



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE  
E AUTOMAÇÃO**



**CAIO COSTA E SILVA**

**MÉTODOS DE INSPEÇÃO DE TUBULAÇÕES DE TRANSPORTE DE  
MINÉRIO: O CASO DA INTEGRIDADE DE DUTOS**

**OURO PRETO - MG**  
**2017**

**CAIO COSTA E SILVA**  
**costaesilva.caio@gmail.com**

**MÉTODOS DE INSPEÇÃO DE TUBULAÇÕES DE TRANSPORTE DE  
MINÉRIO: O CASO DA INTEGRIDADE DE DUTOS**

Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Ouro Preto  
como requisito para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** Washington Luis Vieira da Silva, DSc.

**OURO PRETO – MG**  
**2017**

C837m Costa e Silva, Caio .  
Métodos de inspeção de tubulações de transporte de minério [manuscrito]: o caso da integridade de dutos / Caio Costa e Silva. - 2017.

70f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Vieira da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Minérios - Tubulações. 2. Minas e recursos minerais - Canos e canalização - Inspeção. 3. Minérios - Canos e canalização - Administração de risco. I. Silva, Washington Luis Vieira da . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ATA DA DEFESA**

Aos 31 dias do mês de Março de 2017, às 16h 00min, na sala 28, localizado na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno Caio Costa e Silva, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: DSc. Washington Luís Vieira da Silva, Profa. DSc. Maria Perpetuo Socorro Mol Pereira e o Especialista Ricardo Bruno Nébias Andrade. O candidato (a) apresentou o trabalho intitulado: “**Método de inspeção de tubulação de transporte de minério: o caso da integridade de dutos**”, sob orientação do DSc. Washington Luís Vieira da Silva. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) APROVADO com a nota/conceito 9,0.

Ouro Preto, 31 de Março de 2017.

Prof. DSc. Washington Luís Vieira da Silva  
**Professor Orientador**

Profª. DSc. Maria Perpetuo Socorro Mol Pereira  
**Professora Avaliadora**

Ricardo Bruno Nébias Andrade  
**Avaliador**

Caio Costa e Silva  
**Aluno(a)**

Dedico a minha mãe Maisa (*in memoriam*), pelo ensinamentos que levarei pela vida toda, meu pai Cleiton, pelo apoio e persistência que me ajudaram a vencer esta etapa.

## **AGRADECIMENTO**

As minhas tias Cyntia e Cynara, por sempre me apoiarem nas horas difíceis.

A madrinha Dona Maria Carmo, por ser a luz nesta caminhada.

A professora Socorro, por acreditar no meu potencial.

A Larissa, pelo apoio, companheirismo e carinho infinitos, que motivam a superação de qualquer obstáculo.

Ao meu orientador Washington, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores e colegas do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para meu aprimoramento como profissional.

A Samarco, Gerência de Mineroduto, e em especial Ricardo Bruno, Pedro Gea, Rodrigo Otávio e Ayron pela amizade e ensinamentos.

A querida Calamidade Pública, seus moradores e ex-alunos pela irmandade.

Ao irmão Rafael Henrique, pelos conselhos e amizade.

Aos amigos que tive o prazer de encontrar em Ouro Preto.

*“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.*

Martin Luther King

## RESUMO

Os minerodutos constituem um importante modal de transporte para as mineradoras brasileiras, ganhando cada vez mais força com os novos projetos propostos pelas mineradoras. Sua eficiência está diretamente ligada a capacidade de operação ininterrupta. Para isto os planos de inspeção e manutenção devem ser bem programados e realizados, de forma a mitigar os riscos a operação. Portanto a escolha adequada do regime de inspeção e os métodos utilizados se tornam um parâmetro de grande importância para a manutenção das condições de operação. Os métodos inspeção preventivas são os mais indicados para este caso, pois não interferem na operação. Este trabalho teve como objetivo a análise dos métodos de inspeção utilizados por uma empresa operadora de mineroduto determinando assim, os mais adequados. A pesquisa será quantitativa, exploratória e bibliográfica. A análise dos procedimentos e inspeções da empresa que constituiu o estudo de caso, permitiu estabelecer as vantagens e desvantagens do métodos utilizados, bem como sua aplicabilidade. Desta forma pode-se concluir que a utilização de diferentes métodos de inspeção são necessários para abranger a detecção dos muitos riscos a que os minerodutos estão sujeitos. Também foi possível identificar a possibilidade de análise de outros temas como métodos indiretos para avaliação de integridade de dutos e estudo de viabilidade de adoção de diferentes métodos de inspeção utilizados em outras modalidades de tubulações de transporte.

**Palavras-chave:** Minerodutos, Manutenção, Inspeções Preventivas, Ensaio Não Destrutivo, Inspeções por PIG, Inspeções de Campo.

## ABSTRACT

*The pipelines are an important transportation modality for Brazilian mining companies, gaining more and more strength with the new projects proposed for mining companies. Its operation is directly linked to an uninterrupted operation. For this the inspection and maintenance plans must be well programmed and executed, in order to minimize the risks to operation. Thus, an adequate choice of the inspection regime and the methods used have become a parameter of great importance for maintaining the operating conditions. The methods of preventive inspection are the most indicated for this case, since they do not interfere in the operation. This work aimed at an analysis of the inspection methods used by a pipeline operating company, thus determining the most suitable ones. The research will be quantitative, exploratory and bibliographical. The analysis of the company's procedures and inspections that constitute the case study allowed to establish as advantages and disadvantages of the methods used, as well as their application. In this way it can be concluded that the use of different methods of inspection are necessary to cover a detection of risks and that the pipelines are subject. It was also possible to identify the possibility of analyzing other topics as indirect methods for assessing pipeline integrity and feasibility study of the adoption of different inspection methods used in other modalities of transport pipelines..*

Key-words: Pipeline, Maintenance, Preventive Inspections, Non Destructive Test, In Line Inspections, Field Inspections.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito piezelétrico .....	14
Figura 2: Etapas de inspeção por líquido penetrante.....	15
Figura 3: Representação de um campo de fuga.....	16
Figura 4: Peças após ensaio por partículas magnéticas .....	17
Figura 5: A) PIG de limpeza de discos de poliuretano; B) PIG de limpeza com discos, escovas e imã .....	18
Figura 6: Exemplos de PIG de limpeza. A) PIG de copos com escovas. B) PIG de discos com imãs. C) PIG de espuma. D) PIG de espuma com escovas. ....	18
Figura 7: PIG MFL-A/IEC .....	19
Figura 8: PIG UT-C.....	20
Figura 9: PIG Geométrico (Rosen ROGEO XT).....	21
Figura 10: Fluxograma da metodologia de trabalho.....	23
Figura 11: Processo Produtivo em Minas Gérias .....	26
Figura 12: Trajeto dos minerodutos MG-ES .....	27
Figura 13: Processo Produtivo Ubu.....	28
Figura 14: Perfil com elevação do minerodutos .....	29
Figura 15: Fluxograma do mineroduto 01 .....	30
Figura 16: Faixa de servidão .....	31
Figura 17: Estrutura organizacional da gerência de mineroduto .....	32
Figura 18: Fluxograma de inspeções por PIG .....	33
Figura 19: Exemplo de lançador.....	35
Figura 20: Exemplo de recebedor.....	36
Figura 21: PIG de limpeza com escovas e imã.....	37
Figura 22: Placa calibradora.....	38
Figura 23: <i>Smart</i> PIG com tecnologia MFL.....	39
Figura 24: <i>Smart</i> PIG com tecnologia UT-C.....	39

Figura 25: Desenho esquemáticos de <i>batches</i> bombeados .....	40
Figura 26: Fluxograma das inspeções de campo .....	42
Figura 27: Abertura de vala para inspeção .....	43
Figura 28: Vala pronta para inspeção .....	43
Figura 29: Soldas Longitudinais e Circunferenciais.....	44
Figura 30: Exemplo de posição horária da solda longitudinal .....	44
Figura 31: Tubulação pronta para inspeção.....	45

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Principais minerodutos do Brasil.....	2
Tabela 2: Evolução da manutenção .....	7
Tabela 3: Variáveis e indicadores.....	24
Tabela 4: Descrição dos minerodutos da empresa estudada .....	29
Tabela 5: Intervalos de inspeções por PIG .....	34
Tabela 6: Seções do minerduto.....	36
Tabela 7: Vantagens e desvantagens de inspeções por PIG .....	47
Tabela 8: Vantagens e desvantagens de inspeções de campo .....	47
Tabela 9: <i>Anomaly Types and Tools to Detect Them</i> .....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema .....	1
1.2	Justificativa .....	4
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Geral .....	4
1.3.2	Específicos .....	4
1.4	Estrutura do Trabalho .....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1	Manutenção .....	6
2.2	Tipos de manutenção .....	9
2.2.1	Manutenção Corretiva .....	10
2.2.2	Manutenção Preditiva .....	11
2.2.3	Manutenção Preditiva .....	12
2.3	Tipos de inspeções .....	14
2.3.1	Ultrassom .....	14
2.3.2	Líquido penetrante .....	15
2.3.3	Partículas magnéticas .....	16
2.4	Inspeções internas de dutos .....	17
2.4.1	Utility PIG's .....	17
2.4.2	Smart PIG's .....	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
3.1	Tipo de pesquisa .....	22
3.2	Materiais e métodos .....	23
3.3	Variáveis e indicadores .....	24
3.4	Instrumento de coleta de dados .....	24
3.5	Tabulação dos dados .....	25
3.6	Considerações finais .....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
4.1	Caracterização do setor .....	26
4.1.1	Mineroduto .....	28
4.2	Métodos de inspeção utilizados .....	32

4.2.1	Inspeções por PIG (In Line Inspections) .....	33
4.2.2	Inspeções de campo .....	41
4.3	Vantagens e desvantagens .....	47
4.4	Aplicabilidade dos métodos.....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>50</b>
5.1	Conclusões.....	50
5.2	Recomendações .....	50
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>52</b>
	<b>ANEXO I – TIPOS DE ANOMALIAS E FERRAMENTAS PARA SUA DETECÇÃO</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXO II – FOLHA DE ESCAVAÇÃO .....</b>	<b>57</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

Cada vez mais a busca por competitividade no mercado leva as empresas a maximizarem seus processos de produção. Esta maximização depende da capacidade das empresas de se modificarem e realizarem melhorias contínuas em seus processos e equipamentos (KARDEC, 2004). As melhorias não devem ser realizadas apenas visando os processos produtivos, mas também na manutenção com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos equipamentos e diminuir as falhas destes.

A manutenção pode ser entendida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo a supervisão e modificações, com o intuito de manter ou restabelecer as funções de determinado item ou equipamento (ABNT-NBR 5462,2004).

E de acordo com Kardec e Nascif (2009), o conceito de apenas reestabelecer as condições originais dos equipamentos ainda é realidade para algumas empresas, mas deve-se visar também garantir a confiabilidade e a disponibilidade das funções dos equipamento atentando-se também ao processo produtivo, a segurança, ao meio ambiente e aos custos. Ou seja, a manutenção deve fazer parte de um todo, integrando-se aos outros departamentos da empresa.

A manutenção pode ser dividida em vários tipos e cada autor classifica de acordo com critérios diferentes. Xenos (2004) sugere uma classificação da qual identifica-se os tipos abaixo como importantes para o presente trabalho:

- Manutenção corretiva: entende-se por a manutenção realizada após a ocorrência de uma falha, agindo de modo a repará-la no menor tempo para que não haja perdas significativas na produção;
- Manutenção preventiva: engloba ações periódicas de inspeção e acompanhamento do desgaste e funcionamento dos equipamentos com o intuito de realizar os reparos ou modificações de forma antecipada a ocorrência das falhas;
- Manutenção preditiva: trata-se da otimização do processo de manutenção preventiva, utilizando-se de métodos de inspeção que permitem estimar o limite de vida da peças ou componentes. Sendo este o foco deste trabalho.

A manutenção preditiva utiliza de técnicas ou ensaios para fazer o acompanhamento de parâmetros com o intuito de manter o equipamento em funcionamento pelo maior tempo possível e tentando antecipar o melhor momento para se efetuar a parada do equipamento para manutenção corretiva. Tais técnicas ou ensaios devem permitir a coleta dos dados com mínima interferência na operação dos equipamentos, por isso são utilizados vários tipos de ensaios não destrutivos.

Este trabalho visa analisar as técnicas e estratégias de manutenção preditiva aplicadas na inspeção de dutos de transporte de minério, ou minerodutos, com intuito de manter a integridade destes evitando com que ocorram falhas em sua operação.

A malha mundial de dutos se destina, em sua maioria, a transportar petróleo e gás. O transporte de polpas minerais, classificadas como inertes e não perigosas pelos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), têm início na área da mina / planta de beneficiamento do minério e são bombeadas por longas distâncias até estações de processamento próximas aos portos, com elevada margem de segurança operacional e ambiental, sendo raros os registros de acidentes nesse modal de transporte (BRANDT, 2010).

A Tabela 1 mostra os principais minerodutos do Brasil.

Tabela 1: Principais minerodutos do Brasil.

<b>Empresa</b>	<b>Mineral</b>	<b>Capacidade (Milhões tms/ano)</b>	<b>Extensão [km]</b>	<b>Diâmetro nominal [in]</b>	<b>Início da operação</b>
Hydro	Bauxita	13,2	244	24	2006
Anglo – Minas-Rio	Ferro	24,5	522	24 e 26	2014
Samarco Line #1	Ferro	15,5	398	18 e 20 e 22	1977
Samarco Line #2	Ferro	8,5	400	16 e 14	2008
Samarco Line #3	Ferro	23	400	20 e 22	2014
VALE - Pico - VG	Ferro	7,5	5	12	2009
ValeFert (Fosfertil)	Fosfato	2	120	9	1978
ValeFert (Goiasfertil)	Fosfato	0,9	14	6	1981
Imerys RCC	Caolin	1,2	159	14	2002
Imerys PPSA	Caolin	1,3	180	10	1996

Fonte: Adptado de Torres et al. (2015)

A Tabela 1 evidencia a extensão dos minerodutos presentes no Brasil e sua capacidade de transporte, o que comprova a relevância deste modal no transporte de minério no país.

A movimentação lenta dos produtos escoados por minerodutos deve ser contrabalanceada pela operação praticamente ininterrupta, ou seja, 24 horas por dia sete dias por semana. O custo de implementação ou instalação do transporte dutoviário é mais elevado

se comparados a outros modais de transporte devido a diversos fatores como direitos de acesso, construção, requisitos de controle e capacidade das estações de bombeamento. Porém os custos variáveis são relativamente baixo o que torna este modal o segundo mais vantajoso em relação ao custo, ficando atrás apenas do transporte hidroviário (RIBEIRO; FERREIRA, 2002).

Portanto, para que o transporte dutoviário seja viável do ponto de vista financeiro e também como parte da cadeia produtiva é necessário o seu funcionamento contínuo e ininterrupto.

Baseado nisto é necessário a atuação efetiva e eficiente da manutenção preditiva, para que as inspeções realizadas forneçam dados confiáveis com relação a condição de operação do duto, tornando possível um programa de manutenção com mínima interferência no seu funcionamento e sobretudo evitando ao máximo a ocorrência de falhas.

Para o caso do planejamento de um programa de integridade para dutos, é importante a construção bem estruturada do plano de inspeções preditivas de forma a se obter dados confiáveis, possibilitando desta forma o processo de avaliação e de tomada de decisões quanto aos procedimentos de mitigação das anomalias ou defeitos encontrados.

Algumas normas internacionais propõem alguns modelos ou bases para se estabelecer um programa de integridade, caso da API 1160 ou ASME B31.8S, mas também é necessário que a empresa faça adequações de forma a atender seus casos particulares.

A partir destes dados, é possível criar uma carteira de inspeções de campo priorizando as anomalias que apresentam maiores riscos a operação. Como os minerodutos possuem comprimentos lineares que variam de alguns quilômetros até algumas centenas de quilômetros, há uma grande probabilidade das distâncias dos pontos a serem inspecionados serem muito grandes fazendo-se necessário a existência de mais de uma equipe de inspeção para se cumprir a carteira de inspeções.

Então, a proposição deste estudo é analisar as técnicas de inspeções preditivas utilizadas na manutenção de tubulações de transporte de minério entre plantas de beneficiamento. Diante do contexto, tem-se a seguinte problemática:

**Quais os métodos de inspeção são mais adequados, considerando o caso da integridade de dutos, para tubulações de aço carbono sem revestimento interno, destinadas ao transporte de minério?**

## **1.2 Justificativa**

Para Vaz (1997), a manutenção preditiva pode ser a solução ideal para falhas em equipamentos, pois consiste em definir o melhor momento para intervenção a partir da medição e acompanhamento das variáveis importantes na operação dos equipamentos.

Isto faz com que as falhas sejam previstas com antecedência evitando a exposição a riscos e paradas repentinas na produção, redução nos prazos e custos de manutenção devido ao conhecimento prévio das falhas que necessitam de reparo, operação dos equipamentos visando a diminuição do desgaste, aumento da produtividade e rendimento (MIRSHAWKA, 1991).

Para que a manutenção preditiva alcance os benefícios citados anteriormente, os métodos de inspeção devem ser realizados de maneira a causar a mínima interferência no funcionamento dos equipamentos. Desta forma, tais métodos são ideais para a inspeção de tubulações de transporte, pois não causam interrupções na operação.

Portanto, este trabalho tem como finalidade estudar as técnicas de inspeção de dutos de transporte de minério, observando as normas nacionais e internacionais relacionadas com tema.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

Analisar os métodos de inspeção mais adequados para as tubulações de transporte de polpa de minério, observando técnicas de manutenção e normas utilizadas por equipes de integridade.

### **1.3.2 Específicos**

- Realizar um estudo teórico em relação a: manutenção, tipos de manutenção, manutenção preditiva, tipos de inspeções preditivas, ensaios não destrutivos, normas para inspeção de tubulações e procedimentos de manutenção de minerodutos;
- Descrever os principais métodos de inspeção aplicados em minerodutos;
- Apresentar as vantagens e desvantagens de cada método de inspeção de minerodutos;
- Apresentar melhorias ou novos métodos de inspeção mais eficientes.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho será dividido em 5 capítulos que apresentam-se da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito dos métodos de inspeção que utilizam ensaios não destrutivos. Visa também descrever o funcionamento e a importância das inspeções para dutos de transporte.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir do estudo de caso de inspeções em um mineroduto.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manutenção

A palavra manutenção deriva do *latim manus tenere*, que significa manter o que se tem. A manutenção está presente na história humana desde o desenvolvimento de instrumentos de produção (VIANA 2002).

Bechtold (2010) diz que a manutenção remonta ao século XVI com desenvolvimento dos primeiros relógio mecânicos, que trouxeram a necessidade dos técnicos de montagem e assistência técnica.

De acordo com Monchy (1989) o termo manutenção tem origem militar, e no contexto de combate significa manter um efetivo ou material em um nível constante. Na indústria, o termo foi utilizado pela primeira vez em 1950 nos Estado Unidos da América. Já na França o termo é associado com “conservação”.

Com o decorrer da revolução industrial no século XVII, houve um grande aumento na capacidade de produção, exigindo também formas de manter a disponibilidade dos equipamentos. Este processo evolutivo da cadeia de produção passa por Taylor em 1900, até o advento da Segunda Guerra Mundial, onde o aumento de produção fez com que a manutenção se firmasse como uma necessidade na cadeia produtiva (VIANA, 2002).

A evolução da manutenção pode ser dividida em quatro gerações de acordo Kardec e Nascif (2009), como se observa na Tabela 2.

Tabela 2: Evolução da manutenção

<b>Evolução da manutenção</b>				
	Primeira geração	Segunda geração	Terceira geração	Quarta geração
Ano				
Aumento das expectativas em relação à manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Conserto após falha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Disponibilidade crescente</li> <li>•Maior vida útil do equipamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Maior confiabilidade</li> <li>•Maior disponibilidade</li> <li>•Maior relação custo benefício</li> <li>•Preservação do meio ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Maior confiabilidade</li> <li>•Maior disponibilidade</li> <li>•Preservação do meio ambiente</li> <li>•Segurança</li> <li>•Influir nos resultados do negócio</li> <li>•Gerenciar os ativos</li> </ul>
Visão quanto à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Existência de seis padrões de falha (Nowlan &amp; Heap e Moubray)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduzir drasticamente falhas prematuras (Nowlan &amp; Heap e Moubray)</li> </ul>
Mudanças nas técnicas de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Habilidades voltadas para o reparo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Planejamento manual da manutenção</li> <li>•Computadores grandes e lentos</li> <li>•Manutenção preventiva (por tempo)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Monitoramento da condição</li> <li>•Manutenção preditiva</li> <li>•Análise de risco</li> <li>•Computadores pequenos e rápidos</li> <li>•Softwares potentes</li> <li>•Grupos de trabalho multidisciplinares</li> <li>•Projetos voltados para a confiabilidade</li> <li>•Contratação por mão de obra e serviços</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aumento da manutenção preditiva e monitoramento de condição</li> <li>•Minimização nas manutenções preventiva e corretiva não planejada</li> <li>•Análise de falhas</li> <li>•Técnicas de confiabilidade</li> <li>•Manutenibilidade</li> <li>•Engenharia de manutenção</li> <li>•Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e custo do ciclo de vida</li> <li>•Contratação por resultados</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

De acordo com a Tabela 2, a primeira geração contempla o período anterior a Segunda Guerra Mundial, onde os equipamentos eram simples e a produtividade não era prioridade. A

manutenção era basicamente corretiva e não planejada, dependendo da habilidade do executante do reparo. A segunda geração ocorre no período pós guerra até a década de 70, onde falta de mão de obra levou a uma mecanização da produção, bem como na necessidade de maior disponibilidade e confiabilidade visando o aumento da produtividade. Isto levou a evitar as falhas, o que resultou no conceito da manutenção preventiva. O custo da manutenção também aumentou e os sistemas de planejamento e controle de manutenção foram desenvolvidos.

Ainda de acordo com a Tabela 2, durante a terceira geração o conceito de manutenção preditiva é reforçado e a confiabilidade é cada vez mais aplicada a engenharia de manutenção. Além disso o avanço da informática possibilitou o desenvolvimento de *softwares* para o acompanhamento e planejamento das atividades de manutenção. Nesta fase houve um aumento da automação e mecanização da produção.

Para a quarta geração, a disponibilidade é um dos fatores mais importantes de medição da performance e a confiabilidade é uma busca constante da manutenção. A tendência para o mínimo de intervenções na planta torna a manutenção preditiva e o monitoramento de equipamentos e processos as práticas mais utilizadas, ocasionando uma redução nas manutenções preventivas e programadas e tornando as manutenções corretivas não planejadas um indicador de ineficácia da manutenção. Há a necessidade de integração das áreas de engenharia, operação e manutenção para garantir a eficácia das ações da manutenção.

A Knight Wendling Consulting AG (1996; p.4) define manutenção como:

Todas as medidas necessárias para manter/restabelecer as condições especificadas dos meios técnicos de um sistema, como também determinar e avaliar as condições existentes destes meios num dado momento.

Uma definição mais ampla foi dada por Monchy (1989, p.97):

A manutenção dos equipamentos de produção é um elemento chave tanto para a produtividade das indústrias quanto para a qualidade dos produtos. É um desafio industrial que implica rediscutir as estruturas atuais inertes e promover métodos adaptados à nova natureza dos materiais.

Para Slack (2002) podem ser definidos os seguintes objetivos para manutenção:

- Redução de custos: a manutenção preventiva visa a redução dos defeitos, diminuindo ações corretivas que possuem custos mais elevados que as ações de prevenção;

- Maior qualidade dos produtos: equipamento em perfeito estado de funcionamento produzem produtos com maior qualidade;
- Aumento da segurança: quando se garante um ambiente de produção organizado e limpo, há um aumento na segurança dos trabalhadores;
- Melhor ambiente de trabalho: um ambiente de limpo, seguro e organizado devido a manutenção autônoma acarreta em uma melhora nas condições da trabalho;
- Desenvolvimento profissional: a manutenção produtiva total promove o desenvolvimento de novas habilidades e crescimento profissional devido ao envolvimento direto dos trabalhadores nas decisões de produtividade da empresa;
- Aumento da vida útil do equipamento: as ações preventivas, preditivas e de melhoria garantem um aumento na vida útil dos ativos da empresa;
- Aumento da confiabilidade: as ações de manutenção resultam no aumento do tempo entre falhas, gerando maior disponibilidade dos equipamentos e aumento da produção;
- Valorização das instalações: instalações bem mantidas têm maior valor de mercado;
- Maior poder de investimento: a redução de custos devido a uma manutenção eficaz se relaciona diretamente com o aumento da capacidade de investimentos, o que beneficia todos os *stakeholders*;
- Preservação do meio ambiente: funcionamento e regulamento dos ativos proporcionados pela manutenção produtiva total traz como consequência o uso eficiente de recursos e diminuição de impactos ambientais.

## 2.2 Tipos de manutenção

Para Pinto e Xavier (1999) os tipos de manutenção são classificados de acordo com a atitude dos usuários em relação às falhas.

Segundo Viana (2002), muitos autores abordam os vários tipos de manutenções possíveis, que nada mais são do que as formas como são encaminhadas as intervenções nos instrumentos de produção. Pode-se observar um consenso em torno da seguinte classificação:

- Manutenção corretiva;
- Manutenção preventiva;
- Manutenção preditiva.

### 2.2.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é definida pela ABNT (2004) como a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane e destinada a recolocar determinado itens em condições de executar uma função requerida.

Kardec e Nascif (2004, p.38) definem:

Ao atuar em um equipamento que apresenta um defeito ou desempenho diferente do esperado estamos fazendo manutenção corretiva. Assim, a manutenção corretiva não é, necessariamente, a manutenção de emergência.

Para Pinto e Xavier (1999), a manutenção corretiva pode ser dividida em:

- Manutenção corretiva não planejada: é a correção da falha de maneira aleatória. Caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho menor do que o esperado. Não há tempo para preparação do serviço. Normalmente implica em altos custos;
- Manutenção corretiva planejada: é a correção do desempenho menor do que o esperado ou da falha, por decisão gerencial, ou seja, pela atuação em função de acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra. A eficácia da manutenção corretiva planejada é função da qualidade da informação fornecida pelo acompanhamento do equipamento.

Para Souza (2009), a falha pode ocorrer de forma súbita e imprevisível, não possibilitando a preparação ou planejamento prévio, acarretando uma ação de emergência ou de urgência para a equipe de manutenção.

Ainda de acordo com Souza (2009), a manutenção corretiva planejada é efetuada após a constatação de uma anomalia ou falha de um componente que já apresentou esta falha em uma inspeção ou durante a operação normal do equipamento.

### 2.2.2 Manutenção Preditiva

Viana (2002) classifica a manutenção preventiva como todo serviço realizado em máquinas que não apresentam falha ou desempenho abaixo do esperado, ou seja, estão em condições operacionais.

Manutenção preventiva são todas as ações executadas pela manutenção, tanto as de inspeção como as de intervenção através da programação, com o objetivo de evitar a ocorrência de emergências (FARIA, 1994).

Segundo A.Kelly e M.J.Harris (1987), em algumas situações de paradas adversas, pode-se aproveitar o momento para execução de manutenção periódica sem intervenção na produção. Esse tipo de manutenção pode ser chamado de manutenção preventiva de oportunidade.

Conforme afirma Kardec e Nascif (2004) os seguintes fatores devem ser levados em consideração para a adoção de uma política de manutenção preventiva:

- Quando não é possível a manutenção preditiva;
- Aspectos relacionados com a segurança profissional ou da instalação que tornam mandatória a intervenção, normalmente para a substituição de componentes;
- Por oportunidade em equipamentos críticos de difícil liberação operacional;
- Riscos de agressão ao meio ambiente;
- Em sistemas complexos e ou de operação contínua.

Segundo Souza (2009), a manutenção preventiva é aquela que auxilia a corretiva, através de aplicação de uma técnica que envolve o conhecimento dos equipamentos e suas instalações e é, ainda, responsável pela intervenção no processo que poderá interromper ou não a produção de forma planejada e programada. Não é conveniente pensar que a manutenção preventiva seja um conjunto de atividades de verificações e trocas periódicas de peças. Não há padronização para este tipo de manutenção, pelo simples fato de que os equipamentos, as operações e os processos são diferentes.

Para Xenos (2004), a manutenção preventiva feita periodicamente deve ser a atividade principal das ações de manutenção em uma empresa, pois gera como consequências a diminuição de ocorrência de falhas, mais disponibilidade dos equipamentos e diminui as interrupções não programadas na produção.

Para Kardec e Nascif (2004), a manutenção preventiva proporciona um conhecimento prévio das ações, permitindo boas condições de gerenciamento das atividades e dos recursos e

gerando previsibilidade de consumo de materiais e sobressalentes. Por outro lado requer a parada do equipamento ou sistema para sua execução, o que acarreta questionamentos sobre a necessidade da manutenção caso o conjunto de fatores não forem suficientemente fortes ou claros.

### **2.2.3 Manutenção Preditiva**

A ABNT (2004, p.7) conceitua a manutenção preditiva como a “manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.”

Para Viana (2002), a manutenção preditiva se trata de um conjunto de tarefas com o objetivo de acompanhar máquinas ou peças por meio de edições, monitoramento ou controle estatístico para tentar prever o momento de ocorrência das falhas. Dessa forma, este tipo de manutenção visa determinar o tempo correto para a intervenção e utilizar os componentes o máximo de sua vida útil.

A manutenção preditiva representa uma quebra de paradigma na manutenção e se intensifica com o desenvolvimento tecnológico que possibilita equipamentos que fornecem avaliações confiáveis das instalações e sistemas operacionais em funcionamento (Kardec e Nascif, 2004).

Ainda para Kardec e Nascif (2004) as condições básicas para se adotar a Manutenção Preditiva são as seguintes:

- O equipamento, o sistema ou a instalação devem permitir algum tipo de monitoramento/medição;
- O equipamento, o sistema ou a instalação devem merecer esse tipo de ação, devido aos custos envolvidos;
- As falhas devem ser oriundas de causas que podem ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada;
- Seja estabelecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado.

Para Osada (1993) há oito metas para manutenção preditiva:

- Determinar o melhor período para manutenção

- Reduzir o volume do trabalho de manutenção preventiva;
- Evitar avarias abruptas e reduzir o trabalho de manutenção não planejado;
- Aumentar a vida útil das máquinas, peças e componentes;
- Melhorar a taxa de operação eficaz do equipamento
- Reduzir os custos de manutenção;
- Melhorar a qualidade do produto
- Melhorar o nível de precisão da manutenção do equipamento.

Kardec e Nascif (2002) afirmam que pode-se contar com inúmeras técnicas de monitoração para a verificação da modificação do parâmetro estabelecido. Técnicas preditivas podem ser classificadas pela grandeza medida, defeito e aplicabilidade. Seguem as técnicas mais aplicadas:

- Ensaios Elétricos (Corrente tensão e isolamento);
- Análise de Vibrações (Nível global, espectro de vibrações e pulsos de choque);
- Análise de Óleos (Viscosidade, teor de água e contagem de partículas);
- Análise de Temperatura (Termometria convencional e indicadores de temperatura);
- Energia Acústica (Ultrassom e emissão acústica).

Estas técnicas de monitoração ou inspeção preditivas englobam em sua maioria ensaios não destrutivos ou END's.

É necessário que as equipes que efetuam este tipo de manutenção sejam bem treinadas, pois além das medições é necessário que haja a análise dos dados obtidos para a formulação de diagnósticos. Do ponto de vista de produção a manutenção preditiva oferece os melhores resultados devido a mínima intervenção nos equipamentos (KARDEC e NASCIF, 2004).

## 2.3 Tipos de inspeções

### 2.3.1 Ultrassom

Os sons produzidos em um meio refletem-se ou reverberam em suas paredes e podem ser transmitidos a outros meios, estes fenômenos simples constituem os fundamentos para os ensaios de ultrassônicos de matérias (ANDREUCCI,2016).

Para Santin (1996) um ensaio típico por ultrassom convencional se dá pela introdução de feixe sônico no material a ser inspecionado através de um transdutor acoplado ao aparelho, com o objetivo de detectar discontinuidades internas ou sub-superficiais.

Andreucci (2016) caracteriza os ensaios de ultrassom como não destrutivos e com objetivo de detectar defeitos ou discontinuidades que podem estar presentes em diversos tipos de materiais. Tais defeitos podem ser formados por processos de fabricação ou por esforços sofridos pelo material analisado. Como exemplo de defeitos detectados por ultrassom temos bolhas de gás, dupla laminação, micro-trincas, etc.

O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível apresentado por alguns materiais, e se caracteriza como a capacidade de se expandirem ou comprimirem em resposta a aplicação de uma diferença de potencial externa ou de produzirem uma polarização dielétrica em resposta a uma deformação externa (SANTIN,1996).

A Figura 1 mostra o funcionamento de um material piezoelétrico.

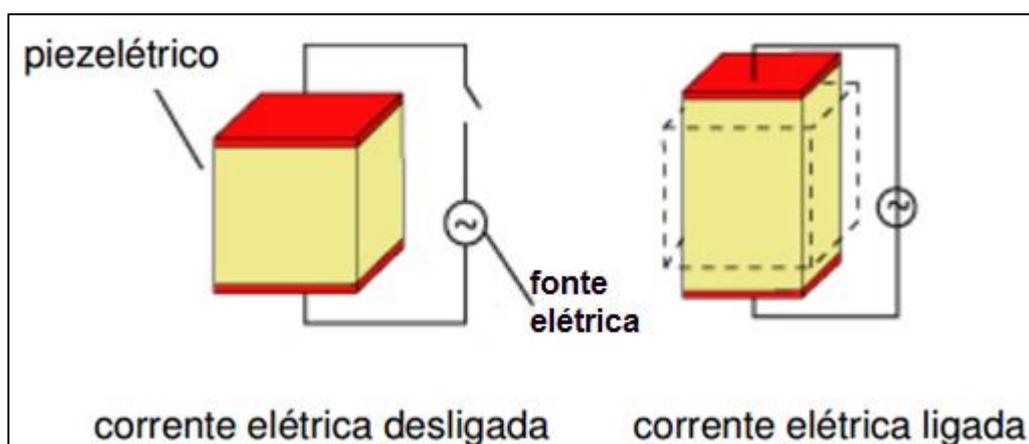


Figura 1: Efeito piezoelétrico  
Fonte: (ANDREUCCI,2016)

A Figura 1 mostra um exemplo simplificado do funcionamento do efeito piezoelétrico. As ondas ultrassônicas são geradas ou introduzidas no material através de elementos denominados transdutores ou cabeçotes que possuem materiais piezoelétricos com uma

determinada dimensão e que vibra com uma certa frequência. Este emissor pode se apresentar com determinadas formas (circular, retangular). O receptor também é dotado de elemento piezoelétrico, isto se deve ao fato da capacidade destes elementos em transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica. (ANDREUCCI,2016).

### 2.3.2 Líquido penetrante

O ensaio por líquidos tem como objetivo a detecção de descontinuidades que estejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc. Sua aplicação pode ser realizada em vários tipos de materiais sólidos, desde que não possuam superfície porosa ou muito grosseria (ANDREUCCI,2016).

O ensaio consiste em fazer penetrar um líquido em uma descontinuidade com abertura superficial, após o preenchimento da descontinuidade é realizada a remoção do excesso de líquido da superfície. Então com auxílio de um revelador, o líquido é retirado da descontinuidade e a imagem formada por este líquido nos fornece as características do defeito analisado (INFOSOLDA,2016).

A Figura 2 mostra as etapas de uma inspeção por líquido penetrante.

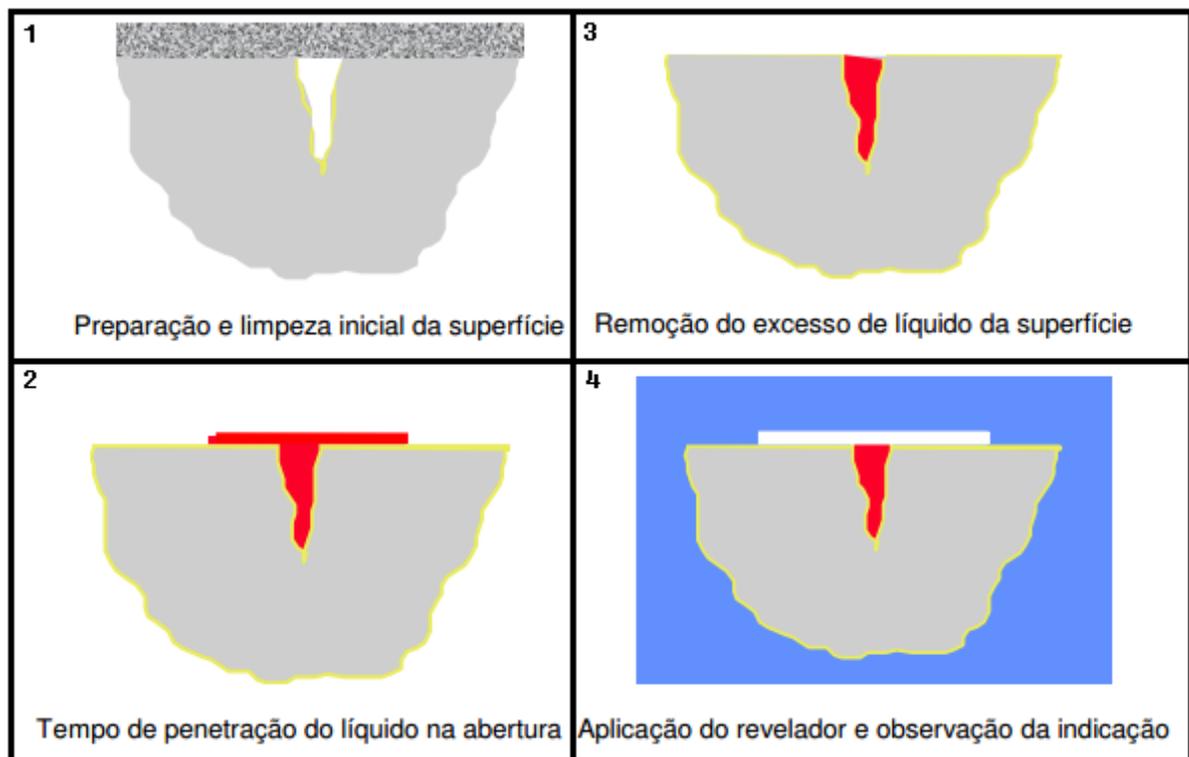


Figura 2: Etapas de inspeção por líquido penetrante  
Fonte: (ANDREUCCI,2016)

Este método é de simples aplicação e possui poucas etapas, que são exemplificadas pela Figura 2. Inicialmente deve-se realizar a limpeza e preparação da superfície para que o líquido possa ser aplicado no ponto a se inspecionar. Depois de um tempo o líquido terá penetrado completamente e deve-se retirar o excesso da superfície. Por fim aplica-se um revelador para que se possa avaliar o defeito.

O ensaio ou inspeção é de grande simplicidade, tanto em sua execução quanto na análise de seus resultados. As análises geralmente são baseadas na forma e volume das indicações, levando em consideração as normas pertinentes (ANDREUCCI,2016).

### 2.3.3 Partículas magnéticas

Diferente do ensaio por líquido penetrante, o ensaio por partículas magnéticas consegue detectar descontinuidade tanto superficiais quanto sub superficiais, porém só pode ser realizado em materiais ferromagnéticos acabados ou semi-acabados (ANDREUCCI,2016).

A Figura 3 é uma representação de um campo de fuga.

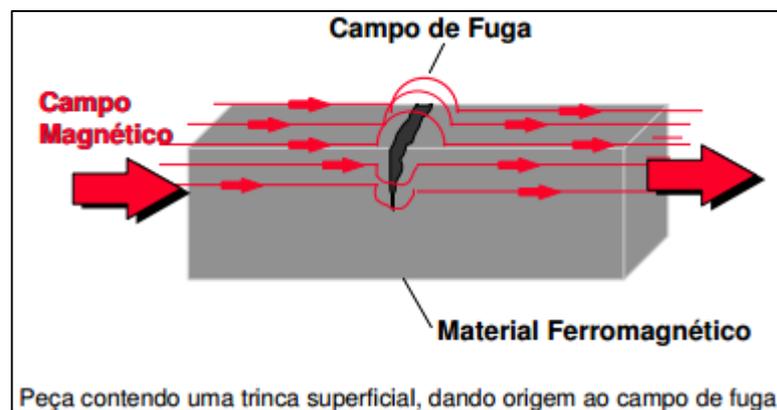


Figura 3: Representação de um campo de fuga  
Fonte: (ANDREUCCI, 2016)

De acordo com Andreucci (2016) o ensaio consiste em induzir um campo magnético na peça ou parte desta que se deseja inspecionar. Desta forma as descontinuidades do material irão gerar um fuga do campo magnético induzido na peça (Figura 3) e com a ajuda de partículas ferromagnéticas estas descontinuidades podem ser evidenciadas, pois ocorrerá uma aglomeração de partículas onde ocorrer a fuga do fluxo magnético. Desta forma o ensaio por partículas magnéticas é um detector de campos de fuga, que são evidenciado pela presença de acúmulos de partículas.

A Figura 4 mostra peças após a realização do ensaio por partículas magnéticas

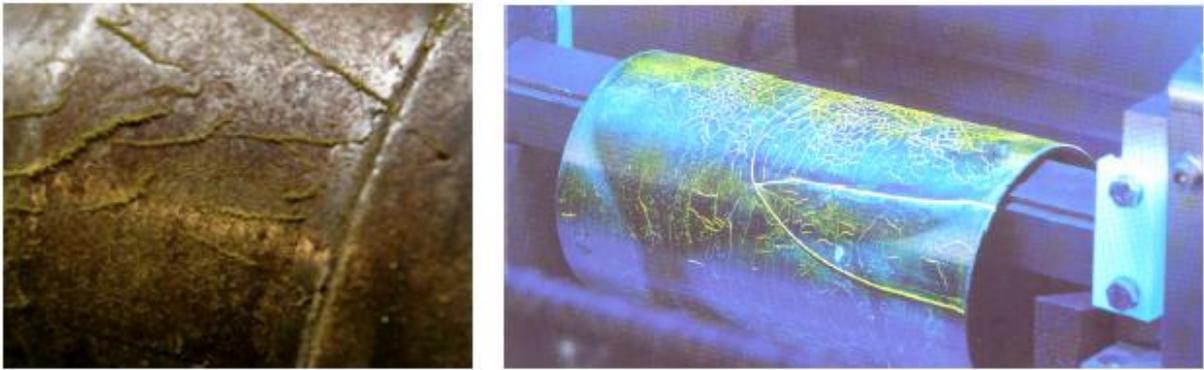


Figura 4: Peças após ensaio por partículas magnéticas  
Fonte: (ANDREUCCI, 2016)

Na prática, como mostrado na Figura 4, verifica-se que para ocorrer um campo de fuga adequado na região das descontinuidades, a intensidade de campo, deve atingir valores adequados e as linhas de força devem ser o mais perpendicular possível ao plano da descontinuidade, caso contrário não será possível o acúmulo das partículas de forma nítida (ANDREUCCI,2016).

## 2.4 Inspeções internas de dutos

Operadoras de dutos de transporte utilizam ferramentas chamadas pipeline inspection gauges ou PIG's para realizar atividades como limpeza e inspeção no interior de seus dutos. Os PIG's são inseridos no interior do duto e se deslocam por sua extensão, na maioria das vezes, impulsionados pelo próprio fluido transportado. Os PIG's são separados em dois tipos de acordo com suas finalidades: Utility PIG's e Smart PIG's.

### 2.4.1 Utility PIG's

Estes PIG's são de construção simples e geralmente não possuem instrumentos para de coleta de dados ou para inspeções (PETROWIKI,2016). São utilizados:

- realizar limpezas
- separação de produtos transportados
- testes hidrostáticos
- calibração do diâmetro do duto

Em alguns casos podem ser acoplados a estes PIG's instrumentos de medição, chamados de pipeline data log ou PDL, com o intuito de registrar alguns parâmetros de operação do duto como pressão, temperatura, aceleração, etc (ROSEN-GROUP, 2016).

Pode-se observar alguns exemplos de PIG's na Figura 5 e na Figura 6.

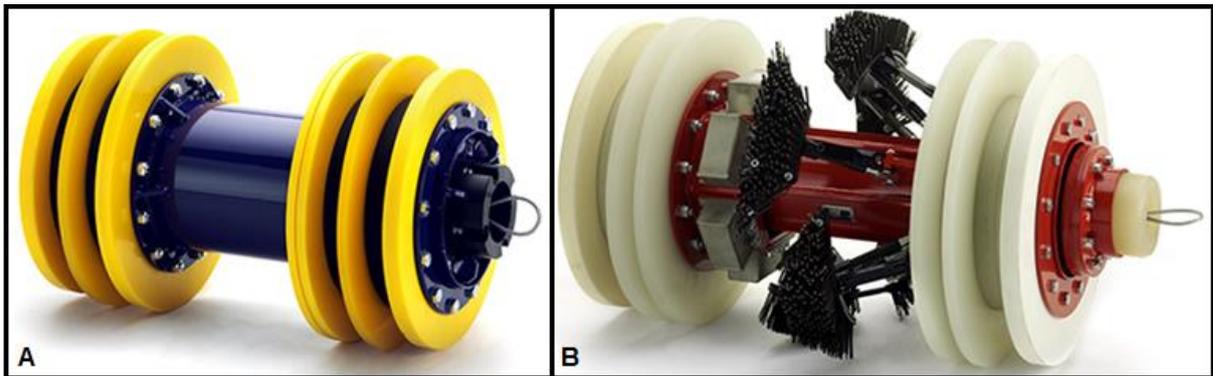


Figura 5: A) PIG de limpeza de discos de poliuretano; B) PIG de limpeza com discos, escovas e imã  
Fonte: (ROSEN-GROUP,2016)

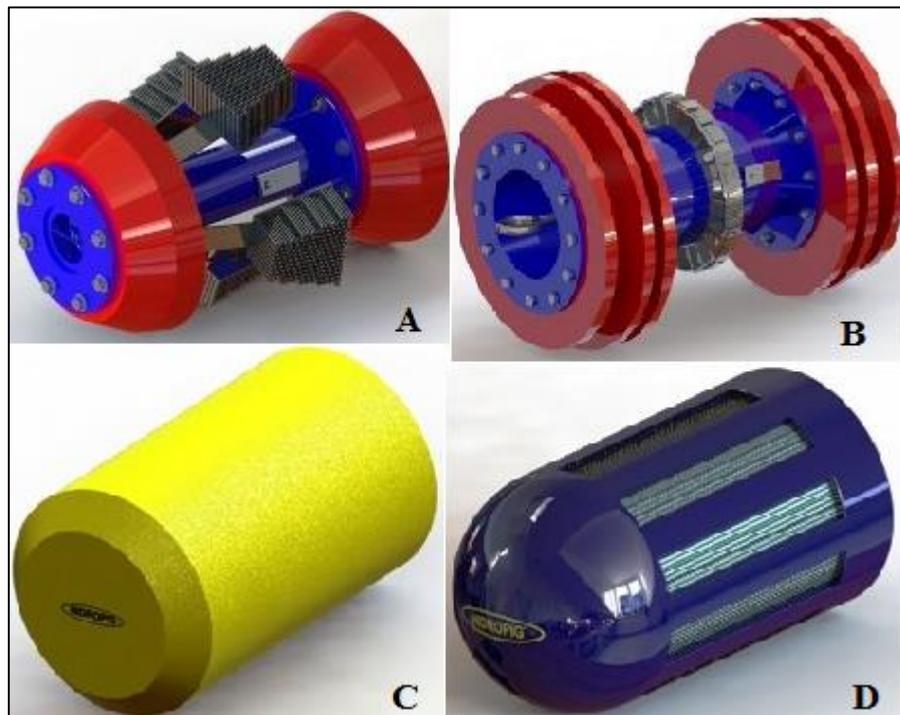


Figura 6: Exemplos de PIG de limpeza. A) PIG de copos com escovas. B) PIG de discos com imãs. C) PIG de espuma. D) PIG de espuma com escovas.  
Fonte: adaptado (HIDROPIG, 2016)

OS PIG's de limpeza podem ser construídos de vários materiais, como copos e discos de poliuretano e espumas, e vários formatos, como observados na Figura 6. Além disso, na Figura 5, observa-se que eles podem ser montados com configurações bem distintas.

#### 2.4.2 *Smart PIG's*

Os *smart PIG's*, ou PIG's instrumentados, destinam-se à inspeções interna dos dutos através de técnicas de ensaios não destrutivos. Estes PIG's podem fornecer várias informações

sobre as condições do duto como espessura das paredes, ovalização, presença de amassamentos, corrosões ou trincas (NACE SP0102, 2010).

Uma das grandes vantagens dos PIG's instrumentados é permitir o mapeamento com precisão dos defeitos e/ou parâmetros do duto ao longo de toda sua extensão, o que seria inviável com outro método de inspeção (GENTIL, 2003).

De acordo com a norma API Standard 1160 2001, a classificação dos *smart* PIG's pode ser feita da seguinte maneira:

- *Metal loss tools*
  - *Magnetic Flux Leakage (MFL)*
  - *Ultrasonic compression wave (UT)*
- *Crack Detection Tools*
  - *Ultrasonic shear waves (UT-C)*
  - *Transverse MFL*
- *Geometry Tools*
  - *Caliper*
  - *Mapping*

A Figura 7 é um exemplo de PIG instrumentado com tecnologia MFL.



Figura 7: PIG MFL-A/IEC  
Fonte: Pesquisa direta (2016)

Os PIG's com tecnologia MFL, como o da Figura 7, são capazes de detectar variações da espessura do duto a partir de um campo magnético induzido por fortes eletroímãs. Quando há uma variação de espessura ou um defeito, o campo magnético sofre mudanças que são registrada por sensores para posterior avaliação e processamento (POPLE, 2003).

A Figura 8 mostra um PIG instrumentado com tecnologia UT-C para detecção e trincas.



Figura 8: PIG UT-C  
Fonte: Pesquisa direta (2016)

Os PIG's com tecnologia UT, Figura 8, utilizam vários cabeçotes de ultrassom para fazer a detecção de espessura ou defeitos no tubo. O princípio de funcionamento é parecido com o descrito no item 2.3.1 deste capítulo, mas utilizando-se de vários cabeçotes para fazer a varredura completa da circunferência do duto.

A Figura 9 mostra um modelo de PIG geométrico.

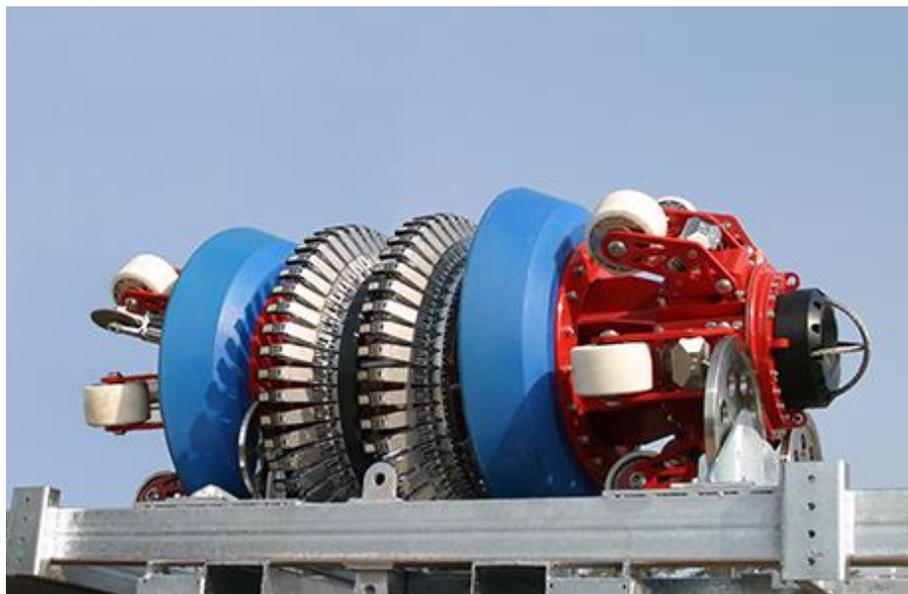


Figura 9: PIG Geométrico (Rosen ROGEO XT)  
Fonte: (ROSEN-GROUP, 2016)

Por fim, os PIG's geométricos (Figura 9) possuem um conjunto de calibradores ou braços mecânicos destinados a inspeção da geometria da tubulação. Opcionalmente estes PIG são com a tecnologia inercial. Esta combinação de sensores fornece dados sobre a geometria do duto, incluindo a forma e curvatura da linha de centro da tubulação, além de referenciamento em três eixos (xyz) o que proporciona dados o posicionamento do duto (CZYZ et al, 2003).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Tipo de pesquisa

De acordo com Gil (2008), a pesquisa pode ser descrita como um processo sistemático e formal de desenvolvimento do método científico. Com objetivo fundamental de descobrir respostas para problemas, através do emprego de procedimentos científicos.

Do ponto de vista de abordagem do problema, as pesquisas podem apresentar duas grandes classificações: quantitativa e qualitativa.

- O modelo quantitativo estabelece hipóteses que exigem, geralmente, uma relação entre causa e efeito e apoia suas conclusões em dados estatísticos, comprovações e testes. Esse modelo tem a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitar distorções de análise e interpretação (GRESSLER, 2004).
- A abordagem qualitativa é utilizada quando se busca descrever a complexidade de determinado problema, não envolvendo manipulação de variáveis e estudos experimentais. Por meio dela, reúnem-se informações sobre os fenômenos investigados com o uso de entrevistas abertas e não direcionadas, depoimentos, histórico de ocorrência dos fatos, estudo de casos (GRESSLER, 2004).

Para Vergara (1997), uma pesquisa pode ser classificada quanto aos fins como sendo exploratória, descritiva, explicativa, metodológica, aplicada e intervencionista. A investigação exploratória é realizada em área na qual há pouco conhecimento acumulado e sistematizado. Por sua natureza de sondagem, não comporta hipóteses que, todavia, poderão surgir durante ou ao final da pesquisa.

Para Gil (2007), pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.

Pesquisa Documental é muito parecida com a bibliográfica. A diferença está na natureza das fontes, pois esta forma vale-se de materiais que não receberam ainda um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetos da pesquisa. Além de analisar os documentos de “primeira mão” (documentos de arquivos, igrejas, sindicatos, instituições etc.), existem também aqueles que já foram processados, mas podem receber outras interpretações, como relatórios de empresas, tabelas, etc (GIL 2007).

Estudo de caso consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento.

Este estudo pretende analisar qualitativamente os procedimentos de inspeção de tubulações de transporte adotados por uma empresa mineradora. A pesquisa será de caráter exploratório, documental e bibliográfico, pois usará como fontes livros e artigos acadêmicos, além de documentos e padrões usados e fornecidos pela empresa estudada. Por fim, será utilizado um estudo de caso com o objetivo de definir os melhores métodos de inspeção para minerodutos.

### 3.2 Materiais e métodos

Este estudo pretende analisar quais as motivações para as inspeções aplicadas em tubulações destinadas ao transporte de minério, a adequação as normas que regem estas inspeções e o a análise dos dados obtidos.

Na Figura 10, o fluxograma descreve a metodologia a ser utilizadas.

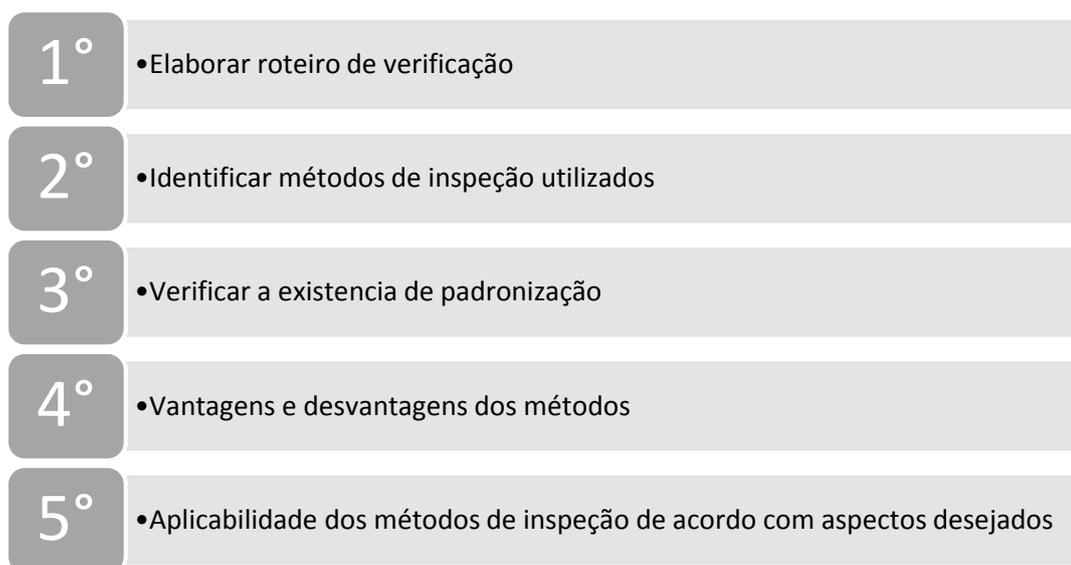


Figura 10: Fluxograma da metodologia de trabalho  
Fonte: Pesquisa direta (2016)

Inicialmente será elaborado um roteiro para se verificar os tipos de inspeção empregados pela empresa estudada, se há uma padronização estabelecida para aplicação de cada tipo de inspeção, bem como a frequência de realização destes bem como a as situações em que cada inspeção é praticada.

Após levantar todos os dados pertinentes sobre os tipos de inspeção e sua aplicação, cada inspeção terá suas vantagens e desvantagens listadas. Desta forma poderá se estabelecer

em quais situações os métodos devem ser aplicados e/ou quais métodos são mais viáveis de serem usados levando-se em consideração para esta análise vários critérios como viabilidade econômica, assertividade da inspeção, capacitação de pessoal, etc.

Após a realização destas etapas espera-se ser possível identificar qual ou quais métodos são mais adequados para se realizar uma rotina de inspeção em tubulações de transporte de minério.

### 3.3 Variáveis e indicadores

É de extrema importância o acompanhamento de alguns parâmetros da tubulação de aço carbono, alguns deles são devido as condições de operação, outros são definidos no projeto e construção do duto, como tipo de aço e espessura da parede do duto. Também é foco deste trabalho os métodos de inspeção, e a aplicação e resultados fornecido por cada método utilizado pela empresa. A Tabela 3 apresenta as variáveis e os respectivos indicadores que serão analisados no presente estudo.

Tabela 3: Variáveis e indicadores

<b>Variáveis</b>	<b>Indicadores</b>
Tubulação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de aço</li> <li>• Espessura da parede</li> <li>• Pressão suportada</li> <li>• Tipo de defeito</li> </ul>
Métodos de inspeção	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultra som</li> <li>• Partícula magnética</li> <li>• Líquido penetrante</li> <li>• Inspeção visual</li> <li>• In line inspections (ILI)</li> </ul>

Fonte: Pesquisa direta (2016)

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

Os dados necessário para este trabalho serão adquiridos através da revisão bibliográfica de documentos, relatórios e procedimentos da empresa estudada, além de artigos e normas

nacionais e internacionais referentes ao tema de pesquisa. Também será realizado uma análise do histórico de dados de inspeção registrados.

Análise de *softwares* de apoio como SAP (*Systems, Applications & Products in Data Processing*), *Sinergy*, *Data Aligner*, *Anomaly Finder*, *Rosoft* e ROAIMS irá fornecer dados importantes sobre o histórico e os dados gerados pelas inspeções. A obtenção de dados através do diálogo direto com os responsáveis pelo planejamento e execução das inspeções também será de grande importância para a realização deste trabalho.

### **3.5 Tabulação dos dados**

Para tabulação dos dados serão utilizados os softwares: *Microsoft Word* 2013, *Microsoft Excel* 2013, SAP, *Sinergy*, *Data Aligner*, *Anomaly Finder*, *Rosoft* e ROAIMS.

### **3.6 Considerações finais**

Este capítulo teve o objetivo de apresentar a metodologia que será utilizada, descrevendo o tipo de pesquisa, os materiais e métodos empregados, as variáveis e seus respectivos indicadores, as formas de coleta de dados e como estes são registrados e analisados.

A metodologia apresentada terá o objetivo de nortear a busca da solução do problema proposto.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do setor

O estudo foi realizado em uma mineradora de grande porte que realiza sua atividade em dois estados, Minas Gerais e Espírito Santo. Seu principal produto é o minério de ferro pelletizado, que é utilizado pela indústria siderúrgica. A totalidade de sua produção é destinada para exportação.

A Figura 11 mostra processos produtivos da empresa em Minas Gerais.

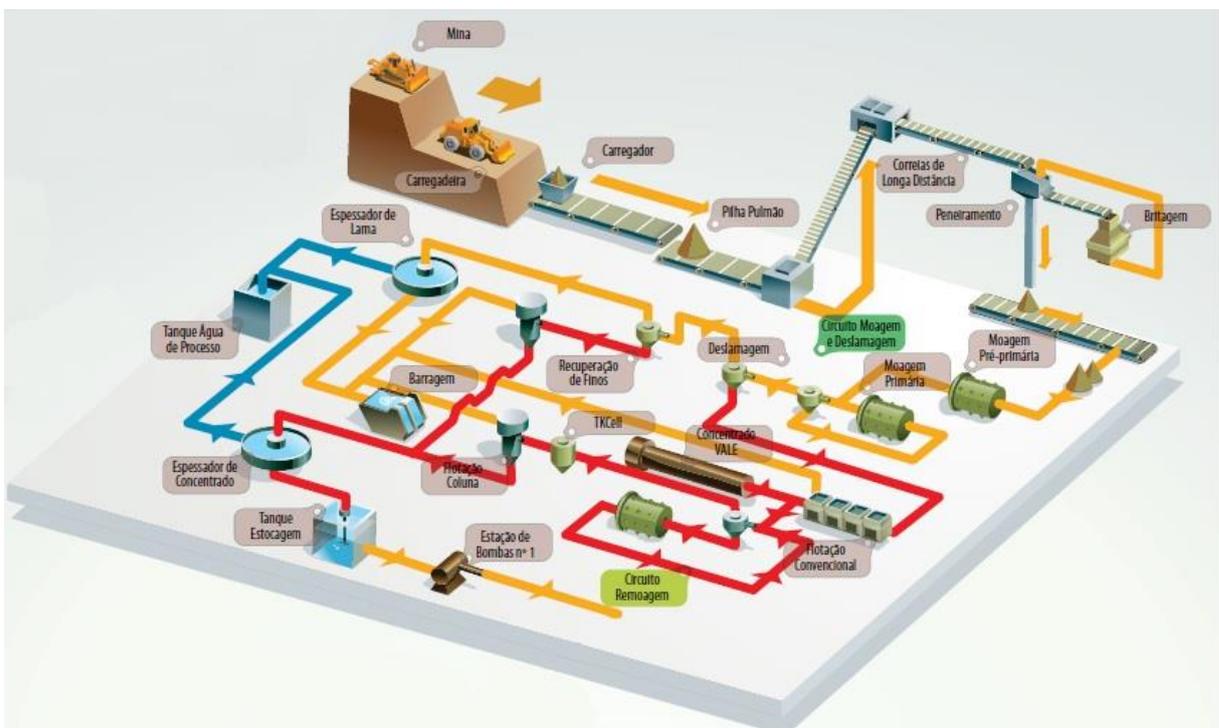


Figura 11: Processo Produtivo em Minas Gerais  
Fonte: Empresa Estudada (2016)

Um dos diferenciais é o processo produtivo interligado, onde a empresa controla todas as etapas do processo, desde a extração até o embarque do produto. A Figura 11 é um esquema simplificado do processo produtivo da extração do minério até o bombeamento da polpa de minério pelo mineroduto. É possível observar a utilização de correias transportadoras para levar o minério da mina até as usinas de beneficiamento, reduzindo a utilização de caminhões.

O minério extraído na mina possui teor médio de 46% de ferro, por este motivo se faz necessário processo de beneficiamento para que se atinja valores por volta de 67% de teor de ferro. O processo de beneficiamento engloba as etapas de britagem, moagem, deslamagem e flotação com o objetivo de alterar as características químicas e físicas do minério. E por fim

ocorre a etapa de espessamento para ajustar a porcentagem de sólidos presente na polpa de minério. Ao fim do beneficiamento se obtém a polpa de minério com os parâmetros adequados para seu bombeamento.

A Figura 12 mostra o trajeto dos minerodutos de Minas Gerais até o Espírito Santo.



Figura 12: Trajeto dos minerodutos MG-ES  
Fonte: Empresa Estudada (2016)

Como pode se observar na Figura 12, a empresa possui três linhas de minerodutos destinadas ao escoamento da polpa de minério de ferro até a unidade de Anchieta-ES, onde ocorre a produção das pelotas. A polpa é bombeada a uma velocidade média de 6 km/h e leva quase três dias para chegar ao seu destino, atravessando 27 municípios entre Minas Gerais e Espírito Santo.

A Figura 13 mostra o processo produtivo das pelotas no Espírito Santo.

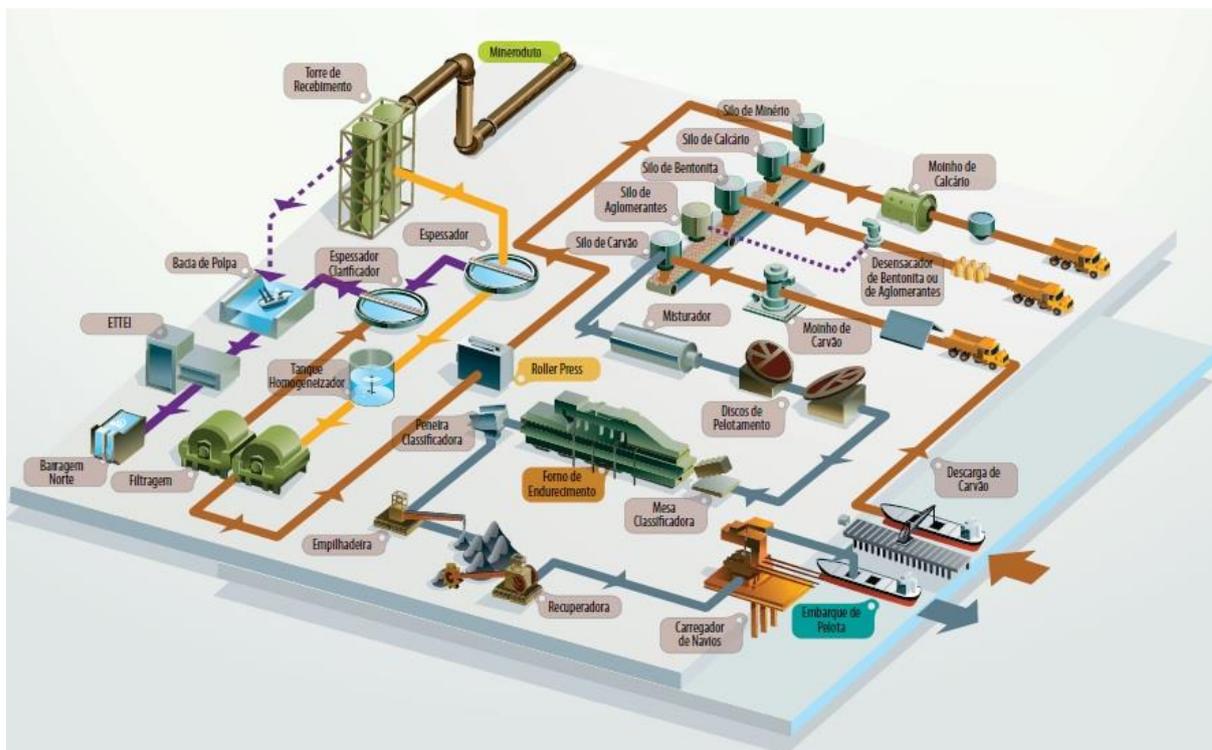


Figura 13: Processo Produtivo Ubu  
Fonte: Empresa Estudada (2016)

De acordo com Figura 13, após chegar ao Espírito Santo, a polpa é filtrada para retirar água, que após é reutilizada em até 90% pela empresa. Logo após são acrescentados insumos necessário a produção de pelotas e o material segue para os fornos de pelotização da empresa. A pelotização consiste na aglomeração do minério de ferro fino em esferas (pelotas), com diâmetro que varia de 8 a 16 milímetros, por meio de um tratamento térmico. As pelotas produzidas podem ser destinadas a alto fornos ou a redução direta.

Após saírem do fornos de pelotização, as pelotas seguem para um pátio de estocagem para aguardar o navio que às transportarão para seu destino final. O trajeto até o porto é realizado através de correias transportadoras. O porto está preparado para receber até dois navios com capacidade de 210 mil toneladas, com taxas de carregamento de 9 mil toneladas por hora de pelotas.

#### 4.1.1 Mineroduto

A empresa estudada possui três linhas de minerodutos e algumas de suas características são detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4: Descrição dos minerodutos da empresa estudada

Linha	Capacidade [Milhões tms/ano]	Extensão [km]	Diâmetro nominal [in]	Comissionamento
Linha 1	15.5	398	18, 20, 22	1977
Linha 2	8.5	400	16, 14	2008
Linha 3	23	400	20, 22	2014

Fonte: Empresa Estudada (2016)

A primeira linha entrou em operação em 1977 (Tabela 4), foi o primeiro mineroduto brasileiro e é considerado um projeto pioneiro para época de sua construção. Com comprimento total de 398 km, interliga as duas unidades da empresa e tem capacidade para transportar até 15,5 toneladas métricas secas de minério por ano.

As segunda e terceira linhas são de construção mais recente, sendo que após o começo da operação da terceira linha, a segunda linha foi hibernada até que a terceira planta de beneficiamento da empresa estivesse operando com total capacidade.

A Figura 14 mostra o perfil dos minerodutos.

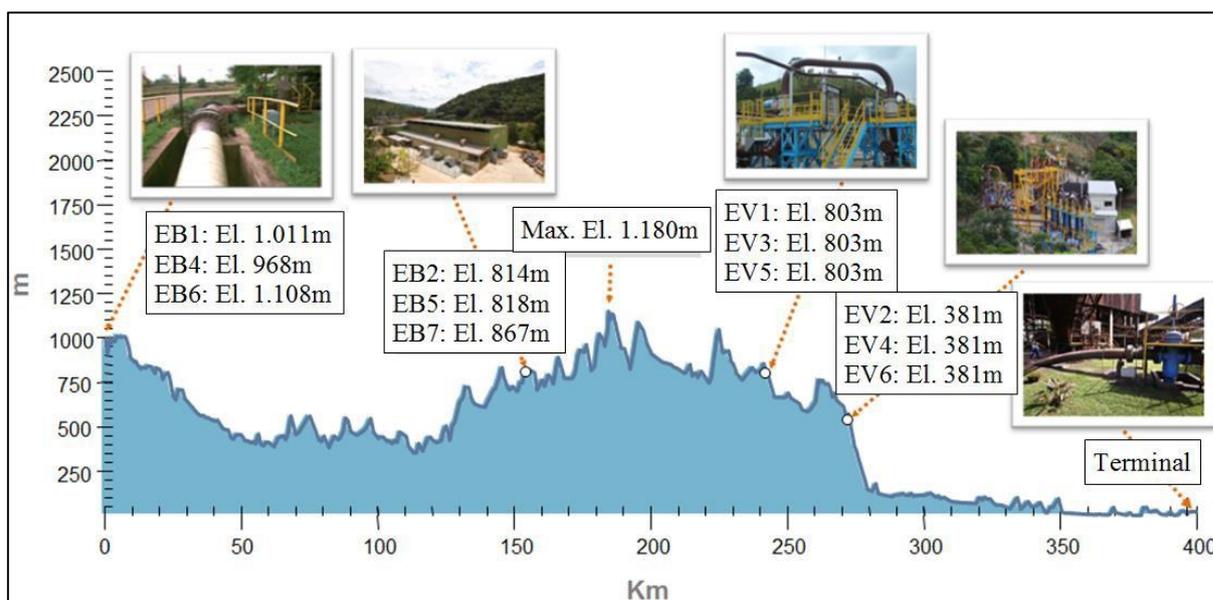


Figura 14: Perfil com elevação do minerodutos

Fonte: (MATTIOLI, 2016)

De acordo com a Figura 14, cada linha é composta por duas estações de bombeamento (EB's), duas estações de válvulas (EV's) e o duto em si. As estações de bombeamento se situam no início de cada linha e a 153 km do início. Isto se deve ao perfil altimétrico do percurso do mineroduto, sendo necessária uma segunda estação para vencer os obstáculos impostos pela altura do terreno, como pode se observar na Figura 15. As estações de bombeamento são compostas por tanques de armazenamento, bombas de centrífugas e por bombas de deslocamento positivo.

As estações de válvulas são um conjunto de válvulas e orifícios destinadas a controlar a pressão em cada linha, sendo que este controle se dá com a operação das válvulas para permitir ou não a passagem da polpa bombeada por orifícios restritivos que aumentam a perda de carga localizada. As estações ficam a 240 km e a 275km do início de cada linha. Portanto a linha um é composta por EB1, EB2, EV1 e EV2; a linha 2 compreende EB4, EB5, EV3 e EV4 e a linha 3 EB6, EB7, EV5 e EV6.

A figura 16 é um fluxograma esquemático da linha 01.

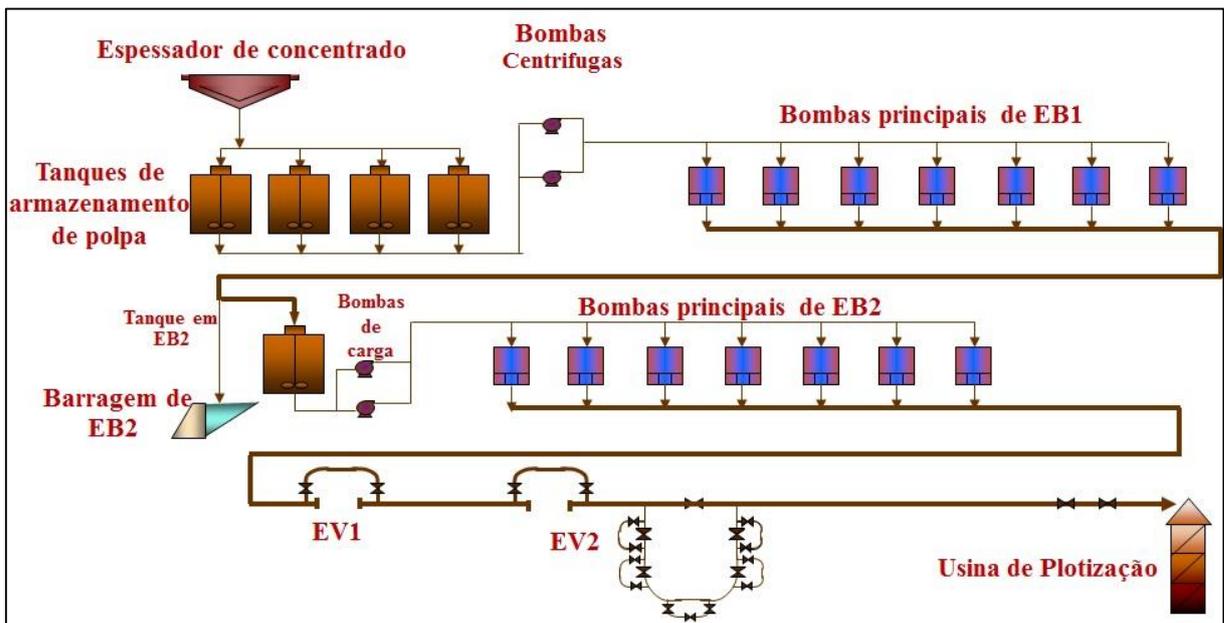


Figura 15: Fluxograma do mineroduto 01  
Fonte: adaptado (MATTIOLI, 2016)

A Figura 15 mostra que a EB possui tanques de armazenagem de polpa, um conjunto de bombas centrífugas e sete bombas de deslocamento positivo destinadas ao bombeamento da polpa. Normalmente, apenas seis bombas são usadas, e uma permanece em *stand by*. Apesar de haver a possibilidade de bombeamento interligado entre as EB's, em geral isso não ocorre pois a operação independente das EB's torna o processo mais flexível e por este motivo EB2 possui uma barragem para captação de água e tanques de armazenagem de polpa.

A Figura 16 é uma representação da posição da tubulação no solo.

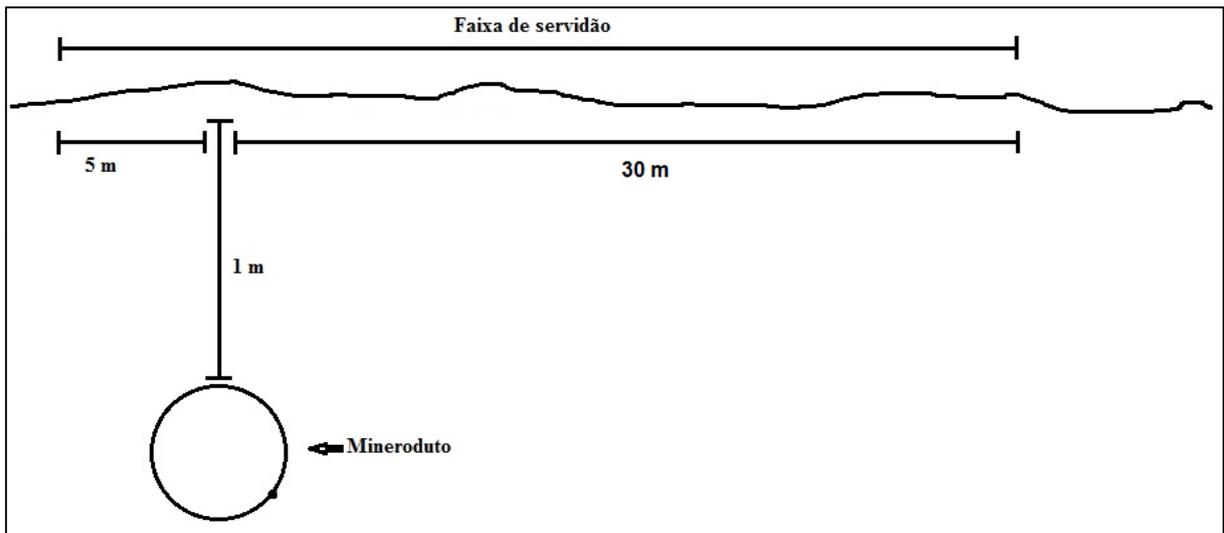


Figura 16: Faixa de servidão  
Fonte: Pesquisa direta (2016)

Os minerodutos são enterrados a uma profundidade média de 1 metros no solo e é definido uma área de 5 metros à esquerda e 30 metros à direita a partir do eixo longitudinal da tubulação como faixa de servidão do mineroduto ao longo de toda sua extensão, Figura 16. A empresa operadora do mineroduto deve sinalizar a faixa de servidão e conscientizar a população sobre os riscos de escavação e de construção na faixa de modo a evitar danos a tubulação e de facilitar o acesso das equipes de inspeção e manutenção ao duto.

Os dutos são fabricados com aço carbono, atendendo as especificações API 5L X60 e API 5L X65 para o caso da linha 01 e API 5L X70 para os demais. O comprimento médio de cada tubulação é de 10 m e possuem costura longitudinal realizada através de soldagem por arco duplo submerso. Os dutos são ligados um ao outro por uma solda circunferenciais realizada através de eletrodo revestido ou TIG (tungsten inert gas).

A gerência de mineroduto segue a estrutura organizacional indicada na Figura 17:



Figura 17: Estrutura organizacional da gerência de mineroduto  
Fonte: Empresa estudada (2015)

Todas as três linhas e suas interligações são de responsabilidade da gerência de mineroduto. O departamento de operação é responsável pelo bombeamento da polpa e o controle de algumas características físicas e químicas da polpa que são vitais para a operação correta e segura do mineroduto. São realizadas amostragem a cada uma hora para aferir parâmetros com PH, tamanho de partículas, porcentual de sólidos, dentre outras.

O departamento de manutenção fica responsável pela inspeção e manutenção das estações de bombeamento e de válvulas.

A Equipe de Integridade é responsável por determinar as inspeções, os tipos de reparos a serem realizados, pela análise dos dados obtidos nas inspeções realizadas nas tubulações do mineroduto, pela criação de uma carteira de reparos priorizando os pontos com anomalias mais críticas e pelo monitoramento das anomalias encontradas pelas inspeções. Todos trabalham em conjunto para manter as condições seguras para operação com o máximo de disponibilidade do mineroduto. Portanto é de responsabilidade da equipe de integridade os métodos de inspeção que são o foco deste estudo.

## 4.2 Métodos de inspeção utilizados

Nesta seção são listados e descritos os métodos de inspeção utilizados pela empresa em estudo. Além disso, será feito um detalhamento dos procedimentos desenvolvidos e utilizados para cada método.

As inspeções são realizadas com intuito de mapear e avaliar as anomalias ou defeitos que podem ser críticos a operação do mineroduto, e os dados gerados por estas inspeções são imprescindíveis para as equipes de manutenção e de integridade tomar decisões quanto a mitigação destes.

#### 4.2.1 Inspeções por PIG (In Line Inspections)

As inspeções por PIG, ou In Line Inspections (ILI) são muito importantes para os operadores de tubulações de transporte em geral por permitirem um mapeamento quase completo das ameaças ou anomalias presentes por toda extensão da tubulação de maneira rápida e confiável.

A Figura 18 mostra as etapas a serem seguidas para realização da inspeção.

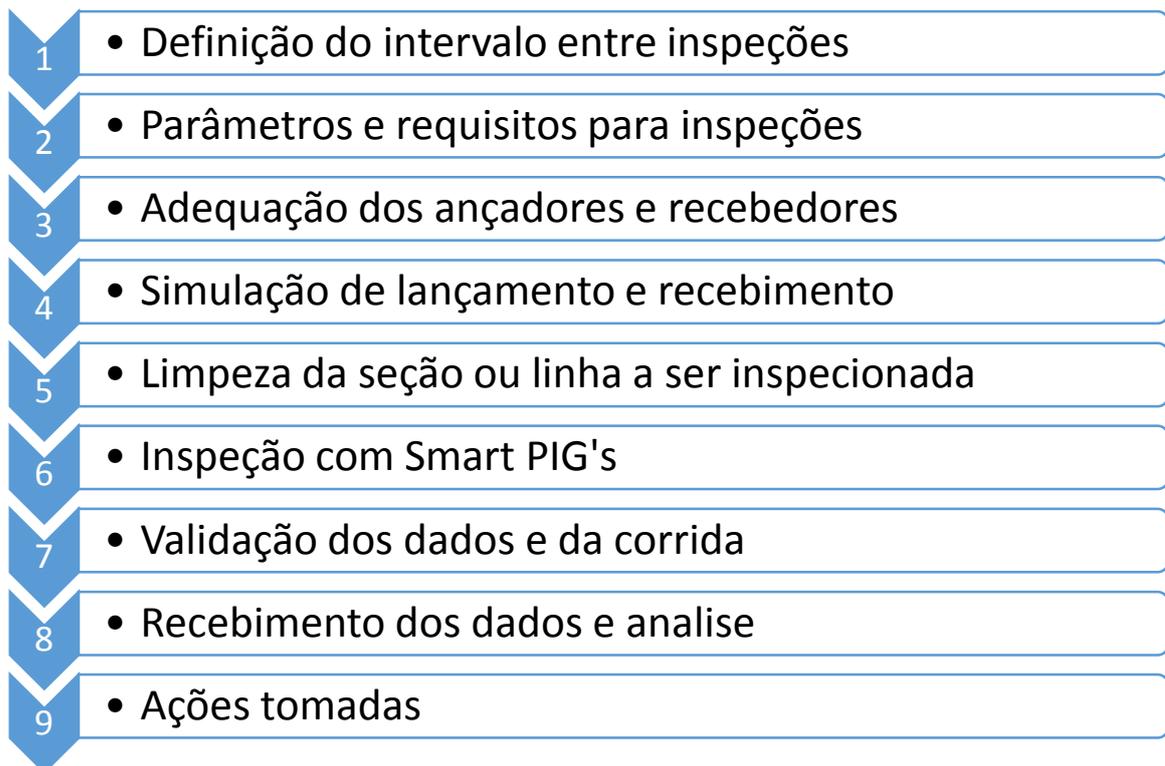


Figura 18: Fluxograma de inspeções por PIG  
Fonte: Pesquisa direta (2016)

O fluxograma dado pela Figura 18 é um passo a passo com as principais tarefas necessárias para a preparação e execução de inspeções por PIG instrumentado realizadas na empresa estudada. Na primeira etapa é definido o intervalo entre as inspeções como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Intervalos de inspeções por PIG

<b>Inspeção</b>	<b>Ameaças mapeadas</b>	<b>Intervalo máximo entre inspeções</b>
Smart pig para corrosão (MFL e/ou UT e/ou TMFL)	Corrosão interna ou externa Erosão Defeitos de laminação Defeitos de fabricação	Recomendável: 5anos Máximo aceitável: 7anos
Smart pig para trinca (UT Crack Detection e/ou TMFL)	Trincas	Recomendável: 5anos Máximo aceitável: 7anos
Smart pig para defeitos geométricos (Geometric Deformation Tool)	Defeitos geométricos (quantitativamente)	Recomendável: 5anos Máximo aceitável: 7anos
Smart pig para desvios de traçado (Inertial Mapping Tool)	Movimentação de solo	Recomendável: 3anos Máximo aceitável: 5anos
Inspeção com pig de limpeza com placa calibradora (caliper tool)	Defeitos geométricos (qualitativamente)	Recomendável: anual Máximo aceitável: 2anos

Fonte: Empresa Estudada (2016)

Em geral, é de responsabilidade do operador do duto definir os intervalos em que ocorreram tais inspeções. No caso da empresa estudada, as equipes responsáveis definiram a Tabela 5 como base para as inspeções por PIG. Porém as inspeções vem sendo realizadas com intervalos de menores, aproximadamente 3 anos, desde 2006. No Brasil, existe a regulamentação para o intervalo de inspeções apenas para dutos de transporte de óleo e gás.

As inspeções por PIG são realizadas por empresas terceirizadas, que são definidas de acordo com atendimento de proposta técnica e comercial fornecidas pela equipe de Integridade em um processo de licitação.

Para a realização de uma inspeção utilizando-se smart PIG's alguns requisitos devem ser analisados.

- Variação de pressão na extensão da seção ou linha a ser inspecionada: Devido a fatores de construção e de operação a pressão varia ao longo da tubulação e como o PIG se movimenta com o fluxo do fluido bombeado ele também está sujeito a estas pressões. Os PIG são projetados para suportarem até certo limite de pressão sem que haja danos a inspeção e/ou ao equipamento.
- Velocidade do fluido bombeado: Outro fator muito importante para a qualidade da inspeção é a velocidade que o fluido atinge, e portanto o PIG que estará imerso nele. Deve ser levada em consideração pois há uma velocidade máxima para que as leituras feitas pelos PIG's sem que sejam prejudicadas e uma

velocidade mínima a fim de evitar que a ferramenta pare na tubulação causando entupimento.

- **Diâmetro nominal:** O diâmetro nominal da tubulação e suas variações são também devem ser considerados, pois interferem diretamente nas inspeções. Isto se dá pela necessidades estarem em contato direto com as paredes do tubo para que sejam feitas as inspeções. Caso a seção ou linha a ser inspecionada possuir variação do diâmetro nominal o PIG deve ser capaz de se adequar a essa variação.
- **Fluido bombeado:** A maior parte dos smart PIG's devem ser bombeados com água ou gás, o que causa uma restrição na produção. Portanto deve ser definido o melhor dia para se realizar a inspeção de maneira a não prejudicar a produção, além de programar a quantidade necessária de agua a ser bombeada.
- **Geometria de construção do mineroduto:** o fator mais importantes para a inspeção, pois é o que permite ou não a inspeção por PIG. Se refere angulação das curvas da tubulação, como os PIG's são ferramentas com largura considerável, apesar de certa flexibilidade, há uma angulação limite que a ferramenta alcança sem que ela se danifique. Caso os ângulos sejam muito fechados a tubulação pode ser considerada não "pigavel", ou seja, não pode receber inspeções por PIG sem que modificações sejam realizadas.

A Figura 19 e Figura 20 são desenhos esquemáticos dos lançadores e recebedores respectivamente.

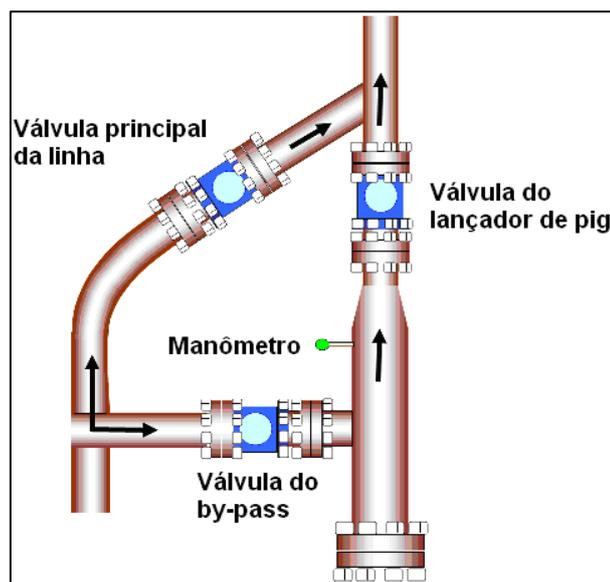


Figura 19: Exemplo de lançador  
Fonte: Empresa estudada (2016)

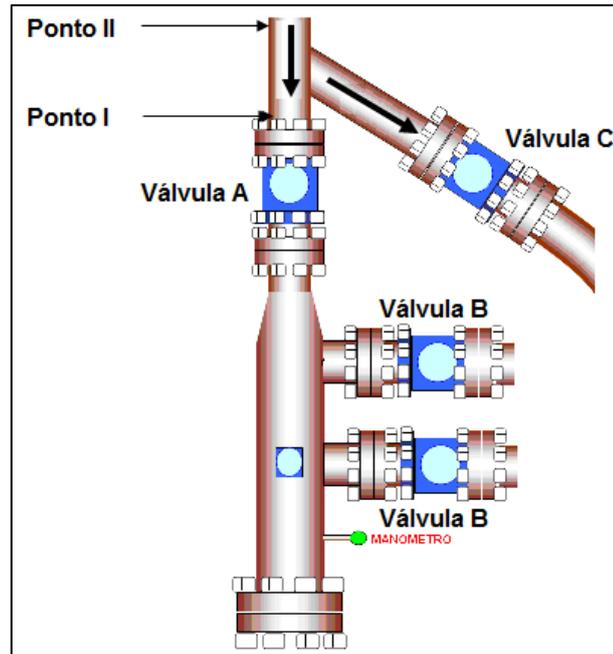


Figura 20: Exemplo de receptor  
Fonte: Empresa estudada (2015)

Um outro aspecto a ser analisado é forma de lançamento e recebimento dos PIG's. O recomendado é que a empresa instale uma derivação em suas tubulações, destinadas ao lançamento e/ou recebimento do PIG, como as da Figura 19 e Figura 20. Esta derivação é projetada para “aprisionar” o PIG, de forma a permitir as operações sem a necessidade de parar a operação de bombeamento. A empresa estudada possui este tipo de derivação em todas as suas linhas e seções, além do projeto de construção de cada linha ter contemplado os parâmetros para viabilizar a passagem de PIG's.

Após a escolha da empresa fornecedora do serviço de inspeção por PIG, as datas de inspeção são marcada para cada seção do mineroduto, que no caso estudado é dividido em quatro seções como mostra a tabela 05.

Tabela 6: Seções do mineroduto

Seção	Extensão (Km)
EB1-EB2	154
EB2-EV1	87
EV1-EV2	32
EV2-Terminal	125

Fonte: Empresa estudada (2015)

Quando o intervalo de lançamento de qualquer PIG, tanto de limpeza quanto *smart* PIG, for maior do que 4 dias é necessário realizar uma simulação de lançamento e de recebimento na seção ou linha em questão. Esta simulação é importante para checar o funcionamento de todas as válvulas e manômetros usados nas operações de lançamento e recebimento. Além

disso, a simulação força a passagem de fluxo na derivação o que faz com que qualquer depósito de material proveniente da própria polpa bombeada seja lavado, evitando que ao se lançar ou receber um PIG este possa ficar preso, o que pode causar danos ao PIG ou o entupimento e rompimento da tubulação.

Para realizar a inspeção com *smart PIG's*, é necessário que a seção seja limpa, ou seja, é programado uma sequência de lançamento de PIG's de limpeza. Cada lançamento de PIG é chamado de corrida pelas pessoas da área. O número de corridas de PIG's de limpeza será determinado com a avaliação do material arrastado por cada PIG limpeza. Quando o PIG de limpeza é recebido, o material grosseiro que ele arrasta e recebido com ele e desta forma é possível analisar quantitativamente a limpeza do duto. Com o passar das corridas a tendência é a diminuição da quantidade de material arrastado, até que a limpeza do tubo seja considerada satisfatória.

A Figura 21 é um exemplo de PIG de limpeza utilizado na empresa.



Figura 21: PIG de limpeza com escovas e imã  
Fonte: Empresa estudada (2016)

A limpeza é feita geralmente com PIG's de mandril dotados de discos de poliuretano, que possuem configurações diferentes para cada tipo de limpeza. Para limpeza pesada além dos discos de poliuretano o PIG é dotado de escova e/ou imãs, Figura 21. Para limpezas mais leves, o PIG geralmente é configurado apenas com um conjunto de discos de poliuretano.

A Figura 22 é uma placa calibradora que pode ser montada nos PIG's de limpeza



Figura 22: Placa calibradora  
Fonte: Empresa estudada (2016)

Após a realização da limpeza, deve ser lançado um PIG com placa calibradora (Figura 22) para assegurar que não haja nenhum amassamento ou deformação na seção que possa restringir a passagem do PIG instrumentado. Isto visa evitar o entupimento ou “plug”, que pode levar a rompimento da tubulação.

Após os passos anteriores serem realizados a tubulação está pronta para receber um smart PIG. Devido às restrições que as campanhas de PIG podem gerar sobre a produção é aconselhável realizar inspeções com todas as ferramentas em uma mesma campanha, evitando desta forma a necessidade de refazer as corridas de limpeza.

A Figura 23 mostra um smart PIG com tecnologia MFL utilizado na empresa.



Figura 23: *Smart* PIG com tecnologia MFL  
 Fonte: Empresa estudada (2016)

A Figura 24 é um smart PIG com tecnologia UT-C utilizado na empresa para detecção de trincas.



Figura 24: *Smart* PIG com tecnologia UT-C  
 Fonte: Empresa estudada (2016)

A empresa estudada, em sua última inspeção, optou pelas seguintes tecnologias de smart PIG:

- Inercial;
- Geométrico;
- MFL;

- UT (medição de espessura);
- UT-C (trincas).

Estas inspeções permitem o mapeamento de todos os tipos de anomalias presentes na tubulação e que poderiam gerar algum risco a operação.

Os smart PIG's não podem ser lançados com polpa de minério, portanto é necessário o bombeamento de água. A água é necessária para facilitar o contato dos instrumentos do PIG com as paredes da tubulação e permitir sua inspeção. Além disso, a água não causa danos a estes instrumentos.

A Figura 25 é uma forma simplificada de visualizar os *batches* bombeados.

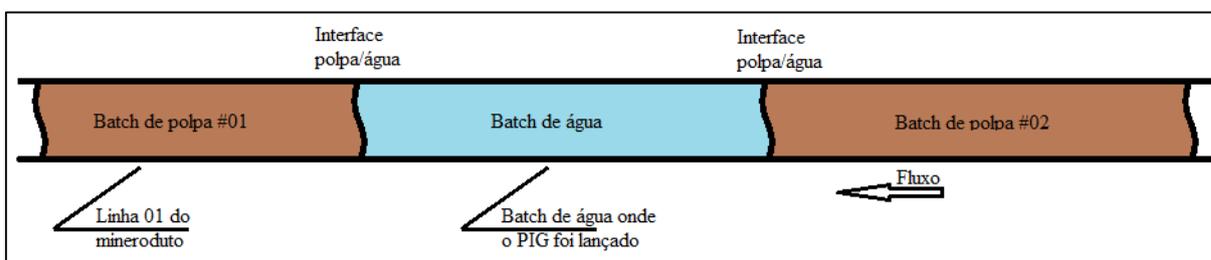


Figura 25: Desenho esquemático de *batches* bombeados  
Fonte: Pesquisa direta (2015)

O bombeamento da polpa é dividido em *batches* ou batelada por tempo de bombeamento. Isto é necessário para que haja maior controle das quantidades de polpa bombeadas e torna possível bombear minérios com especificações diferentes. Portanto o *smart* PIG deve ser lançado em um *batch* de água, ou seja, é bombeado água por algumas horas antes e depois de se lançar o PIG de forma que ele fique longe das interfaces da água e polpa, o que é mostrado esquematicamente na Figura 25.

Em qualquer corrida de PIG, seja de limpeza ou instrumentado, é necessário que haja equipes para fazer o rastreamento do PIG durante o percurso. Em geral são usadas duas equipes dotadas de instrumentos de localização de PIG que se revezam para a detecção nos pontos determinados. Estes pontos estão 5 km distantes entre si em média. Esta ação tem duas finalidades: permitir o preenchimento e atualização da planilha de previsão de chegada do PIG no fim da linha ou seção e ter certeza que o PIG continua em movimento dentro da tubulação.

Logo após o recebimento e a retirada do PIG instrumentado da tubulação, a empresa fornecedora dos PIG's deve fazer a validação previa dos dados coletados. Após esse passo estes dados são enviados para análise na empresa contratada, que por fim deve gerar um relatório da inspeção. Este relatório contém as posições exatas de todas as anomalias, soldas

circunferenciais e longitudinais, derivações, suportes, dentre outros componentes encontrados pela inspeção na tubulação. O relatório também fornece dados necessários pra se atestar a qualidade das inspeção feita tais como pontos em que não houveram leitura, a qualidade das leituras, entre outros.

Todos os aspectos que atestam a qualidade da inspeção são previamente acordados entre as duas empresas e devem ser atendidos para que a inspeção seja validada. Caso contrário, a empresa fornecedora do serviço de inspeção por PIG deve refazer a inspeção.

De posse do relatório final da inspeção, a equipe de Integridade deve inicialmente priorizar os pontos mais críticos a operação do mineroduto para que sejam feitas as inspeções de campo e possíveis reparos. Depois dos pontos mais críticos serem inspecionados em campo, é formulada uma carteira de inspeções anual para que os inspetores de faixa possam confirmar e acompanhar as anomalias indicadas pela inspeção por PIG.

Estes dados também são utilizados para outros estudos realizados pela equipe de integridade, como cálculo da taxa de erosão, cálculo da taxa de crescimento de corrosões, entre outros. Estes estudos são muito importantes para a manutenção da operação do mineroduto, mas não fazem parte do escopo desse trabalho.

As ações descritas nesta seção são todas contempladas por procedimentos internos da empresa, além de estar de acordo com normas e boas práticas nacionais e internacionais, como por exemplo o documento “POF- *Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines*” que estabelece o padrão para inspeções por PIG instrumentados.

#### **4.2.2 Inspeções de campo**

As inspeções de campo, são todas as inspeções realizadas em pontos específicos ao longo da extensão da tubulação do mineroduto. Na Figura 26, o fluxograma define os passos para realização destas inspeções.

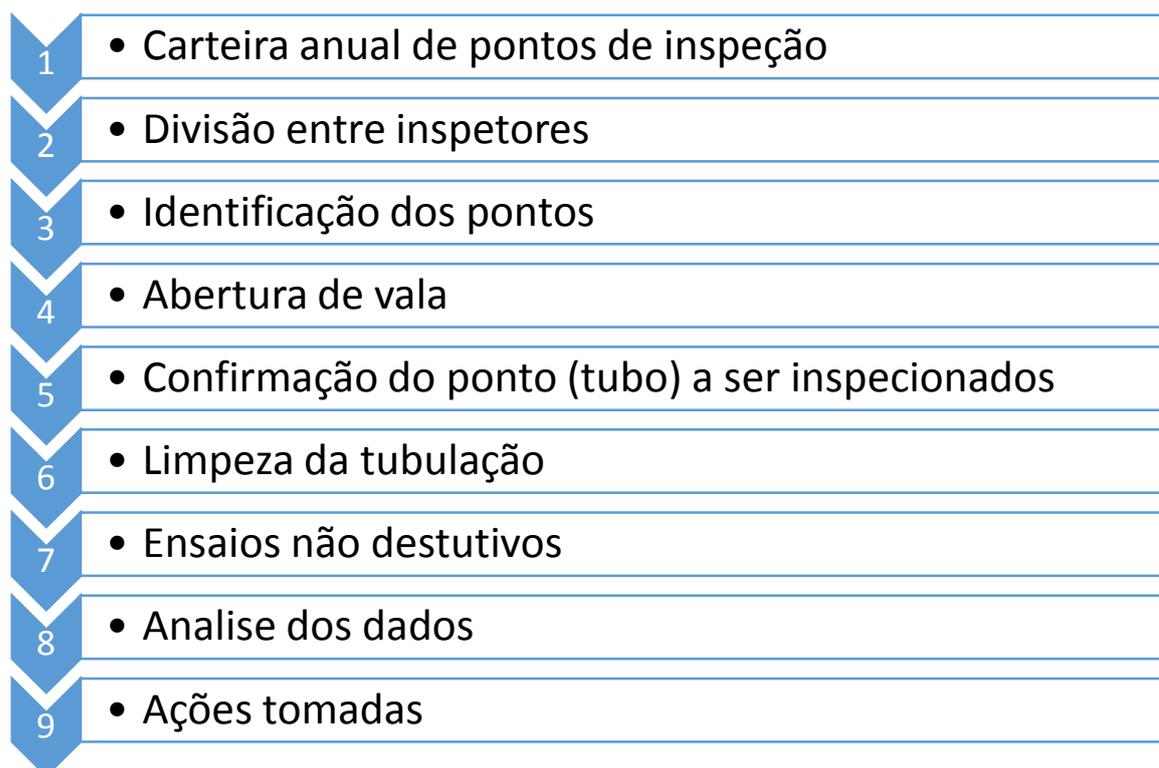


Figura 26: Fluxograma das inspeções de campo  
Fonte: Pesquisa direta (2016)

De acordo com a Figura 26, inicialmente deve-se programar os pontos a serem inspecionados pelas equipes ao longo do ano. Estes pontos de inspeção são programados pela equipe de integridade anualmente de forma a priorizar os pontos mais críticos. A criticidade depende de alguns fatores como, tipo da anomalia, tamanho da anomalia, área em que o anomalia se encontra, acessibilidade ao local, entre outros.

Estabelecida a carteira anual de pontos de inspeção, eles são divididos entre os inspetores da faixa de servidão. Cada inspetor é responsável por um trecho do mineroduto e deve identificar na carteira os pontos a serem inspecionados em seu trecho.

Os pontos de inspeção geralmente são dados em documentos chamados de folha de escavação, exemplo mostrado no anexo II, que possuem informações que permitem aos inspetores encontra-los. Algumas das principais informações são:

- Travessias de rios ou lagos;
- Cruzamento com rodovias municipais, estaduais ou federais;
- Cruzamento com ferrovias;
- Cruzamento com outras tubulações;
- Mudanças de espessura e/ou diâmetro da própria tubulação;

- Distância as EV's e EB's;
- Posição da solda longitudinal;
- Georreferenciamento;
- Superficial do local a ser inspecionado.

A abertura de valas para inspeção é mostrada na Figura 27.



Figura 27: Abertura de vala para inspeção  
Fonte: Empresa estudada (2016)

Após a identificação do lugar exato da anomalia a ser inspecionada, o inspetor responsável deve programar a abertura da vala. A vala é aberta por uma equipe contratada que presta serviços de obras civis. Inicialmente o inspetor usa um localizador de tubulações enterradas para definir a região exata da tubulação e definir a área de escavação. Então a equipe realiza a escavação da vala de maneira a expor a tubulação como exemplificado na Figura 27.

A Figura 28 mostra as valas abertas e prontas para inspeção.



Figura 28: Vala pronta para inspeção  
Fonte: Empresa estudada (2016)

A Figura 28 mostra exemplos de valas abertas, em geral a vala é maior que o comprimento do tubo a ser examinado, ou seja maior do que 12 m. Isso é necessário para a confirmação do tubo a ser inspecionado que é feita a partir da identificação da posição horária da soldas longitudinais do tubos, que devido ao procedimento de construção não são colocadas de maneira coincidente, como exemplificado na Figura 29.

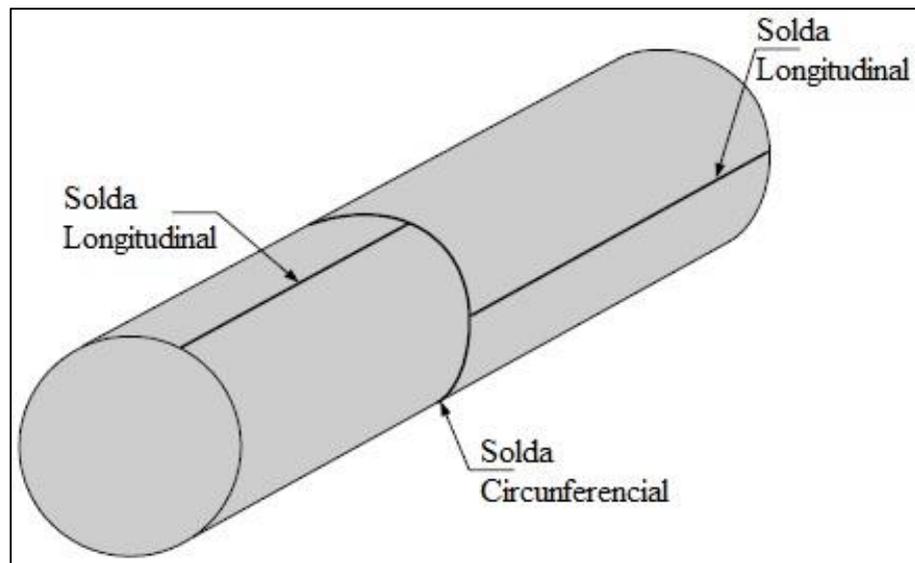


Figura 29: Soldas Longitudinais e Circunferenciais  
Fonte: Empresa estudada (2016)

A Figura 30 mostra um desenho esquemático para identificação da posição da solda longitudinal.

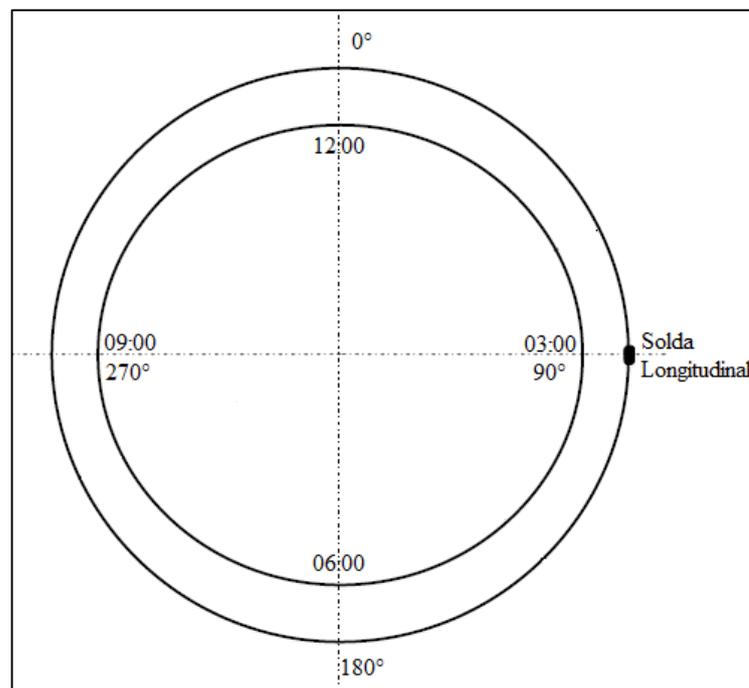


Figura 30: Exemplo de posição horária da solda longitudinal  
Fonte: Empresa estudada (2016)

A Figura 30 é um desenho esquemático de como se identificar a posição da solda longitudinal. A parte superior do tubo é considerada como 12:00 ou 0°, a medição é feita no sentido horário considerando o sentido do fluxo de minério, portanto na Figura 30 a solda longitudinal está à 90° ou na posição de 03:00.

A Figura 31 mostra o detalhe de uma tubulação sem revestimento e limpa, pronta para inspeção.



Figura 31: Tubulação pronta para inspeção  
Fonte: Empresa estudada (2016)

Após a identificação do tudo, a equipe responsável deve realizar a retirada do revestimento do duto que, no caso da empresa estudada, pode ser coaltar, fita ou tripla camada. Após a retirada do revestimento a superfície do tubo deve ser limpa até expor a camada de metal, esta limpeza é realizada com auxílio de lixas manuais e de esmerilhadeira e de forma a não retirar material do tubo, como pode se observar na Figura 31.

Após concluídos todos os passos descritos anteriormente, a tubulação está pronta para ser inspecionada. As inspeções de campo são feitas através dos seguintes ensaios não destrutivos:

- Ultrassom;
- Partícula Magnética;
- Líquido Penetrante.

A partir da folha de escavação é possível localizar o ponto exato das anomalias ou defeitos a serem inspecionados. Equipe de inspeção por ultrassom utiliza uma malha de pontos, que definem os espaçamentos entre os pontos de medição, de forma abranger todo a extensão do defeito ou anomalia relatado pela folha de escavação.

Antes de realizar a inspeção dos pontos da malha, o inspetor deve realizar a calibração do equipamento de medição de acordo com a espessura nominal da tubulação e com o tipo de aço a ser inspecionado. Esta calibração é feita utilizando um bloco de calibração que deve sempre estar de posse do inspetor. Após a calibração do equipamento o inspetor deve realizar a medição dos pontos e registra-las em um documento chamado folha de medição.

A inspeção com partículas magnéticas é feita com utilização de um aparelho chamado yoke, que é uma eletro ímã portátil com a finalidade de gerar um campo magnético em uma determinada área. Esta inspeção é qualitativa e tem como finalidade a verificação de defeitos superficiais na parede externa da tubulação, tais como trincas.

Quando trincas superficiais são encontradas pode-se realizar a inspeção com a utilização de líquido penetrante para avaliar a profundidade da trinca de maneira qualitativa, apesar de haver alguns métodos quantitativos.

A abertura da vala e a exposição da tubulação permite aos inspetores realizarem uma inspeção visual a procura de defeitos superficiais ou geométricos, o que complementa as inspeções realizadas pelos ensaios não destrutivos

Realizada a inspeção, as medições devem ser comparadas com as encontradas na folha de escavação e devem ser analisadas junto com a equipe de integridade para se definir a ação de reparo a ser tomada. Estas ações de reparo dependem do tipo de defeito encontrado e de sua análise com base em normas.

Como na inspeção por *smart* PIG's, as inspeções de campo têm procedimentos internos pra sua realização e também são baseadas em normas nacionais e internacionais. As inspeções são realizadas por uma equipe de inspetores contratados e auxiliados pelos inspetores de faixa da empresa estudada.

### 4.3 Vantagens e desvantagens

As Tabela 7 e Tabela 8 trazem um resumo das vantagens e desvantagens apresentadas para cada método estudado na seção 4.2 deste trabalho.

Tabela 7: Vantagens e desvantagens de inspeções por PIG

<b>Inspeções por smart PIG</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detecção de anomalias em toda extensão do duto com apenas uma inspeção</li> <li>• Detecção de varios tipos de anomalias com apenas uma inspeção</li> <li>• Possibilidade de combinar dois ou mais tipos de inspeção</li> <li>• Pode fornecer informações adicionais sobre a operação do duto</li> <li>• Alta qualidade e confiabilidade dos dados</li> <li>• Os dados fornecidos são base para outros estudos sob o comportamento e vida util da tubulação</li> <li>• Não necessita de pequenos intervalos entre inspeções</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causa restrições a operação, o que pode restringir a produção</li> <li>• Necessita de mão de obra especializada pra realizar o tratamento do dados</li> <li>• Custo alto por inspeção</li> <li>• Processamento do dados gerados não é imediato</li> <li>• Necessita de parâmetros especiais de construção</li> <li>• Poucas empresas fornecem o serviço</li> <li>• Pode causar danos sérios a tubulação em caso de imperícia dos executantes da inspeção</li> </ul>

Fonte: Pesquisa direta (2016)

Tabela 8: Vantagens e desvantagens de inspeções de campo

<b>Inspeções de campo</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mão de obra menos especializada</li> <li>• Custo por inspeção baixo</li> <li>• Resultados imediatos</li> <li>• Vários empresas fornecedoras do serviço</li> <li>• Não causa restrições a operação e produção</li> <li>• Não necessita de parâmetros especiais de construção</li> <li>• Possibilita ações de reparo imediatas</li> <li>• É usada para confirmar os dados fornecidos pela inspeção de PIG</li> <li>• Permite a combinação de vários tipos de inspeção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeções pontuais</li> <li>• Há possibilidade dos resultados serem apenas qualitativo</li> <li>• Necessidade de desenterrar a tubulação, o que pode causar danos sérios por imperícia dos executantes da escavação</li> <li>• Necessidade da retirada do isolamento da tubulação</li> <li>• Muitos pontos são de difícil acesso para as equipes de inspeção</li> </ul>

Fonte: Pesquisa direta (2016)

#### 4.4 Aplicabilidade dos métodos

Os métodos de inspeção apresentados neste capítulo podem ser aplicados em todos os tipos de tubulações feitas de aço e destinadas a transporte de fluidos, não somente ao transporte de polpa de minério, mas como também líquidos e gases.

Os *smart* PIG`s surgiram para inspeção de dutos destinado ao transporte de petróleo (oleodutos) e seus derivados e de gás natural (gasodutos), e depois foram adaptadas para atender as tubulações de transporte de minério.

No caso dos PIG`s, alguns parâmetros construtivos e de operação devem ser analisados:

- Raio das curvas da tubulação;
- Diâmetro nominal e suas mudanças;
- Derivações para lançamento e recebimento;
- Pressões máximas atingidas;
- Velocidade de deslocamento do fluido;
- Temperatura do fluido bombeado;
- Tipo de fluido bombeado.

Ainda se tratando dos PIG`s instrumentados, a ferramenta a ser utilizada deve ser escolhida de acordo com as ameaças presentes ou que se espera encontrar na tubulação a ser inspecionada. A norma API 1160 fornece uma tabela que estabelece a relação entre tipo de defeito x ferramenta usada na detecção. Esta tabela encontra-se no anexo I.

Já as inspeções de campo com a utilização de ensaios não destrutivos podem ser realizadas em todas tubulações de aço desde haja condições de realizar os testes, como por exemplo superfície do ponto a se inspecionar deve estar limpa de maneira correta e com temperatura adequada-. No caso particular do ensaio por ultrassom o aparelho deve estar calibrado para o tipo de aço a ser inspecionado, bem como sua espessura nominal. As inspeções por ultrassom conseguem detectar defeitos de corrosão interna e externa, defeitos de laminações, defeitos de construção do tubo e trincas.

Já os ensaios por partículas magnéticas e por líquido penetrantes são destinados a defeitos superficiais externos da tubulação, gerando na maioria das vezes análises qualitativas destes defeitos.

Como proposto inicialmente, os métodos de inspeção de tubulações destinadas ao transporte de minério foram analisados. A revisão dos documentos e procedimentos

desenvolvidos pela empresa permitiu que todas etapas do processo de inspeção pudessem ser analisadas e descritas. Desta forma foi possível determinar os pontos fortes e fracos foram de cada método, além permitir estabelecer alguns requisitos necessários para aplicação dos métodos estudados. Estas informações são de grande relevância para responder o questionamento que norteia este trabalho.

## **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 Conclusões**

O objetivo principal deste trabalho era analisar os métodos de inspeção mais adequados para tubulações de aço carbono destinadas ao transporte de minério, considerando o caso da integridade de dutos.

A partir da análise teórica feita no capítulo 2 deste trabalho, foi possível identificar os métodos de inspeções preditivas mais utilizados em tubulações de transporte de minério, ou minerodutos, bem como a metodologia para sua aplicação e algumas normas que direcionam estas inspeções.

Feita a análise teórica, foi possível fazer uma revisão e acompanhamento dos procedimentos de inspeção adotados pela empresa estudada, focando em todas as etapas e parâmetros necessários para aplicação de cada método de inspeção. Ficou claro que muitas vezes os métodos de inspeção devem ser analisados desde a etapa de projeto, visto que requerem algumas características construtivas específicas para sua realização.

Ao se comparar os pontos fortes e fracos de cada método utilizado pela empresa em questão, conclui-se que os métodos devem ser utilizados em conjunto com o intuito de se agregar suas vantagens, para que os dados gerados na inspeção sejam os mais precisos e confiáveis possíveis.

A aderência, por parte das equipes executantes das inspeções, aos procedimentos traçados pela empresa e as normas nacionais e internacionais são fatores muito importante, não só para alcançar resultados confiáveis, mas também para garantir a segurança operacional e das pessoas envolvidas.

A rotina adequada de inspeções é o que vai garantir o sucesso das equipes de manutenção, inspeção e integridade, pois é o único modo de realizar um acompanhamento das ameaças a que a tubulação está sujeita e permitir uma operação segura e eficiente.

### **5.2 Recomendações**

Para estudos futuros algumas oportunidades foram identificadas:

- Fazer um estudo de métodos de inspeção aplicados a outras tubulações de transporte a fim de se identificar possíveis melhorias nas inspeções;

- Identificar métodos alternativos que podem ser adaptados para inspeção de tubulações de transporte;
- Estudar as metodologias que utilizam os dados do históricos da inspeção da tubulação, além de outros dados, para avaliações indiretas da integridade da tubulação chamadas de DA (*direct assessment*) como por exemplo ECDA (*external corrosion direct assessment*), ICDA (*external corrosion direct assessment*) e SCCDA (*stress corrosion crack direct assessment*). Tais metodologias são descritas em normas internacionais da NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) e CEPA (*Canadian Energy Pipeline Association*).

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

- AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE. **API 1160: Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines. 2001**
- ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por Ultrassom**. São Paulo, 2016.
- ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos penetrantes**. São Paulo, 2016.
- ANDREUCCI, Ricardo. **Partícula magnética**. São Paulo, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BRANDT, W. **Mineroduto Ferrous Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Meio Ambiente. EIA – Estudo de Impactos Ambientais**. Ferrous Resources do Brasil S. A. Nova Lima: Brandt Meio Ambiente, 2010.
- CZYZ, J.A.; WAINSELBOIN, S.E. **Monitoring pipeline movement and its effect on pipe integrity using inertial/caliper in-line inspection**. In: Rio Pipeline Conference And Exposition, 2002, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2003.
- FARIA, José Geraldo de Aguiar. **Administração da manutenção: Sistema P.I.S.** São Paulo: Edgard Blucher, 1994.
- FERNANDES, Alexandre. **Manutenção Produtiva Total: Uma ferramenta eficaz na busca da Perda-Zero**. 2005
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 4º edição; Rio de Janeiro; Editora LTC
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GRESSLER, Lori Alice. **Introdução à pesquisa**. Edições Loyola, 2004.
- HIDROPIG. **Linha de Produtos**. <<http://hidropig.com.br/produtos/>>. Acessado em 28 de maio de 2016.
- INFOSOLDA. **Ensaio não-destrutivo: líquidos penetrantes**. <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/217-ensaio-nao-destrutivo-liquidos-penetrantes.html>>. Acessado dia 16 de maio de 2016.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção Função Estratégica**. 2ª edição, 1ª Reimpressão 2004, p.38. Editora Quality Mark, Rio de Janeiro, Coleção Manutenção, Abraman.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Julio; BARONI, Tarcísio. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Editora Quality Mark, Rio de Janeiro, 2002. Coleção Manutenção, Abraman.
- KELLY e M.J. HARRIS. **Administração da Manutenção Industrial**. São Paulo: Atlas, 1987.
- KNIGHT WENDLING CONSULTING AG. **Auditoria de Manutenção para Empresa “X”**. Zurich, 1996, p.4.
- MATTIOLI, Gabriela Goes. **Avaliação da corrosão interna em minerodutos brasileiros para transporte de minério de ferro**. Universidade Federal De Minas

Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. 2016

MIRSHAWKA, V. **Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos**. 1 ed. São Paulo: Makron Books, McGrawHill, 1991.

MONCHY, François. **A Função Manutenção**. São Paulo: Durban, 1987, p. 97.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE SP0102: Standard Practice In-Line Inspection of Pipelines**. 2010

Pople, Andrew. **Magnetic Flux Leakage Pigs or Ultrasonic Pigs? The Case for Combined Intelligent Pig Inspections**. 6th International Conference, Pipeline Rehabilitation and Maintenance, October 6-10, 2003, Hilton Berlin, Germany.

RIBEIRO, P. C. C.; FRREIRA, K. A. **Logística e transportes: uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro**. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2002

ROSEN-GROUP. **Solutions for pipeline systems**. < <http://www.rosen-group.com/global/solutions/pipeline-systems.html> > Acessado em 28 de maio de 2016.

SANTIN, J.L. **“Ultra – Som – Técnicas e Aplicação”**. Qualitymark – Ed.1996.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

SOUZA, Valdir Cardoso. **Organização e Gerência da Manutenção – Planejamento, Programação e Controle da Manutenção**. 3ª Ed, revisada. São Paulo: All Print, 2009.

TAKAHASHI, Yoshikazu. **Manutenção Produtiva Total**. 1º edição, IMAM editora, 1993.

TORRES, Ayrton Silva Guimarães, SILVA, Caio Costa, VIEIRA, Pedro Renato Gea, ANDRADE, Ricardo Bruno Nébias. **Samarco’s evolution on erosion rate calculation method**. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 10, 2015, Rio de Janeiro. IBP1352\_15 Samarco’s evolution on erosion rate calculation method. Rio de Janeiro: Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute – IBP, 2015.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. Atlas, 1997.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM Planejamento e Controle da Manutenção**. 1ª Ed; Rio de Janeiro; Qualitmark Ed.; 2002.

XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Belo Horizonte : DG, 1998.

XENOS, Harilaus Georgius D’ Philippos. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2004

## ANEXO I – TIPOS DE ANOMALIAS E FERRAMENTAS PARA SUA DETECÇÃO

Tabela 9: *Anomaly Types and Tools to Detect Them*

ILI PURPOSE	METAL LOSS TOOLS			CRACK DETECTION TOOLS		GEOMETRY TOOLS	
	MFL (Magnetic Flux Leakage)		Ultrasonic (compression wave)	Ultrasnic (shear wave)	Transverse MFL	Caliper	Mapping
	Standard Resolution (SR) MFL	High Resolution (HR) MFL					
METAL LOSS (CORROSION) External Corrosion Internal Corrosion	Detection(1), Sizing(3),(10) No ID/OD Discrimination	Detection(2) Sizing(3)	Detection(2) Sizing(3)	Detection(2) Sizing(3)	Detection(2) Sizing(3)	No Detection	No Detection
NARROW AXIAL EXTERNAL CORROSION (NAEC)	No Detection	No Detection(4)	Detection(2) Sizing(3)	Detection(2) Sizing(3)	Detection(2) Sizing(3)	No Detection	No Detection
CRACKS AND CRACK-LIKE DEFECTS (axial) Stress Corrosion Cracking Fatigue Cracks Longitudinal Seam Weld Imperfections Incomplete Fusion (Lack of fusion) Toe-cracks	No Detection	No Detection	No Detection	Detection(2) Sizing(3)	Detection(2) Sizing(3)	No Detection	No Detection
CIRCUMFERENTIAL CRACKING	No Detection	Detection(5) and Sizing(5)	No Detection	Detection(2) and Sizing(3) if Modified(6)	No Detection	No Detection	No Detection

DENTS WRINKLE BENDS BUCKLES	Detection(7)	Detection(7) Sizing Not Reliable	Detection(7) Sizing Not Reliable	Detection(7) Sizing Not Reliable	Detection(7) Sizing Not Reliable	Detection(8), (10) Sizing	Detection, Sizing Not Reliable
	In Case of Detection, Circumferential Position is Provided						
GOUGES	Detection1, (2) but No Discrimination as Gouges						No Detection
LAMINATION OR INCLUSION	Limited Detection	Limited Detection	Detection and Sizing(3)	Detection and Sizing(3)	Limited Detection	No Detection	No Detection
REVIOUS REPAIRS	Detection of Steel Sleeves and Patches, Others Only with Ferrous Markers		Detection Only of Steel Sleeves and Patches Welded to Pipe	Detection Only of Steel Sleeves and Patches Welded to Pipe	Detection of Steel Sleeves and Patches, Others Only with Ferrous Markers	No Detection	No Detection
MILL-RELATED ANOMALIES	Limited Detection	Limited Detection	Detection	Detection	Limited Detection	No Detection	No Detection
BENDS	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	Detection and Sizing(3)	Detection and Sizing(3)
OVALITIES	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	Detection and Sizing(3), (11)	Detection and Sizing(3), (9)
PIPELINE COORDINATES	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	No Detection	Detection and Sizing(3)
Notes: 1. Limited by the minimum detectable metal loss 2. Limited by the minimum detectable depth, length, and width of the defects 3. Depnd by the speciPd sizing accuracy of the tool 4. If the width is smaller than the minimum detectable defect width for the tool 5. Reduced Probability of Detection (POD) for tight cracks 6. Transducers to be rotated by 90°				7. Reduced reliability depending on the size and shape of the dent 8. Depending on the conBpuration of the tool, also circumferential position 9. If equipped for ovality measurement 10. Available in tethered tool 11. If equipped for bend measurements			

Fonte: (API1160, 2001)

# ANEXO II – FOLHA DE ESCAVAÇÃO

