

# REVISTA

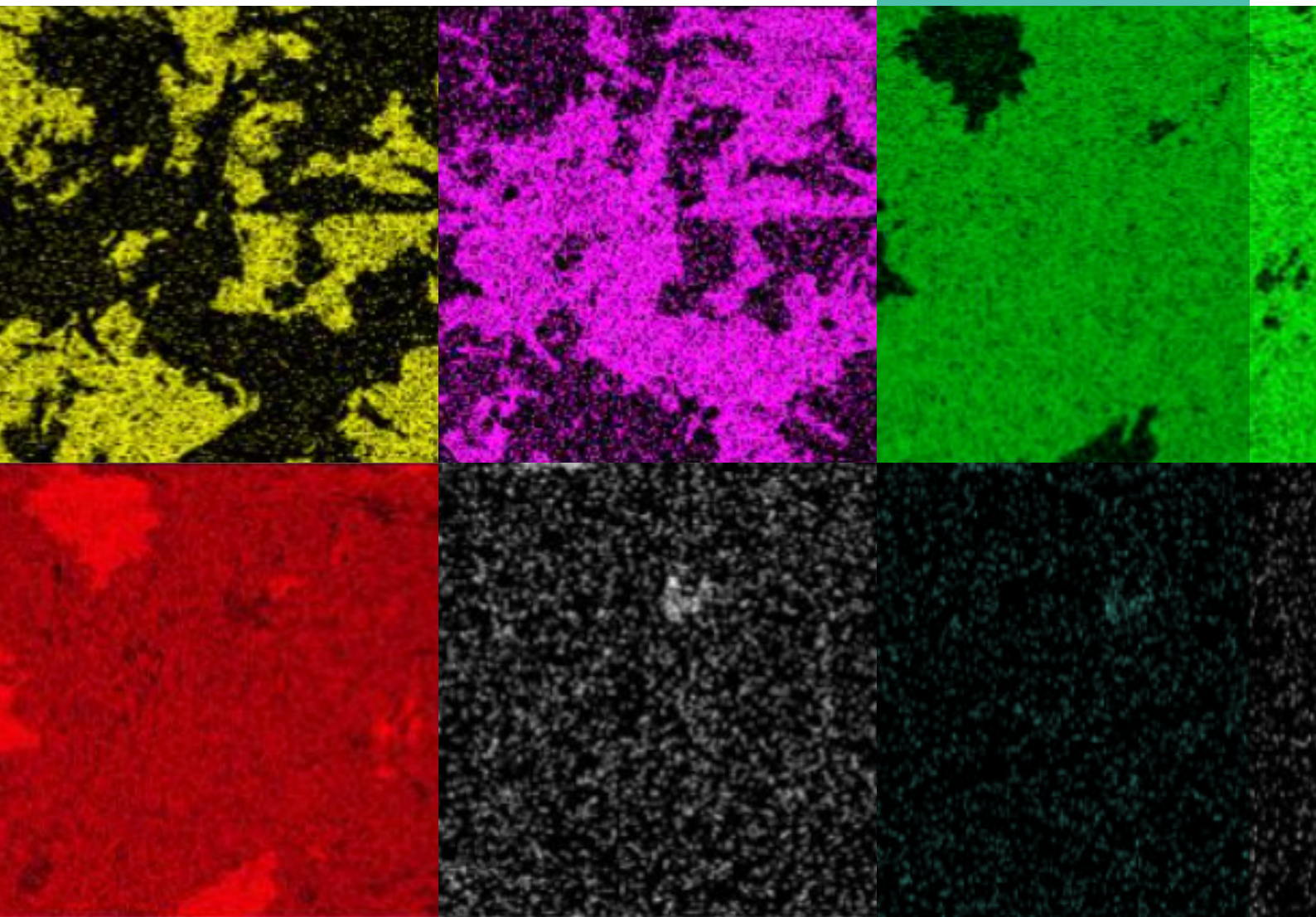
# IPT

Tecnologia  
e inovação

# 15

ipt  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLÓGICAS

Dezembro/2020



## ROCHAS DE REVESTIMENTO

Origem de manchas laranjas e dificuldade de sua detecção em microscópio eletrônico no granito branco

## MONITORAMENTO DE GASES

Metodologia desenvolvida pelo IPT garante integridade do equipamento e segurança da equipe técnica

## INSPEÇÃO EM EQUIPAMENTOS

Estudo avalia consequências econômicas e impactos de falhas em trabalhadores, sociedade e meio ambiente



## REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.4, n.15, dezembro, 2020

Quadrimestral

### Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado

Andreia Longuinho da Silva

Zehbour Panossian

### Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado

Silas Derenzo

### Assistentes Editoriais

Augusto Max Colin

Bruno D. Francisco da Silva

Ester Garcia Ferreira da Silva

Hamilton Lelis Ito

João Antonio Rodrigues Garcia

Luiz Silviano

Maria Natalina Martins

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

## Créditos técnicos

DIAGRAMAÇÃO E ARTE:  
Luiz Silviano

REVISÃO:  
Eduardo Luiz Machado

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã  
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830

# #15

Revista IPT:  
Tecnologia  
e inovação



## SUMÁRIO

### Artigos técnicos

p.06

Análise da implementação da metodologia de inspeção baseada em risco em equipamentos estáticos em uma planta química

Autores: Vitor Alves Del Duca, Silas Derenzo

p.36

Metodologia desenvolvida pelo IPT de monitoramento contínuo dos gases efluentes de alto-forno durante o processo de abaixamento de carga (*blow down*)

Autor: Renato Vergnhanini Filho

p.44

*Failure analysis – a duty of IPT*

Autores: Hamilton Lelis Ito, Jonas de Carvalho Gomes

p.71

Estudo de manchamento alaranjado em granito branco

Autores: Eduardo Brandau Quitete, Natasha da Silveira Pinto,  
Mírian Cruxên Barros de Oliveira

p.95

Avaliação pós-ocupação para acústica de salas de aula - estudo de caso em escolas técnicas do Estado de São Paulo

Autores: Lúcio Paulo de Paula, Maria Akutsu, Henrique Lima Pires

## TECNOLOGIA DO CONFORTO, DA SEGURANÇA E DO DESEMPENHO



Jefferson de Oliveira Gomes  
Diretor-Presidente do IPT

Entregamos aqui a décima quinta edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação'. Cinco artigos técnicos foram selecionados com rigor, o que é marca editorial nas publicações que têm a chancela do Instituto. São apresentados estudos técnicos avançados e em áreas tão distintas quanto avaliação acústica em salas de aula pós-ocupação, monitoramento de gases em alto-forno, inspeção com base em risco num equipamento estático em planta industrial e análise de falhas em estruturas metálicas.

Abre esta edição o artigo "Análise da implementação da metodologia de inspeção baseada em risco em equipamentos estáticos em uma planta química". São seus autores Vitor Alves Del Duca, do Monitoramento Industrial da GE Digital S.A. e mestre pelo Mestrado Profissional em Processos Industriais do IPT; e Silas Derenzo, pesquisador do Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas e docente do Mestrado Profissional do IPT. Avalia-

se o nível de risco a que vasos, tanques e tubulação], estão potencialmente sujeitos e estratégias de inspeções. São avaliados impactos de falhas em trabalhadores, sociedade e ambiente.

Em seguida vem o artigo intitulado "Metodologia desenvolvida pelo IPT de monitoramento contínuo dos gases efluentes de alto-forno durante o processo de abaixamento de carga (*blow down*)", de autoria do pesquisador Renato Vergnhanini Filho, do Laboratório de Engenharia Térmica (LET) do IPT. Apresenta-se metodologia de monitoramento contínuo dos gases efluentes de alto-forno, durante o processo de abaixamento de carga denominado *blow down*, visando o controle do processo para garantir a integridade do equipamento e da própria equipe técnica envolvida no processo.

Na sequência uma versão em inglês de artigo intitulado "Failure analysis – a duty of IPT". A autoria é dos pesquisadores Hamilton Lelis Ito e Jonas de Carvalho Gomes, da Fundação de Apoio ao IPT. Praticamente desde 1900 o Instituto atua na análise de falhas em estruturas metálicas, visando identificar suas causas para evitar que se repitam. Neste artigo são apresentados casos emblemáticos de análise de falhas feitas por equipes do IPT, visando estabelecer critérios para monitorar e intervir corretamente antes de uma ocorrência.

Segue-se o artigo "Estudo de manchamento alaranjado em granito branco", de Eduardo Brandau Quitete, do Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT; Natasha da Silveira Pinto, da Fundação de Apoio ao IPT; e Mirian Cruxên Barros de Oliveira, pesquisadora vinculada à Diretoria de Inovação do IPT. O aparecimento de manchas alaranjadas em rochas de revestimento é conhecido. Este trabalho aponta a causa nas concentrações de ferro remobilizado, sua origem e dificuldades para detecção microscópica.

Fecha a edição artigo intitulado "Avaliação pós-ocupação para acústica de salas de aula - estudo de caso em escolas técnicas do Estado de São Paulo". Os autores são Lúcio Paulo de Paula, engenheiro civil e mestre pelo Mestrado Profissional do IPT em Habitação: Planejamento e Tecnologia; Maria Akutsu, pesquisadora do Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios e docente do Mestrado Profissional do IPT; Henrique Lima Pires, engenheiro civil e pesquisador do Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios do IPT. O objetivo neste estudo foi a 'Avaliação Pós-Ocupação' (APO) de escolas técnicas da rede pública na cidade de São Paulo.

Boa leitura!

# Análise da implementação da metodologia de inspeção baseada em risco em equipamentos estáticos em uma planta química

*Implementation analysis of risk-based inspection methodology in static equipment for a chemical plant*

Vitor Alves Del Duca<sup>ab</sup>, Silas Derenzo<sup>bc</sup>

a Monitoramento Industrial ,GE Digital S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Mestrado Profissional em Processos Industriais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil

c Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: [derenzo@ipt.br](mailto:derenzo@ipt.br)

Palavras-chave:

inspeção equipamento estático; gestão de risco; integridade mecânica; ensaio não destrutivo; inspeção baseada em risco.

*Keywords:*

*inspection for static equipment; risk management; mechanical integrity; non-destructive test; risk based inspection.*

## Resumo

A inspeção em equipamentos estáticos vem ganhando destaque no cenário industrial nacional e internacional. Tendo o objetivo de se garantir a integridade física dos ativos, reduzir o risco de incidentes e acidentes que podem levar a perdas financeiras e de vidas devido a falhas na gestão e controle da integridade/corrosão. No Brasil, a norma regulamentadora NR-13 (MT ,2017) define a frequência de inspeção dos equipamentos pressurizados estáticos, porém ela não aborda temas como a gestão de riscos dos equipamentos. O estudo, aplica a metodologia de inspeção baseada em risco (IBR) baseada na norma API-580 (API(a), 2016), de forma complementar à NR-13, e padrões corporativos de inspeção aos equipamentos não enquadrados na NR-13. Avaliando-se o nível de risco a que os equipamentos estão suscetíveis, e verificando suas estratégias de inspeções de acordo com os potenciais mecanismos de danos a que estão suscetíveis. No estudo, foram selecionados cinco equipamentos, entre vasos, tanques e tubulação. A metodologia avaliou as consequências que uma falha pode ter aos trabalhadores, sociedade e meio ambiente e bem como as consequências econômicas decorrentes de uma parada operacional não programada da unidade de processos. Como resultado, concluiu-se que vasos de pressão devem seguir a frequência de inspeção já definida pela NR13, porém com a atualização do escopo das técnicas de inspeção, mais aderente a detecção dos

mecanismos de danos suscetíveis. Os tanques atmosféricos e a tubulação, tiveram diferentes classificações de riscos, com a possibilidade de modificação da estratégia de inspeção mais aderente aos mecanismos de danos e um aumento dos intervalos de inspeções de pelo menos 25%, quando comparado aos praticados antes da análise.

## Abstract

The inspection of static equipment has been gaining prominence in the national and international industrial scene. With the objective of guaranteeing the physical integrity of the assets, reducing the risk of incidents and accidents that can lead to financial losses, and of lives due to failures in the management and control of integrity/corrosion. In Brazil, the regulatory standard NR-13 (MT, 2017) defines the frequency of inspection of static pressurized equipment, but it does not address issues such as risk management of equipment. The study applies the risk-based inspection methodology (IBR) based on the API-580 standard (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (a), 2016), in a complementary way to NR-13, and corporate inspection standards for equipment not covered by NR-13. Assessing the level of risk to which the equipment is susceptible and verifying their inspection strategies according to the potential mechanisms of damage to which they are susceptible. In the study, five pieces of equipment were selected, among vessels, tanks, and piping. The methodology evaluated the consequences that failure can have on workers, society, and the environment, as well as the economic consequences resulting from an unscheduled operational shutdown of the processing unit. As a result, it was concluded that pressure vessels should follow the inspection frequency already defined by NR13, but with the update of the scope of inspection techniques, more adherent to the detection of the mechanisms of susceptible damage. The atmospheric tanks and the piping had different risk classifications, with the possibility of modifying the inspection strategy more adherent to the damage mechanisms and an increase in the inspection intervals of at least 25% when compared to those practiced before the analysis.

## 1 Introdução

A corrosão é um dos principais fenômenos de deterioração que afeta a vida dos equipamentos e tubulações em plantas de processos químicos (PERUMAL, 2014). Ela pode acarretar na ocorrência de falhas e ocasionar vazamentos, perdas de produção, acidente aos colaboradores e impactos ao meio ambiente (PERUMAL, 2014). Consequentemente, verificou-se um importante desenvolvimento do tema de gestão do risco e integridade mecânica nas últimas décadas (SANDERS, 2015). Inspectores e engenheiros de integridade mecânica, responsáveis pelas inspeções e gestão dos programas relacionados à área, deixaram de ter um papel coadjuvante nas operações. Suas atividades passaram ter mais representatividade e reconhecimento na indústria. Estes profissionais participam ativamente de decisões estratégicas nas unidades em que trabalham.

Estudos mostram que a corrosão global possui um custo estimado em 2,5 trilhões de dólares americanos, equivalente a 3,4 % do Produto Interno Bruto (PIB) global. Com programas de controle e gestão da corrosão, estima-se a possibilidade de uma economia entre 15 a 35 % nos custos totais, podendo alcançar a economia de 875 bilhões de dólares americanos anualmente (NACE INTERNATIONAL, 2016).

No Brasil, está em vigência a norma regulamentadora NR-13, aplicável aos equipamentos estáticos como por exemplo caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques atmosféricos. A NR-13 define as frequências de inspeção baseada no tempo, sem uma definição das atividades mínimas para as inspeções internas e externas (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2017). Para empresas que possuem equipe própria de inspeção e de gestão dos programas de manutenção, a própria NR-13 prevê a modalidade Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos (SPIE) (MT, 2017). Isto abre a possibilidade de extensão dos prazos das inspeções internas e externas. Porém, a norma não aborda, em sua avaliação, uma classificação e gestão de risco com a probabilidade e consequência de falha para os equipamentos.

Os custos envolvendo a manutenção podem alcançar 40% do orçamento anual da unidade, devido a fatores tais como a não otimização dos tempos e escopos das inspeções/manutenções, elevado número de equipamentos, idade avançada das unidades fabris, novas de normas e padrões nacionais e internacionais mais restritivas. Busca-se, então, a solução através de estratégias de manutenção otimizadas e com um viés focado em segurança, algo valorizado no mercado (ETI; OGAJI; PROBERT, 2006).

Em 1993 a American Petroleum Institute (API) conduziu um projeto envolvendo 21 refinarias de petróleo com o objetivo de desenvolver uma metodologia para inspeções baseadas na avaliação de riscos existentes a casa equipamento. O resultado desse esforço foi a metodologia criada pela norma API-580, que explica e detalha as etapas e padrões para se criar e implantar uma nova estratégia de inspeção baseada nos riscos de falha do equipamento (ROBERGE, 2012). A metodologia tem o potencial de eliminar uma lacuna existente quanto à falta de otimização sobre as frequências de inspeção e das atividades de inspeção que a NR-13 estabelece atualmente, acrescentando uma análise e gestão de riscos nos equipamentos estáticos. A inspeção baseada em risco mostra ser uma forma eficaz de melhorar indicadores de confiabilidade, alavancar o aprimoramento da cultura de segurança de processo e o conhecimento técnico dos riscos associados a falhas na operação e no funcionamento da unidade (ETI; OGAJI; PROBERT, 2006).

O presente trabalho aplica a metodologia da norma API-580 em 5 equipamentos de uma planta química. Nesse trabalho é definido e avaliado o risco (consequência e probabilidade de falha) de cada equipamento aos respectivos mecanismos de danos. Após a classificação dos riscos são definidas as técnicas de inspeção mais adequadas e eficientes para detectar e mensurar os mecanismos de danos mapeados na análise de risco (API, 2011). Os resultados são avaliados de forma a evidenciar os benefícios desta técnica na classificação de risco dos equipamentos, definição de estratégia de inspeção, complementação da legislação vigente e normas internas da corporação. Os benefícios avaliados são:

- A melhoria na estratégia de inspeção com atividades de maior aderência técnica aos mecanismos de degradação e corrosão a que os equipamentos estáticos estão sujeitos.
- Os novos intervalos de inspeção dinâmicos quando comparados com a estratégia atual, baseada em intervalos fixos definido via NR-13 ou normas internas da corporação.

## 2 Procedimento metodológico

### 2.1 Descrição do problema

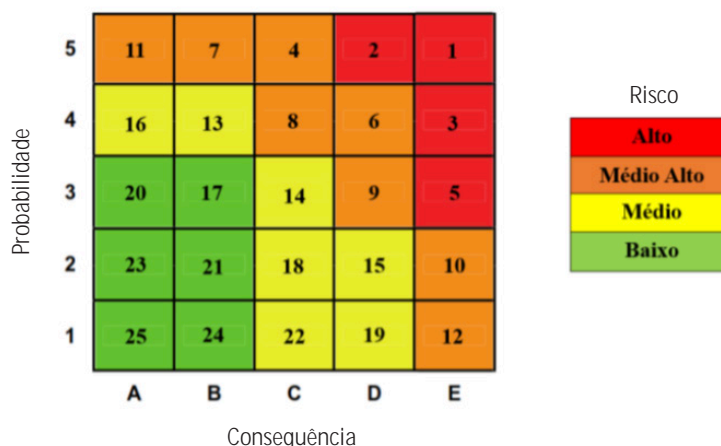
A unidade química no qual o estudo foi realizado possui mais de 40 anos de operação. Os equipamentos dessa unidade podem estar em estado avançado de degradação e corrosão caso um programa efetivo de gestão e inspeção não tenha sido aplicado no passado. Informações críticas para uma gestão de risco e integridade mecânica, como taxa de corrosão dos equipamentos, desenhos de projetos e escopo de inspeções alinhado aos mecanismos de danos são pontos deficitários no cenário atual da unidade. A unidade produtiva se encontra próxima a uma área urbana e com a presença de áreas ambientais e rio em suas proximidades. Este fato corrobora para uma melhor definição e gestão dos riscos dos equipamentos estáticos, a fim de se evitar possíveis falhas e impactos a comunidade e corporação.

### 2.2 Seleção dos equipamentos e classificação do risco

A unidade química estudada possui mais de 30 anos de operação. O critério de seleção de equipamentos considerou a seleção daqueles com idades distintas (com até 5 anos e com mais de 20 anos) além de trabalharem com fluidos de classes e pressões diferentes. Com isso tem-se uma visão dos resultados da metodologia tanto para equipamento com fluidos perigosos, quanto com fluidos não perigosos e sob baixa pressão. Na aplicação da metodologia de inspeção baseada na norma API-580, foram selecionados quatro equipamentos e uma tubulação: tanque 01, de recebimento de matéria prima; tanque 02 de recebimento de efluentes; vaso de pressão 01 de ar comprimido; vaso de pressão 02 de gás inorgânico e a tubulação 01 de efluentes da planta.

Para a avaliação de risco são necessários dados operacionais e especificações técnicas, tais como o material de fabricação, dimensões de fabricação e projeto, volume, características do fluido principal como pH, temperatura, porcentagem de sólidos, pressão de trabalho, íons livres, etc. A base de dados é composta por documentos auxiliares, tais como análises de riscos anteriores, históricos de manutenção e inspeções, desenhos e memoriais de cálculo do projeto. O risco foi classificado utilizando a matriz da Figura 1, que mostra a relação entre probabilidade de falha e consequência da falha.

Figura 1 - Matriz de Classificação de Risco



Fonte: (API (b), 2016).

A definição da probabilidade conforme descrito nas seções seguintes, irão gerar a classificação final do risco e seu nível. Os equipamentos e tubulação selecionados foram analisados de acordo com os seus potenciais mecanismos de dano, taxas de corrosão e fluidos predominantes.

## 2.3 Avaliação e classificação da probabilidade de falha

Na avaliação qualitativa da probabilidade de falha os equipamentos foram divididos em componentes e, para cada um deles, foram analisados os mecanismos de danos. Estes foram confirmados através de relatórios de inspeções anteriores e os seus potenciais de risco, segundo referências e a experiência dos especialistas envolvidos.

Todos os mecanismos de danos avaliados foram apresentados de forma individual para cada componente e seu potencial risco de falha, considerando os fatores de histórico de inspeções, frequência, escopo e técnicas adequadas para identificar os mecanismos, taxa de corrosão real (baseada em históricos de medições) ou teórica, efetividade e confiabilidade de inspeções passadas e reparos, e também o histórico de mudanças de processo e condições operacionais. A Tabela 1 apresenta as 5 categorias finais de classificação da probabilidade de falha. O valor final da probabilidade foi selecionado pelo mais crítico. Essa tabela é uma referência fornecida pela API-580, como um padrão para classificação da probabilidade de falha em análise quantitativa e contém adaptações para a taxa de corrosão por ano de acordo com as taxas encontradas na unidade.

Tabela 03 – Resultados das avaliações com os gestores

Categoria		Descrição	Taxa Corrosão (mm/ano)
5	Muito Alto	1 ou mais em 10 casos de falha em uma base anual	Desconhecida ou > 0,254mm/ano
4	Alto	1 ou mais em 100 casos de falha em uma base anual	< 0,254mm/ano ou > 0,127mm/ano
3	Moderado	1 ou mais em 1000 casos de falha em uma base anual	< 0,127mm/ano ou > 0,06 mm/ano
2	Baixo	1 ou mais em 10000 casos de falha em uma base anual	< 0,06 mm/ano
1	Muito Baixo	Menos de 1 em 10000 casos de falha em uma base anual	Inexistente

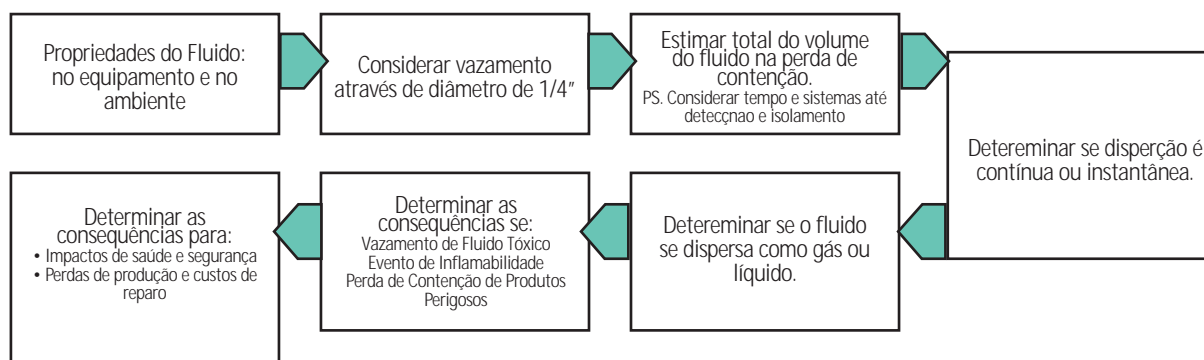
Fonte: adaptado da API (a) (2016)

## 2.4 Avaliação e classificação das consequências de falha

O processo de definição e classificação das consequências de falha dos equipamentos considera como resultante no cálculo final da consequência os tópicos de saúde e segurança, meio ambiente e custos para o negócio em caso de falha. Os três itens foram analisados de forma individual para cada componente e o valor de maior criticidade foi considerado como resultante da consequência de falha. Documentos e relatórios de avaliações de risco, provenientes de estudos elaborados pela equipe de segurança de pessoas e de processo, como HAZOP, e estudos pontuais de impactos ambientais ou à comunidade, foram considerados como material auxiliar na classificação da consequência.

A avaliação qualitativa da consequência seguiu o fluxo apresentado na Figura 2, que determina as etapas a serem seguidas no processo padrão de avaliação e classificação da consequência da falha para cada um dos componentes.

Figura 2 - Fluxo da Análise de Consequência de Falha



Fonte: elaborado pelos autores. Adaptado da API (a) (2016)

### 2.4.1 Consequências à saúde e segurança

Na Tabela 2 são apresentados os critérios para a classificação final da severidade da consequência da falha, do ponto de vista de saúde e segurança para a unidade. A definição desses critérios foi baseada em guias e classificações internas de saúde e segurança da corporação.

Tabela 2 – Categorias Consequências Potenciais de Danos à Saúde e Segurança

Severidade	Uma ou mais consequências a seguir
E	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Fatalidades e lesões permanentes dos colaboradores e comunidade externa</li> <li>· Necessidade de atendimentos médicos externo a unidade</li> </ul>
D	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Lesões permanentes dos colaboradores</li> <li>· Necessidade de atendimentos médicos externo a unidade</li> </ul>
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Atendimentos de primeiros socorros na unidade com necessidade de atendimento externo posteriormente</li> <li>· Lesões de curto e médio prazo provocando afastamento dos colaboradores</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Atendimentos básicos de primeiros socorros na unidade sem necessidade de atendimento externo posterior</li> </ul>
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sem consequências significativas (quase acidente) e impacto às pessoas próximas ou envolvidas na ocorrência.</li> <li>· Necessário registro para fins de controle e indicadores.</li> </ul>

Fonte: elaborada pelos autores

### 2.4.2 Consequências ao meio ambiente

Foram consideradas as especificidades das legislações municipal, estadual e federal a que unidade está submetida e as normas internas da empresa relacionadas ao meio ambiente para a classificação de acidentes e incidentes. Para a análise das consequências ao meio ambiente foi utilizada a Tabela 3, sendo apresentados os critérios de classificação para as consequências de meio ambiente. A definição desses critérios fora baseada em guias e classificações internas de meio ambiente da corporação.

Tabela 3 – Categorias Consequências Potenciais relativas ao Meio Ambiente

Severidade	Uma ou mais consequências a seguir
E	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Danos permanentes ou longo prazo ao ecossistema externo a unidade produtiva</li> <li>· Evacuação da comunidade</li> <li>· Desligamento e/ou evacuação da unidade</li> <li>· Multas e autuações por órgãos de fiscalização</li> <li>· Repercussão na mídia nacional/internacional</li> </ul>
D	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Necessidade de remediações fora da unidade produtiva (comunidade externa)</li> <li>· Ameaça a licença operacional</li> <li>· Descumprimento de normas regulatórias</li> <li>· Interrupção parcial da unidade e pequenos impactos na comunidade</li> <li>· Repercussão na mídia local</li> </ul>
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Incidentes reportáveis a autoridades locais</li> <li>· Não atendimento a requerimentos externos – legislações</li> <li>· Necessidade de remediações dentro da unidade produtiva</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Incidentes reportáveis dentro da corporação com investigação formal e divulgação das causas raiz e ações de correção</li> </ul>
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sem consequências ambientais (vazamentos de água, ar e vapor)</li> <li>· Incidentes não reportáveis dentro dos padrões da corporação</li> </ul>

Fonte: elaborada pelos autores

### 2.4.3 Consequências financeiras

As consequências financeiras consideram as perdas de produção em função das paradas do sistema produtivo para a realização da manutenção corretiva das suas falhas. Também são considerados os custos envolvidos no reparo e a perda de produto devido à perda de contenção. Para o cálculo das perdas produtivas foram utilizados os valores de referência apresentados na Tabela 4 para a classificação das perdas financeiras para a unidade em específico. Nela, o valor de "X" indica o valor calculado referente as perdas financeiras devido a falha que deve ser utilizado na comparação e classificação da severidade. A definição desses critérios foi baseada na capacidade produtiva e faturamento da unidade produtiva em análise.

Tabela 4 – Categorias consequências financeiras

Consequências financeiras		
Severidade	Custos Perdas de Produção (R\$)	% Impacto no Faturamento
E	$X > R\$10.000.000,00$	$X > 80\%$
D	$R\$2.000.000,00 < X < R\$10.000.000,00$	$60\% < X < 80\%$
C	$R\$500.000,00 < X < R\$2.000.000,00$	$40\% < X < 60\%$
B	$R\$ 50.000,00 < X < R\$500.000,00$	$20\% < X < 40\%$
A	$X < R\$50.000,00$	$0\% < X < 20\%$

Fonte: elaborado pelos autores

## 2.5 Classificação do risco

O risco (R) resultante da combinação dos resultados obtidos pelo produto entre a probabilidade de falha (POF) e a consequência de falha (COF), conforme a Equação 1.

$$R = POF \times COF \quad (1)$$

Os riscos de cada equipamento foram tabelados, classificados e incluídos na matriz final (**Figura 1**), permitindo visualizar a classificação de todos dos riscos da unidade relacionados à integridade mecânica (perda de contenção).

Para a unidade avaliada o limite de risco aceitável pela empresa é o médio alto. Nenhum dos riscos que estejam classificados nos quadrantes de 1 a 5 da **Figura 1** serão aceitos. Assim, são necessárias ações com investimentos por parte da empresa para reduzir a probabilidade de falha ou consequência. Mudanças tais como redução de volume, sistemas de alarme ou redundâncias são capazes de impactar e reduzir a consequência. A realização de inspeções mais frequentes, com escopos mais abrangentes, em aderência aos mecanismos de dano, pode auxiliar na redução da probabilidade da falha.

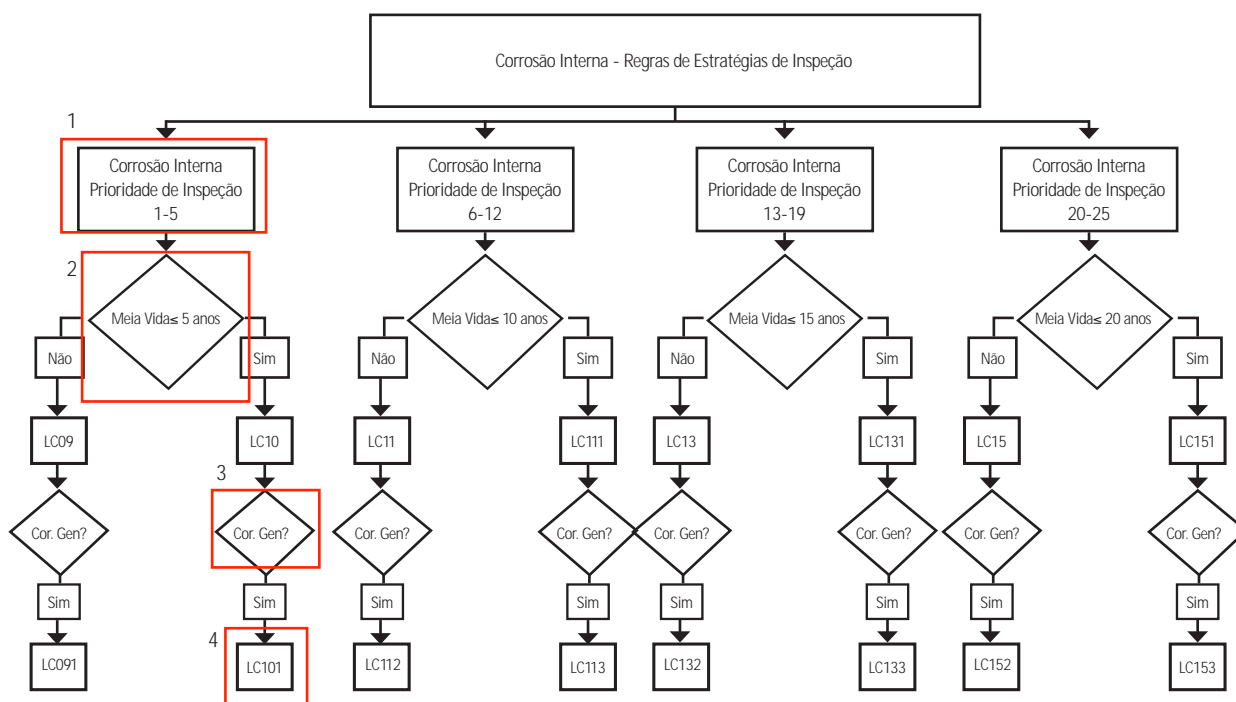
## 2.6 Definição da estratégia de inspeção e frequências

A estratégia de inspeção para os componentes dos equipamentos, baseada nas recomendações da API-580, foi adequada à realidade da unidade e região. Os intervalos para as inspeções foram definidos de acordo o mecanismo de dano, classificação do risco e tipo de equipamento. A metodologia da API 581 deixa explícito no item 4.4.2-letra F, que a definição do intervalo máximo entre as inspeções está sujeita à legislação local ou ao critério da corporação que está implementando o procedimento. Foi utilizado como referência o documento da GE Meridium – “RBI Inspection Strategies” (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2016), com o escopo e a frequência de inspeção através de lógicas baseadas na classificação do risco de cada componente. A **Figura 3** mostra um exemplo do fluxo decisório para a definição da frequência e escopo de inspeção e a estratégia de inspeção proposta pelo documento para o mecanismo de dano de corrosão interna.

O fluxo começa pela classificação do risco entre as 4 categorias possíveis, conforme mostrado na **Figura 3** (ponto 1). Na próxima etapa (ponto 2) verifica-se a vida remanescente do equipamento, ou seja, pelos cálculos de perda de espessura, em quantos anos o equipamento irá atingir a espessura mínima definida no seu projeto. O mecanismo de dano de corrosão generalizada deve ser analisado (ponto 3); havendo a existência dele, o fluxo deve continuar; na sua ausência deve-se utilizar a estratégia correspondente à pergunta anterior. Caso o mecanismo de dano de corrosão generalizada

esteja presente, a estratégia (ponto 4) deverá ser escolhida. Essa será a estratégia final para o mecanismo de dano em análise. Para cada uma das estratégias apresentadas, há uma frequência e escopo mínimo proposto pelo documento.

Figura 3 – Fluxo de seleção de escopos de inspeção – corrosão interna



Fonte: Adaptado de GENERAL ELECTRIC COMPANY (2016)

## 2.7 Análise crítica da estratégia de inspeção proposta

A análise crítica entre as estratégias de inspeções atuais (NR-13 ou guias internos) e a novas propostas pela metodologia de inspeção baseada no risco foi realizada para identificar os principais benefícios potencialmente presentes, bem como melhorias de gestão de riscos e as informações sobre os ativos adquiridas durante o processo de implementação. Avalia-se como a implementação da metodologia da inspeção baseada em risco pode auxiliar e complementar as atuais estratégias de inspeção da unidade. Também se discute como a metodologia pode agregar benefícios durante sua implementação, e identificar deficiências relativas à gestão e atualização de informações e documentos dos ativos analisados.

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Seleção de ativos

As Tabelas 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam os dados técnicos de operação e projeto dos equipamentos 5 equipamentos selecionados para o estudo. Os materiais dos equipamentos seguem a referência da norma ASTM e unidades do Sistema Internacional (SI).

Tabela 8 – Tanque 01 - Tanque de Recebimento Matéria Prima - Especificação

Volume (m <sup>3</sup> ):	~95
Material fabricação:	ASTM A240-316L
Fluido de Processo:	Matéria Prima inorgânica + Água Quente
Temperatura de Operação (°C):	150
Pressão de Operação (kgf/cm <sup>2</sup> ):	Atmosférica
Código de Fabricação:	ASME VIII Div I ed. 2007
Máxima Pressão de Trabalho Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> ):	1,05

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 9 Tanque 02 – Tanque de Recebimento de Efluentes- Especificação

Volume (m <sup>3</sup> ):	~5350
Material fabricação:	ASTM A285 Gr C
Fluido de Processo:	Efluentes
Temperatura de Operação (°C):	42
Pressão de Operação (kgf/cm <sup>2</sup> ):	Atmosférica
Código de Fabricação:	API- 650 ed. 2007
Máxima Pressão de Trabalho Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> ):	Atmosférica

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 10 – Vaso de Pressão 01 -Vaso para Ar Comprimido- Especificação

Volume (m <sup>3</sup> ):	13
Material fabricação:	ASTM A283
Fluido de Processo:	Ar Comprimido
Temperatura de Operação (°C):	60
Pressão de Operação (kgf/cm <sup>2</sup> ):	9,0
Código de Fabricação:	ASME VIII Div I ed. 1986
Máxima Pressão de Trabalho Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> ):	12,9

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 11 – Vaso de Pressão 02- Vaso de Pressão de Gás Inorgânico - Especificação

Volume (m <sup>3</sup> ):	100
Material fabricação:	ASTM A516 Gr 70
Fluido de Processo:	Gás Tóxico
Temperatura de Operação (°C):	35
Pressão de Operação (kgf/cm <sup>2</sup> ):	10
Código de Fabricação:	ASME VIII Div I ed. 1998 U-Stamp
Máxima Pressão de Trabalho Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> ):	25,6

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 12 – Tubulação 01 – Tubulação de efluentes da planta - especificação

Volume (m <sup>3</sup> ):	6
Material fabricação:	ASTM A312 TP304
Fluido de Processo:	Efluentes
Temperatura de Operação (°C):	90
Pressão de Operação (kgf/cm <sup>2</sup> ):	4
Data fabricação:	2001
Código de Fabricação:	ASME B31.3 – Process Piping
Máxima Pressão de Trabalho Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> ):	40 @ 150 °C

Fonte: elaborado pelos autores

### 3.2. Análise da probabilidade de falha

As Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17 apresentam os resultados das análises dos equipamentos e as discussões que originaram os valores de POF de cada seção, resultando na seleção do POF final pelo maior valor obtido. Para definir cada uma das probabilidades de falhas apresentadas nessas tabelas, foram utilizados os critérios de histórico de falha e taxas de corrosão.

Tabela 13 – Probabilidade de falha – tanque 01 (Tq-01)

Equip.	Componente	Loc. MD	Corrosão	Justificativa	POF	POF final
Tq-01	Calota Sup.	Interno	Generalizada	SS300, pH ácido, vapores, taxa de corrosão inexistente.	1	2
		Externo	Sob Isolamento	SS300, c/ isolamento térmico, 71 °C < TEMP < 107 °C	2	
	Costado/ Calota Inf.	Interno	Generalizada	SS300, pH ácido, fluidos, taxa de corrosão inexistente.	2	3
		Externo	Pitting	SS300, pH ácido, incrustações, dados relatório de inspeção 2017	3	
			Sob Isolamento	SS300, c/ isolamento térmico, 71 °C < TEMP < 107 °C.	2	

Fonte: elaborado pelos autores

Loc. MD - Localização do mecanismo de dano

O tanque 01 é um vaso suspenso (sem partes enterradas) que opera a pressão atmosférica e armazena uma única matéria prima em solução, de modo que o costado e a calota inferior foram considerados em conjunto. A calota superior foi considerada outro componente devido ao fluido predominante ser o vapor da mistura de matéria prima com água quente. Relatórios anteriores mostraram a ocorrência de corrosão por pite nas soldas da calota inferior e costado. A POF para calota superior foi categorizada em 2 e o costado e a calota inferior em 3.

Tabela 14 – Probabilidade de falha – tanque 02 (Tq-02)

Equip.	Componente	Loc. MD	Corrosão	Justificativa	POF	POF final
Tq-02	Fundo	Interno	Generalizada	Carbono, serviço efluentes c/oxigênio, dados relatório inspeção 2010.	1	3
		Externo	Solo	Carbono, fundação concreto, taxa padrão de corrosão < 0,127 mm/ano	3	
	Costado	Interno	Generalizada	Carbono, serviço efluente c/oxigênio, taxa padrão de corrosão < 0,063 mm/ano.	2	2
		Externo	Atmosférica	Carbono, sem isolamento térmico.	1	

Fonte: elaborado pelos autores

No tanque 02 foi identificado que o costado e fundo do tanque possuíam características e formas de degradação distintas, levando a criação de dois componentes, costado e fundo. Os componentes possuem taxas de corrosão distintas devido a uma deficiência no sistema de proteção catódica do equipamento. A classificação da POF foi de 3 para o fundo e para o costado foi de 2.

Tabela 15 – Probabilidade de Falha – Vaso 01

Equip.	Componente	Loc. MD	Corrosão	Justificativa	POF	POF final
Vaso 1	Calota Sup./ Costado	Interno	Generalizada	Carbono, ar instrumentos, taxa padrão de corrosão < 0,063 mm/ano.	2	2
		Externo	Atmosférica	Carbono, sem isolamento térmico.	1	
	Calota Inf.	Interno	Generalizada	Carbono, ar instrumentos + água, taxa padrão de corrosão > 0,127 mm/ano.	4	4
		Externo	Atmosférica	Carbono, sem isolamento térmico.	1	

Fonte: elaborado pelos autores

O vaso 01 é um tanque pulmão para o ar de instrumentação, localizado na área de utilidades. Relatórios anteriores de inspeção mostraram severa corrosão generalizada (> 0,127mm/ano) na calota inferior devido ao acúmulo de água entre as purgas do vaso, de modo que a POF da calota superior e costado foi classificada em 2 e a calota inferior em 4

Tabela 16 – Probabilidade de falha – vaso 02

Equip.	Componente	Loc. MD	Corrosão	Justificativa	POF	POF final
Vaso 1	Costado/ Calota	Interno	Generalizada	Carbono, amônia anidra, taxa padrão de corrosão <0,063mm/ano.	3	3
			Sob Tensão	Carbono, amônia anidra, CST – Soldas	2	
		Externo	Atmosférica	Carbono, sem isolamento térmico.	1	

Fonte: elaborado pelos autores

O vaso 02 é horizontal e armazena um gás tóxico. Ele não possui histórico de perdas de espessura ou outros danos ativos ao longo da vida, porém, a literatura mostra o risco de alta incidência de corrosão sob tensão em pontos de acúmulo de tensão, como juntas de soldas. Dessa forma, a POF para calotas e costado é 3.

Tabela 17 – Probabilidade de falha – tubulação 01

Equip.	Componente	Loc. MD	Corrosão	Justificativa	POF	POF final
Tub. 1	Tub.	Interno	Generalizada	SS300, pH ácido, taxa de corrosão inexistente.	1	3
			Sob Tensão	SS300, cloretos, TEMP > 60 °C, CST – Soldas (General Electric Company, 2016)	3	
		Externo	Sob Tensão	SS300, cloretos, TEMP > 60 °C, CST – Soldas (General Electric Company, 2016)	3	

Fonte: elaborado pelos autores

A tubulação 01 é de aço inoxidável e transporta os efluentes quentes gerados na planta principal. A tubulação não possui revestimento térmico. Não foram encontradas evidências de inspeções que verificassem os pontos de soldas interna e externas utilizando técnicas efetivas tais como líquido penetrante ou "phased array". A literatura mostra uma alta incidência de corrosão sob tensão em pontos de acúmulo de tensão tais como pontos de soldas, e assim a POF para a tubulação é 3.

### 3.3 Análises das consequências de falha

A seguir são apresentadas as classificações para os equipamentos considerando as categorias financeiras, saúde e segurança bem como meio ambiente. Na classificação da consequência financeira dos cinco equipamentos considerou-se a capacidade produtiva da unidade de 2.000 kg/dia de produto, com margem financeira de R\$150,00 por kg. Alguns dos equipamentos analisados podem impactar na parada total ou parcial da unidade ou não gerar impacto devido a redundâncias. O cálculo do escopo de reparo no equipamento considerou uma falha padrão com o vazamento através de um furo com diâmetro padrão de 1/4" (~6,3 mm).

- Tanque 01

A consequência financeira apresentada no **Quadro 1** é resultante da criticidade e ausência de um tanque auxiliar ou de reserva e das operações de um conjunto de atividades necessárias para seu reparo e parada da unidade, reparo e partida, que demandam em média 7 dias. Com o tanque parado nesse período é necessário interromper a produção, pois ele recebe todos os efluentes gerados na unidade. Como o tanque não possui sistemas automáticos de detecção de vazamentos, a identificação da falha se dá na ronda dos operadores na área, o que ocorre a cada uma hora, de forma que o tempo de detecção da falha é de 60 minutos. Assim a perda financeira foi estimada em R\$ 2.150.000,00.

Quadro 1 – Cálculo Consequência Financeira Tanque 01

Planta:	Utilidades/Efluentes
Capacidade produtiva	200
Margem (R\$/kg)	R\$ 150,00
Margem (R\$/dia)	R\$ 300.000,00
Tag equipamento	Tanque 1
Descrição equipamento	Tanque Efluentes
Tempo de reparo (dias)	7
Redução Produção (%)	100%
Capacidade (m <sup>3</sup> )	5369
Tempo detecção (min)	60
Tempo isolamento (min)	30
Custo Reparo	R\$ 50.000,00
Consequencia financeira	R\$ 2.150.000,00
Classificação Consequencia Financeira	D

Fonte: elaborado pelos autores

Na análise das consequências à saúde, segurança e ao meio ambiente, a avaliação do equipamento foi A e B, respectivamente. A Tabela 16 mostra a classificação dos três componentes e a classificação final D. Os efluentes não possuem classificação tóxica ou inflamável e o tanque opera a pressão atmosférica. Como o tanque possui uma caixa de contenção de concreto que pode reter o efluente emergencialmente, de modo que há um menor risco ao meio ambiente. Pelos critérios internos, uma falha desse porte exige que as causas raiz sejam investigadas, comunicadas à matriz e formalmente divulgadas.

Quadro 1 – Cálculo Consequência Financeira Tanque 01

Equip.	Comp.	Fluido	Saúde	Meio Amb.	Inflamável	Tóxico	Finan.	Final
Tanque - 01	Fundo	Efluente	A	B	N/A	N/A	D	D
Tanque - 01	Costado	Efluente	A	B	N/A	N/A	A	A

Fonte: elaborado pelos autores

- Tanque 02

A análise da consequência financeira do tanque 02 apresentada no **Quadro 2**, mostra que as perdas financeiras são da ordem de R\$932.000,00, considerando a perda de produção e gastos com o reparo, em função da necessidade de 3 dias de parada. Com a parada desse equipamento a unidade deve interromper as operações, pois não há outra opção para o recebimento e preparo inicial da formulação. O tanque não possui sistema automático de detecção de vazamentos e a forma de identificação seria através da ronda dos operadores na área a cada uma hora.

A classificação de saúde e segurança foi definida como B, uma vez que, em caso de contato direto é obrigatório realizar um atendimento padrão no ambulatório da unidade, independentemente da

Quadro 2 – Cálculo consequência financeira tanque 02

Planta:	Utilidades/Efluentes
Capacidade produtiva	200
Margem (R\$/kg)	R\$ 150,00
Margem (R\$/dia)	R\$ 300.000,00
Tag equipamento	Tanque 2
Descrição equipamento	Tanque Mat. Prima
Tempo de reparo (dias)	3
Redução Produção (%)	100%
Capacidade (m <sup>3</sup> )	98
Tempo detecção (min)	60
Tempo isolamento (min)	30
Custo Reparo	R\$ 62.000,00
Consequencia financeira	R\$ 932.000,00
Classificação Consequencia Financeira	C

Fonte: elaborado pelos autores

quantidade e local de contato com o colaborador. Quanto à avaliação ao meio ambiente, o vaso está localizado em uma área com diques, de modo que, em caso de vazamento o fluido será direcionado ao tanque de efluentes para o devido tratamento. Após a análise das consequências à saúde e segurança e meio ambiente, o equipamento foi categorizado como risco B para os dois quesitos. A **Tabela 17** mostra a classificação final como C.

Tabela 17 – Cálculo consequência final tanque 02

Equip.	Comp.	Fluido	Saúde	Meio Amb.	Inflamável	Tóxico	Finan.	Final
Tanque - 02	Calota Sup.	Mat.Prima	B	B	N/A	S	C	C
Tanque - 02	Costado / Calota Inf.	Efluente	A	B	N/A	S	C	C

Fonte: elaborado pelos autores

- Vaso de pressão 01

O resultado do vaso de pressão 01 é apresentado no **Quadro 3**. Na falha do equipamento, espera-se um impacto de R\$20.000,00, visto que esse equipamento não apresenta nenhum impacto na produção pois há outros vasos no setor de utilidades que fazem a mesma função de pulmão de ar comprimido. Foi considerado como impacto financeiro apenas os custos de reparo do vaso de pressão, considerando valores disponíveis no histórico de manutenção. Como esse equipamento não possui sistemas automáticos de detecção de vazamentos, a forma de identificação seria através da ronda de hora em hora dos operadores na área.

Quadro 3 – Cálculo consequência financeira vaso de pressão 01

Planta:	Utilidades/Efluentes
Capacidade produtiva	200
Margem (R\$/kg)	R\$ 150,00
Margem (R\$/dia)	R\$ 300.000,00
Tag equipamento	Vaso 1
Descrição equipamento	Vaso Ar Comprimido
Tempo de reparo (dias)	4
Redução Produção (%)	0%
Capacidade (m <sup>3</sup> )	13
Tempo detecção (min)	60
Tempo isolamento (min)	30
Custo Reparo	R\$ 20.000,00
Consequencia financeira	R\$ 20.000,00
Classificação Consequencia Financeira	A

Fonte: elaborado pelos autores

Na análise das consequências de saúde e segurança e de meio ambiente, a avaliação para o equipamento foi A para os dois quesitos. A **Tabela 18** mostra a classificação final como A, pois nos três critérios o equipamento obteve esta classificação. Como o equipamento armazena ar comprimido não há impactos ao meio ambiente e às pessoas conforme as tabelas de classificação.

Tabela 18 – Cálculo Consequência Final Vaso de Pressão 01

Equip.	Comp.	Fluido	Saúde	Meio Amb.	Inflamável	Tóxico	Finan.	Final
Vaso 01	Calota Sup./ Costado	Ar Comp.	A	A	N/A	N/A	A	A
Vaso 01	Calota Inf.	Ar Comp.	A	A	N/A	N/A	A	A

Fonte: elaborado pelos autores

- Vaso de pressão 02

A análise da consequência financeira do vaso de pressão 02, apresentada no Quadro 4, mostra que as perdas em caso de falha são da ordem de R\$1.550.000,00, considerando a perda de produção e

gastos com o seu reparo. Este valor resulta em uma classificação C, de acordo com a **Tabela 5**. As perdas produtivas são de 50%, pois somente uma parcela dos produtos utiliza esta matéria prima. O tempo de reparo médio foi estimado em 10 dias.

Quadro 4 – Cálculo consequência financeira vaso de pressão O2

Planta:	Utilidades/Efluentes
Capacidade produtiva	200
Margem (R\$/kg)	R\$ 150,00
Margem (R\$/dia)	R\$ 300.000,00
Tag equipamento	Vaso 2
Descrição equipamento	Vaso Gás Tóxico
Tempo de reparo (dias)	10
Redução Produção (%)	50%
Capacidade (m <sup>3</sup> )	100
Tempo detecção (min)	10
Tempo isolamento (min)	10
Custo Reparo	R\$ 50.000,00
Consequencia financeira	R\$ 1.550.000,00
Classificação Consequencia Financeira	C

Fonte: elaborado pelos autores

Na análise das consequências à saúde e segurança e meio ambiente, a avaliação do vaso de pressão de armazenamento do gás tóxico foi de D para os dois quesitos. A **Tabela 19** mostra a classificação final como D. Devido à alta toxicidade da matéria prima o sistema da unidade possui sistema de proteção contra falhas, tal como sistema de travamento automático das válvulas em caso de detecção do gás acima de determinada concentração no ar ao redor do tanque. Com isso, o tempo de detecção e isolamento em caso de falha não é superior que 10 minutos. Outro fator considerado na análise foi um estudo indicando que, em caso de vazamento de todo o produto do tanque em sua máxima capacidade, a nuvem do gás não atingiria os limites físicos da planta, porém, poderia atingir prédios de processos produtivos. Os danos ao meio ambiente são significativos, porém não são permanentes, mas a nuvem do gás afetaria de forma significativa a vegetação dentro do raio de alcance.

Tabela 19 – Cálculo consequência final vaso de pressão O2

Equip.	Comp.	Fluido	Saúde	Meio Amb.	Inflamável	Tóxico	Finan.	Final
Vaso O2	Calotas/ Costado	Amônia Anidra	D	D	N/A	S	C	D

Fonte: elaborado pelos autores

- Tubulação 01

A análise da consequência financeira da tubulação de efluentes 01 apresentada no Quadro 5 mostra que as perdas financeiras, em caso de falha, são da ordem de R\$200.000,00, considerando os custos relacionados com perda de 50% de um dia de produção, e os custos de reparo. De acordo com a tabela de consequência financeira, uma classificação B.

Quadro 5 – Cálculo consequência financeira tubulação 01

Planta:	Utilidades/Efluentes
Capacidade produtiva	200
Margem (R\$/kg)	R\$ 150,00
Margem (R\$/dia)	R\$ 300.000,00
Tag equipamento	Tubulação 1
Descrição equipamento	Tub. Efluentes
Tempo de reparo (dias)	1
Redução Produção (%)	50%
Capacidade (m <sup>3</sup> )	100
Tempo detecção (min)	10
Tempo isolamento (min)	30
Custo Reparo	R\$ 50.000,00
Consequencia financeira	R\$ 200.000,00
Classificação Consequencia Financeira	B

Fonte: elaborado pelos autores

A avaliação do equipamento foi B para o meio ambiente, visto que em caso de vazamento o fluido irá cair em uma área cimentada e de contenção, sem contato direto com o solo, porém o incidente deverá ser reportado. Para saúde e segurança a classificação foi C, visto que, em função da temperatura de operação dessa tubulação ser superior a 60° C há a possibilidade de contato com algum colaborador na ocorrência de um vazamento, exigindo atendimento de primeiros socorros e tratamento em unidade externa. A Tabela 20 mostra a classificação final C.

Tabela 20 – Cálculo consequência final tubulação 01

Equip.	Comp.	Fluido	Saúde	Meio Amb.	Inflamável	Tóxico	Finan.	Final
Tub.01	Tub.	Efluente	C	B	N/A	N/A	B	C

Fonte: elaborado pelos autores

### 3.4 Classificação final do risco

Após os cálculos de consequências e probabilidade de falha para cada um dos equipamentos e seus respectivos componentes foi obtida a classificação de risco resultante apresentada no **Quadro 6**, de acordo com a nomenclatura e cores da matriz de risco da **Figura 1**.

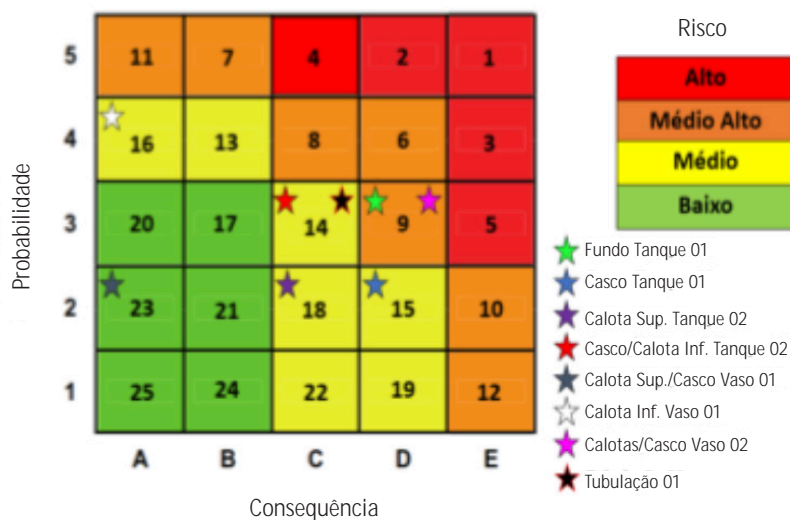
Todos os riscos resultantes nos cinco equipamentos ficaram com classificação abaixo do limite aceitável pela corporação, ou seja, os riscos classificados com valores de 1 a 5, conforme **Figura 1**, não seriam aceitos, e alguma ação de redução deveria ser implementada. Essas ações poderiam compreender desde inspeções imediatas até a alteração das condições operacionais, como a redução de volume ou pressão dos equipamentos, a fim de reduzir a consequência em caso de falha. Porém, o programa de inspeção deve ser seguido a fim de se evitar o aumento da probabilidade de falha que, conseqüentemente, levará ao aumento do risco. Após a classificação final foi constatado que nenhuma ação imediata seria necessária para se reduzir o risco. A **Figura 4** apresenta a estrela do risco final de cada equipamento e seus componentes na matriz de classificação para os equipamentos do estudo.

Quadro 6 – Classificação do Risco Equipamentos

TAG	Componente	Consequencia de falha	Probabilidade de falha	Prizificação Risco - Final	Risco
Tanque 1	Fundo	D	3	9	Médio Alto
Tanque 1	Costado	D	2	15	Médio
Tanque 2	Calota Sup.	C	2	18	Médio
Tanque 2	Costado/Calota Inf.	C	3	14	Médio
Vaso 1	Calota Sup./Costado	A	2	23	Baixo
Vaso 1	Calota Inf.	A	4	16	Médio
Vaso 2	Calotas/Costado	D	3	9	Médio Alto
Tub. 1	Tubulação	C	3	14	Médio

Fonte: elaborado pelos autores

Figura 4 – Matriz de risco resultante



Fonte: elaborado pelos autores

### 3.5 Estratégias de inspeção

Utilizando o documento GE Meridium – “RBI Inspection Strategies” (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2016), que segue a norma API 580, os escopos de inspeção foram definidos utilizando-se os fluxos decisórios para cada mecanismo de dano em função do risco final do componente. A norma API 580 possibilita a flexibilização nas escolhas dos escopos e frequências, desde que sejam efetivas aos mecanismos de dano.

Para cada mecanismo de danos identificados e classificados foram obtidos os escopos de inspeção de acordo com os fluxos similares ao da Figura 3. Na Tabela 21 são apresentadas as frequências das inspeções, grau de confiança sugerido ao escopo e o código do escopo proposto com base no referido documento para os equipamentos.

Tabela 21 – Escopos de inspeção via RBI

Equipamento	Componente	Interna / Externa	Frequencia/anos	Grau de confiança	Escopo:
Tanque 1	Costado	Interna	15	Alto	LC132
Tanque 1	Costado	Externa	7	Muito alto / Médio	LC38
Tanque 1	Fundo	Interna	10	Alto	LC112
Tanque 1	Fundo	Externa	N/A	N/A	N/A
Tanque 2	Calota Sup.	Interna	15	Alto	LC132
Tanque 2	Calota Sup.	Externa	15	Médio	LC391
Tanque 2	Costado/Calota Inf	Interna	15	Alto	LC132
Tanque 2	Costado/Calota Inf	Externa	15	Médio	LC391
Vaso de pressão 1	Calota Sup./Costado	Interna	20	Médio	LC152
Vaso de pressão 1	Calota Sup./Costado	Externa	10	Muito alto / Médio	LC41
Vaso de pressão 1	Calota Inf.	Interna	15	Alto	LC133
Vaso de pressão 1	Calota Inf.	Externa	7	Muito alto / Médio	LC381
Vaso de pressão 2	Calota/Costado	Interna	10	Muito alto	LC112
Vaso de pressão 2	Calota/Costado	Interna/CST	5	Médio	LC51
Vaso de pressão 2	Calota/Costado	Externa	5	Muito alto / Médio	LC35
Tubulação 1	Tubulação	Interna	10	Médio	LC29
Tubulação 1	Tubulação	Externa	15	Muito alto / Médio	LC38

Fonte: elaborado pelos autores

### 3.6 Análise crítica das novas estratégias de inspeção e implementação da metodologia

A análise crítica dos resultados é apresentada em duas partes: a primeira foca nos intervalos das inspeções internas e externas para os cinco equipamentos analisados e como se comparam com as frequências atuais; a segunda parte foca na análise das novas estratégias, ou seja, nos ensaios a serem realizados em cada inspeção com as devidas técnicas e abrangências. Também é analisada como a implementação da metodologia auxilia no aumento do conhecimento da unidade, não apenas sobre o processo, mas principalmente sobre os ativos que estão sendo avaliados.

#### 3.6.1 Prazos das inspeções

Com a definição das probabilidades e consequências de cada um dos componentes dos equipamentos e subsequente definição do risco final e estratégia de inspeção, foi possível notar que os prazos propostos para as inspeções internas e externas são relativamente superiores ao proposto pela norma

NR-13. Para essa unidade os prazos máximos que a norma possibilita para inspeções internas são 10 anos e externas 5 anos. Esse é o caso dos vasos de pressão 01 e 02, que devem seguir a frequência de inspeção imposta pela a NR-13, pois a proposição de extensão dos prazos de inspeção resultaria na infração da norma em questão e, conseqüentemente, à legislação nacional.

Os tanques 01 e 02 e a tubulação 01, que operam a pressão atmosférica, não são enquadrados pela norma NR-13, de modo que podem ser aplicados os novos prazos propostos pela inspeção baseada em risco. A Tabela 22 mostra a diferença entre a frequência atual praticada pela unidade e a proposta pela metodologia após o estudo. No caso da tubulação 01 não havia antes da análise planos de inspeção preventivos com uma frequência definida.

Tabela 21 – Escopos de inspeção via RBI

Equipamento	Interna / Externa	Frequência Atual (anos):	Frequência Proposta (anos):	Diferença (%):
Tanque 1	Interna	8	10	+25%
	Externa	4	7	+75%
Tanque 2	Interna	4	15	+375%
	Externa	4	15	+375%
Tubulação 1	Interna	N/A	10	-
	Externa	N/A	15	-

Fonte: elaborado pelos autores

O aumento do prazo entre as inspeções é substancial nos equipamentos não pressurizados, que possuíam suas estratégias de inspeção definidas através normas internas da corporação. Como a implementação da metodologia de inspeção foi uma decisão corporativa, os ganhos nesses casos

poderão ser capturados e as novas frequências de inspeção implementadas. Os equipamentos vaso de pressão 01 e vaso de pressão 02, são legalmente obrigados a seguirem as frequências de inspeção definidas através da NR-13 e não sofreram alterações nos prazos de inspeções, apenas nos escopos, seguindo as recomendações da metodologia.

### 3.6.2 Escopo das inspeções

Com a definição dos escopos de inspeção de forma individualizada aos componentes dos equipamentos é possível verificar que alguns riscos atuais ou potenciais aos quais os equipamentos estão sujeitos não foram considerados no escopo de inspeção original, o que pode representar um risco às operações da unidade. O contrário também foi constatado, ou seja, estavam sendo aplicadas técnicas de inspeção para mecanismos de dano específicos quando não havia a sua necessidade.

Também não havia um plano de inspeção para a tubulação 01, somente registros de inspeções esporádicas. Os novos escopos se mostraram mais completos e aderentes aos riscos e mecanismos de danos a que cada um dos equipamentos está sujeito, quando comparados aos escopos atuais, que são bastante genéricos e pouco focados em técnicas de alta eficiência. Outro benefício foi a introdução do detalhamento de cada escopo de inspeção, com a indicação da área mínima a ser inspecionada, os locais de maior risco (ex: bocais de entrada e saída), as técnicas a serem aplicadas, o padrão de registro nos relatórios e o nível mínimo de certificação dos inspetores, que não eram explícitos na estratégia anterior. A metodologia trouxe padronização ao processo de inspeção.

A metodologia anterior era genérica e não apresentava um nível de detalhamento de descrição de tarefas como a proposta no documento GE Meridium – "RBI Inspection Strategies" (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2016). A aplicação desta metodologia resulta em um novo padrão de inspeção, auxiliando na repetibilidade das inspeções, independente do inspetor que estiver executando o trabalho. Os escopos atuais, definidos através da NR13, que não detalha a formas de se selecionar o melhor escopo de inspeção para os equipamentos, deixando essa definição a cargo do profissional habilitado. Essa deficiência pode ser suprida com a aplicação da NR-13 junto com a API-580. A Tabela 23 apresenta a comparação entre o escopo atual e o proposto para o tanque 02 com a metodologia de inspeção baseada em risco. Os itens com o "X" representam as atividades que estão no escopo atual ou propostas, de acordo com a respectiva coluna.

Tabela 23 – Comparação escopo de inspeção para tanque 02

Atividade:	Escopo Atual:	Escopo Proposto:
Líquido Penetrante	X	X
Inspeção Visual	X	X
Medição Espessura (Costado)	X	
Retirada Isolamento Térmico		X
Medição Espessura (Bocais)		X
Taxa de Corrosão - Pites		X
Certificação Mínima Inspetores		X
Definição de % de área a ser inspecionada		X

Fonte: elaborado pelos autores

Para todos os equipamentos os novos escopos de inspeção foram mais aderentes aos mecanismos de danos presentes e potenciais que os equipamentos estão sujeitos. Os novos escopos possuem requisitos mínimos e definições claras das atividades que devem ser realizadas durante a inspeção e como os registros devem ser feitos, para serem consultados nas próximas inspeções. Essas definições e estudos de mecanismos de danos não estão presentes como requisitos obrigatórios na NR-13

e guias da corporação, mostrando que o estudo dos potenciais danos, como também, potenciais consequências em caso de falha gerou um aumento no nível das inspeções, com maior assertividade e controle na qualidade.

### 3.7 Discussão dos resultados

Com os resultados das classificações dos riscos para os equipamentos analisados é possível observar que não são apenas os equipamentos de armazenamento de produtos perigosos que oferecem os maiores riscos à unidade. Os tanques atmosféricos e a tubulação selecionada tiveram diferentes classificações de riscos, mostrando a possibilidade de modificação da estratégia de inspeção a uma mais aderente aos potenciais riscos. Equipamentos que não possuíam uma estratégia de inspeção, como a tubulação 01, podem apresentar um risco considerável à unidade. O vaso de pressão 02 apresenta o mesmo nível de risco que o tanque de tratamento de efluentes (tanque 01), sendo o primeiro por questões de saúde/segurança e meio ambiente e o segundo por questões financeiras devido à necessidade de parada total da unidade em caso de falha.

Os resultados mostram que a metodologia pode ser uma forma de classificar e dar visibilidade a equipamentos não priorizados em uma primeira análise de risco na unidade, revelando equipamentos de maior periculosidade que expõem e fragilizam a operação da fábrica. A implementação da metodologia na unidade resultou em um gerenciamento dos riscos da unidade quanto à falha de equipamentos que poderiam levar a um vazamento, provocando perdas financeiras. Como consequência, estes danos poderiam gerar impactos na comunidade, meio ambiente e colaboradores da unidade, que resultariam diretamente na degradação da imagem da companhia perante a sociedade.

No processo de identificação, classificação e definição das estratégias de inspeções baseadas nos mecanismos de danos via API-580 observou-se que esta norma pode ser utilizada como uma ferramenta complementar à norma NR-13 e aos guias internos das corporações. Uma sugestão de melhoria para a aplicação no Brasil seria uma atualização da NR-13, envolvendo a disciplina de gestão de risco com probabilidade de falhas e suas consequências. Tais mudanças tornariam a NR-13 uma norma mais alinhada com as melhores práticas mundiais de gestão de integridade de equipamentos.

A NR-13 não apresenta orientações sobre detalhamento e orientações para uma definição da estratégia de inspeção, criação de modelos de corrosão, avaliação individualizada dos componentes dos equipamentos e modelo de reavaliação que constate os resultados de cada inspeção. Essas deficiências podem ser amenizadas e até suprimidas caso a metodologia seja aplicada em conjunto com a norma. Com planos de inspeção mais aderentes aos potenciais riscos, é possível um aumento na qualidade das inspeções e gestão.

Outro benefício advindo dos equipamentos não enquadrados pela NR-13 é a possibilidade de intervalos de inspeções mais longos, reduzindo o número de paradas dos equipamentos, como o tanque 02 que teve seu intervalo de inspeção alterado de 4 para 15 anos. Mudança que pode

gerar uma economia com gastos em manutenções e menor exposição ao risco dos inspetores. Em contrapartida ao maior intervalo entre inspeções, obteve-se uma estratégia de inspeção mais robusta e assertiva para se detectar potenciais falhas a que os equipamentos estão sujeitos. Isso foi possível graças às técnicas de ensaios não destrutivos adequados e com escopos claros e padronizados das áreas a serem inspecionadas e seus respectivos relatórios, condição que não existia antes da aplicação da metodologia da API-580.

O processo de implementação da metodologia de inspeção baseada em risco demonstrou ser capaz de trazer benefícios finais como já citados, além de melhorias e adequações resultantes do processo de gestão das informações técnicas dos equipamentos (desenhos, memoriais, históricos de manutenção e operação) para a avaliação das probabilidades e consequências.

Durante o processo de implementação foram identificadas fragilidades no sistema, como falta de desenhos, isométricos, históricos de manutenção, memoriais de projeto e gestão de mudanças que ocorreram ao longo da vida da planta, como modificações em tubulações que não estavam adequadamente representadas na documentação. Durante a implementação foram necessários ajustes e atualizações de documentos para garantir uma confiabilidade dos dados e, conseqüentemente, das

análises. Esta condição também pode representar outra forma de risco à unidade, visto que há registros de acidentes dentro da indústria química pela falta de documentação atualizada.

## 4 Conclusões

A metodologia estabelecida pela norma API-580 é de fácil aplicação, desde que as informações mínimas necessárias estejam disponíveis para as análises técnicas e classificação das probabilidades de falha e consequência. As estratégias finais de inspeção resultaram em proposições diferentes das obtidas apenas com a NR-13, no tocante a escopo e frequência das inspeções. Foram obtidos aumentos entre os intervalos de inspeções de até 300% (Tabela 22) para o caso de equipamentos que não fazem parte da NR-13.

A API-580 deve ser aplicada como uma ferramenta complementar às normas brasileiras, tais como NR-13, e concomitantemente às normativas internas das corporações na definição das estratégias de inspeção para equipamentos estáticos. A metodologia implementa um processo cíclico e contínuo de inspeção, resultando no aumento do nível de conhecimento técnico da unidade sobre seus equipamentos, melhoria contínua das estratégias de inspeção e gerenciamento dos riscos relacionados a falhas que gerem vazamentos e potenciais danos a corporação.

A implementação propicia melhoria na qualidade da informação e documentação dos equipamentos contemplados, pois existe a necessidade de informações técnicas (desenhos, históricos de manutenção e operação e parâmetros operacionais) no processo de avaliação do risco. Os resultados podem gerar benefícios econômicos para as empresas e para a gestão dos riscos por parte dos empregados. Há

uma redução na exposição aos riscos durante a inspeção em função dos períodos entre inspeções consecutivas serem maiores, como no caso do tanque 2 que teve um intervalo de inspeção modificado de 4 anos para 15 anos. Com a redução das paradas programadas dos equipamentos, gera-se uma economia quanto aos custos de manutenção em material e de pessoas, e uma maior disponibilidade e estabilidade operacional devido à redução em parada de equipamentos para inspeções.

Assim, a metodologia proposta deve complementar (e não substituir) os requisitos normativos legais vigentes, elevando conseqüentemente o nível de conhecimento e gerenciamento sobre a integridade dos ativos da unidade e reduzindo os potenciais riscos associados à falha (vazamentos) em operação. O incremento de conhecimento sobre os ativos e processo operacional ocorre ao longo de todo o processo de implementação, sendo atualizado a cada ciclo de inspeção de forma contínua. A metodologia pode ser aplicada em unidades industriais em conjunto aos requisitos legais de cada região e corporação.

## 5 Referências

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API-571: Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry. 2 ed. Washington: API Publishing Services, 2011. 372 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE . API-580: Risk-based inspection. 3 ed. Washington: API Publishing Services, 2016. 94 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API-581: Risk-based Inspection Methodology. 3 ed. Washington: API Publishing Services, 2016.

ETI, M.C.; OGAJI, S.O.T.; PROBERT, S.D. Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. **Applied Energy**, [s.l.], v. 83, n. 11, p.1235-1248, nov. 2006. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.01.002.

GENERAL ELECTRIC COMPANY- (United State of America-USA). GE Digital APM - RBI 580 Inspection strategies. 5. ed. Chicago: Ge, 2016. 161 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. NR13: **NR-13 Caldeiras, vasos de pressão e tubulação**. 7 ed. Brasília: Ministério do Trabalho. 2017.23p.Disponível em:<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR13.pdf>..Acesso em: 16 out. 2018.

NACE INTERNATIONAL-(United State of America-USA). **International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study**. Houston: Nace International, 2016. 216 p. Disponível em: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>. Acesso em: 26 maio 2019.

PERUMAL, K. E. Corrosion risk analysis, risk based inspection and a case study concerning a condensate pipeline. *Procedia Engineering*, [s.l.], v. 86, p.597-605, 2014. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.085>.

SANDERS, R. E. The role of mechanical integrity in chemical process safety. *Chemical Process Safety*, [s.l.], p.297-352, 2015. Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-12-801425-7.00012-1.

DOI 10.34033/2526-5830-v4n15-1



## Artigos técnicos

Metodologia desenvolvida pelo IPT de monitoramento contínuo dos gases efluentes de alto-forno durante o processo de abaixamento de carga (*blow down*)

*Methodology developed by IPT for continuous monitoring of blast furnace effluent gases during the load lowering process (blow down)*

Renato Vergnhanini Filho<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Laboratório de Engenharia Térmica (LET), Área de Concentração Tecnológica em Energia (ACTEN), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: vergnhan@ipt.br

### Palavras-chave:

abaixamento de carga de alto-forno; monitoramento de gases; *blow down*.

### Keywords:

*blast furnace load lowering; gas monitoring; blow down.*

## Resumo

O artigo apresenta a metodologia desenvolvida pelo LET de monitoramento contínuo dos gases efluentes de alto-forno durante o processo de abaixamento de carga (*blow down*), visando o controle do processo, de forma a garantir a integridade do equipamento e da equipe técnica envolvida.

## Abstract

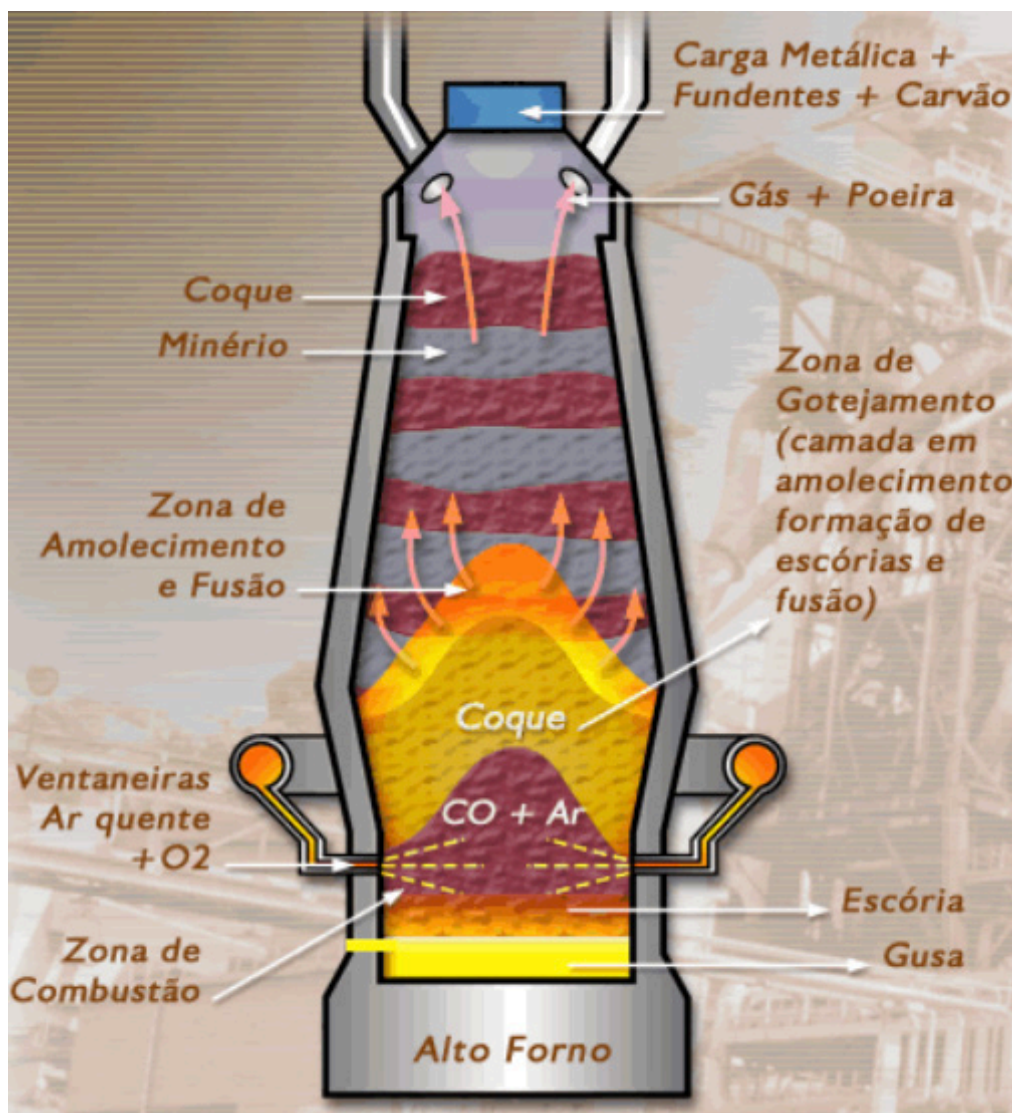
The article presents the methodology developed by LET for continuous monitoring of blast furnace effluent gases during the load lowering process (*blow down*), aiming at the control of the process, in order to guarantee the integrity of the equipment and the technical team involved.

## 1 Introdução

Alto-forno é como se chama o reator químico, na siderurgia, de tamanho variável, externamente revestido por metal e internamente com material refratário, onde é reduzido o minério de ferro, a fim de transformá-lo em ferro-gusa. Atualmente, aproximadamente 60 % do aço produzido no mundo tem como origem o ferro-gusa.

Matérias primas ferrosas, fundentes e coque são alimentados, alternadamente, pelo topo do alto-forno por uma correia transportadora. Em uma região chamada zona de combustão, as ventaneiras sopram gases a elevadas temperaturas, contendo oxigênio e outros combustíveis auxiliares (óleo mineral, carvão pulverizado, gás natural etc.), que sobem e reagem com a carga metálica contida no interior do forno, causando sua redução e fusão (Figura 1).

Figura 1 - Alto-forno



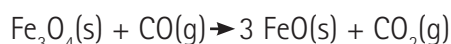
Fonte: <https://www.infomet.com.br/site/siderurgia-3a-processo.php>

A principal reação química que produz o ferro fundido é:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$

Essa reação pode ser dividida em várias etapas. A primeira envolve o ar preaquecido soprado no forno com o carbono do coque para produzir monóxido de carbono:  $2 \text{C(s)} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{CO(g)}$

O monóxido de carbono é um gás redutor do minério de ferro e reage com o óxido de ferro para produzir ferro fundido e dióxido de carbono:  $3 \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO(g)} \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$

A temperaturas em torno de 850 °C, o ferro é reduzido ainda mais:



À medida que o óxido de ferro desce para a região de temperaturas mais altas, de até 1200 °C, ele é finalmente reduzido para o ferro metálico:  $\text{FeO(s)} + \text{CO(g)} \rightarrow \text{Fe(s)} + \text{CO}_2(\text{g})$

Os produtos das reações que ocorrem no alto-forno são o ferro-gusa e a escória, escoados no estado líquido para a base do reator e separados por diferença de densidade. O ferro-gusa é conduzido por canais refratários para os carros torpedos para ser transportado para as aciarias. A escória é levada para os granuladores de escória.

Ocasionalmente, faz-se necessário a realização de paradas de funcionamento do alto-forno por vários dias, seja por condições de limitação de mercado ou para efetuar atividades de reparo e manutenção.

Nessas paradas de longa duração, tem-se procedimento específico de preparação, com a execução de atividades que visam garantir a integridade do equipamento e da equipe técnica envolvida. Dentre os diferentes métodos para a realização do desligamento, o denominado *blow down* tem sido o mais aplicado desde a década de 1970.

O *blow down* consiste no abaixamento de carga e redução do volume de sopro até que o nível de carga alcance a altura das ventaneiras, propiciando um forno livre de cascão e o mais vazio possível.

Na operação normal, o gás gerado no alto-forno (GAF - Gás de Alto-Forno ou *BFG - Blast Furnace Gas*) possui composição média mostrada na Tabela 1, porém no *blow down*, com o forno operando numa condição atípica, há alterações de composição, com o risco da formação de uma atmosfera explosiva. Portanto, é fundamental o acompanhamento dos gases efluentes do forno durante o processo (SATHLER et. al., 2015; PONTES et. al., 2018).

Tabela 1 - Composição típica do gás de alto-forno.

Composição do gás de alto-forno (% em volume e em base seca):				
CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
23	3	24	50	~0

Fonte: valores médios de medições realizadas pelo IPT nas siderúrgicas Gerdau e Ternium, utilizando conjunto de analisadores contínuos de gases e sistemas de sucção e condicionamento de amostras.

## 2 Metodologia desenvolvida pelo LET de monitoramento contínuo dos gases durante o *blow down* de alto-forno

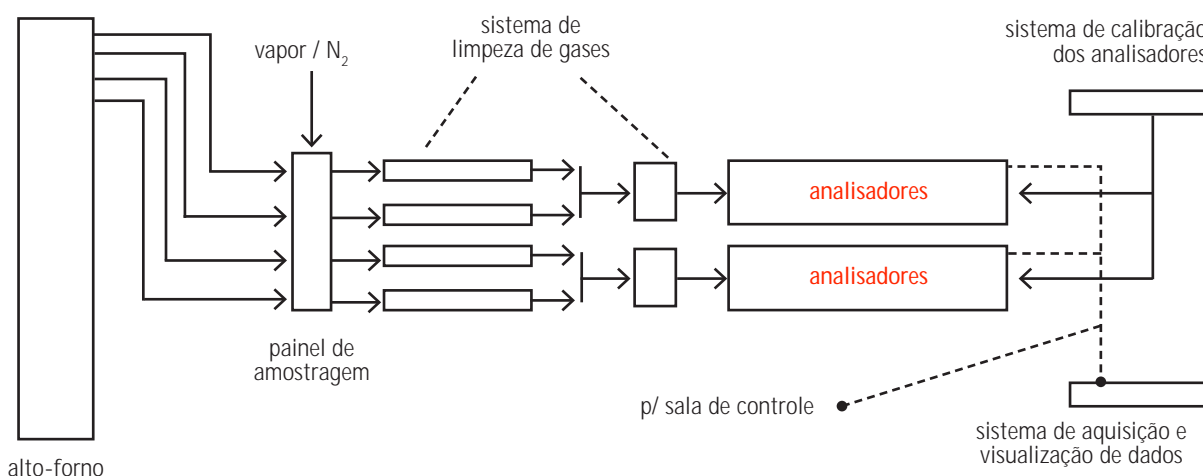
A metodologia desenvolvida pelo LET consiste na construção de quatro linhas de amostragem (uma por *up take*), independentes, ligando o topo do alto-forno a um painel de amostragem, de modo que no eventual entupimento de uma delas, a segunda será alinhada. Caso a segunda obstrua antes de ter sido realizada a desobstrução da primeira, ter-se-á, ainda, a terceira linha e, da mesma forma, a quarta linha. No painel, são conectados dutos de vapor de água e nitrogênio ou ar comprimido para a limpeza das linhas de amostragem.

Devido, também, a possibilidade de obstruções, são construídas quatro linhas ligando o painel a quatro sistemas de amostragem de gases, independentes, cada uma contendo filtros, vacuômetros, rotômetros, válvulas, serpentinas, condensadores, ciclones etc. A dois desses sistemas são conectados uma bomba de vácuo e um conjunto de analisadores contínuos de gases ficando, portanto, dois sistemas de reserva.

São monitorados os teores de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) dos gases. Os sinais de saída dos analisadores, no formato de 4 a 20 mA, alimentam um sistema de aquisição e visualização montado junto aos mesmos, e são replicados para o supervisor da sala de controle do alto-forno através de uma derivação na saída dos instrumentos, possibilitando o acompanhamento e registro *online* dos valores obtidos.

A Figura 2 ilustra a montagem para a realização do monitoramento dos gases. A Tabela 2 mostra os analisadores de gases utilizados.

Figura 2 - Montagem para a realização do monitoramento dos gases.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Analisadores contínuos de gases.

Analisadores contínuos de gases (dois por constituinte)		
Constituinte	Princípio de operação	Faixa de medição (% em volume e em base seca)
O <sub>2</sub>	paramagnetismo	0 – 25
CO	absorção da radiação infravermelha	0 – 50
CO <sub>2</sub>		0 – 100
H <sub>2</sub>	condutividade térmica	0 – 50

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3 Trabalhos realizados pelo IPT de monitoramento contínuo dos gases durante o *blow down* de alto-forno

Nos últimos anos, o IPT realizou o monitoramento contínuo dos gases durante o *blow down* de alto-fornos instalados em várias siderúrgicas no Brasil (Acesita - atual Aperam, ArcelorMittal - unidades de João Monlevade e Juiz de Fora, CSN e Gerdau) e na Argentina (Siderar). As Figuras 3 e 4 mostram fotos referentes a esses trabalhos.

As Figuras 5 a 8 mostram, no *blow down*, a variação da composição dos gases efluentes de um dos alto-fornos monitorados pelo IPT.

Figura 3 - Painéis de amostragem.



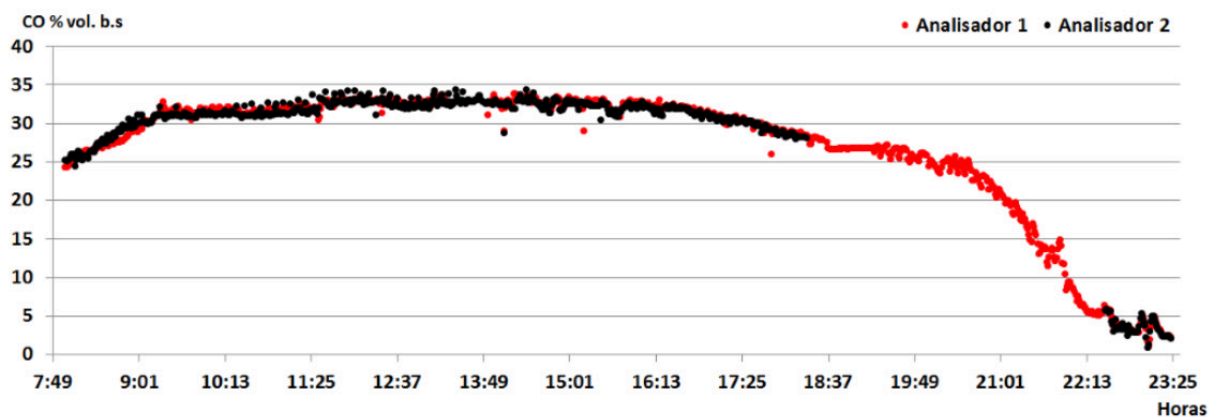
Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Figura 4 - Van equipada com a instrumentação do IPT e posicionada junto ao alto-forno.



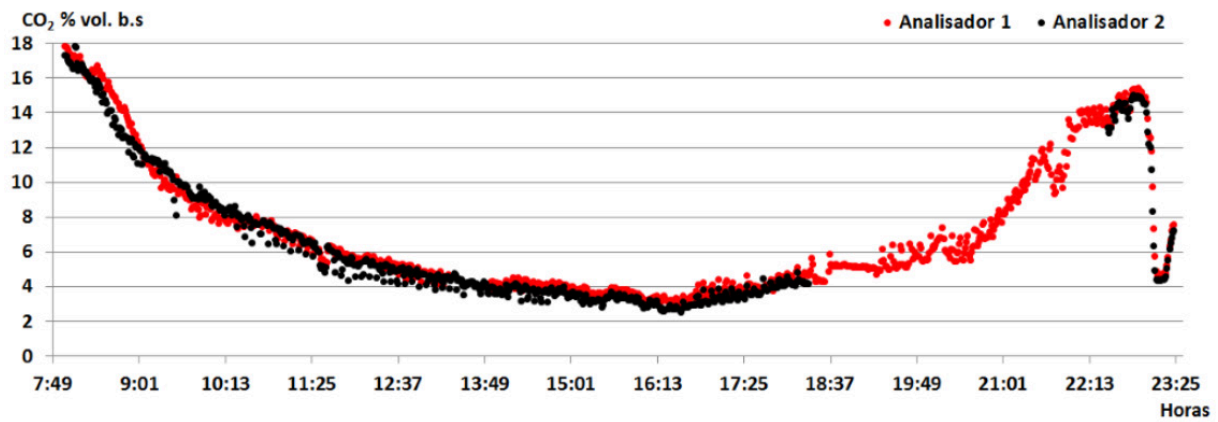
Fonte: acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Figura 5 - Teor de CO dos gases durante o *blow down*.



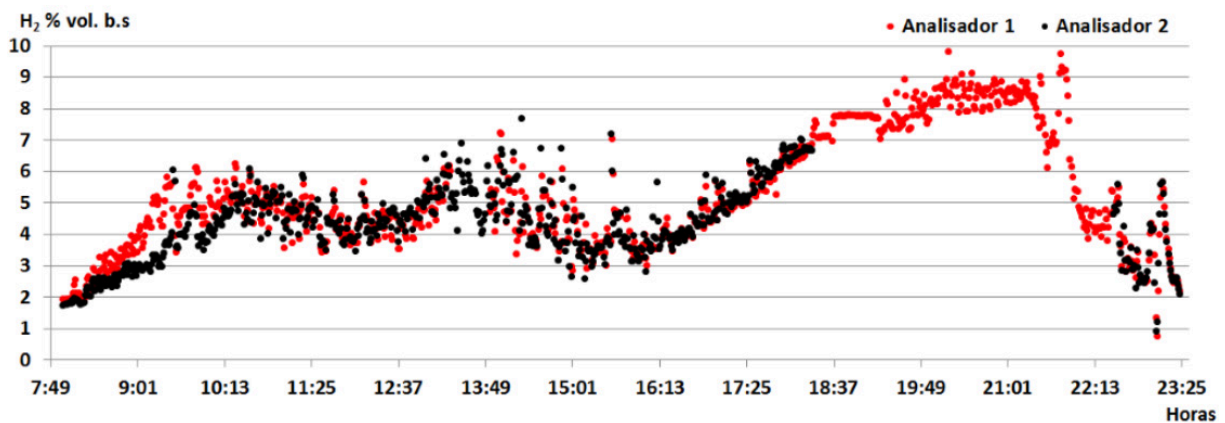
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6 - Teor de CO<sub>2</sub> dos gases durante o *blow down*.



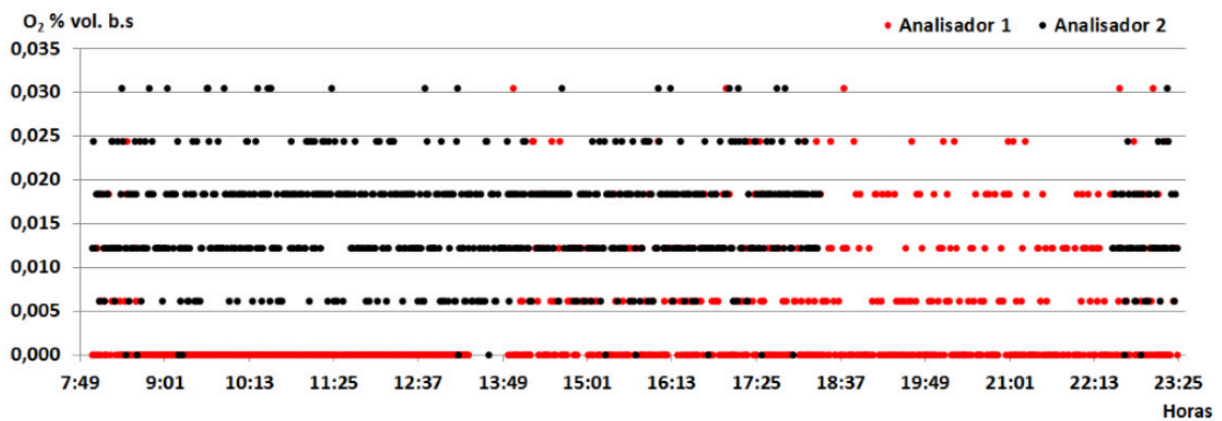
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7 - Teor de H<sub>2</sub> dos gases durante o *blow down*.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 8 - Teor de O<sub>2</sub> dos gases durante o *blow down*.



Fonte: elaborado pelo autor

## 4 Conclusões

No *blow down* do alto-forno, quando ele opera numa condição atípica, havendo a possibilidade da formação de uma atmosfera explosiva, a metodologia de monitoramento contínuo dos gases desenvolvida pelo LET, onde tudo é exaustivamente verificado e são utilizados instrumentos e componentes em redundância, permite que o procedimento seja realizado com segurança pela siderúrgica.

## 6 Referências

SATHLER, F.; NASCIMENTO JUNIOR, R. C.; COSTA, C. C.; RIBEIRO, E. C. Descrição dos fundamentos teóricos e práticos do *blow down* aplicados ao alto-forno 03 da ArcelorMittal Aços Planos América do Sul. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 45; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 16; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 3, 17-21.08.2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PONTES, F. S.; FARIA, G. A.; PESSOA, R. R.; AGUIAR, P. G. O.; LYRIO, A. M. C.; SIMÃO, J. R.; GONÇALVES, P. C.; MIRANDA, S. M.; REIS, P. G.; MIRANDA, W. P. *Blow down* e drenagem da salamandra do alto-forno nº 2. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 48; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 6, 04-04.10.2018, São Paulo, SP, Brasil.

DOI 10.34033/2526-5830-v4n15-2



Hamilton Lelis Ito<sup>a\*</sup>, Jonas de Carvalho Gomes<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil

\*E-mail: hlito@ipt.br

*Keywords:*

*failure; fracture; fatigue; flake; fretting*

### *Abstract*

Since the early 1900's, the time when IPT acquired its first optical microscope for metallography, failure analysis has been an important activity which IPT has always been involved in. The term failure analysis has a broad meaning, but the intent now is to restrict this meaning to the analyses performed on fractured or cracked mechanical components and structures intended to determine their causes. Cases related to loss of stability of structures due to deformation, wear and general corrosion, which are also considered failures, will not be treated in this article. Engineers normally try to design machines, engines, and all sorts of mechanical components and structures to be failure proof. For that material selection, manufacturing processes, assembling, and maintenance recommendations are carefully specified. The obedience to these specifications normally prevents failures. However, if one or more of the items specified above is not obeyed, the possibility of failure will increase. Furthermore, there are situations, in which even though all the specifications are followed by the book, a part can fail, and an accident ensues. Some selected failure analysis case studies performed by IPT are presented in this paper. The trends for the future are to apply monitoring techniques to mechanical components and structures able to alert the possibility of failures before they occur.

## 1 Introduction

*Since 1907, the time when IPT acquired its first optical microscope for metallography, failure analysis has been an important activity which IPT has always been involved in. The term failure analysis has a broad meaning, but here it will be restricted to the analyses, performed on fractured or cracked mechanical components and structures, intended to determine the causes of the failure. Engineers normally aim at designing machines, engines, and all sorts of mechanical components and structures to be failure proof during their expected lifetime. For that, stress calculation, material selection, manufacturing processes, assembling, and maintenance recommendations are carefully specified according to standards and design criteria which are continuously reviewed. When failures occur, it is not unusual that improvements in new editions of standards, construction codes and operational and maintenance guides occur as aftermath of failure analyses. The obedience to these specifications not only provides a safe operation but normally avoids failures. However, if one or more of the items specified above is not obeyed, the possibility of failure will increase.*

*Situations in which, even though all the specifications and recommendations are followed by the book, failures can occur and result in accidents. Sometimes the design is correct but, during the assembling or the construction, some simplifications are adopted, or, for example, some misguided action taken by workers not properly trained can introduce defects as arc strikes on structures and rotating parts, misalignment in assembling, disobedience to the design in manufacture, and others, threatening the equipment's performance. Problems as such do not appear necessarily at the startup and at the first hours of operation but later when the equipment is running in a steady state. Other times, a small incident can cause a visually imperceptible damage, as a dent on an originally smooth surface, or a mini or micro bend on an originally straight part subjected to tensile pulsating loading, for example. This kind of a damage changes local stresses, so the component which was professionally designed to resist the operational loading becomes susceptible to develop a fatigue crack even working according to the expected loading.*

*Sometimes unexpected effects of the environment can become a huge problem. The damage of a pump seal causing a small leakage can lead a surface of a shaft to pitting corrosion, for example. The pit can become a stress raiser able to initiate a stress corrosion crack or a fatigue corrosion crack.*

*Misalignments of shafts, originally aligned, caused by small movements of the soil can provoke displacements on the foundation of heavy equipment, such as gear boxes coupled to motors, capable to introduce bending loads on shafts not predicted in the design. If the shafts were designed to resist severe torque (when the most important load is torsion) and negligible bending, fracture in consequence of rotating bending due to misalignment can occur. Many times, a proper care in the foundation design and the use of elastic couplings between the motor shaft and the gear-box shaft can fix the problem.*

*Equipment for high temperature service, which sometimes suffers local temperature increase due to a deficiency on the heat transmission through pipe walls, can suffer local overheating which consequence can be the premature failure due to creep. Equipment designed to work continuously, but used intermittently, can fail with fewer working hours than the predicted in design because it will be more prone to thermal fatigue.*

*It is not uncommon to have hardened and tempered steel parts that are zinc plated for protection against corrosion to suffer hydrogen induced cracking. The zinc plated layer does protect steel from general corrosion, attracting to itself the anodic reaction, but at the same time, the cathodic reaction on the iron generates hydrogen which, being absorbed by the steel, can cause hydrogen induced cracking on regions submitted to tensile stress.*

*There are many other situations like those presented above, and it would be impossible to make a complete list of events able to cause failures.*

*Fortunately, there are solutions for fracture control which means that, if it is not possible to fix all the problems that can lead a component to fracture, it is possible to take actions to avoid it. Preventive and predictive maintenance, nondestructive evaluation, damage tolerance and fitness for service are resources normally used to avoid fracturing. The use of temperature, vibration, stress and strain sensors can provide a continuous monitoring of critical mechanical members, producing data able to indicate if something wrong is going on before the failure occurs. For cracked members, it is possible to control the crack advancing before it reaches a critical size performing a continuous acoustic emission monitoring.*

*As can be seen, currently, there are technical resources able to reduce the risk of failure to almost zero. They are more or less applied in function of the possible consequences of the failure. If the fracture does not threat human and environmental safety and/or does not imply in significant economic losses, corrective actions as the substitution of a broken bolt,*

*for example, can be enough. Other times, the failure of only one bolt can be the beginning of a huge disaster indicating that each case shall be individually evaluated.*

*Since its foundation, IPT has analyzed thousands of fractures of different sorts of mechanical components. In 1912, Hippolyto Gustavo Pujol Junior, the engineer responsible for the acquisition and operation of the first equipment for mechanical testing and microstructural analysis of IPT, published an article on microscopic metallography and thermal analysis (PUJOL, 1912) which was the basis for the course on those subjects, which he taught at Polytechnic School of São Paulo. The consolidation of the capability of IPT to analyze failures occurred after Hubertus Colpaert assumed the management of the laboratory in 1928. In his book on metallography published in 1951, Colpaert (1951) presented several examples of fractured parts analyzed by IPT.*

*During the first half of 20th Century, railways crossed the State of São Paulo, Brazil, and companies used to request IPT's help when failures of railroad components and trains parts occurred. From mid-fifties to sixties, after Colpaert's death, Alberto Albuquerque Arantes took the responsibility to perform failure analysis at IPT. His extensive background on materials and on mechanics gave him resources not only to evaluate the material properties but also to analyze the loads responsible for fractures. During this time, the role of Arantes analyzing failures of automotive components should be highlighted. These components were being nationalized by the recent automotive industry implanted in Brazil, and Arantes proposed changes in material and in manufacturing processes to obtain the desired properties of com-*

ponents which in some cases exceeded them. Still in the sixties, Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva started his engineering career at IPT and soon assumed Colpaert's and Arantes's heritage (ITO, 2007). Later, Paulo Sérgio and Tiberio Cescon, a former IPT intern advised by Colpaert, taught a new generation of specialists, among them, the main author of this paper, who is proud of having so brilliant teachers. A previous publication on IPT's failure-analysis case studies (AZEVEDO; CESCÓN, 2004) presented a list of 22 researchers that performed failure analysis at IPT from 1933 to 2003 and about half of them followed directly or indirectly the teachings of Paulo Sérgio and Tiberio.

Currently, it is possible to say that along its existence, IPT has performed thousands of failure analyses, from tinny parts like hypodermic needles to huge parts like crankshafts of stationary engines of thermoelectric power plants; from small LPG containers for domestic use to huge pressure vessels of petrochemical industry. IPT customers are normally private

companies, state companies and the government, but sometimes, IPT also attends private individuals. Currently, IPT performs failure analysis of a different sort of equipment and structures for the whole country (Brazil) and overseas if it is requested to.

Due to a trust relationship established between IPT and customers, the information contained on IPT reports are confidential, and cannot be spread out to the public. The exceptions occur only when the customer provides a written permission allowing IPT to divulge the content of the reports, normally publishing papers on the subject. This does not mean that the results of projects requested by the District Attorney or the Court of Justice cannot become public because, in these cases, the reports are attached to the lawsuit that can be consulted by interested persons.

This article intends to present some examples of case studies on failure analyses performed by IPT without exposing any customer. Because of that, much information of the investigations, including procedures, data, calculations, and the customer itself will not be presented.

The early case studies performed by IPT were mostly related to defective parts, like rails and train wheels presenting internal or surface defects, inappropriate welding on hardened and tempered parts and so on. It is important to remember that, at that time, the only nondestructive test available was the visual inspection. Radiography, magnetic particles, eddy current, ultrasonic testing, and other nondestructive testing, which today can assure the soundness of parts and structures, had not been developed or were not easily available then. Chemical analysis and mechanical testing were used in quality control, but they were unable to determine if a given part was defective or not. Metallography could, and still can detect shrinkage and pores in castings and forging and rolling laps. Nevertheless, metallography is destructive, and it would not be applied to parts that were going to be put in service. On the other hand, metallography used to be and is still one of the most powerful resources in failure analysis. In the past, many failures could be attributed to the material's quality or processing which could be easily identified by metallography and still can nowadays.

The application of the scanning electron microscopy in failure analysis started around 1960 and, at IPT in the 1970's, caused a revolution because it not only made it possible to determine fracture micro-

*-mechanisms but also it was able to provide local chemical analysis of precipitates, inclusions and products of corrosion or oxidation, when equipped*

*with EDS and WDS. X-ray diffraction, Auger spectroscopy and transmission electron microscopy can also be applied in failure analysis, but the solution of most of the cases does not require them.*

*Currently, many industries apply severe rules in quality control in mass production of several parts used in different applications reducing much the possibility of failures. However, it does not apply to big parts or structures which, most of the times, are produced in small quantities and sometimes just one piece. In these cases, the material properties or the quality evaluation based on nondestructive testing are applied individually to each part or structure.*

## 2 Case studie

*It is impossible to present studies of failure analysis performed at IPT encompassing all sorts of materials, structures and mechanical components. The few case studies to be presented ahead are not necessarily the most important but they were chosen because they were familiar to one of the authors since he was part of the teams that performed the analyses. The choice of what to present was not easy because along its lifetime IPT has analyzed failures for different kind of industry. Following, a tentative list of grouping the industrial branches for which IPT has performed failure analyses is presented:*

- *Agriculture;*
- *Air Transportation;*
- *Automotive;*
- *Cement;*
- *Chemical;*
- *Civil Construction;*
- *Electric Power;*
- *Food;*
- *Metallurgical;*
- *Mining;*

- Oil and Gas;
- Petrochemical;
- Pulp and Paper;
- Railroad;
- Steelmaking;
- Sugar and Alcohol.

## 2.1 Case studies related to railway and trains

### 2.1.1 Longitudinal cracking of a rail due to residual stress

As mentioned before railways were the one of the first kind of industry to request failure analyses to IPT. There are so many cases that it would be impossible to enumerate and present them in a single article. Fatigue of rails initiated in hydrogen flakes (fish eyes) and brittle fracture of wheels initiated in surface cracks caused by local heating due to friction when the wheel blocked by the brake slid on the rail, used to happen frequently in the past (ITO, 1994).

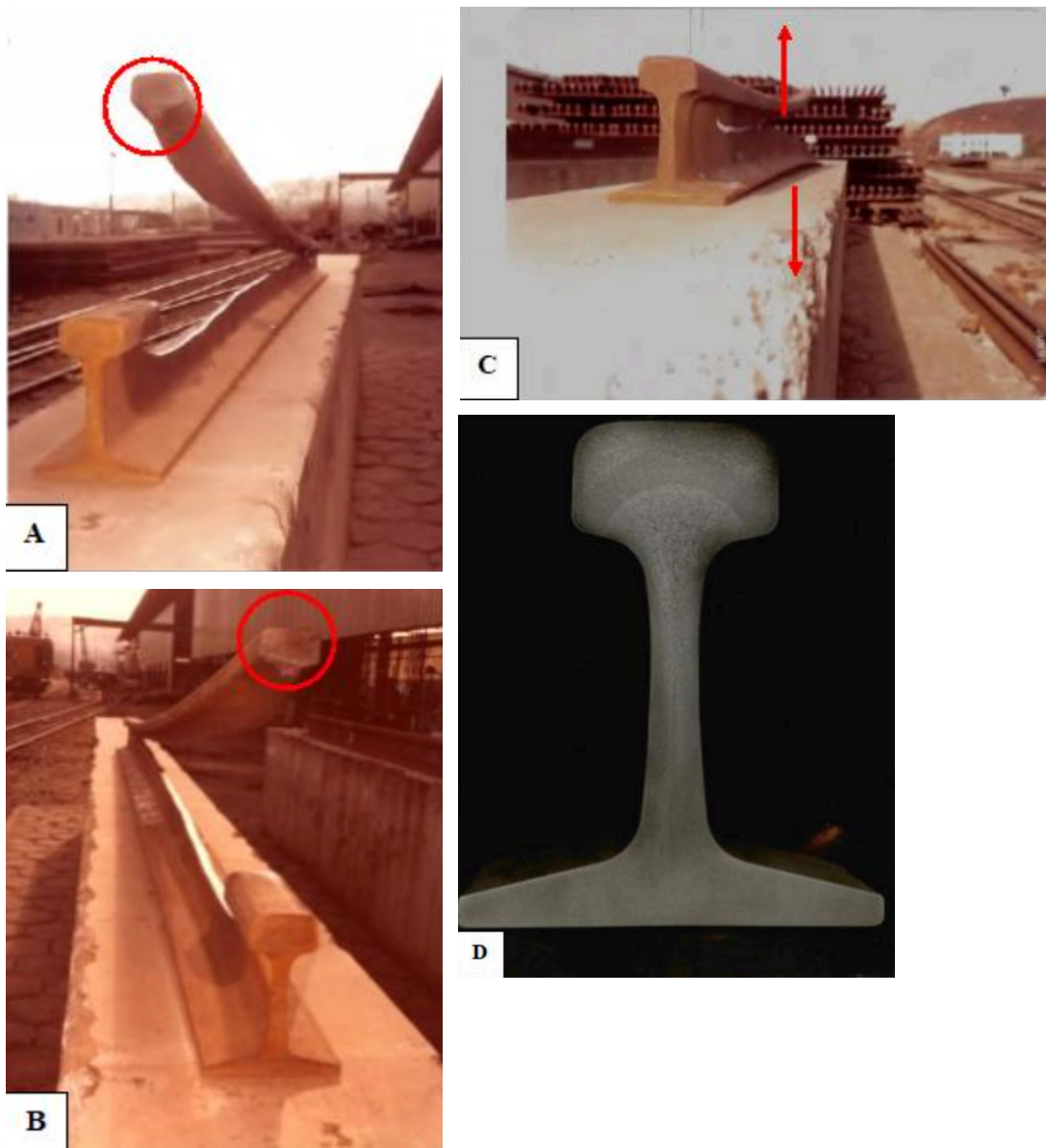
An astonishing longitudinal cracking along the rail web caused by residual stress during the assembling on the track requires to be reported to become unforgettable (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a). *Figure 1* shows a surface quench hardened rail that cracked during its assembling on the track. The rail was being transversally cut-off when suddenly it cracked longitudinally along the web in consequence of residual stress. Details (A) and (B) of *Figure 1* show the displacement of approximately 1 m, between the opposed surfaces of the crack in the cut region. The arrows in detail (C) point to the center of curvature acquired by the head and the rail base after the cracking. The displacement between the crack opposed surfaces and the curvature of the head and rail base occurred in consequence of the stress relieving of the residual stresses probably introduced during the heat treatment of the rail head and the cold straightening that followed it. Detail (D) presents the macrography of a transverse section of the rail, showing the depth of the local quench hardening of the head.

### 2.1.2 Fracture of a rail due to hydrogen absorbed during the steelmaking process

*Figure 2* shows a transversal fracture of a rail initiated in a consequence of hydrogen embrittlement due to deficient degassing during the steelmaking processing (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981b). The metallographic analysis of a section approximately perpendicular to the dark

elliptical area of the fracture in the rail head, known as fish-eye (AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK COMMITTEE, 1975; POLUSKIN, 1956), observed in Figure 1 (A), presented hydrogen flakes showed in Figure 2 (B). The alternating vertical loading, applied to the rail due to the regular transit of trains caused fatigue propagation inside the head, from the fisheye area. The fracture occurred when the crack reached its critical size.

Figure -1 – Aspect of a rail cracked longitudinally along the web during a cut along the transverse section. (A) and (B) Observe the displacement occurred after the rail cracking. The region that was being cut is encircled in red. (C) Under this angle of view it is possible to observe the curvature occurred in the head and in the rail base which centers of curvature point to opposed directions. (D) Aspect of the macrostructure of a transverse section of the rail showing the heat-treated region of the rail head.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981a)

Figure 2 – Aspect of a rail fractured transversally in consequence of hydrogen embrittlement. (A) The circular area in the rail head is known as fisheye occurs when hydrogen dissolved in steel in liquid state is not properly eliminated during the steel refining. (B) This photomicrography, taken from a rail longitudinal section passing through the fisheye region, presented internal cracks known as hydrogen flakes.

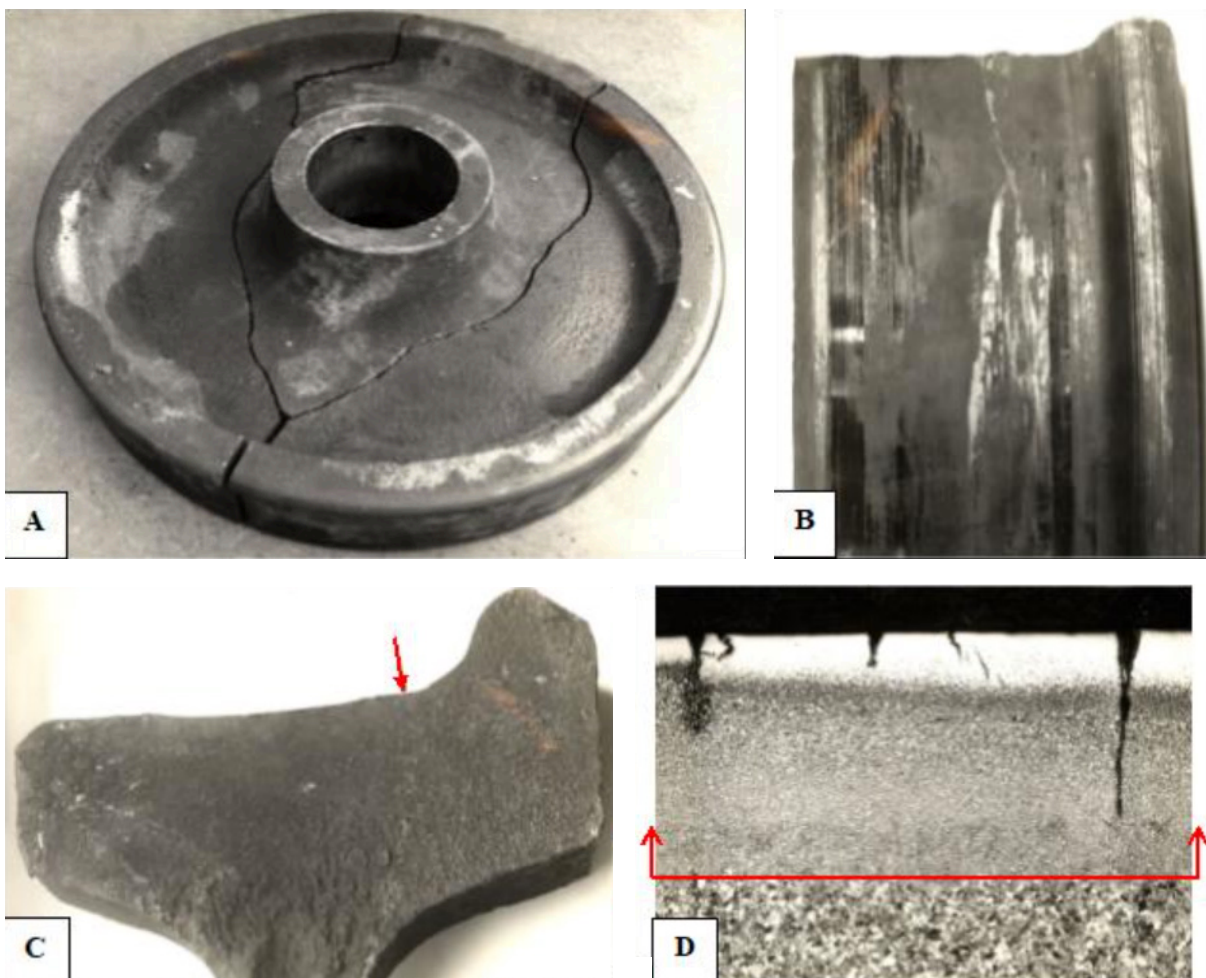


Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981b)

### 2.1.3 Fracture of a wheel due to thermal cracking on the rolling surface

*Figure 3 presents a train wheel that fractured in consequence of thermal cracks on the rolling surface (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981c). The wheel blocking occurred during braking led the wheel to slide on the track. The white layer, observed in Figure 3 (D), is constituted of untempered martensite caused by the temperature rise caused by the heat generated by the friction between the wheel surface and the track surface. The heating rose the temperature of the wheel surface up to the austenitic field. The quenching provided by the heat drained from the rolling surface to the wheel bulk caused cracking. The fracture initiated in one of these cracks.*

Figure 3 – (A) General aspect of the fractured wheel. The fracture began at the rolling surface, propagated along the rim and bifurcated around the hub. (B) Scratching can be observed on the wheel's rolling surface. (C) Aspect of the fracture surface. The arrow points to region of fracture initiation. (D) Microstructure of the material observed on a section perpendicular to the fracture surface. The region above the red line suffered microstructure change in a consequence of local heating generated by the friction between the wheel and the track. The whitish region is constituted of untempered martensite. The cracks initiated on the wheel surface due to thermal shock propagated in consequence of thermal fatigue and/or thermal-mechanical fatigue. Above the red line, there is the heat affected zone caused by the heat generated by friction between the wheel and the track. Below the red line, the material presents a regular microstructure for the wheel, constituted of pearlite. Magnification: 50X; etchant: Nital.

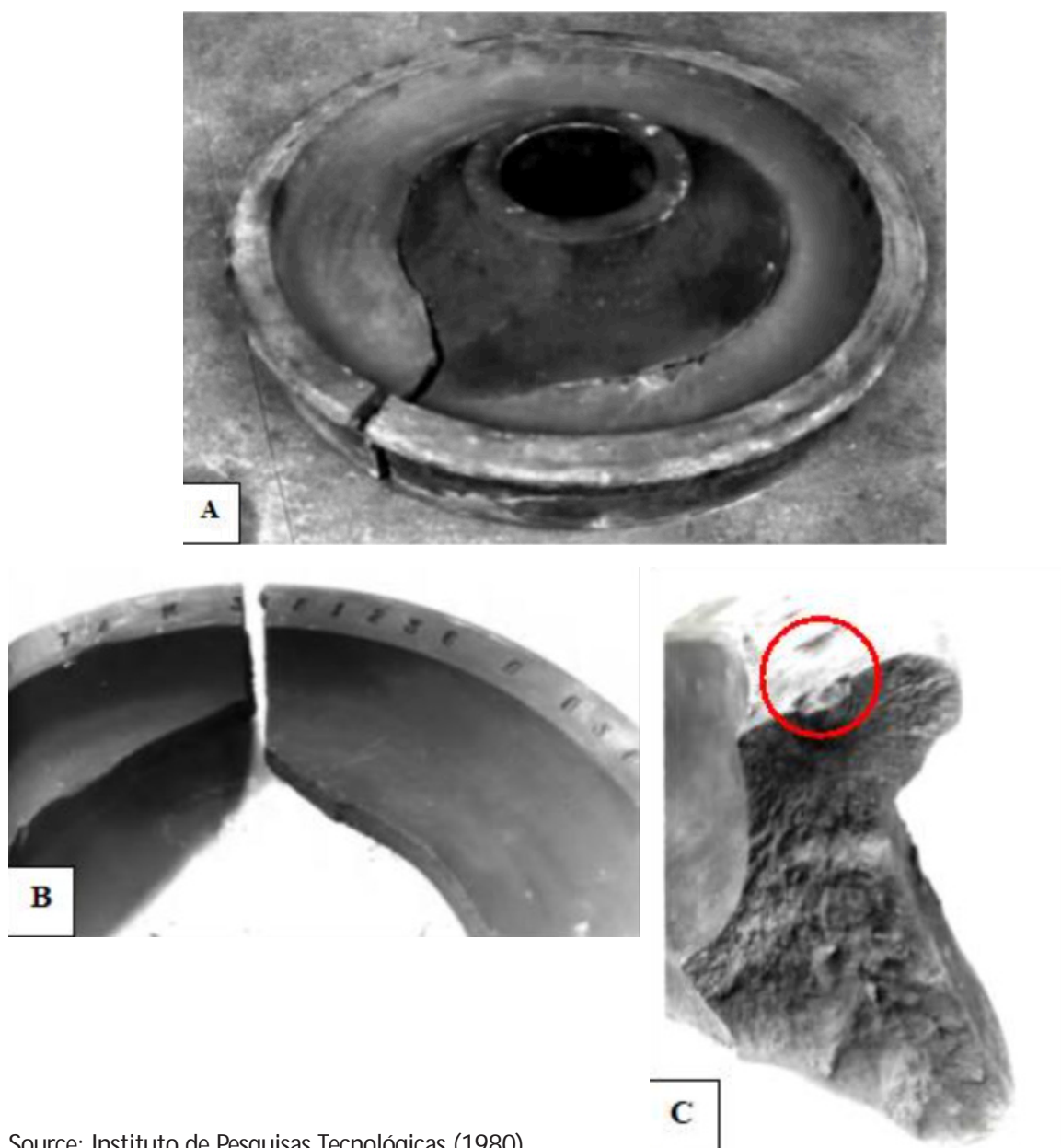


Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, (1981c)

### 2.1.4 Fracture of a wheel due to a too sharp identification mark

Figure 4 (A) presents a train wheel fractured as consequence of a manufacturing defect (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1980). The stress concentration caused by a too deep and sharp identification mark, observed in Figure 4 (B), provided conditions

Figure 4 – (A) General view of the fractured wheel. It can be observed that the hub detached from the wheel. (B) Aspect of rim side (flange) where the identification numbers and letters were stamped. It can be observed that the fracture passes through one of the identification marks. (C) The area outlined by the red circle shows fatigue beach marks spreading out from the tip of an identification mark. Radial marks typical of brittle fracture propagated from the fatigue area.

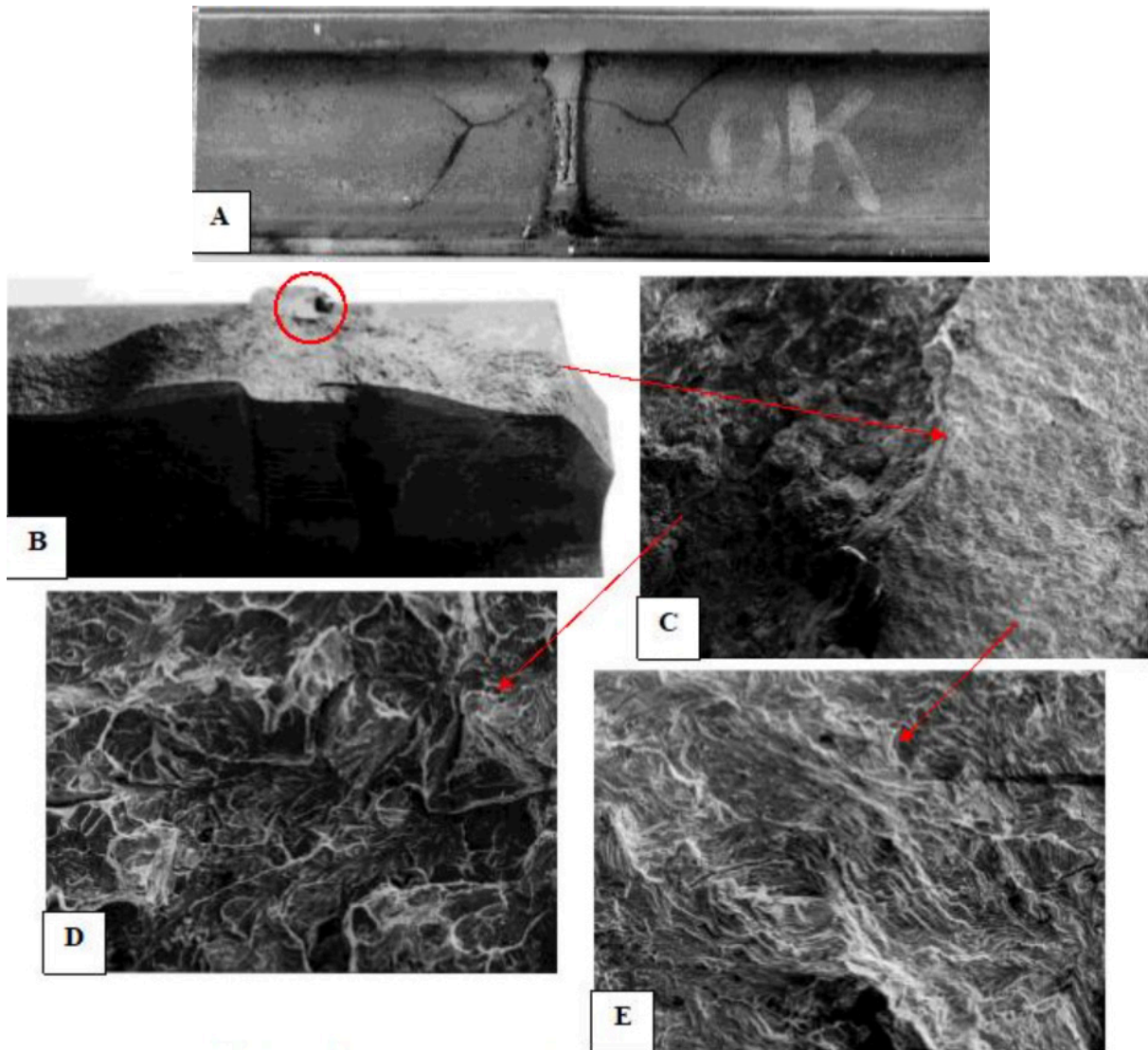


Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1980)

### *2.1.5 Cracking of a rail butt weld joint due to multiple causes*

*Figure 5* (shows a rail butt weld joint cracked in service and removed from the tracks before fracturing (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1990). *Figure 5 (A)* shows the aspect of the joint after a liquid penetrant testing. It can be seen that the crack presents a pattern almost symmetrical in relation to the weld, in which a longitudinal crack splits in both of its ends. *Figure 5 (B)* shows the aspect of the exposed surface of the crack after the rail was properly cut. The region outlined by circle presents a defect in the weld flash that triggered the failure process. Firstly, a small fatigue crack initiated on the defect became unstable and suffered a sudden longitudinal propagation. The stresses responsible for this step were due to a combination of the stress caused by the lateral component of the load applied by the wheel flange on the track and the residual stress due to an inefficient or a lack of stress relieving after welding. The longitudinal propagation of the crack stopped when the stress relieving caused by its own propagation lead it to arrest. After this step, the rail became more compliant allowing the development of four fatigue cracks, two each side. *Figure 5 (C)* show the intersection between longitudinal crack and one of the two cracks that propagate in directions approximately at 45 degrees from the longitudinal crack. From *Figure 5 (C)* two arrows point to two photos of secondary electron image taken in a scanning electron microscope. *Figure 5 (D)* presents the microfractographic aspect of the surface of the longitudinal crack that shows cleavage, and *Figure 5 (E)* presents the microfractographic aspect of the slant crack that shows fatigue striations. The complete process can be described as the initiation of a small fatigue crack in a weld defect due to the lateral loading, applied by the wheel flange on the rail combined with the residual stress due to welding, lead the structure to reach the material's  $K_{Ic}$  generating the longitudinal crack. The longitudinal crack was arrested due to the relief of the residual stress due to the own cracking. After that, the torsion moment due to the lateral component of the load applied on the rail by the wheels caused two fatigue cracks initiated at each end of the longitudinal crack. This is a case in which no accident occurred because the crack was found during the ultrasonic inspection of the tracks before the rail fracturing. The solution of the problem required a better quality control of the weld to avoid and or to remove defects, the stress relieving after welding to reduce the possibility of cracking, and the periodical inspection of the rails by NDT to find eventual cracking occurred in service.

Figure 5 – (A) Overall view of the weld joint. The cracks were revealed by liquid penetrant. (B) Aspect of exposed surface of the horizontal crack and one slant crack. The circled region indicates a weld defect and around it a small smooth flat area of fatigue. The chevron marks observed on the longitudinal crack surface point to the weld region. (C) This picture taken with low magnification in a scanning electron microscope shows the corner between the longitudinal crack and the lower slant right crack. (D) Secondary electron image of the surface of the longitudinal crack showing cleavage. (E) Secondary electron image of the slant crack showing fatigue striations.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1990)

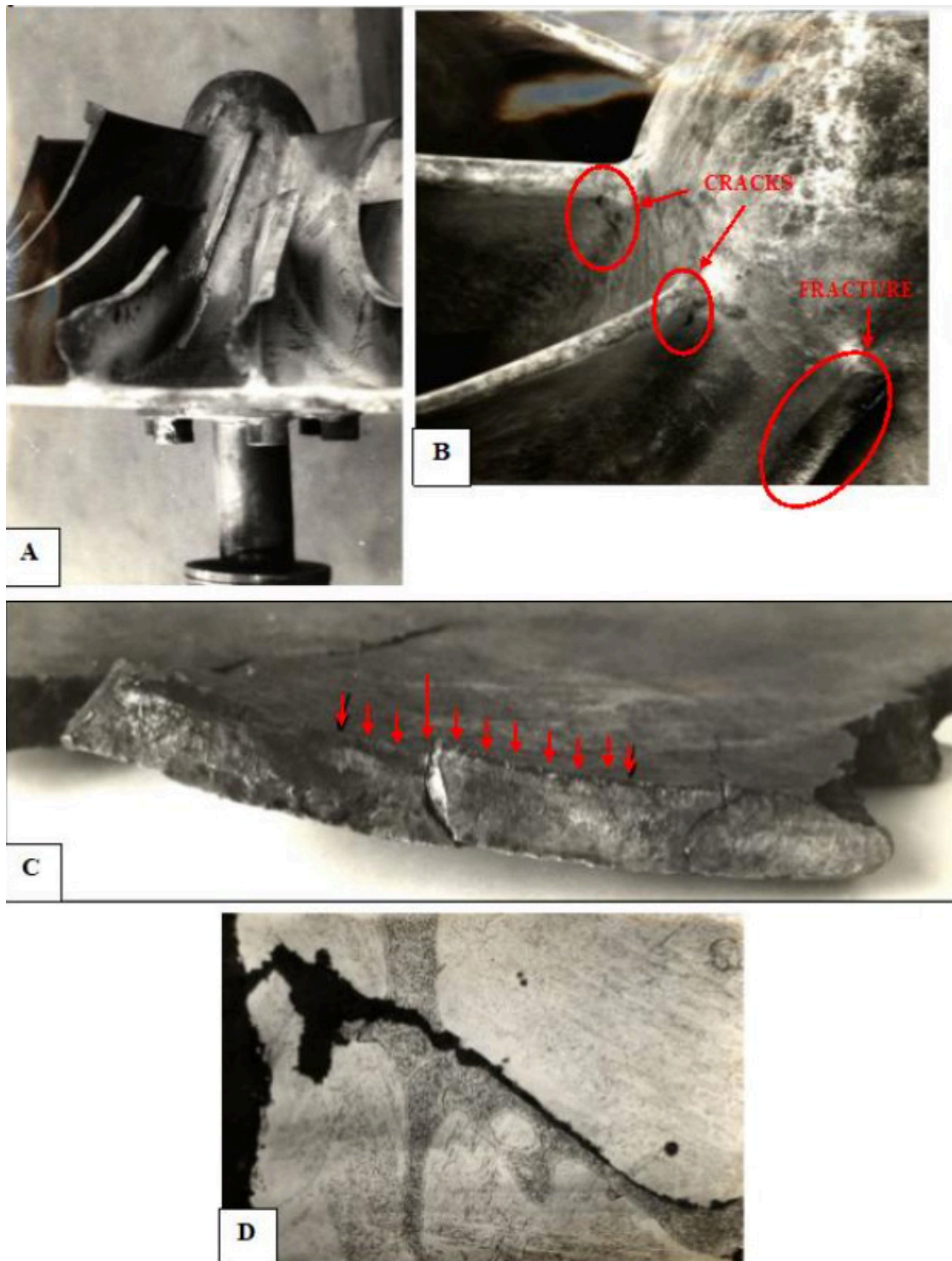
## 2.2 Cases related to steelmaking equipment

### 2.2.1 Corrosion fatigue in a rotor of the first stage of an oxygen plant turbo compressor

The rotor of the first stage of an oxygen plant turbo compressor of a steelmaking company, that had its blades fractured, worked under a severe environment due to air pollution (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1979).

The rotor was made of CB-7Cu, the cast version of the 17-4-PH precipitation hardening stainless steel. *Figure 6 (A)* shows an overall view of the rotor and in *Figure 6 (B)*; two cracks detected by a liquid penetrant test on the base of the blades near a fractured blade can be observed. *Figure 6 (C)*, which shows the fracture surface of a blade detached from the rotor, presents hatched marks typical of fatigue cracks initiated in stress concentration regions. *Figure 6 (D)* shows a photomicrography of a section passing through one crack initiated in a corrosion pit on the blade surface. The WDS analysis performed on the corrosion product in a JEOL JXA-50A Electron Probe Micro-analyzer revealed the presence of the elements oxygen (O), sulfur (S) and chlorine (Cl) inside the pit. The analysis of the water suspension prepared with 5 % of the solid residue removed from the inside of the rotor housing revealed 2.7 pH and chloride and sulfate concentration of 0.07 % and 50.2 %, respectively. The steelmaking plant was near the ocean, the air presented high concentration of SO<sub>2</sub> and, before being compressed, the air was simply dry filtered. The humidity and salt from the sea air, associated to SO<sub>2</sub>, generated in the blast furnace and in the coke plant, provided the condensation of a corrosive solution inside the compressing chamber during the compression. Since pitting corrosion is favored by the exposition of the steel to stagnant contaminated water, it probably occurred during periods in which the compressor was off. The resultant pits became stress raisers responsible for the several points of fatigue initiation indicated by the steps on the fracture surface presented in *Figure 6 (C)*.

Figure 6 – (A) General view of the rotor showing fractured blades. (B) Two cracks detected by liquid penetrant test on blades near a fractured blade. (C) Visual aspect of the fracture surface. The arrows point to hatched marks on the fracture surface typical of fatigue initiation at stress concentration points. The step pointed by the longer arrow indicates a region in which two fronts of fatigue propagation merged. (D) Aspect of the microstructure of a section that crosses a crack propagating from a corrosion pit.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1979)

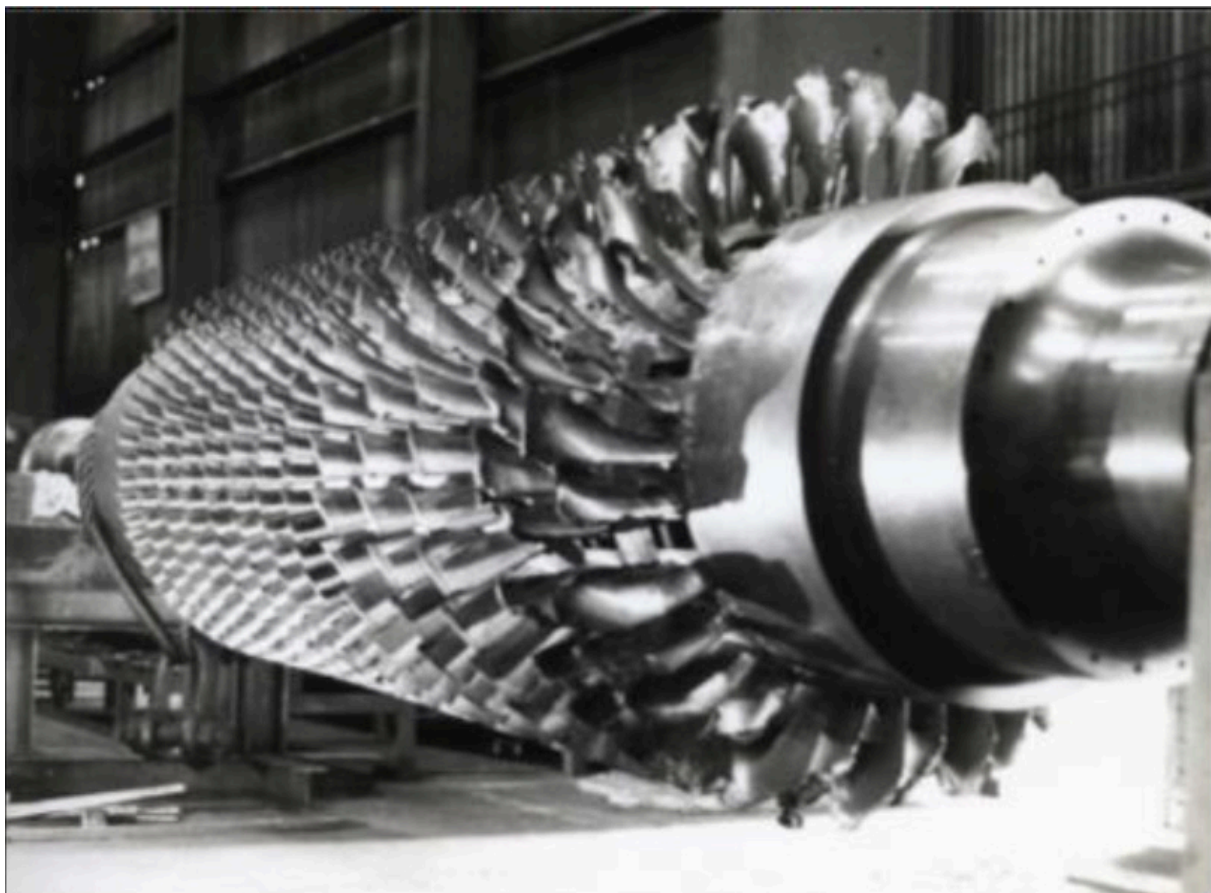
### 2.2.2 Fracture of blades of an axial compressor that fed Cowpers

The fracture of a few AISI 310 stainless steel blades of the rotor of an axial air compressor almost caused a blast furnace shut off (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991a). The compressors were used to feed Cowpers that preheated the air dispensed to the blast furnace tuyères.

The steelmaking company had only two axial compressors for the service, and the other that was scheduled for maintenance could not stop working before the failed one was fixed or substituted. Had the accident of the first compressor occurred just after the second compressor shutdown, the air supply for the blast furnace would have stopped condemning it to freezing.

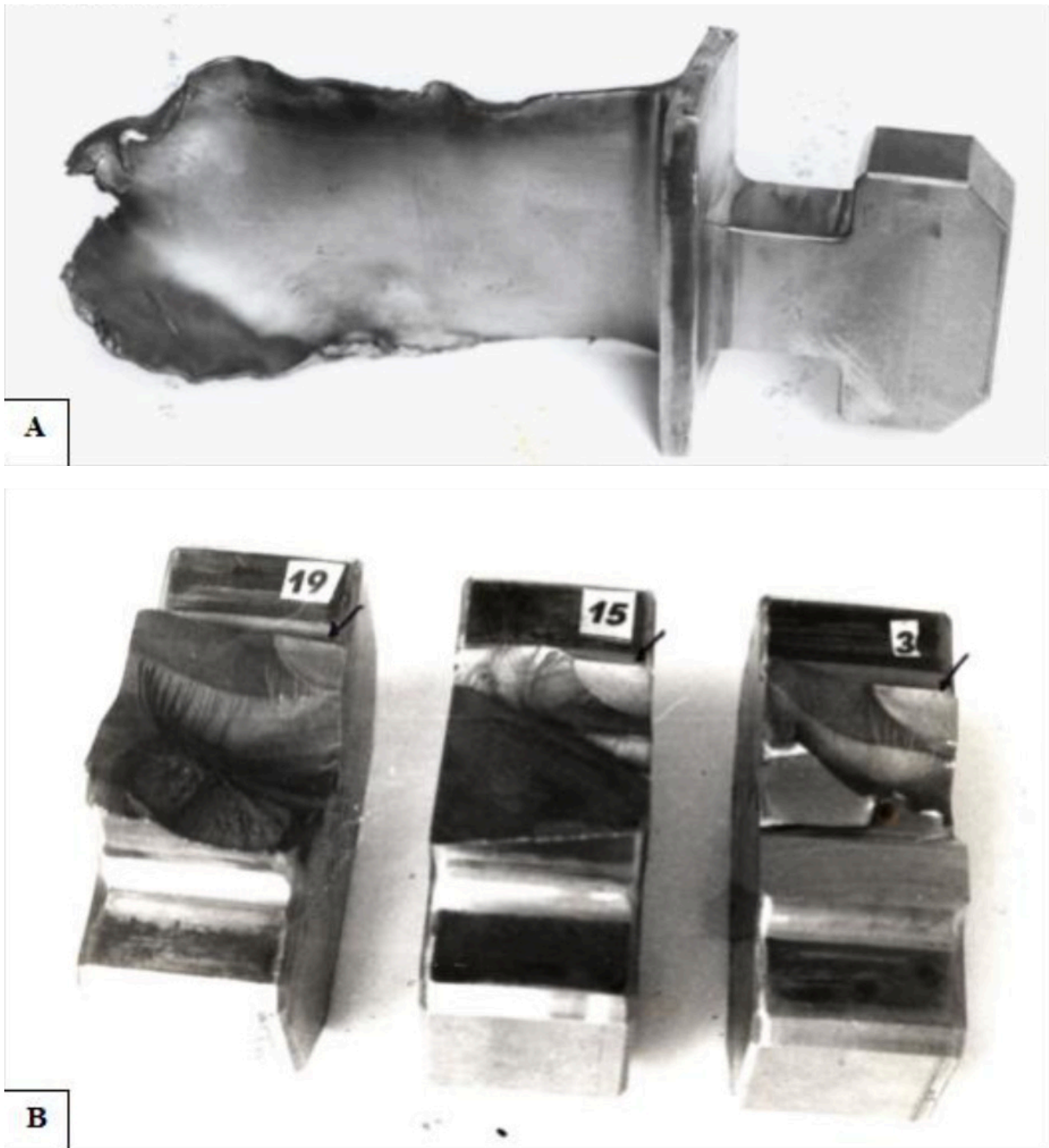
Figure 7 shows a general view of the compressor rotor after the failure. Six blades suffered fracture, three of the first stage, and three of the second stage of compression. The pieces of blades, detached after fracturing, hit other blades damaging not only most of the moving blades that were attached to the compressor shaft but also the stationary blades attached to the compressor case. Figure 8 shows the typical aspect of the fracture occurred in the blades.

Figure 7 – Overall aspect of the failed rotor of the axial compressor.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

Figure – 8 – (A) Aspect of one blade of the first stage of the compressor damaged due to impact against fractured blades. (B) Aspect of fracture surface of three blades showing a similar pattern. The arrows point to the fracture of the three blades initiated near the corner between the neck and the fracture surface.



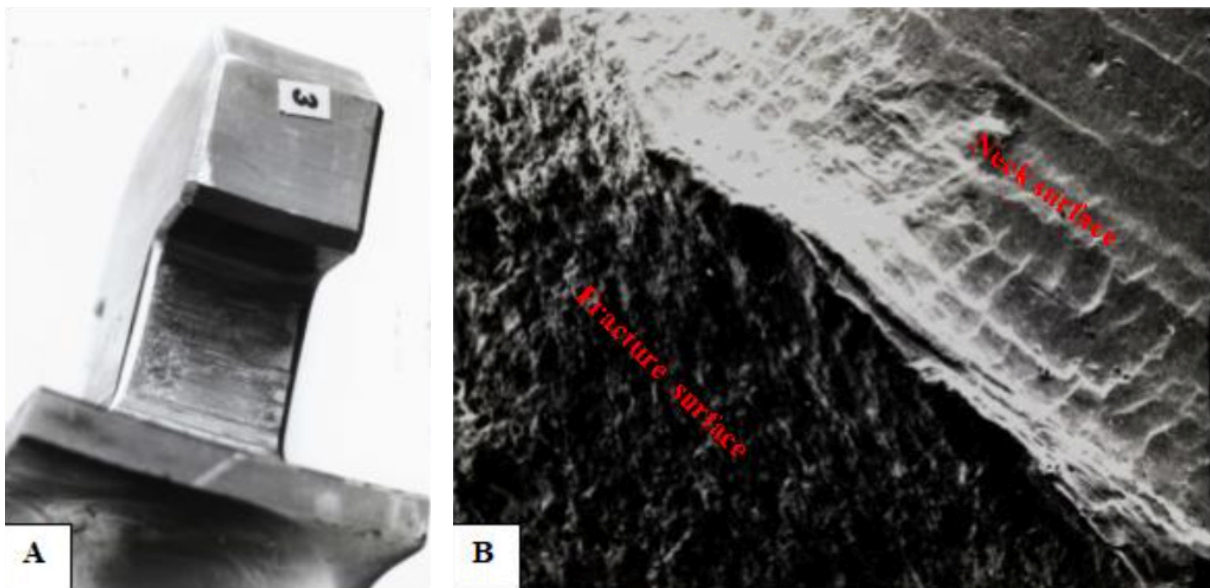
Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1979)

The examination of the fracture surfaces presented in Figure 8 revealed that the fracture occurred due to fatigue. Figure 9 (A) shows the typical aspect of the blade's neck surface that contacted the assembling groove of the rotor's shaft. The neck's surface was damaged by fretting, caused by micro movements between the blade and the shaft due to the vibration occurred in service. The same damaging was observed on the neck's surface of all

blades of stages I and II. Figure 9 (B) shows the typical low magnification secondary electron image of the intersection between the blade surface and the fracture surface. The damage caused by the friction on the blade surface is observed.

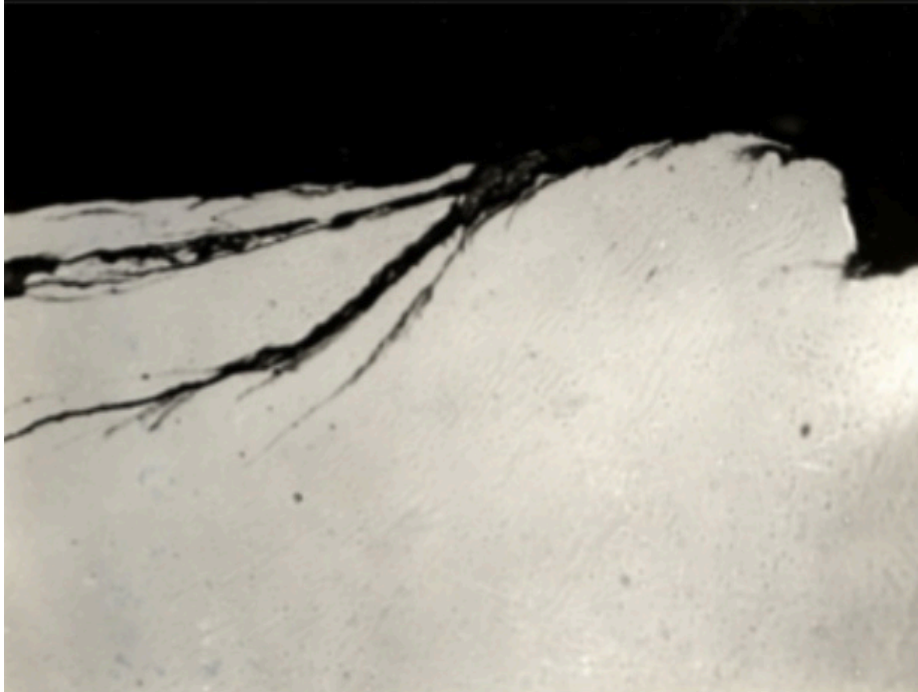
An unetched section, perpendicular to the corner between the fracture surface and the blade surface observed in Figure 9 (B), presented in Figure 10, shows deformation laps on the blade neck surface caused by fretting.

Figure 9 – (A) Aspect of a blade neck's surface showing scratching caused by friction against the shaft's groove surface. (B) Secondary electron SEM image showing the intersection between a fracture surface and a blade surface showing damage caused by friction on the neck surface.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

Figure 10 – Aspect of a section observed by optical microscope perpendicular to the corner between the fracture surface and the blade's neck showed in Figure 9 (B) showing deformation laps on the neck surface. Unetched. Magnification 500 X.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

*The major cause of the fracture was the too small clearance between the blade's neck surface and the shaft's groove surface which allowed the contact between the surfaces and consequently fretting. The stress responsible for the fatigue was due to vibration combined with the stress due to the radial load caused by the centrifugal force on the blades estimated in about 40 % of the yield stress of the material (520 MPa) for the blades of stage I of the compressor.*

## 2.3 An example of rupture of containers for liquefied gases

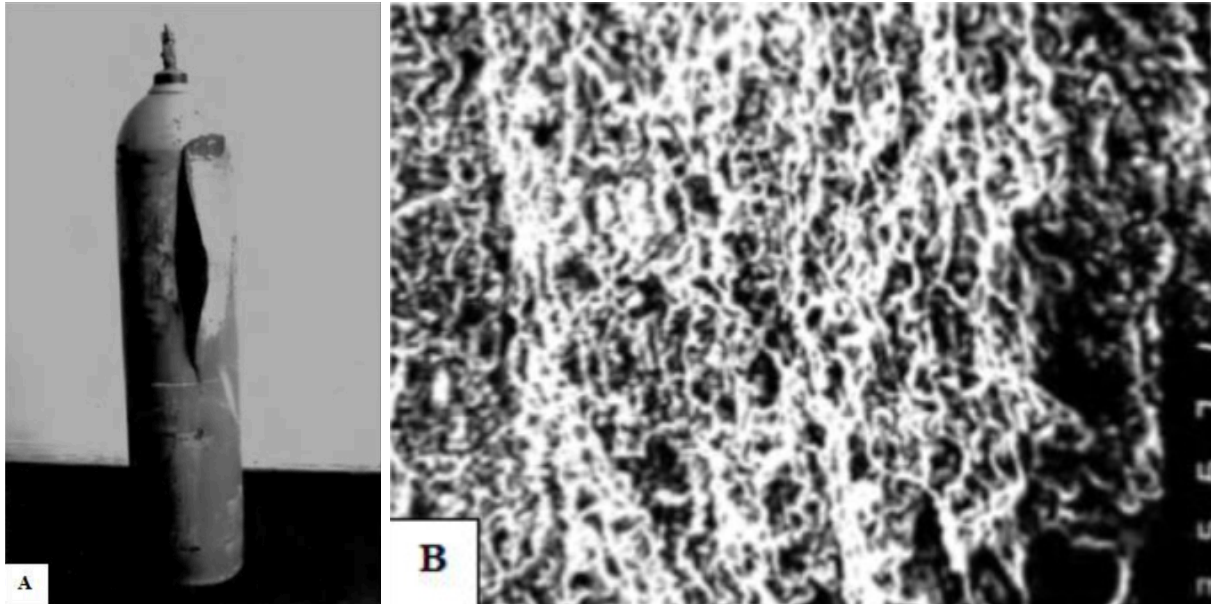
Many gases under pressure are in equilibrium liquid/gas states at room temperature. In those cases, the volume of the container is filled with a mass of product partly in liquid state and partly in gas state. Since there is gas and liquid inside the container, the internal pressure is the vapor pressure of the substance for the temperature at which it is maintained. In this condition (constant volume), a temperature rising increases the volume of the liquid fraction and a temperature lowering reduces the volume of it. If the container is overcharged, it is possible for the whole volume of the container to be totally filled with liquid. It can be found in thermodynamics data books that the compressibility of liquids is much smaller than the compressibility of gases. If the container is totally filled with liquid, liquid

expansion due to heating will stress the container walls much more than if the container is filled with liquid in equilibrium with gas at the same temperature.

Normally, to avoid overpressure of the container, it is equipped with safety valves. There are different kinds of safety valves, those limited by pressure and those limited by temperature. Valves that open above a defined pressure can simply be rupture discs made of defined thickness and material resistance that once ruptured, release all the gas inside the container. Another type of pressure limiting valve is provided with a spring that maintains it close until the opening force due to the internal pressure overcomes the shutting force applied by the spring. Once opened, the valve releases gas just enough to relief the pressure in excess, and closes. There are valves controlled by temperature made of low melting-point alloys that melt when it is reached, releasing all the gas.

*Figure 11 (A)* presents a cylinder for chlorine gas that, after being exposed to sun during a summer-time day on a truck bucket, had a sudden rupture (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991b). The inhalation of the gas by a person that was near the container led him to death. The material analysis did not reveal any quality problem in the cylinder and the fracture was 100 % ductile as can be observed by macroscopic deformation showed in *Figure 11 (A)*, and microscopically by the dimples revealed in a scanning electron microscope secondary electron image presented in *Figure 11 (B)*.

Figure 11 – (A) Aspect of the cylinder after rupture. It can be observed that the rupture was accompanied by macroscopic plastic deformation. (B) Secondary electron image of the fracture surface observed in a scanning electron microscope. The fracture surface is constituted only with dimples.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991b)

*The cylinder volume was 50 liters and was able to be filled up to 68 kg of chlorine. Chlorine is a substance that, as LPG and CO<sub>2</sub>, under pressure, can be kept liquefied at room temperature. At constant temperature, the pressure is maintained constant as long as there is gas and liquid simultaneously inside the container. The problem occurred because the cylinder was overloaded leading the cylinder to be totally filled with chlorine in a liquid state and it was equipped only with a fusible safety valve that should open when the temperature reached 70 °C. Because the cylinder was too full, it reached a rupture pressure much before the melting temperature of the fusible valve was reached. Calculations in the report demonstrated that an overload of 5 kg of chlorine would be enough to lead the cylinder to yield at 30 °C. Other cylinders of the same lot were found with more than 5 kg overload sustained the assumption that the failed cylinder was overloaded. The ductile fracture, the obedience of the material to the specifications and the absence of manufacturing defects in the container indicate that the material quality should not be responsible for the failure.*

*The use of an inappropriate safety valve, the overloading during the cylinder fill up and the heating caused by the sun exposure caused the cylinder rupture. The simple obedience to the limit loading and proper storage of the chlorine cylinder would have avoided the accident.*

## 2.4 Cases related to new material processing

### 2.4.1 Fracture of a concrete prestressing steel bar

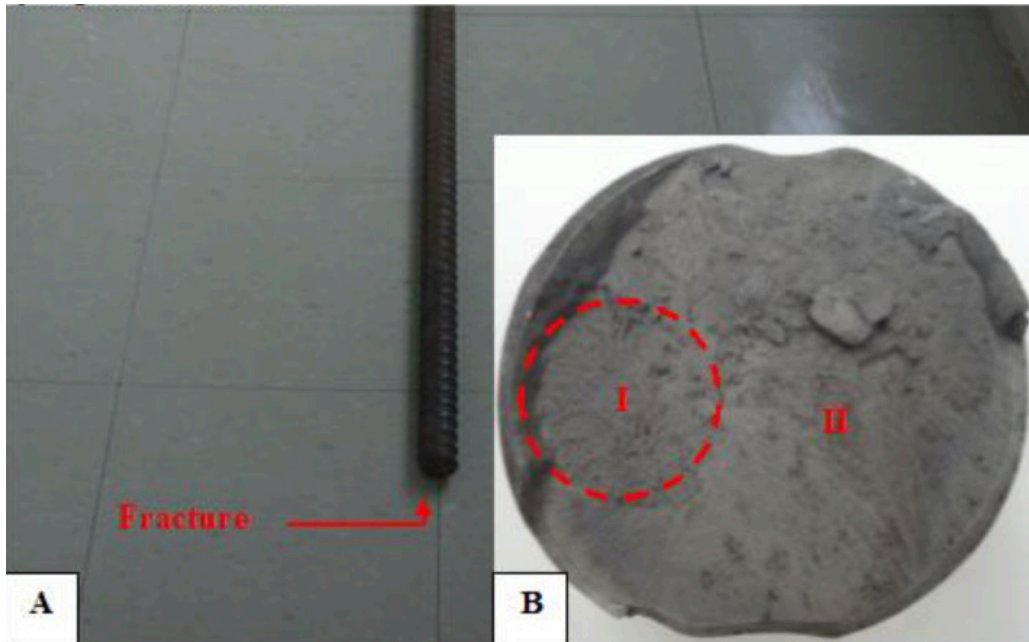
The steelmaking processes have been developed in such a way that currently it is rare to find steels that do not obey the specified chemical composition. The improvements on steel refining lead the content of impurities like sulfur and phosphorus to levels at least one order of magnitude below the minimum specified long ago by standards that have been valid until nowadays. In the past, when out of the specification, these impurities used to be responsible for low performance of steels. However, there are a few situations in which a too low percentage of sulfur can become a problem. Too low sulfur can make hardened and tempered steel prone to develop a defect named fisheyes due to the action of low hydrogen levels that, in the past, were considered safe. It has been found that some sulfur can be helpful to protect steel against hydrogen (FRUEHAN, 1997). Depending on the application, it is possible to be necessary to establish not only the maximum level but also a minimum level of sulfur content.

*Figure 12* shows a quenched and tempered rebar used for prestressing concrete that fractured due to hydrogen (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2014). The material chemical composition obeyed the specified by ISO 6934-1 [INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION, 1991], but the sulfur content was 0.006 %, or one order of magnitude below the maximum established by the standard (0.040 %). The fracture surface showed in *Figure 12 (B)* presents an almost circular area from which the fracture propagated.

*Figure 13* shows secondary electron images (SEI) of Regions I (fracture initiation) and II (fracture propagation) indicated in *Figure 12 (B)*. *Figure 13 (A)* shows that the aspect of

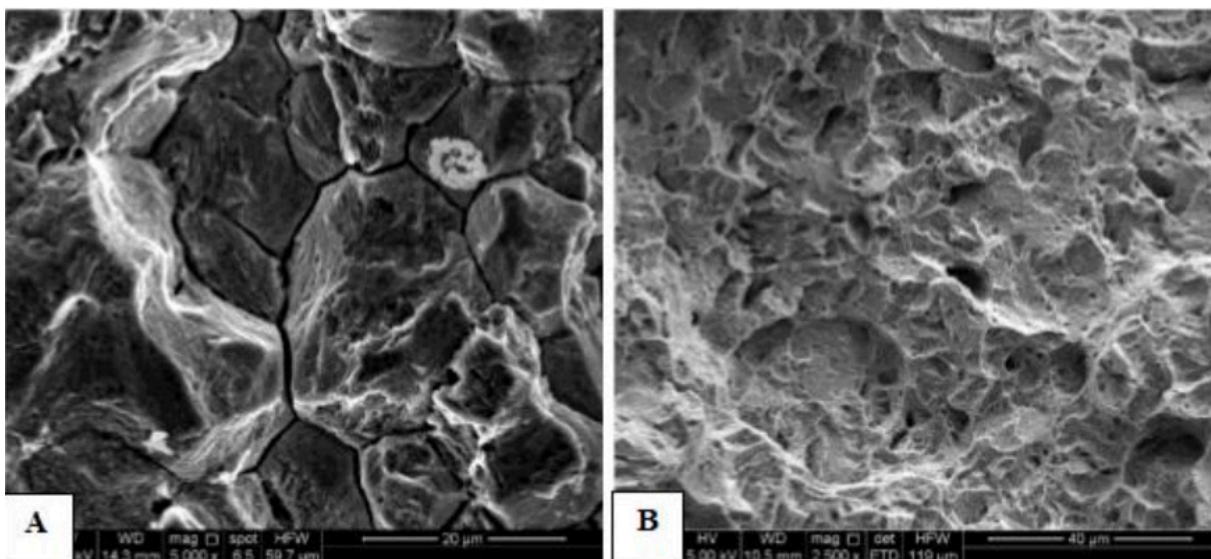
the fracture of Region I is intergranular with secondary intergranular cracks, typical of hydrogen embrittlement. *Figure 13 (B)* shows the aspect of Region II of the fracture surface which is constituted of a mix of cleavage and dimples, sometimes, named quasi cleavage.

Figure 12 – (A) Fractured rebar for pre-stressed concrete. (B) Aspect of the fracture surface. The circled area of the left side of the fracture outlines a fisheye due to hydrogen embrittlement.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014)

Figure 13 – (A) Aspect of fracture surface observed by scanning electron microscopy of Region I of Figure 10 showing intergranular fracture and secondary intergranular cracks. (B) Aspect of fractured surface observed by scanning electron microscopy of Region II of Figure 1. Mix of cleavage and dimples - quasi cleavage.

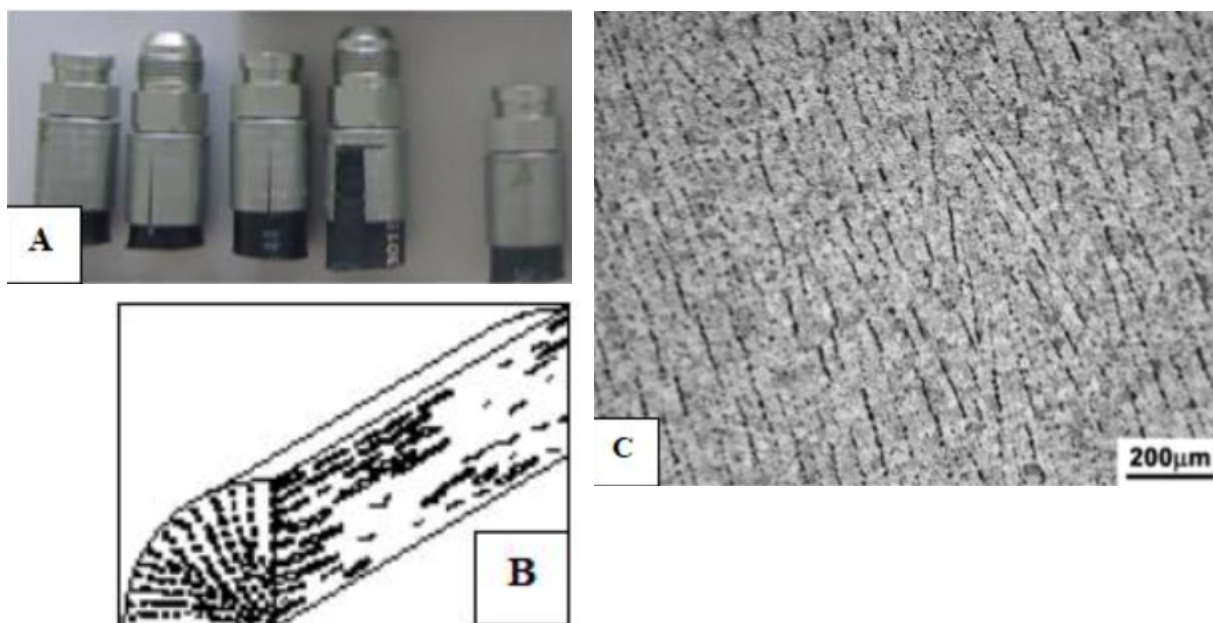


Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014)

*Figure 14 shows another example of a material that had its implicit properties reduced by new processing (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2009). The parts observed in Figure 14 (A) were high pressure hose couplers. The regular process to make the couplers was to machine bars of resulfurized steel. The assembling operation by spiking the coupler on the hose used to be applied for a long time without so many cracking events.*

*When the manufacturer started to use continuous cast hot-rolled resulfurized steel bars, the cracking during the spiking of the couplers on the hoses began to become epidemic. The cause was the percentage of area reduction during the rolling of the new steelmaking process was not high enough to eliminate the radial orientation of the inclusions generated in the solidification as shown in Figure 14 (B). The hot-rolled bars passed in all tests long ago established according to standards. However, the new steelmaking process not only caused radial columnar grain grown along the radial direction, orienting the inclusions along the columnar grain boundaries but also was not able to break the orientation of the inclusions in the radial direction because the area reduction during hot rolling was not high enough for that. The inclusion orientation of bars produced according to the former process was predominantly longitudinal, whereas, on the new process, the inclusions were also oriented on the radial direction reducing the material's ductility in the direction perpendicular to the coupler radius.*

Figure 14 - (a) General view of some connectors. Observe longitudinal cracks in two of them. (b) Sketch showing the orientation of the sulfide inclusions in both longitudinal and transversal directions of the continuous cast hot rolled steel bar. (c) Photomicrography showing the orientation of the inclusions in the radial direction observed on the transverse section of the coupler.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2009)

*Other situations, in which shortcuts or changes on the traditional processes were responsible for failures, have been analyzed by IPT failure analysis team. Cases involving materials that had not had the microstructure properly homogenized due to a deficient combination between heat treatment and hot working are not uncommon. It is not uncommon either to have shafts and other moving parts to fracture due to fatigue initiated in internal flaws related to the continuous casting of plates and bars that suffered insufficient hot working after casting.*

*The classical processes to make plates, bars and forgings are highly energy consuming, because thick cast blocks and plates obtained from the steel plant require much hot working and reheating during rolling and forging operations. From more than half a century, classic ingot, billet and plate casting has been substituted by continuous casting which not only reduces the cost but also improves the productivity of steelmaking, demanding much less energy on the following processes of rolling and/or forging. Continuous casted plates and bars do not require much hot working to reach the desired size. However, the extensive hot working and reheating, required in the former process, can provide a better homogenizing of the material microstructure than that obtained from hot worked continuous casted plates and billets.*

*Because of the smaller reduction of thickness in rolling and forging of continuous casted plates and bars, the manufacturing of some products using this kind of material can become more complicated. The manufacturer buys steels that obey specifications established by standards long ago. However, the steels produced in the past were processed in such a way that some implicit properties, as bending or impact resistance provided by the former processes, were superior to the same properties in materials produced according the new continuous process. Since the new material attends the properties established by the standard (but not the implicit properties) the manufacturer that uses the steel will pay the onus of the innovation on the steelmaking, many times being led to change the manufacturing process or the material.*

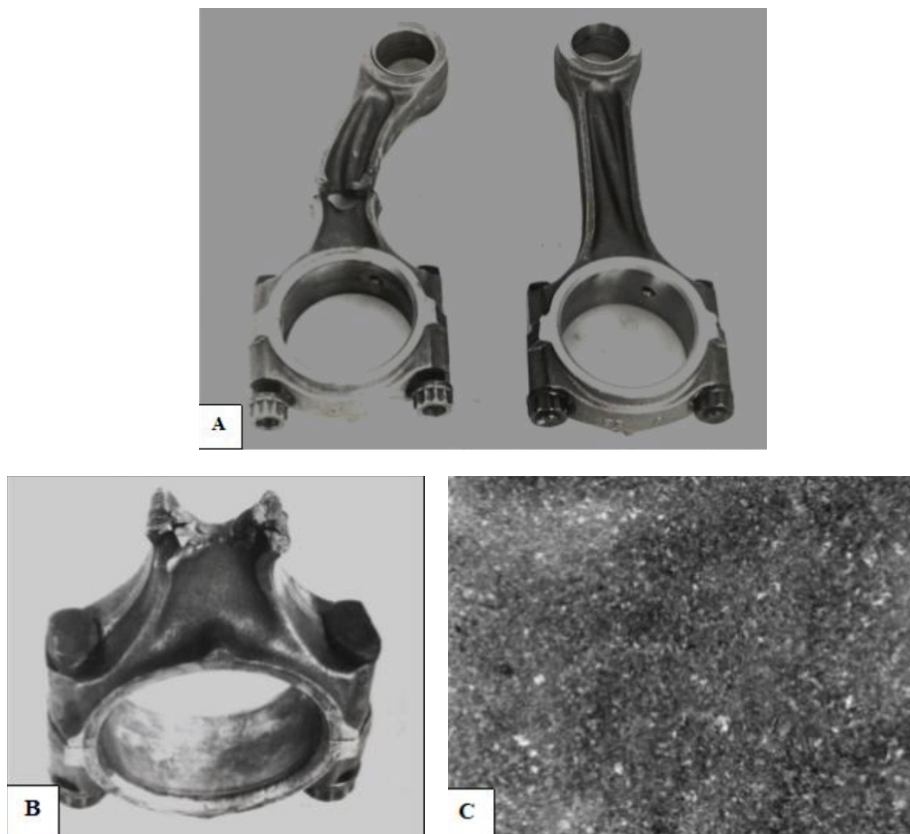
*The conclusion is that the new processing techniques have been revolutionary and came to stay. However, for some applications, there is still a place for materials processed by the former way, mainly for those cases in which the materials cost is negligible when compared with the cost of a failure.*

## 2.5 It could happen to you

Driving through flooded areas can bring a problem that many car drivers are not aware of. The best recommendation could be do not try to cross over a flooded area if you have a choice. Some people try to cross over flooded areas and water streams pushing the gas pedal to avoid the engine shut off. Many times, it works but if water level is high enough to reach the air admission, water will be sucked in, filling the engine cylinder, and causing a hydraulic block. What does it mean? When water is inside the cylinder, the piston, instead of compressing a mixture of fuel and air, it will compress liquid water. This process imposes severe dynamic compressive loading to the connecting rod leading it to buckle.

Figure 15 (A) shows two connecting rods. On the left, one fractured after buckling due to a hydraulic block and, on the right, a new one (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1996). The fracture surface showed in Figure 15 (B) was too damaged to be analyzed by SEM. The material presented a microstructure constituted of tempered martensite as can be observed in Figure 15 (C) and hardness of 250 HB which was according to the specifications.

Figure 15 – (A) Aspect of two pickup truck connecting rods. The one on the left fractured after buckling due to a hydraulic block and the one on the right was new. The fracture surfaces do not match perfectly because after the fracture the engine kept running for some time damaging them. (B) View of the fracture surface. (C) The microstructure of the material is tempered martensite.



Source: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1996)

To avoid hydraulic block, vehicles designed to cross over water streams (normally SUV's and trucks), besides four-wheel-drive, should have the air filter and the exit end of exhaust gases pipe positioned at the vehicle top level.

## 4 Acknowledgements

To my mentors Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva and Tiberio Cescon (in memoriam) for showing me how to identify what matters and what does not in failure analysis, always following a path based on ethics. To IPT, where I built up my professional background, for allowing me to write this paper. To Vanessa Yumi Nagayassu Ferrari for providing the digital copies of old report photographs.

## 5 References

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK COMMITTEE. *Metals handbook*. 8th ed. Metals Park : ASM, 1975. v.10, p.61.

AZEVEDO, C.R.F. ; CESCO, T. (Ed.). *Metalografia e análise de falhas – casos selecionados (1933-2003)*. São Paulo: IPT, 2004 . p.21-24.

COLPAERT, H. *Metalografia macrográfica e micrográfica dos produtos siderúrgicos comuns*. São Paulo: IPT, 1951. (IPT-Boletim 40).

FRUEHAN, R.J. A review of flaking and its prevention. *Iron & Steelmaker*, v.24, n.8, p. 61-69, Aug. 1977.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 15 505*. São Paulo: IPT, 1981a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 15 935*. São Paulo: IPT, 1981b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 15 662*. São Paulo: IPT, 1981c.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 13 968*. São Paulo: IPT, 1980.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 28 484*. São Paulo: IPT, 1990.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 12 559*. São Paulo: IPT, 1979.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 29 564*. São Paulo: IPT, 1991a

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 28 941*. São Paulo: IPT, 1991b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report 138 657-205*. São Paulo: IPT, 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *IPT Technical Report. 108 180-205*. São Paulo: IPT, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 6934-1: Steel for the prestressing of concrete – General Requirements*. Geneve, ISO, 1991.

ITO, H.L. Apoio do Laboratório de Metalografia do IPT à Ferrovia. *Ferrovia*. São Paulo, n. 150, p. 1E-12E, jan./feb., 1994.

ITO, H.L. Metalografia – 100 anos no Brasil. *Metalurgia e Materiais*. São Paulo, v.63, p.573-78, nov. 2007.

PUJOL H.G. Noções elementares de Metallographia Microscopica e Analyse Thermica. *Revista Polytechnica*. São Paulo, n. 39/40, oct./nov., 1912.

DOI 10.34033/2526-5830-v4n15-3



# Estudo de manchamento alaranjado em granito branco

*Study of orange staining in white granite*

Eduardo Brandau Quitete<sup>a\*</sup>, Natasha da Silveira Pinto<sup>b</sup>,  
Mírian Cruxên Barros de Oliveira<sup>c</sup>

a Laboratório de Materiais de Construção Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Fundação de Apoio ao IPT, São Paulo-SP, Brasil.

c Diretoria de Inovação, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: quitete@ipt.br

Palavras-chave:  
rochas de revestimento; granito;  
manchamento

*Keywords:*  
*rocks for cladding; granite;*  
*staining.*

## Resumo

O aparecimento de manchas alaranjadas é bem conhecido no setor de rochas de revestimento. Em geral os manchamentos são considerados resultado da remobilização de íons  $Fe^{2+}$  e deposição como  $Fe_2(OH)_3$ . Embora a explicação seja fácil e bem conhecida, é difícil a percepção da mancha sob microscópio óptico e mais ainda por microscopia eletrônica de varredura. Neste trabalho foi possível detectar concentrações de ferro remobilizado, inferir sua origem e entender o motivo da dificuldade de detecção do elemento ferro da mancha ao microscópio eletrônico. Os resultados indicam que o manchamento é, de fato, causado por ferro remobilizado de filossilicato, contendo este elemento (zinnwaldita), e depositado nos contatos entre os grãos minerais da rocha e em fissuras e clivagens dos minerais, principalmente em subsuperfície.

## Abstract

The occurrence of orangey stains is well known in the stone cladding industry. They are usually considered result of Fe<sup>2+</sup> ions remobilization and deposition as Fe<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>. Although the explanation is easy, it is difficult to perceive the stain spot by optical microscope examination and even harder by electron microscopy. In this work it was possible to detect remobilized iron concentrations, infer its origins and understand why it is difficult to detect iron in the stain area by electron microscopy. The results point to that the staining is indeed due to iron remobilized from iron bearing phyllosilicate and deposited in grain contacts, cracks and mineral cleavages, especially in subsurface.

## 1 Introdução

Na maioria das rochas ígneas ou metamórficas que incorporam o elemento ferro durante sua formação no interior da terra, este é bivalente (Fe<sup>2+</sup>). Em condições atmosféricas de temperatura, pressão e umidade, o ferro presente nos minerais tende a aumentar seu estado de oxidação de 2+ para 3+ e oxidar-se como FeOOH, em geral na forma cristalina de goethita ou sem arranjo cristalino definido, ou seja, amorfo (WINKLER, 1975).

O fenômeno das manchas ferruginosas é bem conhecido no setor de rochas ornamentais ou de revestimento, principalmente em mármore. Por outro lado, são escassos os estudos da formação de manchas ferruginosas em granitos (FRASCÁ, 2003). Em um desses poucos trabalhos, Quick Sirivivatnanon (2008) estudaram um sienito australiano de granulação fina contendo siderita (FeCO<sub>3</sub>), que apresentou manchamento visualmente semelhante ao descrito no presente estudo. Os autores concluíram que seria originado pela alteração da siderita para óxidos/hidróxidos de ferro, e, que as manchas permanecem estáveis por décadas. A siderita é um mineral pouco comum em granitos e rochas semelhantes, e não foi encontrado registro de sua ocorrência em granitos de revestimento no Brasil.

Frasca (2013) afirma que o amarelecimento ou manchamento ferruginoso é a ocorrência de alteração de cor mais comum em rochas brancas, sejam granitos ou mármore. Um dos possíveis mecanismos seria a deposição de óxidos ou hidróxidos de ferro em microdescontinuidades presentes nos minerais formadores da rocha.

Calegari et al (2019) concluem que dois granitos brancos, diferentes do estudado aqui, apresentaram manchamento marrom-alaranjado, ainda no processo de desdobramento em chapas, devido à remobilização do ferro da variante almandina (Fe<sup>2+</sup><sub>3</sub>Al<sub>2</sub>[S<sub>1</sub>O<sub>4</sub>]<sub>3</sub>) da granada, e deposição em fissuras como óxido de ferro, embora os resultados não permitam descartar hidróxidos de ferro como a forma final do ferro manchante.

De acordo com Gomes (2006), as rochas granitóides da Suíte Magmática de Santa Quitéria estão localizadas na porção setentrional da Província Borborema e correspondem a corpos graníticos de caráter sin, tardi a pós-tectônicos na forma de batólitos e "stocks" alongados a subarredondados, e às vezes anelares intrusivos e/ou gradando para metatexitos e diatexitos. No arco magmático de

Santa Quitéria, a grande maioria das determinações de idade está no intervalo 640-610 milhões de anos (NEVES et al., 2014).

Os corpos graníticos São Paulo e Morrinhos se diferenciam dos outros por serem hololeucocráticos, e de cor branca com megacristais de feldspatos e quartzo, granulação média a grossa e isotrópica (GOMES, 2006). Petrograficamente, segundo o mesmo autor, a associação quartzo + albita + K-feldspato + muscovita (zinnwaldita) + fluorita ou topázio caracteriza a maioria desses granitos tardios, classificados como albita, granitos com topázio, fluorita e zinnwaldita.

Zinnwaldita é uma série mineral de micas escuras contendo lítio (RIEDER et al., 1998). Sua composição contém teores variáveis de  $Fe^{2+}$  e Li, definindo os membros da série conforme essa variação. Pode ainda conter flúor e manganês.

Este trabalho objetivou determinar a causa do manchamento de cor alaranjada e dimensões milimétricas na superfície de ladrilhos de granito branco.

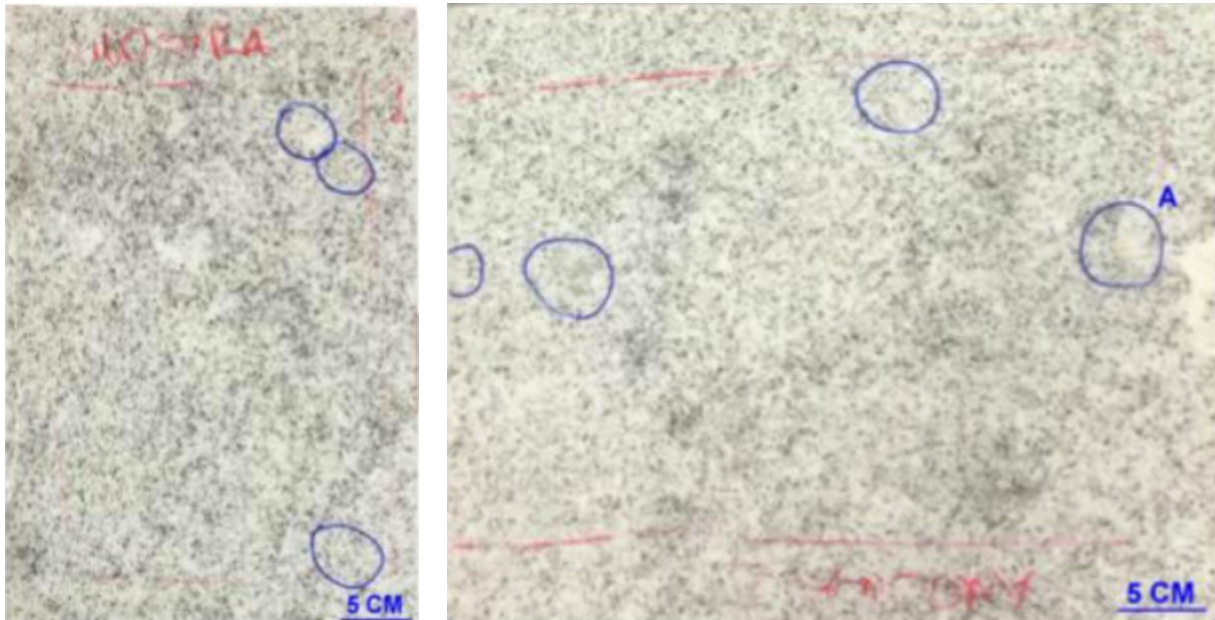
## 2 Materiais

Rocha designada comercialmente como "Granito Branco Alpha" (referência do laboratório LMCC 497/15). A amostra, fornecida em 17.07.2015, sob a forma de dois ladrilhos polidos de aproximadamente 40 cm x 27 cm x 2 cm e 45 cm x 36 cm x 2 cm, procedente de Serrote São Paulo, Município de Santa Quitéria, Ceará. Apresenta granulação fina, cor cinza claro e pequenas manchas alaranjadas de poucos milímetros de diâmetro dispersas irregularmente na superfície, conforme Figuras 1 e 2. Segundo o geólogo Eleno de Paula Rodrigues (informação verba<sup>1</sup>), que trouxe as amostra para estudo, as manchas são percebidas nos blocos, ainda na jazida e não se conseguiu removê-las das chapas com os produtos usuais do mercado. Informou ainda, que não foi percebida evolução das manchas no processo de beneficiamento entre a jazida e as chapas polidas e que, face à impossibilidade de remoção das manchas, o produtor descarta as chapas que apresentam as manchas.

---

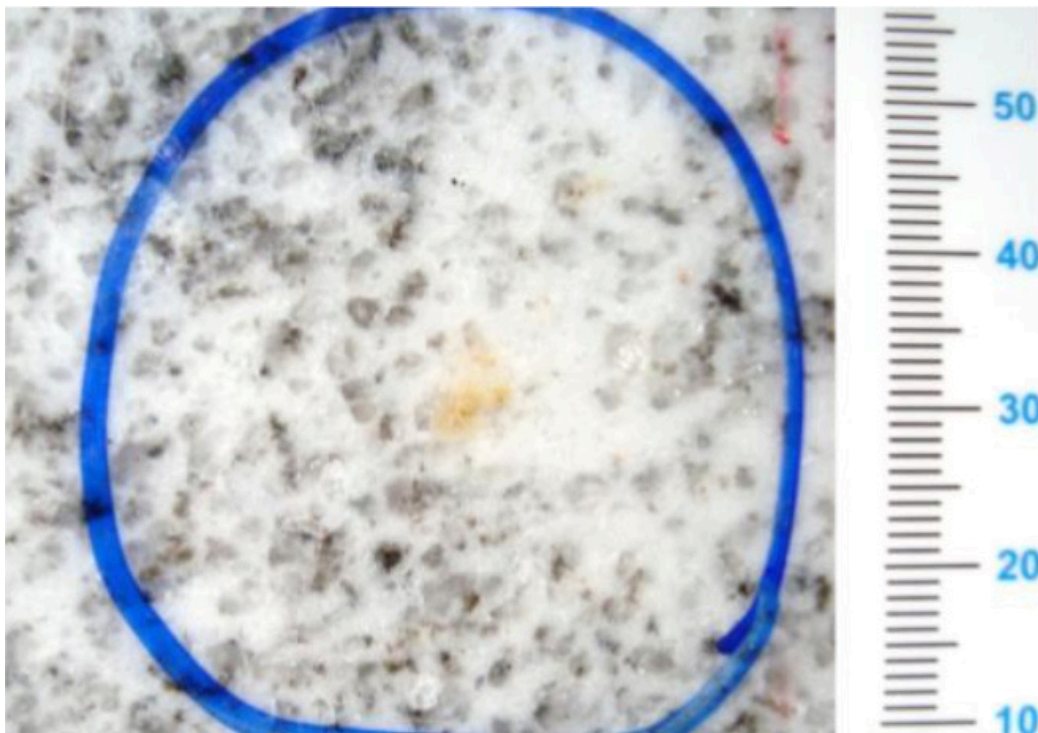
<sup>1</sup> Informação fornecida via contato telefônico, em junho de 2020.

Figura 1 – Dois ladrilhos polidos do “Granito Branco Alpha” (LMCC 497/15). Os círculos em azul indicam os locais das manchas.



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 2 – Foto da mancha alaranjada à direita (identificada por “A”) na Figura 1. Escala em milímetros.



Fonte: elaborado pelos autores

## 3 Métodos utilizados

Foram realizados: observação em estereomicroscópio, análise petrográfica sob microscópio ótico de luz transmitida e microscopia eletrônica de varredura com microanálise, conforme descrito a seguir.

### 3.1 Observação em estereomicroscópio

Algumas manchas, sempre da superfície polida, incluindo aquela na área submetida à microscopia eletrônica, foram observadas com luz refletida em estereomicroscópios (lupa binocular) marca Wild, modelo M5 e marca Leica, modelo M165 C, este último com câmera digital marca Leica, modelo DFC425 acoplada. A observação em estereomicroscópio permite estudar materiais transparentes em três dimensões, ou seja, fornece visualização da superfície e subsuperfície. A técnica de observação com o estereomicroscópio utiliza aumento menor que a análise petrográfica e, por isso, abrange maior área na amostra.

### 3.2 Análise petrográfica

A análise petrográfica foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 15845-1:2010 - "Rochas para revestimento - Parte 1: Análise petrográfica" (ABNT, 2010), da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. O método consiste no estudo de seções delgadas conforme resumido a seguir.

Foram cortados, com disco diamantado, dois pequenos blocos com cerca de 30 mm de comprimento, 20 mm de largura e com espessura original. Cada bloco foi lixado, colado em lâmina de vidro, cortado e desbastado com carbetto de silício até que a seção colada à lâmina atingisse a espessura de 0,03 mm, sendo então coberto com lamínula de vidro. Um bloco teve a superfície polida colada à lâmina, enquanto que o outro teve uma superfície perpendicular à superfície polida colada na lâmina de vidro. As seções delgadas, de áreas ortogonais entre si, foram estudadas em microscópio de luz transmitida com dupla polarização e platina giratória (microscópio petrográfico) e a classificação petrográfica seguiu os critérios propostos por Le Maitre (1989).

Utilizou-se microscópio marca Leica modelo DM4500 P e câmera digital marca Sony, modelo Cyber-shot DSC-W125.

### 3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise por dispersão de energia (EDS)

Uma das áreas apresentando manchamento foi analisada por microscopia eletrônica de varredura na superfície polida de um bloco com cerca de 10 mm x 10 mm, obtido por corte em serra de disco diamantado. O fragmento foi preparado por recobrimento com ouro em sua superfície polida para garantir a boa condutividade de elétrons.

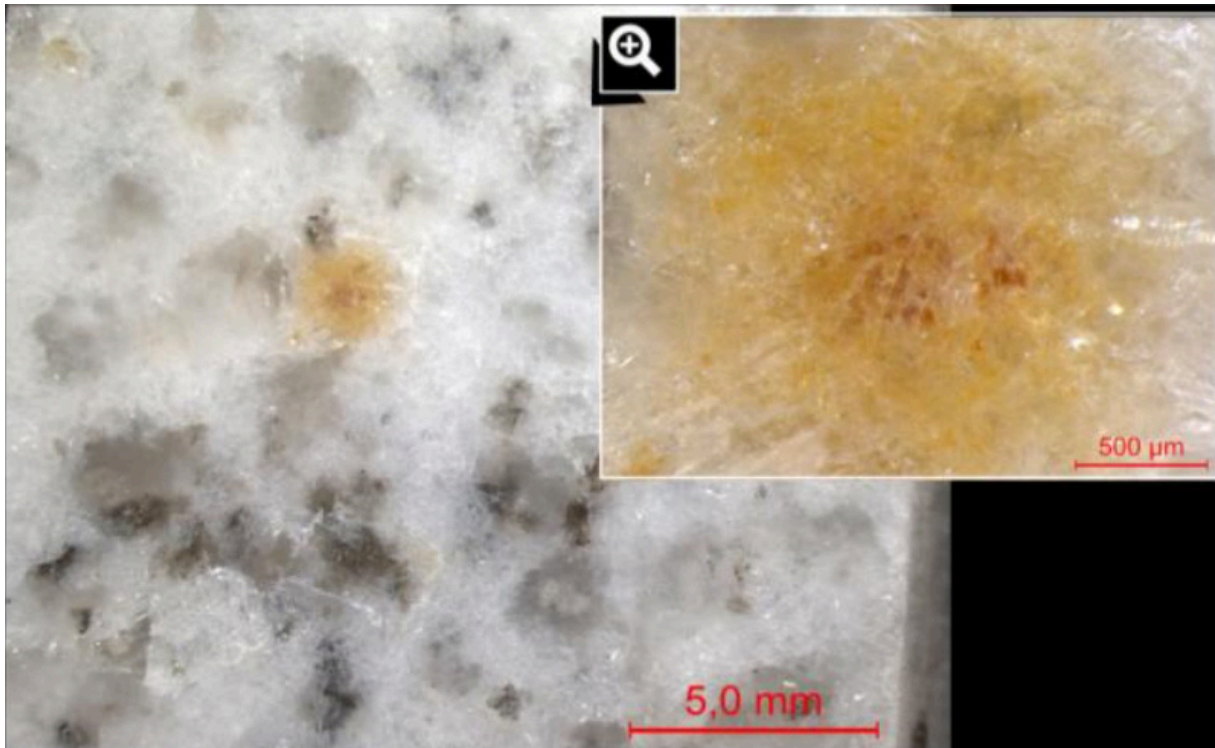
As análises foram executadas utilizando microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (FEG), marca FEI, modelo Quanta 3D. As imagens foram obtidas utilizando detectores de elétrons retroespalhados e de elétrons secundários em condições de tensão de aceleração de 15 kV. Utilizou-se espectroscópio de energia dispersiva (EDS) da marca Oxford Instruments. A análise por EDS não detecta os elementos leves H, He, Be, B e Li. Quando a análise por EDS é realizada em um "ponto", deve-se considerar que o "ponto" na verdade é um volume arredondado de alguns micrometros cúbicos, e, portanto, o resultado é influenciado pelas regiões ao redor e pelo ponto escolhido, principalmente nos maiores aumentos. Nas imagens de elétrons retroespalhados o contraste é devido principalmente às diferenças de número atômico (Z) dos elementos presentes, ou seja, quanto maior o número atômico, maior o número de elétrons e mais clara a área. As imagens de elétrons secundários também são sensíveis a diferenças de condutibilidade eletrônica dos materiais e são melhores para a percepção das diferenças de relevo.

## 4 Resultados

### 4.1 Observação em estereomicroscópio

As observações em estereomicroscópio indicam que o manchamento ocorre por concentração de material alaranjado nos contatos entre grãos e fissuras, principalmente sob a superfície polida, a menos de 1 mm de profundidade. Como os grãos de quartzo são transparentes e os de feldspato, transparentes a translúcidos, a mancha aparenta estar na superfície. Conforme indicado pela análise petrográfica, os feldspatos (albita e microclínio) e quartzo constituem aproximadamente 90 % do "Granito Branco Alpha". As Figuras 3 a 6 ilustram as manchas e a área selecionada para análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 3 – Montagem de fotografias da superfície polida do “Granito Branco Alpha” com a região da mancha alaranjada selecionada para análise por microscopia eletrônica e detalhe da mancha.



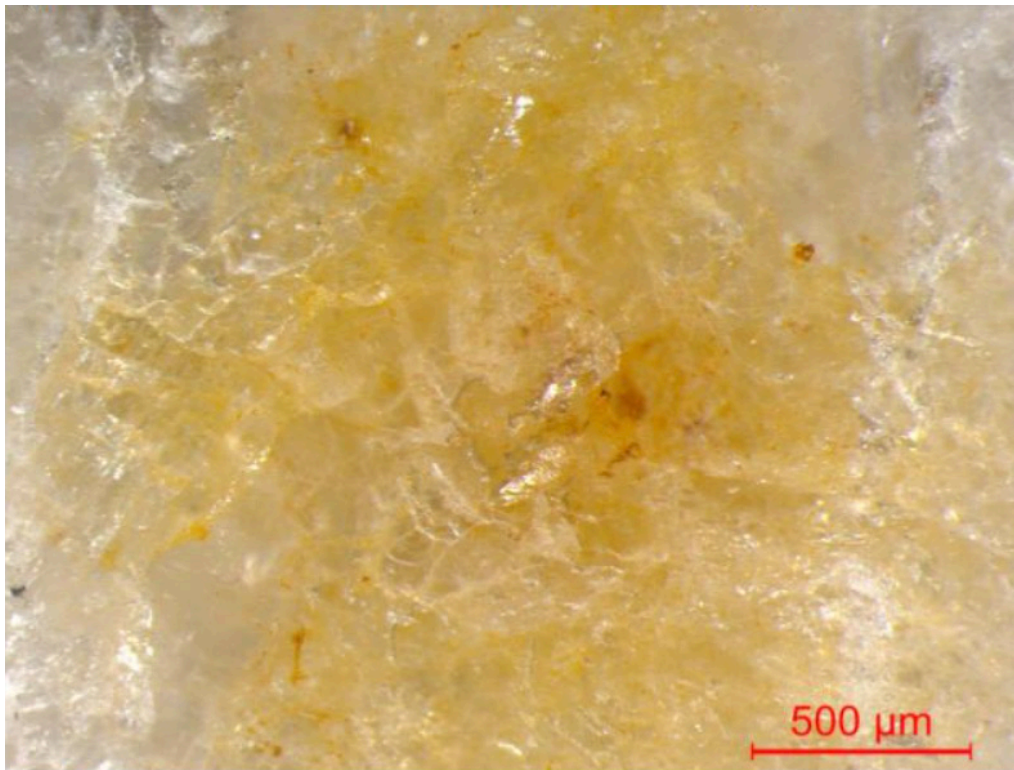
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 4 – Superfície polida do “Granito Branco Alpha”, selecionada para análise por MEV. Na foto a delimitação retangular riscada com ponta de widia (carbeto de tungstênio) é parcialmente visível.



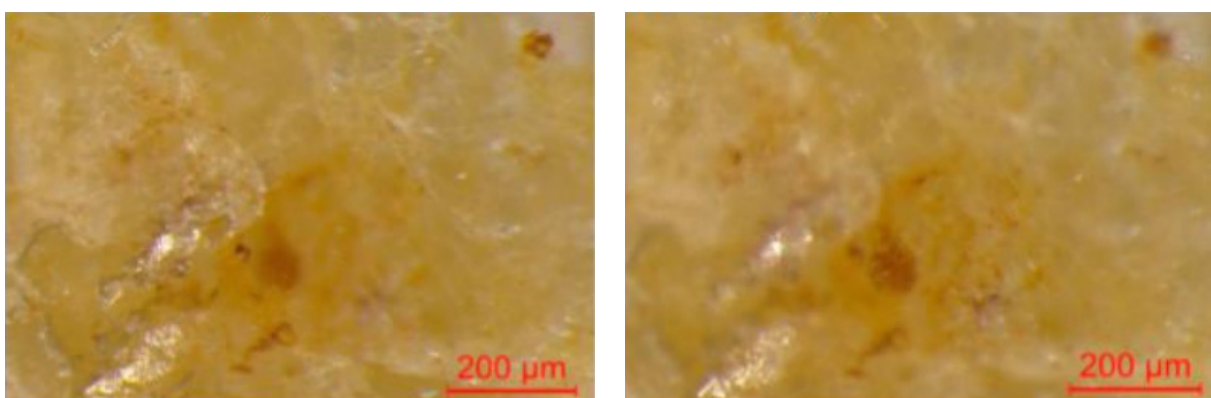
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 5 – Detalhe de uma área com mancha do “Granito Branco Alpha” da Figura 1.



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 6 – Detalhe da Figura 5, com foco na superfície (foto da esquerda) e subsuperfície (foto da direita), indicando que a parte mais intensa da mancha está em subsuperfície.



Fonte: elaborado pelos autores

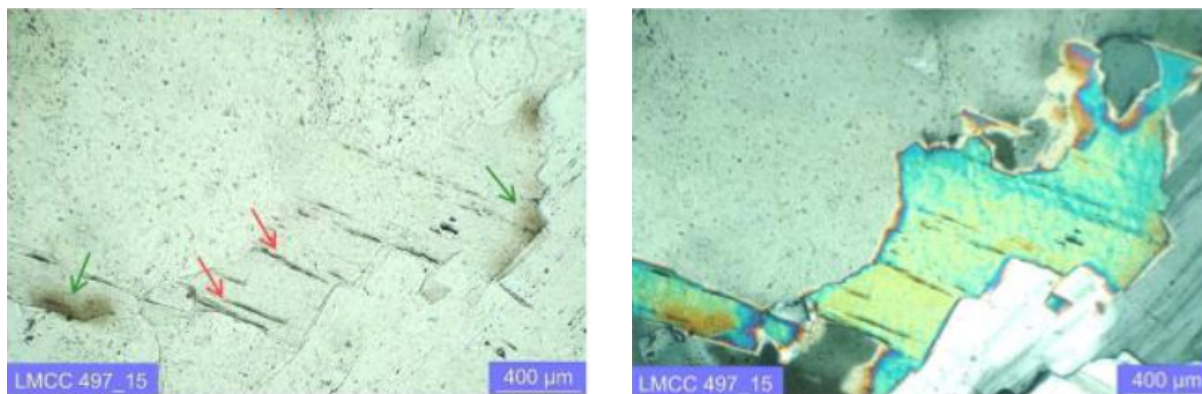
## 4.2 Análise petrográfica (microscopia de luz polarizada transmitida)

Os resultados da análise petrográfica do "Granito Branco Alpha" resumidamente são os seguintes:

Rocha de estrutura maciça, textura predominantemente traquitoide, porfírica a poiquilitica. O principal mineral é a albita, com tamanho entre 0,1 mm a 1,5 mm e representando 35 % a 40 % da rocha, seguida pelo quartzo (20 % a 25 %) em grãos de 0,005 mm a 5 mm, microcroclínio em grãos de 0,5 mm a 2 mm (40 %) e mica da série da zinnwaldita (5 %) com tamanhos entre 0,7 mm a 1,4 mm. Os minerais acessórios, perfazendo cerca de 5 %, são topázio, fluorita, opaco, apatita e provável zircão.

A rocha apresenta fraca alteração, de origem intempérica e hidrotermal, evidenciada por zinnwaldita alterada em mica branca, com concentração de hidróxidos de ferro nas bordas e em traços de clivagem (Figuras 7 e 8). Hidróxidos de ferro também são comuns em bordas de topázio ou como pontuações em quartzo e feldspatos próximos a zinnwaldita. Mineral prismático alongado (possível zircão) apresenta bordas metamícticas<sup>2</sup>.

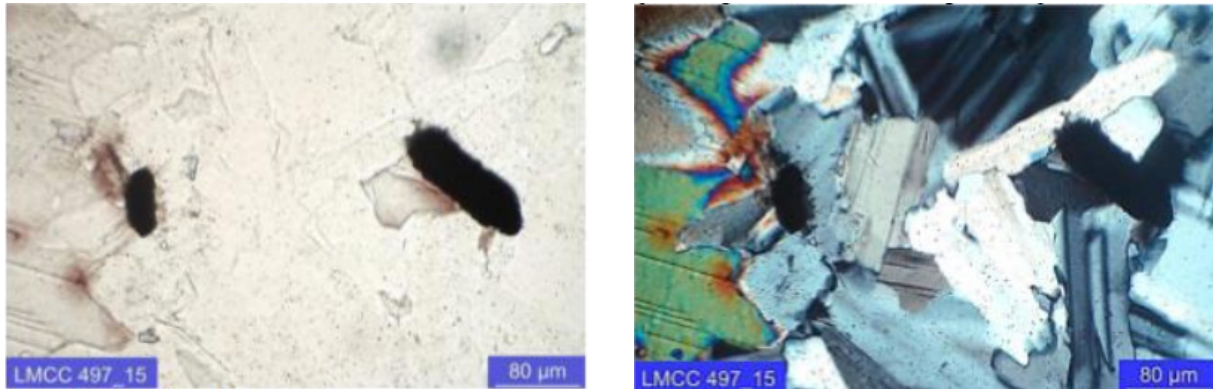
Figura 7 - Fotomicrografias da zinnwaldita apresentando concentração de hidróxidos de ferro nas bordas (setas verdes) e nos traços de clivagem (setas vermelhas). À esquerda, com polarização simples e à direita, com polarização cruzada.



Fonte: elaborado pelos autores

<sup>2</sup> Metamictização é o processo pelo qual elementos radioativos contidos em alguns minerais provocam rompimentos no retículo cristalino do mineral hospedeiro, como resultado de dano por radiação, enquanto sua morfologia externa é preservada (BATES; JACKSON, 1980).

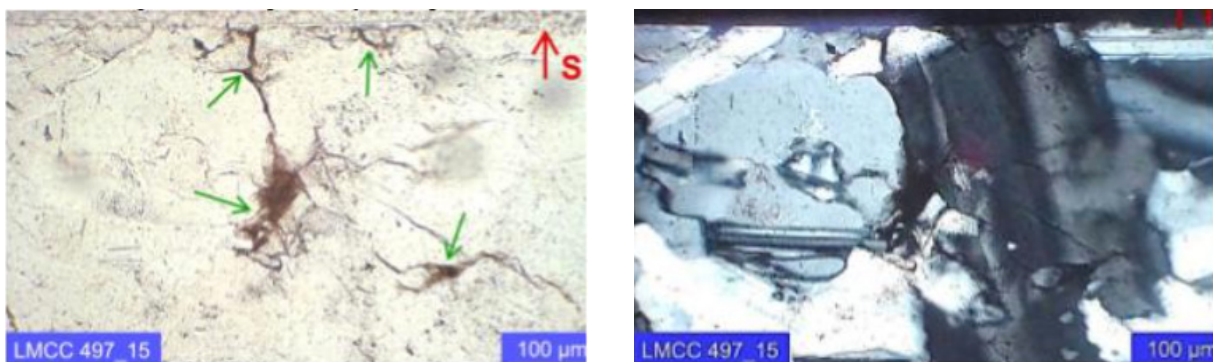
Figura 8 - Fotomicrografia de minerais opacos associados à zinnwaldita. Notar concentração de hidróxidos de ferro no contato. À esquerda, com polarização simples e à direita, com polarização cruzada.



Fonte: elaborado pelos autores

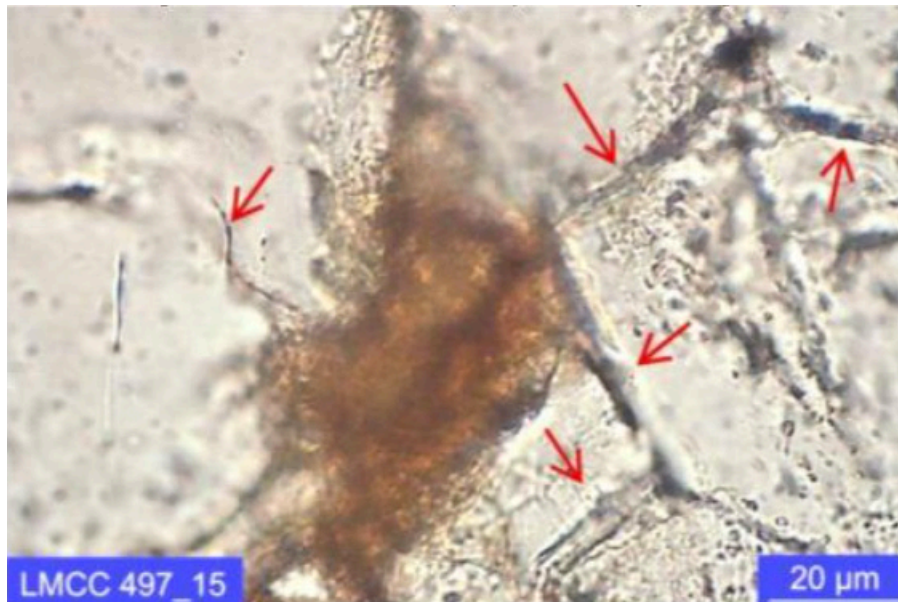
O estado microfissural é moderado, com microfissuras intragranulares, sem preenchimento ou preenchido por hidróxidos de ferro e intergranulares, preenchidas por hidróxidos de ferro (Figuras 9 e 10). Microfissuras transgranulares são pouco comuns, geralmente preenchidas por hidróxidos de ferro.

Figura 9 - Fotomicrografia de lâmina transversal à superfície polida do "Granito Branco Alpha" em área de manchamento alaranjado. Concentração de hidróxidos de ferro, migrando para as microfissuras associadas (setas verdes). A superfície polida da amostra é indicada por S (seta vermelha). À esquerda, com polarização simples e à direita, com polarização cruzada.



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 10 – Detalhe da Figura 9, com destaque para microfissuras preenchidas por hidróxidos de ferro (setas). Polarização simples, com condensador.



Fonte: elaborado pelos autores

Em corte paralelo à superfície observa-se textura porfírica a poiquilítica mais evidente, enquanto a lâmina do perfil (ortogonal à superfície) destaca a textura traquitóide da matriz, com orientação subparalela. Zinnwaldita, levemente pleocróica, apresenta concentração de hidróxidos de ferro nas bordas. Apatita, acicular, acha-se dispersa, e, por vezes, inclusa em albita. Fluorita ocorre em interstícios. Zircão, geralmente metamictico, apresenta-se disperso ou incluso em mica (provável zinnwaldita), provocando halos pleocróicos. Topázio, quando em associação com zinnwaldita, contém bordas escuras, com impregnação de hidróxidos de ferro.

Com base nos minerais, textura e origem ígnea, a rocha é petrograficamente classificada como microclínio-albita granito.

Ocorre outro tipo de mancha, menor e mais escura, referente a pontos amarronzados de dimensão submilimétrica, por vezes visíveis macroscopicamente, que podem ter sido provocadas pela possível alteração por metamictização de mineral identificado como possível zircão (Figura 11).

Figura 11 – Fotomicrografia do “Granito Branco Alpha”. Possível zircão associado a manchas de cor marrom. Polarização simples e condensador.

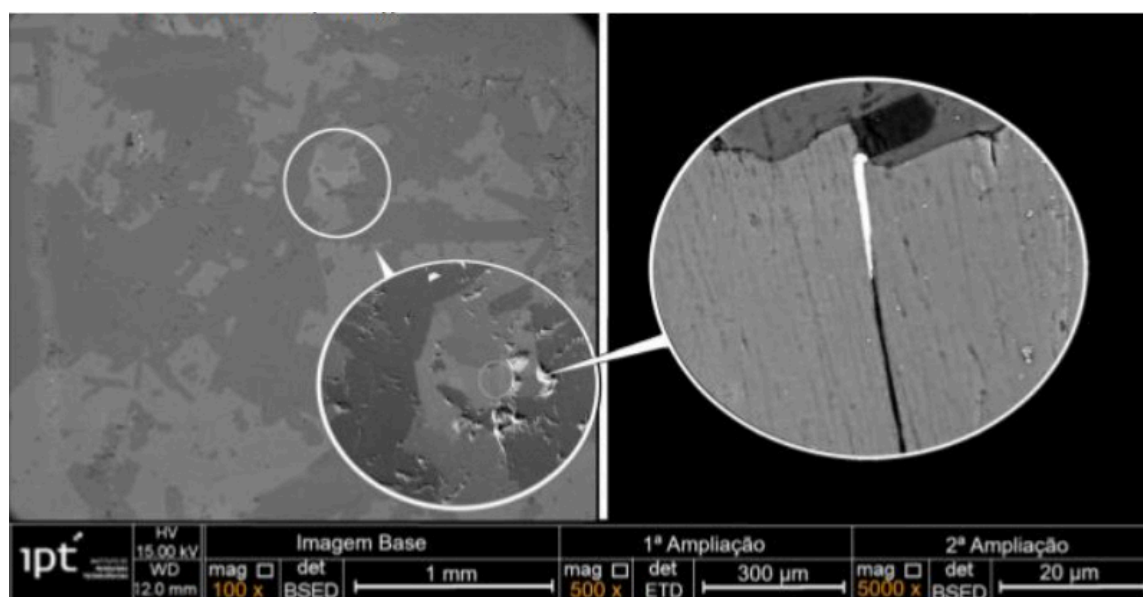


Fonte: elaborado pelos autores

#### 4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise por espectroscopia de dispersão de energia (EDS)

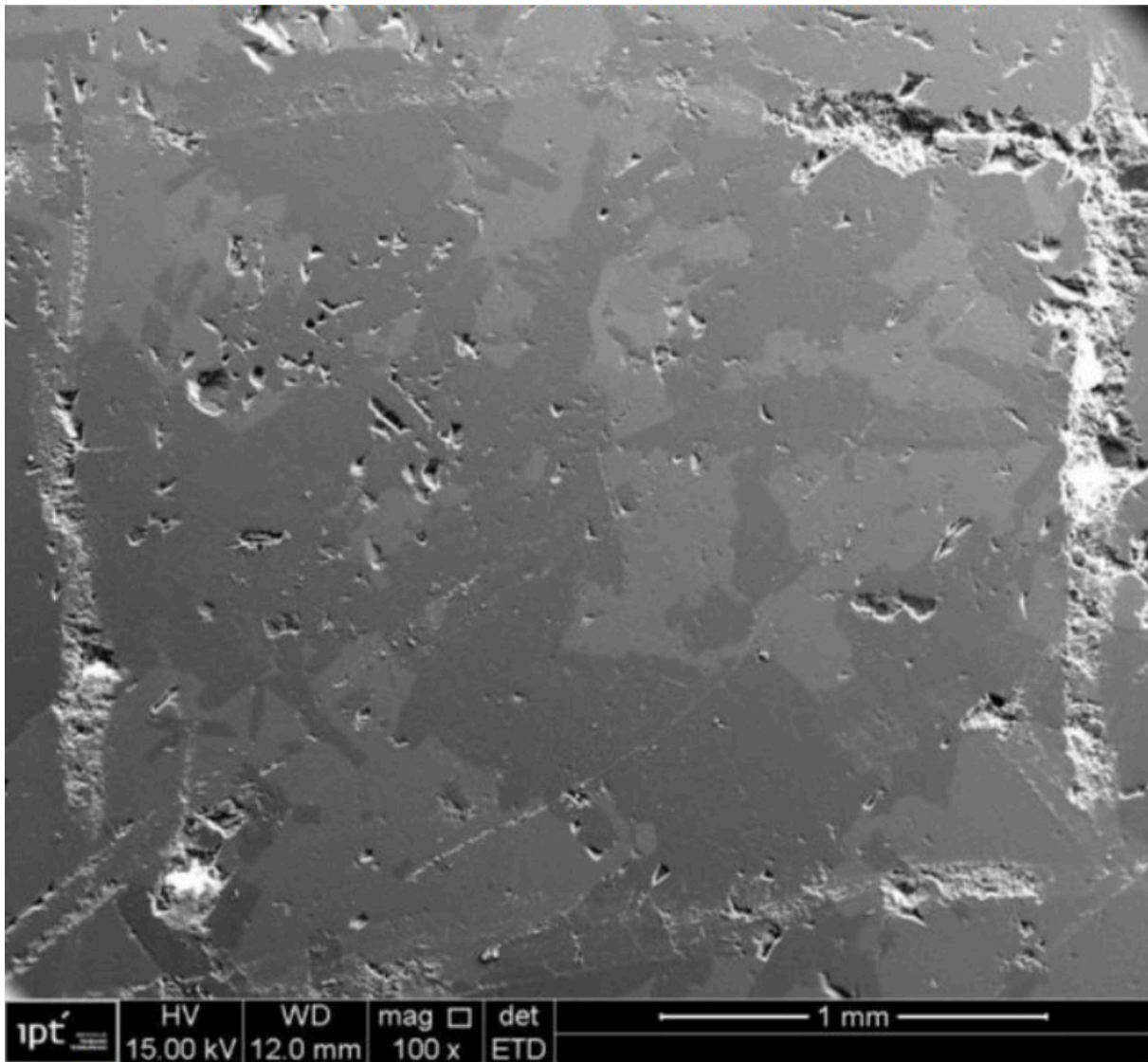
Os resultados das imagens de MEV e das análises de dispersão de energia (EDS) do “Granito Branco Alpha” estão apresentados nas Figuras 12 a 22 e na Tabela 1 (análises químicas).

Figura 12 – Montagem com imagens de microscopia eletrônica de varredura do “Granito Branco Alpha” – área com mancha alaranjada demarcada nas Figuras 1 a 4. Conforme será visto mais adiante, o detalhe mostra uma concentração de ferro (mais clara) em uma fissura da zinnwaldita (detector de elétrons retroespalhados para a principal e o detalhe da direita e elétrons secundários para o detalhe menor (centro)).



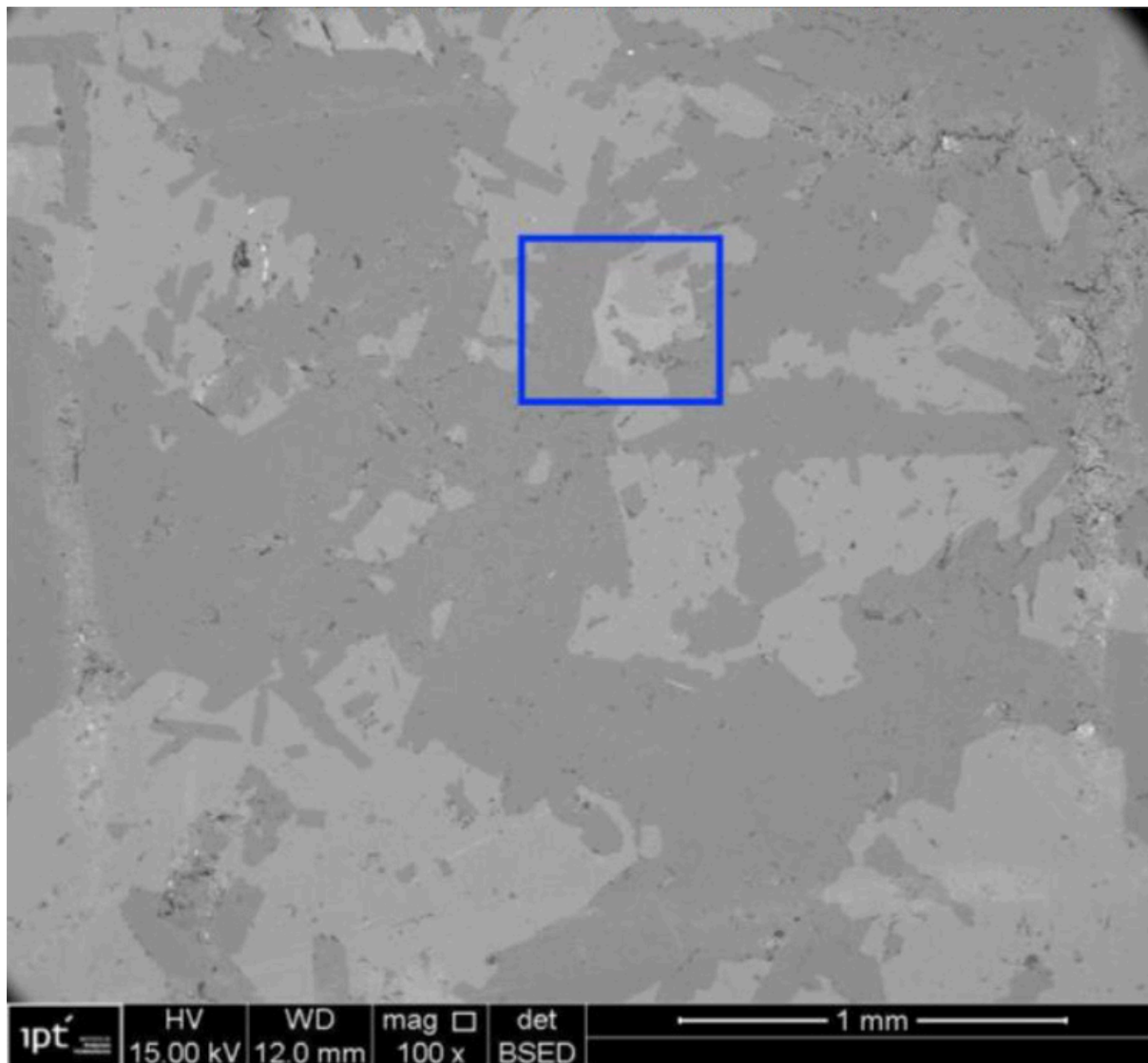
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 13 - "Granito Branco Alpha" - ênfase de relevo da área com mancha alaranjada demarcada nas Figuras 3 e 4. Os sulcos irregulares foram feitos com a ponta de widea para facilitar a identificação da área no microscópio eletrônico de varredura (detector de elétrons secundários).



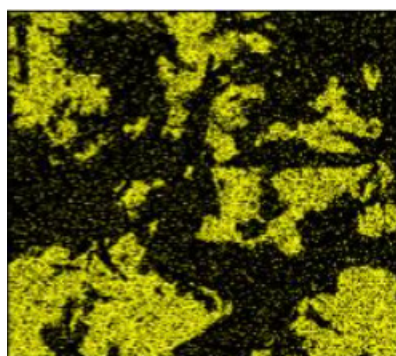
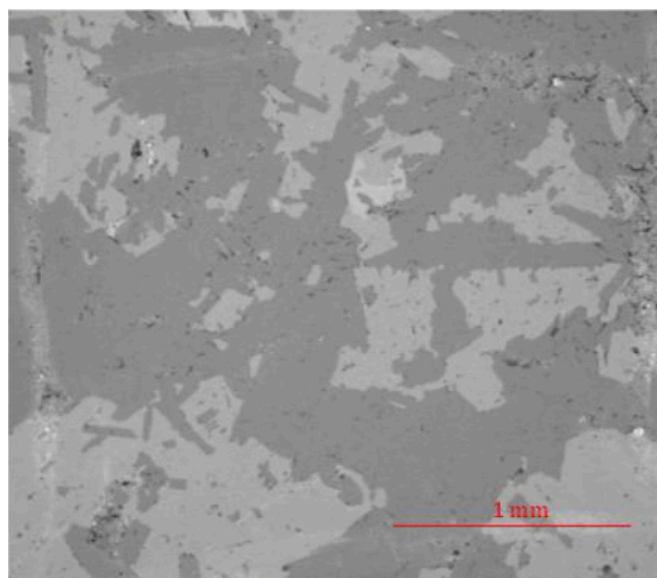
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 14 - Mesma área da figura anterior (detector de elétrons retroespalhados). Toda a área foi submetida à análise química por EDS (Figuras 15 a 19). A área demarcada foi ampliada em fotos posteriores.

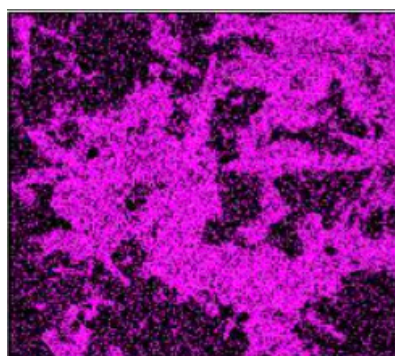


Fonte: elaborado pelos autores

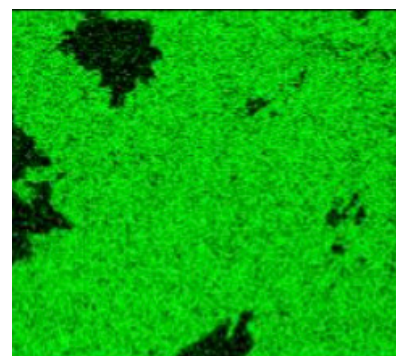
Figura 15 - Mapas de distribuição em área de alguns elementos químicos da obtidos por EDS. As concentrações de potássio indicam o microclínio, os locais ricos em sódio correspondem à albita e o quartzo é identificado pelos locais sem alumínio e com maiores teores de silício. Notar concentração de ferro e flúor, indicando a zinnwaldita, na mesma região que será ampliada em figuras posteriores.



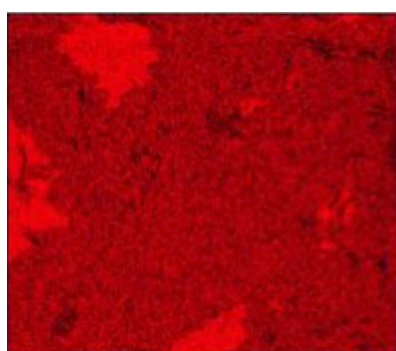
Potássio (K)



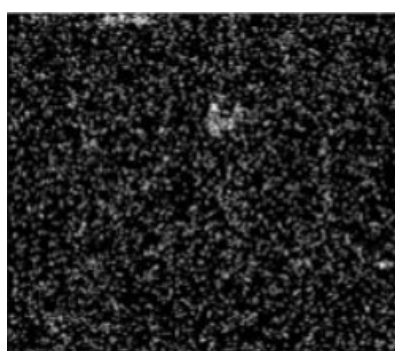
Sódio (Na)



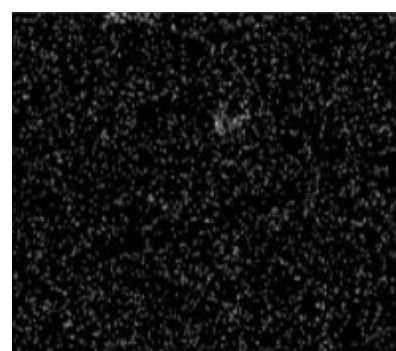
Alumínio (Al)



Silício (Si)



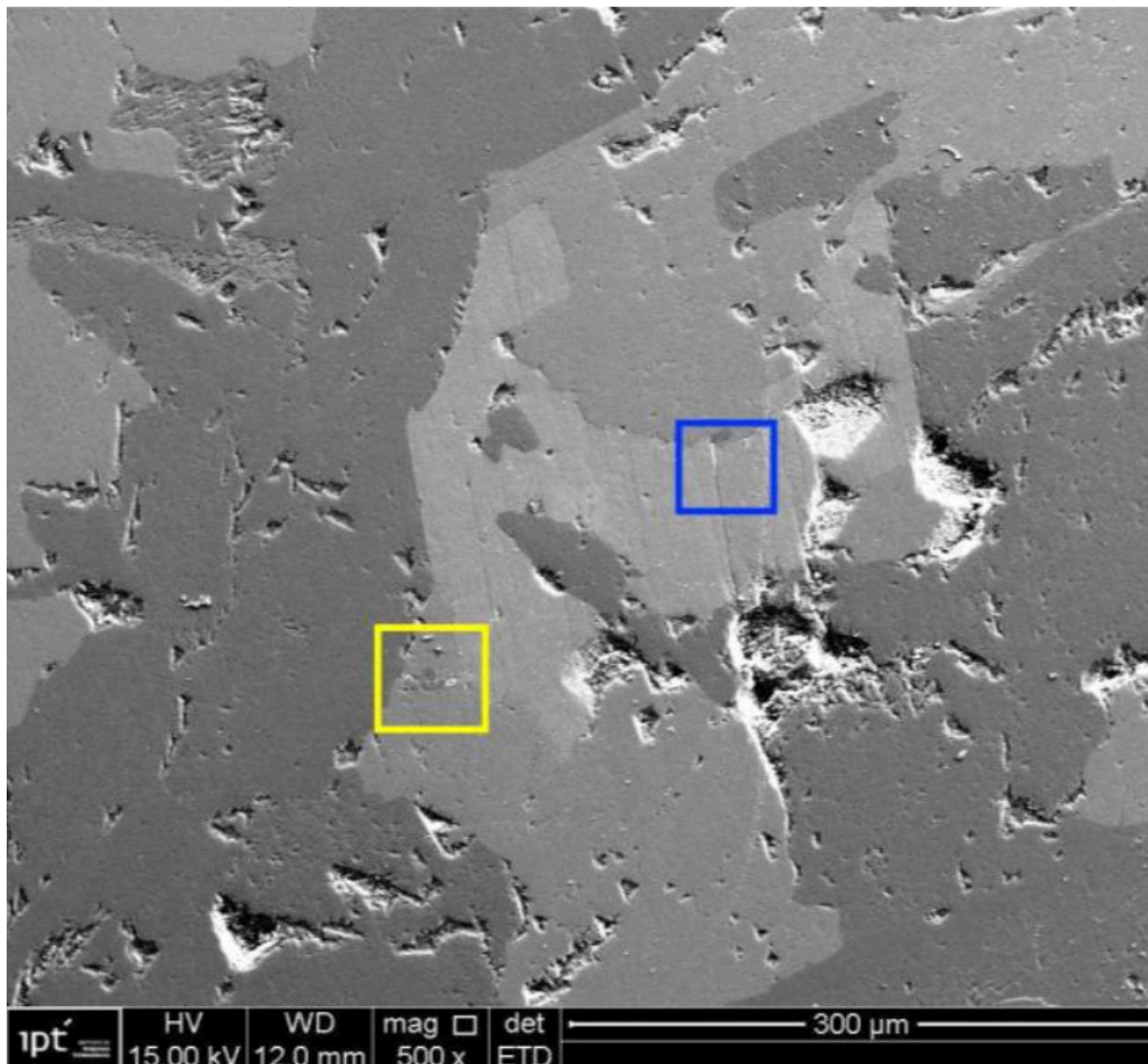
Flúor (F)



Ferro (Fe)

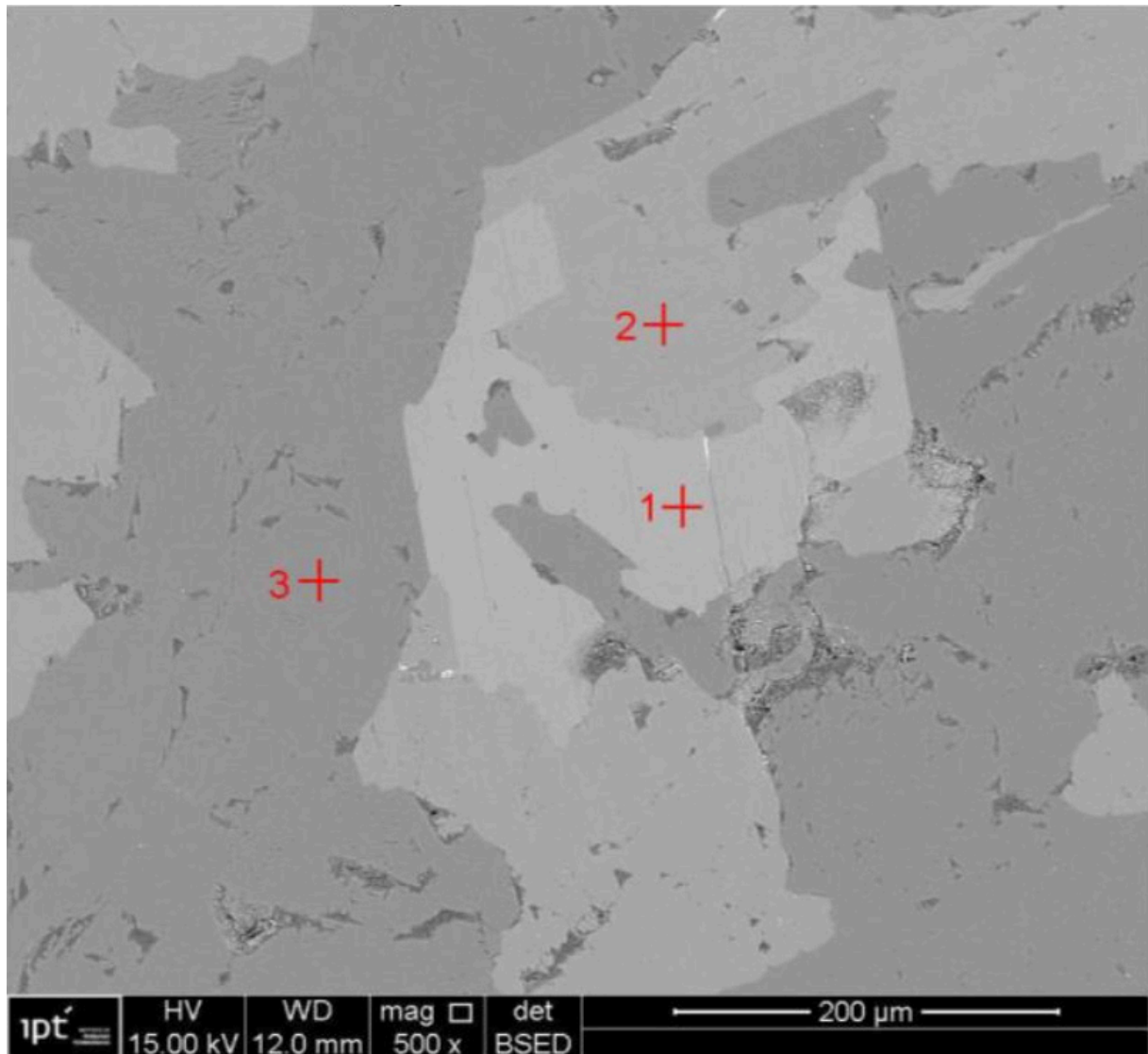
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 16 - Detalhe da região do quadrado na Figura 14 com ênfase no relevo (detector de elétrons secundários).



Fonte: elaborado pelos autores

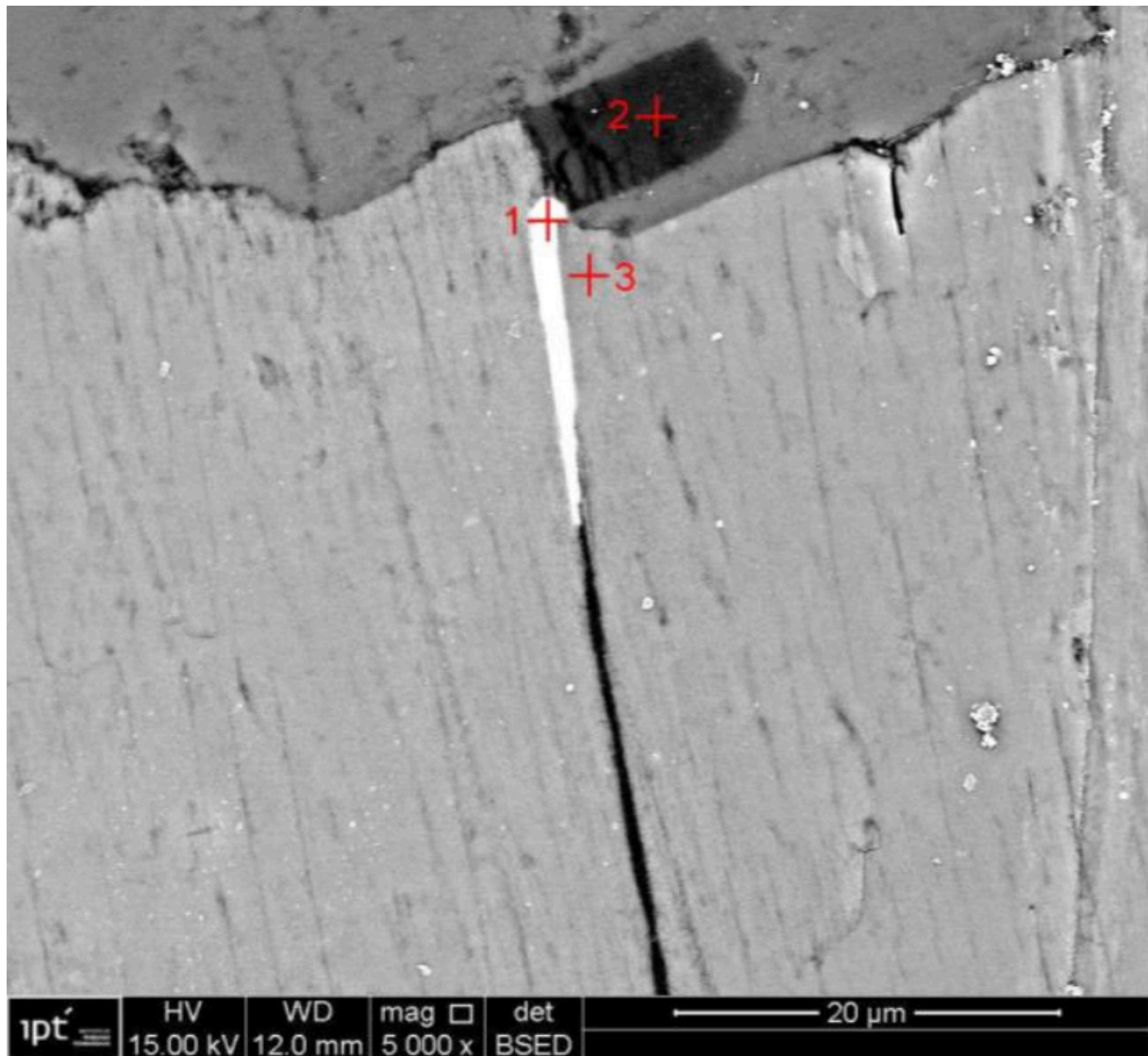
Figura 17 - Mesma área da figura anterior (detector de elétrons retroespalhados). Os pontos 1, 2 e 3 indicam os locais das análises químicas, apresentadas na Tabela 1, compatíveis com zinnwaldita, microclínio e albita, respectivamente



Fonte: elaborado pelos autores

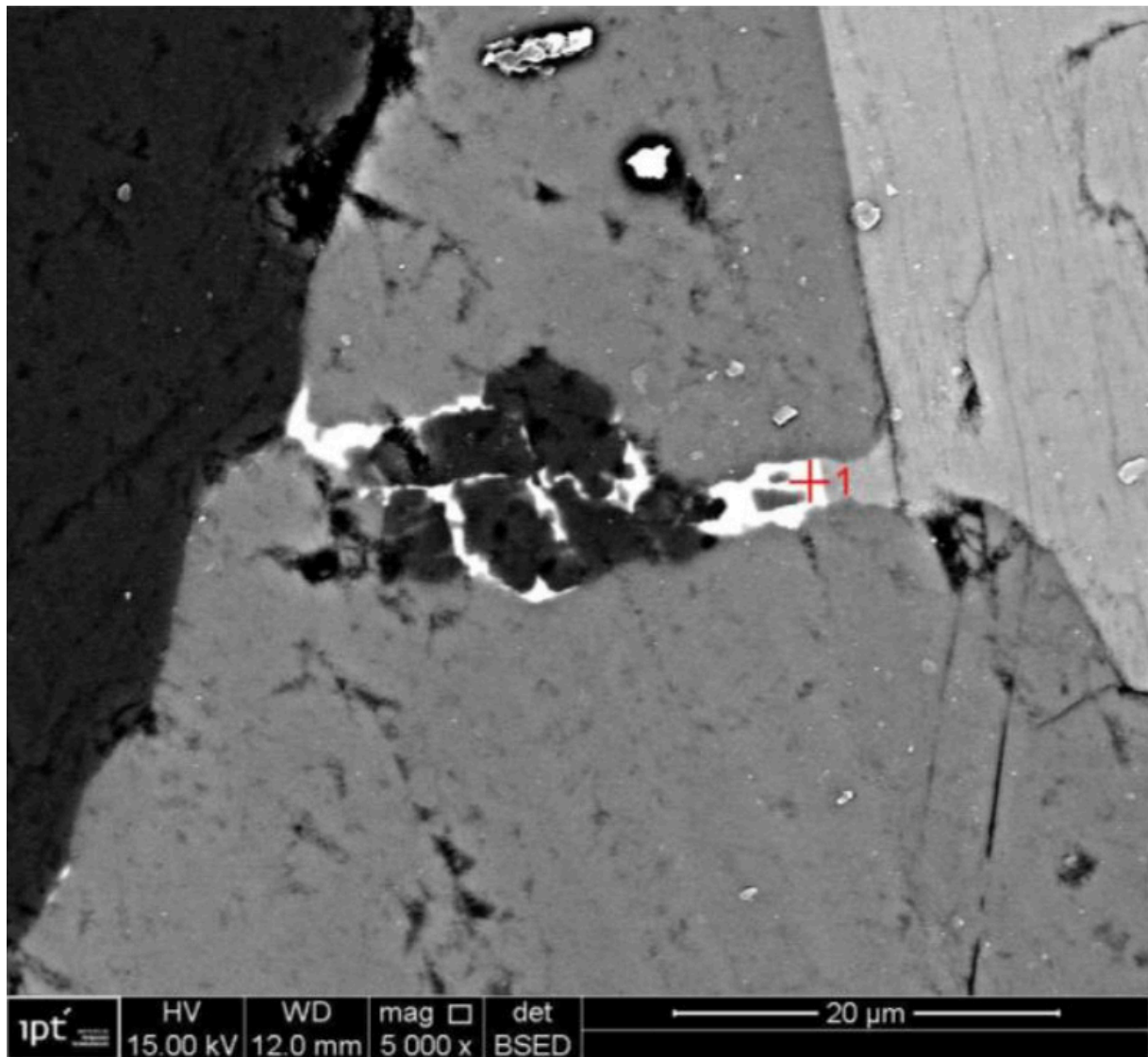
A análise por microscopia eletrônica de varredura não permitiu a visualização das manchas nem a sua caracterização química. O principal motivo desta dificuldade deve ser o predomínio da mancha abaixo da superfície. Por outro lado, confirmou a presença de ferro em microdescontinuidades da zinnwaldita e dos feldspatos (albita e microclínio), conforme Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Detalhe do quadrado azul (direita) da Figura 16 por elétrons retroespalhados, indicando os pontos 1, 2 e 3 onde foi realizada análise química (Tabela 1). A análise do ponto 1 indicou o predomínio de ferro. O resultado do ponto 3 confirma que o mineral que ocupa a maior parte da imagem é a zinnwaldita (mica). O ponto 2 indica uma albita e parte superior da foto é microclínio, conforme análises anteriores



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 19 - Imagem de elétrons retroespalhados no detalhe do quadrado amarelo (esquerda) da Figura 16, com análise química do ponto 1 (Tabela 1). A análise indica tratar-se de óxidos ou hidróxidos de ferro.



Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 1 – Resultados das análises químicas por EDS em percentagem de átomos nos pontos seleccionados das figuras.

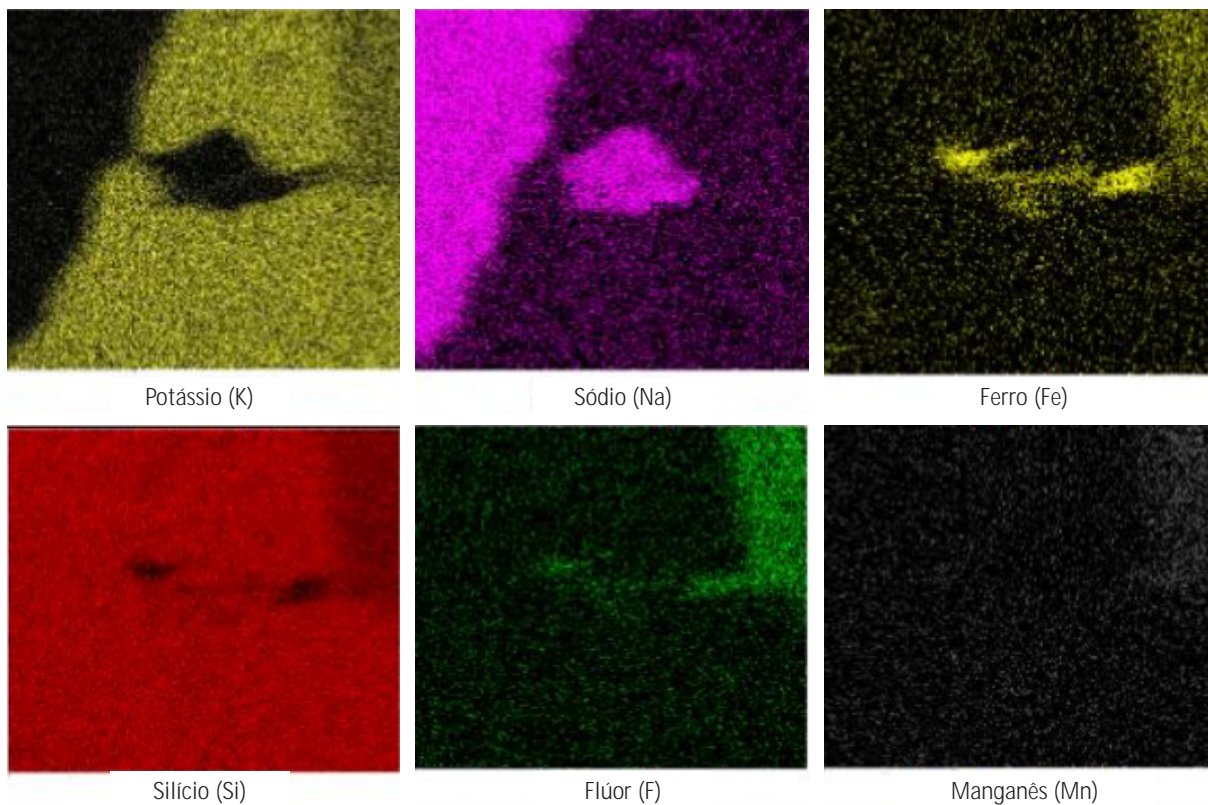
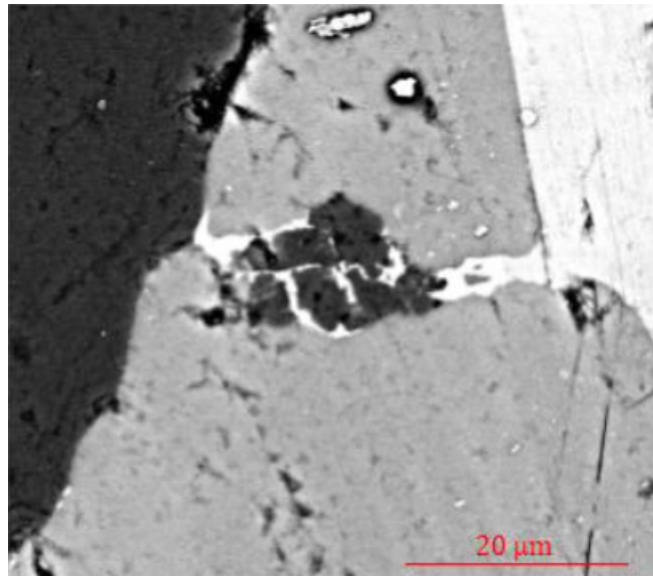
Elemento	Local da medida (Figura e ponto)						
	Fig. 17 p1	Fig. 17 p2	Fig. 17 p3	Fig. 18 p1	Fig. 18 p2	Fig. 18 p3	Fig. 19 p1
C	-	-	6,0	5,6	5,6	4,7	9,7
O	48,5	58,1	55,9	56,2	55,7	47,7	57,2
F	11,8	-	-	0,9	-	10,8	-
Na	-	0,2	5,6	0,6	5,6	-	-
Al	9,4	7,9	7,5	6,4	7,6	8,4	5,9
Si	21,5	26,6	25,0	6,8	25,4	20,2	5,0
K	4,8	7,3	-	0,8	-	4,7	0,8
Mn	1,2	-	-	-	-	0,9	-
Fe	2,9	-	-	22,6	-	2,5	21,3
Soma	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Fase interpretada	zinnwaldita	microclinio (feldspato)	albita (feldspato)	óxido ou hidróxido de Fe	albita	zinnwaldita	óxido ou hidróxido de Fe

Fonte: elaborado pelos autores

- = Elemento considerado inexistente no ponto analisado.

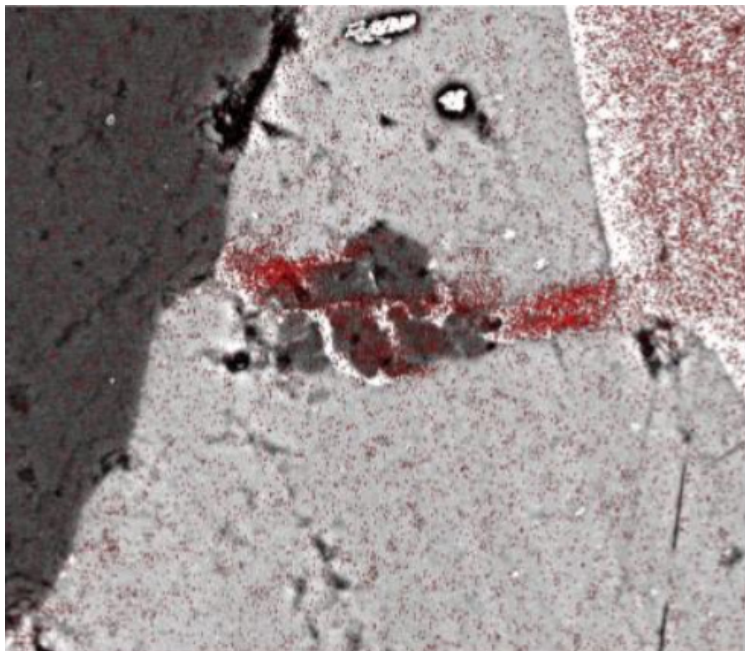
A EDS não detecta Li e as percentagens são normalizadas para 100% dos elementos detectados.

Figura 20 - Mapa de pontos de área da Figura 19, onde se destaca a concentração de ferro em fissuras, tanto do microclínio (rico em potássio) quanto da albita (rica em sódio).



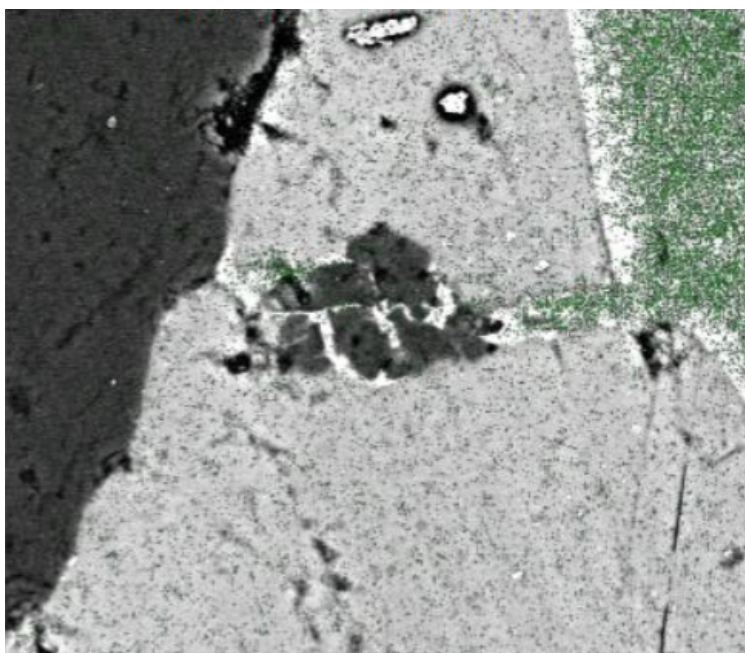
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 21 - Mapa de pontos do elemento ferro (vermelho) sobreposto à imagem de elétrons retroespalhados. O ferro proveniente da zinnwaldita, em cima à direita, concentra-se no centro da imagem.



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 22-Detalhe do mapa de pontos do elemento flúor (verde) sobreposto à imagem de elétrons retroespalhados. A concentração mais elevada na parte superior direita da imagem corresponde à zinnwaldita (mica).



Fonte: elaborado pelos autores

O elemento carbono detectado nas análises químicas não deve fazer parte da composição original da rocha. Provavelmente é originado de hidrofugante ou resina aplicada na rocha pelo produtor para melhorar suas propriedades.

A microanálise revelou também a presença de elementos terras-raras em pequenas proporções, o que é normal para este tipo de rocha.

## 5 Conclusões

O manchamento por pontos alaranjados no "Granito Branco Alpha" é causado pela remobilização do elemento ferro da zinnwaldita, e pela sua precipitação como hidróxidos de ferro nos contatos entre os grãos, principalmente abaixo da superfície polida, o que é denominado de subsuperfície. Ocorrem outros tipos de manchas, menores e mais escuras (cor marrom), que podem ter sido provocadas por alteração do mineral zircão.

Os processos conhecidos de remobilização e precipitação de ferro estão em quase sua totalidade associados à água. No caso do "Granito Branco Alpha", considerando-se que as manchas são percebidas na fase de extração, o manchamento deve ter ocorrido por alteração intempérica ou hidrotermal, ou seja, ainda no maciço. Uma provável origem hidrotermal explicaria a estabilidade das manchas frente aos processos de corte e polimento, sempre com água abundante.

Por estar em subsuperfície dos ladrilhos, o repolimento não deve ser suficiente para remover as manchas, a menos que se consiga desbastar cerca de 1 mm da superfície e mesmo assim, pode-se expor manchas mais profundas. Provavelmente, os métodos tradicionais de remoção de manchas de ferro não são eficazes devido à presença dos hidróxidos de ferro em subsuperfície.

Recomenda-se estudo comparando amostras na frente de lavra, em blocos, após corte e após polimento para confirmar a origem das manchas ainda no maciço e sua suposta estabilidade.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem a Taeko Yonamine Fukuhara pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura, a Eleno de Paula Rodrigues por incitar o estudo e revisar o texto, a Priscila Rodrigues Melo Leal pela revisão do texto e informações sobre a microscopia eletrônica de varredura, a Mikaella Balis e Vitor Henrique de Souza pela edição das figuras.

## 7 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2010. NBR 15845-1 Rochas para revestimento – Parte 1: Análise petrográfica. Rio de Janeiro. 2010. 4 p.

BATES, R.L.; JACKSON, J.A. (Eds.) 1980. *Glossary of geology*. 2 ed. Falls Church, American Geological Institute. 751 p.

CALEGARI, S.S.; SOARES, C. C. V.; HARTWIG, M. E.; MEDEIROS JÚNIOR; E. B.; MARQUES, R.A.; PONTELLO, M.. O Efeito do microfissuramento no desenvolvimento de patologias em rochas ornamentais: o exemplo dos granitos branco viena e branco itaúnas. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1 p. 514-524, 2019.

FRASCÁ, M.H.B.O. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento. 2003. 282f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003,

FRASCÁ, M.H.B.O. Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas. In: VIDAL, F.W.H.; AZEVEDO, H.; CASTRO, N.F. (Eds). *Tecnologia de rochas ornamentais, lavra e beneficiamento*. Rio de Janeiro: CETM/MCTI. p. 45-98. 2013.

GOMES, I. P. Caracterização petrográfica e petroquímica dos granitos tardi a pós-tectônicos da região de Santa Quitéria-Ceará. 2006. 219f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

LE MAITRE, R.W. (Ed.). *A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences - Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford. Blackwell Scientific Publications. 193p. 1989.

NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 3, p. 493-518, 2014.

QUICK, G.W.; SIRIVIVATNANON, V. Predicting iron staining of siderite-bearing microsyenites intended for dimension stone use. In: *Construction and Building Materials* v. 22, p. 257-263, 2008.

RIEDER, M.; CAVAZZINI, G.; D'YAKONOV, Y. S.; FRANK-KAMENETSKII, V. A.; GOTTARDI, G.; GUGGENHEIM, S.; KOVAL, P.W.; MÜLLER, G.; NEIVA, A. M. R.;

RADOSLOVICH, E. W.; ROBERT, J.; SASSI, F. P.; TAKEDA, H.; WEISS, Z.; WONES, D. R. Nomenclature of the micas. *Clays and Clay Minerals*, v. 46, n. 5, p. 586-595, 1998.

WINKLER E.M. Natural rust on stone. In: *Stone. Applied Mineralogy*, Vienna, vol 4. 1975.

DOI 10.34033/2526-5830-v4n15-4



# Avaliação pós-ocupação para acústica de salas de aula - estudo de caso em escolas técnicas do Estado de São Paulo

*Post occupancy evaluation for classroom acoustics - case study in technical schools of São Paulo State*

Lúcio Paulo de Paula<sup>cd</sup>, Maria Akutsu<sup>ab</sup>, Henrique Lima Pires<sup>ad</sup>

a Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

c Mestre pelo Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

d Engenheiro Civil.

\*E-mail: [luciopp@gmail.com](mailto:luciopp@gmail.com)

### Palavras-chave:

sala de aula; acústica; medição de nível de ruído; avaliação pós-ocupação.

### Keywords:

classroom; acoustic; noise level measurement; post occupancy evaluation; PS.

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo a "Avaliação Pós-Ocupação" (APO) de escolas técnicas da rede pública na cidade de São Paulo, quanto à satisfação dos ocupantes com as condições de conforto acústico. Foram analisadas três escolas técnicas com projetos arquitetônicos distintos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de quatro métodos que se complementam: análise de projetos; vistorias in loco das edificações escolares; questionários APO aplicados aos alunos, professores e gestores das unidades escolares; e medições de parâmetros acústicos, destacando-se o nível de pressão sonora nos ambientes internos, o ruído de fundo e o tempo de reverberação em salas de aula. Os resultados obtidos indicam que as escolas técnicas não atendem aos padrões de conforto acústico previsto nas normas e recomendações de especialistas. De forma geral, os usuários (diretores, professores e alunos) não estão satisfeitos com o conforto acústico das escolas.

## Abstract

This work aimed at the Post-Occupancy Evaluation (POE) of public technical schools in the city of São Paulo, related to the acoustical comfort of the occupants. Three technical schools with different architectural projects were analyzed. The research was developed using four complementary methods: project analysis; inspections in loco of school buildings; POE questionnaires applied to students, teachers and school unit managers; and measurements of acoustic parameters, with emphasis on the sound pressure level in indoor environments, background noise and reverberation time in classrooms. The results obtained indicate that technical schools do not meet the standards of acoustic comfort provided in the standards and recommendations of specialists. In general, users (principals, teachers and students) are not satisfied with the acoustic comfort of schools.

## 1 Introdução

A grande demanda de profissionais das diversas áreas como indústria, agropecuária, serviços e saúde, impulsionaram a criação de inúmeras escolas técnicas e faculdades de tecnologia nos grandes centros urbanos. A criação de cursos técnicos é importante para atender a demanda das empresas em busca de profissionais e apoiar o crescimento e desenvolvimento da sociedade.

Em se tratando de construção de escolas técnicas, a localização é um fator importante. Geralmente as construções são próximas aos grandes centros onde há empregos, estações de metrô e terminais de ônibus.

Dados do censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018) relatam que 57 % da população brasileira vivem nos grandes centros urbanos. Há no Brasil, 317 municípios com mais de 100 mil habitantes, ou seja, 5,7 % do total de municípios do país. A cidade de São Paulo é o maior município do país com população de 12,25 milhões de habitantes. Devido à alta densidade demográfica nas grandes cidades, os terrenos vazios são cada vez mais escassos. Na cidade de São Paulo não é diferente, há cada vez menos quantidade de terrenos disponíveis, principalmente próximos às localidades de grande circulação de pessoas e postos de trabalho disponíveis.

As escolas do Centro Paula Souza também utilizam terrenos e prédios públicos em localidades como se descreveu acima. Quanto aos prédios utilizados pelas escolas, pouco se faz para readaptá-los, geralmente não seguindo o padrão recomendado pela Fundação para o Desenvolvimento da Educação (FDE). Portanto as novas escolas do Centro Paula Souza, ora têm novos edifícios, ora adaptações em prédios públicos que eram utilizados para outros fins.

De acordo com dados do Centro Paula Souza (2019), há hoje em funcionamento 223 escolas técnicas no estado de São Paulo, divididas em 165 municípios. Somente na região metropolitana de São Paulo estão em funcionamento 44 escolas técnicas profissionalizantes mantidas pelo governo do Estado de São Paulo. As faculdades de tecnologia compõem 71 unidades no estado. Atualmente essas instituições de ensino juntas possuem 300 mil alunos matriculados.

Nos projetos dessas novas escolas técnicas, é avaliada a demanda local de alunos e tipos de cursos técnicos que serão oferecidos nessas escolas, desta forma há uma preocupação maior com a quantidade de salas, ficando a qualidade das aulas em segundo plano. No caso do desempenho acústico de escolas, os sons não inerentes ao processo didático são considerados ruídos residuais que podem gerar dificuldades na comunicação e aprendizagem de alunos, que visam a se capacitar, e dos professores que auxiliam no processo ensino-aprendizagem. Neste sentido, Zwirtes (2006) coloca que, dentro da sala de aula, ocorre a diminuição da atenção e fadiga mental dos alunos exposto aos ruídos.

Dentro desse contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de fazer a Avaliação Pós-Ocupação de escolas técnicas estaduais do estado de São Paulo, para a proposição de recomendações de projeto visando a melhoria das condições acústicas dos ambientes, proporcionando aos usuários, desde os alunos e professores dentro das salas de aula, até os gestores e funcionários nas suas diversas atividades em diferentes ambientes, condições satisfatórias de conforto acústico.

## 2 Método de pesquisa

Foram escolhidas três escolas com características distintas de localização e projeto arquitetônico para a realização dos estudos de caso. Os estudos contemplaram as seguintes atividades:

- levantamento dos projetos arquitetônicos das escolas;
- visita técnica para levantamento de dados de construção, instalações e acabamentos;
- visita para aplicação dos questionários para professores e alunos das três escolas, nos três períodos de funcionamento, com o objetivo de qualificar a percepção acústica no processo de ensino-aprendizagem;
- visita técnica para medições "in loco" de parâmetros acústicos que caracterizam o desempenho acústico de salas de aula – foi escolhida uma sala de aula típica para cada escola.

## 3 Análise e discussão dos resultados

Foram feitos levantamentos das condições dos edifícios, considerando as questões acústicas, levando em conta o uso e a manutenção dos edifícios e também as condições de seu entorno, além de medições de ruído residual e determinações de parâmetros para avaliação da adequação das salas de aula no processo de ensino e aprendizagem. Os resultados das análises realizadas são discutidos a seguir.

### 3.1 Análise dos projetos arquitetônicos

Foram analisadas as medidas dos perímetros das salas de aula e suas volumetrias, determinadas em projeto, e comparadas com as executadas nas obras. Também foram inseridas informações das disposições das salas de aula no plano de massa das escolas.

De acordo com o FDE, por meio dos catálogos e manuais que propiciam soluções para a Administração Pública, as salas de aula para ensino médio devem ter, comprimento e largura de 7,20 m e pé direito de 3,00 m, totalizando área mínima de 51,84 m<sup>2</sup> e volume mínimo de 155,52 m<sup>3</sup>. Também deve existir área para uma cadeira de rodas demarcada em piso. Estas dimensões foram usadas como referência nas análises realizadas.

Utilizou-se também, como referência, o gráfico de Bolt (1946 apud ALTON; POHLMANN, 2009) para salas de aula com formatos retangulares, com valores de comprimento, largura e altura e suas respectivas proporções, que permite uma avaliação rápida da adequação geométrica das salas de aula quanto aos modos de ressonância acústica.

Em todos os projetos analisados não foi encontrado projeto acústico ou detalhamento específico. Também na escolha dos materiais, utilizados nas salas, não são feitas referências às características de desempenho acústico dos mesmos.

#### 3.1.1 ETEC Carlos de Campos

Na ETEC Carlos de Campos verificou-se que as medidas de projeto em relação às executadas estão próximas, apresentando variação média de apenas 1 %.

As salas de aulas estão localizadas ao redor das áreas comuns, aumentando a proximidade do ruído residual proveniente dessas áreas.

Comparando com os padrões da FDE, nenhuma sala atende plenamente essa padronização: 25 % das salas apresentam áreas e volumes inferiores aos especificados pela FDE.

As salas de aula da ETEC Carlos de Campos não se enquadram na área do gráfico de Bolt, ou seja, as salas de aula não estão qualificadas acusticamente, portanto, estão fora da tolerância geométrica das salas retangulares que garantam um padrão mínimo de modos de ressonância acústica.

### 3.1.2 ETEC Santa Ifigênia

Na ETEC Santa Ifigênia, verificou-se que as medidas de projeto em relação às executadas estão próximas, apresentando variação média no intervalo de 1 % a 7 %.

As salas de aulas estão localizadas ao lado de ruas de grande tráfego e imóvel vizinho, aumentando a proximidade do ruído residual proveniente dessas áreas. O pátio da escola fica localizado no andar térreo e está coberto por laje alveolar. Como as salas de aula ficam no segundo e terceiro andar, existe o isolamento entre os andares, desta forma, melhorando o isolamento dos ruídos provenientes do pátio. Por outro lado, como 50 % das salas ficam perpendiculares aos alinhamentos prediais das ruas de grande tráfego de veículos, as salas ficam mais expostas aos ruídos externos de carros, transeuntes, etc.

Nenhuma sala atende a padronização de medidas individuais do FDE.

### 3.1.3 ETEC Dra. Maria Augusta Saraiva

Na ETEC Maria Augusta Saraiva, verificou-se que as medidas de projeto em relação às executadas estão próximas, apresentando variação média de apenas 1 %.

As salas de aulas estão de frente para a Rua Guaianases que tem baixo fluxo de veículos. As salas de aulas estão rodeadas de corredores de circulação e outras salas de aulas, aumentando a proximidade do ruído proveniente dessas áreas.

Nessa escola, não existe em projeto a quadra poliesportiva, apenas uma área improvisada no subsolo do estacionamento. O pátio fica localizado no andar térreo e aos fundos da edificação, desta forma, não contribuindo, em grande escala, para o ruído dentro das salas de aula.

## 3.2 Ambiente Construído, uso e manutenção

Foram constatados no ambiente construído, diversos problemas na etapa de gestão da construção ou gestão de projetos. As principais causas são referentes à compatibilização de projetos, falta de manutenção e falta de tratamento acústico que contribuem para um desempenho insatisfatório.

### 3.2.1 ETEC Carlos de Campos

Nas ruas que circundam o prédio da escola, foi notado trânsito intenso de veículos, ônibus e uma linha férrea de trem de passageiros e cargas situada a 500 metros de distância, aproximadamente.

Os principais ruídos residuais detectados dentro das salas de aula durante a visita técnica foram os provenientes do pátio externo. Com a escola vazia, percebe-se como ruído principal os veículos e vozes de pessoas nas ruas.

Como as salas não tem sistema de condicionamento de ar, as janelas ficam abertas na maioria do tempo, as portas de madeira possuem frestas de mais de 5 mm, além de estarem fora de prumo. Esses fatores facilitam a entrada de ruídos residuais vindos da quadra poliesportiva, do pátio de recreação e também dos corredores de acessos às salas de aula. Há também vários aparelhos de ventilação mecânica na sala de aula que aumentam ruído residual interno durante as aulas.

### 3.2.2 ETEC Santa Ifigênia

Nas ruas que circundam o prédio da escola foi notado trânsito intenso de veículos.

Os principais ruídos residuais detectados dentro das salas de aula durante a visita técnica foram os provenientes dos corredores. Durante o período de aulas escuta-se a voz de professores e alunos de uma sala para outra, devido a falhas na isolamento sonora entre salas.

Os caixilhos, com vidro simples de 4 mm de espessura, são paralelos ao alinhamento predial da rua, além da falta de manutenção nos caixilhos serem visíveis em várias salas, como as gaxetas de fixação dos vidros soltas, que podem causar falhas na vedação. Como as salas não tem sistema de condicionamento de ar, as janelas e portas ficam abertas, na maioria do tempo, facilitando a entrada do ruído vindo da rua e também do corredor de acesso às salas de aula. Há também vários aparelhos de ventilação mecânica na sala de aula que aumentam os ruídos residuais internos durante as aulas.

Quanto à compatibilização de projeto observam-se problemas como: as paredes divisórias entre salas de aula possuem frestas de mais de 50 mm, contribuindo para a passagem de ruído entre as salas; a falta de elementos de isolamento sonora das tubulações de águas pluviais que ficam aparentes. Em dias de chuvas a fonte do ruído proveniente do fluxo de água, fica diretamente inserida dentro das salas de aulas, por onde passam essas tubulações.

### 3.2.3 ETEC Dra. Maria Augusta Saraiva

Nas ruas que circundam o prédio da escola foi observado trânsito médio de veículos comparado com as ETECs Carlos de Campos e Santa Ifigênia, porém notou-se ruído de aeronaves que sobrevoam o local da escola.

Com a escola vazia, notou-se predominância de ruído proveniente dos veículos e vozes de pessoas nas ruas. Em período de aulas, as vozes dos alunos são a maior fonte dos ruídos residuais. Há

também vários aparelhos de ventilação mecânica na sala de aula que aumentam ruídos residuais interno durante as aulas.

Os elementos construtivos da fachada são vedação em concreto armado com 20 cm de espessura e caixilho em alumínio com fechamento em vidro de 4 mm de espessura, tipo basculante, com borracha de vedação que ajuda no isolamento dos ruídos residuais proveniente das áreas externas.

A vedação interna das salas de aulas é composta por paredes em drywall, com espessura de 8 cm sem elementos especiais de isolamento sonora, o que pode contribuir para o aumento de ruídos residuais vindo de outras salas.

As portas de madeira, que possuem frestas com mais de 5 mm, estão fora de prumo, além de possuírem visores de vidro com 3 mm de espessura facilitando a passagem de ruído residual vindo do corredor. Como as salas não têm sistemas de condicionamento de ar, as janelas ficam abertas na maioria do tempo, facilitando a entrada de ruído residual vindo da parte externa.

O piso cerâmico, caixilhos com vidros e paredes com massa corrida podem aumentar a reverberação dentro da sala de aula. Nestas salas, também foi possível observar pilares internos que prejudicam a visão dos alunos dificultando o entendimento dos assuntos abordados pelo professor. A causa é a falha de projeto arquitetônico.

### 3.3 Análise dos questionários

No total foram entrevistados de forma presencial 748 alunos, 47 professores e 271 gestores nas três escolas. Nos próximos itens, são apresentados os resultados dos questionários, destacando-se algumas informações relevantes obtidas do questionário feito com os alunos, professores e gestores respectivamente.

#### 3.3.1 Aplicação dos questionários para alunos

A Tabela 01 apresenta os resultados das respostas dos alunos ao questionário, destacando-se a seguir algumas observações relevantes:

- na ETEC Santa Ifigênia, os alunos do período matutino e noturno têm maiores problemas com os ruídos vindos das salas vizinhas como as vozes dos professores e alunos. Para os alunos do período vespertino os ambientes mais ruidosos são os externos devido ao trânsito. Na média geral de todos os períodos, 25 % dos alunos têm dificuldades para ouvir com clareza o professor e apenas 38 % não se sentem afetados pelo ruído no entendimento dos assuntos das aulas;

- na ETEC Dra. Maria Augusta, novamente percebe-se que a maior fonte de ruído está fora dos limites da escola para os alunos do período da tarde, porém os ruídos que mais incomodam são as vozes dos alunos. Para os alunos do período matutino e noturno, as fontes de ruído se distribuem entre o lado externo (sendo este o mais ruidoso) e as áreas comuns da escola. Para mais da metade dos alunos do período matutino e noturno, o ruído que mais atrapalha é das vozes dos alunos, estando na sequência os ruídos do trânsito. Para os alunos do período vespertino os ruídos que mais atrapalham estão distribuídos entre vozes dos alunos, trânsito e trens/aeronaves. Isto pode ser devido à linha 7 da CPTM nas proximidades da escola e também de aeronaves que sobrevoam o local da escola. Dos alunos do período matutino, 27 % têm dificuldades ou não conseguem ouvir com clareza a voz do professor e 37 % não se sentem afetados pelo ruído no entendimento das aulas. Para os períodos vespertino e noturno, em média 58 % não se sentem afetados pelo ruído no entendimento das aulas;
- na ETEC Carlos de Campos, as respostas dos alunos dos três períodos são semelhantes. Mais da metade acham que os ruídos nas áreas comuns da escola são normais e em média 36 % acham barulhentos. Para 54 %, em média, dos alunos a maior fonte de ruído vem do lado externo à escola e 25 % acham que vem do pátio. Porém para 59 % dos alunos o ruído que mais atrapalha são as vozes dos demais alunos e 23 % acham que é o ruído de trânsito. Em média 42 % dos alunos não escutam, ou escutam com dificuldade a voz do professor e apenas 37 % dos alunos não se sentem afetados pelo ruído no entendimento das aulas.

Tabela 01 – Resultados das avaliações com os alunos

	ETEC Santa Ifigênia				ETEC Maria Augusta				ETEC Carlos de Campos - Brás			
	Manhã	Tarde	Noite	Média	Manhã	Tarde	Noite	Média	Manhã	Tarde	Noite	Média
<b>Q1. Como você avalia o ruído nas áreas comuns da escola (pátio, corredores etc)?</b>												
Muito silencioso	1 %	2 %	1 %	2 %	1 %	4 %	3 %	3 %	1 %	1 %	1 %	1 %
Silencioso	4 %	7 %	8 %	6 %	2 %	4 %	4 %	3 %	5 %	3 %	5 %	5 %
Normal	64 %	55 %	51 %	57 %	56 %	72 %	58 %	62 %	55 %	61 %	55 %	57 %
Barulhento	25 %	31 %	31 %	29 %	35 %	14 %	30 %	26 %	38 %	33 %	38 %	36 %
Muito barulhento	5 %	5 %	9 %	6 %	6 %	6 %	5 %	6 %	0 %	2 %	0 %	1 %
<b>Q2. De onde vem o ruído que você escuta?</b>												
Lado externo/rua	29 %	48 %	29 %	35 %	33 %	60 %	29 %	41 %	57 %	48 %	57 %	54 %
Sala ao lado	64 %	43 %	65 %	57 %	20 %	10 %	32 %	20 %	3 %	5 %	3 %	4 %
Corredor	3 %	0 %	1 %	1 %	24 %	11 %	24 %	19 %	13 %	15 %	13 %	14 %
Pátio	0 %	2 %	0 %	1 %	21 %	7 %	5 %	11 %	25 %	26 %	25 %	25 %
Não ouço nenhum ruído	4 %	7 %	5 %	5 %	3 %	13 %	11 %	9 %	3 %	5 %	3 %	3 %
<b>Q3. Caso você escute algum ruído que incomode, qual deles que mais te atrapalha?</b>												
Vozes dos alunos	35 %	14 %	29 %	26 %	59 %	34 %	68 %	54 %	59 %	58 %	59 %	59 %
Vozes dos professores	17 %	17 %	34 %	23 %	3 %	2 %	4 %	3 %	0 %	2 %	0 %	1 %
Trânsito/rua	28 %	59 %	23 %	37 %	23 %	25 %	16 %	21 %	22 %	23 %	22 %	23 %
Ar condicionado - ventilador	0 %	0 %	3 %	1 %	8 %	7 %	4 %	6 %	0 %	3 %	0 %	1 %
Trem/aeronaves	1 %	2 %	1 %	1 %	2 %	21 %	3 %	9 %	3 %	2 %	3 %	3 %
Construções vizinhas	11 %	5 %	6 %	7 %	5 %	8 %	5 %	6 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Quadra poliesportiva/outros	7 %	3 %	5 %	5 %	0 %	3 %	5 %	3 %	13 %	8 %	13 %	12 %
<b>Q4. Em horário regular de aula, você consegue ouvir com clareza a voz do professor?</b>												
Sim	80 %	67 %	70 %	72 %	74 %	90 %	89 %	84 %	55 %	65 %	55 %	59 %
Não	0 %	7 %	3 %	3 %	4 %	0 %	4 %	3 %	8 %	7 %	8 %	8 %
Escuto com dificuldade	20 %	26 %	28 %	25 %	23 %	10 %	7 %	13 %	37 %	28 %	37 %	34 %
<b>Q5. O ruído atrapalha no entendimento dos assuntos abordados em sala de aula pelo professor?</b>												
Sim	44 %	48 %	40 %	44 %	46 %	35 %	39 %	40 %	47 %	36 %	47 %	44 %
Não	36 %	40 %	38 %	38 %	37 %	57 %	58 %	51 %	33 %	45 %	33 %	37 %
Escuto com dificuldade	20 %	12 %	23 %	18 %	17 %	8 %	3 %	9 %	20 %	18 %	20 %	19 %

Fonte: elaborada pelos autores (2020)

### 3.3.2 Aplicação dos questionários para professores

A Tabela 02 apresenta os resultados das respostas dos professores ao questionário, destacando-se abaixo algumas observações relevantes:

- quanto às áreas comuns das escolas, a ETEC Carlos de Campos é a mais barulhenta segundo os professores, estando as ETECs Maria Augusta e Santa Ifigênia na sequência. Quanto ao ruído dentro das salas de aula, as ETECs Santa Ifigênia e Carlos de Campos são igualmente críticas, avaliadas como 60 % e 53 % (barulhenta/muito barulhenta), respectivamente. Apesar de apenas 20 % dos professores da ETEC Maria Augusta avaliarem o ruído nas salas de aula como barulhento, 82 % deles precisam aumentar a voz na maioria das vezes durante as aulas, estando as ETECs Carlos de Campos com 71 % e Santa Ifigênia com 53 %;
- quanto às origens dos ruídos, na ETEC Santa Ifigênia as opiniões se dividem quase igualmente entre o lado externo à escola e as salas vizinhas, porém os ruídos que mais incomodam são os ruídos de trânsito. Na ETEC Maria Augusta, 93 % dos professores acham que os ruídos vêm dos corredores e os ruídos que mais incomodam são das vozes dos alunos; o ruído do ar-condicionado também é um problema para 29 % dos professores. Na ETEC Carlos de Campos, 82 % acham que os ruídos vêm do lado externo e apenas 18 % acham que vêm das salas vizinhas, porém 29 % acham que o ruído que mais incomoda é das vozes dos alunos, 38 % do trânsito e 14 % dos camelôs;
- os professores da ETEC Carlos de Campos são os que mais têm problemas para ouvir os alunos quanto a algum assunto da aula com 59 %, estando as ETECs Maria Augusta e Santa Ifigênia na sequência com 24 % e 18 %, respectivamente;
- cerca de metade dos professores da ETEC Maria Augusta, 41 % dos professores da ETEC Santa Ifigênia e todos os professores da ETEC Carlos de Campos consideram que os alunos têm seu rendimento escolar prejudicado devido ao ruído;
- quanto às doenças ocupacionais relativas à audição e fala, a ETEC Carlos de Campos apresenta a menor quantidade de casos com 7 %, estando as ETECs Santa Ifigênia com 18 % de casos e a ETEC Maria Augusta com 27 %. Todos os professores que tiveram tais doenças ficaram afastados apenas por alguns dias.

Tabela 02 – Resultados das avaliações com os professores

	Santa Ifigênia	Maria Augusta	Carlos de Campos	Média
<b>Q1. Como você avalia o ruído nas áreas comuns da escola (pátio, corredores etc)?</b>				
Muito silencioso	0 %	0 %	0 %	0 %
Silencioso	0 %	0 %	0 %	0 %
Normal	73 %	40 %	29 %	48 %
Barulhento	20 %	47 %	53 %	40 %
Muito barulhento	7 %	13 %	18 %	13 %
<b>Q2. Como você avalia o ruído nas salas de aula?</b>				
Muito silencioso	0 %	0 %	0 %	0 %
Silencioso	0 %	0 %	6 %	2 %
Normal	40 %	80 %	41 %	54 %
Barulhento	53 %	20 %	53 %	42 %
Muito barulhento	7 %	0 %	0 %	2 %
<b>Q3. É possível falar normalmente com os alunos?</b>				
Sempre	47 %	6 %	29 %	27 %
Nunca	0 %	0 %	0 %	0 %
É preciso aumentar a voz	53 %	82 %	71 %	69 %
<b>Q4. De onde vem o ruído que você escuta?</b>				
Lado externo/rua	47 %	7 %	82 %	45 %
Sala ao lado	53 %	0 %	18 %	24 %
Corredor	0 %	93 %	0 %	31 %
Não ouço nenhum ruído	0 %	0 %	0 %	0 %
<b>Q5. Caso você escute algum ruído que incomode, qual deles que mais te atrapalha?</b>				
Vozes dos alunos	15 %	67 %	29 %	37 %
Vozes dos professores	18 %	5 %	10 %	11 %
Trânsito/rua	42 %	0 %	38 %	27 %
Ar condicionado - ventilador	9 %	29 %	10 %	16 %
Trem/aeronaves	0 %	0 %	0 %	0 %
Construções vizinhas	6 %	0 %	0 %	2 %
Camelôs no lado externo/outros	9 %	0 %	14 %	8 %

	Santa Ifigênia	Maria Augusta	Carlos de Campos	Média
Q6. Quando o aluno está respondendo ou questionando algum assunto, você consegue ouvi-lo com clareza?				
Sim	71 %	65 %	41 %	59 %
Não	18 %	24 %	59 %	33 %
Q7. Nas salas onde há ruído excessivo, você considera que o rendimento escolar dos alunos foi prejudicado?				
Sim	41 %	53 %	100 %	65 %
Não	59 %	47 %	0 %	35 %
Q8. Você já teve alguma doença ocupacional (relacionado à audição/fala)?				
Sim	18 %	27 %	7 %	17 %
Não	82 %	73 %	93 %	83 %
Q9. Caso tenha tido alguma dessas doenças, quanto tempo ficou afastado por tal motivo?				
Alguns Dias	100 %	100 %	100 %	100 %
Meses	0 %	0 %	0 %	0 %
Meses	0 %	0 %	0 %	0 %

Fonte: elaborada pelos autores (2020)

### 3.3.3 Aplicação dos questionários para os gestores

Quase 40 % dos gestores trabalham acima de 16 anos nas escolas e 63 % trabalham nos três períodos de aulas. Essas informações do questionário são importantes, pois a experiência nas escolas ao longo dos anos e o trabalho nos três períodos permitem ao gestor ter uma visão geral da escola durante cada período.

A Tabela 03 apresenta os resultados das respostas dos gestores ao questionário.

Tabela 03 – Resultados das avaliações com os gestores

Q1. Tempo em anos que trabalha no Centro Paula Souza	
1 até 5	11 %
6 até 10	28 %
11 até 15	21 %
16 até 20	19 %
Acima de 21	21 %
Q1. Tempo em anos que trabalha no Centro Paula Souza	
Manhã e tarde	20 %
Manhã e noite	7 %
Tarde e noite	7 %
Geralmente os 3 períodos	63 %
Noite	3 %
Q3. Como você avalia o ruído nas áreas comuns?	
Silencioso	9 %
Satisfatório	59 %
Barulhento	27 %
Muito barulhento	5 %
Q4. Como você avalia o ruído nas salas de aula?	
Silencioso	11 %
Satisfatório	61 %
Barulhento	4 %
Muito barulhento	24 %
Q5. É possível falar normalmente com os alunos?	
Sempre	55 %
Nunca	1 %
É preciso aumentar a voz	44 %

Q6. Caso você escute algum ruído que incomode, qual deles que mais te atrapalha?	
Vozes dos alunos	51 %
Vozes dos professores	3 %
Trânsito/rua	11 %
Ar condicionado - ventilador	25 %
Trem/aeronaves	2 %
Construções vizinhas	2 %
Outros	8 %
Q7. Quando o aluno está respondendo ou questionando algum assunto, você consegue ouvi-lo com clareza?	
Sim	79 %
Não	21 %
Q8. Em relação a salas de aula de outras escolas que você já trabalhou ou trabalha, como você avalia o nível de ruído da outra escola?	
Silencioso	8 %
Satisfatório	62 %
Barulhento	24 %
Muito barulhento	4 %
Q9. Nas salas onde há ruído excessivo, você considera que o rendimento escolar dos alunos foi prejudicado?	
Sim	83 %
Não	17 %
Q10. Você já teve alguma doença ocupacional (relacionado à audição/fala)?	
Sim	7 %
Não	93 %
Q11. Caso tenha tido alguma dessas doenças, quanto tempo ficou afastado por tal motivo?	
Nenhum dia	82 %
01 até 15 dias	16 %
16 até 30 dias	0 %
Acima de 30 dias	2 %

Fonte: elaborada pelos autores (2020)

De acordo com a Tabela 3, destacam-se abaixo algumas observações relevantes como referência para outros futuros projetos das escolas na escolha da localização da unidade escolar e dos ambientes de uso comum:

- a avaliação geral dos gestores é que 32 % das escolas do Centro Paula Souza foram classificadas como muito barulhenta ou barulhenta, devido aos ruídos das áreas comuns das escolas;
- em se tratando de ruído interno dentro das salas de aula, 28 % dos gestores classificam como muito barulhenta ou barulhenta;
- para 45 % dos gestores, na maioria das vezes, para a comunicação ser realizada com os alunos, eles têm que aumentar o tom da voz. Essa informação é importante para a saúde ocupacional dos professores, entendimento e comunicação entre alunos e gestores;
- para 51 % dos gestores, o principal ruído que mais incomoda vem de vozes dos alunos de diversos ambientes, atrapalhando na comunicação interna. O segundo ruído que mais incomoda 25 % vem do ar condicionado e 11 % de trânsito na rua;
- no caso de inteligibilidade da fala do aluno, a sensação dos gestores é que em 21 % dos casos não é possível ouvir o aluno com clareza;
- foi observado que 28 % dos gestores avaliam as outras escolas como muito barulhenta ou barulhenta;
- 83 % acreditam que o rendimento escolar dos alunos é prejudicado pelo motivo do ruído;
- 7 % já tiveram doenças ocupacionais relacionadas à audição ou fala devido à exposição ao ruído no ambiente de trabalho;
- na questão de absenteísmo por afastamento médico, motivos a priori de doenças relacionados ao ruído no ambiente de trabalho, 18 % dos gestores tiveram faltas no ambiente de trabalho por doenças auditivas ou na fala. Isso pode causar prejuízo na gestão escolar e perda de qualidade na gestão e acompanhamento de alunos e funcionários.

### 3.4 Medições de parâmetros acústicos in loco

Foram feitas medições do nível de pressão sonora nos ambientes internos e externos das escolas e a determinação do tempo de reverberação dos ambientes, em estudo. Na Tabela 4, são apresentados os resultados das medições do nível de pressão sonora no interior das salas, no corredor ao lado das salas e o ruído externo à escola e o tempo de reverberação das salas. Também são apresentados os níveis estatísticos L10 e L90.

O nível estatístico L90 é o nível de ruído que foi excedido em 90 % do tempo de medição. Esse parâmetro indica a condição mais característica do ruído durante o período de medição, sendo muito próximo do ruído residual, porém não necessariamente igual.

O nível estatístico L10, é o nível de ruído que foi excedido em 10 % do tempo de medição. Este parâmetro indica o nível de ruído a partir do qual estão s níveis de ruído mais significativos da medição, dessa forma podendo ser associado aos ruídos intrusivos.

Conforme colocado por Bistafa (2018), quanto maior a diferença entre o L10 e L90, maior será o incômodo do ruído. Também a FHWA (2020), estabelece que para áreas onde são instaladas escolas, o L10 deve ser no máximo 70 dB(A).

Para as determinações de nível de pressão sonora a incerteza de medição é de  $\pm 1$  dB e para a determinação do tempo de reverberação a incerteza de medição é de  $\pm 0,02$  s.

Tabela 04 – Parâmetros acústicos medidos nas escolas

ETEC	Ambiente e unidade de medição	Condição	$L_{Ae}$ g-	$L_1$ o	$L_9$ o	L10- L90
Santa Ifigênia	Sala (dB)	Sala ocupada	72	76	61	15
	Corredor (dB)	Com sala ocupada	66	68	61	7
	Lado externo da escola (dB)	Com sala ocupada	61	61	59	2
	Sala (dB)	Desocupada	$L_{Aeq} = 63$			
	Tempo de Reverberação (s)	Desocupada	$TR_{500\text{ Hz}} = 0,78$			
Dra. Maria Augusta Saraiva	Sala (dB)	Sala ocupada	78	83	71	12
	Corredor (dB)	Com sala ocupada	69	78	67	11
	Lado externo da escola (dB)	Com sala ocupada	63	67	54	13
	Sala (dB)	Desocupada	$L_{Aeq} = 65$			
	Tempo de Reverberação (s)	Desocupada	$TR_{500\text{ Hz}} = 1,70$			
Carlos de Campos	Sala (dB)	Sala ocupada	77	81	70	11
	Corredor (dB)	Com sala ocupada	78	83	71	12
	Lado externo da escola (dB)	Com sala ocupada	72	76	71	5
	Sala (dB)	Desocupada	$L_{Aeq} = 62$			
	Tempo de Reverberação (s)	Desocupada	$TR_{500\text{ Hz}} = 1,62$			

Fonte: elaborado pelos autores (2020)

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os dados dos TR medidos nas escolas e TR recomendados por normas e autores nacionais e internacionais. Quanto ao trabalho de Ikeda (2019), a autora propõe recomendações de TR para as frequências a partir de 63 Hz a 8000 Hz em bandas de terço-de-oitava, porém ateve-se neste trabalho a analisar somente as bandas de terço-de-oitava 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Tabela 05 – Comparação entre os dados de TR medidos nas escolas e os recomendados.

TR (s) recomendados			TR (s) medidos nas escolas						
Fonte	Condição	Faixa de aceitação	Carlos de Campos		Santa Ifigênia		Maria Augusta		
			Sala com volume 240 m <sup>3</sup>	Sala com volume 243 m <sup>3</sup>	Sala com volume 135 m <sup>3</sup>	Sala com volume 137 m <sup>3</sup>	Sala com volume 135 m <sup>3</sup>	Sala com volume 137 m <sup>3</sup>	
Norma ABNT NBR 12179:1992	Em 500 Hz, recinto ocupado	$0,4 < TR \leq 0,6$ ; $120 < V \leq 300 \text{ m}^3$	1,62	1,43	0,79	0,77	1,70	1,92	
França apud Zannin et al., 2013	Média aritmética dos TR em 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, recinto mobiliado e desocupado	$0,4 < TR \leq 0,8$ ; $V \leq 250 \text{ m}^3$	1,56	1,37	0,71	0,70	1,71	1,89	
Norma ANSI S 12.60 (2010)		TR = 0,6; $V \sim 283$							
DFES (2003)		TR (escola secundária) < 0,8							
DIN E 18041	Média aritmética dos TR em 500 Hz e 1000 Hz, recinto ocupado vc	$0,8 \leq TR \leq 1,0$ ; $V \leq 250 \text{ m}^3$	1,59	1,37	0,71	0,70	1,75	1,95	
Fukuchi e Ueno (2003)	Média aritmética dos TR em 500 Hz e 1000 Hz, recinto mobiliado e desocupado	TR = 0,6; $V \sim 200$							
Ikeda (2019)	Diversas frequências, recinto mobiliado e desocupado	500 Hz	$0,8 \leq TR \leq 2,1$	1,67	1,43	0,79	0,76	1,70	1,92
		1000 Hz	$0,6 \leq TR \leq 2,0$	1,64	1,32	0,64	0,64	1,79	1,98
		2000 Hz	$0,6 \leq TR \leq 2,0$	1,60	1,36	0,70	0,70	1,63	1,78

Fonte: ABNT NBR 12179(1992); França apud Zannin et al ( 2013); ANSI S 12.60( 2010); DFES Great Britain Department for Education and Skills (2015); DIN E 18041; Fukuchi e Ueno (2003); Ikeda (2019).

### 3.4.1 Análise dos resultados

Considerando-se os dados da Tabela 5, observa-se que os TR recomendados pelas fontes citadas, exceto Ikeda (2019), variam entre 0,4 s e 1,0 s dependendo do método de análise, se em 500 Hz, média de 500 Hz e 1000 Hz ou média de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Comparando os dados medidos nas escolas com estas fontes, nota-se que nas ETECs Carlos de Campos e Maria Augusta os TR mínimos medidos foram maiores do que os recomendados, portanto, estas duas escolas não atendem os critérios destas recomendações.

A ETEC Santa Ifigênia apresentou TR significativamente menor, sendo a que atendeu a maior parte dos critérios, reprovando apenas nos critérios das fontes: norma NBR 12179, norma DIN E 18041 e Fukuchi e Ueno (2003).

A autora Ikeda (2019) propõe em seu trabalho uma faixa relativamente ampla de TR para salas de aula. Com base nos critérios propostos pela autora, todas as salas analisadas estão dentro de sua faixa de aceitação.

Quanto ao nível de pressão sonora, no interior das salas ocupadas, observa-se uma variação de 72 dB(A) a 78 dB(A), níveis elevados para um ambiente escolar.

Considerando os valores do  $LA_{eq}$  nas áreas externas à escola percebe-se uma variação entre 61 dB e 63 dB nas ETECs Santa Ifigênia e Maria Augusta, respectivamente e 72 dB para a ETEC Carlos de Campos, que são valores mais baixos comparados aos  $LA_{eq}$  nas áreas internas das escolas, como nos corredores ou salas de aula, demonstrando que a geração de ruído interno das escolas é importante para o nível de incomodidade.

Comparando os níveis estatísticos  $L_{90}$  e  $L_{10}$ , e a diferença  $L_{10}-L_{90}$ , que indica o nível de incomodidade, pode-se observar que para as salas ocupadas, essa diferença varia de 11 dB(A) a 15 dB(A), indicando que durante o período de aula, ocorre uma variação de ruído alta o que é um indicador sensível do nível de incomodidade no interior das salas de aula. No lado externo das escolas, nota-se uma variação relativamente pequena das ETECs Carlos de Campos e Santa Ifigênia, o que indica um ruído constante, porém ao considerar esses mesmos parâmetros para os ambientes internos da escola como salas de aula e corredores, percebe-se uma variação maior, o que indica maior frequência de ruídos intrusivos (picos) gerados no interior das escolas o que corrobora com as respostas ao questionário dos alunos destas escolas e gestores que consideram que os ruídos que mais atrapalham são das vozes dos alunos e, no caso da ETEC Santa Ifigênia, soma-se as vozes dos professores, apesar de os professores dessas duas escolas em sua maioria considerarem o ruído de trânsito o mais incomodativo. Na ETEC Maria Augusta esses parâmetros indicam ruídos de pico no lado externo às escolas, equivalentes aos internos, porém estes se tornam irrelevantes em comparação com o nível de ruído dentro das salas de aula, além de que a diferença entre tais parâmetros indica ruídos de pico ainda maiores nos corredores da escola que também corrobora com os questionários dos alunos, professores e gestores que indicam que os ruídos que mais atrapalham são as vozes dos alunos.

Em relação ao ruído residual no interior das salas desocupadas, observa-se uma variação de 62 dB(A) a 65 dB(A). Isto mostra que os ambientes não atendem as especificações da Norma NBR 10152:2017, sendo que o nível de pressão sonora adequado para o interior das salas de aula é no máximo 35 dB(A). Em relação ao ruído residual, isto é, o ruído de fundo no interior das salas desocupadas, observa-se uma variação de 62 a 65 dB(A). Isto mostra que os ambientes não atendem as especificações da Norma NBR 10152:2017, sendo que o nível de pressão sonora adequado para o interior das salas de aula é no máximo 35 dB(A).

## 4 Considerações finais

Este trabalho alertou a necessidade de intervenção sobre a qualidade acústica das salas de aula das escolas estudadas e recomendações para projetos futuros. É possível ainda que existam várias escolas do ensino público ou privado que enfrentam os mesmos problemas. Pensando nisto, para evitar que tais problemas se perpetuem em novos projetos, destaca-se a seguir, uma abordagem rápida de recomendações para novos projetos de escolas a serem estudados com mais profundidade em pesquisas futuras.

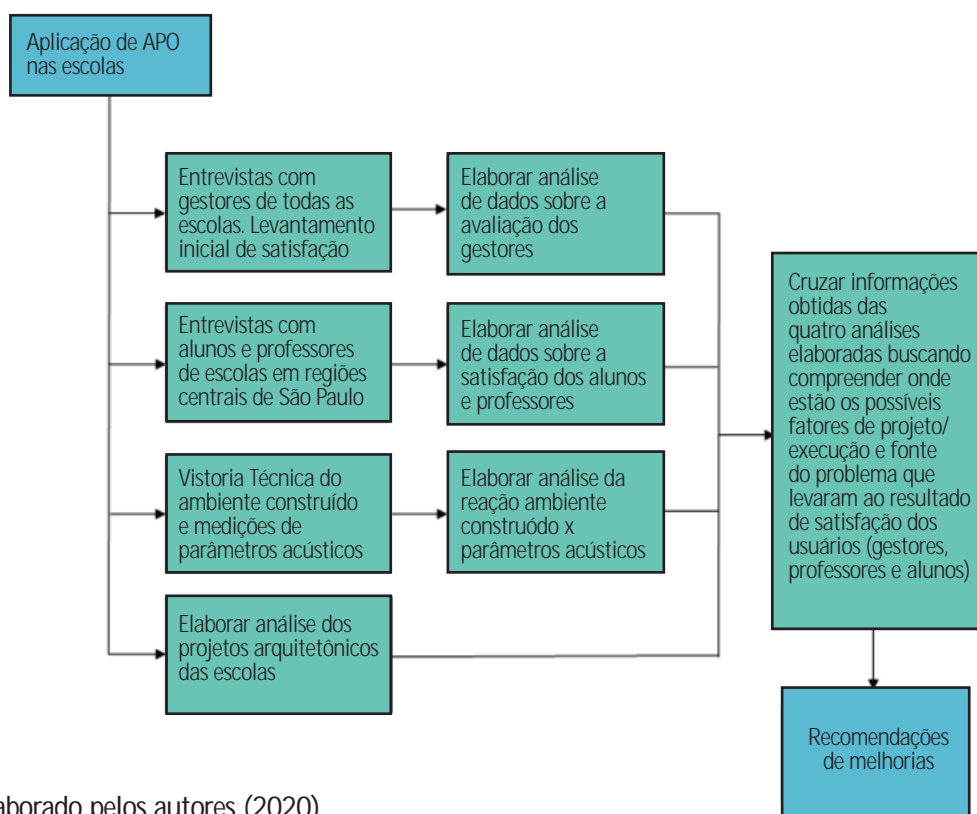
### 5.1 Recomendações para novos projetos de escolas

Para melhoria do desempenho acústico nas salas de aulas de escolas técnicas, fazem-se necessárias algumas observações de projeto visando a inteligibilidade da fala, a redução de ruídos de fundo, externos ou internos ao ambiente, e tempo de reverberação adequado ao tipo de atividade exercida no ambiente:

- escolha do local do terreno em uma área com tráfego e nível de ruído ambiental reduzidos;
- atentar para as medidas dos padrões da FDE para melhor distribuição interna dos alunos, incluindo alunos cadeirantes;
- estudo de parâmetros acústicos durante a fase inicial do projeto para verificar a melhor disposição da edificação no terreno, principalmente na avaliação da localização das salas de aulas e corredores, pátios, quadras, e em relação às ruas;
- escolha de materiais de vedação interna e externa com aplicações que otimizem não somente a isolamento sonora, como também a qualidade acústica de cada ambiente, conforme a sua ocupação; por exemplo, uso de revestimentos absorvedores sonoros dentro das salas de aula que ajudem a controlar a reverberação;
- utilizar portas especiais para isolamento sonora, como portas com folhas maciças ou sólidas com sistema de vedação inferior com acionamento automático (guilhotina).

- avaliar a proporção entre as medidas horizontais das salas e o pé-direito, como sugere a escala de Bolt;
- a compatibilização entre os projetos é importante para a adequação/solução de obra, minimizando as falhas de construção;
- na fase de obras faz-se necessária a correta execução do projeto de conforto ambiental e aplicação adequada dos materiais e revestimentos indicados no referido projeto;
- na fase de manutenção, faz-se necessário um plano de manutenção de portas, caixilhos e equipamentos de climatização;
- na necessidade de aplicação dos questionários, recomenda-se o fluxograma apresentado na **Figura 06**.

Figura 06 –Fluxograma de proposta para melhoria das informações dos questionários em escolas técnicas



Fonte: elaborado pelos autores (2020)

## 5 Conclusão

Analisando as respostas dos usuários aos questionários sobre as condições de conforto acústico nos ambientes e os parâmetros acústicos medidos, conclui-se que as três escolas avaliadas necessitam de melhorias neste aspecto, pois é alta a probabilidade do rendimento dos alunos de fato estar sendo prejudicado de acordo com as opiniões dos próprios alunos, professores e gestores. É necessário também, propor recomendações de projetos para novas escolas no sentido de proporcionar uma melhor inteligibilidade da fala, bem como a redução adequada dos ruídos de fundo e a atenuação dos ruídos intrusivos.

## 6 Referências

ACOUSTIC SOCIETY OF AMERICA – ASA. ANSI S12.60. Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools. Melville, 2010.

ALTON, Everest; POHLMANN, Ken C. *Master Handbook of Acoustics*. 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2009. 510 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10152: Níveis de Conforto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BISTAFA, Sylvio R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2018. 436p.

CENTRO PAULA SOUZA. *Sobre o Centro Paula Souza*. Disponível em: <https://www.cps.sp.gov.br/sobre-o-centro-paula-souza>. Acesso em: 23 jul. 2019.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. DIN E 18041. Acoustic quality in rooms - specifications and instructions for the room acoustic design. Berlin, 2003.

GREAT BRITAIN DEPARTMENT FOR EDUCATION AND SKILLS- DFES. *Acoustic design of acoustic schools: a design guide*. Stationery Office, 2003. (Building bulletin 93).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION- FHWA . *Highway traffic noise analysis and abatement policy and guidance*. Disponível em: [https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/regulations\\_and\\_guidance/polguide/polguide03.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/Environment/noise/regulations_and_guidance/polguide/polguide03.cfm). Acesso em: 15 jun 2020.

FUKUCHI T.; UENO, K. *Guidelines on acoustic treatments for schools buildings proposed by the Architectural Institute of Japan*. In: THE INTERNATIONAL CONGRESS OF ACOUSTICS, Kyoto, 2004. *Proceedings ...* Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/268345588\\_Guidelines\\_on\\_acoustic\\_treatments\\_for\\_school\\_buildings\\_proposed\\_by\\_the\\_Architectural\\_Institute\\_of\\_Japan](https://www.researchgate.net/publication/268345588_Guidelines_on_acoustic_treatments_for_school_buildings_proposed_by_the_Architectural_Institute_of_Japan). Acesso em: 18 abr 2020.

GANTOIS, Carlos. *Tecnologia, inovação e competitividade da indústria brasileira*. Salvador: Federação das Indústrias do estado da Bahia, 2014. Disponível em: [http://www.fieb.org.br/apoio\\_a\\_industria/Noticia/2079/artigo--tecnologia-inovacao-e-competitividade-da-industria-brasileira-.aspx](http://www.fieb.org.br/apoio_a_industria/Noticia/2079/artigo--tecnologia-inovacao-e-competitividade-da-industria-brasileira-.aspx). Acesso em: 22 set. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. Divulga as estimativas de população dos municípios para 2018. Brasil. *Estatísticas Sociais*, 29 ago. 2018. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22374-ibge-divulga-as-estimativas-de-populacao-dos-municipios-para-2018>. Acesso em: 12 jun. 2019.

IKEDA, C.Y.K. *Determinação de faixas de operação de parâmetros acústicos para avaliação da qualidade sonora de salas de aula*. 2019.313f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-15012019-162548/pt-br.php>. Acesso em: 16 abr 2020.

REICHHELD, Fred. *The Ultimate Question 2.0: How Net Promoter Companies Thrive in a Customer-Driven World*. [S.l.: s.n.], 2003. 290 p.

ZANNIN, P.H.T.; FIEDLER, P.E.K.; BUNN, F. Reverberation time in classrooms – Case study: When an administrative decision changes acoustic quality. *Journal of Scientific and Industrial Research*. v.72-8, p. 506 – 510, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/288249614\\_Reverberation\\_time\\_in\\_classrooms\\_-\\_Case\\_Study\\_When\\_an\\_administrative\\_decision\\_changes\\_acoustic\\_quality](https://www.researchgate.net/publication/288249614_Reverberation_time_in_classrooms_-_Case_Study_When_an_administrative_decision_changes_acoustic_quality). Acesso em 18 abr 2020.

ZWIRTES, D. P. Z. *Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas escolas estaduais do Paraná*. 2006.161f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.c

DOI 10.34033/2526-5830-v4n15-5



**IPT**

## Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, 532

Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP

CEP 05508-901

### Central de Relacionamento com o Cliente

(11) 3767-4102/ 4456 / 4091

[ipt@ipt.br](mailto:ipt@ipt.br)

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

### Redes Sociais

[twitter.com/@ipt](https://twitter.com/@ipt)

[youtube.com/IPTbr](https://youtube.com/IPTbr)

[facebook.com/iptsp](https://facebook.com/iptsp)

[linkedin.com/iptsp](https://linkedin.com/iptsp)

[instagram.com/ipt\\_oficial](https://instagram.com/ipt_oficial)



| Secretaria de Desenvolvimento Econômico