

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Dissertação de Mestrado

Inertização de minerodutos para mitigação de sua corrosão interna

Autor: Ayrton Silva Guimarães Torres
Orientadora: Prof^a. Vanessa de Freitas Cunha Lins

Fevereiro/2021

Ayron Silva Guimarães Torres

Inertização de minerodutos para mitigação de sua corrosão interna

Versão final

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais.

Área de concentração: Tecnologias limpas, materiais e nanotecnologia

Orientadora: Prof^ª. Vanessa de Freitas Cunha Lins

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2021

T693i	<p>Torres, Ayrton Silva Guimarães. Inertização de minerodutos para mitigação de sua corrosão interna [recurso eletrônico] / Ayrton Silva Guimarães Torres. - 2021. 1 recurso online (xiii, 67 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 62-67. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia química - Teses. 2. Corrosão - Teses. 3. Minerodutos - Teses. I. Lins, Vanessa de Freitas Cunha. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

CDU: 66.0(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"INERTIZAÇÃO DE MINERODUTOS PARA MITIGAÇÃO DE SUA CORROSÃO INTERNA"

Ayron Silva Guimarães Torres

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**.

277ª DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24 DE FEVEREIRO DE 2021 POR:



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa de Freitas Cunha Lins, Professora do Magistério Superior**, em 24/02/2021, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Gomes Brandao, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 24/02/2021, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosa Maria Rabelo Junqueira, Membro**, em 24/02/2021, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Cotting, Professor do Magistério Superior**, em 24/02/2021, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0571791** e o código CRC **D12B4E9C**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me capacitar e guiar em todos os momentos.

À professora Vanessa de Freitas Cunha Lins que, além de me orientar com sabedoria, foi fundamental e me apoiou em todas etapas do mestrado.

Ao meu gestor na Samarco, Vitor Rodrigues Quites, por permitir que este trabalho fosse adiante.

Aos colegas do Mineroduto com quem pude discutir os resultados do trabalho.

À Samarco, UFMG e ao PPGEQ pela oportunidade de fazer o mestrado.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

DEDICATÓRIA

À minha filha, Alice, benção de Deus em minha vida e motivo de muita alegria.

À minha esposa, Gabriela, por estar sempre ao meu lado me apoiando com muito amor e carinho.

Aos meus pais, Itamar e Ana, por sempre me orientarem e me ajudarem em tudo na vida, com toda dedicação possível.

Aos meus irmãos, Ramon e Anderson, pela torcida e incentivo.

Resumo

A capacidade de transporte dos minerodutos está diretamente relacionada à rugosidade interna da tubulação. Dessa forma, a aplicação de métodos de proteção contra corrosão tem fundamental importância, tanto na fase operacional quanto em momentos de paralisação temporária. Além disso a corrosão também afeta a vida útil do duto. O mineroduto 2 da Samarco Mineração S.A. foi inertizado com gás nitrogênio, no ano de 2015, sendo utilizada como referência a norma ABNT NBR 15280-2. Análises químicas, mineralógicas e microestruturais foram conduzidas em amostras de materiais removidos do interior do duto por pigs de espuma, no ano de 2017, a fim de identificar e caracterizar o produto de corrosão gerado. A fase mais marcante encontrada foi a magnetita, com morfologia botrioidal, formada pela oxidação do aço do tubo do mineroduto. Em 2019, o mineroduto foi reativado e posteriormente inspecionado com pigs instrumentados, tecnologias ultrassom e MFL (*Magnetic Flux Leakage*). Nessas inspeções verificou-se que as regiões corroídas estão mais concentradas nos quilômetros iniciais das seções, onde também foram observadas maiores profundidades de corrosão, bem como maiores taxas de corrosão e erosão, o que mostra a maior influência da fase operacional no desenvolvimento do processo corrosivo e desgaste da tubulação. Ademais a maior parte das regiões corroídas reportadas pelos pigs tem baixo percentual de profundidade, variando entre 10% e 33%, sendo que mais de 98% destas regiões tem profundidades menores ou iguais a 15%, o que mostra que o processo corrosivo não se desenvolveu substancialmente. Dessa forma, a aplicação do processo de inertização em minerodutos de longa distância se mostrou viável para longos períodos de tempo. Contudo, neste trabalho são sugeridas melhorias no processo de inertização para torná-lo mais robusto.

Palavras-chave: Mineroduto; corrosão; inertização; hibernação.

Abstract

The transport capacity of the pipelines is related to the internal roughness of the pipeline. Thus, the application of corrosion protection methods is of fundamental importance, both in the operational phase and in times of temporary shutdown. In addition, corrosion also affects the life of the pipeline. The second Samarco's slurry pipeline was inertized with nitrogen gas in 2015, using the ABNT NBR 15280-2 standard as reference. Chemical, mineralogical and microstructural analyzes were conducted on samples of materials removed from the inside of the duct by foam pigs, in 2017, in order to identify and characterize the corrosion product. The most striking phase found was magnetite, with botrioidal morphology, formed by the oxidation of steel in the pipeline. In 2019, the slurry pipeline was reactivated and later inspected with smart pigs, ultrasound and MFL (Magnetic Flux Leakage) technologies. In these inspections it was found that the corroded regions are more concentrated in the initial kilometers of the sections, where greater depths of corrosion were also observed, as well as higher corrosion and erosion rates, which shows the greater influence of the operational phase in the development of the corrosive process and pipeline wear. Furthermore, most of the corroded regions reported by the pig have a low percentage of depth, varying between 10% and 33%, with more than 98% of these regions having depths less than or equal to 15%, which shows that the corrosive process is not developed substantially. Thus, the application of the inertization process in long-distance pipelines proved to be feasible for long periods of time. However, this work suggests improvements in the inertization process to make it more robust.

Keywords: Slurry Pipeline; corrosion; inertization; hibernation.

Lista de símbolos

- Ms magnetita secundária, geralmente botrioidal, produto da corrosão do aço do tubo do mineroduto;
- Hs hematita secundária, geralmente botrioidal, produto da corrosão do aço do tubo do mineroduto;
- Hp hematita primária, originária do concentrado do minério; portanto, não é produto do processo corrosivo;
- Go goethita, em geral botrioidal e primária; mais raramente pode ser produto da corrosão do aço do tubo do mineroduto;
- Q quartzo, sempre primário;
- Ag agregado de partículas secundárias e primárias, cimentado por calcita;
- Ca calcita;
- Po poro;
- R resina de impregnação.

Lista de figuras

Figura 1: Malha de minerodutos do Brasil em quilômetros (Torres et al., 2015).	4
Figura 2: Diagrama de Moody (FOX; MCDONALD'S; PRITCHARD, 2006).	6
Figura 3: Fluxo operacional esquemático do Mineroduto 2.	7
Figura 4: Perfil de elevação dos minerodutos da Samarco (adaptado de AUSENCO, 2012).	8
Figura 5: Efeito do oxigênio dissolvido na taxa de corrosão na polpa de minério de ferro (adaptado de GANDHI <i>et al</i> 1975), conforme citado por (BROWN, HEYWOOD, 1991)	11
Figura 6: Diagrama Eh versus pH para polpa da Samarco Mineração S.A. (adaptado de MATTIOLI, 2016).	12
Figura 7: O efeito do pH na taxa de corrosão do duto em presença de concentrados de minério de ferro. (Adaptado de GANDHI <i>et al</i> 1975), conforme citado por (BROWN, HEYWOOD, 1991)	12
Figura 8: Relação entre temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa para uma selecionada temperatura de bulbo seco do gás (t): a) temperatura (t_d) em função da umidade relativa e b) umidade relativa em função da temperatura (t_d).	16
Figura 9: Temperatura de ponto de orvalho em função da pressão de vapor da água	16
Figura 10: Pig instrumentado com ferramentas de ultrassom e MFL.	17
Figura 11: Funcionamento do ultrassom para medição de espessura (Adaptado de WALKER, 2010)	18
Figura 12: Comportamento dos campos magnéticos. a) sem fuga de campo, duto sem defeito. b e c) com fuga de campo, duto com defeito interno ou externo (Adaptado de WALKER, 2010).	18
Figura 13: PIG usado para remoção de material sedimentado.	19
Figura 14: PIG de espuma com nível de impregnação inadequado.	20

Figura 15: Ilustração de um relógio analógico.....	23
Figura 16: Medidas de temperatura de ponto de orvalho nos pontos de monitoramento.	25
Figura 17: Medidas de percentual de oxigênio nos pontos de monitoramento.....	26
Figura 18: Pigs de espuma lançados para a secagem do duto durante a recarga do nitrogênio.	26
Figura 19: Material coletado durante a passagem dos pigs de espuma durante recarga do nitrogênio.	27
Figura 20: Difratoograma da amostra Global.....	30
Figura 21: Difratoograma da amostra > 850 μm	30
Figura 22: Difratoograma da amostra > 425 μm	31
Figura 23: Difratoograma da amostra > 150 μm	31
Figura 24: Difratoograma da amostra < 150 μm	32
Figura 25: Três fragmentos milimétricos de tubérculos são mostrados.....	33
Figura 26: Fragmento de tubérculo com trama botrioidal. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), Poro (Po) e Resina de impregnação (R).	34
Figura 27: Bandas paralelas de magnetita e hematita. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs).	35
Figura 28: Fragmento de tubérculo com estrutura complexa.	36
Figura 29: Fragmento de tubérculos com poros grandes e pequena quantidade grãos de goethita. Goethita secundária (Go), Poro (Po) e Resina de impregnação (R).	37
Figura 30: Imagem de fragmento de tubérculo com bandas de magnetita e hematita secundárias e grãos hematita primária. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), hematita primária (Hp), agregado (Ag) e Poro (Po).	38
Figura 31: Fragmento de tubérculo bastante compacto, com inclusões de quartzo.	39

Figura 32: Detalhe do fragmento de tubérculo da figura 29 (caixa vermelha). Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), hematita primária (Hp) e quartzo (Q).....	40
Figura 33: Fragmento alongado de tubérculo com crostas de agregado de partículas finas cimentadas por calcita. Magnetita secundária (Ms), agregado (Ag) e resina de impregnação (R).....	41
Figura 34: Detalhe de tuberculo com grãos de Goethita. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), goethita secundária (Go), poro (Po) e resina de impregnação (R).....	42
Figura 35: Poro parcialmente preenchido com agregado e contendo um grão de calcita. Magnetita secundária (Ms), agregado (Ag), calcita (Ca) e poro (Po).....	43
Figura 36: Fragmentos de tubérculos com contornos desde angulosos até arredondados.....	44
Figura 37: Ordens de grandeza das quantidades de regiões corroídas em função do percentual de profundidade.....	46
Figura 38: Distribuição das ordens de grandeza das quantidades de regiões corroídas e perfil altimétrico ao longo do mineroduto.....	48
Figura 39: Distribuição das ordens de grandeza das extensões das regiões corroídas e perfil altimétrico ao longo do mineroduto.....	50
Figura 40: Posições horárias das regiões corroídas ao longo do comprimento do mineroduto.....	52
Figura 41: Taxas de corrosão ao longo do duto.....	54
Figura 42: Distribuição das menores espessura por posição.....	55
Figura 43: Taxas de erosão ao longo da tubulação.....	56

Lista de tabelas

Tabela 1: Operadores de minerodutos no Brasil (Adaptado de TORRES <i>et al.</i> , 2015)..	5
Tabela 2: Valores das medições – entrega do duto após secagem e recarga de nitrogênio	27
Tabela 3: Análise granulométrica (% em massa)	28
Tabela 4: Análises químicas da amostra global e das frações granulométricas (% em massa)	28
Tabela 5: Resultados dos ensaios de FRX e DRX	29

SUMÁRIO

1 – Introdução.....	1
3 – Objetivos.....	3
4 – Revisão Bibliográfica	4
4.1 – Minerodutos	4
4.2 – Minerodutos da Samarco Mineração S.A.	6
4.3 – Corrosão em minerodutos	9
4.3.1 – Corrosão interna.....	9
4.3.1.1 – Erosão-Corrosão.....	9
4.3.1.2 – Corrosão Induzida Microbiologicamente.....	13
4.3.1.3 – Paralisação temporária de minerodutos	14
4.4 – Inspeção de dutos com pigs	17
5 – Metodologia	19
5.1 – Inertização do Mineroduto.....	19
5.2 – Análise de material arrastado do interior do mineroduto pelo pig	21
5.3 – Inspeção com pig instrumentado do mineroduto e avaliação das corrosões	22
6 – Resultados e Discussões	24
6.1 – Inertização do Mineroduto.....	24
6.2 – Análise de material arrastado do interior do mineroduto pelo pig	28
6.2.1 – Análise química e mineralógica	28
6.2.2 – Análise Microestrutural.....	32
6.3 – Inspeção com pig instrumentado do mineroduto e avaliação das regiões corroídas.....	46
6.3.1 - Análise dos resultados de corrosão	46
6.3.2 - Análise dos resultados de erosão	55
7 – Conclusões.....	58
8 – Sugestões de trabalhos futuros.....	61
9 – Referências Bibliográficas	62

1 – Introdução

Nas últimas duas décadas, o transporte de polpa de minérios por minerodutos aumentou consideravelmente no Brasil (TORRES *et al.*, 2015). Isto se deve às diversas vantagens apresentadas por minerodutos em relação a outros meios de transporte, como baixo índice de acidentes de trabalho durante a operação, menor consumo de energia, alta confiabilidade, economia no transporte e relativo baixo impacto ambiental (SAMPAIO; BRANDÃO, 2004).

Minerodutos são utilizados para se transportar o minério do ponto de extração e beneficiamento para o local de embarque e processamento e sua capacidade de transporte está diretamente relacionada à rugosidade da tubulação (MATTIOLI *et al.*, 2018). Neste sentido, a corrosão interna dos dutos tem papel importante uma vez que aumenta a rugosidade e reduz a capacidade do sistema, devido ao aumento do fator de atrito.

Além da redução de capacidade de transporte, a corrosão também afeta a vida útil dos minerodutos devido à redução da espessura de parede dos tubos, com prejuízos a integridade estrutural.

Nos minerodutos da empresa Samarco Mineração S.A., que transportam polpa de minério de ferro, o pH da polpa é elevado para atingir a zona de passivação de acordo com o diagrama de *Pourbaix* (McCAFFERTY, 2010) para minimização da corrosão.

Em determinados momentos durante a fase operacional, pode ser necessária a paralisação temporária de um duto por questões econômicas, legais ou de estratégia das empresas.

Na Samarco Mineração S.A., para minimizar a corrosão interna nos dutos parados, são aplicadas duas metodologias para hibernação: preenchimento do duto com água tratada, que considera a elevação do pH com adição de hidróxido de sódio e remoção de oxigênio dissolvido na água com adição de bissulfito de sódio catalisado com cobalto; e preenchimento do duto com gás nitrogênio, que é inerte, sendo comum utilizar a nomenclatura “inertização” neste último caso.

Atualmente, as duas técnicas estão em aplicação na Samarco Mineração S.A. sendo o preenchimento do duto com a água tratada aplicado a casos com menores períodos de parada e a inertização para casos com maiores períodos de parada, neste último caso para eventos acima de 4 anos. Cabe ressaltar que, de acordo com análises de risco e ambientais, o método de inertização possa ser escolhido como melhor alternativa, independentemente dos períodos de paralisação, tendo em vista que um possível vazamento de material, nitrogênio, para o meio ambiente não acarretaria em impactos ambientais significantes.

Este trabalho visa descrever o processo de inertização do mineroduto 2 da Samarco Mineração, que tem aproximadamente 400 quilômetros de extensão e transporta a polpa de minério de ferro de Mariana-MG até Anchieta-ES, avaliar as etapas necessárias e a aplicação dessa metodologia em escala industrial, caracterizar produtos de corrosão removidos do interior do duto e propor causas e mecanismos para as corrosões encontradas durante as inspeções.

3 – Objetivos

Descrever o processo de inertização do mineroduto 2 da Samarco Mineração em período de paralisação.

Caracterizar os produtos de corrosão removidos do interior da tubulação pela passagem de pigs durante período de inertização.

Avaliar o processo de inertização a partir da análise dos resultados obtidos em inspeções realizadas com pigs instrumentados no mineroduto.

4 – Revisão Bibliográfica

4.1 – Minerodutos

A mineração tem empregado o conceito de transportar polpa em dutos desde meados dos anos 1950, e a construção de minerodutos de longa distância tem evoluído em todos os continentes a partir deste momento (ABULNAGA, 2002). A polpa é essencialmente uma mistura de sólidos e líquidos e, mais especificamente, ela é composta por um fluido, geralmente água, que transporta partículas sólidas mantidas em suspensão (ABULNAGA, 2002).

No Brasil a malha de minerodutos aumentou consideravelmente nos últimos anos como mostrado na Figura 1.

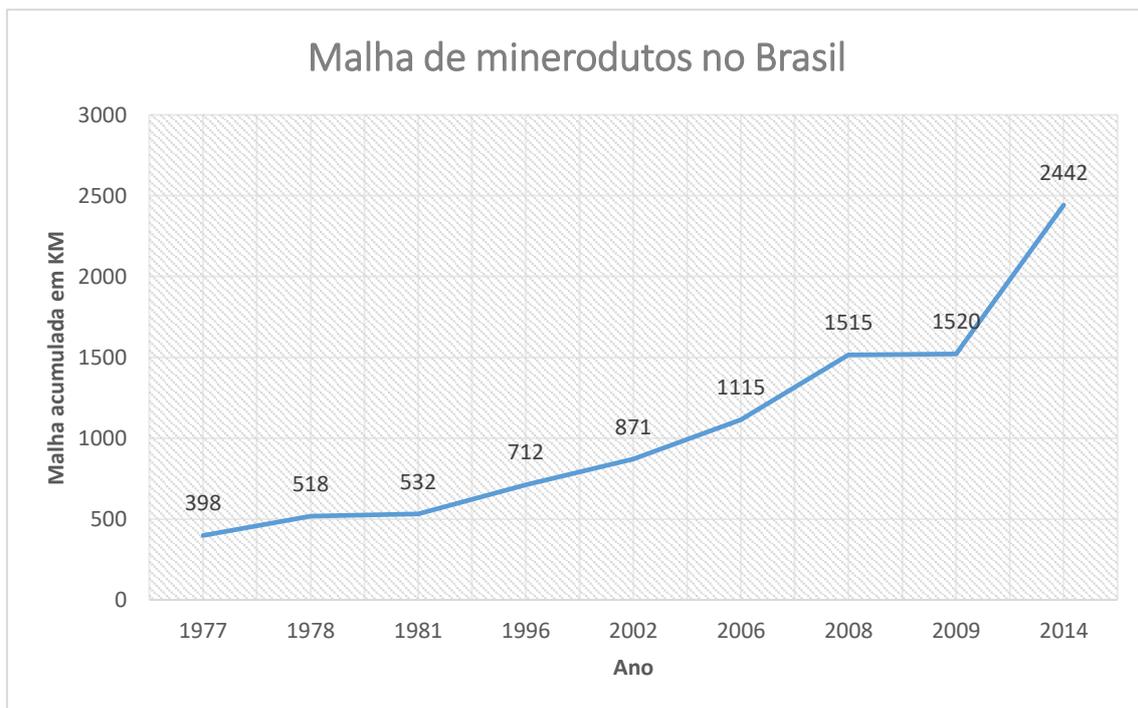


Figura 1: Malha de minerodutos do Brasil em quilômetros (Torres et al., 2015).

Este aumento na utilização de minerodutos para transporte de minérios, apesar do alto custo de implantação, se deve a diversas vantagens como: modal de transporte mais confiável, pois são poucas as interrupções e a influência de fatores meteorológicos; baixo custo operacional; danos e perdas dos produtos são baixos; baixo índice de acidentes (RIBEIRO; FERREIRA, 2002).

Os principais minerodutos brasileiros podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1: Operadores de minerodutos no Brasil (Adaptado de TORRES *et al.*, 2015)

Operador	Minério	Comprimento [Km]	Diâmetros nominais [Pol.]	Início de operação
Hydro	Bauxita	244	24	2006
Anglo	Ferro	522	24/26	2014
Samarco linha #1	Ferro	398	18/20/22	1977
Samarco linha #2	Ferro	400	14/16	2008
Samarco linha #3	Ferro	400	20/22	2014
Mosaic (Fosfertil)	Fosfato	120	9	1978
Imerys RCC	Caulim	159	14	2002
Imerys PPSA	Caulim	180	10	1996
Dow Química	Sal-Gema	51	14	1977

No processo de transporte de polpas de minério, um importante parâmetro é a perda de carga ocasionada pelo atrito do material transportado com as tubulações. Neste sentido, desde os anos 1950, muitos pesquisadores têm tentado criar um modelo físico-matemático para prever a perda de carga em minerodutos (MIEDEMA; RAMSDELL, 2016).

MOODY (1944) apresentou o gráfico de fator de atrito em função do número de Reynolds e a rugosidade relativa da tubulação em seus estudos. Este diagrama que atualmente é conhecido como diagrama de *Moody* é mostrado na Figura 2.

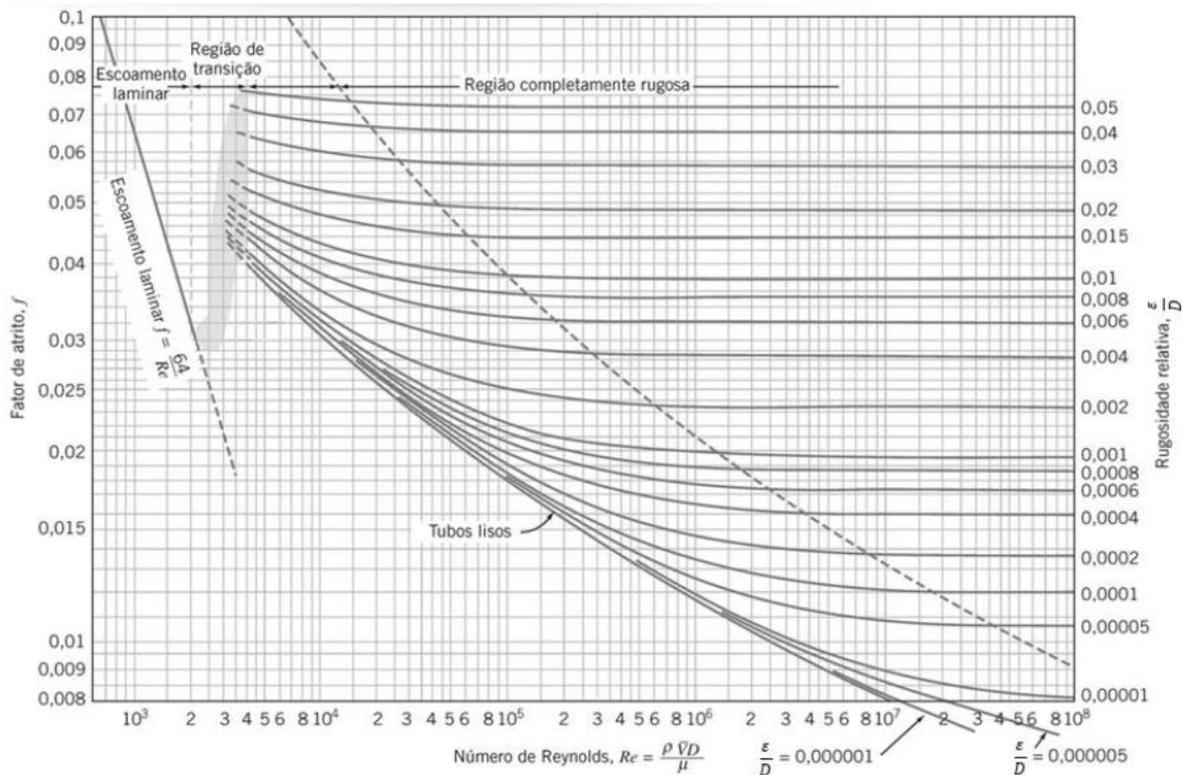


Figura 2: Diagrama de Moody (FOX; MCDONALD'S; PRITCHARD, 2006).

Observando a região de bombeamento em regime turbulento, para as curvas a direita da região de transição na Figura 2, caso da maioria dos minerodutos, à medida em que se aumenta a rugosidade relativa, o fator de atrito aumenta, consequentemente aumentando a perda de carga do sistema, reduzindo, assim, a capacidade de bombeamento. Dessa forma, além da importância do cálculo de perda de carga para a realização do projeto, este parâmetro é monitorado e mitigado durante a operação de minerodutos.

4.2 – Minerodutos da Samarco Mineração S.A.

A Samarco Mineração S.A. possui três minerodutos de, aproximadamente, 400 km de comprimento cada. Tais minerodutos bombeiam a polpa de minério de ferro proveniente do processo de beneficiamento localizado no Estado de Minas Gerais, até os processos de filtragem e pelotização, localizados no Estado do Espírito Santo. A direção geral dos minerodutos é aproximadamente NW-SE, interceptando os seguintes municípios no sentido Minas Gerais - Espírito Santo:

- Ouro Preto, Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado, Urucânia, Abre Campo, Pedra Bonita, Matipó, Santo Antônio do Grama, Santa Margarida, Orizânia, Divino, Luisburgo e Espera Feliz, no estado de Minas Gerais;
- Dolores do Rio Preto, Guaçuí, Alegre, Jerônimo Monteiro, Cachoeiro do Itapemirim, Vargem Alta, Rio Novo do Sul, Itapemirim, Piúma e Anchieta, no estado do Espírito Santo.

Cada mineroduto possui duas estações de bombas (EB's), sendo que a primeira bombeia a polpa na seção 1 e a segunda bomba na seção 2. O processo se inicia nas EB's localizadas na Unidade de Germano, municípios de Mariana/MG e Ouro Preto/MG. Após cerca de 153 quilômetros, a polpa de minério de ferro é bombeada novamente, por EB's instaladas no município de Matipó/MG. Cada mineroduto possui também duas estações de válvulas na seção 2 (EV's), uma localizada no município de Guaçuí/ES e outra no município de Alegre/ES. Estas EV's têm a função de reduzir a pressão estática em alguns pontos da tubulação durante a parada do bombeamento. Nas EV's de Alegre/ES ainda existe uma sequência de *loops* com orifícios cerâmicos que auxiliam no controle das pressões dinâmicas ao longo da linha (BECHTEL, 1977; MINERCONSULT, PSI, 2005; AUSENCO, 2012). O fluxo operacional esquemático do Mineroduto 2 é apresentado na Figura 3.

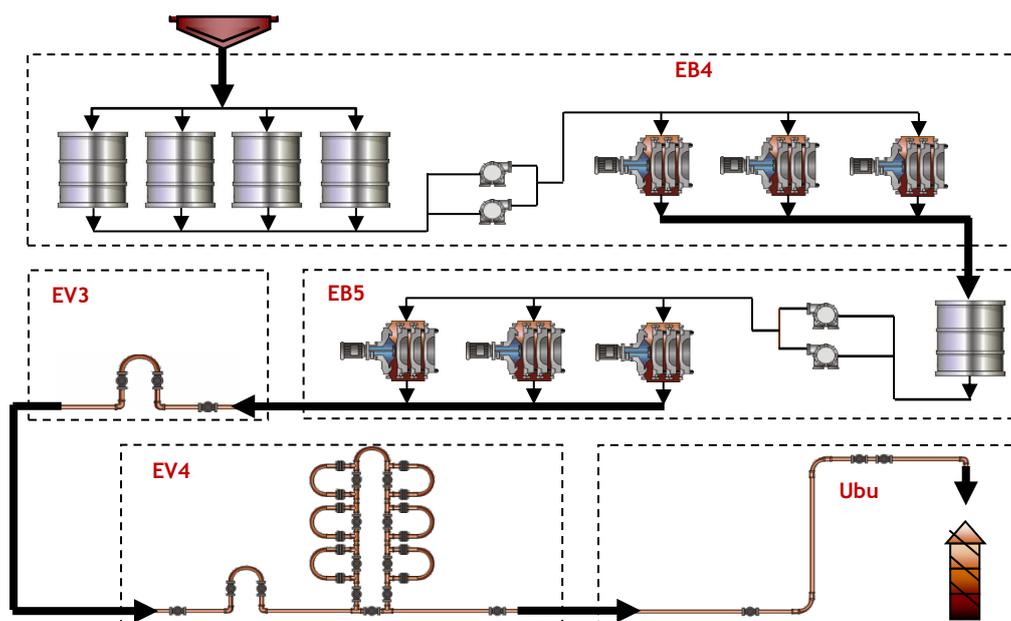


Figura 3: Fluxo operacional esquemático do Mineroduto 2

A polpa transportada constitui-se de uma mistura de minério de ferro e água, com cerca de 70% de sólidos em massa. A velocidade de transporte pode variar entre 1,4 m/s e 2,3 m/s (BECHTEL, 1977; MINERCONSULT, PSI, 2005; AUSENCO, 2012).

A tubulação dos minerodutos da Samarco Mineração S.A. é de aço carbono e atende as especificações da norma API 5LX 60 para o mineroduto 1 e API 5L X70 para os minerodutos 2 e 3, sem revestimento interno. O diâmetro do mineroduto 1 varia entre 18", 20" e 22", o do mineroduto 2 entre 14" e 16" e o do mineroduto 3 entre 20" e 22" (BECHTEL, 1977; MINERCONSULT, PSI, 2005; AUSENCO, 2012).

Os minerodutos foram construídos em uma faixa de servidão com 35 metros de largura e apresentam perfil de elevação de acordo com a Figura 4.

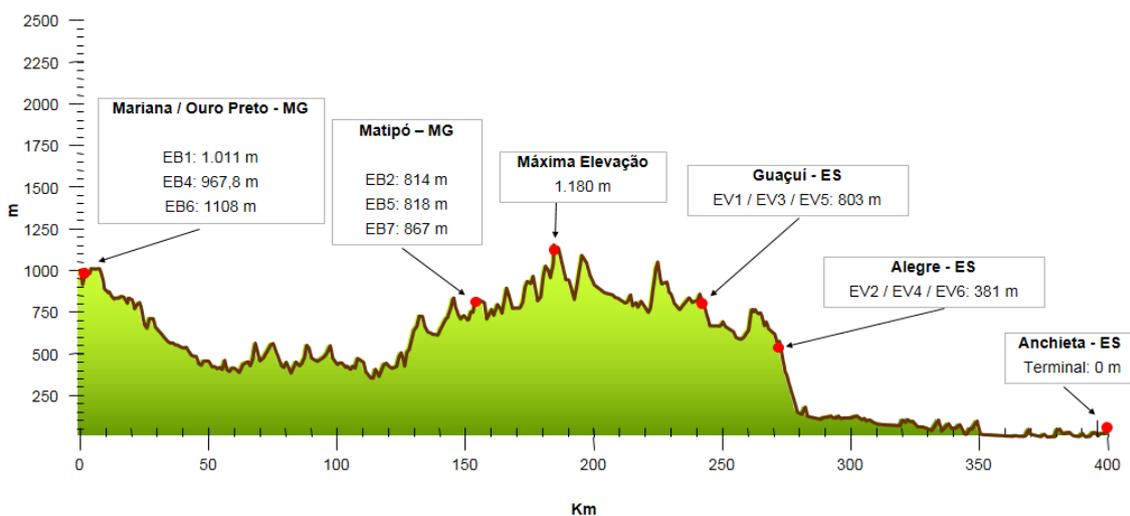


Figura 4: Perfil de elevação dos minerodutos da Samarco (adaptado de AUSENCO, 2012).

O mineroduto 2, foco deste estudo, é composto por duas seções e quatro trechos. O que caracteriza uma seção é a existência de uma estação de bombeamento no início da tubulação. Os trechos podem ser caracterizados como parte dos dutos que podem ser isoladas por válvulas. As seções podem ser subdivididas em um ou mais trechos. A seguir são apresentadas as seções e trechos do Mineroduto 2.

- Seção1:
 - EB4-EB5 (153Km).
- Seção 2:
 - EB5-EV3 (88Km).
 - EV3-EV4 (32Km).
 - EV4-UBU (125Km).

4.3 – Corrosão em minerodutos

A corrosão em minerodutos, normalmente, é um processo eletroquímico com um mecanismo dependente do tempo, assim como do ambiente dentro da tubulação ou nas proximidades da mesma. A corrosão normalmente aparece de forma generalizada ou localizada nos dutos, podendo ser percebida nas superfícies interna e externa (COSHAM; HOPKINS, 2004). Corrosão externa pode ser induzida por microrganismos (LIU *et al.*, 2021), gerada por correntes parasitas (PENG *et al.*, 2020), ou induzida por outros fatores agressivos (LIU *et al.*, 2019). A corrosão de forma generalizada interna, pode ser observada pela redução da espessura da tubulação do mineroduto, ao longo do tempo de operação, devido a associação desta com a erosão. A corrosão de forma localizada externa pode se desenvolver em momentos de ineficiência do sistema de proteção catódica associados com a existência de falhas do revestimento externo do duto. A corrosão de forma localizada interna pode se desenvolver também pela ação de microrganismos.

4.3.1 – Corrosão interna

Durante a fase operacional de um mineroduto, em termos de superfície interna, a corrosão pode ser analisada sob dois pontos de vista, de forma independente, para os processos corrosivos que possam se desenvolver durante o período de hibernação (sem fluxo), ou associada a processos erosivos, situação comum durante operação com polpa (com fluxo).

4.3.1.1 – Erosão-Corrosão

Durante a operação de minerodutos, a associação de processos corrosivos e erosivos (erosão-corrosão) causam maior dano às tubulações. A erosão-

corrosão é um complexo processo sinérgico envolvendo um simples conceito de interação da erosão, com a remoção mecânica do material por partículas erodentes, e a corrosão, com a perda de material da superfície do duto por um processo eletroquímico (GUILLEN *et al*, 2017).

Corrosão e erosão são aspectos que têm que ser considerados no projeto de minerodutos. A água que será utilizada e o tamanho das partículas de sólidos têm que ser estudadas para estimativa das taxas de corrosão e erosão (BELTRÁN *et al*, 2016).

As propriedades e características das partículas sólidas, como tamanho, forma, densidade e dureza, têm influência significativa no desgaste erosivo da tubulação. A influência de cada propriedade das partículas na erosão deve ser estudada separadamente. SINHA *et al* (2017) compilou diversos estudos já realizados nesta área.

A perda de massa total pelo sinergismo da erosão-corrosão é maior do que a soma das perdas de massa analisadas separadamente (LU; LUO, 2006). Para MALKA *et al* (2006), o mecanismo dominante neste sinergismo é o aumento da erosão pela corrosão nas condições de seu estudo, mesmo resultado encontrado por Islam *et al* (2013) que além de avaliar os efeitos sinérgicos, também avaliou os aumentos das taxas devido ao aumento da velocidade de fluxo.

Segundo TANG *et al* (2008), geralmente, um fluido em movimento acentua o comportamento anódico do aço ao diluir, remover e até mesmo danificar o filme de óxido formado na superfície interna do tubo, sendo este efeito potencializado, no caso de minerodutos, devido ao impacto das partículas da polpa que promove maior degradação do filme de óxido.

ELEMUREN *et al* (2018), avaliou em seus estudos a influência da velocidade do fluxo nos efeitos sinérgicos entre erosão e corrosão, determinando que essa sinergia é dominante para velocidades mais baixas de fluxo, enquanto o processo erosivo é predominante para as velocidades mais altas.

A corrosão é geralmente viabilizada por oxigênio. Para um pH neutro ou alcalino, como o caso dos minerodutos, a reação catódica predominante é a redução do

oxigênio. A água totalmente oxigenada contém 8 ppm de oxigênio, mas a quantidade real irá variar com a pressão atmosférica, teor de sal solúvel da água e temperatura. A taxa de corrosão é controlada pelo transporte de massa de oxigênio para a superfície (BROWN, HEYWOOD, 1991).

A taxa de corrosão será máxima no início da tubulação, mas reduzirá ao longo do duto conforme o oxigênio for sendo consumido, este efeito pode ser observado na Figura 5 (BROWN, HEYWOOD, 1991).

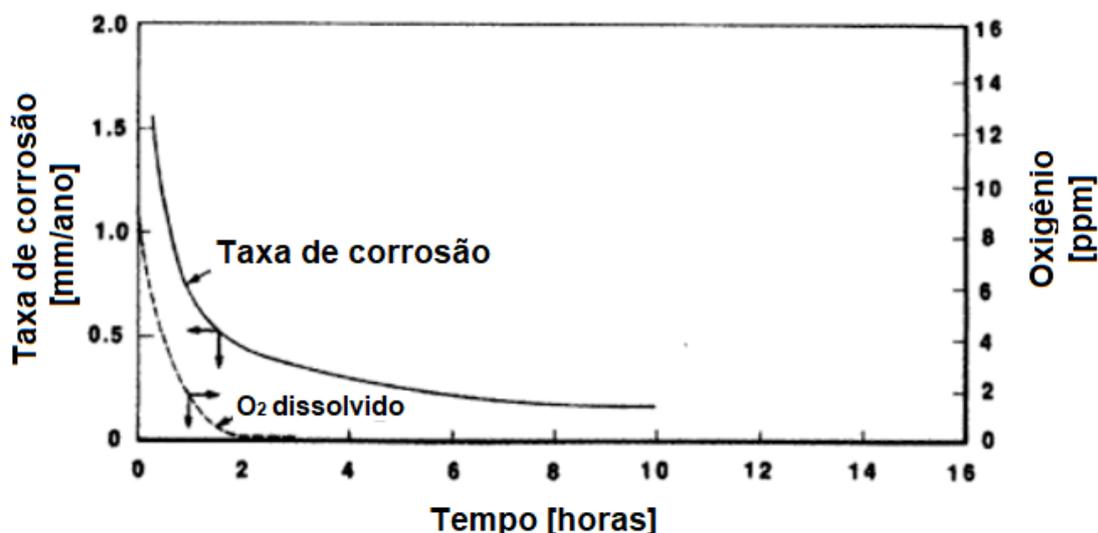


Figura 5: Efeito do oxigênio dissolvido na taxa de corrosão na polpa de minério de ferro (adaptado de GANDHI *et al* 1975), conforme citado por (BROWN, HEYWOOD, 1991)

Para mitigar a corrosão e seus efeitos durante a operação de minerodutos, o pH da polpa de minério pode ser ajustado, sendo elevado para atingir a zona de passivação de acordo com o diagrama de *Pourbaix* (E_h .versus pH). Este diagrama, para a situação da Samarco, está apresentado na Figura 6, onde água de selagem se refere a água utilizada para selar mecanicamente as bombas.

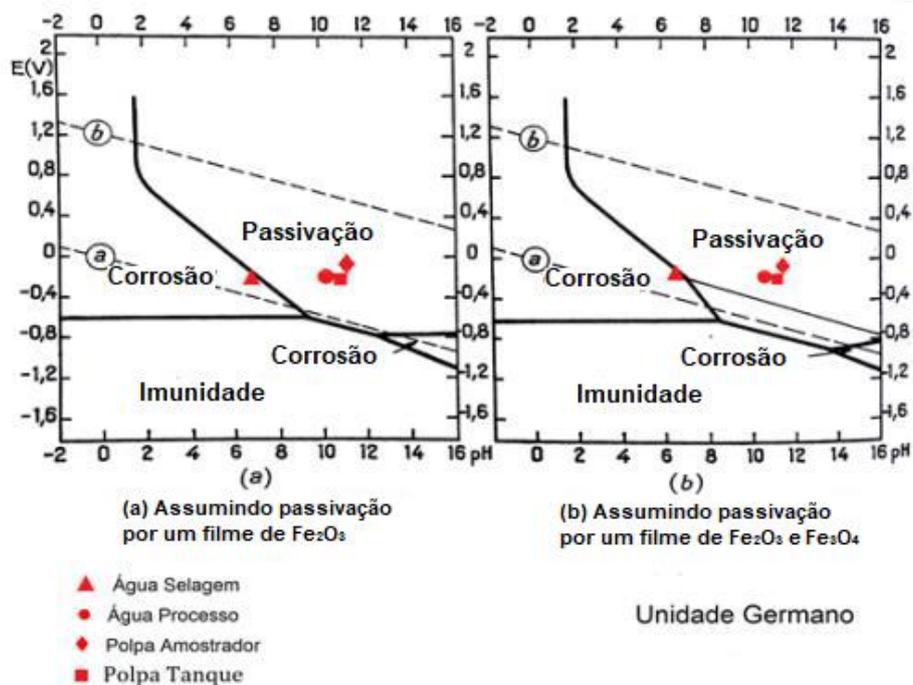


Figura 6: Diagrama Eh versus pH para polpa da Samarco Mineração S.A. (adaptado de MATTIOLI, 2016)

Estudos realizados por GANDHI *et al* (1975), conforme citado por (BROWN, HEYWOOD, 1991), mostram que ocorre a redução da taxa de corrosão com o aumento do pH da polpa, conforme pode ser observado na Figura 7.

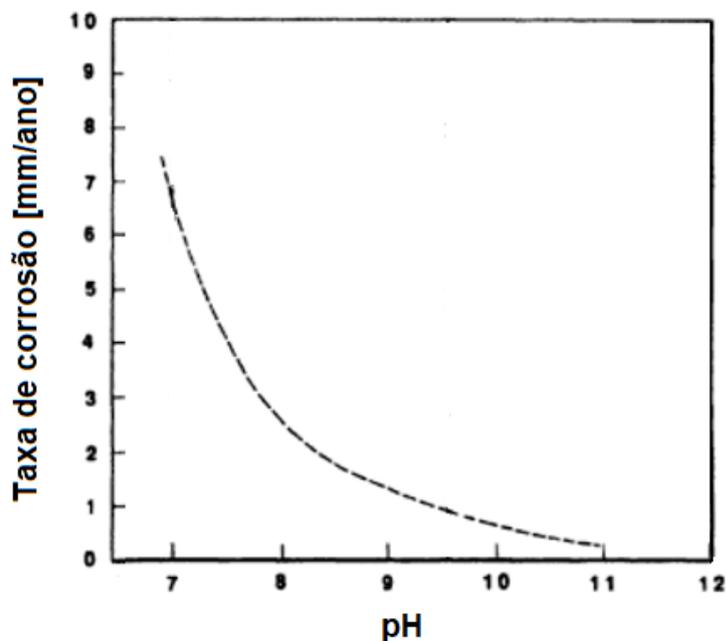


Figura 7: O efeito do pH na taxa de corrosão do duto em presença de concentrados de minério de ferro. (Adaptado de GANDHI *et al* 1975), conforme citado por (BROWN, HEYWOOD, 1991)

Na Samarco é feita a adição de hidróxido de sódio para elevação do pH da polpa. Outras maneiras de lidar com os problemas do processo erosivo-corrosivo é projetando um duto considerando sobre-espessura de parede ou aplicando revestimento interno (BELTRÁN *et al*, 2016; GONZALEZ-FRANCHI *et al*, 2015).

4.3.1.2 – Corrosão Induzida Microbiologicamente

A Corrosão Induzida Microbiologicamente (CIM) se refere a corrosão causada pela atividade de microrganismos (LIA *et al* 2018). CIM é responsável por cerca de 20% a 40% de todas as falhas ocorridas por corrosão em dutos (YIN *et al* 2018, MARCIALES *et al* 2019, LIA *et al* 2018).

A CIM pode ocorrer em diversos ambientes e não se limita à corrosão aquosa em condições submersas, mas também ocorre em atmosferas úmidas (COETSER, CLOETE 2005).

Apesar de existirem casos atribuídos a corrosão pela ação de fungos e algas, o mais frequente é a corrosão causada por ação bacteriana (GENTIL 2003). Estas bactérias podem se desenvolver em meios aeróbicos ou anaeróbicos, apesar de existirem bactérias que podem crescer em ambos os ambientes, devido a capacidade que têm de mudar seu metabolismo. (HERRO, PORT, 1993).

Existem vários tipos de bactérias que podem causar corrosão (MARCIALES *et al* 2019). Contudo para o caso de minerodutos, alguns estudos mostram que as bactérias redutoras de sulfato (BRS) e as ferrobactérias causam maior preocupação (GERÇÓSSIMO *et al* 2011, LUTTERBACH *et al* 2011, RINGAS 2007, MATTIOLI 2016).

Segundo RINGAS (2007) quando a superfície do metal é exposta em ambiente aquoso, quase que imediatamente se inicia a formação de uma camada inorgânica. Após um período, matérias orgânicas começam a aderir na superfície e aumenta a espessura da camada. Bactérias aeróbicas começam a colonizar a camada, que agora passa a ser chamada de biofilme. Assim que o biofilme atinge uma determinada espessura, as BRS começam a colonizar o biofilme, se instalando entre este e a superfície metálica. Esta condição favorece o desenvolvimento das BRS (anaeróbicas), pois o oxigênio contido na água é consumido no biofilme pelas espécies aeróbicas, mantendo as condições

anaeróbicas na região das BRS. A medida que as BRS crescem, ocorre a formação de tubérculos que consistem em produtos de corrosão e biofilme, que protegem e auxiliam o crescimento das BRS. Em seguida, a corrosão passa a se desenvolver debaixo do tubérculo, na forma de pites, que só podem ser vistos com a remoção dos tubérculos.

Para GENTIL (2003), as ferrobactérias, aeróbicas, aceleram a oxidação de íons Fe^{2+} dissolvidos na água para íons Fe^{3+} que formam, $Fe_2O_3.H_2O$ ou $Fe(OH)_3$ que são insolúveis. Tais óxidos hidratados ou hidróxidos insolúveis podem ficar aderidos em forma de tubérculos. Os tubérculos podem causar diminuição da capacidade de vazão da tubulação, ser prejudicial as trocas térmicas, favorecer a corrosão por aeração diferencial e gerar condições favoráveis para o desenvolvimento das BRS.

Para mitigar a ação das bactérias no processo corrosivo dos dutos, podem ser utilizados biocidas e inibidores de corrosão. Manter uma rotina de limpeza com a passagem de *pigs* remove as incrustações (tubérculos) desfavorecendo a instalação e desenvolvimento das bactérias (Gentil, 2003).

Para este estudo foi descartada a ocorrência deste tipo de corrosão. MATTIOLI (2016) concluiu em seus estudos que não há evidências de ataque por corrosão microbiológica no interior do mineroduto.

4.3.1.3 – Paralisação temporária de minerodutos

Durante os períodos de paralisação temporária de um mineroduto, sejam estes por razões econômicas, legais ou estratégicas da empresa ou então durante o pré-comissionamento (período entre a construção do duto e início de operação), as preocupações se concentram nos processos corrosivos. Para minimizar a corrosão interna nos dutos parados podem ser aplicadas duas metodologias de hibernação: o preenchimento do duto com água tratada; ou preenchimento do duto com material inerte, normalmente nitrogênio gasoso (LINS *et al.*, 2016; MATTIOLI, 2016; TORRES *et al.*, 2017).

Na hibernação com água, para o tratamento da mesma, podem ser utilizados inibidores de corrosão e biocidas. LINS *et al* (2016) compararam algumas soluções para hibernação de um mineroduto durante o período de pré-

comissionamento, chegando à conclusão de que a solução composta pela água de rio e glutaraldeído gerou a maior resistência a corrosão dos aços API 5L X70, tendo assim maior eficiência para a hibernação.

Na Samarco Mineração S.A., o processo aplicado consiste na elevação do pH da água a ser bombeada para um valor médio de 11,4 com adição de hidróxido de sódio e a remoção do oxigênio dissolvido na água com a adição de bissulfito de sódio catalisado com cobalto.

Na hibernação com gás inerte ou “inertização”, é realizada a diminuição dos níveis de oxigênio e de umidade no interior do duto. A Samarco Mineração S.A. aplicou esta técnica de forma pioneira no Mineroduto 2, pois não existem registros da utilização deste tipo de processo em minerodutos.

O processo consiste no enchimento do duto com nitrogênio gasoso que pode ser produzido no local por uma unidade geradora de nitrogênio ou fornecido por caminhões. No caso da produção local, o ar atmosférico é separado usando o método de separação por membranas.

Na Samarco Mineração S.A., a norma ABNT NBR 15280-2 foi utilizada como referência para o processo de inertização, a mesma não é específica para minerodutos, mas serve como referência de boas práticas. De acordo com esta norma, o duto é considerado inerte quando a pressão remanescente de nitrogênio no interior da tubulação é maior que 0,5 bar e a temperatura de ponto de orvalho de 0°C a 1 atm é atingida. É aceita a utilização de nitrogênio com uma concentração mínima de 95%.

Assumindo que a pressão do gás de inertização seja constante no interior da tubulação, a temperatura de ponto de orvalho é a temperatura para a qual o gás deve ser resfriado afim de que seja alcançada a saturação máxima de vapor de água na mistura, podendo, a partir deste ponto, iniciar o processo de condensação do vapor de água, que é um sério problema, pois favorece os processos corrosivos no interior do duto. (BAGHBAN et al, 2016).

Segundo LAWRENCE (2005), existe uma relação entre a temperatura de ponto de orvalho e a umidade relativa do gás, conforme Figura 8. Observa-se para umidades relativas maiores que 50% que esta relação se aproxima da linear,

onde t_d é a temperatura de ponto de orvalho, RH é a umidade relativa e t é a temperatura de bulbo seco do gás.

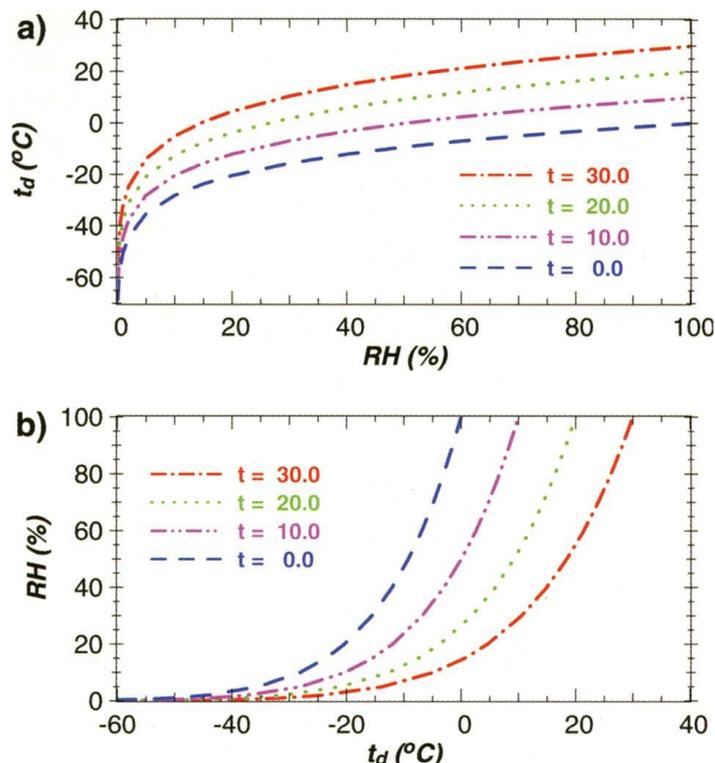


Figura 8: Relação entre temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa para uma selecionada temperatura de bulbo seco do gás (t): a) temperatura (t_d) em função da umidade relativa e b) umidade relativa em função da temperatura (t_d).

Segundo BERNING (2012), a temperatura de ponto de orvalho pode ser representada em função da pressão de vapor da água, propondo um modelo que está graficamente apresentado na Figura 9.

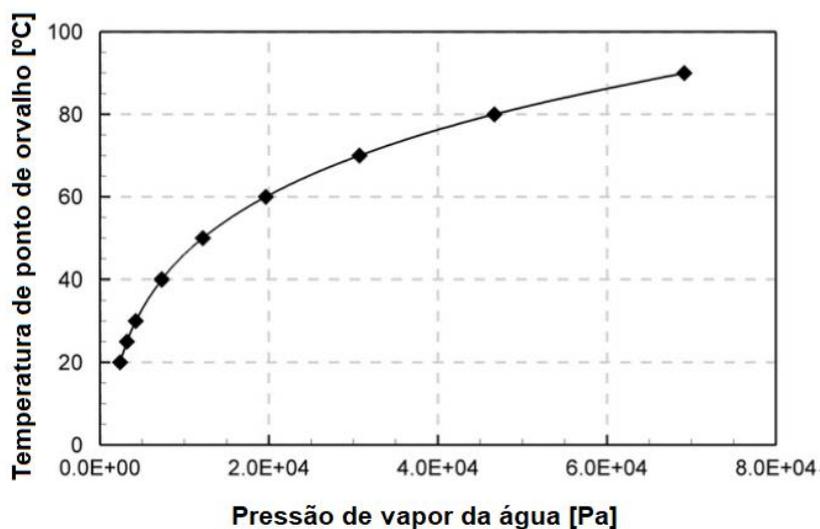


Figura 9: Temperatura de ponto de orvalho em função da pressão de vapor da água

4.4 – Inspeção de dutos com pigs

Para uma verificação completa da condição do duto é necessária a aquisição de informações das superfícies interna e externa do duto, da espessura da parede, posição das soldas circunferenciais e longitudinais. Para isso, o acesso irrestrito ao duto seria necessário gerando custo elevado e perda de tempo. Para suprir esta necessidade, são utilizados dispositivos montados com equipamentos de END (Ensaio Não Destrutivo) equipados com baterias que se movem no interior dos dutos, estes são conhecidos como pigs instrumentados (WALKER, 2010).

Para detecção de defeitos de corrosão, as técnicas mais aplicadas são o ultrassom e o uso de sensores magnéticos, MFL (*Magnetic Flux Leakage*). A Figura 10 mostra um pig lançado nos minerodutos da Samarco Mineração S.A com estas ferramentas instaladas.



Figura 10: Pig instrumentado com ferramentas de ultrassom e MFL.

No caso do ultrassom, para a medição da espessura da parede, um transdutor ultrassônico é usado para gerar uma onda sonora no cabeçote, que é então transmitida através de um acoplante líquido para a superfície da peça. O transdutor registra as reflexões (ecos) causadas pelas superfícies adjacente e remota do material a ser testado, no caso de tubos, as suas superfícies internas e externas (WALKER, 2010). A Figura 11 ilustra o funcionamento do ultrassom para medição de espessura.

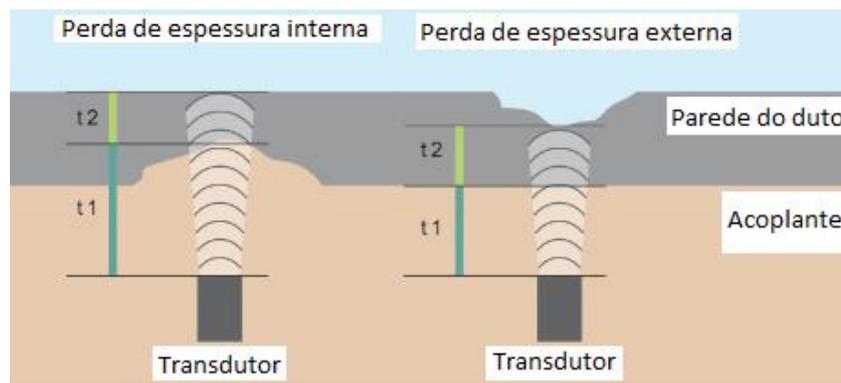


Figura 11: Funcionamento do ultrassom para medição de espessura (Adaptado de WALKER, 2010)

A diferença nos tempos de chegada destas reflexões está diretamente relacionada com a distância entre o transdutor e as superfícies da peça de teste. Assim, com base nos reflexos da onda ultrassônica, a espessura do material pode ser avaliada.

O teste MFL é largamente utilizado para detecção de corrosão em estruturas de aço. O princípio básico do teste envolve magnetizar um objeto de metal ferroso até o nível de saturação com um poderoso campo magnético. Onde o objeto não tem falhas, o fluxo magnético irá permanecer intacto, onde há perda interna ou externa de metal, ocorrem as fugas de fluxo magnético a partir do objeto. A Figura 12 ilustra estas situações.

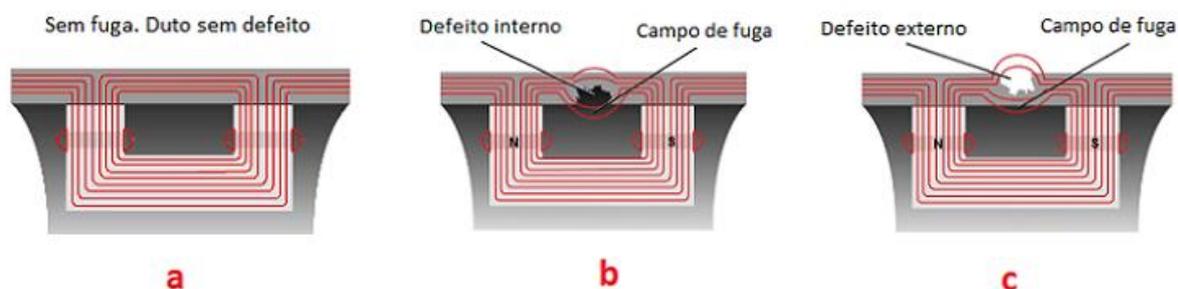


Figura 12: Comportamento dos campos magnéticos. a) sem fuga de campo, duto sem defeito. b e c) com fuga de campo, duto com defeito interno ou externo (Adaptado de WALKER, 2010).

5 – Metodologia

O mineroduto 2 da Samarco Mineração S.A. foi inertizado com gás nitrogênio, no ano de 2015, sendo utilizada como referência a norma ABNT NBR 15280-2. Análises químicas, mineralógicas e microestruturais foram conduzidas em amostras de materiais removidos do interior do duto por pigs de espuma, no ano de 2017, a fim de identificar e caracterizar o produto de corrosão gerado. Em 2019, o mineroduto foi reativado e posteriormente inspecionado com pigs instrumentados, tecnologias ultrassom e MFL (*Magnetic Flux Leakage*).

A metodologia empregada para a parte experimental desta dissertação de mestrado é apresentada a seguir.

5.1 – Inertização do Mineroduto

O duto foi inertizado de acordo com as cinco etapas descritas a seguir:

Etapa 1 – Limpeza

Inicialmente, água sem tratamento foi bombeada através do mineroduto para remover a polpa de minério de ferro que estava dentro da tubulação. Na sequência foram lançados PIGs de limpeza para fornecer maior energia mecânica para remoção de sedimentos do interior da tubulação. Estes sedimentos não são removidos pelo fluxo de água nas condições de bombeamento existentes. Os PIG's foram lançados com água. A Figura 13 mostra um pig usado no processo de limpeza.



Figura 13: PIG usado para remoção de material sedimentado.

Etapa 2 – Desaguamento

O desaguamento do duto foi realizado utilizando PIGs, que foram lançados com ar comprimido. Nesta etapa, o objetivo é remover a água do duto. Os PIGs foram dos mesmos modelos usados na etapa de limpeza. Os equipamentos utilizados nesta etapa e na subsequente foram basicamente compressores e geradores de energia.

Etapa 3 – Secagem

Depois do processo de desaguamento o duto é seco através do lançamento de PIGs de espuma utilizando ar comprimido e seco. O duto é considerado seco quando o nível de impregnação no diâmetro externo do PIG for menor que 25,4 mm (1 pol.). A Figura 14 mostra um PIG de espuma partido que ainda não atingiu a especificação de nível de impregnação com água.



Figura 14:PIG de espuma com nível de impregnação inadequado.

Etapa 4 – Inertização

Esta etapa do processo é a injeção do nitrogênio na tubulação. O nitrogênio foi produzido no local pelas unidades geradoras e um secador de ar, conforme estabelecido na norma ABNT NBR 15280-2.

Etapa 5 – Monitoramento

Depois de realizada a inertização, o monitoramento dos parâmetros foi realizado trimestralmente, durante um ano, em pontos localizados nas extremidades de cada tramo do duto. Foram medidos três parâmetros, pressão residual do nitrogênio, nível de oxigênio no interior do duto e temperatura de ponto de orvalho, utilizando respectivamente os instrumentos, manômetro analógico,

oxímetro e termo higrômetro. Neste monitoramento, é esperado que os resultados estejam aderentes aos requisitos da inertização do duto definidos na norma ABNT NBR 15280-2. De acordo com esta norma, o duto é considerado inerte quando a pressão remanescente de nitrogênio no interior da tubulação é maior que 0,5 bar e a temperatura de ponto de orvalho de 0°C a 1 atm é atingida. É aceita a utilização de nitrogênio com uma concentração mínima de 95%.

5.2 – Análise de material arrastado do interior do mineroduto pelo pig.

Foi coletado material arrastado do interior da tubulação através da passagem de pig's no trecho compreendido entre as estações de bombeamento EB4 e EB5. Isso ocorreu durante a fase de secagem do tramo para realização da recarga de nitrogênio após a etapa de monitoramento da inertização.

Este material foi analisado na UFMG, pelo Professor Emérito, Paulo Roberto Gomes Brandão, Ph.D., após passar por análises granulométrica e química na Samarco Mineração S.A. A amostra global apresentava granulometria entre 0,85 mm e 0,038 mm e 9 frações granulométricas correspondentes a esta amostra global também foram analisadas.

A distribuição granulométrica foi expressa em termos de porcentagem de massa retida nas peneiras selecionadas, cuja unidade de referência é o mesh (#), que representa o número de aberturas na malha da peneira por polegada linear. Foi utilizado o peneiramento com vibração mecânica e as peneiras utilizadas nos testes foram: 20# (0,85mm), 28# (0,60mm), 35# (0,42mm), 48# (0,30mm), 65# (0,21mm), 100# (0,15mm), 150# (0,106mm) e 400# (0,038mm).

A análise química foi realizada por via úmida, através da técnica de dicromatometria, para Fe₂O₃, FeO e por análise por espectroscopia de emissão atômica em plasma de acoplamento indutivo (ICP-AES) para CaO, SiO₂, Al₂O₃, P, e MnO₂. O espectrômetro de emissão atômica utilizado é da marca Ciros, modelo CCD. Os teores de ferro foram convertidos de Fe para Fe₂O₃.

A quantificação da perda por calcinação (PPC), também chamada de perda ao fogo, consistiu na calcinação da amostra em uma estufa, para determinar a quantidade de matéria volátil presente na mesma, como, por exemplo, umidade e matéria orgânica, que são removidas por ação da alta temperatura.

Várias das frações granulométricas apresentavam baixa quantidade de massa e/ou correspondiam a um percentual baixo do conjunto das frações. Desta maneira, para realização das análises detalhadas de caracterização, frações vizinhas minoritárias foram agrupadas, de modo que as novas frações tivessem percentual de massa entre 15 a 30% do total. Com isto, o número total ficou em 4 frações granulométricas, mais a amostra global, num total de 5 amostras para caracterização.

Para os estudos de microscopia, foram preparadas seções polidas das duas frações granulométricas de maior tamanho de partículas. Foram utilizadas apenas pastas de diamante na etapa de polimento com abrasivo solto.

As amostras pulverizadas em moinho de panela foram submetidas às análises por difração de raios X e por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Foi utilizado o difratômetro de raios X para amostras em pó da marca Philips (Panalytical), com sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40 e goniômetro PW 3020/00. O espectrômetro de fluorescência de raios X utilizado é da marca Philips (Panalytical), modelo PW 2400.

Os estudos microestruturais foram efetuados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dual, com emissão de efeito de campo (FEG), marca FEI, modelo Dual-FIB Quanta 3D, com espectrômetro de raios-X por dispersão de energia (EDS) marca BRUKER, modelo Nano X Flash Detector 5010, software Esprit. Foram utilizadas imagens de elétrons retroespalhados (IER) e raramente de imagens de elétrons secundários (IES). Uma película muito fina de carbono foi aplicada para tornar as amostras condutoras.

5.3 – Inspeção com pig instrumentado do mineroduto e avaliação das corrosões

Foi realizada a inspeção com pig instrumentado em todo o mineroduto 2 nos anos de 2019 e 2020. As ferramentas de inspeção utilizadas foram o ultrassom e o MFL. Nestas inspeções foram identificados pontos de corrosão interna que subsidiaram as análises deste trabalho.

As regiões corroídas ao longo do duto foram avaliadas quanto a sua distribuição. Sendo avaliada a relação destas distribuições com o perfil de altimetria da

tubulação. Para realizar os cálculos das taxas de corrosão foram utilizadas as espessuras de projeto e as espessuras medidas pelos pigs.

Apesar do mineroduto ter ficado inertizado desde 2015 e neste período os processos corrosivos terem atuação principal, também foi avaliado o processo erosivo, tendo em vista que o duto operou por 7 anos antes de ser paralisado.

Normalmente, a erosão afeta mais pronunciadamente a parte inferior da tubulação, contudo ocorre em toda a circunferência do tubo. As inspeções com pig forneceram as medidas de espessuras mínimas por tubo para toda a circunferência e para quatro quartos isoladamente: Topo entre 10:30 e 01:30 horas; Direita entre 01:30 e 04:30 horas; Esquerda entre 07:30 e 10:30 horas e Fundo entre 04:30 e 07:30 horas. Foi utilizado o valor mais frequente para definir a espessura mínima. A definição das posições horárias está de acordo com as apresentadas em um relógio analógico, conforme ilustrado na Figura 15.

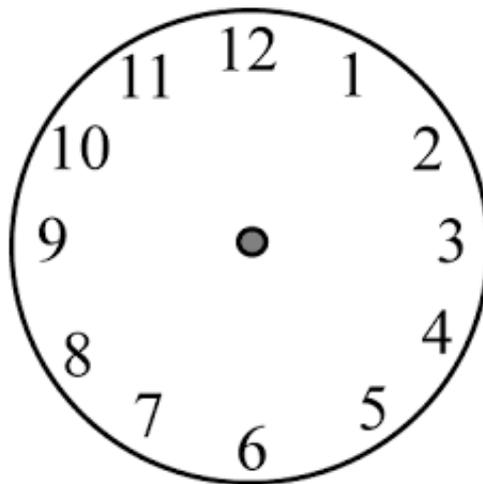


Figura 15: Ilustração de um relógio analógico

Para a definição da espessura mínima de parede foram excluídos os ruídos de medição, áreas termicamente afetadas das soldas e anomalias menores que 2 metros de comprimento.

6 – Resultados e Discussões

6.1 – Inertização do Mineroduto

Como o processo de inertização de um mineroduto era algo inédito, esperava-se que ocorressem problemas operacionais durante a realização deste.

A etapa de limpeza ocorreu sem maiores problemas, sendo o duto considerado limpo quando a quantidade de material removido de seu interior foi menor que 50 g/km.

A etapa de desaguamento foi a mais laboriosa. Durante as operações com pig de esvaziamento do trecho de EB5-EV3, por inúmeras vezes o processo teve que ser paralisado devido ao aumento considerável de pressão que ultrapassou os limites previstos para o projeto de inertização. Foi necessário realizar o enchimento da tubulação algumas vezes, como medida de remover os bolsões de ar que estavam se formando à frente do pig, assim como foram realizadas trepanações no duto para amenizar a formações destes bolsões de ar. Foram testados diferentes tipos de pigs. Constatou-se que as condições para inertização de um mineroduto que já havia operado a 7 anos atrás, diferem consideravelmente das condições de um duto novo que nunca foi operado. Em um duto novo, a rugosidade da superfície interna é menor, o que provoca um desgaste menor dos pigs. Apesar de terem sido lançados pigs de limpeza e os dutos serem considerados limpos, existe muita incerteza quanto à remoção completa do minério de ferro do interior da tubulação e isso também pode ter contribuído para acelerar o desgaste dos pigs. Uma vez que o desgaste dos pigs é considerável, a tendência é que o ar comprimido gere bolsões de ar à frente do pig, dificultando seu deslocamento.

Na etapa de secagem, foram utilizadas centenas de pigs de espuma, sendo o duto considerado seco quando o grau de impregnação dos pigs foi menor que uma polegada. Os pigs foram lançados em baterias com diversos pigs operando ao mesmo tempo.

Na etapa de injeção de nitrogênio, o processo foi considerado finalizado antes do atingimento do parâmetro temperatura de ponto de orvalho, na maioria dos

pontos de medição, conforme pode ser visto na Figura 16 para os valores medidos na data de 06/06/2015.

No período de monitoramento foram realizadas quatro coletas de dados. Com relação as pressões no interior do duto, todas ficaram acima de 0,5 bar durante todo o processo de inertização. Com relação a temperatura de ponto de orvalho, na maioria dos pontos de monitoramento, foi observada tendência de aumento, conforme pode ser observado na Figura 16. Dessa forma, foi identificada a necessidade de recarga do nitrogênio devido ao aumento da temperatura de ponto de orvalho.

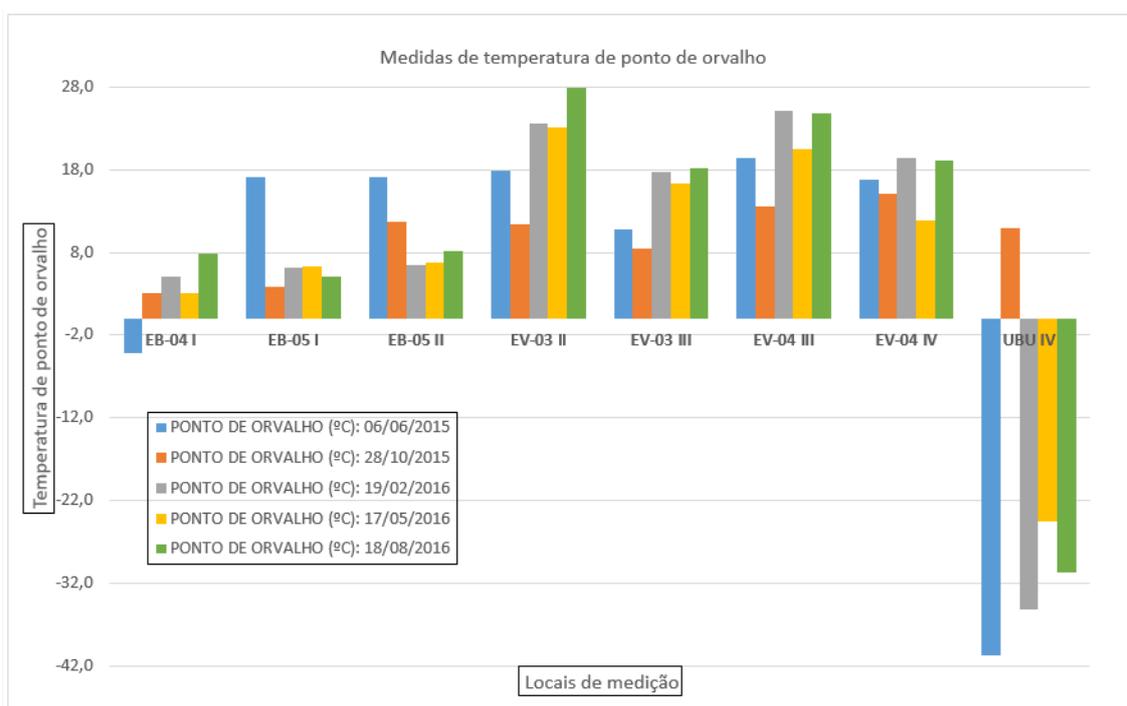


Figura 16: Medidas de temperatura de ponto de orvalho nos pontos de monitoramento.

A Figura 17 apresenta os valores percentuais de oxigênio nos pontos de monitoramento.

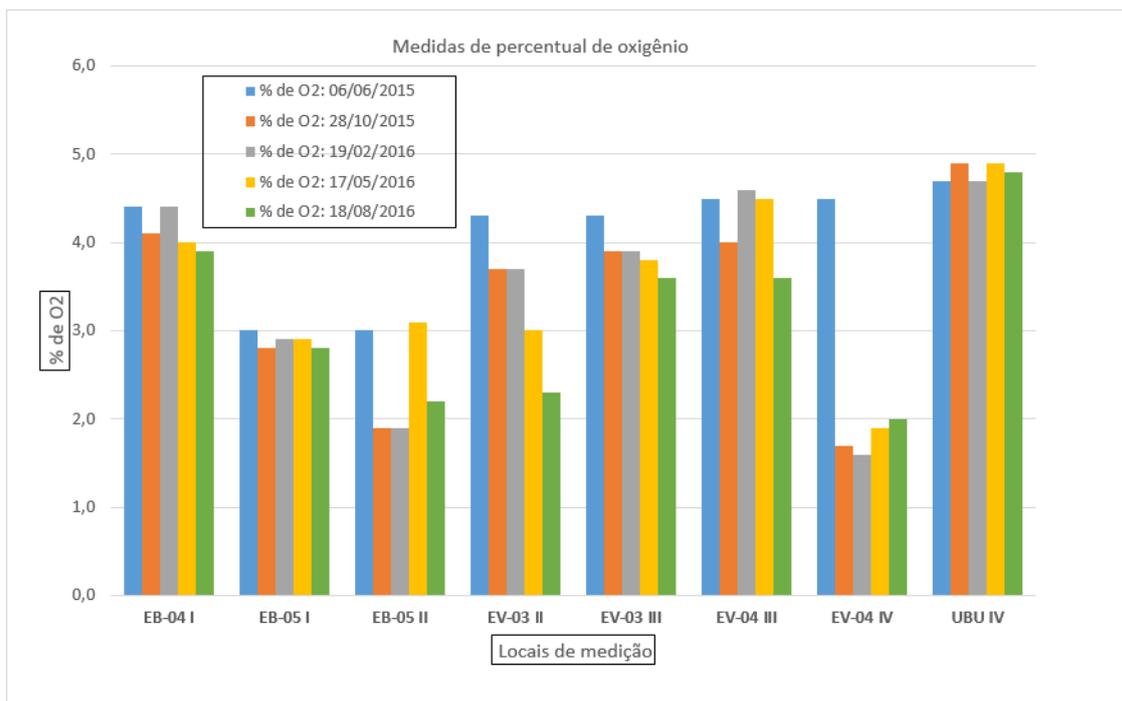


Figura 17: Medidas de percentual de oxigênio nos pontos de monitoramento.

A recarga de nitrogênio foi realizada em 2017, naquele momento foram lançados pigs de espuma para secagem dos trechos, estes pigs arrastaram o material que foi caracterizado nesta dissertação. As Figuras 18 e 19 mostram respectivamente, imagens de um pig de espuma após a corrida e o material removido do interior da tubulação.



Figura 18: Pigs de espuma lançados para a secagem do duto durante a recarga do nitrogênio.



Figura 19: Material coletado durante a passagem dos pigs de espuma durante recarga do nitrogênio.

Após o término do processo de secagem e recarga do nitrogênio no mineroduto os parâmetros de inertização foram completamente atingidos, como pode ser verificado na tabela 2. Onde é possível verificar que a pressão remanescente de nitrogênio no interior da tubulação é maior que 0,5 bar, a temperatura de ponto de orvalho é menor 0°C a 1 atm e o teor de oxigênio é menor ou igual a 5%.

Tabela 2: Valores das medições – entrega do duto após secagem e recarga de nitrogênio

LOCAL:	TRAMO:	PRESSÃO (bar):	OXIGÊNIO RESIDUAL (%)	TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO (°c):
EB-04	I	1,05	4,7	-11,3
EB-05	I	1,05	4,7	-40,8
EB-05	II	1,30	3,0	-28,4
EV-03	II	1,10	4,4	-33,5
EV-03	III	1,40	4,5	-43,1
EV-04	III	1,55	5,0	-14,5
EV-04	IV	1,05	5,0	-12,6
UBU	IV	1,10	4,9	-25,4

Apesar dos conceitos estabelecidos na norma ABNT NBR 15280-2 ser referência adequada para inertização de minerodutos, observou-se que para atingir o objetivo de proteção contra a corrosão em longos períodos de parada operacional, alguns itens deveriam ser melhor avaliados, conforme a seguir:

- ✓ Quantidade de pontos de monitoramento;
- ✓ Localização ideal dos pontos de monitoramento;
- ✓ Estabelecimento de critérios de aceitação que envolvam a medição de umidade no interior do duto.

Para este trabalho tais itens listados não foram avaliados, mas foi observado que era possível atender os parâmetros de inertização nos pontos de monitoramento, mas devido a longa distância entre estes pontos, bolsões de umidade podem ter ficado retidos na tubulação e assim com pouco tempo os parâmetros de aceitação não foram alcançados nos pontos de medição.

6.2 – Análise de material arrastado do interior do mineroduto pelo pig

6.2.1 – Análise química e mineralógica

Os materiais removidos do interior do mineroduto foram caracterizados, os resultados da análise granulométrica são apresentados na tabela 3, enquanto os resultados da análise química são apresentados na tabela 4.

Tabela 3: Análise granulométrica (% em massa)

Fração	Tyler #	mm	% retida	Preparação da amostra para MEV-EDS
1	20	0,85	27,82	secção polida
2	35	0,43	26,48	secção polida
3	100	0,15	29,42	partículas soltas
4	-100	-0,15	16,28	partículas soltas
5	Global	global	100	

Tabela 4: Análises químicas da amostra global e das frações granulométricas (% em massa)

Elementos	PPC	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	Soma
Global	5,05	64,18	10,50	1,03	0,394	0,049	0,793	0,779	0,038	0,016	82,83
>0,850mm	2,28	66,18	12,27	0,71	0,352	0,012	0,863	0,742	0,021	0,011	83,44
>0,425mm	2,43	66,10	11,80	0,87	0,351	0,028	0,813	0,676	0,023	0,011	83,10
>0,150mm	3,60	65,16	10,86	1,11	0,344	0,036	0,772	0,676	0,033	0,016	82,61
<0,150mm	16,48	54,56	3,72	2,42	0,536	0,127	0,715	1,100	0,100	0,038	79,80

A composição mineralógica foi definida com apoio da composição química. Para todas as amostras não foi possível quantificar as fases identificadas por DRX, pois os resultados pela abordagem de Rietveld não seriam confiáveis, devido ao grau de cristalinidade baixo de todas as fases minerais. Dessa forma, uma consolidação com a análise química foi inviável, por insuficiência e redundância de dados. Contudo, a estimativa da abundância de fases, comparada com a respectiva análise química, é confiável, apesar de não ser quantitativa. Além da intensidade dos picos nos difratogramas, a maior abundância de magnetita é confirmada pelo nítido grau de magnetismo observado nas amostras macroscópicas. A tabela 5 mostra os resultados obtidos nos ensaios FRX e DRX em termos de níveis de quantificação e abundância de fases, respectivamente.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de FRX e DRX

Espectrometria de fluorescência de raios-X – FRX					
Elementos presentes	Amostra Global	> 850µm	> 425µm	> 150µm	< 150µm
Fe, O	Altos	Altos	altos	altos	altos
Mn, Ca, Si	Médios	Médios	médios	médios	médios
Al, Cr	Baixos	Baixos	baixos	baixos	baixos
P, Mg, Ti, S, Ni, Cl	Traços	Traços	traços	traços	traços
Cu, Zn	-	-	-	-	traços
Difração de raios-X – DRX					
Minerais presentes	Amostra Global	> 850µm	> 425µm	> 150µm	< 150µm
magnetita	Abundante	abundante	abundante	abundante	abundante
hematita	Médio	médio	médio	médio	médio
goethita	Médio	médio	médio	médio	médio
calcita	Baixo	traço	baixo	baixo	baixo
quartzo	-	-	traço	traço	-

Os difratogramas para as amostras Global, > 850µm, > 425µm, > 150µm e < 150µm são apresentados nas Figuras, 20, 21, 22, 23 e 24, respectivamente.

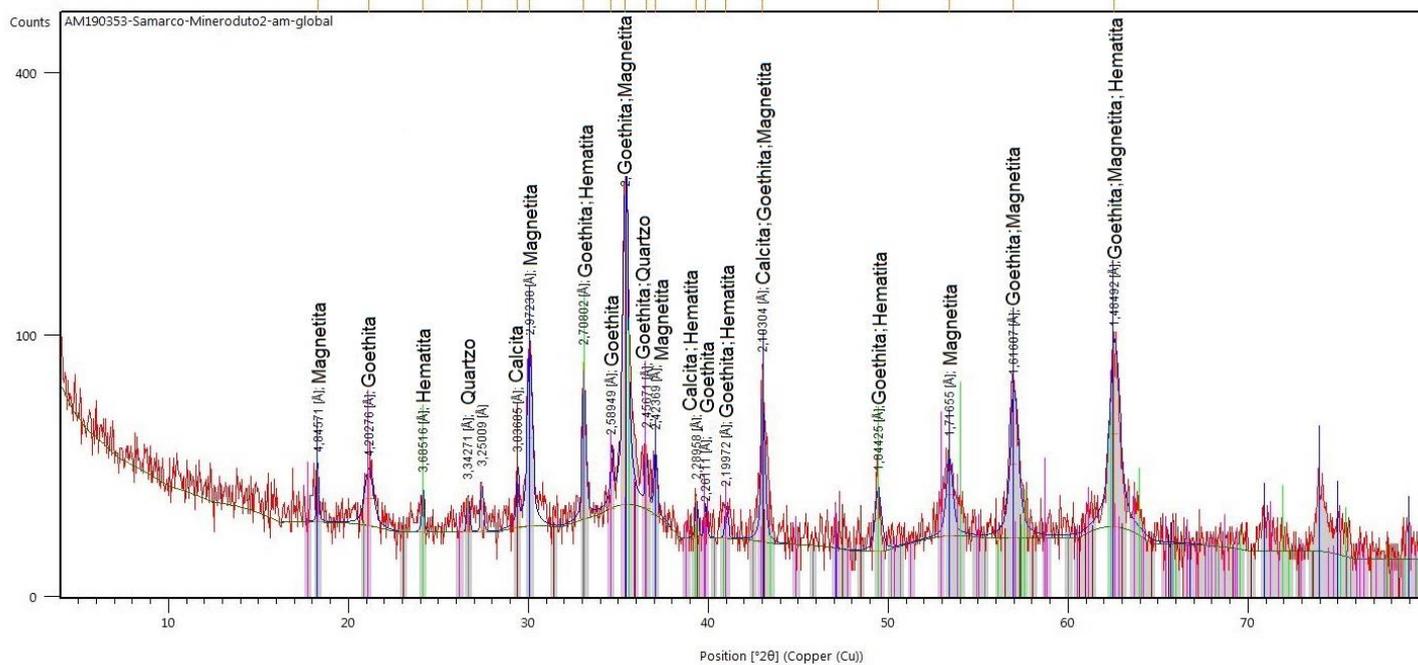


Figura 20: Difratoograma da amostra Global

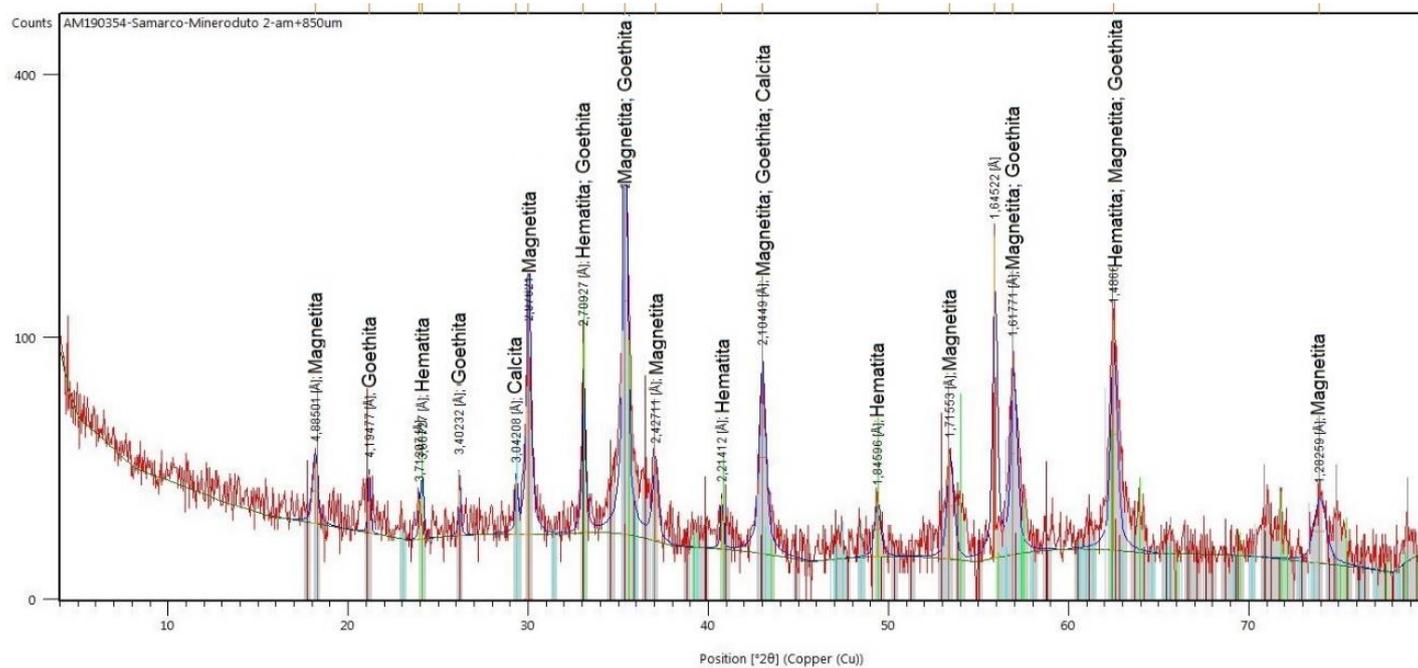


Figura 21: Difratoograma da amostra > 850 μm

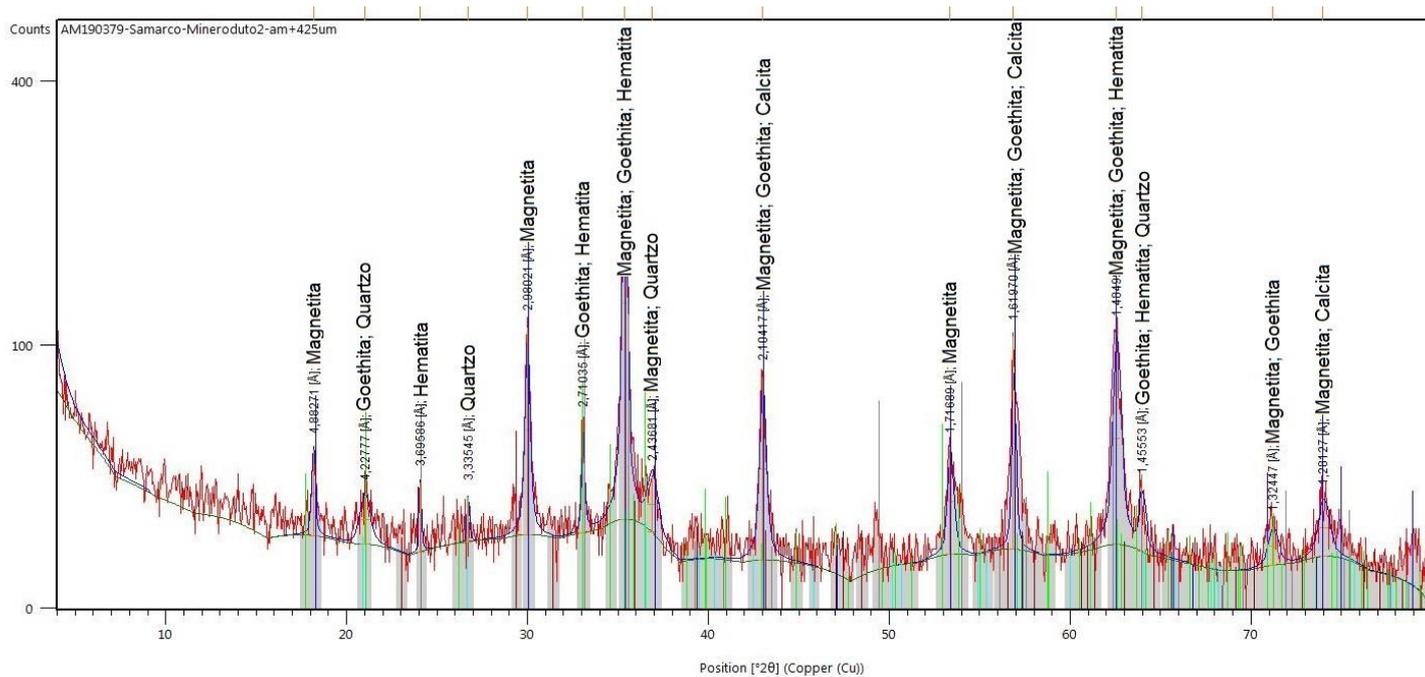


Figura 22: Difratoograma da amostra > 425 μm

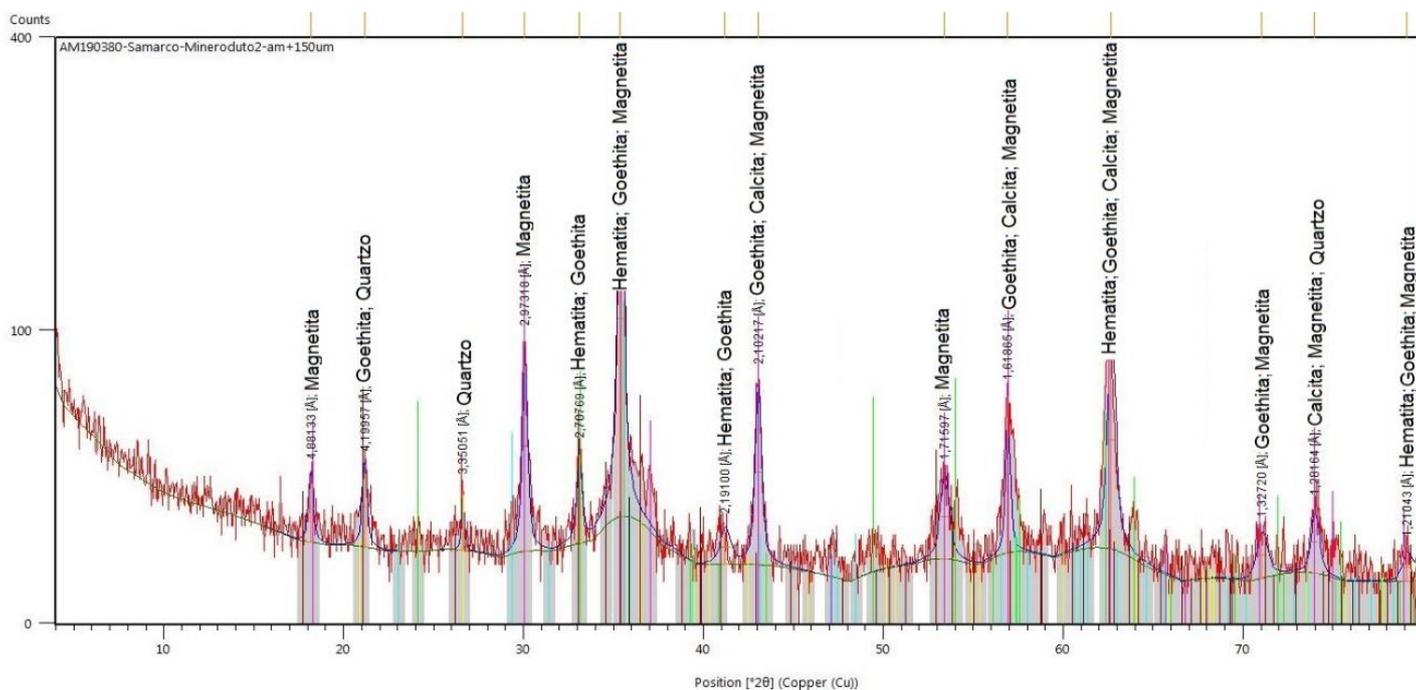


Figura 23: Difratoograma da amostra > 150 μm

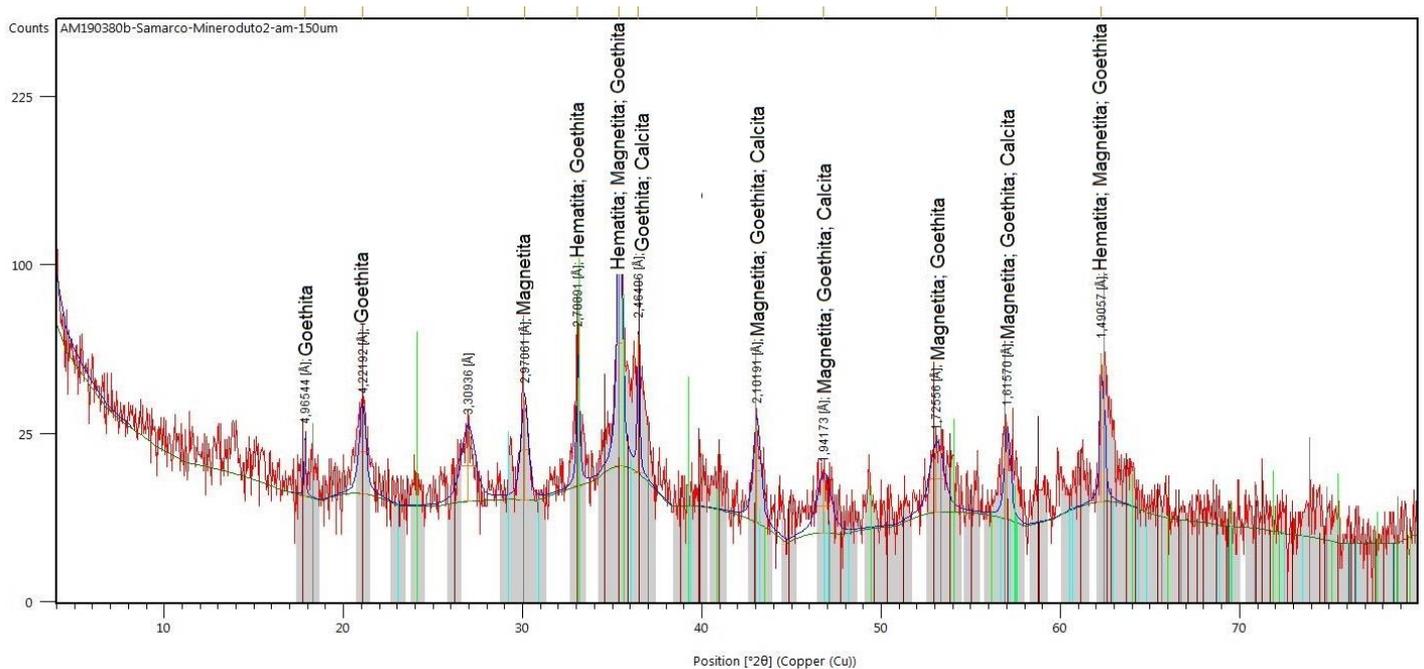


Figura 24: Difratoograma da amostra < 150 μm

As amostras estudadas mostraram composições químicas e mineralógicas muito semelhantes para todas as faixas granulométricas analisadas. Os elementos dominantes foram ferro e oxigênio, seguidos por silício, alumínio, cálcio e manganês, estes na faixa mediana, de 0,4 a 2,4%; os elementos menores a traço foram Cr, P, Mg e Ti. Os valores de PPC são medianos, de 2,3 a 5,1%, com exceção da fração < 0,150mm (#100) com 16,5%.

As fases minerais presentes, identificadas por DRX, foram magnetita e hematita abundantes e goethita medianamente abundante; calcita e quartzo tiveram concentrações baixas.

6.2.2 – Análise Microestrutural

Os estudos microestruturais foram realizados em quatro frações granulométrica conforme a tabela 3.

Amostras > 0,850mm e > 0,425mm

Nestes tamanhos de partículas, foi possível a preparação de secções polidas, que foram recobertas com carbono e observadas no MEV.

As microestruturas são de tubérculos típicos, embora mostrando diferenças individuais.

A Figura 25 mostra três fragmentos milimétricos de tubérculos. Estes apresentam trama predominantemente botrioidal, com presença moderada de poros submilimétricos grandes, mas com vários menores.

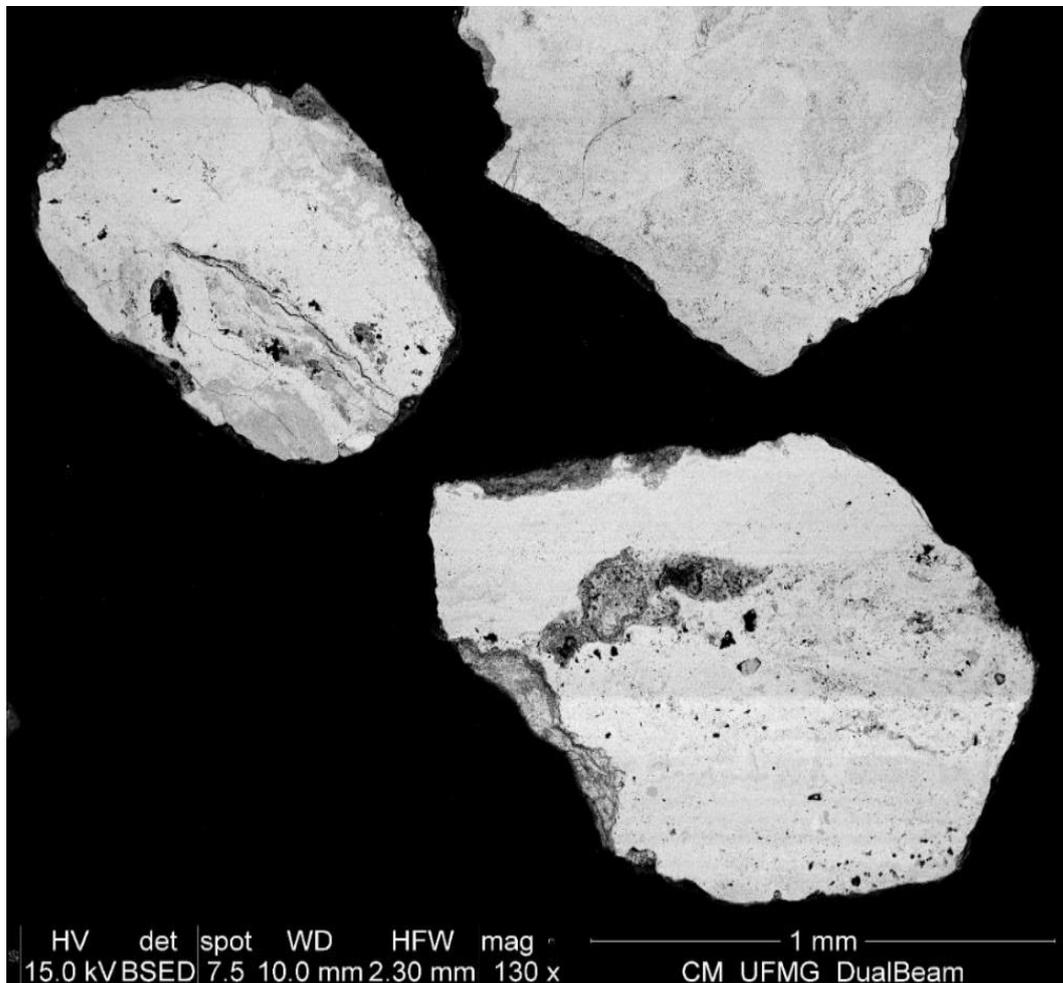


Figura 25: Três fragmentos milimétricos de tubérculos são mostrados.

Observando em maior detalhe o fragmento de tubérculo da parte inferior da imagem da Figura 25, verifica-se na região mediana nítida trama botrioidal. Praticamente todas as feições microestruturais são secundárias, isto é, são produtos da corrosão, conforme pode ser visto na Figura 26.

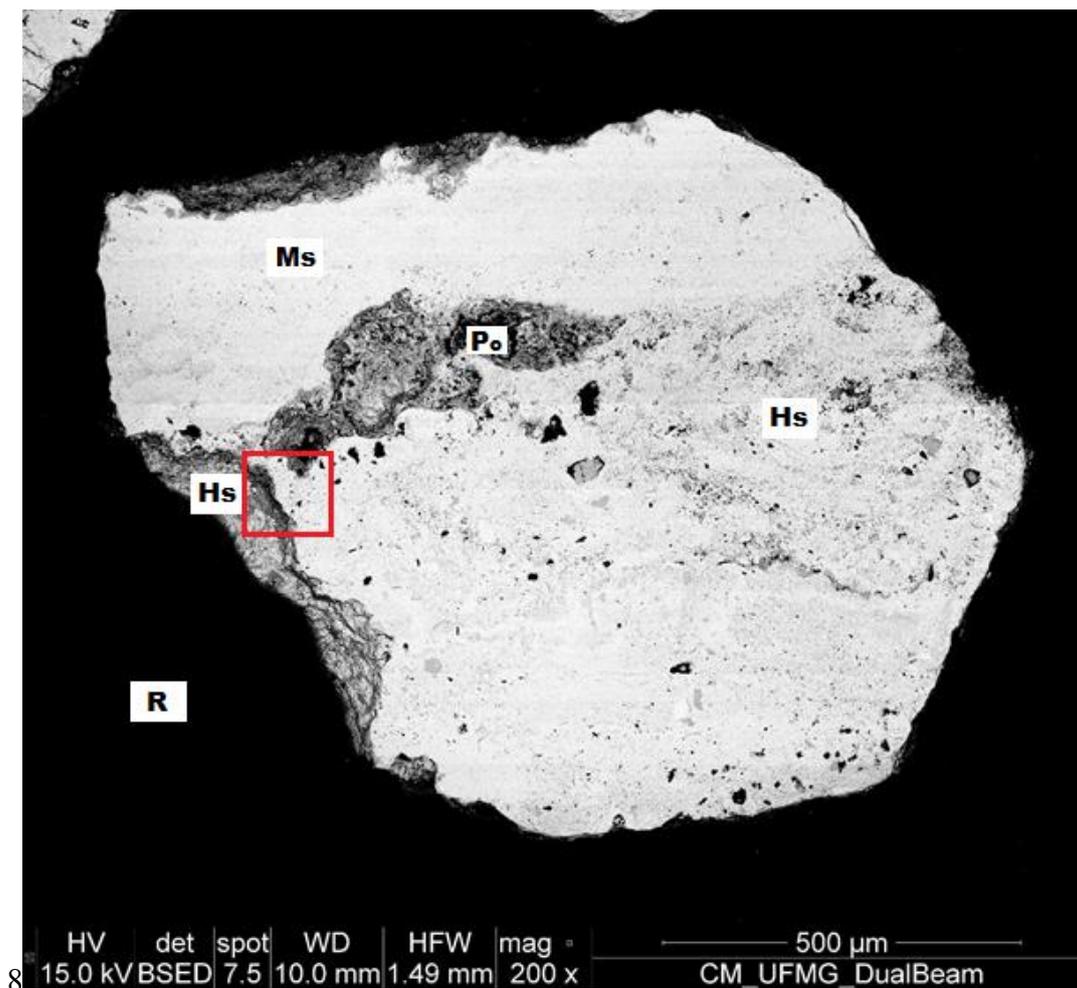


Figura 26: Fragmento de tubérculo com trama botrioidal. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), Poro (Po) e Resina de impregnação (R).

Com uma ampliação ainda maior do tubérculo da Figura 26 (caixa vermelha), bandas paralelas de magnetita e hematita foram identificadas, ambas secundárias, conforme mostrado na Figura 27.

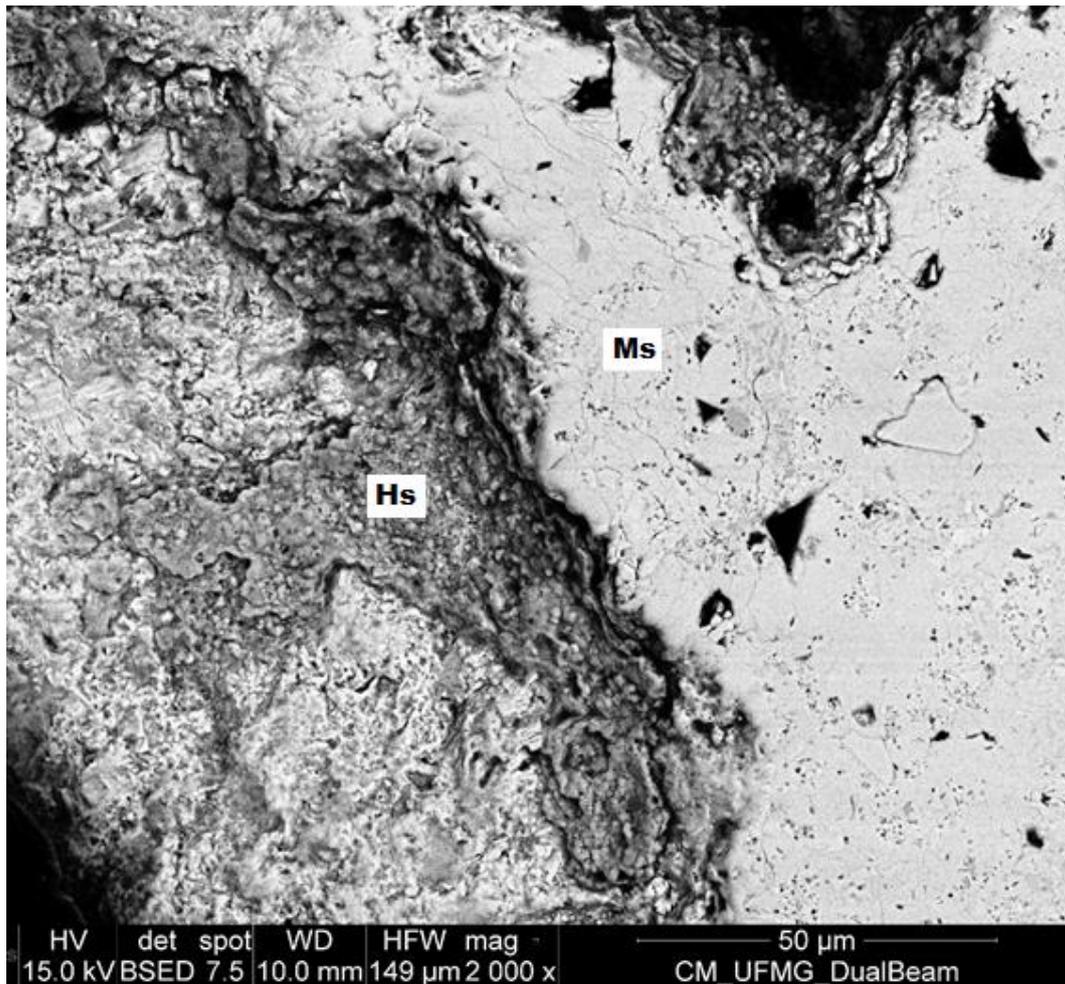


Figura 27: Bandas paralelas de magnetita e hematita. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs).

Observando outro fragmento de tubérculo, Figura 28, verifica-se uma estrutura complexa, mas predominantemente botrioidal, sendo suas regiões central e lateral direita altamente porosas e o restante relativamente maciço.

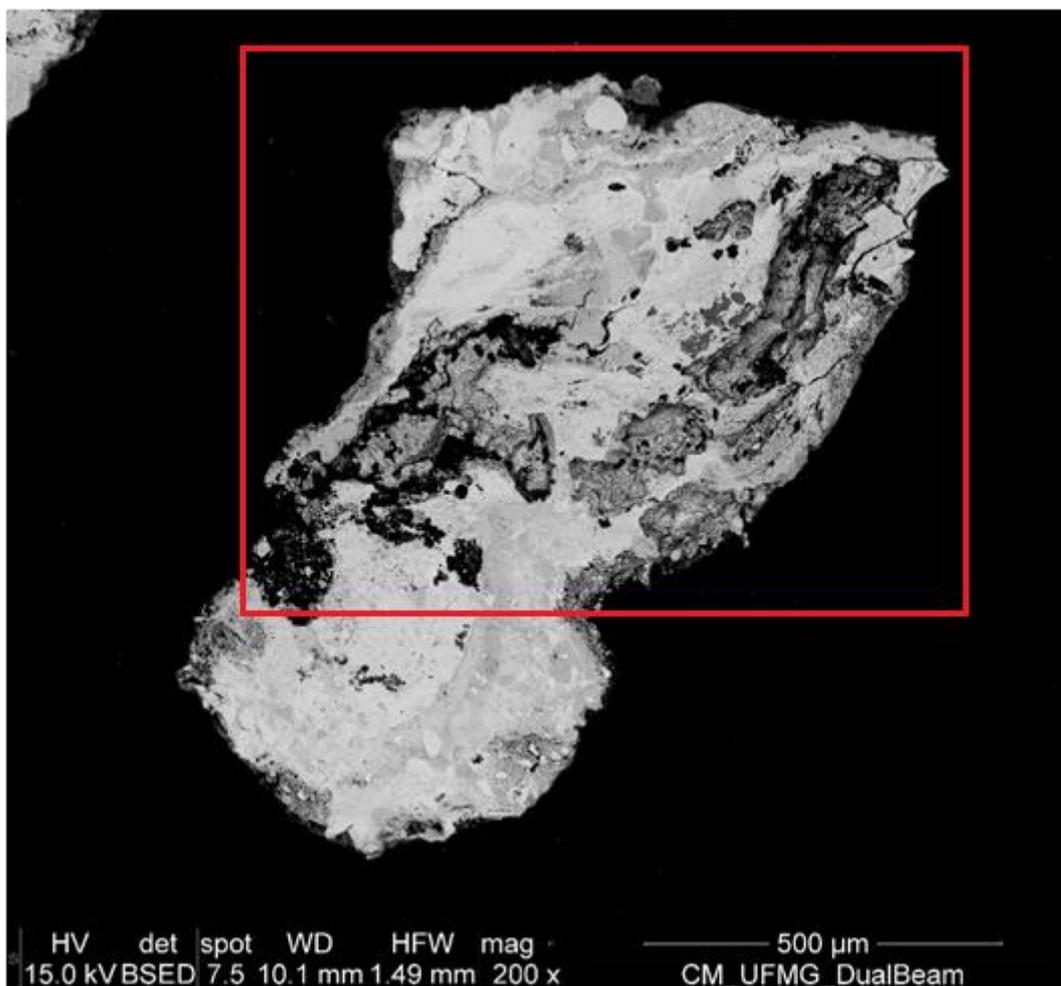


Figura 28: Fragmento de tubérculo com estrutura complexa.

Com maior ampliação do fragmento de tubérculo da Figura 28 (caixa vermelha), quantidade de poros relativamente grandes e presença de grãos pequenos de goethita secundária foram observadas, conforme pode ser visto na Figura 29.

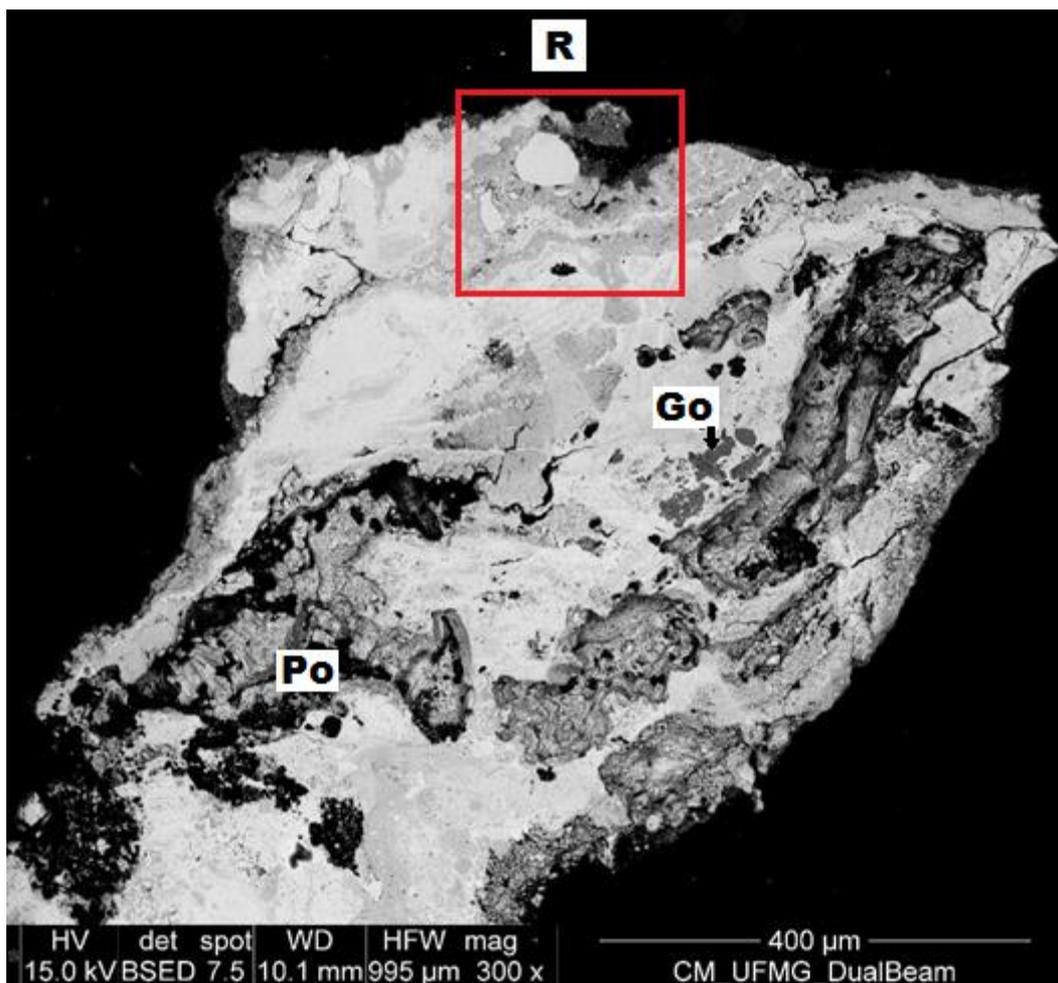


Figura 29: Fragmento de tubérculos com poros grandes e pequena quantidade grãos de goethita. Goethita secundária (Go), Poro (Po) e Resina de impregnação (R).

Com ampliação ainda maior da parte superior da Figura 29 (caixa vermelha), observou-se trama botrioidal, com alternância de bandas de magnetita e hematita, ambas secundárias; há alguns grãos de hematita primária, com feições lamelar e granular, conforme pode ser verificado na Figura 30.

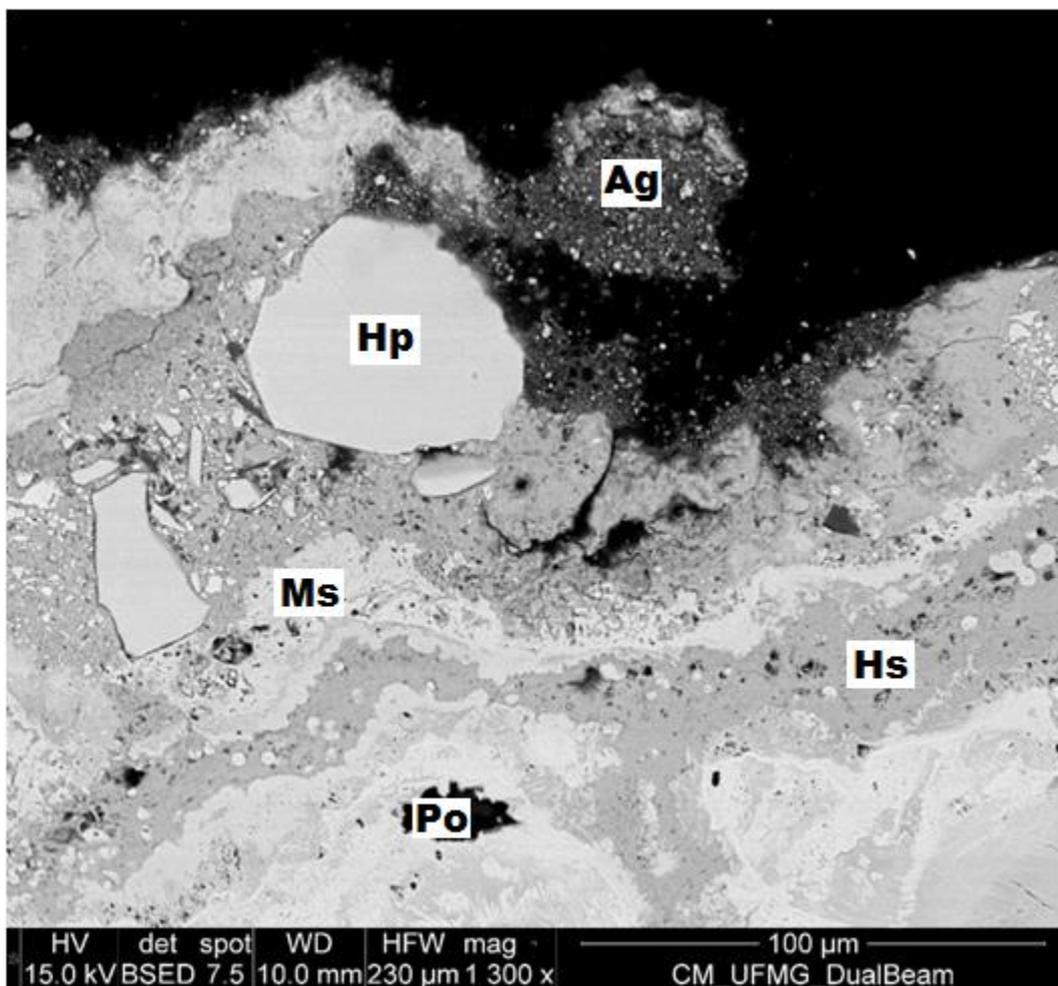


Figura 30: Imagem de fragmento de tubérculo com bandas de magnetita e hematita secundárias e grãos hematita primária. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), hematita primária (Hp), agregado (Ag) e Poro (Po).

A Figura 31 mostra um fragmento de tubérculo, bastante compacto, com trama botrioidal nítida somente na região inferior. Com maior ampliação da imagem da Figura 31 (caixa vermelha) foi possível visualizar que a fase de fundo era composta por magnetita secundária, mas com vários grãos de hematita primária e secundária, bem como algumas inclusões de quartzo, conforme mostrado na Figura 32.

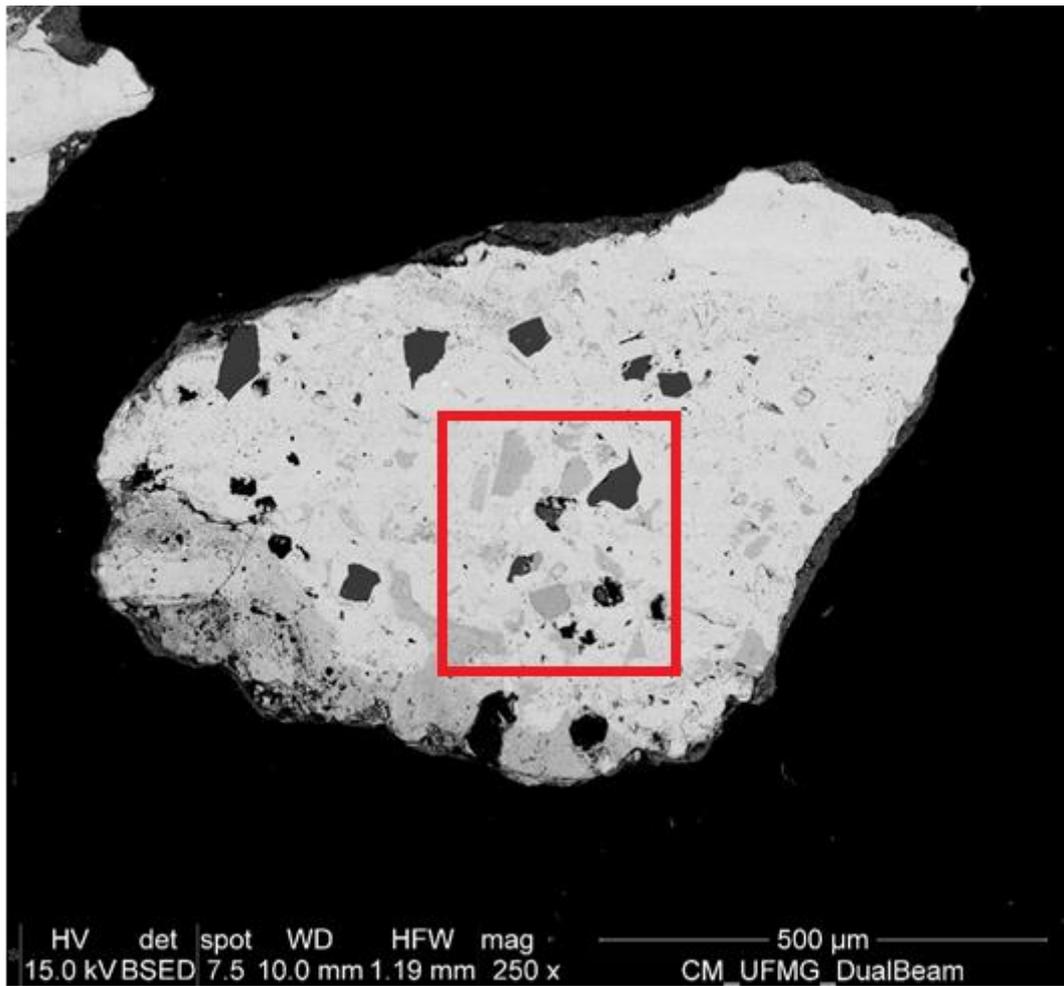


Figura 31: Fragmento de tubérculo bastante compacto, com inclusões de quartzo.

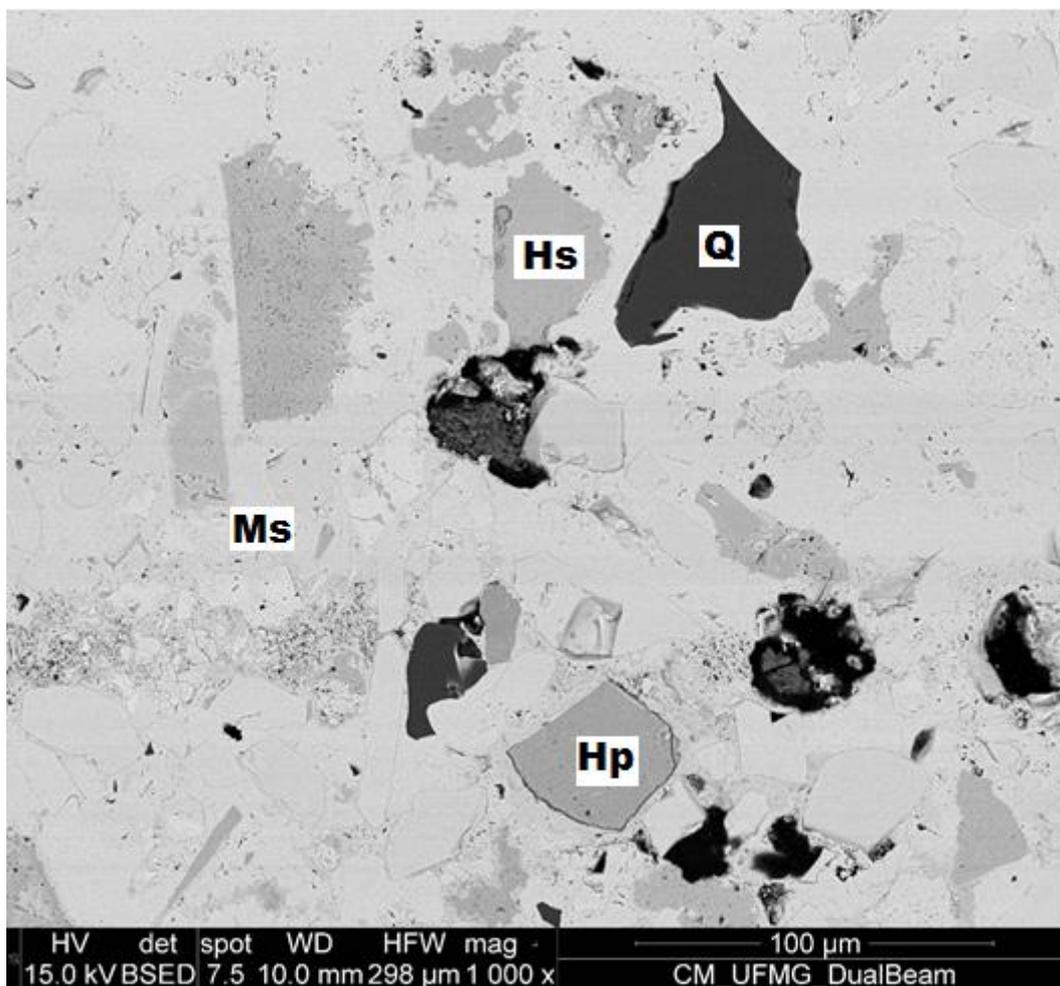


Figura 32: Detalhe do fragmento de tubérculo da figura 29 (caixa vermelha). Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), hematita primária (Hp) e quartzo (Q).

Ainda foi observado um fragmento alongado de tubérculo, Figura 33, com uma camada maciça e destacada de uma trama botrioidal, composta quase exclusivamente de magnetita botrioidal, com crostas de agregado de partículas finas, cimentadas por calcita; na região marcada por Ag, esta crosta é mais espessa.

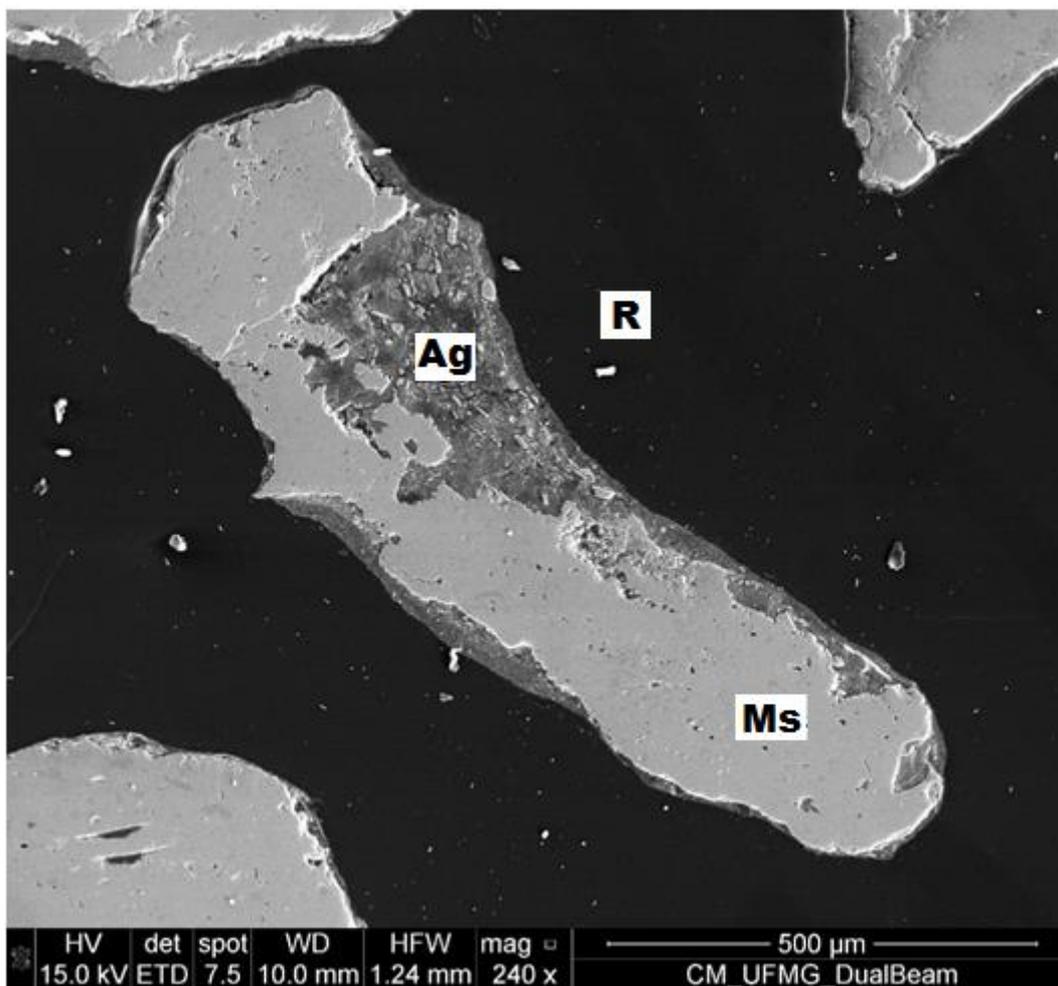


Figura 33: Fragmento alongado de tubérculo com crostas de agregado de partículas finas cimentadas por calcita. Magnetita secundária (Ms), agregado (Ag) e resina de impregnação (R).

As Figuras 34 e 35 mostram detalhes de outros tubérculos analisados.

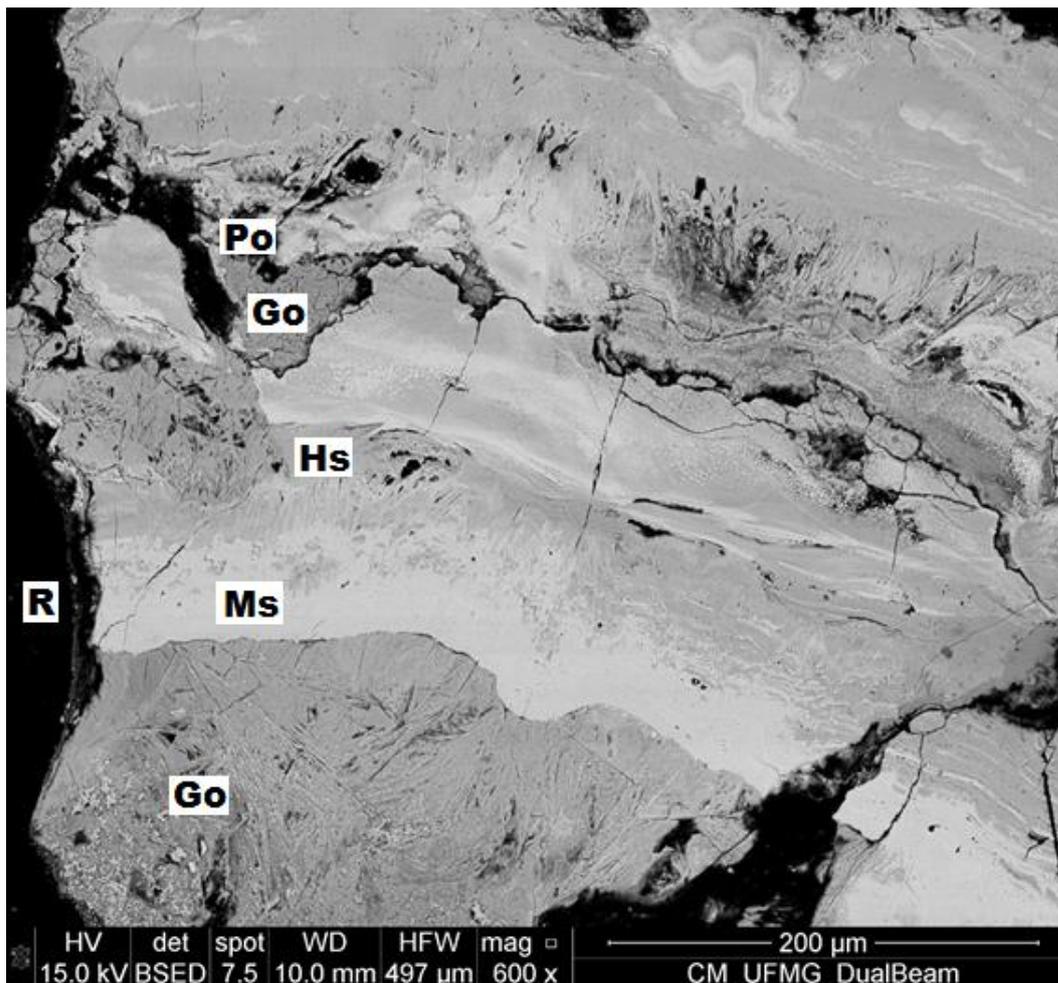


Figura 34: Detalhe de tuberculo com grãos de Goethita. Magnetita secundária (Ms), hematita secundária (Hs), goethita secundária (Go), poro (Po) e resina de impregnação (R).

A Figura 34 mostra trama botrioidal, com bandas alternadas de magnetita e hematita, ambas secundárias, com grãos de Goethita.

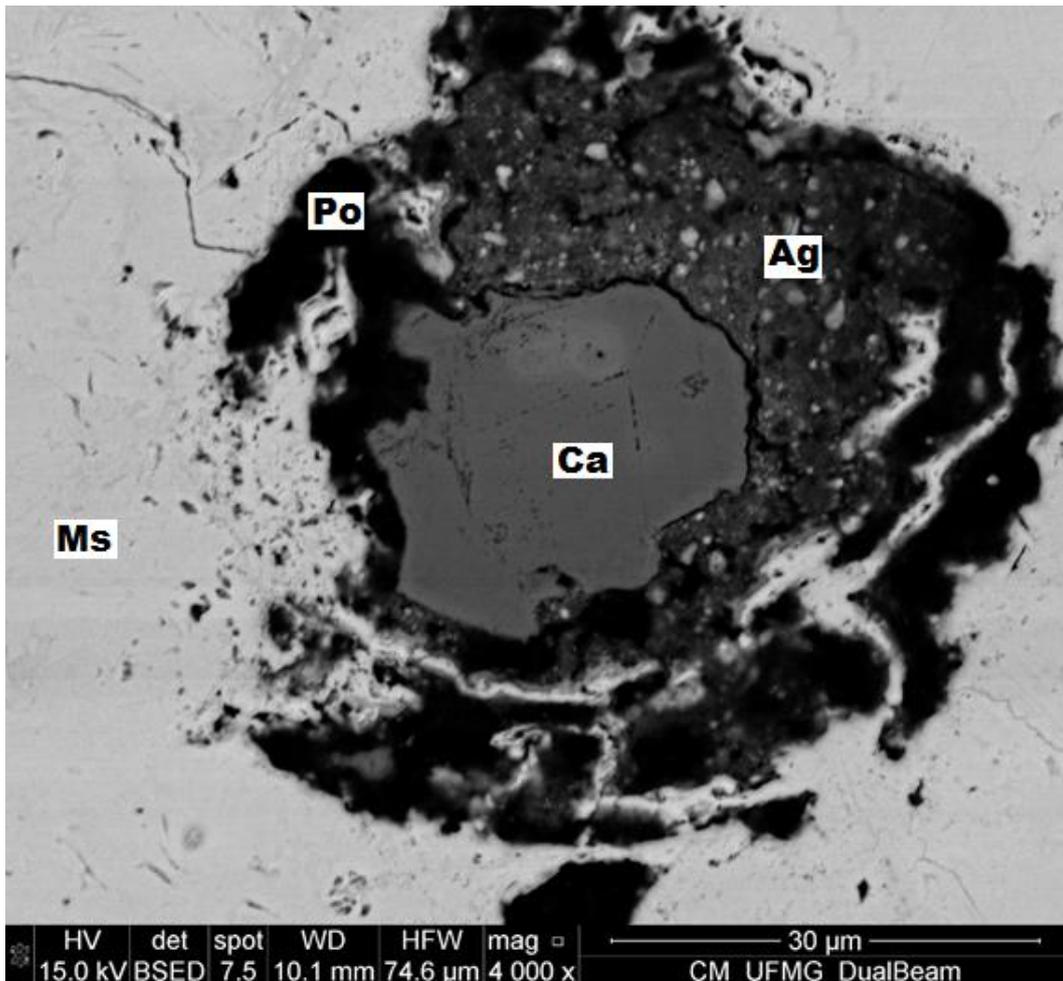


Figura 35: Poro parcialmente preenchido com agregado e contendo um grão de calcita. Magnetita secundária (Ms), agregado (Ag), calcita (Ca) e poro (Po).

Figura 35 mostra um poro parcialmente preenchido com agregado (Ag) e contendo um grão de calcita (Ca)

Amostras > 0,150mm e < 0,150mm

Devido ao tamanho das partículas, não foi prático preparar secções polidas; então, partículas foram espalhadas sobre um “stub”, com o uso de fita adesiva condutora, e recobertas com película de carbono.

Foram observados fragmentos de tubérculos com contornos desde angulosos até arredondados, conforme pode ser visto na Figura 36.

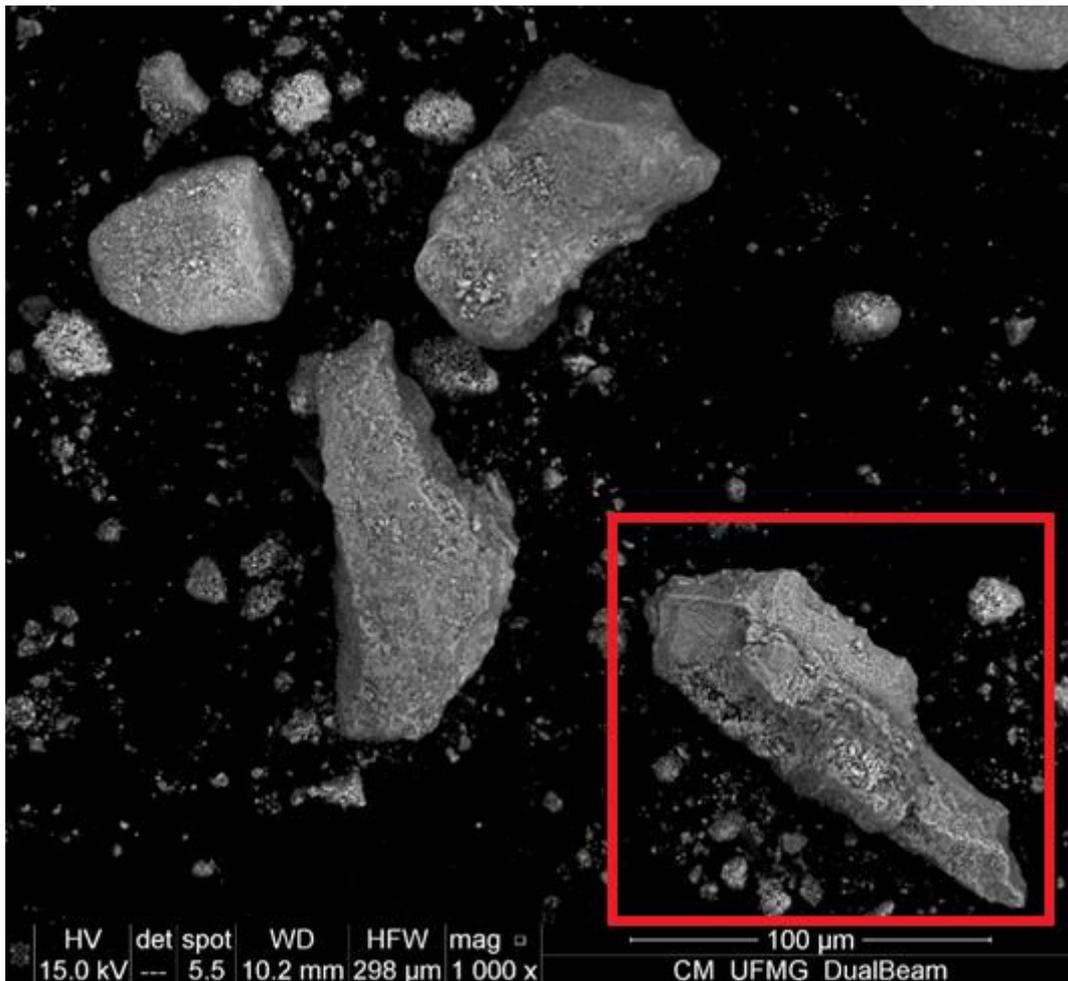


Figura 36: Fragmentos de tubérculos com contornos desde angulosos até arredondados.

Os dois fragmentos na parte central inferior da Figura 36 são alongados, e tem origem da trama botrioidal do tubérculo que os originou. Sendo o fragmento de tubérculo mais à direita composto predominantemente de magnetita secundária (caixa vermelha).

Pela análise microestrutural, com o apoio das análises químicas e mineralógica por DRX, tem-se que a fase mais marcante é a magnetita, com morfologia botrioidal, mais raramente maciça; esta fase é a causa principal da propriedade ferromagnética dos materiais retirados do mineroduto e examinados neste estudo. Esta magnetita é formada pela oxidação do aço do tubo do mineroduto; ressalte-se que a magnetita natural, isto é, presente originalmente nos concentrados transportados, é bastante baixa; assim, quase toda a magnetita analisada é proveniente da corrosão e denominada secundária.

A hematita é a segunda fase em abundância. Parte minoritária da hematita, certamente, provém do concentrado de minério de ferro (primária); porém, no caso da amostra estudada, a fração majoritária da hematita originou-se da oxidação do aço, sendo, portanto, secundária. Somente pela análise microestrutural, principalmente pela morfologia botrioidal, é possível distinguir a hematita primária da secundária.

O mineral goethita mostra a mesma ambiguidade de origem que a hematita, com o complicativo que a goethita é quase sempre botrioidal. O principal caráter para distinção é pela análise microestrutural, pela ocorrência íntima da goethita na estrutura do tubérculo.

A fase calcita é derivada totalmente do hidróxido de cálcio adicionado ao concentrado. Já o quartzo é sempre um componente original do concentrado de minério.

A grande maioria das partículas estudadas é constituída de tubérculos; na amostra atual praticamente todas as partículas estudadas são fragmentos, mesmo na fração granulométrica mais grossa. Os tubérculos são compostos essencialmente de produtos da corrosão do aço e incluem quantidades variáveis de minério fino e de calcita geralmente também muito fina, oriunda da carbonatação do hidróxido de cálcio. A forma geral é arredondada, mas há também fragmentos bastante irregulares e angulosos. A microestrutura essencial é a de magnetita botrioidal compacta, isto é, em camadas finas, paralelas e concêntricas (quando curvas), mostrando arranjos radiais de cristalitos. A hematita, principalmente a secundária, é o segundo mineral presente na microestrutura dos tubérculos. Nas imagens do MEV, algumas camadas têm cor mais escura, contrastando com a cor predominante mais clara. Os tubérculos têm estrutura bastante complexa, heterogênea e às vezes porosas.

Agregados de partículas finas de minério e de produtos de corrosão são frequentes, formando crostas e preenchendo poros e fissuras maiores. Estes agregados são cimentados pela calcita, com uma microestrutura que lembra a das argamassas.

Em comparação com estudos anteriores de produtos de corrosão em minerodutos, como no trabalho de MATTIOLI (2016), a amostra atual mostra grande similaridade. A única diferença com algum significado é que os fragmentos de tubérculo atuais parecem um pouco menos porosos, em relação aos poros maiores, milimétricos e submilimétricos.

6.3 – Inspeção com pig instrumentado do mineroduto e avaliação das regiões corroídas

6.3.1 - Análise dos resultados de corrosão

O mineroduto foi todo inspecionado com pigs instrumentados de ultrassom e MFL.

Foram detectadas inúmeras regiões corroídas em todo o mineroduto. Na Figura 37 é apresentada a ordem de grandeza das quantidades de regiões corroídas em função do percentual de profundidades.

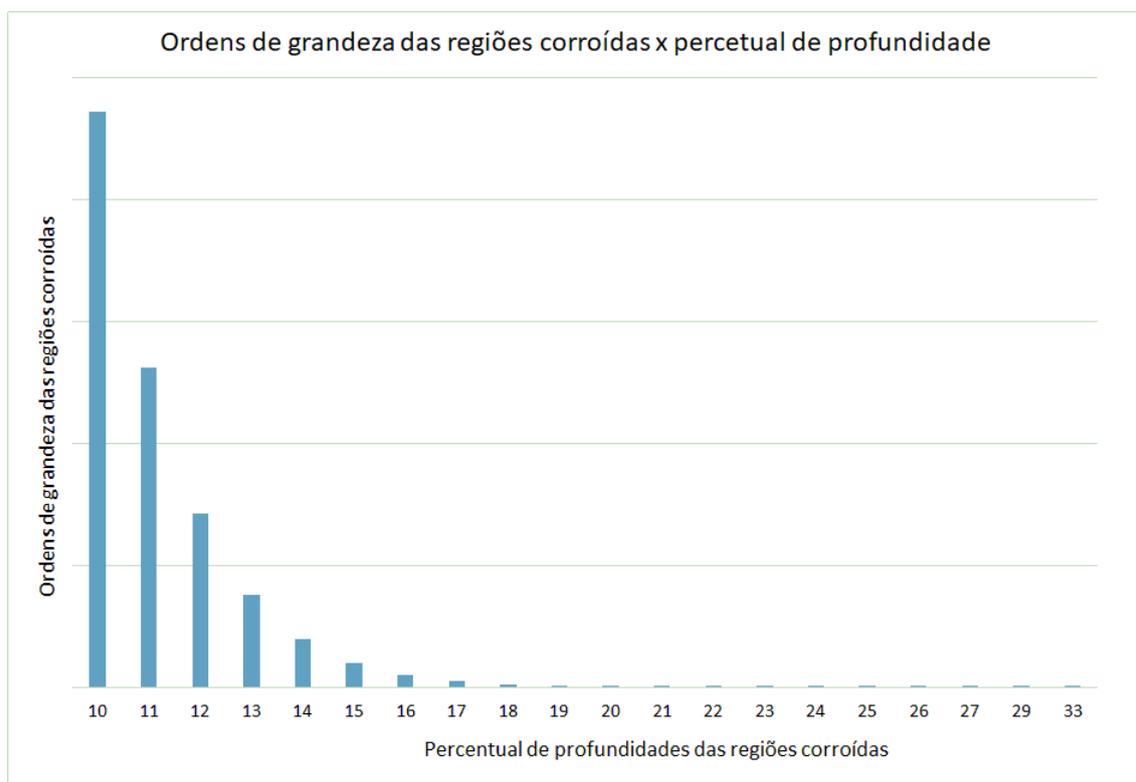


Figura 37: Ordens de grandeza das quantidades de regiões corroídas em função do percentual de profundidade.

Foram identificadas corrosões com profundidade variando entre 10% até 33%, sendo que mais de 98% das regiões corroídas são menores ou iguais a 15% de profundidade.

A Figura 38 mostra as ordens de grandeza das quantidades de regiões corroídas e o perfil altimétrico ao longo do comprimento do duto.

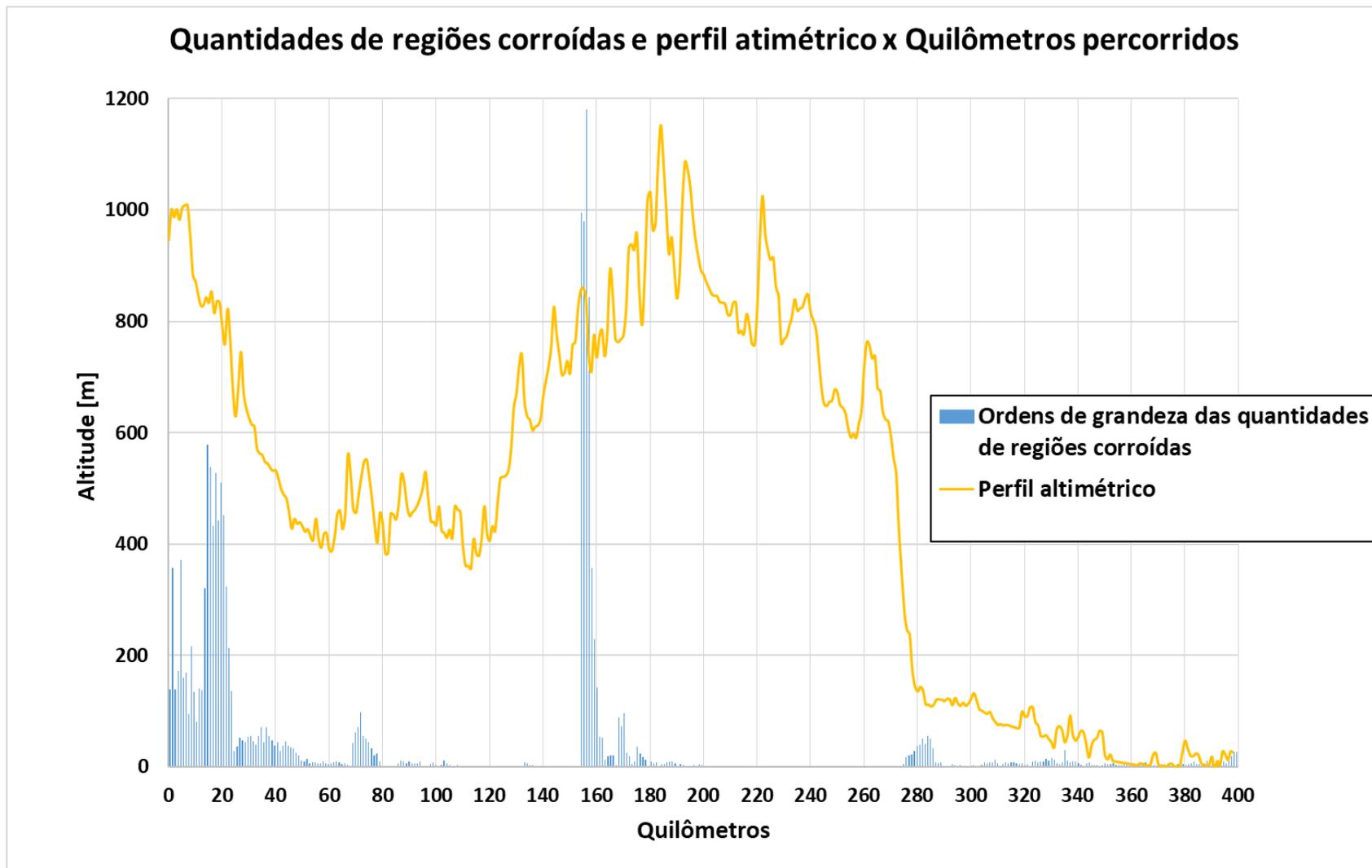


Figura 38: Distribuição das ordens de grandeza das quantidades de regiões corroídas e perfil altimétrico ao longo do mineroduto.

Os resultados apresentados na Figura 38 mostram, conforme esperado, que as corrosões estão mais concentradas nos quilômetros iniciais das seções, ou seja, mais próximos as estações de bombeamento. A polpa bombeada contém oxigênio dissolvido que causa corrosão, sendo a taxa de corrosão decrescente à medida que o oxigênio é consumido.

Para a seção 1, trecho entre o KM 0 e o KM 153 conforme é apresentado no item 4.2, foi observado um maior percentual de regiões corroídas nos primeiros 23 quilômetros, esta quantidade reduz, mas ainda é considerável até 46 quilômetros. Em outros três pontos da seção 1 as quantidades de regiões corroídas podem ser destacadas, entres os quilômetros 68 e 78 de forma mais considerável, entre 85 e 109 e entre 130 e 140, em menor quantidade. Nestes três pontos observa-se um comportamento similar, as corrosões estão em regiões mais baixas do relevo, o que pode ser uma indicação de que houve acúmulo de umidade nestes locais, favorecendo o desenvolvimento de processos corrosivos.

Para a seção 2, trecho entre o KM 153 e o KM 398, nos 10 quilômetros iniciais, foi observada a maior quantidade de regiões corroídas, sendo que nos 20 quilômetros subsequentes a quantidade reduz, mas ainda é considerável. Em outros três pontos da seção 2, as quantidades de regiões corroídas podem ser destacadas: na região entre o Km 167 e o Km 177, onde as áreas corroídas estão concentradas em pontos mais baixos do relevo; na região do Km 274, e na região entre o Km 304 e o Km 398, que apresenta um perfil mais distribuído das regiões corroídas, sendo que neste intervalo estão as partes mais baixas do relevo. No Km 274 está instalada a EV4, conforme é apresentado no item 4.2, e durante as atividades de *re-start* a pressão na linha fica zerada, ou próxima de zero, no início do processo. Dessa forma, as regiões corroídas podem ter sido causadas por cavitação e em alguns casos potencializadas pela erosão devido à restrição do fluxo de sólidos durante a cavitação.

Foi analisada as ordens de grandeza das extensões das regiões corroídas ao longo do comprimento do duto. A Figura 39 mostra as ordens de grandeza das extensões das regiões corroídas e o perfil altimétrico ao longo do comprimento do duto.

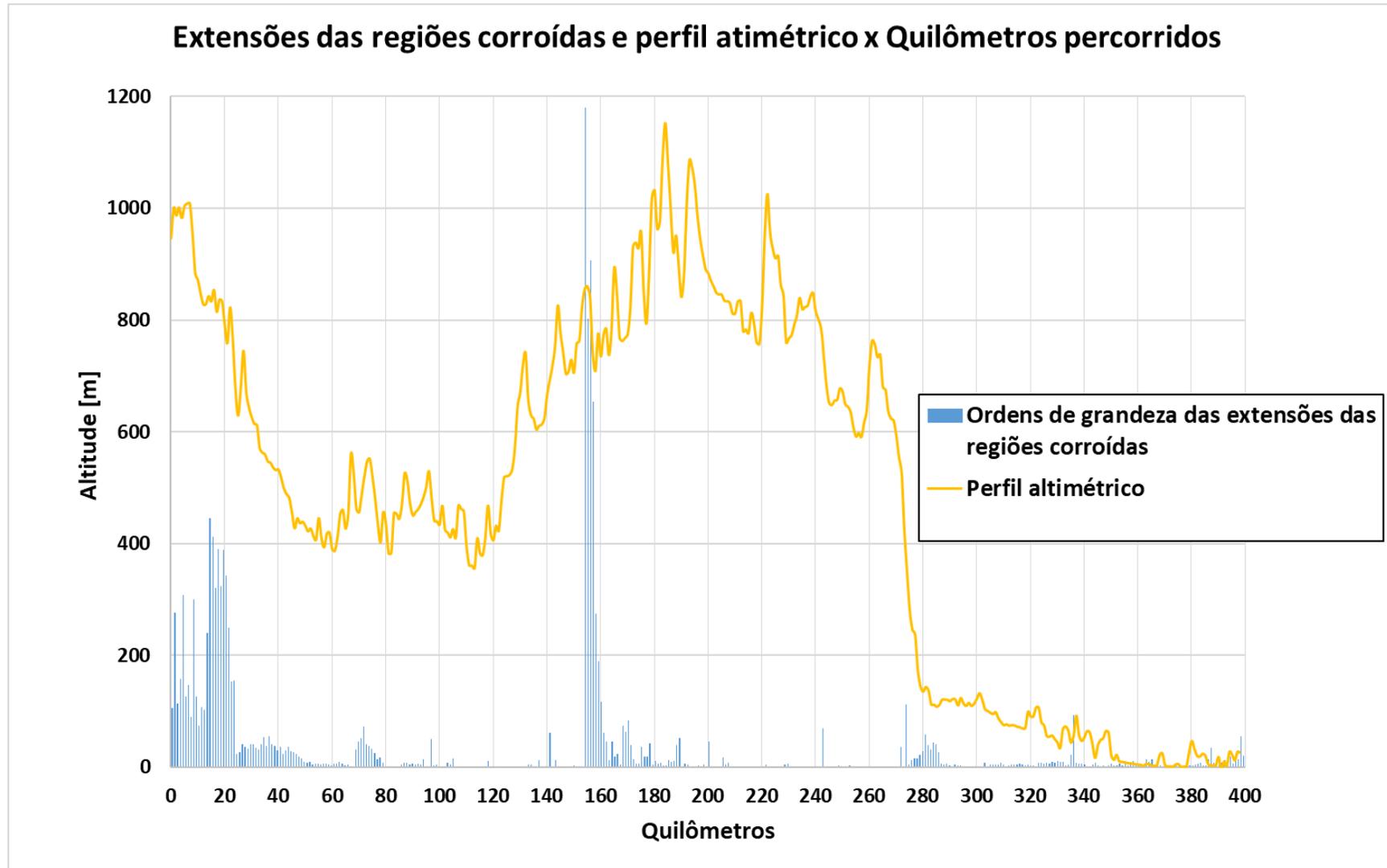


Figura 39: Distribuição das ordens de grandeza das extensões das regiões corroídas e perfil altimétrico ao longo do mineroduto .

A análise dos resultados apresentados na Figura 39 mostrou que as extensões das regiões corroídas, conforme esperado, foram maiores onde há maiores densidades de regiões corroídas. Contudo, foi possível observar que, em determinados quilômetros, mesmo com uma baixa densidade de regiões corroídas a extensão da região corroída foi maior que o esperado, mostrando que as corrosões, individualmente, afetavam uma área maior. Foram percebidos os mesmos padrões observados para as análises de ordem de grandeza das quantidades de regiões corroídas.

A Figura 40 mostra as posições horárias, conforme apresentadas na Figura 15, das regiões corroídas ao longo do comprimento do duto, utilizando como referência o sentido do fluxo de bombeamento.

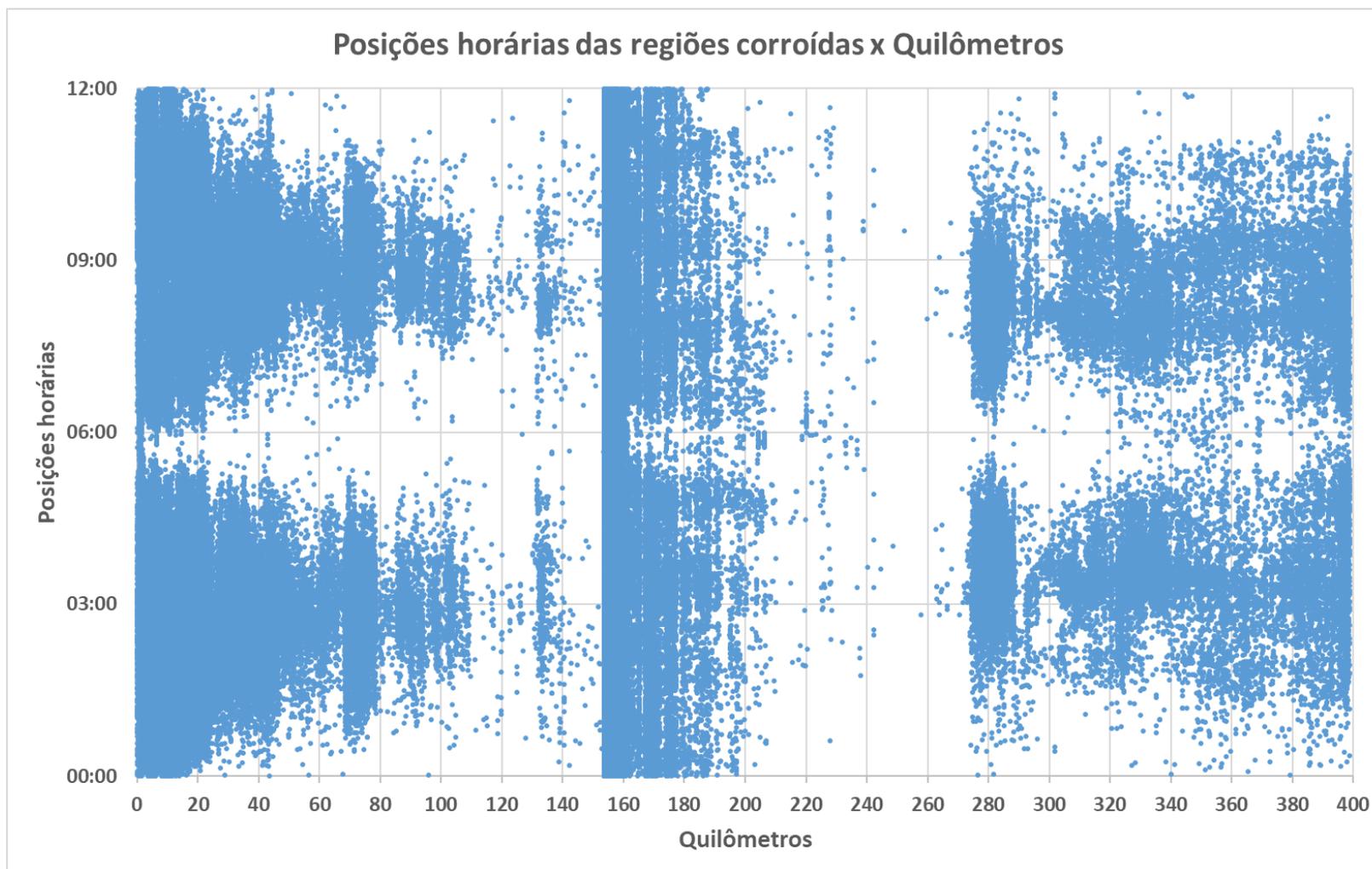


Figura 40: Posições horárias das regiões corroídas ao longo do comprimento do mineroduto

A Figura 40 mostra que na seção 1 as regiões corroídas estão mais uniformemente distribuídas ao longo da circunferência do duto no início, à medida que se aumenta a distância estas regiões tendem a se concentrar em torno dos eixos de 03:00 e 09:00 horas. Isso acontece até aproximadamente o Km 135, a partir daí as regiões corroídas voltam a ficar mais uniformemente distribuídas. A distribuição uniforme no início da seção pode ser explicada pela maior disponibilidade de oxigênio no período que o duto estava em operação. A menor densidade de regiões corroídas na posição de 06:00 horas é causada pela maior ação abrasiva da polpa nessa posição. Dessa forma, o processo erosivo é predominante em relação ao processo corrosivo.

A Figura 40 ainda mostra que na seção 2 as regiões corroídas estão mais uniformemente distribuídas ao longo da circunferência do duto no início, assim como na seção 1, porém, diferentemente, à medida que a distância em relação ao início da seção aumenta, estas distribuições se mantêm uniformes até o entorno do Km 213, a partir daí até o entorno do Km 273, ocorre uma grande redução na quantidade de regiões corroídas. Entre o Km 273 e o Km 398, as regiões corroídas apresentam um perfil mais uniforme ao longo do duto ficando bem distribuídas na circunferência, mas com certa concentração em torno dos eixos de 03:00 e 09:00 horas. Um fato chama a atenção na seção 2, na região compreendida entre as estações de válvulas 3 e estação de válvulas 4, quilômetros 242 e 273 respectivamente: a baixa quantidade de regiões corroídas e o percentual de profundidade baixo. Isso pode ser explicado pelo fato deste ser o trecho mais curto do mineroduto, cerca de 32 quilômetros, o que favorece o processo de limpeza, secagem e inertização. Outro fato é que este trecho apresenta menor diâmetro e, portanto, maior velocidade do fluxo. Dessa forma, pode ser que o processo erosivo, a que a tubulação está sujeita, tem maior predominância do que o processo corrosivo, não deixando este último de desenvolver.

Na Figura 41 são apresentadas as taxas de corrosão ao longo do mineroduto.

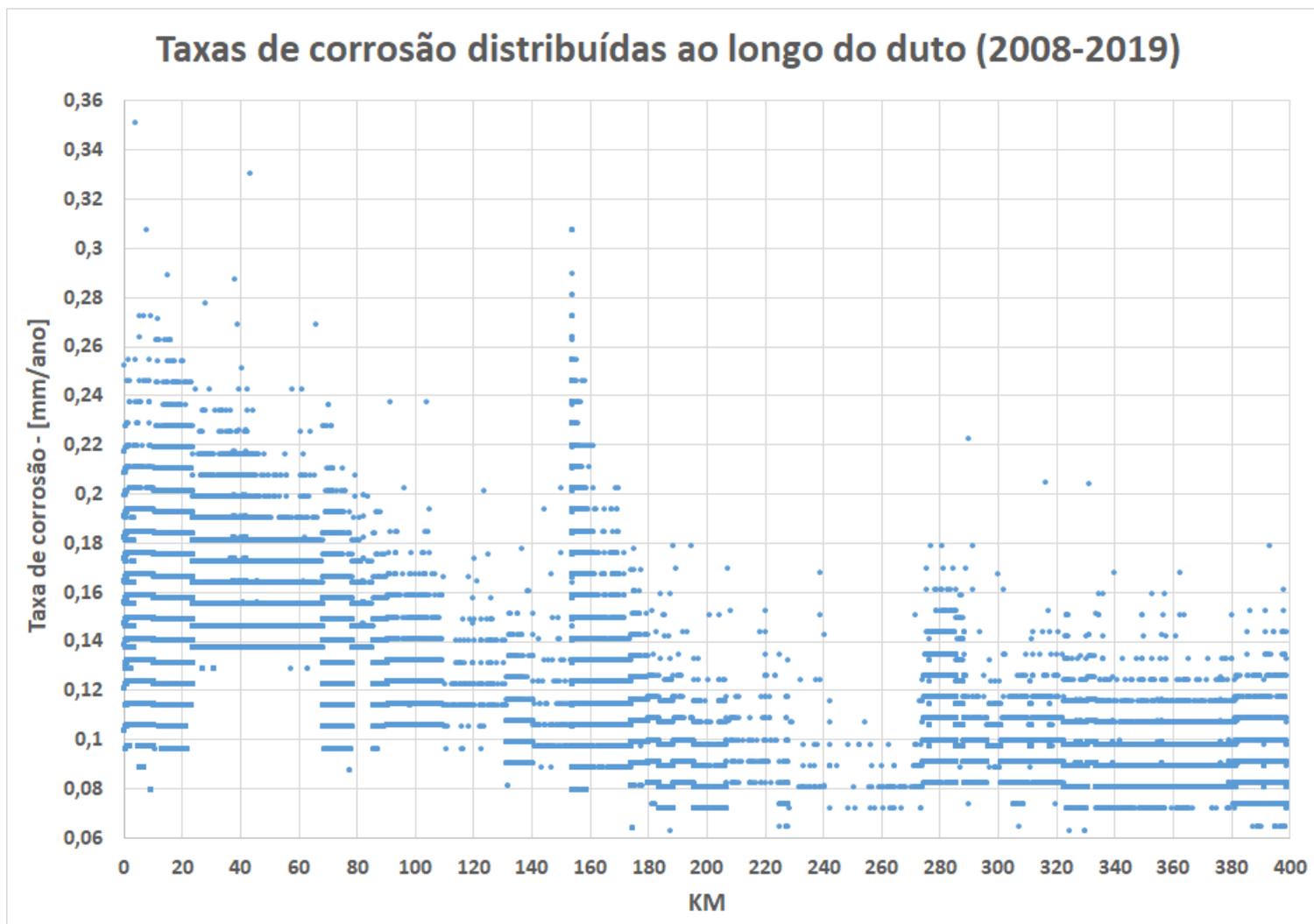


Figura 41: Taxas de corrosão ao longo do duto.

Os resultados das taxas de corrosão apresentados na Figura 41, mostram que as taxas são mais altas nos inícios das seções, após as estações de bombeamento nos Km 0 e Km 153, porém decrescentes ao longo do trecho, mostrando que o processo corrosivo é, principalmente, relacionado ao oxigênio dissolvido na água bombeada durante a fase operacional. No início a taxa é maior e à medida em que o oxigênio é consumido ao longo da tubulação, as taxas apresentaram tendência de redução. Esta tendência de redução é mais acentuada no trecho compreendido entre o Km 153 e o Km 274, em comparação ao trecho entre o Km 0 e o Km 153.

6.3.2 - Análise dos resultados de erosão

Conforme esperado, os tubos com menores valores de espessura no fundo foram mais predominantes, em relação as demais posições. A Figura 42 mostra a distribuição em termos percentuais por posição em que foram encontradas as menores espessuras por tubo.

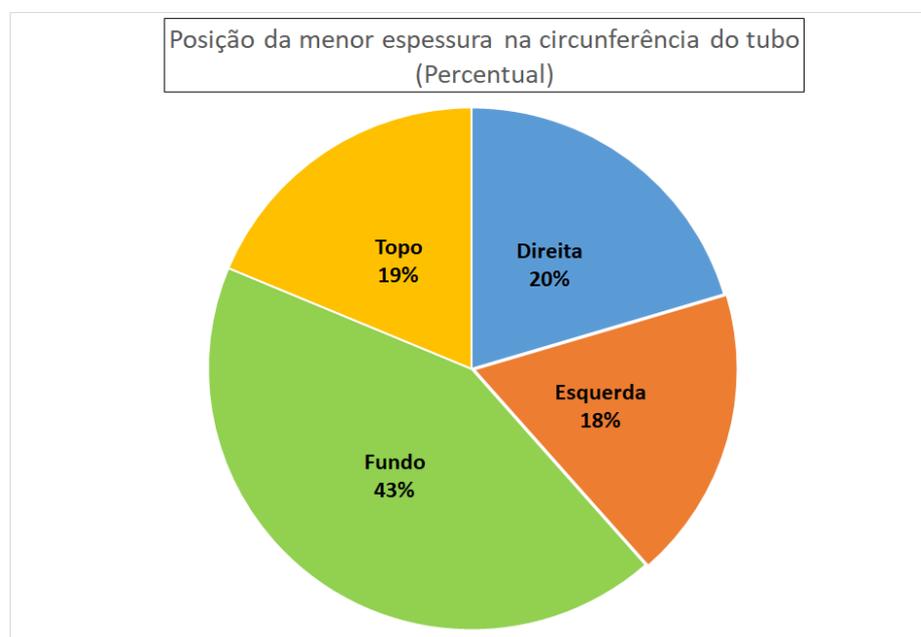


Figura 42: Distribuição das menores espessura por posição

Na Figura 43, são apresentadas as taxas de erosão ao longo de toda a tubulação.

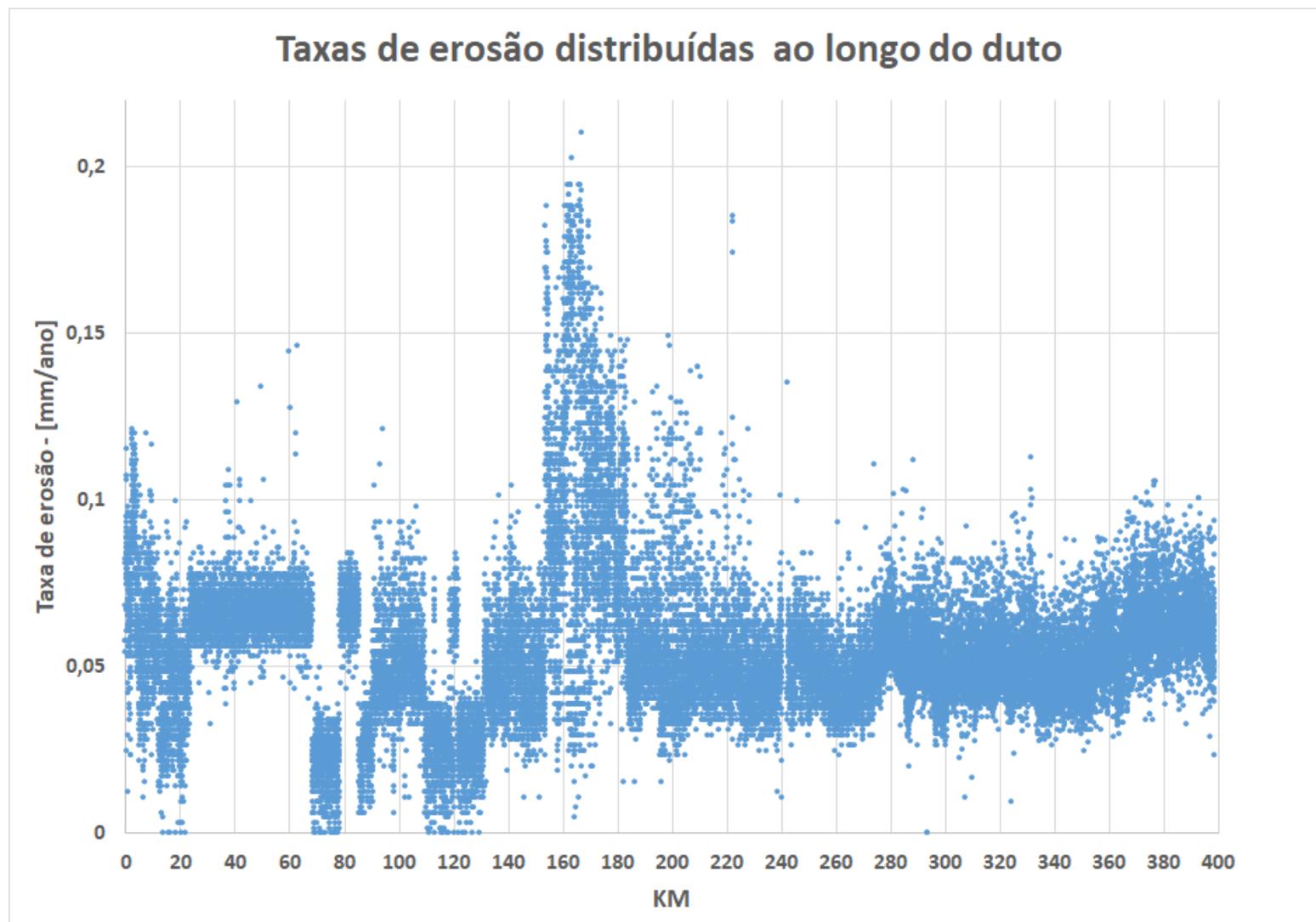


Figura 43: Taxas de erosão ao longo da tubulação

Analisando os resultados de erosão, apresentados na Figura 43, observa-se que as taxas de erosão são mais altas nos inícios das seções, Km 0 e Km 153, apresentando tendência de queda ao longo do trecho. As taxas são consideravelmente maiores no início da seção 2 até próximo ao Km 183. Neste trecho, durante a fase operacional, foram registradas as maiores perdas de carga do sistema, que causam redução das vazões da EB5, uma vez que o sistema é limitado na pressão de descarga das bombas. Dessa forma, a velocidade mínima de depósito pode não ser atingida, podendo ocorrer deposição de partículas e a formação de leitos no fundo da tubulação será mais acentuada. Caso sejam formados leitos fixos, poderá ocorrer corrosão sob os depósitos e, caso estes sejam móveis, o processo erosivo será favorecido. Tal situação poderia explicar as taxas de erosão mais altas neste trecho. Outro ponto importante com relação ao início das seções é o efeito sinérgico dos processos corrosivo e erosivo.

7 – Conclusões

Após a realização das análises e discussão dos resultados, as seguintes conclusões podem ser obtidas com relação as avaliações de corrosão e do processo de inertização de minerodutos de longa distância:

- A aplicação do processo de inertização em minerodutos de longa distância se mostrou viável para longos períodos de tempo, 4 anos no caso deste trabalho.
- Para garantir maior qualidade e eficiência de aplicação do processo de inertização devem ser definidos pontos de monitoramento dos parâmetros ao longo do duto, uma vez que os pontos monitorados estavam localizados nas extremidades dos trechos. Foi observada a possibilidade de atendimento dos critérios de inertização nos pontos de monitoramento, mas devido a longa distância entre estes pontos, bolsões de umidade podem ter ficado retidos na tubulação e com o tempo foram perdidos os parâmetros;
- Devem ser estabelecidos critérios de aceitação que levem em consideração os valores de umidade medidos diretamente no interior do duto.
- O material removido do interior do duto apresenta como fase marcante a magnetita, com morfologia botrioidal. Esta fase é a causa principal da propriedade ferromagnética apresentada. A magnetita com morfologia botrioidal é formada pela oxidação do aço do tubo do mineroduto; uma vez que a magnetita natural, isto é, presente originalmente nos concentrados transportados, é insignificante; assim, quase toda a magnetita analisada é proveniente da corrosão;

- Para os tubérculos removidos do interior da tubulação, verificou-se que são compostos essencialmente de produtos da corrosão do aço e incluem quantidades variáveis de minério fino e de calcita geralmente também muito fina, oriunda da carbonatação do hidróxido de cálcio. A forma geral é arredondada, mas há também fragmentos bastante irregulares e angulosos. A microestrutura essencial é a de magnetita botrioidal compacta, isto é, em camadas finas, paralelas e concêntricas (quando curvas), mostrando arranjos radiais de cristalitos. A hematita, principalmente a secundária, é o segundo mineral presente na microestrutura dos tubérculos.
- A maior parte das regiões corroídas, com base nas informações obtidas utilizando o pig, tem baixo percentual de profundidade, variando entre 10% e 33%, sendo que mais de 98% destas regiões tem profundidades menores ou iguais a 15%, o que mostra que o processo corrosivo não se desenvolveu substancialmente.
- As regiões corroídas estão mais concentradas nos quilômetros iniciais das seções, ou seja, mais próximos as estações de bombeamento. Fato que evidencia a maior influência da fase operacional no desenvolvimento do processo corrosivo, devido ao oxigênio dissolvido na água, e não como consequência de falhas no processo de inertização. Outro fator que corrobora com este ponto de vista é que as maiores profundidades de corrosão, em sua maioria, estão localizadas nestes quilômetros iniciais.
- Não foi possível estabelecer uma correlação entre as regiões corroídas com o perfil altimétrico da tubulação, mas foi observado um determinado padrão de concentração de regiões corroídas em pontos mais baixos do relevo em determinados trechos da tubulação;

- Com relação as distribuições das regiões corroídas ao longo da circunferência do duto, no início das seções se apresentaram uniformes e à medida que a distância em relação ao início aumentou, estas regiões corroídas tenderam a se concentrar em torno dos eixos de 03:00 e 09:00 horas. A menor densidade de regiões corroídas na posição de 06:00 horas foi atribuída a maior ação abrasiva da polpa nessa posição. Dessa forma, o processo erosivo é predominante em relação ao processo corrosivo. Contudo a menor densidade de regiões corroídas na posição de 12:00 horas não pode ser compreendida neste estudo.
- Foi verificado um sinergismo existente entres os processos corrosivos e erosivos.

8 – Sugestões de trabalhos futuros

- Avaliar qual seria a percentagem de umidade residual ideal no interior de dutos de longa distância para garantir os melhores resultados na proteção contra corrosão no processo de inertização.
- Estudar qual a distância máxima aceitável entre os pontos de monitoramento dos parâmetros de inertização para garantir maior eficiência do processo.

9 – Referências Bibliográficas

AUSENCO PSI. Filosofia operacional e de controle do Mineroduto 3. 2012, Belo Horizonte.

ABULNAGA B. E. Slurry systems handbook. New York: McGraw-Hill, 2002.

BAGHBAN, A., BAHADORI, M., ROZYN, J., LEE, M., ABBAS, A., BAHADORI, A., RAHIMALI, A. Estimation of air dew point temperature using computational intelligence schemes. Applied Thermal Engineering 93 (2016) 1043–1052.

BECHTEL. Samarco Pipeline Operating Manual. 1977, Belo Horizonte.

BELTRÁN, J. P.; CECI, P., MIGUEZ, P., CASALI, P. Construction of Slurry Pipelines. Procedia Engineering 138 (2016) 127 – 130

BERNING, T. The dew point temperature as a criterion for optimizing the operating conditions of proton exchange membrane fuel cells. International Journal Of Hydrogen Energy 37 (2012) 10265-10275

BROWN, N. P., HEYWOOD, N. I. Slurry Handling – Design of Solid-Liquid Systems. Elsevier Science Publishers LTD, 1991. ISBN 1-85166-645-1

COETSER, S. E., CLOETE, T. E. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems. Critical Reviews in Microbiology, 31:213–232, 2005.

COSHAM, A., HOPKINS, P. The assessment of corrosion in pipelines – guidance in the pipeline defect assessment manual (pdam). Pipeline Pigging and Integrity Management Conference 17-18th May 2004 – Amsterdam, The Netherlands.

ELEMUREN, R., EVITTS, R., OGUOCHA, I., KENNELL, G., GERSPACHERB, R., ODESHIA, A. Slurry erosion-corrosion of 90° AISI 1018 steel elbow in saturated potash brine containing abrasive silica particles. Wear 410–411 (2018) 149–155.

FOX, R. W.; MCDONALD'S, A. T.; PRITCHARD, P. J. Introdução à Mecânica dos fluidos. Trad. Ricardo N. N. Koury; Geraldo A. C. França. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S. A. 2006.

GENTIL, V. Corrosão. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341p.

GERÇÓSSIMO, R. P., COSTA, L. L. A. C. ABREU, L. J. B., REZENDE, S. E. .Corrosion control results in slurry phosphate pipeline. IBP1665_11. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, September, 2011, Rio de Janeiro.

GONZALEZ-FRANCHI, G., RUIZ, A., PALMER-JONES, R., ANDRADE, R. B. N., VIEIRA, P. R. G. Corrosion growth and remnant life study on pipeline no. 1 of Samarco Mineração S.A., based on multiple ILI data sets. IBP1300_15. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, September, 2015, Rio de Janeiro.

GUILLEN, P., VIEIRA, P. R. G., ANDRADE, R. B. N, HIRSCH, B., SOLTIS, J. Development of an integrity management plan for a slurry pipeline system considering repeat in-line inspection results. IBP2056_17. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, October 2017, Rio de Janeiro.

HERRO, H. M., PORT, R. D. The Nalco guide to cooling water system failure analysis. New York: McGraw-Hill, 1993. 420p.

ISLAM, Md. A., FARHAT, Z. N., AHMED, E. M., ALFANTAZI, A. M. Erosion enhanced corrosion and corrosion enhanced erosion of API X-70 pipeline steel. Wear 302(2013)1592–1601

LAWRENCE, M. G. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air – A Simple Conversion and Applications. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 86 No. 2, February 2005, 225-233

LIA, Y., XUB, D., CHENA, C., LI, X., JIAD, R., ZHANG, D., SNAD, W., WANG, F., GU, T. Anaerobic microbiologically influenced corrosion mechanisms interpreted using bioenergetics and bioelectrochemistry: A review. *Journal of Materials Science & Technology* 34 (2018) 1713–1718.

LINS, V. F. C., LAGE, F. C., CASTRO, M. M. R., COSTA, C. G. F., MATENCIO, T. Strategies for corrosion inhibition of slurry pipelines prior to commissioning. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 69(2), 161-166, apr. jun. 2016.

LIU, A., CHEN, K., HUANG, X., CHEN, J., JIANFENGZHOU, J., XU, W., Corrosion failure probability analysis of buried gas pipelines based on subset simulation, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 57, p. 25-33, 2019.

LIU, B., SUN, M., LU, F., DU, C., LI, X., Study of biofilm-influenced corrosion on X80 pipeline steel by a nitrate-reducing bacterium, *Bacillus cereus*, in artificial Beijing soil. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 197, 111356, 2021.

LU, B.T., LUO, J.L. Synergism of electrochemical and mechanical factors in erosion -corrosion, *J. Phys. Chem. B* 110 (9) (2006) 4217–4231.

LUTTERBACH, M. T. S., CONTADOR, L. S., OLIVEIRA, A. L. C., GALVÃO, M. M., RODRIGUES, T. C., RUFINO, R., OTHON, O., SARQUIS, M. I. M. Biocorrosion analysis of water, bauxite slurry and internal pipeline fouling samples from the production process bauxite slurry in Paragominas Pará. IBP1334_11. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, September, 2011, Rio de Janeiro.

MALKA, R., NEŠIĆ, S., GULINO, D. A. Erosion corrosion and synergistic effects in disturbed Liquid-particle flow. In: 61ST ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION - CORROSION, NAC Expo 2006, paper n° 06594 , March 12-16, San Diego, California, USA, 2006.

MARCIALES, A., PERALTA, Y., HAILE, T., CROSBY, T., WOLODKO, J. Mechanistic microbiologically influenced corrosion modeling—A review. *Corrosion Science* 146 (2019) 99–111.

MATTIOLI, G. G. Avaliação da corrosão interna em minerodutos brasileiros para transporte de minério de ferro. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. p.150, (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MATTIOLI, G. G., MARTINS, A. F., LINS, V. F. C., BRANDÃO, P. R. G, TORRES, A. S. G., Evaluation of internal corrosion in a Brazilian iron ore slurry pipeline based on the characterization of scales and tubercles. *REM, Int. Eng. J.*, Ouro Preto, 71(2), 203-208, apr. jun. 2018.

MCCAFFERTY, E. *Introduction to Corrosion Science*. New York: Springer, 2010. 575 p.

MIEDEMA, S. A.; RAMSDELL, R. C. *Slurry Transport Fundamentals, A Historical Overview & The Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity Framework* 1st Edition, 2016.

MINERCONSULT Engenharia, PSI do Brasil. *Filosofia operacional e de controle do Mineroduto 2*. 2005, Belo Horizonte.

MOODY, L.F. Friction Factors for Pipe Flow. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 66, 671-681, 1944.

PENG, X., HUANG, Z., CHEN, B., LIU, D., LI, H., On the interference mechanism of stray current generated by DC tram on pipeline corrosion. *Engineering Failure Analysis*, v. 116, 104760, 2020.

PENSPEN Integrity. *Mothball Study. Second Iron Ore Pipeline*. 2013, Richmond – United Kingdom.

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

RINGAS, C. Internal corrosion of slurry pipelines caused by microbial corrosion: causes and remedies. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy VOLUME 107 The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2007. SA ISSN 0038–223X/3.00 + 381-384 june 2007

SAMPAIO, D. A., BRANDÃO, P. R. G. Rheological properties of iron ore concentrates produced by Samarco Mineração S.A. (Samarco) and their effect on the potential of plug formation of the pipeline. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROTRANSPORT, 16, 2004, Santiago. *Papers presented at Hydrotransport*. 16th International Conference. Bedfordshire: BHR Group Limited, 2004. 231-243.

SINHA, S. L., DEWANGAN, S. K., SHARMA, A. A review on particulate slurry erosive wear of industrial materials: In context with pipeline transportation of mineral-slurry. Particulate Science and Technology ARTICULATE SCIENCE AND TECHNOLOGY 2017, VOL. 35, NO. 1, 103–118.

TANG, X., XU, L. Y., CHENG, Y. F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil-sand slurry. II: Synergism of erosion and corrosion. Corrosion Science 50 (2008) 1469–1474

TORRES, A. S. G., SILVA, C. C., VIEIRA, P. R. G., ANDRADE, R. B. N. Samarco's evolution on erosion rate calculation method. IBP1352_15. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, September, 2015, Rio de Janeiro.

TORRES, A. S. G., MATTIOLI, G. G., SANTOS, L. J., ANDRADE, A. C. O., TORRES, I. A., QUITES, V. R., SILVA, D. A., ANDRADE, R. B. N. Hibernation of slurry pipelines: a comparative analysis between nitrogen and treated water. IBP2038_17. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, October, 2017, Rio de Janeiro.

WALKER, J. In-line inspection of pipelines. Verlag modern industrie. Germany, 2010. ISBN 978-3-86236-003-1

YIN, K., LIU, H., CHENG, Y. F. Microbiologically influenced corrosion of X52 pipeline steel in thin layers of solution containing sulfate-reducing bacteria trapped under disbonded coating. Corrosion Science 145 (2018) 271–282.