenta conexão com estudos sobre a miopia da aprendizagem (Levinthal e March, 1993), na medida em que os mesmos mecanismos de aprendizagem que contribuem para o aprimoramento da performance organizacional também podem gerar melhorias limitadas. No caso analisado, evidenciou a partir de 2012 um retorno a uma visão de curto prazo sobre mecanismos de aprendizagem que passaram

a ter como foco o apoio a atividades de inovação relacionadas principalmente a redução de custos e ganhos de produtividade nas operações, contribuindo de certa forma para uma condição de estagnação (*lock in*).

#### Contribuições para ações empresariais

O trabalho também apresenta algumas contribuições para os gestores empresariais a respeito da importância da construção de um modelo de gestão de tecnologia que leve em conta (i) a articulação dos vários atores dentro da organização envolvidos no processo de construção de capacidades para inovação e (ii) como diferentes mecanismos de aprendizagem podem ser combinados ao longo do processo de construção de capacidades para inovação (fase inicial, de consolidação e fronteira tecnológica).

#### Limitações do estudo e sugestões para futuras pesquisas

Este estudo apresenta limitações relativas ao seu escopo e abrangência, principalmente em função da estratégia de pesquisa adotada (estudo de caso único em profundidade), que limita tanto a quantidade quanto a qualidade das evidências coletadas e sua análise. Também cabe destacar as limitações da autora para coleta e interpretação dos dados em função das dificuldades de processamento de grande quantidade de informações. Desta forma, sugere-se ampliar o estudo realizado para abranger não só todo o negócio cobre (incluindo outras etapas de produção como lavra, exploração mineral e comercialização), mas também diferentes áreas de negócio dentro da mesma organização (notadamente, níquel e minério de ferro), de forma a capturar de forma outros elementos que possam aprofundar o entendimento do relacionamento entre a acumulação de capacidades tecnológicas na área de processamento mineral e as variações intra-empresarias entre estes diferentes negócios e operações.



Também cabe aprofundar a análise da relação entre a acumulação de capacidades tecnológicas e outros fatores influentes em nível de empresa (especialmente o papel da liderança, das estratégias corporativas e janelas de oportunidade). Neste trabalho, estes elementos foram trabalhados de forma agregada como condições organizacionais, sem um tratamento mais detalhado que poderia ser construído a partir de aportes da literatura relativa ao papel da liderança, pressões institucionais e janelas de oportunidade.

Vale-se sugere aprofundar o estudo através da realização de análises comparativas sobre o processo de acumulação de capacidades tecnológicas e o papel dos mecanismos de aprendizagem para o desenvolvimento da indústria de mineração a partir de evidências de outras empresas no Brasil e da indústria de mineração de outros países emergentes nos quais a mineração tem grande relevância na economia (Chile e Peru, entre outros). Sugere-se realizar estudos voltados para a cadeia de mineração nestes países, especialmente a cadeia de fornecedores de equipamentos e serviços (incluindo àqueles tradicionais bem como novos provedores de tecnologias digitais e de biotecnologia), além de universidades e centros de pesquisa para melhor entendimento das interações existentes nesta cadeia e o papel que os mesmos têm para ampliação das capacidades tecnológicas para as empresas e economias destes países. Por fim, sugere-se a ampliação do estudo para avaliar de que forma as indústrias de recursos minerais podem contribuir para o desenvolvimento tecnológico e econômico do Brasil.

## 9. Referências Bibliográficas

AMIRA (2015). Projetos colaborativos. Disponível em <http://amirainternational.com/>

ARIFFIN, N. (2000). The internationalization of innovative capabilities: The Malaysian electronics industry. Tese de doutorado, Science and Technology Policy Research (SPRU), University of Sussex, Brighton, England.

BANK OF CANADA, Commodity Price Supercycles: what are they and what lies ahead ? Autum, 2016, disponível em <https://www.bankofcanada.ca/wp-content/uploads/2016/11/boc-review-autumn16-buyuksahin.pdf>

BAGINSKI, L; PITASSI, C.; BARBOSA, J.G. P. (2017). Technological capability in the Brazilian naval industry: a metric for offshore support vessels, RAI Revista de Administração e Inovação, 14 (2017), 109 - 118.

BARNETT, A.; BELL, M. (2011). Is BHP Billiton's Cluster Programme in Chile relevant for Africa's mining industry? Policy Practice Brief, 7 August.

BARSHOP, P. HARRIES-REES, K. Best practices pay off - European Chemical News, January 2004, 2004

BELL, M. (1984). Learning and the accumulation of industrial technological capacity in developing countries. In K. Fransman & M. King (Eds.). Technological capability in the third world . London: McMillan Press.

BELL, M. (2009).

BELL, M.; FIGUEIREDO, P.N. (2012). Building innovative capabilities in latecomer emerging market firms: some key issues. In. E. Aman, J. Cantwell (Eds). Innovative Firms in Emerging Market Countries, Oxford,: Oxford University Press.

BELL, M.; PAVITT, K. (1993). Technological accumulation and industrial growth: contrast between developed and developing countries, Industrial and Corporate Change, 2 (2), 157 -210.

BELL, M.; PAVITT, K. (1995). The development of technological capabilities. In: UI Haque, I.; Bell, M.; Dahlman, C. Lall, S. e Pavitt, K. Trade, technology and international competitiveness. Washington, DC, The World Bank.

BERGERMAN, M. et al (2007). Controle Operacional da Usina do Sossego. In: XXII ENTMMME / VII MSHMT – Ouro Preto , nov/2007.

BERGERMAN, M; DELBONI JUNIOR, H; OLIVEIRA, R. (2016). Performance analysis of the HRC™ HPGR in pilot plant, REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 69(2), 227-232, Apr. jun. 2016. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672015690124>

BERGERMAN, M. (2019). Entrevista a Revista In the Mine, Ano XIV, 2019, n. 80. Disponível em <https://www.inthemine.com.br/site/edicao-no-80/>

CHANDLER, A. D. Jr. (1962). *Strategy and structure: chapters in the history of the American industrial enterprise*, Cambridge, MA, MIT Press.

CHESBROUGH, H.W. *Open innovation: the new imperative for creating and profiting from technology*. Boston: Harvard Business School Press, 2003.

CHESBROUGH, H.W. *Open innovation: a new paradigm for understanding industrial innovation*, In Chesbrough, H.W, Vanhaverbeke, W. & West, J. (Eds.), *Open innovation: researching a new paradigm*, p. 1-12, New York: Oxford University Press, 2006.

COHEN e LEVINTHAL (2000). Absorptive capacity: A new perspective in learning and innovation, in *Strategic Learning in a knowledge economy*, Edited by: Robert L. Cross, Jr and Sam B. Israelit, Butterworth & Heinemann, 2000.

CRESWELL, J. W. (2010) ; *Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e Misto*. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed.

DAHLANDER, L., GANN, D. How open is innovation? *Research Policy* 39 (6), 699 – 709.

DAHLMAN, C.; ROSS-LARSON, B.; WESTPHAL, L. (1987). Managing technological development : lessons from the newly-industrializing countries. *World Development*, 15, 759 -775.

DANTAS,E. (2006). *The Development of Knowledge Networks in Latecomer Innovation Systems: The Case of Petrobras in the Brazilian Offshore Oil Industry*. Tese de doutorado, University of Sussex,UK.

DANTAS, E.; BELL, M (2009). Latecomer firms and the emergence and development of knowledge networks: The case of Petrobras in Brazil. *Research Policy*, 38 (5), 829-844.

DANTAS, E.; BELL, M (2011). The Co-evolution of Firm-Centered Knowledge networks and Capabilities in Late Industrializing Countries: The Case of PETROBRAS in the offshore oil innovation system in Brazil. *World Development*, 39 (9), 1570 – 1591.

DAVENPORT, W.G.;KING, M.J.;SCHLESINGER; BISWAS,A.K. (2002). *Extractive Metallurgy of Copper*. Pergamon.

DOBRA, J.; DOBRA, M.; OUEDRAOGO,A. (2018). Does mineral development provide a basis for sustainable economic development ?, *Resources Policy*, 58 (2018), 71 -76.

DUTRÈNIT, G. (2000). *Learning and Knowledge Management in the Firm. From Knowledge Accumulation to Strategic Capabilities*, Edward Elgar, Cheltenham, UK.

DUTRÈNIT, G. (2004). Building Technological Capabilities in Latecomer Firms: A Review Essay, *Science, Technology & Society* 9:2, pp.209 – 241.

DUTRÈNIT, G. (2006). Instability of the technology strategy and building of the first strategic capabilities in a large Mexican firm. *International Journal of Technology Management*, 36(1-3), p. 43–61.

DNPM

EISENHART, K., MARTIN, J. (2000); Dynamic capabilities: What are they?, *Strategic Management Journal*, 21 (10/11), p. 1105 – 1122.

FIGUEIREDO, P.N. *Gestão da Inovação: conceitos, mensuração e evidências no Brasil*. Rio de Janeiro, LTC, 2009.

FIGUEIREDO, P.N. (2001). *Technological learning and competitive performance*. Cheltenham, K.; Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing.

FIGUEIREDO, P.N. (2003). Learning, capability accumulation and firm differences: evidence from latecomer steel. *Industrial and Corporate Change*, 12 (3), 607-643.

FIGUEIREDO, P.N. (2008). Industrial policy changes and firm-level technological capability development: evidence from Northern Brazil. *World Development*, 36(1), 55-88.

FIGUEIREDO, P.N. (2010). Discontinuous innovation capability accumulation in latecomer natural resource-processing firms. *Technological Forecasting and Social Change*, 77 (7), 1090-1108.

FIGUEIREDO, P.N. (2014). Beyond technological catch-up: an empirical investigation of further innovative capability accumulation outcomes in latecomer firms with evidence from Brazil, *Journal of Engineering and Technological Management*, 31, 73- 102.

FIGUEIREDO, P.N. (2016). Evolution of the short-fiber technological trajectory in Brazil's pulp and paper industry: the role of firm-level innovative capability-building and indigenous institutions. *Forest Policy and Economics*, 64, 1-14.

FIGUEIREDO, P.N.; PIANA, J. (2016). When “one thing (almost) leads to another” : a micro-level exploration of learning linkages in Brazil's mining industry. *Resources Policy*, 49, 405 – 414.

FIGUEIREDO, P.N.; PIANA, J. (2018). Innovative capability building and learning linkages in knowledge-intensive service SMEs in Brazil's mining industry. *Resources Policy*, 58, 21- 33.

FIGUEIREDO, P.N.; PIANA, J. (2019). How learnig-based innovation strategies affect technology upgrading intensity: Evidence from Brazil's mining industry.

FONSECA, R.; OLEGÁRIO, F.; BERGERMAN, M.G. (2017). Avaliação da granulometria de alimentação e dos produtos da etapa rougher de flotação da usina do Salobo de beneficiamento de minério de cobre sulfetado. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belém- PA, Out-2017.

FURTADO, J.; URIAS,E. (2013). Recursos naturais e desenvolvimento: estudos sobre o potencial dinamizador da mineração na economia brasileira. São Paulo, IBRAM.

GODOY, A. D. (2008). Estudo de caso qualitativo. In: GODOI, Christiane Kelinübing; BANDEIRA-DE-MELO, Rodrigo; SILVA, Anielson Barbosa (org.). Pesquisa qualitativa em estudos organizacionais: paradigmas, estratégias e métodos. São Paulo: Saraiva 2009, cap. 4, p. 115-146.

HIRSCHMAN, A. O. (1958). *The strategy of economic development*. New Haven, Conn., Yale University Press.

HUBERMAN, M.A.; MILES,M. (1994). *Qualitative Data Analysis: an expanded source book*, 2<sup>nd</sup> edition, Sage Publications.

ICSG (2018). The world copper Factbook 2019, International Copper Study Group, disponível em <https://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/2965>.

KATZ, J. (1987). *Technology Generation in Latin American Manufacturing Industries*, Macmillan, London.

KATZ, J.; PIETROBELLI, C. (2018). Natural resource based growth, global value chains and domestic capabilities in the mining industry. *Resources Policy* 58 (2018), 11- 20.

KEMP,R.; SCHOT, J.; HOOGMA, R. (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology Analysis and Strategic Management*, 10(2), 175-196.

KIM, L. (1997). The Dynamics of Samsung's Technological Learning in Semiconductors. *California Management Review* , 39(3), 86-100.

KIM, L. (1998). Crisis construction and organizational learning: capability building in catching-up at Hyundai Motor. *Organization Science*, 9 (4), 506-552.

KIM, L. (2003). Managing the transition of technology life. *Technovation*, 23, 371 – 381.

KEMP,R; SCHOT, J; HOOGMA, R. (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology Analysis and Strategic Management*, 10 (2), 175 – 196.

LALL, S. (1992). Technological Capabilities and Industrialization. *World Development*, 20 (2), 165-186.

LEE, K.; LIM, C. (2001). Technological regimes, catching-up and leapfrogging: findings from the Korean industries. *Research Policy*, 30 (3), 459 -483.

LEMA, R.; QUADROS, R.; SCHMITZ, H.(2015); Reorganizing global value chains and building innovation capabilities in Brazil and India. *Research Policy* , v. 44, p.1376 -1386.

LEONARD-BARTON, D. (1995). *Wellsprings of knowledge: building and sustaining the sources of innovation*. Boston, MA: Harvard Business School Press.

MAY, Tim (2004); *Pesquisa social: questões, métodos e processos*. 3ª. ed. Porto Alegre: Artmed.

LUZ, A.B.; LINS, F.A.F (2004). Introdução ao tratamento de minérios. In: *Tratamento de Minério*. CETEM Comunicação técnica, 4 ed.

MALERBA, F.(1992). Learning by firms and incremental technical change. *The Economic Journal*, 102 (413), 845-859.

MELLO, L.E; SEPÚLVEDA, E.S. (2017). Interação Academia-Indústria. Relato da experiência da Vale. *Revista de Estudos Avançados*, 31 (90): 89-101, 2017. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo.

MIKESELL, R. (1997). Explaining the resource curse, with special reference to mineral exporting countries, *Resource Policy* 23 (4), 1991- 1999.

MILES, M.B.; HUBERMAN, A.M. (1994). *Qualitative data analysis*. London, Sage Publication.

MOLINA, O. (2018). Innovation in an unfavorable context: local mining suppliers in Peru, *Resources Policy* 58 (2018), 34 – 48.

NAVARRO, L. (2018). The World Class Supplier Program for mining in Chile : Assessment and perspectives, , *Resources Policy* 58 (2018), 49 – 61.

OCDE (2007). *Manual de Oslo – Diretrizes para a coleta e interpretação de dados sobre inovação* (3ª edição). Tradução FINEP. Retrieved from <http://download.finep.gov.br/imprensa/oslo2.pdf>.

PAVITT, K. (1984); Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory, *Research Policy*, v. 13, issue 6, p. 343 -373.

PENROSE, E.T. (1959). *The theory of the growth of the firm*. Oxford, Basil Blackwell.

PÉREZ, C. (2010). Dinamismo tecnológico e inclusión social en America Latina: uma estratégia de desarrollo productivo basada em los recursos naturales. *Revista CEPAL*, Santiago, 100 (2), 123 – 145.

PETERSON, D.J.; La TOURRETTE, T.; BARTIS, J.T. (2001) *New Forces at Work in Mining: Industry Views of Critical Technologies*, RAND Science and Technology Policy Institute. Disponível em <http://www.rand.org/publications/MR/MR1324/>

PIANA, J. (2016); *Variações em trajetórias de acumulação de capacidades tecnológicas em nível inter-empresarial: uma análise empírica da Vale S.A.*; Tese Doutorado, EBAPE-FGV.

PIETROBELLI, C.; MARIN, A.; OLIVARI, J. (2018). Innovation in mining value chains: new evidences from Latin America. *Resources Policy* 58 (2018), 1 – 10.

SACHS, J.D; WARNER, A. (2001). The curse of natural resource. *Econ. Rev.* 45 (4-6), 827 – 838.

SCHMITZ, H.; STRAMBACH, S. (2009); The organisational decomposition of innovation and global distribution of innovative activities: insights and research agenda, *Int. J. Technological Learning, Innovation and Development*, v. 2, n. 4, p. 231 – 249.

SCOTT-KEMMIS, D. (2013). How about those METS? Leveraging Australia's mining equipment, technology and services sector, Mining Council of Australia.

STUBRIN, L. (2018). Innovation, learning and competence building in the mining industry. The case of knowledge intensive mining suppliers (KIMS) in Chile, *Resources Policy*, 58 (2018), 62 – 70.

TAKAHASHI, A. R. W (org.) (2013). Pesquisa qualitativa em administração: fundamentos, métodos e usos no Brasil, São Paulo, Editora Atlas.

TEECE, D; PISANO, G.; SHUEN, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management, *Strategic Management Journal*, 18 (7), 509-533.

TIDD, J.; PAVITT, K.; BESSANT, J. (2005) Managing Innovation – Integrating Technological, Market and Organizational Change. Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, London.

TORRES-VARGAS, A. (2006). Product-market and technological direction in the evolution of large business groups in Mexico. In: DRUID Summer Conference, Copenhagen.

URZUA, O. (2013). The emergence and development of knowledge intensive mining service suppliers in the late 20th century. Tese de doutorado, University of Sussex, UK.

VALE (2006). Manual de Processo Produtivo – Cobre

VALE (2010). Press release Vale lança oferta pública para aquisição da Paranapanema. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/information-market/press-releases/Paginas/Vale-lanca-oferta-publica-para-aquisicao-da-paranapanema.aspx>

VALE (2012). Nossa história. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/book-our-history/paginas/default.aspx>

VALE (2015). Relatório Anual de 2014 (Form 20F). Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/information-market/annual-reports/Paginas/default.aspx>.

VALE (2019) Fact Sheet 2019. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/company/fact-sheet/Paginas/default.aspx>

VASCONCELOS, Y. (2012). Bactérias mineradoras in Pesquisa FAPESP, Edição 200, out/2012. Disponível em <https://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/bacterias-mineradoras/>

VERGARA, S.C. (1998). Projetos e relatórios de pesquisa em administração, 3ª edição, Editora Atlas, São Paulo.

WHEATON PRECIOUS METALS. Technical Report – Salobo Copper-Gold Mine. Effective Date Dec, 31, 2017, Amended May, 2019. Disponível em [https://s21.q4cdn.com/266470217/files/doc\\_downloads/2019/05/Salobo-2018-43-101-Amended-filed.pdf](https://s21.q4cdn.com/266470217/files/doc_downloads/2019/05/Salobo-2018-43-101-Amended-filed.pdf)

YIN, R. K. (2005). Estudo de caso: planejamento e métodos. 3ª edição, Porto Alegre, Bookman.



## Anexo 1 - Etapas do processamento mineral de cobre

Etapa	Descrição
Cominuição (britagem e moagem)	<p>(i) na mineração de cobre o circuito típico de cominuição é constituído por britagem primária, seguida por pilha de regularização, transporte do ROM (Run of mine) britado até a planta de moagem/concentração, moagem SAG (semi-autógena), britagem de pebbles (material de tamanho crítico na moagem SAG), moagem de bolas, e em alguns casos remoagem no circuito de flotação. A britagem possibilita a redução de grandes blocos com dimensões em torno de 1m para tamanho próximo a 200 mm de modo a propiciar o transporte através de correias transportadoras e possibilitar a alimentação da moagem;</p> <p>(iii) a moagem é a etapa necessária para propiciar a liberação dos minerais de cobre presentes no minério. Os minerais de cobre devem estar fisicamente independentes (“livres”) dos demais minerais sem interesse. No beneficiamento de minérios de cobre, o moinho SAG (semi-autógeno) é muito utilizado. Alternativamente à moagem SAG a prensa de rolos de alta pressão ou HPGR (high pressure grinding rolls) tem sido utilizada em algumas plantas de beneficiamento de cobre (Cerro Verde no Peru e Salobo no Brasil). Para liberação dos minerais de cobre antes da etapa de flotação, é necessário reduzir todo o minério até tamanhos próximos entre 200 e 100 <math>\mu\text{m}</math> e até menores dependendo da liberação mineral; o moinho de bolas é o equipamento tradicionalmente mais utilizado com fins de liberação;</p> <p>(iii) para reduzir o custo de operação (principalmente em função do consumo de energia de corpos moedores) são utilizadas etapas intermediárias de peneiramento (ou ciclonagem) para separação por tamanho ou classificação;</p>
Flotação	<p>(i) base do processo de beneficiamento mineral de vários metais; cobre (e outros metais como o níquel, zinco, ouro) são concentrados através da flotação de sulfetos;</p> <p>(ii) o tamanho obtido na etapa de moagem é muito importante afetando a liberação e consequentemente o desempenho do processo de flotação. Dependendo do tipo de minério, formação geológica, minerais associados, existe um tamanho ótimo e adequado para a flotação;</p> <p>(iii) a flotação envolve processo de separação de partículas minerais realizada em meio aquoso e com presença de fase gasosa através de fluxo de ar induzido. A separação se baseia nas diferenças de comportamento da partícula em função da característica de sua superfície, que pode apresentar diferentes níveis de hidrofobicidade (aversão pela água). O ar (oxigênio e nitrogênio) que é constituído de moléculas apolares terá afinidade com superfícies hidrofóbicas e desta forma pode promover a separação das partículas do meio aquoso. São utilizados reagentes químicos (espumantes, modificadores e reguladores) nas etapas do processo de flotação de forma a estabilizar o processo e as condições do sistema de flotação;</p> <p>(iii) as características do mineral (estrutura cristalina, distribuição de impurezas, os minerais de ganga e o tamanho de liberação) influenciam na flotabilidade dos minerais de cobre. Deste modo espera-se um comportamento diferenciado na flotação para cada tipo de minério encontrado na natureza. Para dimensionamento dos circuitos de flotação faz-se necessário realizar testes com amostra representativa do depósito para determinar os parâmetros cinéticos, condições de operação e reagentes;</p> <p>(iv) ao longo da operação na planta de beneficiamento, durante a vida útil da mina, é comum que a mineralogia do depósito mineral se altere (por exemplo com diminuição do teor, aumento da dureza), sendo necessário realizar testes para desenvolver novos reagentes que permitam manter a recuperação;</p> <p>(v) Os equipamentos mais utilizados na flotação de cobre atualmente são as células tanque de grande capacidade (entre 50 e 300 <math>\text{m}^3</math>) e colunas de flotação. As células de flotação basicamente são tanques agitados que podem ter aeração forçada, através de sistema de sopradores, ou ser auto-aeradas, onde o próprio movimento de rotação gera a aspiração de ar para dentro da célula. A célula tanque trabalha com injeção de ar (ar forçado) produzido a partir de sistema de sopradores e encaminhado e controlado através de válvulas. A coluna é equipamento de flotação mais recente e sua aplicação tem crescido principalmente em função de maior seletividade, menor espaço para instalação, menor investimento e custo de operação, grande adaptabilidade a sistemas de automação). As colunas de flotação exigem tempos de residência maiores. Tem-se observado que a tendência para a flotação de minérios de cobre é o uso de circuitos de flotação mistos;</p> <p>(vi) o concentrado obtido na etapa de flotação segue para o processo de separação sólido/líquido, próxima etapa de beneficiamento. O rejeito geralmente é descartado por</p>

	gravidade para a barragem de rejeitos. Para algumas situações onde o custo de obtenção de água é significativo e existem restrições ambientais ao uso extensivo de barragens, há uma tendência no sentido de recuperar a água na planta industrial através do espessamento dos rejeitos.
Separação sólido/líquido	<p>(i) o concentrado obtido na etapa de flotação é uma polpa com geralmente 25-30% de sólidos em peso e deve ser processado para facilitar manuseio, estoque e transporte para a etapa de extração metalúrgica. O objetivo é produzir um concentrado em torno de 8-10% de umidade. Desta forma, são utilizadas as operações unitárias de espessamento e filtração;</p> <p>(ii) os tanques de espessamento recebem polpa diluída (25-30% de sólidos) e com a ajuda de floclulantes, consegue processar o concentrado até 60-65% de sólidos, com recuperação de água para o processo. Os floclulantes são polímeros sintéticos de cadeia longa e ramificada que auxiliam o processo de espessamento, aumentando a velocidade de sedimentação dos sólidos através da formação de flocos de partículas. Para a filtração de minérios de cobre podem se utilizar filtros de discos a vácuo, filtros de tambor a vácuo, filtros prensa e filtros com meio filtrante de cerâmica. O mais utilizado atualmente é o filtro prensa, especialmente em razão da maior dificuldade para filtrar concentrados obtidos de minérios que exigem tamanhos mais finos para a liberação. Atualmente os filtros apresentam bom grau de automatização, principalmente os de grande capacidade.</p>

Fonte: Davenport et al (2002)

## Anexo 2 – Relação de entrevistas realizadas

#	Nome	Função/Cargo	Área atuação/expertise
1.	Rodrigo Quental	Vale- Exploração	Negociação de direitos minerais
2.	Halen de Carvalho	Vale – Metais Básicos/Desenvolvimento Projetos	Engenheiro de mina
3.	Werter Silva	Vale – Metais Básicos/ Desenvolvimento Projetos	Desenvolvimento projetos de cobre região de Carajás
4.	Evandro Silva	Vale – CDM	CDM engenheiro de processo
5.	Geysa Pereira	Ex-Vale (CDM)	CDM engenheira de processo
6.	Felipe Hilário	Vale - CDM	Engenheiro de processo – flotação
7.	Keila Gonçalves	Vale- CDM	Gerente área de processo
8.	Aline Teixeira Silva	Vale - CDM (fazendo mestrado)	Engenheira de processo – flotação
9.	Eugênio Oliveira	Vale – Metais Básicos	Gerente de processo Sossego/Salobo
10.	Vânia Andrade	Consultora independente na área de processamento mineral (ex- Vale/CDM)	Engenheira de processo Gerente de Desenvolvimento Tecnologia no CDM
11.	Patrice Mazzoni	Vale – CDM	Gerente de tecnologia
12.	Edson Ribeiro	Vale – Diretor CDM	Diretor
13.	André Werner	Vale – Corporativo/Relações com Investidores	Gerente RI – Metais Básicos
14.	Heloisa Abud	Ex-Vale Metais Básicos/Marketing	Consultora de comercialização de cobre (Ex-gerente geral comercialização cobre na Vale)
15.	Mikael Djanian	Mckinsey Consultoria	Consultor sênior na área de mineração
16.	Cláudia Diniz	Ex-Vale/ Gerente de Propriedade Intelectual	Diretora Executiva Mining Hub
17.	Fernando Marino	Vale- Metais Básicos	Gerente Geral de planejamento mina – Sossego/Salobo
18.	Olavo Reis	Vale – Operação Sossego/Salobo	Gerente de Gestão Econômica
19.	Liliana Leusin	Vale -Corporativo/ Orçamento	Gerente de acompanhamento de performance de metais básicos
20.	Emanuelle Fernandes	Vale – Metais Básicos	Gerente de gestão de performance metais básicos Brasil (Sossego e Salobo)
21.	Alexandre Salomão	Vale – Corporativo/Estratégia	Gerente P&D – Cobre
22.	Amilton Sinalora	Instituto Tecnológico Vale - ITV	Diretor ITV
23.	Adriano Campos	South 32 (ex Vale)	Gerente de projetos e desenvolvimento de tecnologia mineral
24.	Maurício Bergerman	Pesquisador Poli-USP (ex-Vale, engenheiro de processo no Sossego)	Engenheiro de processo

## **Anexo 3 – Roteiros de Entrevista**

### **Roteiro de Entrevista Geral**

1. Identificação do entrevistado  
Nome, Função atual, Histórico atuação na empresa/indústria
2. Capacidade Tecnológica  
Quando sua área foi criada? Como a área está estruturada?  
Como é o fluxo de produção da sua área? Poderia indicar as principais mudanças/melhorias da área ao longo do tempo? O que motivou estas mudanças?  
Poderia indicar exemplos de atividades/projetos inovadores desenvolvidos pela sua área? Como elas aconteceram? Quais as principais dificuldades encontradas? Como as dificuldades foram superadas? Quais foram os principais benefícios alcançados? O que poderia ser melhor em termos de benefícios? Como é o relacionamento da sua área com outras áreas da empresa?
3. Mecanismos de Aprendizagem  
Como se deu a aquisição de conhecimento para implementar estas mudanças/melhorias?  
Quando isso aconteceu? Quem esteve envolvido? Por que foi realizado desta forma e não de outra? Quais foram os principais benefícios envolvidos?  
Mecanismos inteorganizacionais : treinamentos, P&D, centros de pesquisa e comitês  
Mecanismos interorganizacionais: treinamento, consultoria e assistência técnica, testes e experimentações. Desenvolvimento e engenharia, P&D  
Parceiros envolvidos : expertise, usuários, clientes, fornecedores, competidores, universidades, institutos de pesquisa
4. Resultados e benefícios  
Quais foram os resultados/benefícios das mudanças/melhorias realizadas? Poderia citar exemplos de benefícios concretos? Quais foram os resultados de melhoria na produtividade?  
Quais foram os resultados de melhoria no consumo de água? Quais foram os resultados de melhor eficiência energética? Quais foram os resultados de melhoria ambiental? Quais foram os resultados de melhoria em aspectos comerciais? O que poderia ser melhor?
5. Outros fatores
  - 5.1 Específicos da indústria
  - 5.2 Específicos da empresa
    - 5.2.1 Papel da liderança : orçamento para projetos de melhoria operacional, desenvolvimento equipes, desenvolvimento de parcerias interorganizacionais e parceiros externos
    - 5.2.2 Estratégia da área de negócios/corporativa

### **Roteiro de Entrevista : Estratégico**

1. Identificação do entrevistado ( Nome, Função atual , Histórico atuação na empresa/indústria)
2. Estrutura organizacional da área de estratégia corporativa : Quando sua área foi criada? Como a área está estruturada? Como é o fluxo de informação da sua área? Como é o relacionamento da sua área com outras áreas da empresa? Detalhe o relacionamento da área com as áreas de operação (Sossego, Salobo), centro de pesquisa (CDM) e área de transformação digital.
3. Definição de estratégia para área de cobre na Vale  
Descreva o processo de definição da estratégia corporativa para a área de cobre, indicando quem participa do processo, como se dá o processo de definição, revisão e acompanhamento da estratégias. Comente qual o papel exercido neste processo pela liderança da área de negócios, da área corporativa e pela área de desenvolvimento de tecnologia.  
Existe estratégia específica para inovação e desenvolvimento de novas tecnologias na área de beneficiamento de minérios de cobre? Se existe, como se dá este processo? Quem participa do processo de definição, alocação de orçamentos e monitoramento dos resultados obtidos?
4. Fatores específicos da indústria  
(fontes relatório Deloitte Tracking the trends – the top 10 issues transforming the mining industry)

- (i) Aumento da maturidade no uso de Analytics e inteligência artificial para reduzir variabilidade nos processos, mitigar riscos e gerir melhor expectativas dos vários stakeholders;
- (ii) Digitalização da supply chain : criação de uma cadeia de valor mais interconectada e capaz de dar resposta mais rápidas... uso de algoritmos, IA e machine learning para transformar dados em insights que permitam redução de CAPEX, resposta mais rápida a necessidades de ajuste em projetos em implantação e otimização dos planos de lavra integrando mudanças em tempo real;
- (iii) Específicos para Lavra : (1) blasting box /caixa de ignição (inicia os explosivos, permite utilizar mecanismo de ignição de ar pressurizado ao invés de um com molas para evitar explosões inesperadas), (2) mecanização, automação e robótica: sistemas de monitoramento, controle e operação incorporados em equipamentos destinados à execução de tarefas semi-autônomas ou totalmente automatizadas (ex. britadores in pit, equipamento de mineração contínua, TBM tunnel boring machine, injetores de emulsão com braço robótico, máquinas automáticas de perfuração, carregadores com controle remoto ou automação, robôs utilizados em tarefas de manutenção e manuseio de materiais, coletores de amostra automatizados, caminhões, escavadeiras e perfuratrizes autômatas. Objetivos são redução de custos (energia e trabalho) e sustentabilidade (acidentes e danos ambientais);
- (iv) Específicos para processamento mineral: pré concentração subterrânea, usina modular, sonar fluxômetro (SONARTRAC e CIDRA) utilizados para medir o fluxo de materiais em movimento em caminhões e correias transportadoras; monitoramento da cominuição de minérios: primeiro passo para processamento dos minérios => utilização de análises de imagens contínuas (sistema split-online);
- (v) Biotecnologia e engenharia química e mecânica : biolixiviação, utilização segura de explosivos para fragmentação, monitoramento de tecnologias para manutenção e aumento de vida útil dos equipamentos;
- (vi) Sistemas de controle e otimização de processos:
- (vii) Sistemas de gestão, análise e tomada de decisão: BI, big data
- (viii) Dispositivos móveis e tecnologia wearable: computação incorporada em dispositivos de uso diário (uniformes, exoesqueletos, veículos e ferramentas de trabalho)

#### 5. Específicos da empresa

Papel da liderança: orçamentos, desenvolvimento equipes, desenvolvimento de parcerias interorganizacionais e parceiros externos  
 Estratégia da área de negócios/corporativa : estratégia da Vale para área de cobre