

REVISTA

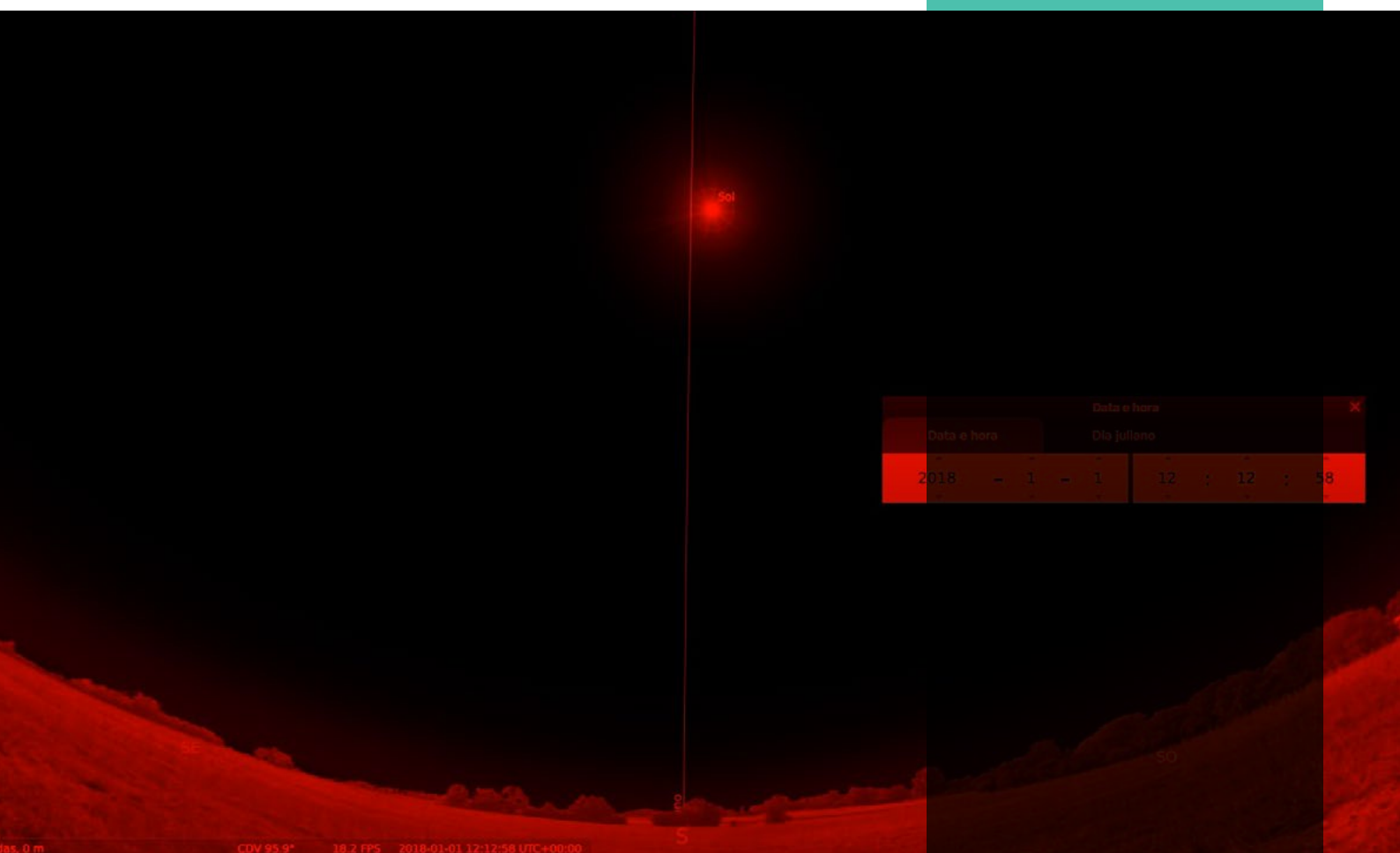
IPT

Tecnologia
e inovação

11

ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Agosto/2019



HABITAÇÃO

Identificação dos solos colapsíveis e os problemas decorrentes da sua manifestação

METALOGRAFIA

Estudo mostra casos de análises de falhas realizadas pelo IPT e as tendências para o futuro

METROLOGIA

Discussão sobre a medida do intervalo de tempo astronômico conhecido como "dia solar verdadeiro"



REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.3, n.11, agosto, 2019

Quadrimestral

Editores-chefes

Andreia Longuinho da Silva

Eduardo Luiz Machado

Zehbour Panossian

Conselho Editorial

Ana Carolina Carneiro

Edna Baptista dos S. Gubitoso

Juliana Lopes Cardoso

Luciana Aparecida Alves

Maria Natalina Martins

Assistentes Editoriais

Augusto Max Colin

Bruno D. Francisco da Silva

Denis Bruno Virissimo

Denise Oliveira de Paula

João Antonio Rodrigues Garcia

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:
Augusto Max Colin

REVISÃO:
Edna Baptista dos S. Gubitoso
Zehbour Panossian

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

ISSN 2526-5830

#11

Revista IPT:
Tecnologia
e inovação

Artigos técnicos

SUMÁRIO

p.06

Incertezas na determinação do dia solar verdadeiro:
conceitos metrológicos aplicados à astronomia

p.21

Colapsibilidade de solos em um distrito de Porto Velho - Rondônia:
impactos em Habitações Populares

p.35

Análise de falhas - um dever do IPT

p.65

Preparo de lote piloto de sedimento estuarino candidato
a material de referência de composição química elementar

FOCO EM MEDIÇÕES E ANÁLISES



Jefferson de Oliveira Gomes
Diretor-Presidente do IPT

A décima primeira edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' reúne quatro artigos selecionados, produzidos por grupos de pesquisadores do Instituto e colaboradores. A expertise destes profissionais nos respectivos campos de atuação é um diferencial de qualidade nos conteúdos produzidos. São contribuições relevantes para aprimorar o conhecimento técnico aplicado em diversas áreas.

Em "Análise de falhas – um dever do IPT", os autores Hamilton Lelis Ito e Jonas de Carvalho Gomes, pesquisadores do Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto, discutem a amplitude metodológica deste tipo de análise em Metalografia. Mas o objetivo, neste artigo, é restringir o significado às análises que visam a determinação das causas de fraturas ou trincas em componentes mecânicos e estruturas, sem abordar casos relacionados à perda

de estabilidade devido a fatores como deformações, desgaste e corrosão generalizada.

No artigo "Incertezas na determinação do dia solar verdadeiro – conceitos metrológicos aplicados à Astronomia", uma abordagem original feita pelos pesquisadores Fabricio Goncalves Torres e Diogo Cesar Borges Silva, do Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT, juntamente com Ramachrisna Teixeira do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Discutem, de um ponto de vista metrológico, a medida do intervalo de tempo astronômico conhecido como "dia solar verdadeiro", unidade de tempo muito utilizada ao longo da história humana.

Estudo conduzido pela pesquisadora Gisleine Coelho de Campos, do Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura do IPT, juntamente com Felipe Schaeffer Santos, da BK Consultoria e Serviços, apresenta-se sob o título "Colapsibilidade de solos em um distrito de Porto Velho, Rondônia: impactos em habitações populares". Neste artigo os autores discutem conceitos para identificação de solos passíveis de colapso e problemas deles decorrentes.

Intitulado "Preparo de lote piloto de sedimento estuarino candidato a material de referência de composição química elementar", este artigo discute a falta de materiais de referência brasileiros para sedimentos contendo metais pesados depositados em reservas hídricas. Os autores Juliana Ferreira de Oliveira, Patricia Hama e Ricardo Rezende Zucchini, do Laboratório de Referências Metrológicas do IPT, e Rubens César Figueira Lopes, do Instituto de Oceanográfico da USP, apresentam um lote-piloto preparado a partir de sedimento coletado na região do Alto Estuário de Santos, visando a produção de material de referência certificado.

Boa leitura!

Incertezas na determinação do dia solar verdadeiro: conceitos metrológicos aplicados à astronomia

Uncertainty in determining the true solar day: metrological concepts applied to astronomy

Fabricio Goncalves Torres^{a*}, Diogo Cesar Borges Silva^a, Ramachrisna Teixeira^b

^a Laboratório de Metrologia Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil

*E-mail: fabrigt@ipt.br

Palavras-chave:
metrologia; astrometria;
astronomia, incerteza.

Keywords:
*metrology; astrometry;
astronomy, uncertainty.*

Resumo

Neste trabalho, é discutida, de um ponto de vista metrológico, a medida do intervalo de tempo astronômico conhecido como "dia solar verdadeiro" que, ao longo da História, foi uma unidade de tempo bastante utilizada pela humanidade. O intuito é aplicar alguns conceitos da Metrologia a um fenômeno intimamente relacionado às nossas vidas. O software *Stellarium*, que permite simular os movimentos dos corpos celestes, foi utilizado para medir essa unidade em intervalos regulares ao longo de um ano. Os resultados obtidos são apresentados, comparados com os valores do Anuário do Observatório Nacional – RJ, analisados e discutidos.

Abstract

In this work, we discuss, from a metrological point of view, the measurement of the astronomical time interval, known as "true solar day" which, through History, was a unit of time widely used by mankind. The intention is to attract and to motivate the interest to promote the discussion of Metrology concepts applied to a phenomenon strongly related to our lives, in this case, the duration variability of the days along one year. The software Stellarium, which allows simulating the movement of the celestial bodies, was employed to measure the duration of the day in regular intervals along one year. The obtained results are presented, compared against the values from the Yearbook of the National Observatory – RJ and are analyzed and discussed.

1 Introdução

Usamos números para contar e, da mesma forma que uma história, este ato de contar pode dar significado ao que nos cerca. Com a intenção de encontrar um número que traduzisse o tamanho do nosso planeta, muitos matemáticos da Grécia Antiga tentaram determinar o diâmetro da Terra. Dos muitos métodos e números encontrados, foi só por volta de 240 AEC (antes da era comum) que se chegou pela primeira vez a um valor que se compara, muito bem, com o que temos hoje. O cálculo foi feito por Eratóstenes na época em que trabalhava na biblioteca de Alexandria. Infelizmente, a definição exata da unidade de medida empregada por ele para os cálculos, o estádio, perdeu-se ao longo da história, ainda assim, relacionando os possíveis valores do estádio com nossas unidades modernas de comprimento, pode-se atribuir aos seus resultados um erro entre 0,5 % e 17 % (ERATOSTHENES..., 2018).

O exemplo de Eratóstenes é bastante emblemático por seu método exigir que fosse medida com aceitável precisão a distância entre duas cidades, o que demandou um estudo da medição em si, ou seja, a aplicação da Metrologia (do grego *metron* que significa "medida" e *logos* que significa "estudo"). Esse exemplo ilustra também como Metrologia e Astronomia sempre andaram juntas ao longo da história. O avanço nos conhecimentos da Astronomia demandou que fossem desenvolvidos conceitos de Metrologia, tanto pela necessidade de se obter instrumentos mais exatos e precisos, quanto pela utilização de modelos estatísticos mais apropriados. O inverso também é válido, já que o aprimoramento da Metrologia permitiu enxergar mais e entender melhor as nuances da natureza.

A Metrologia também é fundamental para que decisões importantes sejam tomadas baseadas em resultados confiáveis e justos. Medições imprecisas e inexatas podem ter consequências bastante negativas. Um valor para a circunferência da Terra, aproximadamente, 30 % menor do que o valor determinado por Eratóstenes (DETERMINING..., 2018) levou Cristóvão Colombo a acreditar que o Extremo Oriente estava bem mais perto da Europa do que realmente estava (SANTIAGO; SALVIANO, 2005).

O que seria um erro grande? Quando um erro pode ser considerado inapropriado ou grosseiro?

Com a Metrologia atual, temos um conceito mais amplo sobre o que seria um erro grande ou pequeno, embora esse conceito seja relativo, já que, o que seria erro grosseiro para uma determinada aplicação, talvez não seja para outra. Ao poder separar, conceitualmente, erro de incerteza, esse erro pode ser melhor mitigado e, se necessário, reduzido a níveis satisfatórios.

Entretanto, nem sempre a Metrologia foi da forma como a conhecemos hoje. Há alguns séculos, não se tinha um conceito claro do que seria um erro de medida. Durante muito tempo cientistas acreditavam que era possível obter resultados tão verdadeiros que chegavam à perfeição e, portanto, era comum que dados discrepantes fossem manipulados ou omitidos para que o resultado final

convergissem a um valor ideal. Prática comum que, até nos dias de hoje, é realizada por alguns estudantes ao elaborar os relatórios das experiências dos cursos de laboratório. Entretanto, essa prática pode ser muito danosa e, inclusive, ocultar grandes oportunidades para o avanço da ciência.

Como exemplo podemos citar uma das maiores e mais ousadas empreitadas científicas já realizadas: criar uma definição do metro a partir da fração de um dos meridianos da Terra. A medida em si, embora desafiadora, não justificaria ser classificada como uma empreitada tão extraordinária se não fosse pelo fato dela ter iniciado na França, em plena Revolução Francesa (1789-1799), em junho de 1792. Dois grandes cientistas foram convocados para a empreitada: Jean Baptiste Joseph Delambre e Pierre François André Méchain. Delambre foi incumbido de realizar as medidas na parte norte da expedição até Dunquerque, enquanto Méchain comandou a expedição quase mil quilômetros para o sul, até Barcelona (ALDER, 2003). O resultado da expedição foi catastrófico para Méchain que não só teve de passar por uma série de adversidades durante a expedição como também suportar o fato de que algumas de suas medidas apresentaram um grande erro que ele não conseguia explicar. Por fim, essa divergência o enlouqueceu ao ponto de fraudar diversos dados.

Após a morte de Méchain, em 1804, Delambre teve um trabalho extraordinário de organizar todas as informações e resgatar os resultados verdadeiros, porém o erro que angustiava Méchain voltou à tona. Os cientistas da época não tinham uma noção clara do que seria um erro e confundiam conceitos como precisão (concordância entre valores obtidos por medições repetidas, em um mesmo objeto, sob condições especificadas) e exatidão (concordância entre um valor medido e um valor tido como verdadeiro). Somente anos depois, um aluno de Laplace, Nicolas Nicolle, conseguiu identificar que a fonte de erro se devia às imperfeições do Círculo de Borda, instrumento utilizado nas medidas. Por fim, de forma inesperada, o erro de Méchain acabou sendo o responsável pelo desenvolvimento da Teoria dos Erros utilizada até hoje (ALDER, 2003).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como foco aplicar conceitos metrológicos na medição do "dia solar verdadeiro" utilizando o simulador *Stellarium*. Os resultados obtidos são comparados com os valores tabelados obtidos no Anuário do Observatório Nacional (2018), analisados e discutidos.

1.1 Dia solar verdadeiro

Para ilustrarmos aspectos básicos de Metrologia, decidimos determinar a duração **da unidade de tempo chamada "dia solar verdadeiro"** ao longo do ano realizando medidas com o "software" *Stellarium* que nos permite em poucos minutos, simular os movimentos diário e anual aparentes do Sol.

O "dia solar verdadeiro" pode ser definido como o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol por um mesmo meridiano. Dessa forma, a experiência resume-se no registro dos instantes de cada passagem do Sol pelo meridiano de um observador. A diferença entre dois instantes relativos a duas passagens consecutivas nos fornece a duração do "dia solar verdadeiro". A repetição dessa experiência ao longo do ano pode nos revelar, dependendo da precisão, que o dia solar verdadeiro não tem sempre a mesma duração, ou seja, não tem sempre 24 h como o dia civil (calendário).

Essas variações ocorrem devido à inclinação entre os movimentos de rotação e de translação da Terra e à forma elíptica da órbita da Terra ao redor do Sol.

1.2 Simulador *Stellarium*

Stellarium é um software livre, de código aberto, desenvolvido para Linux/Unix, Windows e Mac OS X, que permite simular um planetário em um computador doméstico. Ele utiliza OpenGL para gerar, em tempo real, as posições e movimentos de corpos celestes. Desenvolvido, inicialmente, em 2001 por Fabien Chéreau o projeto é, atualmente, mantido e constantemente atualizado por um grupo de estudantes, profissionais e entusiastas (STELLARIUM..., 2018).

O software possui uma base de dados ampla, podendo chegar a 210 milhões de estrelas, utilizando dados de catálogos como NGC e Hipparcos, entre outros ((STELLARIUM..., 2018). Seu objetivo é atuar como uma ferramenta educacional e de suporte, auxiliando astrônomos, amadores ou não, a planejar observações e verificar conceitos teóricos em um ambiente simplificado.

Utilizando o software é possível verificar características referentes ao movimento de planetas, estrelas e outros corpos celestes, em função do instante e da posição do observador. Pode-se, por exemplo, observar em minutos o movimento de um determinado corpo celeste que levaria anos para ser completado.

2 Medindo o “dia solar verdadeiro”

Como dito, o que queremos então, é registrar os instantes das passagens meridianas do Sol. A rigor, para tal, deveríamos observar o Sol. Entretanto, essa tarefa não é recomendável para leigos. A observação direta do Sol é extremamente perigosa devido à alta intensidade de sua radiação. No caso da Astronomia profissional, embora corriqueira, essa observação exige estratégias especiais e de grande complexidade, sobretudo quando se quer realizar um trabalho de precisão.

A opção para os leigos é observar a passagem meridiana do Sol de forma indireta. Em vez de observarmos o Sol quando este cruza o meridiano, observamos a sombra de uma haste fincada verticalmente. O instante da passagem meridiana do Sol corresponde ao instante em que essa sombra é mínima.

Naturalmente, a realização da medida da sombra da haste nos instantes das passagens meridianas consecutivas do Sol, estarão separadas por, aproximadamente, 24 h. Uma dificuldade ainda maior é que se quisermos medir o comportamento do “dia solar verdadeiro” ao longo do ano, teremos que repetir essa medida muitas vezes e esperarmos pelo menos um ano para termos resultados.

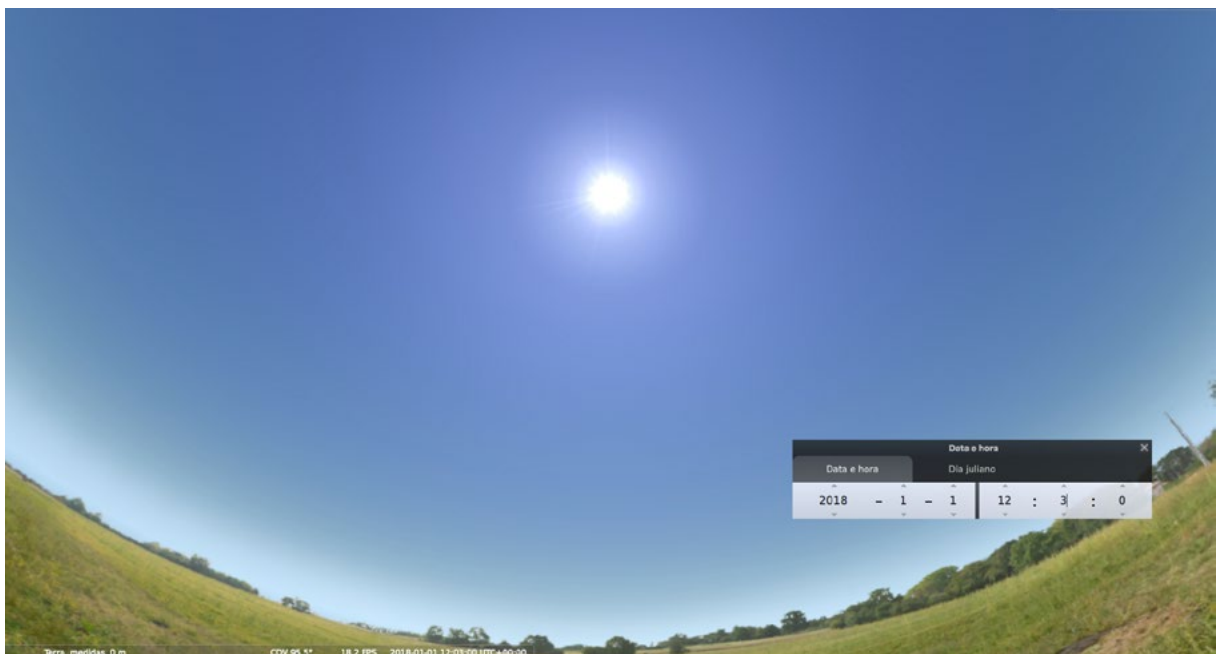
Para viabilizar esse projeto em que o foco principal é a Metrologia, optamos por registrar os instantes da passagem meridiana do Sol, estimando os instantes em que o Sol, em seu movimento diário, atinge a altura máxima usando o simulador *Stellarium*. Isso nos permite realizar essa experiência muito rapidamente e discutir alguns dos diversos fatores que podem interferir na qualidade das medidas.

2.1 Método de medição

A medição do dia solar verdadeiro por meio do software Stellarium consistiu na observação do movimento do Sol, empregando dois métodos diferentes:

- **Método 1:** neste método a observação é feita sem qualquer ferramenta auxiliar, ou seja, a "olho nu". O observador deve acompanhar diretamente a trajetória do Sol até que o astro atinja o ponto de altura máxima. O instante de tempo indicado pelo relógio do simulador é registrado como T_1 . A seguir, no dia seguinte, é registrado como T_2 o instante de tempo em que o Sol se encontra novamente na altura máxima. A diferença entre T_1 e T_2 nos fornece a duração de um dado "dia solar verdadeiro". A **Figura 1** mostra uma captura de tela de um instante de tempo sendo determinado por este método.

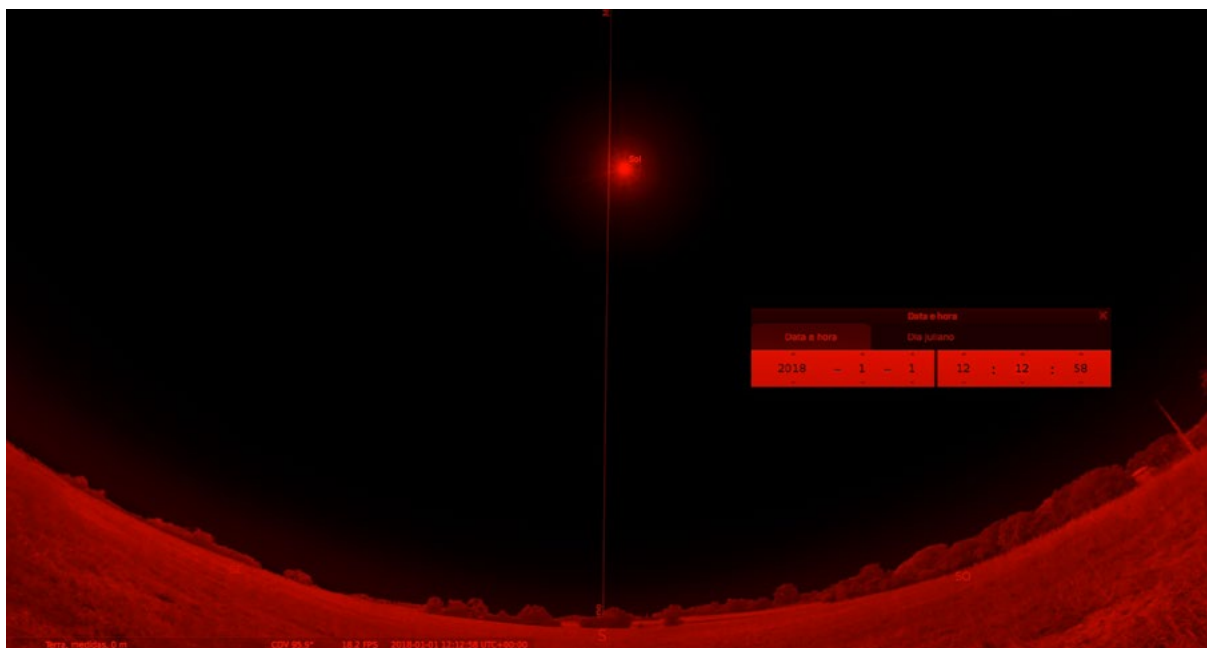
Figura 1 – Método 1, observação direta do Sol pelo observador. É possível observar na imagem o painel da base de tempo que controla a simulação sendo gerada pelo software



Fonte: Elaborado pelos autores

- **Método 2:** neste método, a observação é feita utilizando-se um filtro noturno para reduzir o brilho do Sol e, também, é empregada uma linha meridiana, com o intuito de dar maior precisão na estimativa do instante em que o astro cruza o meridiano local. Da mesma forma que no Método 1, os instantes T_1 e T_2 são determinados e a diferença entre eles nos dá o valor do "dia solar verdadeiro". A **Figura 2** mostra uma captura de tela de um instante de tempo sendo determinado por este método.

Figura 2 – Observação direta do Sol pelo simulador com filtro noturno e linha do meridiano



Fonte: Elaborado pelos autores

Para melhorar a confiabilidade das medidas devido ao observador, dois observadores realizaram as medidas para as mesmas datas. Isso resulta em duas medidas para cada instante, o que nos permite trabalhar com o valor médio, melhor que cada valor individual.

Em ambos os métodos, foram realizadas 24 pares de leituras ao longo do ano de 2018. Os pares adotados foram as datas entre o primeiro e o segundo dia de cada mês (01.01.2018 e 02.01.2018; 01.02.2018 e 02.02.2018, assim por diante, até 01.12.2018 e 02.12.2018). Em nossa análise temporal do comportamento do "dia solar verdadeiro" usamos o valor de cada par de instantes observado para datar a medida realizada, conforme calculado pela **Equação 1**.

$$IT = T_2 - T_1 + 24 \quad (1)$$

Onde,

IT = intervalo de tempo, em h

T_1 = instante de tempo do primeiro dia, em h

T_2 = instante de tempo do segundo dia consecutivo, em h

2.2 Incerteza de medição do intervalo de tempo

Para cada intervalo de tempo medido, tanto para a Método 1 quanto para a Método 2, foi estimada uma incerteza expandida a partir das componentes de incerteza consideradas no **Quadro 1**.

Quadro 1 – Componentes de incerteza consideradas

Componente de incerteza	Avaliação de Incerteza
Resolução do indicador de intervalo de tempo para a medida de T_1 e T_2	Tipo B
Incerteza da base de tempo do relógio	Tipo B
Variabilidade das leituras para estimar o instante em que o Sol atinge altura máxima	Tipo A

Fonte: Elaborado pelos autores

A incerteza tipo A é estimada pela análise estatística, enquanto a incerteza tipo B é estimada por outros meios. A distribuição estatística adotada para essas incertezas tipo B é do tipo retangular. Mais detalhes dessas definições podem ser obtidos no Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012).

É importante ressaltar que, pelo fato da medição ser realizada por meio da simulação do software *Stellarium*, diversas componentes de incerteza, que seriam relevantes em um ambiente real, desaparecem, tais como a dilatação do instrumento para medição da altura do Sol e efeitos atmosféricos. O fato da medida do intervalo de tempo ser uma medida relativa, outras componentes de incerteza, tais como, erros sistemáticos do observador e do relógio utilizado são considerados irrelevantes.

2.2.1 Incerteza devido à resolução

A resolução do indicador de intervalo de tempo é calculada como metade do último dígito significativo apresentado pelo medidor, resultando no valor de 0,05 s, ou 14×10^{-6} h.

2.2.2 Incerteza devido à base de tempo

A base de tempo ou *clock* de um medidor de intervalo de tempo, tal como um cronômetro, é considerada a parte mais importante do instrumento. Um *clock* nada mais é que um gerador que emite pulsos elétricos em uma frequência constante. A precisão de sua frequência varia de acordo com o tipo de elemento cujo *clock* é constituído. Quartzo, rubídio, césio ou hidrogênio são alguns exemplos de elementos empregados como base de tempo. Normalmente, equipamentos acessíveis à maior parte das pessoas (cronômetros, relógios eletrônicos, *lap top*, entre outros) possuem quartzo como base de tempo, cuja incerteza é da ordem de 1 ppm (parte por milhão) (HEWLETT-PACKARD, 1997). Como dito anteriormente, a calibração da base de tempo de um instrumento é realizada por meio de comparação com padrões cuja base de tempo possua menor incerteza que a do item sob calibração. Embora essa prática seja essencial para garantir a confiabilidade metrológica em um ambiente real, como o presente trabalho é baseado em um ambiente virtual, assume-se que o relógio do software possui uma base de tempo de quartzo e, portanto, o valor de sua incerteza é da ordem de 1 ppm.

2.2.3 Variabilidade das leituras

A variabilidade das leituras na estimativa do instante em que o Sol atinge a altura máxima foi calculada por meio do desvio padrão entre as leituras correspondentes obtidas por cada observador.

2.2.4 Determinação da incerteza expandida da medição

Segundo o Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012), a incerteza expandida da medição é o produto da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência (**Equação 2**).

$$U = k \cdot u_c \quad (2)$$

Onde,

k = fator de abrangência

u_c = incerteza padrão combinada, calculada conforme **Equação 3**

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (u_{x_i})^2 \right]} \quad (3)$$

Onde,

y = representa a equação do mensurando, ou seja, do intervalo de tempo

x_i = grandezas de entrada do mensurando (não correlacionadas)

u_{x_i} = incerteza padrão da grandeza de entrada

As derivadas parciais da **Equação 3** são chamadas de coeficiente de sensibilidade.

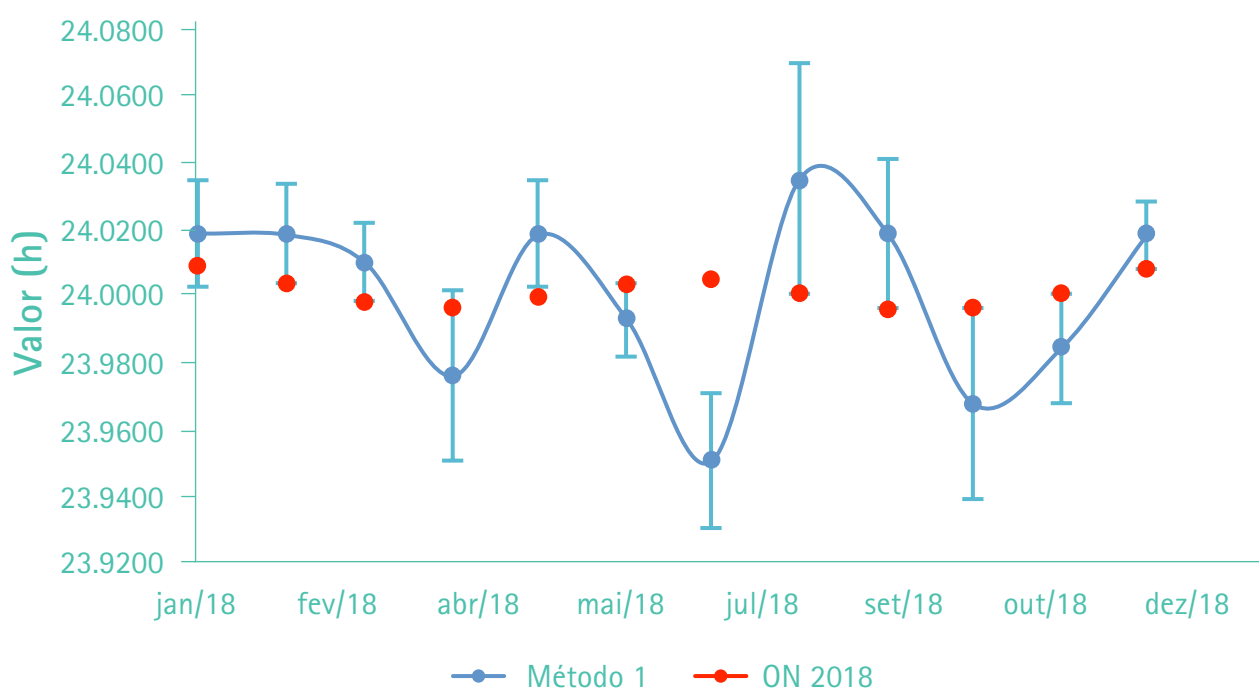
O fator de abrangência k foi obtido pela Tabela T de *Student* bicaudal, para um intervalo de confiança de 95,45 % e número de graus de liberdade calculados pela fórmula de Welch-Satterthwaite (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012).

3 Considerações Finais

Considerando o Método 1, foi encontrada uma considerável dificuldade para definir o instante em que o Sol se encontra no meridiano (altura máxima). Essa dificuldade deve-se, principalmente, ao fato de não termos referências no céu, a linha meridiana, por exemplo, e, também, devido à definição do centro da circunferência que representa o Sol.

O **Gráfico 1** apresenta a comparação entre os valores médios determinados para o “dia solar verdadeiro” ao longo do ano, com aqueles fornecidos no Anuário do Observatório Nacional (2018). As barras representam as incertezas calculadas para cada ponto, conforme descrito no item 2.2.

Gráfico 1 – Comparação entre os valores medidos de intervalo de tempo (em azul) e os obtidos do Anuário 2018 do Observatório Nacional (em vermelho)

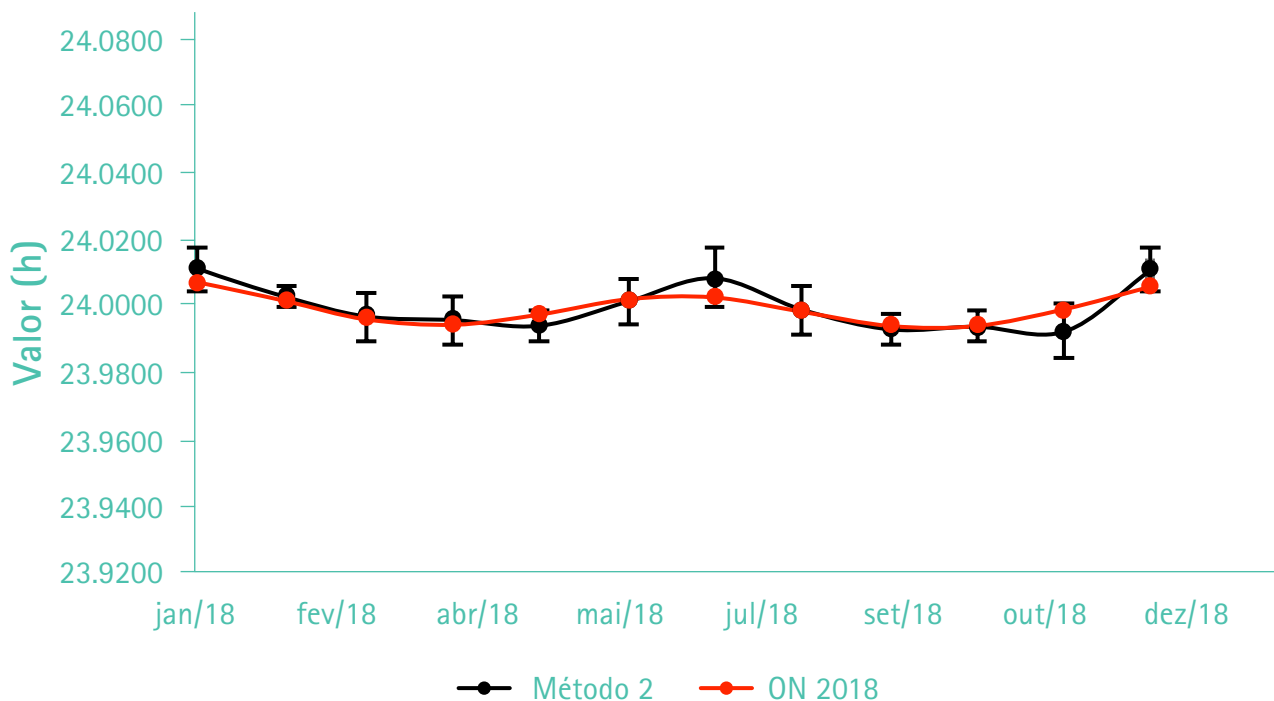


Fonte: Elaborado pelos autores com dados do Observatório Nacional (2018)

Nota: Erro máximo encontrado da ordem de 3 min e incerteza máxima da ordem de ± 2 min.

O **Gráfico 2** apresenta a comparação entre os valores obtidos da medição do dia solar verdadeiro pelo Método 2 com os valores obtidos pelo Anuário do Observatório Nacional (2018), para o mesmo período. As barras representam as incertezas calculadas para cada ponto, conforme descrito no item 2.2.

Gráfico 2 - Comparação entre intervalo de tempo medido (em preto) e obtido do Anuário 2018 do Observatório Nacional (em vermelho). Resultados obtidos com auxílio do filtro noturno e linha meridiana

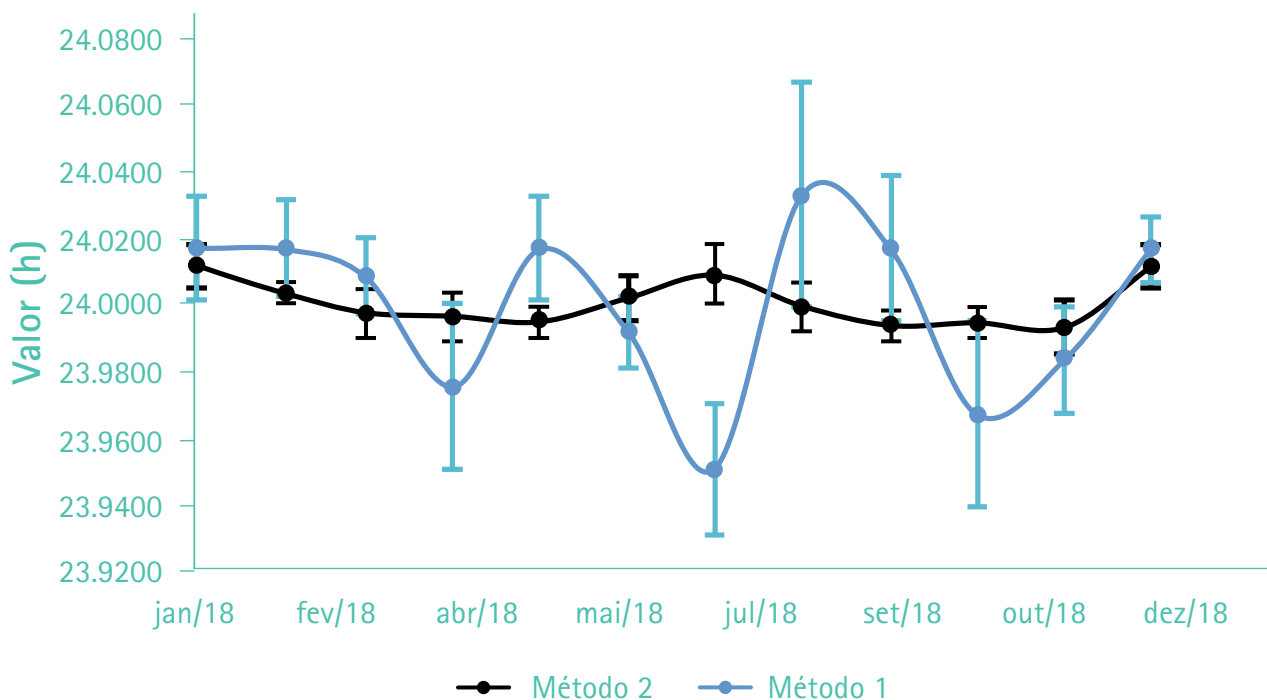


Fonte: Elaborado pelos autores com dados do Observatório Nacional (2018)

Nota: erro máximo encontrado é da ordem de 20 s e incerteza máxima da ordem de ± 40 s.

O **Gráfico 3** apresenta a comparação entre ambos os resultados obtidos tanto com o Método 1, quanto com o Método 2. As barras representam as incertezas calculadas para cada ponto, conforme descrito no item 2.2.

Gráfico 3 – Comparação entre os resultados obtidos. Método 1 em azul e Método 2 em preto



Fonte: Elaborado pelos autores

4 Discussão

Conforme o **Gráfico 3**, ao comparar os **Gráficos 1 e 2**, verifica-se que, tanto o filtro noturno quanto a linha do meridiano contribuíram, significativamente, na redução do erro e da incerteza de medição. No **Gráfico 2**, a diferença entre o intervalo de tempo medido e o obtido pelo Anuário do Observatório Nacional (2018) é muito menor (quase 10 vezes menor, no pior caso) que a diferença apresentada no **Gráfico 1**. Isso ocorreu porque, sem o meridiano e sem o filtro de modo noturno, havia uma grande dificuldade de perceber o movimento do Sol dentro de uma resolução da ordem de 1 s. De fato, o movimento era perceptível somente após algumas dezenas de segundos. Isso acarretou uma alta variabilidade nos resultados da Método 1, resultando em uma incerteza muito maior do que no Método 2.

Portanto, é possível concluir que, medir o intervalo de tempo por meio da observação da passagem do Sol sem qualquer auxílio adicional apresenta resultados úteis somente para aqueles que não exigem uma incerteza inferior a algumas unidades de minutos.

Adicionalmente, observa-se nos gráficos que há uma grande oscilação entre as leituras ao longo do ano. Essa oscilação possui amplitude da ordem de 47 s (baseado nos dados do OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2018). Isso ocorre, principalmente, por conta de dois fatores:

- a órbita da Terra ser uma elipse, fazendo com que o movimento angular da Terra em torno do Sol não seja constante, como descrito pela 2ª Lei de Kepler, que diz que áreas iguais são percorridas por intervalos de tempo iguais; e
- o plano equatorial da Terra não ser paralelo ao plano de sua órbita ao redor do Sol. O ângulo formado entre esses dois planos é da ordem de 23,5°.

Essa oscilação detectada em um experimento simples como este, sugere que a escala de tempo baseada no Sol verdadeiro não é uniforme e exatamente por essa razão foi abandonada como tal. Como alternativa, portanto, foi criado outro conceito de dia solar, chamado **dia solar médio**.

O **dia solar médio** é definido como o intervalo de tempo entre duas passagens meridianas consecutivas de um corpo celeste fictício comumente chamado "Sol médio". Esse corpo fictício, "Sol médio", percorre o equador celeste com uma velocidade igual à velocidade média do Sol verdadeiro na eclíptica. Por definição, o dia solar médio é dividido em 24 h e assim por diante. Desprezando-se as irregularidades na rotação da Terra, pode-se dizer que essa unidade de tempo é estável. Devido ao fato da excentricidade da órbita da Terra não ser muito grande, bem como a inclinação entre os movimentos de rotação e translação, o "Sol médio" está sempre muito perto do Sol verdadeiro, afastando-se no máximo ao redor de 15 min. Isso faz com que sua utilização não perturbe o nosso dia a dia comandado pelo Sol verdadeiro.

Os relógios atuais utilizam como referência uma base de tempo muito mais precisa e estável proveniente de padrões quânticos que, por sua vez, são calibrados de forma a assegurar a rastreabilidade metrológica (**Figura 3**). Por razões de continuidade e pelo fato de que nossas vidas estão intimamente relacionadas com o ciclo solar, os relógios que utilizamos são sincronizados com o "Sol médio", acrescido da correção devido ao fuso horário local. Embora regularmente exista um pequeno ajuste para que haja essa sincronização (chamado de segundo intercalar).

Figura 3 – Padrões de frequência de rubídio do Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT



Fonte: Elaborado pelos autores

5 Conclusão

Nos propusemos aqui a discutir a utilização de alguns conceitos metrológicos na medida de um fenômeno astronômico, movimentos diário e anual aparentes do Sol, ou, de um ponto de vista heliocêntrico, os movimentos de rotação e translação da Terra. O experimento utilizado consistiu em medir a duração do dia solar verdadeiro através de suas passagens meridianas simuladas pelo software Stellarium. As duas estratégias adotadas permitiram a detecção da variabilidade da unidade de tempo "dia solar verdadeiro" e mostraram que, com a utilização de algumas ferramentas fornecidas pelo próprio software, pode-se melhorar em muito a precisão das medidas. Na prática, isso deve sugerir que arranjos adequados, maiores cuidados e repetição da medida, são comportamentos mais do que desejáveis quando queremos precisão.

Embora não discutido no texto, nosso experimento mostra um caminho pouco usual de se estudar os movimentos da Terra, mais do que isso, mostra como podemos detectá-los mesmo, sem observá-los diretamente.

6 Referências

ALDER, K. **A medida de todas as coisas**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2003.

DETERMINING the earth's size. Disponível em: <<http://www.geo.hunter.cuny.edu/~jochen/gtech201/Lectures/Lec6concepts/Datums/Determining%20the%20earths%20size.htm>>. Acesso em: 21 set. 2018.

ERATOSTHENES greek scientist. In: **Encyclopaedia Britannica**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Eratosthenes>>. Acesso em: 21 set. 2018.

HEWLETT-PACKARD. **Application Note 200-3, Fundamentals of Time Interval Measurements**. [S.l.]: HP, 1997.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Centro de Capacitação. **Avaliação de dados de medição**: Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008. Duque de Caxias: Inmetro, 2012.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. **Anuário 2018. Seção C – Posições Aparentes do Sol, Lua e Planetas**. Rio de Janeiro: ON, 2018.

SANTIAGO, B., SALVIANO, A. **Astronomia Geodésica – Posicionamento pelas Estrelas**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 160 p.

STELLARIUM. **Faq**. Disponível em: <<https://github.com/Stellarium/stellarium/wiki/FAQ>>. Acesso em: 21 set. 2018.

DOI 10.34033/2526-5830-v3n11-70



Colapsibilidade de solos em um distrito de Porto Velho - Rondônia: impactos em Habitações Populares

Soil Collapsibility of a Porto Velho district: impacts on popular housings

Gisleine Coelho de Campos^{a*}, Felipe Schaeffer Santos^b

Resumo

O artigo discute os conceitos envolvidos na identificação dos solos colapsíveis e os problemas decorrentes da sua manifestação, chamando a atenção para a necessidade de identificação dos solos com potencial de ocorrência de colapso para que os novos projetos e construções possam já contemplar medidas de mitigação dos possíveis impactos nas obras civis. Recomendações de projeto são dadas, chamando-se a atenção para a necessidade de aprofundamento dos estudos na região norte do país, em particular no estado de Rondônia, onde grandes barragens estão implantadas, os índices pluviométricos são elevados e a infraestrutura ainda é precária.

Abstract

This paper presents the concepts involved in the identification of collapsible soils and the problems arising from their manifestation, with emphasis on the need for identification the soils with potential for collapse, so that new projects and constructions can already contemplate mitigation measures of possible impacts on civil works. Some project recommendations are given, highlighting the need to develop new studies in the northern region of Brazil, particularly in the state of Rondonia, where large dams are located, rainfall levels are high and infrastructure is still precarious.

a Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b BK Consultoria e Serviços Ltda., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: gisleine@ipt.br

Palavras-chave:

solo colapsível; patologia; projeto; Rondônia.

Keywords:

collapsible soil; damage; project; Rondonia.

1 Introdução

Solos colapsíveis são encontrados em diferentes partes do Brasil e do mundo. Um dos primeiros registros históricos do fenômeno foi o caso de uma escola ucraniana, no ano de 1938, que, após sofrer um incêndio, apresentou uma inclinação acentuada decorrente do colapso do solo pela inundação oriunda da água usada pelos bombeiros (CINTRA, 1998).

Em alguns casos, a manifestação do colapso pode se tornar um problema social, a exemplo das patologias identificadas em cerca de 4.000 edificações na cidade de Araraquara, no ano de 1995, em decorrência de chuvas intensas que resultaram em um acúmulo de 660 mm após 10 dias de chuvas. Outro caso, diretamente associado à precipitação pluviométrica elevada, é o da cidade de Terra Roxa, no Paraná, que registrou sérios danos em edificações e foi, inicialmente, associado ao enchimento do reservatório da Hidrelétrica de Itaipu. As investigações, no entanto, mostraram que ocorreu o colapso da camada superficial do solo em decorrência do seu encharcamento, tendo afetado, mais fortemente, as edificações com fundações diretas. Na cidade de Ilha Solteira, em São Paulo, estudos acadêmicos resultaram na primeira carta de risco de colapso do país, identificando áreas com riscos naturais e induzidos por fatores externos (OLIVEIRA, 2002), orientando melhor o uso e ocupação do solo.

Assim, sejam ocorrências pontuais ou regionais, o entendimento do fenômeno de colapso se faz necessário para que os novos projetos e construções apresentem soluções de engenharia capazes de minimizar os impactos negativos decorrentes da colapsibilidade dos solos.

Este artigo apresenta uma revisão conceitual do problema de colapso dos solos e fomenta a discussão de ocorrência desse fenômeno no estado de Rondônia, onde os dados ainda são escassos, mas os problemas sociais são de grande relevância.

2 Definição

Solos colapsíveis podem ser definidos como solos não saturados, com baixo teor de umidade e elevado índice de vazios, que podem sofrer uma espécie de colapso de sua estrutura em consequência do acréscimo do grau de saturação do solo, seja por razão de infiltração de águas pluviais, fissuras em tubulações enterradas, ascensão do lençol freático e, até mesmo, rupturas de fossas. Segundo Cintra e Aoki (2009) é o aumento do teor de umidade que produz o fenômeno de colapsibilidade, quando a carga externa atinge um valor mínimo, caso a caso, definido como carga de colapso. Cintra (1998) relata a existência de solos que entram em colapso apenas pelo peso próprio da camada, mas essa situação não é verificada nos sedimentos cenozóicos predominantes no território brasileiro.

A inundação do solo anula a sucção matricial (coesão aparente), reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo e afetando a estabilidade de sua estrutura. Portanto, o requisito duplo para que as estruturas edificadas sobre solos colapsíveis sofram recalques de colapso é o aumento do teor de umidade até a inundação do solo e a atuação nas fundações, de uma carga no mínimo igual à carga de colapso.

A carga de colapso é, portanto, um condicionante do projeto. Assim sendo, os solos potencialmente colapsíveis podem não sofrer colapso por razão da baixa umidade ou carga momentâneas, o que significa que em uma mesma região   possível a ocorrência de edificações com patologias diversas em decorrência do colapso do solo e outras sem quaisquer sinais de patologias, em função dos diferentes graus de saturação do solo e das tipologias das edificações e fundações.

Em geral, o colapso produz recalques diferenciais acentuados e manifesta-se em um curto intervalo de tempo, diferindo dos recalques decorrentes do processo de adensamento do solo. Ademais, o processo de adensamento é caracterizado pela expulsão de água dos vazios do solo, enquanto que o processo de colapso é caracterizado pela expulsão de ar.

A característica de colapsibilidade de um solo deve ser verificada por meio de ensaios de laboratório (ensaios edométricos) ou de campo (provas de carga) e, muitas vezes, é desconhecida pelos projetistas e consultores de habitações populares que fazem uso apenas de simples cavas para investigar o terreno de fundação. A NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), no capítulo 7.5.3, destaca que deve ser considerada a possibilidade de encharcamento do solo no projeto e no método construtivo.

3 Procedimento metodológico

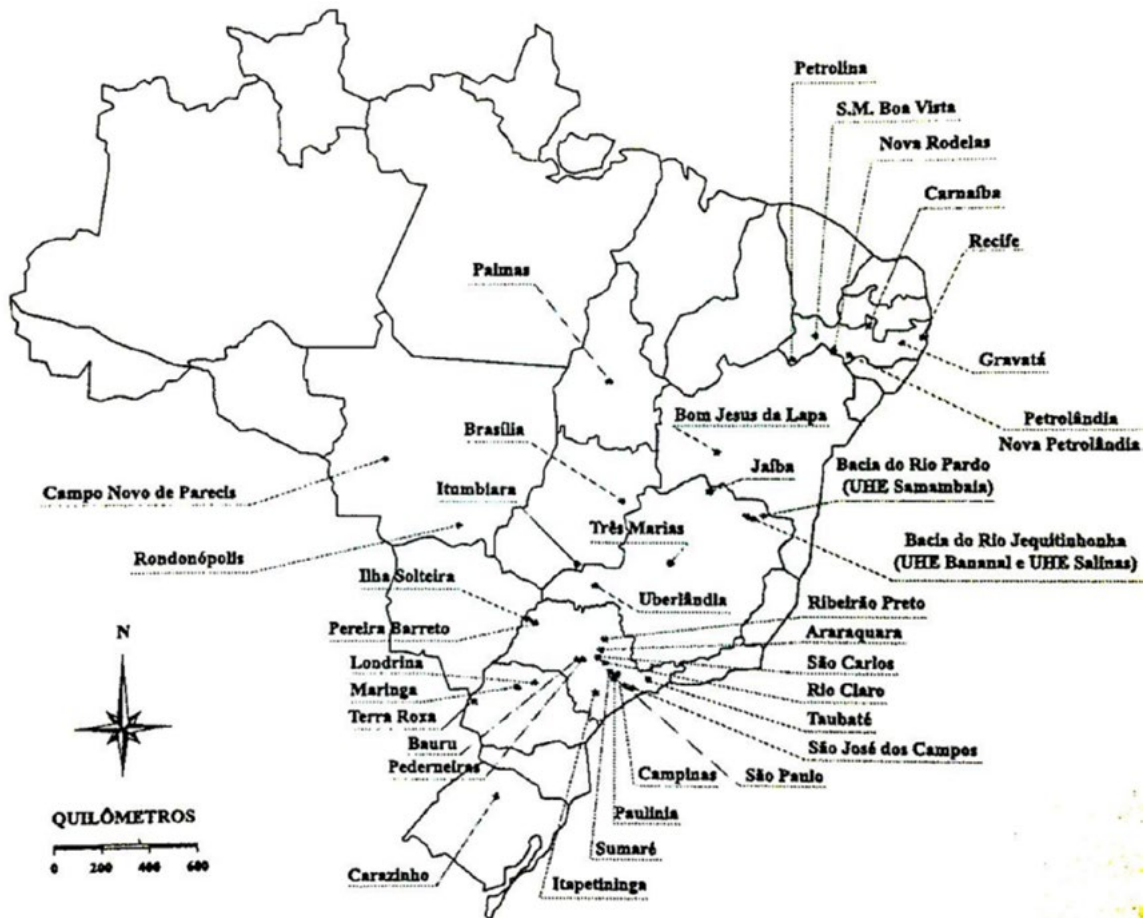
O presente artigo foi elaborado a partir de uma pesquisa de campo que tinha como principal objetivo a identificação das prováveis causas de patologias em edificações populares no distrito de Jacy-Paraná – RO. Para tanto, foi feito, em campo, o levantamento das características das edificações e das características geológico-geotécnicas do local e, na sequência, por meio de ensaios laboratoriais e estudos bibliográficos, buscou-se identificar os principais fatores geradores dos problemas encontrados. Destaca-se no presente trabalho um dos fatores intervenientes no desempenho deficiente das edificações: a colapsibilidade dos solos, característica essa, até então, desconhecida no local e que ainda carece de estudos mais aprofundados e de maior abrangência.

3.1 Solos colapsíveis no Brasil

Os condicionantes para a ocorrência de solos colapsíveis podem ser naturais, como a presença de solos que apresentam recalques importantes quando saturados e sujeitos às sobrecargas, ou antrópicos, tais como a existência de obras que provocam a saturação do solo ou mesmo o rompimento de tubulações. As regiões de clima tropical apresentam condições favoráveis ao desenvolvimento de solos potencialmente colapsíveis, seja pela lixiviação dos finos dos horizontes superficiais nas regiões onde há alteração de estações secas e de precipitações intensas, seja pela deficiência de umidade dos solos que se desenvolvem em regiões áridas ou semiáridas (FREITAS, 2016).

Diversos estudos apontam a existência de solos colapsíveis em várias regiões do Brasil. Cintra e Aoki (2009) apresentam o mapa da **Figura 1**, atualizado até 2009, com a indicação de diferentes municípios onde há o registro da presença de solos colapsíveis. O mapa sugere uma concentração de ocorrências nas regiões sul e sudeste e a ausência de casos na região norte do país.

Figura 1 – Mapa de ocorrências de solo colapsível no Brasil



Fonte: Cintra (2009, p. 14)

No entanto, há que se destacar que a maior parte dos estudos publicados, envolvendo a realização de ensaios de campo e de laboratório, está concentrada nas regiões sul e sudeste, dando a falsa impressão da inexistência desse problema no norte do país. Estudos mais recentes sugerem problemas similares em outros municípios, sendo destacados, neste trabalho, as ocorrências no estado de Rondônia, no qual grandes obras de infraestrutura foram implantadas na última década.

O distrito de Jacy-Paraná fica a 87 km de Porto Velho, capital do estado de Rondônia, na BR-364, sentido Acre. É o distrito mais antigo de Porto Velho; possui como parte de sua história a construção da Estrada de Ferro Madeira Mamoré, além de possuir belas riquezas naturais como o rio Jacy-Paraná e as praias no verão, com a seca do rio.

A construção das Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau no Rio Madeira, próximas ao distrito, ocasionou diversos efeitos, dentre os quais o grande crescimento da população em um curto intervalo de tempo (pico de ocupação entre os anos de 2008 e 2012), que não foi acompanhado pelo crescimento das redes de infraestrutura urbana.

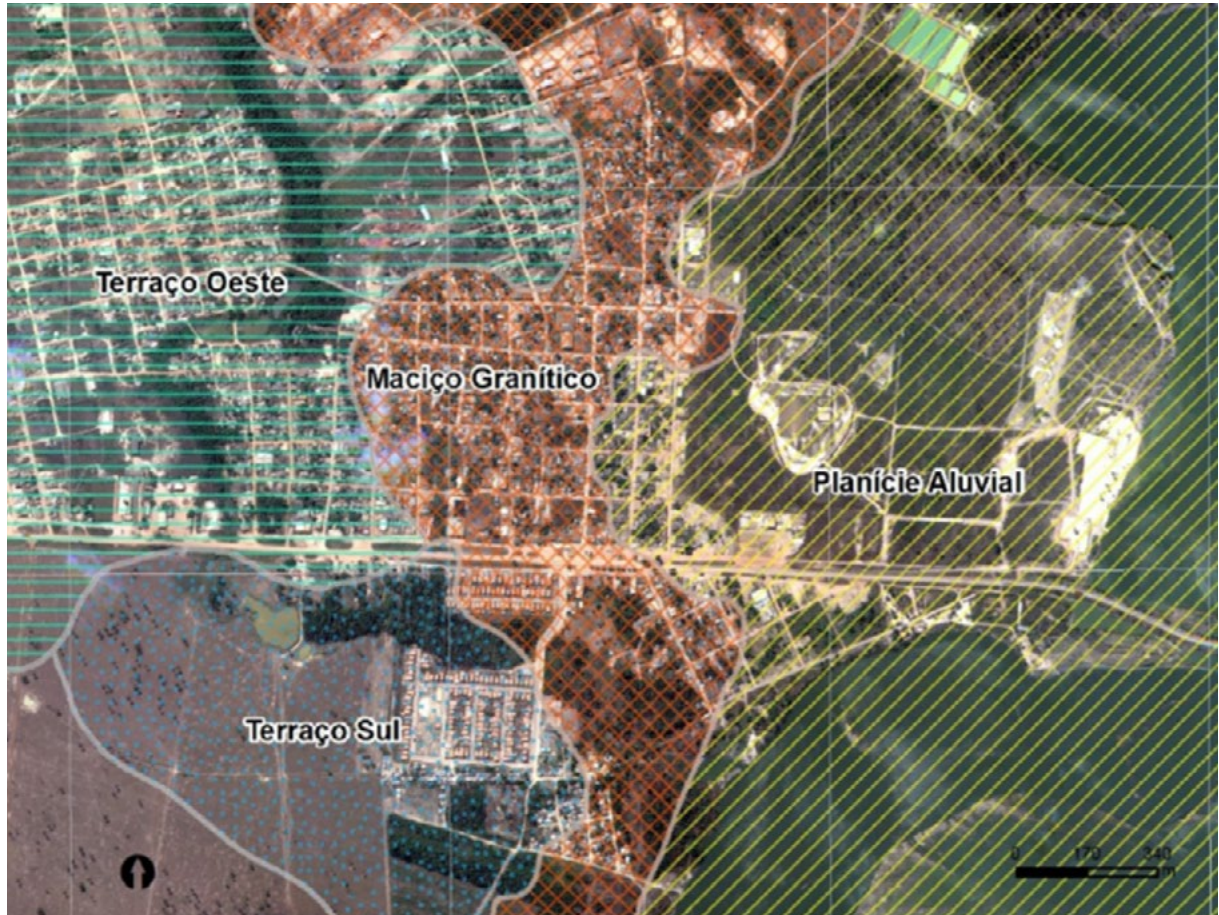
Sondagens a trado e poços de investigação geológico-geotécnica executados em diversos pontos do distrito permitem identificar o solo local com duas origens distintas:

- i. transportados, constituindo os depósitos aluvionares e coluvionares; e
- ii. residuais, constituindo os solos provenientes de alteração da rocha granítica.

Grande parte do material aflorante no município de Jacy-Paraná é composta por sedimentos e terraços de origem colúvio-aluvionar, divididos em três compartimentações geológico-geomorfológicas principais: planície aluvial, terraço sul e terraço oeste. Como substrato desses depósitos sedimentares ocorre rocha granítica e produtos de sua alteração (solos residuais) que, por vezes, aparecem expostos em superfície, sobretudo na região central do distrito (**Figura 2**). Grande parte desses solos superficiais encontra-se com processo de laterização instalado, apresentando concreções de argila cimentadas por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Com base na literatura especializada, a ocorrência de solos colapsíveis está intimamente correlacionada com os processos intempéricos que atuaram nos horizontes do solo ao longo do tempo. Portanto, a colapsibilidade do solo pode se manifestar tanto em solos transportados como em residuais, de origem sedimentar ou cristalina, desde que esses sejam parcialmente lixiviados e apresentem alto índice de vazios em sua condição não saturada.

Figura 2 – Compartimentação geomorfológica do distrito

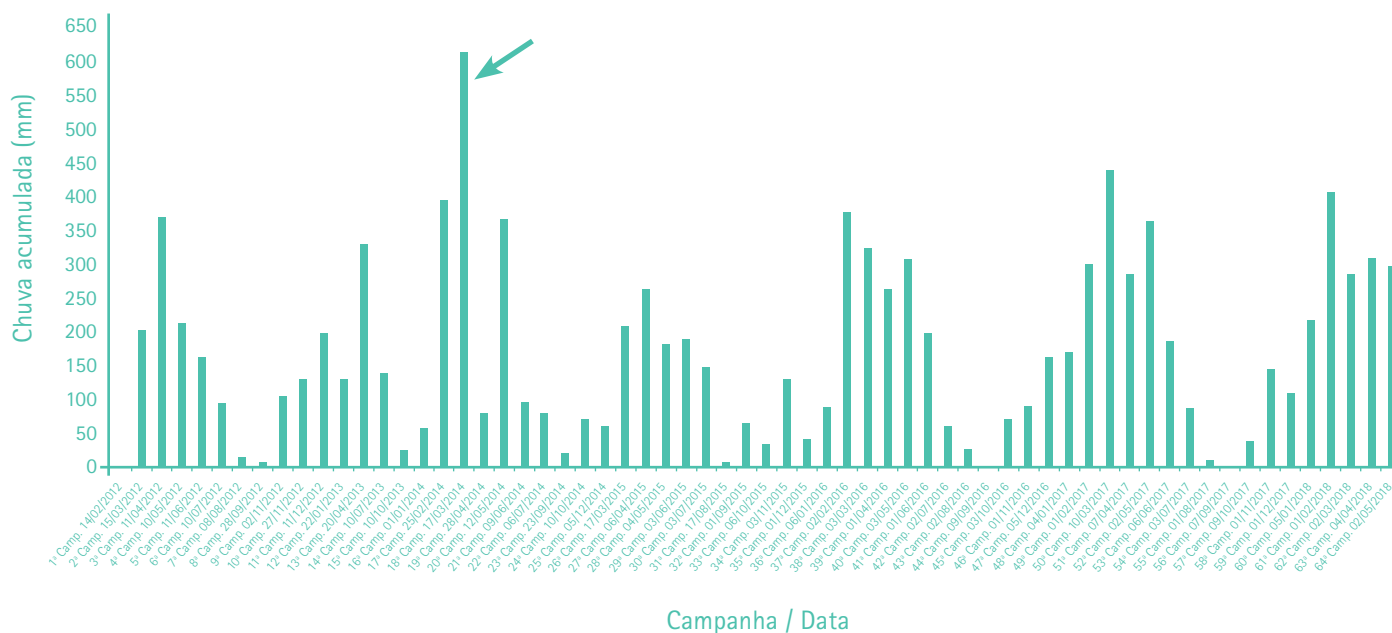


Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2018, p. 67).

Em termos pluviométricos, observa-se em Jacy-Paraná índice similar ao descrito no item 1 para a cidade de Araraquara, SP, associado à grande cheia do Rio Madeira no ano de 2014, como indica a seta verde no histograma da **Figura 3**.

Reitera-se que o problema geotécnico de colapsibilidade é pouco catalogado no estado de Rondônia, sendo que a literatura técnica disponível até 2010 não mencionava, categoricamente, danos em construções vinculados a subsidências em solos colapsíveis (ADAMY, 2010). Nesse estado, até então, os principais riscos geológicos estavam associados aos fenômenos de deslizamentos, ravinas, voçorocas, assoreamentos, dolinas e ao fenômeno de "terras caídas" (ADAMY, 2010). Desse modo, a constatação de solos colapsíveis neste trabalho fomenta e alerta a comunidade técnica sobre a possível ocorrência desse problema geotécnico no estado de Rondônia.

Figura 3 – Distribuição mensal da precipitação no distrito Jacy-Paraná



Fonte: adaptado do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2018, p. 10)

3.2 Características das fundações das edificações populares

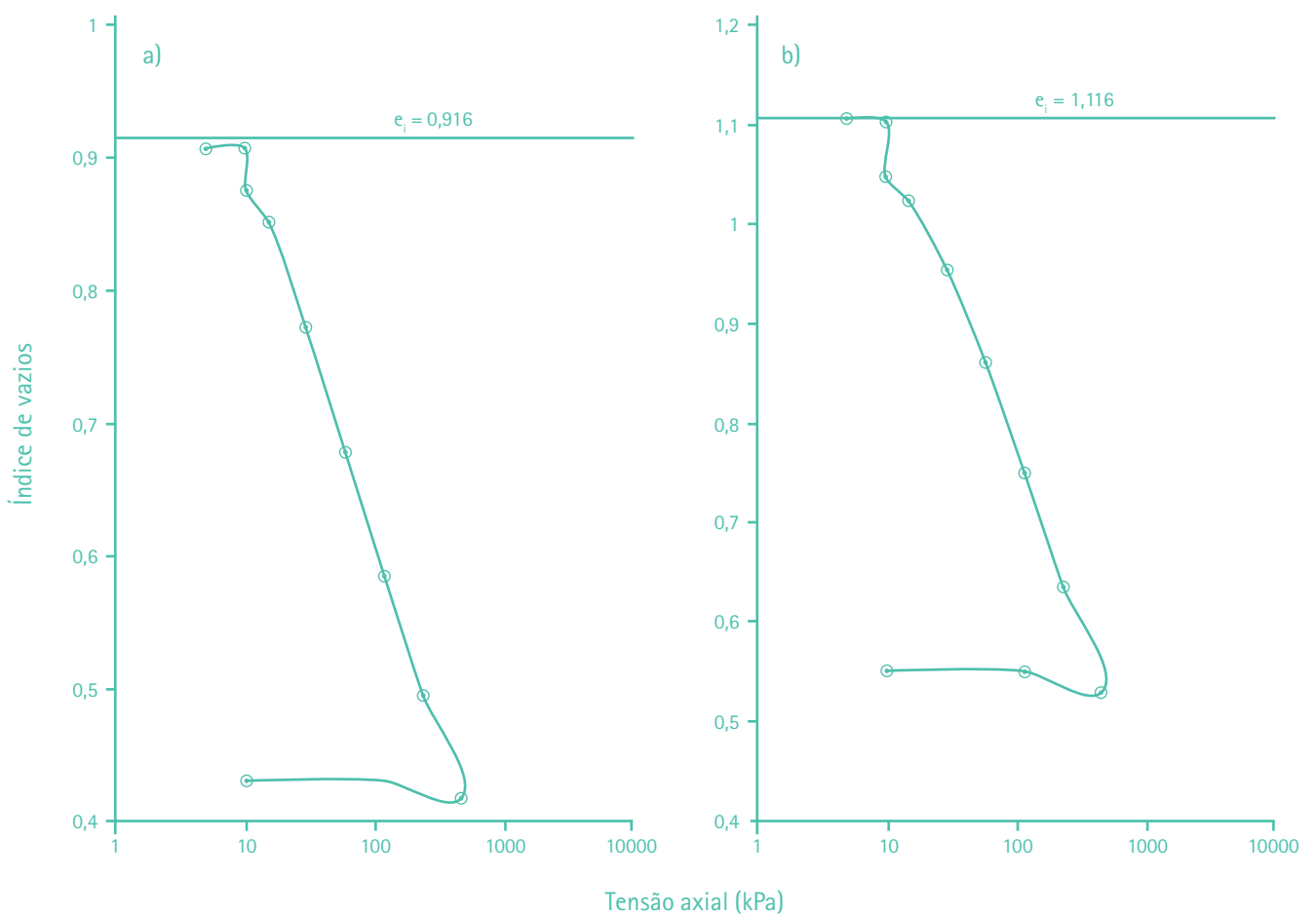
Poços de investigação abertos em edificações de diferentes tipologias situadas no distrito de Jacy-Paraná permitiram identificar a presença de três situações típicas, a saber:

- i. edificações sem elementos de fundações específicos, cuja estrutura se encontra, diretamente, apoiada sobre blocos de alvenaria apoiados na camada superficial do terreno. Nos casos em que a camada superficial do terreno apresenta capacidade de suporte compatível com o carregamento oriundo da edificação e não há problemas erosivos causados pelo fluxo das águas superficiais, as edificações apresentam-se estáveis e sem patologias de fundações (há, em alguns casos, patologias decorrentes do sistema construtivo empregado);
- ii. edificações apoiadas sobre radiers de concreto que transferem, diretamente, ao solo superficial todo o carregamento das estruturas. Essa solução de engenharia requer que a camada superficial seja, adequadamente, compactada e que os sistemas de captação e drenagem superficiais sejam eficazes; apresenta bom desempenho quando a resistência do solo cresce com o aumento da profundidade; e
- iii. edificações apoiadas sobre elementos de fundação rasos, tais como vigas, brocas e pilaretes. De forma geral, essas edificações apresentam o melhor desempenho, em termos de fundações, pois transferem o carregamento das estruturas para camadas de maior resistência do solo, em pequena

profundidade e não diretamente afetadas pelo fluxo superficial das águas. No entanto, esse tipo de solução fica limitado pela posição do afloramento rochoso e, dada a distribuição errática com que esse surge em subsuperfície, pode resultar em elementos de diferentes dimensões e comportamentos em uma mesma edificação.

Com relação ao tipo de solo onde essas fundações se apoiam, pode-se observar o predomínio de argila arenosa, com pouca porcentagem da fração silte. Em um poço de investigação geotécnica aberto no Terraço Oeste (**Figura 2**), foram coletadas duas amostras indeformadas da camada superficial do solo, as quais, submetidas a ensaios edométricos simples, apontaram a ocorrência de colapso da ordem de 2 % quando inundadas a uma tensão de 10 kPa (**Figura 4**), tensão essa correspondente à média dos carregamentos transmitidos ao solo pelas habitações que predominam no local.

Figura 4 – Ensaios edométricos em amostras indeformadas coletadas no Terraço Oeste. a) amostra coletada entre 1 m e 1,2 m; b) amostra coletada entre 1,9 m e 2,1 m.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2019, Apêndice D)

O nível d'água na região onde as amostras indeformadas foram coletadas encontra-se, aproximadamente, a 9,15 m de profundidade, portanto, muito abaixo da posição das coletas. Contudo, a profundidade do nível d'água na região do distrito de Jacy-Paraná apresenta certa oscilação ao longo do tempo devido, sobretudo, à infiltração das águas da chuva e à cota do topo rochoso granítico impermeável.

3.3 Patologias em edificações populares

Em campo, geralmente, as feições indicativas predominantes da ocorrência de colapsibilidade dos solos são a inclinação de edificações (recalques diferenciais), desnivelamento acentuado entre as edificações e os terrenos adjacentes, trincas em terrenos, pavimentos e edificações e, também, afundamentos e formação de cavidades. Cabe destacar que algumas dessas patologias também podem ser originadas por deficiências de projeto e de metodologia construtiva sendo, portanto, essencial um estudo abrangente das características construtivas e geológico-geotécnicas do local para a correta identificação das causas das patologias.

Particularmente, no Distrito de Jacy-Paraná, vistorias recentes no âmbito do projeto de pesquisa mencionado apontaram algumas evidências com características típicas de colapsibilidade dos solos, a saber:

- em áreas externas das edificações, verificou-se em algumas unidades a existência de segmentos de muros de divisa em processo de adernamento, resultantes da perda de resistência do solo superficial em decorrência do seu encharcamento. De forma generalizada, também foram observados processos de erosão do solo de base, particularmente, no contato do terreno com as bordas das fundações em radier ou em blocos de alvenaria (**Figura 5**), à vista de não existir impermeabilização da superfície e nem sistemas adequados de captação e drenagem das águas pluviais nos locais;

Figura 5 – Canaletas de drenagem no entorno do radier



Fonte: arquivo IPT

- em áreas internas, há a presença de trincas e fissuras em painéis de alvenaria e afundamentos de pisos (**Figura 6**), indicativas da ocorrência de recalques diferenciais da camada superficial do solo. Outras patologias, como descolamento entre painéis e deslocamentos de pisos também são frequentes, mas estão diretamente associadas à metodologia construtiva e à qualidade dos materiais empregados e não ao colapso dos solos de apoio;

Figura 6 – Abertura de trincas em pisos e alvenarias



Fonte: arquivo IPT

- nas vias de acesso, a maior parte não pavimentada, observa-se intenso processo erosivo e acúmulo de águas pluviais (**Figura 7**). O acúmulo de águas contribui para o encharcamento do solo e, nos locais onde o solo apresenta potencial de colapso, pode representar o gatilho para a ocorrência de recalques abruptos.

Figura 7 – Erosões em vias de acesso às edificações



Fonte: arquivo IPT

Cabe aqui destacar que estudos feitos por Réthati (1961 apud CINTRA, 1998), na Hungria, indicam dados estatísticos que mostram que a infiltração de água é a causa mais frequente de danos em edificações apoiadas em fundações diretas sobre aterros. Segundo o autor, 36 % dos casos estudados tem origem na quebra de tubulações de esgoto; 25 % decorrem das águas pluviais vindas dos telhados e 15 % das águas pluviais. O percentual restante se divide entre vazamentos nas tubulações de águas e entupimentos de redes. A pesquisa desenvolvida no estado de Rondônia parece corroborar com esses resultados: no local não há redes de esgotos e nem sistemas de captação das águas pluviais, sendo notório o efeito maléfico dos vazamentos das fossas, da queda abrupta das águas dos telhados e das infiltrações nos terrenos não pavimentados para a geração e agravamento das patologias presentes nas edificações.

4 Proposição de soluções de engenharia

Na fase de projeto das edificações populares, o primeiro item de atenção refere-se aos dados das sondagens, em particular à data de sua realização, pois o posicionamento do lençol freático e, por conseguinte, as tensões de sucção, variam com o índice pluviométrico local. A execução dos ensaios de campo (prova de carga, por exemplo) pode, quando possível, ser feita com e sem inundação prévia, de forma a refletir os efeitos que um aumento do teor de umidade terá sobre o solo de apoio das edificações.

Conhecidas as características do solo, é preciso atentar para a necessidade de projetos específicos de drenagem das vias de acesso e também dos terrenos (lotes), visando promover a correta captação e destinação das águas pluviais, evitando-se a saturação do solo por infiltração, com a consequente perda da parcela de resistência aparente devida à sucção e aumento do teor de umidade do material. Recomenda-se ainda impermeabilizar a área perimetral das edificações, evitando-se infiltrações e carreamento de partículas sólidas sob os elementos de fundação direta.

Medidas de reforço ou melhoria do solo, que minimizem ou eliminem os efeitos do colapso do solo, também se fazem necessárias. Essas medidas variam conforme a estrutura a ser construída, pois impactam nos custos e prazos das obras. Dados da bibliografia referenciada indicam que, ao compactar o solo na energia do Proctor Normal, lhe conferindo uma maior interação entre as partículas, com redução do índice de vazios, há uma minimização no potencial de colapso. O melhoramento do solo por compactação também aumenta sua capacidade de carga, contribuindo para a viabilidade de execução de uma fundação superficial, que é mais econômica que uma fundação profunda e, por isso, geralmente, empregada nas habitações populares.

5 Conclusões

A ocorrência de solos potencialmente colapsíveis está intimamente relacionada aos processos de intemperismo, sobretudo em ambientes tropicais onde os processos de lixiviação são acentuados devido à sazonalidade e aos elevados índices pluviométricos, favorecendo o carreamento de finos, a formação de agregados e o aumento de índices de vazios. Essa problemática ocorre de maneira generalizada nos diversos tipos de solos, tanto nos transportados como nos residuais.

A manifestação da colapsibilidade do solo se dá em decorrência de dois fatores principais:

- i. aumento do teor de umidade; e
- ii. atingimento da carga de colapso.

Para tanto, o correto dimensionamento do projeto de fundações diretas para habitações populares deve ser feito conhecendo-se esses parâmetros do solo, por meio de sondagens diretas e ensaios de campo e de laboratório.

Dentre as medidas de reforço ou melhoria dos solos potencialmente colapsíveis, a literatura especializada elenca: a substituição do solo natural; a pré-inundação; a inundação controlada; a estabilização química e/ou térmica; a execução de colunas de deslocamento e, por fim, a compactação controlada segundo parâmetros técnicos, destacada neste trabalho por sua simplicidade e larga aplicação na construção de habitações populares. A definição do método de reforço ou melhoria deve ser conduzida levando-se em consideração o prazo, a onerosidade e a tipologia das fundações e edificações a serem construídas ou reparadas.

Enfatiza-se, ainda, a necessidade de projetos específicos de drenagem das vias de acesso e, também, dos terrenos (lotes), visando promover a correta captação e destinação das águas pluviais, evitando a saturação do solo por infiltração.

O problema geotécnico de colapsibilidade de solos ocorre, amplamente, no território brasileiro, mas a escassez de ensaios laboratoriais e de campo mascara a amplitude dessa problemática, como por exemplo, na região norte do país, especificamente no estado de Rondônia. Portanto, existe a necessidade de aprofundamento de estudos na região, onde grandes barragens estão implantadas, os índices pluviométricos são elevados e a infraestrutura, ainda, é bastante precária. A divulgação do presente estudo, embora restrito a um distrito e com poucos ensaios laboratoriais, visa fomentar a discussão e estimular a pesquisa do comportamento dos solos regionais de Rondônia, assim como já feito, largamente, nos estados do sul e sudeste do país.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Santo Antonio Energia – Sustentabilidade, em particular ao Eng. Ricardo Marques, pelo apoio na realização dos trabalhos de campo e laboratório.

7 Referências

ADAMY, A. (Org.). **Geodiversidade do estado de Rondônia**. Porto Velho: CPRM, 2010. 337 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 91 p.

CINTRA, J. C. A. **Fundações em solos colapsíveis**. São Carlos: EESC-USP, 1998. 106 p.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de fundações em solos colapsíveis**. São Carlos: EESC-USP, 2009. 99 p.

FREITAS, M. C. **Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado**. 2016. 201 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. **Avaliação das atuais condições estruturais e de fundações de edificações localizadas no distrito de Jacy-Paraná, Porto Velho-RO**. São Paulo: IPT/CT-Obras, 2019. v. 1 (Relatório Técnico nº 155.534).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. **Apoio tecnológico para avaliação dos efeitos decorrentes do enchimento do reservatório da Hidrelétrica Santo Antônio sobre o lençol freático no distrito de Jacy-Paraná, Porto Velho, RO**. São Paulo: IPT/CT-Geo, 2018. 212 p. (Relatório Técnico nº 154.613).

OLIVEIRA, C. M. G. **Carta de risco de colapso de solos para a área urbana do município de Ilha Solteira – SP**. 2002. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Ilha Solteira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2002.

DOI 10.34033/2526-5830-v3n11-74



Análise de falhas - um dever do IPT

*Failure Analysis - a duty of IPT*Hamilton Lelis Ito^{a*}, Jonas de Carvalho Gomes^a

Resumo

Desde o início dos anos 1900, tempo em que o IPT adquiriu o seu primeiro microscópio óptico para metalografia, a análise de falhas tem sido um dever que o IPT nunca deixou de cumprir. O termo análise de falhas tem um significado amplo, o objetivo agora, entretanto, é restringir o significado às análises realizadas visando à determinação das causas de fraturas ou trincas em componentes mecânicos e estruturas. Casos relacionados com perda da estabilidade de estruturas devido às deformações, ao desgaste e à corrosão generalizada, que também constituem falhas, não serão tratados neste artigo. Os engenheiros, normalmente, tentam projetar máquinas, motores e todo tipo de componentes mecânicos e estruturas para serem à prova de falhas. Para isso, a seleção do material, o processo de fabricação, a montagem e as recomendações de manutenção são cuidadosamente especificadas. A obediência a essas especificações, normalmente, previne falhas. Contudo, se um ou mais dos critérios especificados não for obedecido a possibilidade de ocorrência de falha aumenta. Além disso, há situações em que mesmo que todas as especificações tenham sido obedecidas, conforme prescritas, uma peça pode falhar e desencadear um acidente. Este artigo apresenta alguns casos de análise de falhas realizadas pelo IPT e as tendências para o futuro de aplicar técnicas de monitoramento a componentes mecânicos e estruturas, capazes de alertar possíveis falhas antes de elas ocorrerem.

Abstract

Since the early 1900's, the time when IPT acquired its first optical microscope for metallography, failure analysis has been a duty whose accomplishments have never stopped. 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 that are also considered failures will not be treated in this article. Engineers normally try to design machines, engines and

^a Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: hlito@ipt.br

Palavras-chave:

fratura, fadiga, sobrecarga, equilíbrio líquido/gás, calço hidráulico.

Keywords:

failure; fracture; fatigue; overloading, liquid/gas equilibrium, hydraulic block.

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 appliance to these specifications normally prevents failures. However, if one or more of the items specified above is not obeyed, the probability of failure increases. Furthermore, there are situations in which, even though all the specifications are followed by the book, a part may fail and an accident ensue. Some selected failure analysis performed by IPT are presented in this paper. The trends for the future are to apply monitoring techniques to mechanical components and structures, capable of alerting possible failures before they occur.

1 Introdução

Desde 1907, quando o IPT adquiriu seu primeiro microscópio metalográfico, a análise de falhas tem sido um dever do qual o IPT nunca se esquivou. O termo análise de falhas tem um significado amplo, mas aqui ele será restrito às análises realizadas em componentes mecânicos e estruturas fraturados ou trincados com o objetivo de determinar as causas das falhas. Os engenheiros, normalmente, se empenham em projetar máquinas, motores e todo o tipo de componentes mecânicos e estruturas, para serem à prova de falhas durante o seu período de vida esperado. Para tanto, o cálculo de tensões, a seleção de materiais, os processos de manufatura, montagem e recomendações de manutenção são, cuidadosamente, especificados conforme normas e critérios de projeto que são revistos, continuamente. Quando ocorrem falhas não é incomum que melhorias em novas edições de normas, códigos de construção e guias de operação e de manutenção ocorram como resultados das análises de falhas. A obediência a essas regras não apenas proporciona uma operação mais segura, mas, normalmente, evita falhas. Contudo, se um ou mais dos critérios especificados não for obedecido, a possibilidade de falha aumenta.

Há situações em que, mesmo que todas as especificações e recomendações tenham sido obedecidas conforme a prescrição, podem ocorrer falhas e resultar em acidentes. Algumas vezes, o projeto está correto, mas durante a montagem ou a construção são adotadas algumas simplificações ou, por exemplo, alguma ação mal dirigida é tomada por trabalhadores sem treinamento apropriado, o que pode introduzir defeitos tais como: abertura de arco em estruturas ou peças rotativas, desalinhamento na montagem, desobediência ao desenho na manufatura e outros, ameaçando o desempenho do equipamento.

Problemas como esses não aparecem, necessariamente, na partida ou nas primeiras horas de operação, mas após um período maior de funcionamento do equipamento em regime permanente. Outras vezes, um pequeno incidente pode causar um dano, visualmente, imperceptível, como uma depressão sobre uma superfície, originalmente, uniforme ou um mini ou micro dobramento em uma peça, originalmente, reta sujeita a uma tensão pulsante de tração, por exemplo. Esse tipo de dano muda tensões locais de modo que o componente que estava projetado, apropriadamente, para resistir à carga de operação fica susceptível a desenvolver uma trinca de fadiga, mesmo trabalhando de acordo com o carregamento esperado.

Algumas vezes, efeitos inesperados do ambiente podem se tornar um grande problema. Um dano na vedação de uma bomba que cause um pequeno vazamento pode levar um eixo a sofrer corrosão por pite, por exemplo. O pite pode se tornar um concentrador de tensão capaz de iniciar uma trinca de corrosão sob tensão ou de corrosão fadiga.

Desalinhamentos em eixos, originalmente alinhados, causados por pequenos movimentos do solo podem provocar deslocamentos na fundação de equipamentos pesados, como redutores acoplados a motores capazes de introduzir cargas de flexão nos eixos não previstas no projeto. Se os eixos forem projetados para resistir a um torque severo (quando a carga mais importante é a de torção) e a uma flexão desprezível, pode ocorrer fratura em consequência de flexão rotativa devido ao desalinhamento. Nesses casos, o desalinhamento impõe um momento fletor não previsto no projeto. Muitas vezes, o cuidado apropriado com o projeto da fundação e o uso de acoplamentos elásticos entre o eixo do motor e o eixo da caixa de redução podem resolver o problema.

Equipamentos para trabalho em alta temperatura que, às vezes, sofrem aumento local de temperatura devido à deficiência na transmissão de calor através das paredes dos tubos, podem sofrer superaquecimento local, cuja consequência pode ser a falha por fluência. Equipamentos projetados para trabalhar continuamente, mas usados intermitentemente, podem falhar com o número de horas muito inferior ao previsto em projeto porque serão mais propensos à fadiga térmica.

Não é incomum peças de aço temperado e revenido, que são zincadas para proteção contra a corrosão, sofrerem trincamento induzido por hidrogênio. A camada de zinco realmente protege o aço da corrosão generalizada, atraindo para si a reação anódica, mas ao mesmo tempo, a reação catódica sobre o ferro gera hidrogênio que, sendo absorvido pelo aço, pode provocar o trincamento induzido por hidrogênio nas regiões submetidas a tensões de tração.

Há muitas outras situações similares a essas apresentadas, anteriormente e seria impossível listar completamente todos os eventos capazes de desencadear falhas.

Felizmente, há soluções para o controle da fratura, o que significa que, se não for possível corrigir todos os problemas que possam levar um componente à falha, é possível tomar ações para evitá-la. Manutenções preventiva e preditiva, avaliação não destrutiva, tolerância ao dano e adequação ao uso são recursos, normalmente, usados para evitar a fratura. O uso de sensores de temperatura, vibração, deformação e tensão podem prover um monitoramento contínuo de elementos mecânicos críticos, produzindo dados capazes de indicar se algo de errado está acontecendo, antes da falha acontecer. Para componentes trincados, é possível controlar o avanço da trinca antes dela atingir um tamanho crítico, utilizando um monitoramento contínuo por meio de emissão acústica.

Como se pode ver, atualmente, há recursos técnicos capazes de reduzir o risco de falha a quase zero. Eles são mais ou menos aplicados em função das possíveis consequências da falha. Se a fratura não ameaça a segurança humana e ambiental e/ou não implica em perdas econômicas

significativas, ações corretivas como a substituição de um parafuso quebrado, por exemplo, pode ser suficiente. Outras vezes, a falha de um único parafuso pode ser o início de um enorme desastre, o que significa que cada caso deve ser avaliado individualmente.

Desde a sua fundação, o IPT analisou milhares de fraturas dos mais diferentes tipos de componentes mecânicos. Em 1912, Hippolyto Gustavo Pujol Jr., o engenheiro responsável pela aquisição e operação dos primeiros equipamentos para ensaios mecânicos e análise microestrutural, publicou um artigo sobre metalografia microscópica e análise térmica (PUJOL, 1912) que serviu de base para o curso sobre esses assuntos que ele ministrou na Escola Politécnica de São Paulo. A consolidação da capacidade do IPT para analisar falhas ocorreu após Hubertus Colpaert assumir a administração da Seção de Metalografia, em 1928. Em seu livro sobre metalografia Colpaert (1951) apresentou diversos exemplos de peças fraturadas analisadas pelo IPT.

Durante a primeira metade do século 20, no Brasil, estradas de ferro cruzavam o estado de São Paulo e aquelas companhias costumavam solicitar o auxílio do IPT quando ocorriam falhas em componentes da estrada de ferro ou de trens. De meados dos anos 1950 até os anos 1960, após a morte de Colpaert, Alberto Albuquerque Arantes assumiu a responsabilidade pela realização das análises de falha no IPT. Seu extenso conhecimento sobre materiais e sobre mecânica deu a ele recursos para não apenas avaliar as propriedades dos materiais, mas também para analisar as cargas responsáveis pelas fraturas.

Durante esse período, pode-se destacar o papel de Arantes analisando falhas de componentes automotivos que estavam sendo nacionalizados pela recente indústria automobilística que se implantava no Brasil, propondo mudanças em materiais e processos de fabricação a fim de obter as propriedades desejadas do componente e, em alguns casos, excedê-las. Ainda nos anos de 1960, Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva iniciou sua carreira como engenheiro no IPT e logo assumiu a herança deixada por Colpaert e Arantes (ITO, 2007). Mais tarde, Paulo Sérgio e Tibério Cescon, ex-estagiário do IPT, orientado por Colpaert, foram responsáveis pela formação de uma nova geração de especialistas entre os quais o autor principal deste artigo, que se orgulha de ter participado.

Atualmente, é possível dizer que, ao longo de sua existência, o IPT realizou milhares de análises de falhas de pequenas peças como agulhas hipodérmicas a grandes como virabrequins de motores estacionários de usinas termoeletricas, de pequenos vasos de pressão como botijões de GLP domésticos a imensos vasos de pressão da indústria petroquímica. Os clientes do IPT, normalmente, são empresas privadas, estatais e entidades de governo e, algumas vezes, pessoas físicas. Atualmente, o IPT realiza análises de falha de diferentes tipos de equipamentos e estruturas para todo o país e para o exterior, quando solicitado.

Devido à relação de confiança estabelecida entre o IPT e seu cliente, as informações contidas nos relatórios do IPT são confidenciais e não podem ser divulgadas para o público. As exceções ocorrem quando o cliente autoriza o IPT, por escrito, a divulgar o conteúdo desses relatórios

técnicos, normalmente, em artigos publicados sobre o assunto. Isso não significa que os resultados de estudos solicitados pelo Ministério Público e pelo Poder Judiciário não se tornem públicos, uma vez que, nesses casos, os relatórios farão parte dos processos que podem ser consultados por pessoas interessadas.

Este artigo objetiva apresentar exemplos de casos de análise de falhas realizados pelo IPT sem, entretanto, expor qualquer cliente. Nesse sentido, muitas informações sobre as investigações, incluindo: procedimentos, dados, cálculos e o próprio cliente, não serão apresentadas.

Os primeiros casos analisados pelo IPT eram, na sua maioria, relacionados a peças contendo defeitos, como trilhos e rodas de trem apresentando defeitos internos ou superficiais, solda inapropriada em peças temperadas e revenidas e, assim por diante. É importante lembrar que, naquele tempo, o único ensaio não destrutivo disponível era a inspeção visual. A radiografia, partículas magnéticas, correntes de Foucault, ensaio por ultrassom e outros ensaios não destrutivos, que hoje asseguram a sanidade de peças e estruturas, ainda não tinham sido desenvolvidos ou não estavam, facilmente, disponíveis.

A análise química e os ensaios mecânicos eram usados em controle de qualidade, mas eles eram incapazes de determinar se uma peça apresentava defeito ou não. A metalografia podia, e ainda pode, determinar defeitos internos como rechupes e poros em fundidos e defeitos de superfície como dobras de forjamento e laminação, mas uma vez que a metalografia é destrutiva, ela não poderia ser aplicada a peças que seriam colocadas em serviço.

Por outro lado, a metalografia era e, ainda é, um dos recursos mais poderosos na análise de falhas. No passado, muitas falhas atribuídas à qualidade do material ou do processamento podiam ser, facilmente, identificadas pela metalografia, o que ainda é possível nos dias de hoje.

A aplicação da microscopia eletrônica de varredura, que começou a ser utilizada na análise de falhas em torno de 1960, no IPT nos anos 1970, causou uma revolução porque ela não apenas tornou possível determinar os micromecanismos de fratura, mas também pode proporcionar a análise química localizada de precipitados, inclusões e produtos de corrosão ou oxidação, quando equipada com EDS e WDS. Outras técnicas como difração de raios X, espectroscopia Auger e microscopia eletrônica de transmissão também podem ser utilizadas na análise de falhas, mas a solução da maioria dos casos não as requer.

Atualmente, muitas indústrias aplicam regras severas de controle de qualidade, na produção em massa de diversas peças usadas em diferentes aplicações, reduzindo muito a possibilidade de falhas. Contudo, isso não se aplica a peças grandes ou estruturas que, na maioria das vezes, são produzidas em pequenas quantidades e, de vez em quando, são únicas. Nesses casos, além das propriedades do material, a avaliação da qualidade é aplicada individualmente, a cada peça ou estrutura.

2 Estudos de caso

É impossível elaborar uma amostra de estudos de casos de análise de falhas abrangendo toda sorte de materiais, estruturas e componentes mecânicos analisados pelo IPT. Os estudos de caso que serão apresentados neste artigo não são, necessariamente, os mais importantes, mas foram escolhidos porque são ícones relevantes para a história desse tipo de análise, uma vez que um dos autores fez parte das primeiras equipes que a realizaram. A escolha sobre o que apresentar não foi fácil, porque ao longo do seu período de existência, o IPT analisou falhas para diferentes tipos de indústria.

A seguir, é apresentada uma lista ilustrativa de alguns ramos da indústria para os quais o IPT tem realizado análise de falhas:

- Implementos agrícolas;
- Transporte aéreo;
- Automobilístico;
- Cimento;
- Químico;
- Construção civil;
- Energia elétrica;
- Alimentos;
- Metalúrgico;
- Mineração;
- Oleo e gás;
- Petroquímico;
- Celulose e papel;
- Ferrovia;
- Siderurgia; e
- Açúcar e álcool.

2.1 Estudos de caso relacionados a ferrovias e trens

2.1.1 Trincamento longitudinal de um trilho devido a tensões residuais

Como mencionado, anteriormente, as ferrovias foram as primeiras empresas a solicitar análises de falha ao IPT. Há tantos casos que seria impossível enumerá-los e apresentá-los em um único artigo. As fraturas por fadiga de trilhos, iniciada em *flakes* de hidrogênio (olho de peixe) e a fratura frágil de rodas, iniciada em trincas superficiais, causada pelo aquecimento localizado devido ao atrito, quando a roda travada pela frenagem escorrega sobre o trilho, costumavam ocorrer, frequentemente, no passado.

Um trincamento longitudinal surpreendente ao longo da alma de um trilho durante a montagem na via, causado por tensões residuais, precisa ser divulgado para se tornar inesquecível (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a). A **Figura 1** mostra um trilho temperado, localmente, no boleto que trincou durante a sua montagem na via. O trilho estava sendo cortado, transversalmente, quando subitamente trincou, longitudinalmente, ao longo da alma, em consequência de tensões residuais. Os detalhes (A) e (B) da **Figura 1** mostram o deslocamento de, aproximadamente, 600 mm, entre as faces opostas da trinca na região do corte.

As setas no detalhe (C) apontam para o centro de curvatura adquirido pelo boleto e pelo patim após o trincamento. O deslocamento entre as faces opostas da trinca e a curvatura adquirida pelo boleto e pelo patim ocorreram em consequência do alívio das tensões residuais, provavelmente, introduzidas no tratamento térmico de endurecimento do boleto e no endireitamento a frio posterior a esse. O detalhe (D) apresenta a macrografia de uma seção transversal do trilho mostrando a profundidade da têmpera localizada na região do boleto.

2.1.2 Trilho fraturado devido ao hidrogênio absorvido durante o processo de fabricação do aço

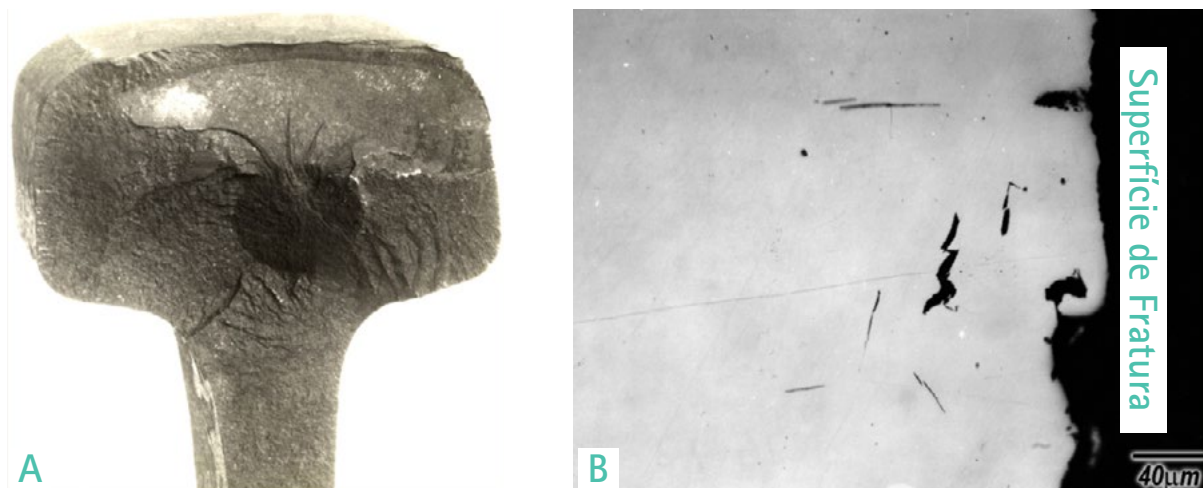
A **Figura 2** mostra a fratura transversal de um trilho, ocorrida em consequência da fragilização pelo hidrogênio devido à desgaseificação deficiente durante o processamento do aço (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981b). A análise metalográfica de uma seção perpendicular à região escura de formato, aproximadamente, elíptico no centro do boleto do trilho, conhecida como "olho de peixe" (AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK COMMITTEE, 1975; POLUSHKIN, 1956), observada na **Figura 2 (A)**, apresentou *flakes* de hidrogênio mostrados na **Figura 2 (B)**. A carga vertical alternada aplicada ao trilho devido ao trânsito normal de trens causou a propagação de fadiga dentro do boleto, a partir da região do "olho de peixe". A fratura ocorreu quando a trinca atingiu o tamanho crítico.

Figura 1 – Aspecto de um trilho trincado, longitudinalmente, ao longo da alma durante o corte da seção transversal. (A) e (B) Observe o deslocamento ocorrido após o trincamento do trilho. A região que estava sendo cortada está envolvida pelo círculo azul. (C) Sob esse ângulo de visão é possível observar a curvatura ocorrida do lado do boleto e do lado do patim do trilho, cujos centros de curvatura apontam para sentidos opostos. (D) Aspecto da macroestrutura de uma seção transversal do trilho mostrando região tratada, termicamente, do boleto.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981a)

Figura 2 – Aspecto de um trilho fraturado, transversalmente, em consequência de fragilização por hidrogênio. (A) A área circular no bolete do trilho, conhecida como "olho de peixe", ocorre quando o hidrogênio dissolvido no aço no estado líquido não é apropriadamente eliminado durante o refino do aço. (B) Essa micrografia, obtida de uma seção passando pela região do "olho de peixe", apresenta trincas internas conhecidas como *flakes* de hidrogênio.

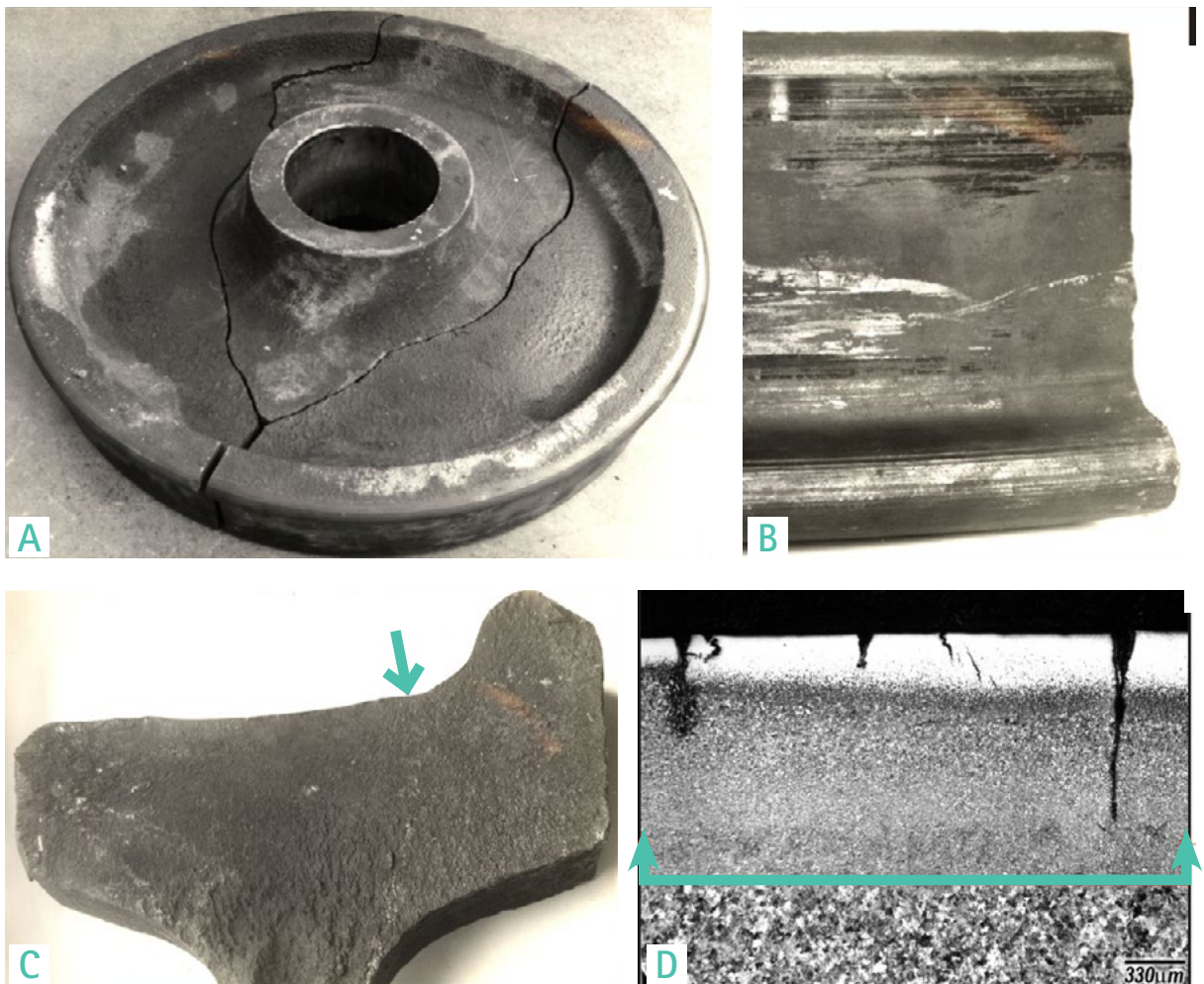


Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológica (1981b)

2.1.3 Fratura de uma roda devido a trincas térmicas na superfície de rolamento

A **Figura 3** apresenta uma roda de trem fraturada em consequência de trincas térmicas na superfície de rolamento (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981c). O travamento da roda ocorrido durante a frenagem fez com que a roda deslizasse sobre o trilho. A camada branca observada na **Figura 3 (D)** é constituída de martensita não revenida causada pelo aumento de temperatura proveniente do calor gerado pelo atrito entre as superfícies da roda e do trilho. O aquecimento aumentou a temperatura da superfície da roda até o campo austenítico. O resfriamento brusco causado pela drenagem de calor da superfície de rolamento para o corpo da roda causou o trincamento. A fratura se iniciou em uma dessas trincas.

Figura 3 – (A) Aspecto geral da roda fraturada. A fratura iniciou-se na superfície de rolamento, propagou-se ao longo do aro e bifurcou em torno do cubo. (B) Pode-se observar riscamento na superfície de rolamento da roda. (C) Aspecto da superfície de fratura. A seta aponta para a região de início da fratura. (D) Microestrutura de uma seção normal à superfície de fratura. As trincas iniciadas na superfície da roda devido ao choque térmico propagaram-se em consequência de fadiga térmica e/ou fadiga termomecânica. Acima da linha azul, encontra-se a zona afetada pelo calor produzido pelo atrito entre a roda e o trilho. Abaixo da linha azul, o material apresenta microestrutura regular para uma roda, constituída de perlita. Ataque: Nital.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981c)

2.1.4 Fratura de uma roda devido a uma marca de identificação muito aguda

A **Figura 4 (A)** apresenta uma roda de trem fraturada em consequência de um defeito de fabricação (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1980). A concentração de tensões causada pela marca de identificação muito aguda, observada na **Figura 4 (B)**, proporcionou condições para iniciação de uma trinca de fadiga. Quando a trinca de fadiga, evidenciada pelas marcas de praia observadas na **Figura 4 (C)**, atingiu o tamanho crítico, a roda a sofreu uma fratura brusca.

Figura 4 – (A) Vista geral de uma roda fraturada. Pode-se observar que o cubo se destacou da roda. Aspecto da lateral do aro (friso) onde os números e letras de identificação foram puncionados. Pode-se observar que a fratura passa através de uma das marcas de identificação. (C) A área delineada pelo círculo em azul mostra marcas de praia de fadiga avançando a partir da extremidade da marca de identificação. Marcas radiais típicas de fratura frágil propagaram-se a partir da área de fadiga.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1980)

2.1.5 Trincamento de uma junta soldada de topo de trilho devido a causas múltiplas

A **Figura 5** mostra uma junta soldada de topo de trilho trincada em serviço e removida da via antes de fraturar (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS, 1990). A **Figura 5 (A)** mostra o aspecto da junta após ensaio com líquido penetrante. Pode ser visto que a trinca apresenta um padrão quase simétrico em relação à solda, em que uma trinca longitudinal bifurca em ambas as extremidades. A **Figura 5 (B)** mostra o aspecto da superfície exposta da trinca após o trilho ter sido, apropriadamente, cortado.

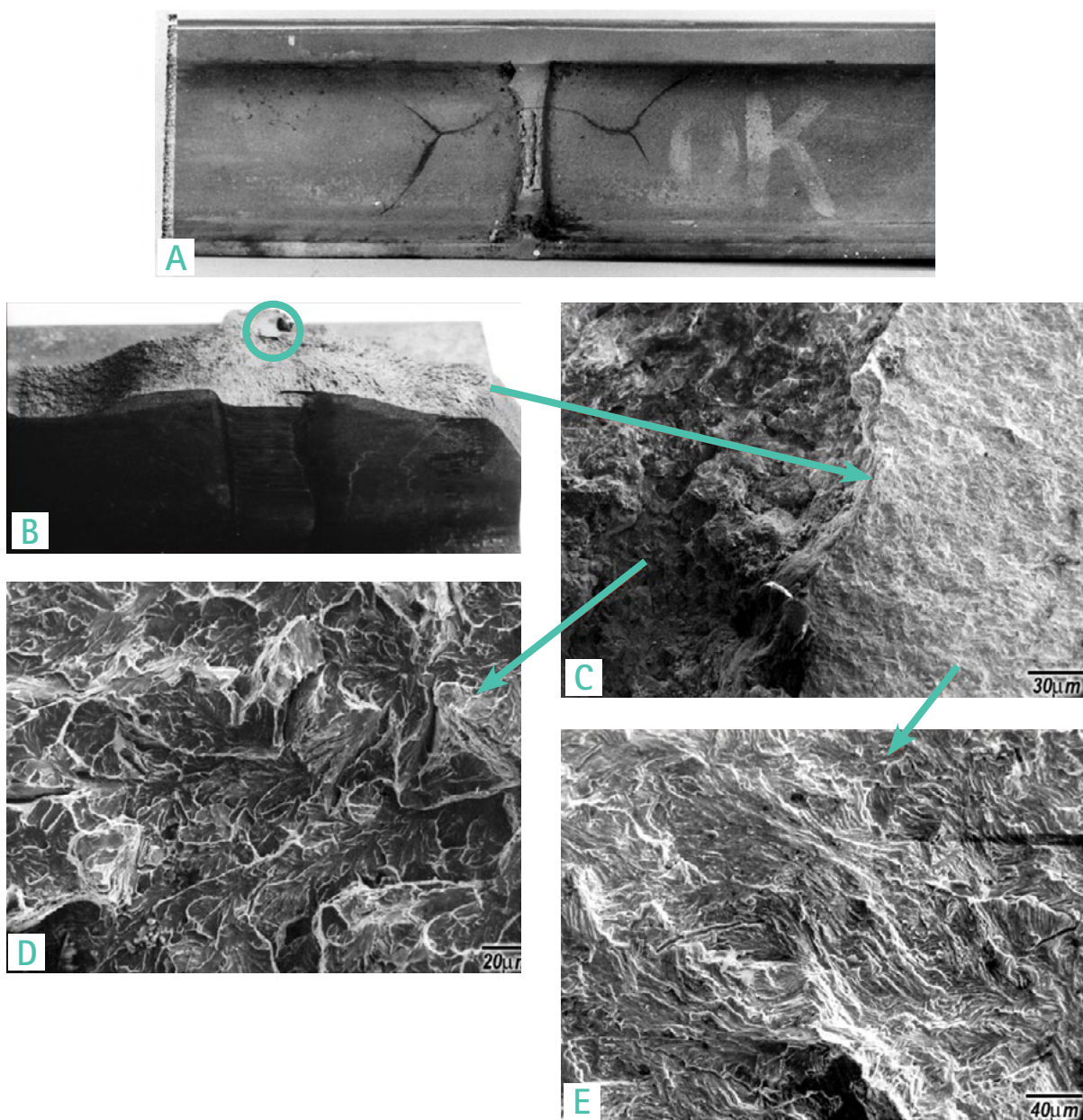
A região demarcada pelo círculo apresenta um defeito na rebarba da solda que desencadeou o processo de falha. Inicialmente, uma pequena trinca de fadiga iniciada no defeito tornou-se instável e sofreu uma propagação longitudinal brusca. As tensões responsáveis por essa etapa foram devidas à combinação da tensão causada pela componente lateral da carga aplicada pela roda sobre o trilho e da tensão residual devido à falta ou ineficiência de alívio de tensões após a soldagem.

A propagação da trinca longitudinal parou quando o alívio de tensões causado pelo seu próprio avanço fez com que tensão responsável por esse baixasse a ponto de interromper a propagação. Depois dessa etapa, o trilho ficou menos rígido permitindo o desenvolvimento de quatro trincas de fadiga, duas de cada lado. A **Figura 5 (C)** mostra a intersecção entre a trinca longitudinal e uma das duas trincas de fadiga que propagaram em direções a, aproximadamente, 45° da trinca longitudinal. A partir da **Figura 5 (C)** duas setas apontam para duas fotos de imagens de elétrons secundários, obtidas em um microscópio eletrônico de varredura.

A **Figura 5 (D)** apresenta o aspecto microfractográfico da superfície da trinca longitudinal que mostra clivagem e a **Figura 5 (E)** apresenta o aspecto microfractográfico da trinca inclinada que mostra estrias de fadiga. O processo completo pode ser descrito como a iniciação de uma pequena trinca de fadiga em um defeito de solda, causada pela combinação da tensão provocada pela carga lateral do trilho e da tensão residual proveniente da solda, que cresceu até atingir o K_{Ic} do material, gerando a trinca longitudinal. A trinca longitudinal parou devido ao alívio da tensão residual causado pelo seu próprio avanço. Após isso, o momento de torção devido à componente lateral da carga aplicada pelas rodas no trilho causou duas trincas de fadiga iniciadas em cada uma das extremidades da trinca longitudinal.

Esse é um caso em que não ocorreu nenhum acidente porque a trinca foi detectada em uma inspeção por ultrassom da via antes do trilho fraturar. A solução para o problema requereu um melhor controle de qualidade da solda, no sentido de evitar ou remover defeitos, o alívio de tensões após a soldagem, para reduzir a possibilidade de trincamento e, a inspeção periódica da via por ensaios não destrutivos, para detectar eventual ocorrência de trincamento em serviço.

Figure 5 – (A) Vista geral da junta soldada. As trincas foram reveladas por líquido penetrante. (B) Aspecto da superfície exposta da trinca horizontal e de uma trinca inclinada. A região marcada pelo círculo indica um defeito de solda e, em torno dele, uma pequena área uniforme e plana de fadiga. As marcas de sargento observadas na superfície da trinca longitudinal apontam para a região da solda. (C) Essa fotografia tirada com pequeno aumento em microscópio eletrônico de varredura mostra a aresta entre a trinca longitudinal e a trinca inclinada inferior direita. (D) imagem de elétrons secundários da superfície da trinca longitudinal mostrando clivagem. (E) imagem de elétrons secundários da superfície da trinca inclinada mostrando estrias de fadiga.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1990)

2.2 Casos relacionados com equipamentos siderúrgicos

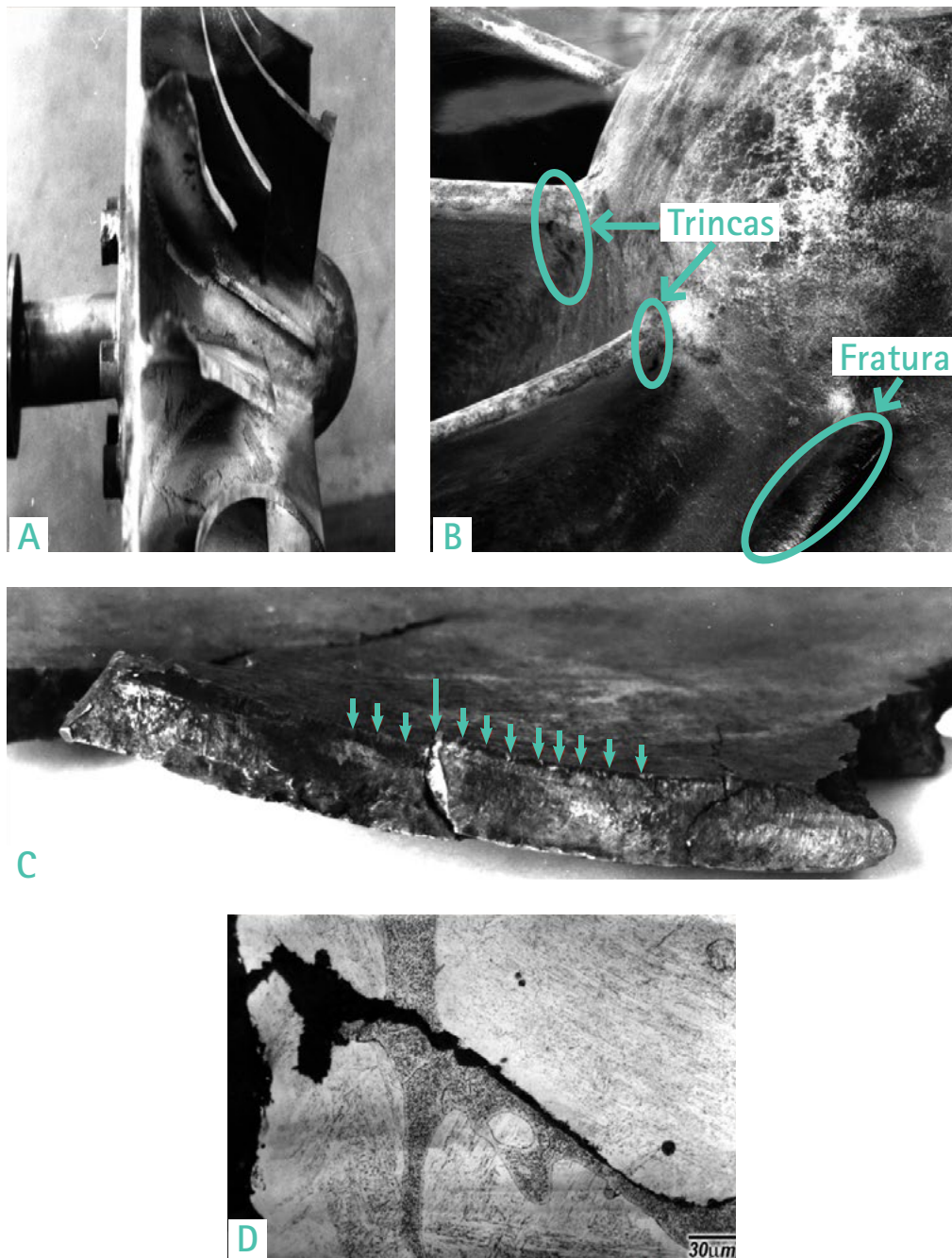
2.2.1 Corrosão fadiga em um rotor do primeiro estágio de um turbo compressor de fábrica de oxigênio

O rotor do primeiro estágio de um compressor da fábrica de oxigênio de uma companhia siderúrgica, que teve suas pás fraturadas, trabalhava em ambiente severo devido à poluição (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1979). O rotor foi fabricado de aço CB-7Cu, a versão fundida do aço inoxidável endurecível por precipitação 17-4-PH. A **Figura 6 (A)** mostra o aspecto geral do rotor e na **Figura 6 (B)** podem ser observadas duas trincas detectadas por líquido penetrante na base das pás, ao lado da pá fraturada. A **Figura 6 (C)** mostra, na superfície de fratura da pá destacada do rotor, degraus típicos de trincas de fadiga iniciadas em regiões de concentração de tensões. A **Figura 6 (D)** mostra a micrografia de uma seção tomada por meio de uma trinca iniciada em um pite de corrosão na superfície da pá.

A análise por WDS realizada no produto de corrosão realizada em microsonda eletrônica JEOL modelo JXA-50A revelou a presença dos elementos oxigênio (O), enxofre (S) e Cloro (Cl) dentro do pite. A análise de uma suspensão aquosa preparada com 5 % do resíduo sólido removido do interior da carcaça do rotor resultou em um pH 2,7 e concentração de cloreto e sulfato de 0,07 % e 50,2 %, respectivamente. A usina siderúrgica se situava próxima ao oceano, o ar apresentava alta concentração de SO_2 e, antes de ser comprimido, o ar era apenas filtrado a seco.

A umidade e o sal proveniente da maresia, associados ao SO_2 gerado no alto forno e na coqueria, proporcionaram a condensação de uma solução corrosiva dentro da câmara de compressão, durante o processo. Uma vez que a corrosão por pite é favorecida pela exposição do aço à água contaminada estagnada, é provável que esta tenha ocorrido em períodos em que o compressor estivesse desligado. Os pites resultantes se tornaram concentradores de tensão responsáveis por diversos pontos de iniciação de fadiga indicados pelos degraus na superfície de fratura apresentada na **Figura 6 (C)**.

Figura 6 – (A) Vista geral do rotor mostrando pás fraturadas; (B) Duas trincas detectadas por meio do ensaio de líquido penetrante em pás fraturadas. (C) Aspecto visual da superfície de fratura. As setas apontam para degraus na superfície de fratura típicos de fadiga iniciada em pontos de concentração de tensões. O degrau indicado pela seta mais longa indica uma região onde duas frentes de propagação de fadiga se juntaram. (D) Aspecto microestrutura de uma seção que cruza uma trinca, mostrando uma trinca se propagando a partir de um pite de corrosão.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1979)

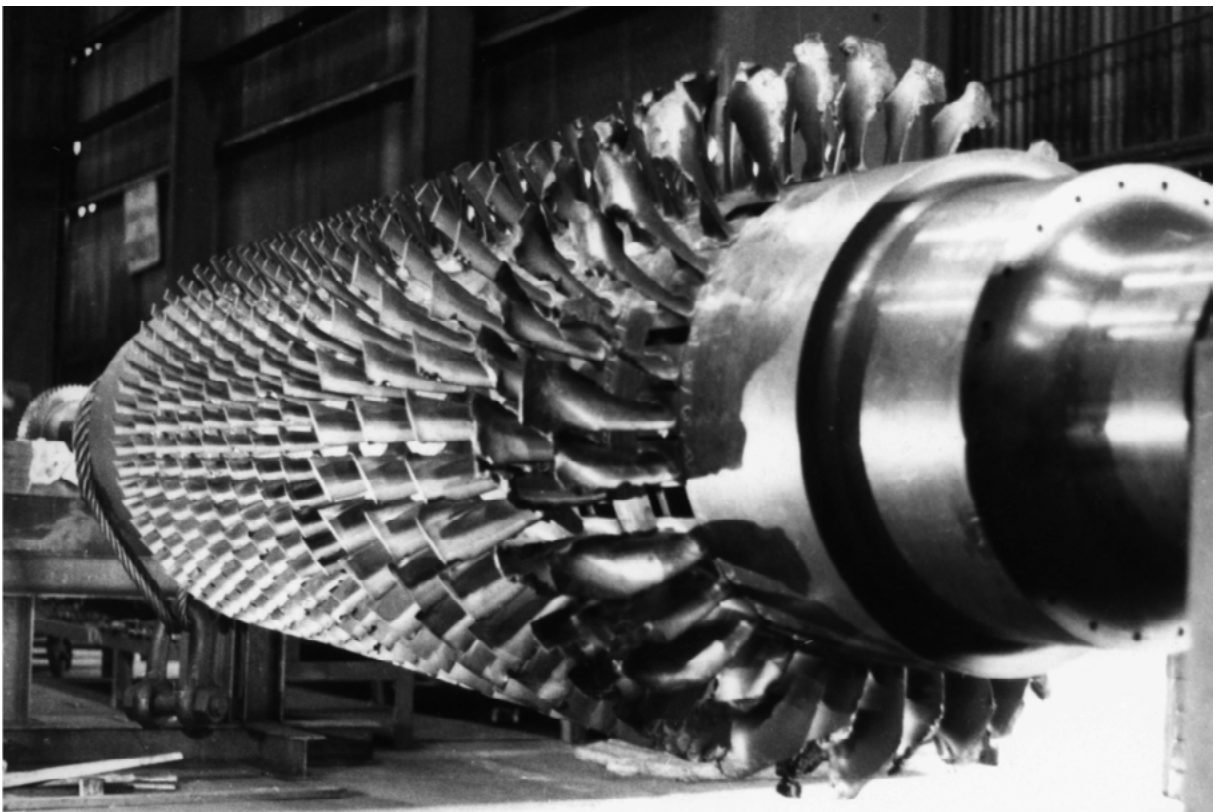
2.2.2 Fratura das palhetas de um compressor axial que alimentava coppers

A fratura de algumas palhetas de aço similar ao AISI 310 do rotor de um compressor axial quase causou o congelamento de um alto forno (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991a). O compressor era usado para alimentar os coppers que preaquecem o ar que alimenta as ventaneiras do alto forno.

A companhia siderúrgica possuía apenas dois compressores axiais para o serviço e o outro que estava programado para manutenção não poderia parar antes de o compressor falhado ser consertado ou substituído. Se o acidente do primeiro compressor ocorresse logo após a parada do segundo compressor, o suprimento de ar para o alto forno seria interrompido condenando-o ao congelamento.

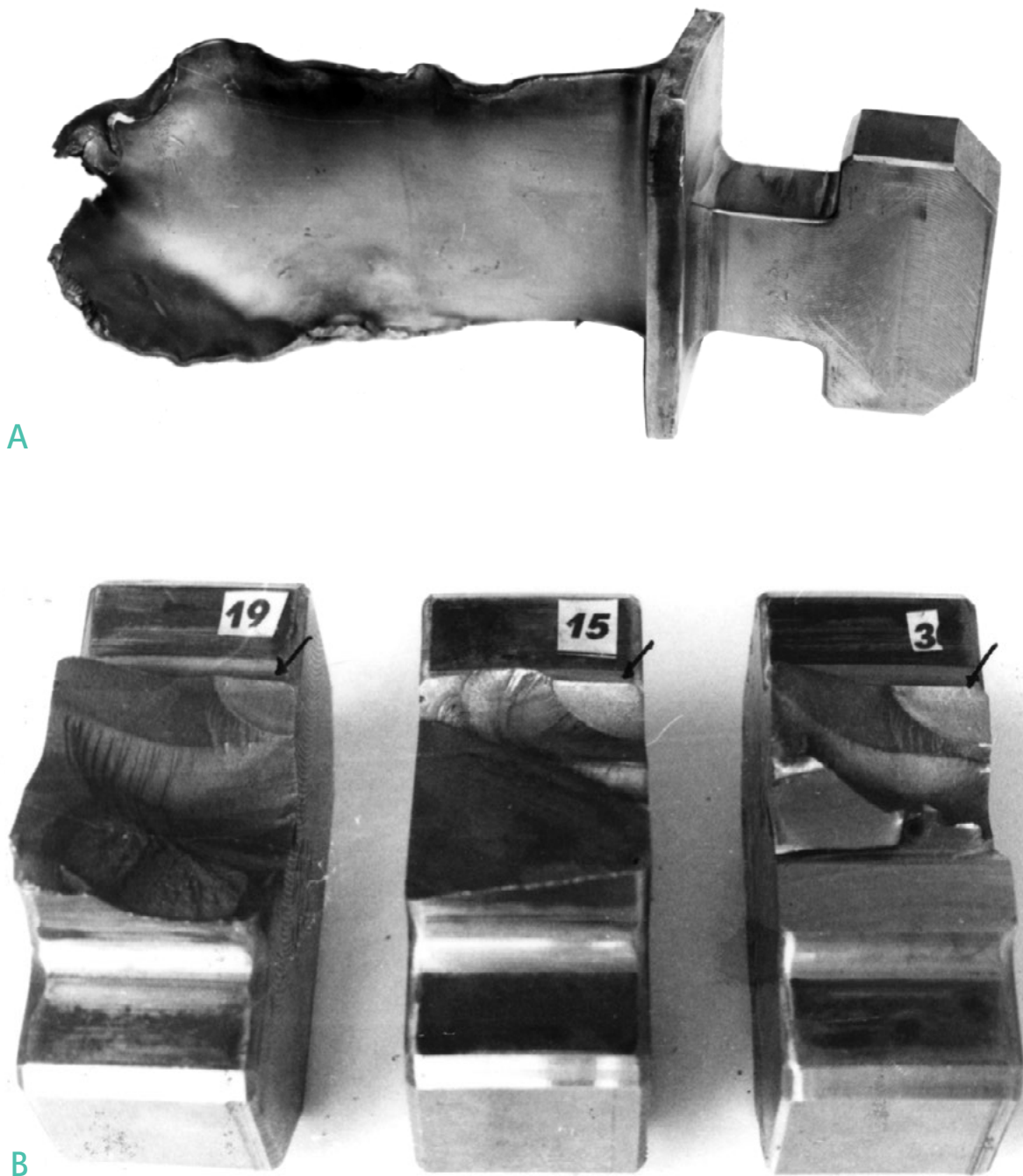
A **Figura 7** mostra o aspecto geral do rotor do compressor após a falha. Seis palhetas sofreram fratura, três do primeiro estágio e três do segundo estágio de compressão. Os pedaços das palhetas destacadas atingiram outras palhetas danificando não apenas aquelas fixas ao rotor, mas também, as palhetas estacionárias fixadas à carcaça do compressor. A **Figura 8** mostra o aspecto típico da fratura ocorrida nas palhetas.

Figura 7 – Aspecto geral do rotor do compressor axial que sofreu falha.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

Figura 8 – (A) Aspecto de uma palheta do primeiro estágio do compressor danificada devido ao impacto contra palhetas fraturadas. (B) Aspecto da superfície de fratura de três palhetas apresentando padrão similar A setas apontam para a fratura de três palhetas iniciadas próximo à aresta formada pela intersecção entre as superfícies do pescoço e da fratura.

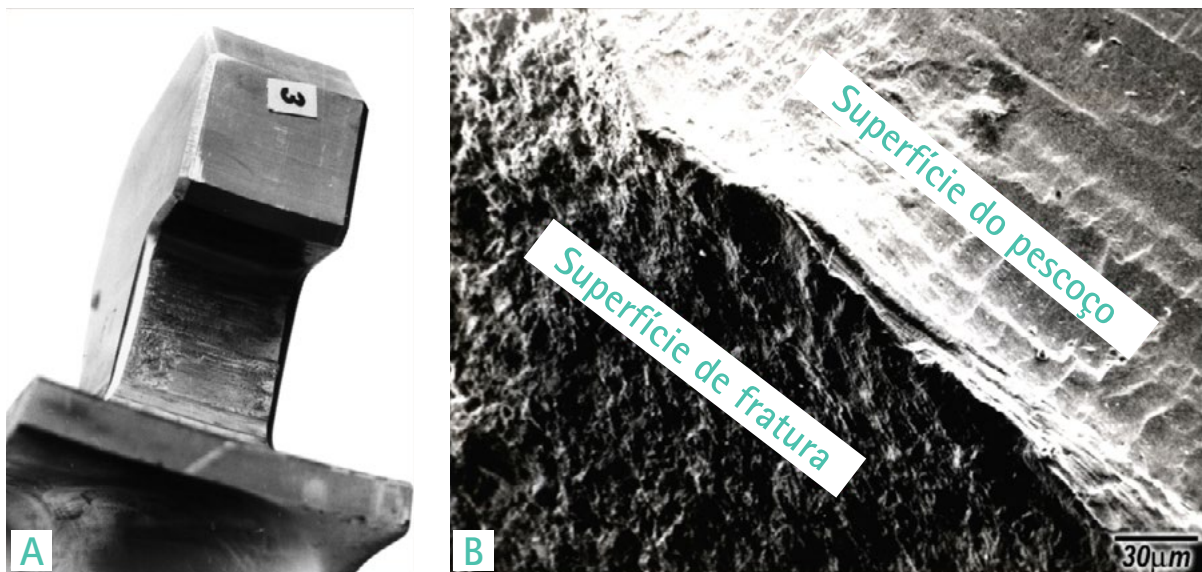


Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

O exame das superfícies de fratura apresentadas na **Figura 8** mostra que essas ocorreram em consequência de fadiga. A **Figura 9 (A)** mostra o aspecto típico da superfície do pescoço das palhetas que estava em contato com o entalhe de montagem do eixo do rotor. A superfície do pescoço estava danificada por *fretting* causado por micromovimentos entre a palheta e o eixo devido à vibração ocorrida em serviço. O mesmo dano foi observado na superfície do pescoço de todas as palhetas dos estágios I e II. A **Figura 9 (B)** mostra a imagem de elétrons secundários típica da intersecção entre a superfície do pescoço da palheta e a superfície de fratura. O dano causado pelo atrito sobre a superfície da palheta é observado.

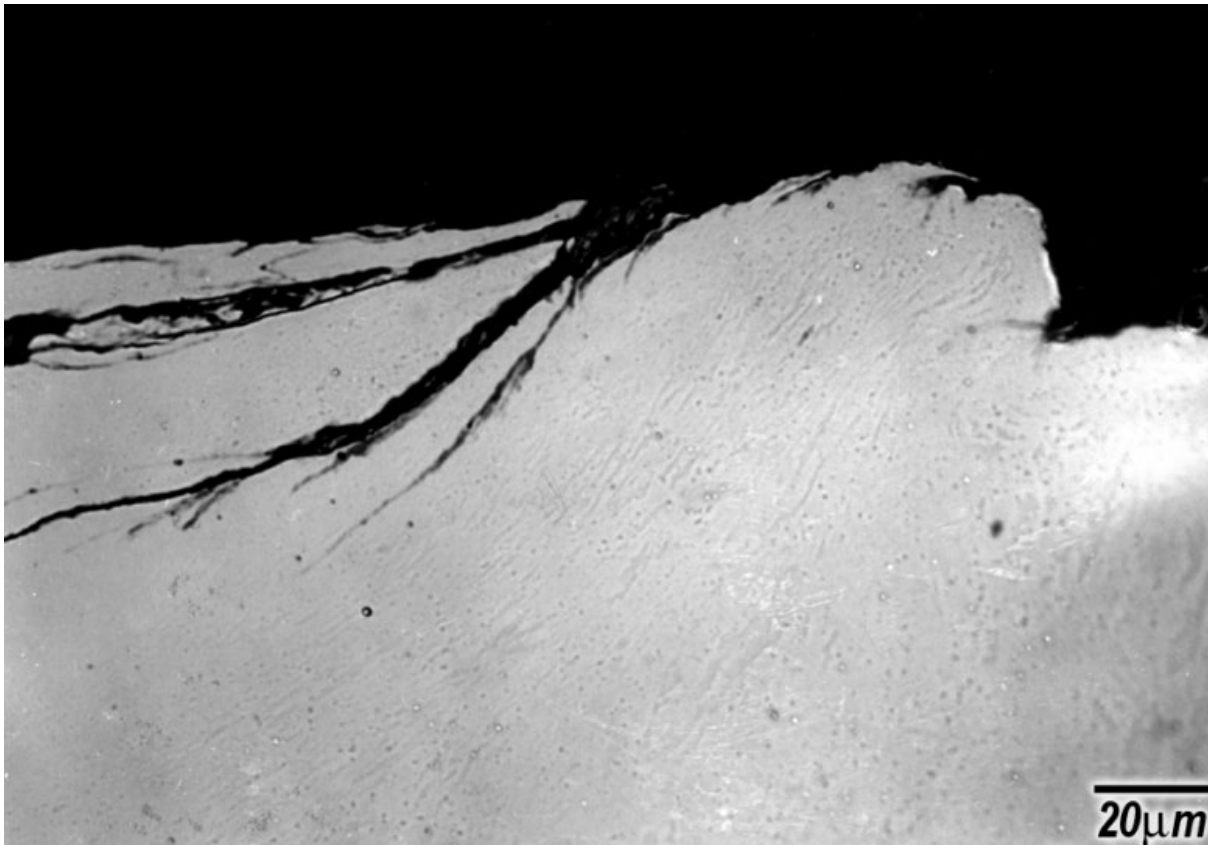
As dobras de deformação, mostradas na **Figura 10**, foram observadas em uma seção perpendicular à aresta entre as superfícies de fratura e da palheta mostrada na **Figura 9**. Essas dobras de deformação foram causadas pelo *fretting*.

Figure 9 – (A) Aspecto da superfície do pescoço de uma palheta mostrando riscamento causado pelo atrito contra a superfície do rasgo do eixo. (B) Imagem de elétrons secundários de microscópio eletrônico de varredura na região de intersecção entre a superfície de fratura e a superfície do pescoço, mostrando danos causados pelo atrito sobre a superfície do pescoço.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a).

Figura 10 – Aspecto de uma seção observada por microscopia óptica perpendicular à aresta entre as superfícies de fratura e do pescoço da palheta apresentada na Figura 9 (B), mostrando dobras de deformação na superfície do pescoço. Sem ataque.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

A principal causa da fratura foi o vão muito pequeno entre o pescoço da palheta e o rasgo na superfície do eixo, que permitiu o contato entre as superfícies e, conseqüentemente, o fretting. A tensão responsável pela fadiga foi devido à vibração combinada com a tensão causada pela carga radial produzida pela força centrífuga sobre as palhetas estimada em cerca de 40 % do limite de escoamento do material (520 MPa), para a palhetas do estágio I do compressor.

2.3 Um exemplo de ruptura de recipientes para gases liquefeitos

Muitos gases sob pressão estão em equilíbrio nos estados líquido/gás à temperatura ambiente. Nesses casos, o volume do recipiente é preenchido com uma massa de produto, parcialmente, nos estados líquido e gasoso. Uma vez que há gás e líquido dentro do recipiente, a pressão interna é a pressão de vapor da substância para a temperatura em que ela é mantida. Nessa condição (volume constante), o aumento de temperatura aumenta o volume da fração de líquido da substância e a redução de temperatura a reduz.

Se o recipiente for sobrecarregado, é possível que todo o seu volume seja preenchido com líquido. Pode-se encontrar em manuais de termodinâmica que a compressibilidade dos diversos líquidos é muito menor do que a compressibilidade dos gases. Se o recipiente for totalmente preenchido com líquido, sua expansão, devido ao aquecimento, causará um aumento de tensão muito maior do que se estivesse preenchido com líquido em equilíbrio com gás à mesma temperatura.

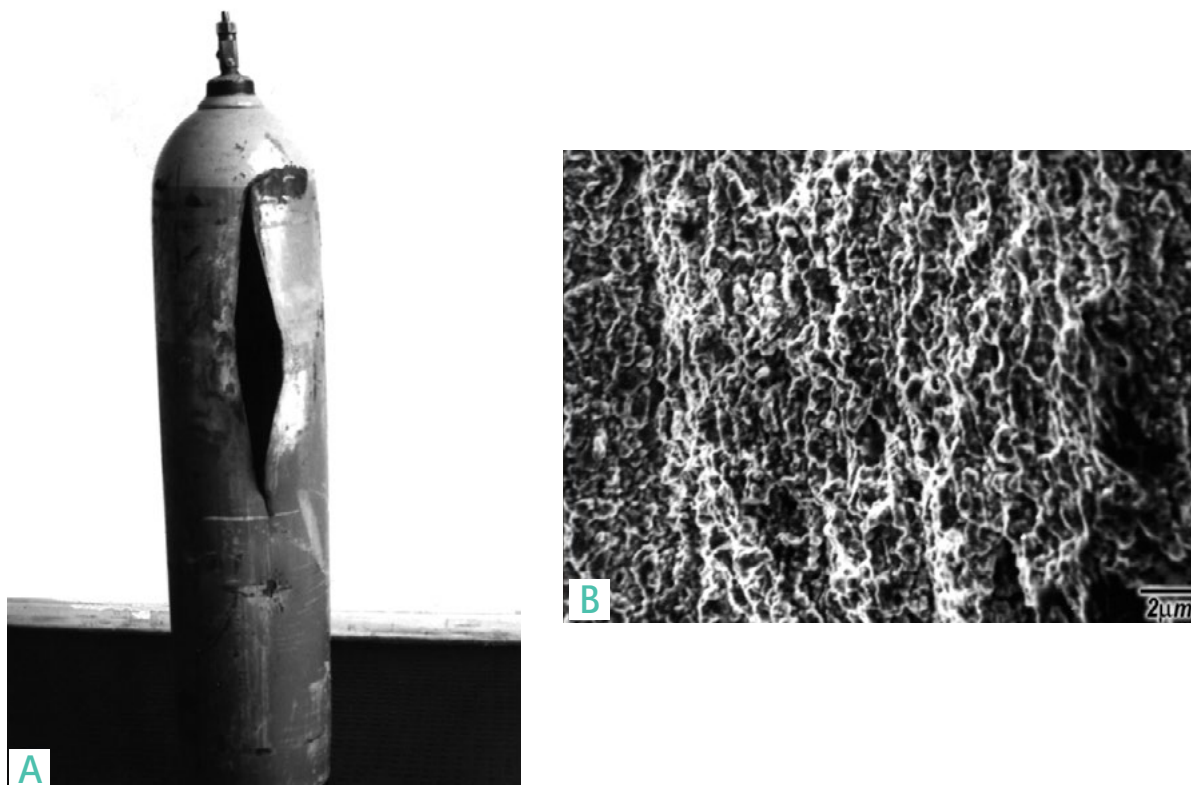
Normalmente, para evitar sobrepresão, o recipiente é equipado com válvulas de segurança. Há diferentes tipos de válvulas de segurança, as limitadas por pressão e as limitadas por temperatura. As válvulas que abrem acima de uma pressão definida podem ser, simplesmente, discos de ruptura fabricados de materiais com espessura e resistência definida, que uma vez rompidos liberam todo o gás do interior do recipiente.

Outro tipo de válvula de segurança limitada por pressão é provida de uma mola que a mantém fechada até que a força oposta de abertura devido à pressão interna supere a força de fechamento aplicada pela mola. Uma vez aberta, a válvula alivia a pressão excessiva e se fecha. Há também, entre outros tipos, válvulas controladas por temperatura fabricadas com ligas de baixo ponto de fusão que se fundem ao atingi-lo, liberando todo o gás.

A **Figura 11 (A)** apresenta um cilindro para gás cloro que, após ser exposto ao sol durante um dia de verão sobre a caçamba de um caminhão, sofreu uma ruptura súbita (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991b).

A inalação do gás por uma pessoa que estava perto do cilindro a levou à morte. A análise do material não revelou qualquer problema na qualidade do cilindro e a fratura se apresentou 100 % dúctil, conforme pode ser observado pela deformação macroscópica mostrada na **Figura 11 (A)** e, microscopicamente, pelos alvéolos revelados na imagem de elétrons secundários apresentada na **Figura 11 (B)**.

Figura 11 – (A) Aspecto do cilindro após a ruptura. Pode se observar que a ruptura foi acompanhada de deformação plástica macroscópica. (B) Imagem de elétrons secundários da superfície de fratura observada em um microscópio eletrônico de varredura. A fratura é constituída apenas de alvéolos.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991b)

O volume do cilindro era de 50 litros e poderia ser preenchido com até 68 kg de gás cloro. O cloro é uma substância que, como o GLP e o CO_2 sob pressão, pode ser mantido liquefeito na temperatura ambiente. À temperatura constante, a pressão é mantida constante enquanto houver líquido e gás, simultaneamente, dentro do recipiente. O problema ocorreu porque o cilindro estava sobrecarregado levando-o a ficar, totalmente, preenchido com cloro no estado líquido, apesar de estar equipado apenas com uma válvula de segurança fusível que se abriria apenas quando a temperatura atingisse 70 °C.

Devido ao cilindro estar muito cheio, ele atingiu a pressão de ruptura muito antes que temperatura de fusão da válvula fosse atingida. Cálculos no relatório demonstraram que uma sobrecarga de 5 kg de cloro seria suficiente para levar o material do cilindro ao limite de escoamento ao atingir 30 °C. Outros cilindros do mesmo lote foram encontrados com mais 5 kg de sobrecarga suportando a admissão de que o cilindro falhado foi sobrecarregado. A fratura dúctil, a obediência do material às especificações e a ausência de defeitos de fabricação no cilindro indicam que a qualidade do material não poderia ser responsabilizada pela falha.

O uso de uma válvula de segurança inapropriada, a sobrecarga durante o enchimento do cilindro e o calor causado pela exposição ao sol, causaram a ruptura do cilindro. A simples obediência à carga limite e a estocagem apropriada do cilindro de cloro evitariam o acidente.

2.4 Casos relacionados a novos processamentos de materiais

2.4.1 Fratura de uma barra de aço para protensão de concreto

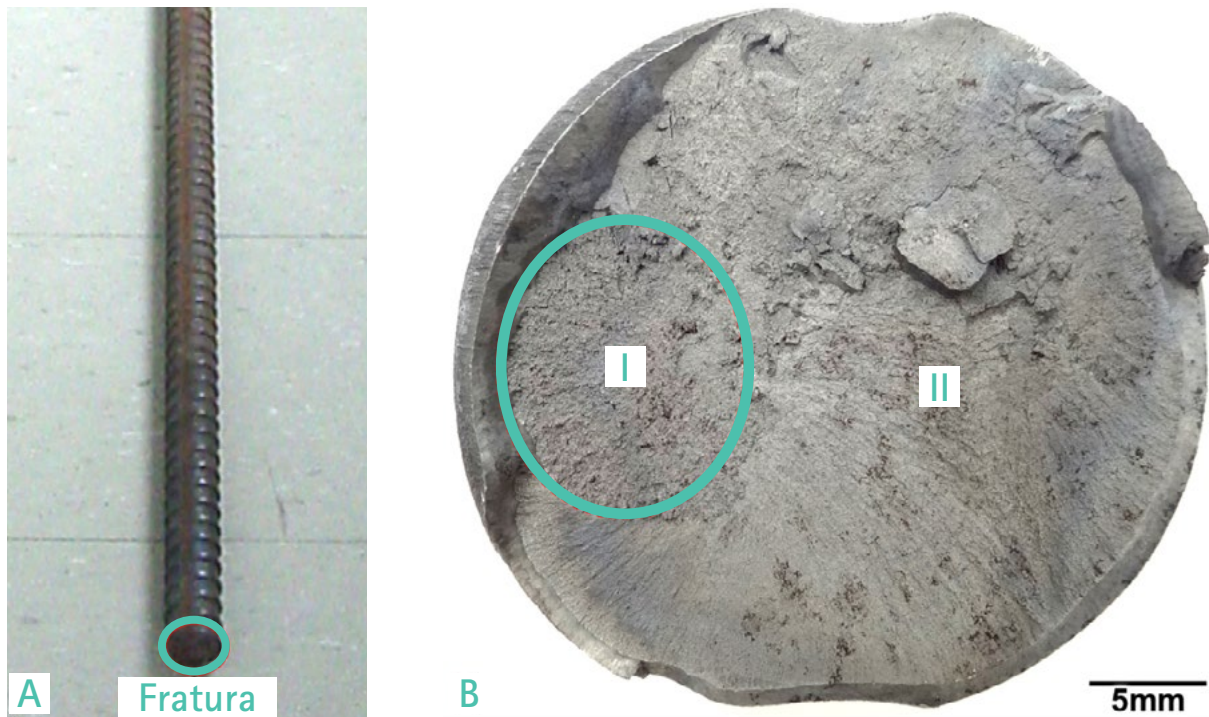
Os processos de fabricação de aço tem se desenvolvido de tal modo que, atualmente, é raro encontrar aços que não obedeçam à composição química especificada. As melhorias nos processos de refino do aço levaram os teores de impurezas como enxofre e fósforo a níveis de, pelo menos, uma ordem de grandeza abaixo do mínimo especificado há muito tempo atrás pelas normas, que continuam válidos até hoje.

No passado, quando fora da especificação, tais impurezas costumavam ser responsáveis pelo baixo desempenho desses materiais. Contudo, há algumas situações em que uma porcentagem muito baixa de enxofre pode se tornar um problema. O enxofre muito baixo pode fazer com que o aço temperado e revenido se torne susceptível a desenvolver um defeito denominado "olho de peixe", devido à ação de baixos níveis de hidrogênio, considerados seguros no passado. Foi descoberto que algum enxofre pode ser útil para proteger o aço contra o hidrogênio (FRUEHAN, 1997). Dependendo da aplicação é possível que seja necessário estabelecer não apenas o teor máximo, mas também o teor mínimo de enxofre.

A **Figura 12 (A)** mostra um vergalhão temperado e revenido usado para protensão de concreto que fraturou devido ao hidrogênio (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2014). A composição química do material obedeceu à especificada pela ISO 6934-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1991), mas o teor de enxofre era de 0,006 %, ou uma ordem de grandeza menor do que o máximo estabelecido (0,040 %). A superfície de fratura mostrada na **Figura 12 (B)** apresenta uma área quase circular, a partir da qual a fratura se propagou.

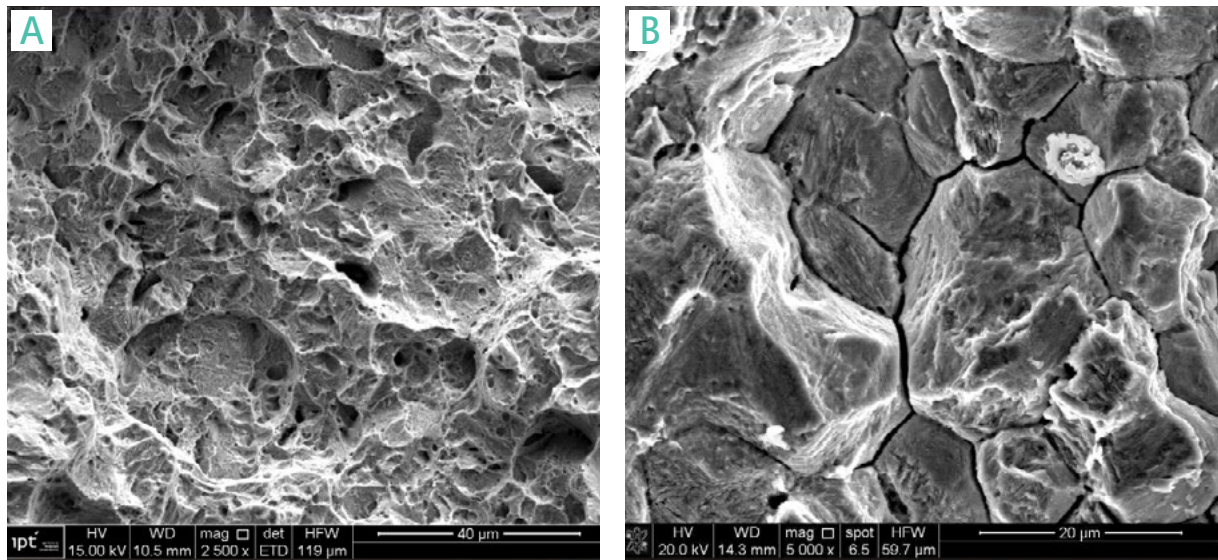
A **Figura 13** mostra imagens de elétrons secundários das regiões I (iniciação da fratura) e II (propagação da fratura) indicadas na **Figura 12 (B)**. A **Figura 13 (A)** mostra que o aspecto da fratura na região I é intergranular com trincas secundárias, típicas de fragilização por hidrogênio. A **Figura 13 (B)** mostra o aspecto da região II da superfície de fratura, constituída de uma mistura de clivagem e alvéolos conhecida como quase clivagem.

Figura 12 – (A) Vergalhão para concreto protendido fraturado. (B) Aspecto da superfície de fratura. A área envolvida pelo círculo do lado esquerdo da superfície de fratura define um "olho de peixe" devido à fragilização por hidrogênio.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014)

Figura 13 – (A) Aspecto da superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura na região I da Figura 12 (B). Fratura intergranular e trincas intergranulares secundárias. (B) Aspecto da superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura a região II da Figura 12 (B). Mistura de clivagem e alvéolos – quase clivagem.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014)

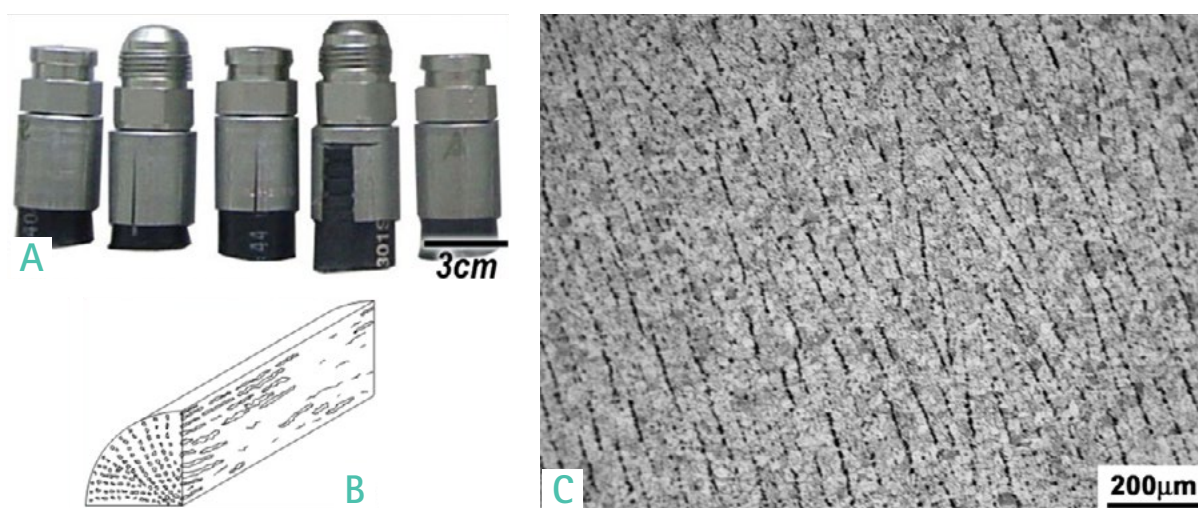
2.4.2 Trincamento de acoplamentos para mangueira de alta pressão

A **Figura 14** mostra outro exemplo de material que teve suas propriedades implícitas reduzidas por um novo processo (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2009). As peças observadas eram acoplamentos para mangueiras de alta pressão. O processo usual de fabricação desses acoplamentos era usiná-los a partir de barras de aço resulfurado. A operação de montagem por meio da cravação do acoplamento costumava ser realizada por um longo tempo sem muitos eventos de trincamento.

Quando o fabricante dos acoplamentos começou utilizar barras de aço resulfurado laminadas a quente a partir de barras obtidas por lingotamento contínuo, o trincamento durante a cravação desses na mangueira começou a se tornar epidêmico. A causa foi a baixa porcentagem de redução de espessura durante a laminação utilizada no novo processo de fabricação do aço que não era alta o suficiente para eliminar a orientação radial das inclusões geradas na solidificação, conforme mostrado na **Figura 14 (B)**.

As barras laminadas passaram em todos os ensaios estabelecidos pelas normas há muito tempo. Contudo, o novo processo de fabricação do aço não apenas causou grãos colunares com crescimento no sentido radial, orientando as inclusões ao longo dos seus contornos, como também não foi capaz de quebrar a orientação das inclusões na direção radial, porque a redução de espessura durante a laminação não era alta o suficiente para isso. A orientação das inclusões nas barras produzidas pelo processo anterior era, predominantemente, longitudinal, ao passo que no novo processo eram também orientadas no sentido radial reduzindo a ductilidade do material na direção perpendicular à radial (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2009).

Figura 14 - (a) Vista geral de alguns acoplamentos. Observe trincas longitudinais em dois deles. (b) Esquema mostrando a orientação das inclusões de sulfeto nas direções, longitudinal e transversal da barra de aço lingotada, continuamente e, laminada a quente (c) Micrografia mostrando a orientação na direção radial observada na seção transversal do acoplamento.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2009)

Outras situações em que atalhos ou mudanças nos processos tradicionais foram responsáveis por falhas têm sido analisadas pela equipe de análise de falhas do IPT. Casos envolvendo materiais que não tiveram a microestrutura, propriamente, homogênea devido à combinação deficiente entre o tratamento térmico e o trabalho a quente não são incomuns. Também não é incomum ter eixos ou outras peças móveis que fraturam devido à fadiga iniciada em defeitos internos relacionados com o lingotamento contínuo de chapas e barras que não sofreram trabalho mecânico suficiente após a fundição.

Os processos clássicos de fabricar chapas, barras e forjados são de alto consumo de energia porque blocos e placas espessas de aço obtidas na usina requerem muito trabalho a quente e

reaquecimento durante as operações de laminação e forjamento. Por mais de meio século, a fundição de lingotes, tarugos e placas tem sido substituída pelo lingotamento contínuo, que não apenas reduz o custo, mas também aumenta a produtividade na fabricação de aço, requerendo muito menos energia nos processos subsequentes de forjamento e laminação.

Placas, barras e tarugos obtidos por lingotamento contínuo não requerem muito trabalho mecânico para atingir o tamanho desejado. Contudo, o extenso trabalho mecânico e reaquecimento requerido nos processos anteriores pode promover uma melhor homogeneização da microestrutura do material do que a obtida por meio do trabalho a quente realizado sobre de placas, barras e tarugos fundidos continuamente.

Devido à menor redução de espessura na laminação e forjamento de placas e barras fundidas, continuamente, a manufatura de alguns produtos usando esse tipo de material pode se tornar mais complicada. O fabricante compra aços que obedecem às especificações estabelecidas por norma há muito tempo. Contudo, os aços produzidos no passado eram processados de tal modo que algumas propriedades implícitas, como resistência ao dobramento ou ao impacto, proporcionadas pelo processo antigo eram superiores às mesmas propriedades de materiais produzidos de acordo com os novos processos.

Uma vez que os materiais produzidos conforme os novos processos atendem as propriedades estabelecidas pela norma (mas não, necessariamente, as propriedades implícitas) o fabricante que usa o aço pagará o ônus da inovação no processo de fabricação do aço, muitas vezes, sendo levado a mudar o processo de manufatura ou o material.

A conclusão é que as técnicas de novos processamentos vieram para ficar. Contudo, para algumas aplicações há, ainda, espaço para materiais processados da forma clássica, principalmente, para aqueles casos em que o custo do material seja desprezível quando comparado com o custo de uma falha.

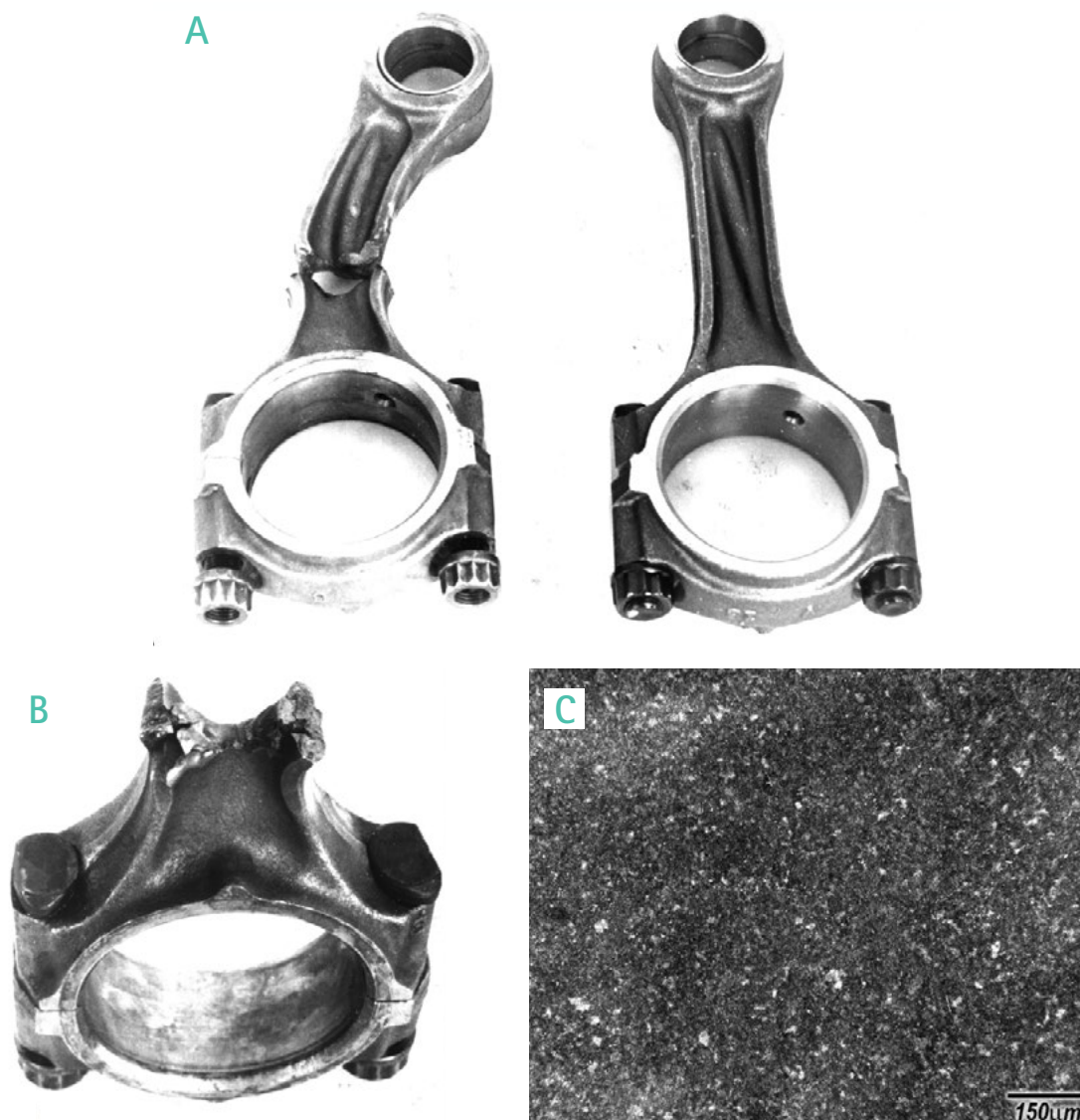
2.5 Poderia ter acontecido com você

Dirigir em áreas com enchente pode trazer um problema, para o qual, muitos motoristas não estão conscientes. A melhor recomendação seria: não tente atravessar uma área inundada, se você tiver escolha. Algumas pessoas tentam atravessar áreas inundadas pisando no acelerador para evitar que o motor morra. Muitas vezes isso funciona, mas se o nível da água estiver alto o suficiente para atingir a admissão de ar, a água será sugada, preenchendo o cilindro do motor e causando um calço hidráulico. O que significa que quando a água estiver no interior do cilindro, o pistão, ao invés de comprimir uma mistura de ar e combustível irá comprimir água líquida. A compressão de líquido impõe uma severa carga de compressão à biela levando-a a flambagem.

A **Figura 15 (A)** mostra duas bielas, à esquerda uma que fraturou após flambar devido a um calço hidráulico e à direita uma biela nova (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1996). A superfície de

fratura mostrada na **Figura 15 (B)** estava muito danificada para ser analisada por MEV. O material apresentou uma microestrutura constituída de martensita revenida, conforme pode-se observar na **Figura 15 (C)** e dureza de 250 HB que atendeu à especificação.

Figura 15 – (A) Aspecto de duas bielas de caminhonete. À esquerda uma que fraturou após flambar devido a um calço hidráulico, à esquerda uma biela nova. As superfícies de fraturam não se ajustam perfeitamente porque após a fratura o motor continuou funcionando danificando-as. (B) Vista da superfície de fratura. (C) A microestrutura do material era constituída de martensita revenida.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1996)

Para evitar o calço hidráulico ou a parada do motor, veículos projetados para cruzar cursos de água (normalmente, SUV's e caminhonetes), além de tração nas quatro rodas, têm o filtro de ar e a extremidade de saída dos gases de escapamento, posicionados no topo do veículo.

3 Considerações Finais

Como mencionado anteriormente, apenas poucos exemplos de análises de falhas realizadas pelo IPT foram apresentados neste artigo. Muito a ser dito a respeito de equipamentos e componentes mecânicos que sofreram falha não foi mencionado aqui. Estudos de caso sobre caldeiras, eixos, parafusos, engrenagens, vasos de pressão, fornos, compressores, tanques e uma inúmera quantidade de componentes mecânicos e estruturas foram realizados e seria necessária a publicação de vários artigos como este, ou talvez um livro inteiro, para retratar um dos papéis do IPT no desenvolvimento tecnológico do Brasil.

Alguém poderia dizer que a análise de falhas não seria necessária se o processamento dos materiais e o controle de qualidade fossem perfeitos, bem como o projeto, a manufatura e a construção. Contudo, a história tem demonstrado que apesar de todas as melhorias no processamento dos materiais e no controle de qualidade, algumas vezes falhas podem ocorrer em consequência, exatamente, de algum tipo de inovação.

A análise por elementos finitos é um poderoso recurso em projeto, mas algumas vezes os projetistas cometem erros, negligenciando importantes *inputs* no programa. Outras vezes, o projeto é perfeito, mas falhas podem ocorrer devido à manufatura e à construção.

Muito deve ser feito a fim de prevenir falhas. Controle de qualidade, manutenções preventiva e preditiva, inspeção periódica e monitoramento permanente por meio de instrumentação apropriada são metodologias capazes de levar a ocorrência de falhas a um número desprezível.

Na maioria dos casos de falhas, alguém falhou em um, ou mais, dos requisitos citados, mostrando o efeito da ação humana para provocar ou prevenir falhas. Isso demonstra a importância de políticas afirmativas de educação continuada, não apenas melhorando a capacidade técnica, mas também as fazendo atentas e aptas a assumir suas responsabilidades, porque um elo fraco apenas é suficiente para quebrar uma corrente.

4 Agradecimentos

Aos meus mentores Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva e Tibério Cescon (*in memoriam*) por me mostrarem como identificar o que importa e o que não importa em análise de falhas, sempre trilhando um caminho baseado na ética. Ao IPT, onde eu construí a minha experiência profissional, por oportunizar a produção deste artigo. A Vanessa Yumi Nagayassu Ferrari por me produzir cópias digitais de fotografias de relatórios antigos.

5 Referências

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

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

FRUEHAN, R. J. A review of hydrogen flaking and its prevention. **Iron & Steelmaker**, v. 24, n. 8, p. 61-69, Aug. 1997.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 15.505**. São Paulo: IPT, 1981a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 15.935**. São Paulo: IPT, 1981b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 15.622**. São Paulo: IPT, 1981c.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 13.968**. São Paulo: IPT, 1980.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 28.484**. São Paulo: IPT, 1990.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 12 559**. São Paulo: IPT, 1979.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 29.564**. São Paulo: IPT, 1991a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 28.941**. São Paulo: IPT, 1991b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 138.657-205**. São Paulo: IPT, 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 108.180-205**. São Paulo: IPT, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 33.898**. São Paulo: IPT, 1996.

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

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

POLUSHKIN, E. P. **Defects and failures of metals – their origin and elimination**. Amsterdam: Elsevier, 1956. p. 177-189.

PUJOL, H. G. Noções elementares de metallographia microscopica e analyse thermica. **Revista Polytechnica**, São Paulo, n. 39-40, out./nov. 1912.

DOI 10.34033/2526-5830-v3n11-95



Preparo de lote piloto de sedimento estuarino candidato a material de referência de composição química elementar

Preparation of a pilot batch of an estuarine sediment for reference material of elemental chemical composition

Juliana Ferreira de Oliveira^{a*}, Patricia Hama^a,
Ricardo Rezende Zucchini^a, Rubens César Figueira Lopes^b

a Laboratório de Referências
Metrológicas, Instituto de
Pesquisas Tecnológicas do Estado
de São Paulo S.A., São Paulo-SP,
Brasil.

b Instituto de Oceanográfico,
Universidade de São Paulo, São
Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: jfoliveira@ipt.br

Palavras-chave:
sedimento; material de
referência; ICP-MS; ICP-OES.

Keywords:
sediment; reference material;
ICP-OES; ICP-MS.

Resumo

Os sedimentos compreendem o material sólido depositado no fundo de corpos hídricos. Os metais pesados tóxicos tendem a se depositar no sedimento e, por este motivo, são monitorados após a dragagem para garantir a correta disposição. Como não existem materiais de referência brasileiros de sedimentos, os laboratórios de análise química utilizam materiais importados para o controle da qualidade de suas medições. Neste trabalho, um lote piloto de material foi preparado a partir de sedimento coletado na região do Alto Estuário de Santos (SP). A caracterização química do material foi realizada por ICP-OES e ICP-MS, empregando-se dissolução de amostras por fusão alcalina ou por digestão por micro-ondas, de acordo com os elementos analisados. Obteve-se um material com estreita distribuição de tamanho de partículas e homogeneidade aceitável. As metodologias de análise empregadas e o processo de preparo desenvolvido são adequados à preparação de um futuro material de referência certificado.

Abstract

The sediments are solid materials deposited at the bottom of water bodies. The toxic heavy metals tend to be deposited as sediments, so they are monitored after being dredged to ensure their correct disposal. As there are no Brazilian reference materials for sediments, chemical-analysis laboratories use imported materials to control the quality of their measurements. In this work, a pilot batch of material was prepared from a sediment collected in the Upper Estuary of

Santos (SP). The chemical characterization of the material was performed by ICP-OES and ICP-MS, using alkaline fusion or microwave digestion to sample dissolution according to the element to be analyzed. A material with a narrow particle size distribution and suitable homogeneity was obtained. The applied methodologies and the preparation process developed are suitable for the preparation of a future certified reference material.

1 Introdução

Os sedimentos aquáticos constituem o material sólido depositado no fundo de rios, represas, lagos e mares. São formados majoritariamente a partir de partículas originadas em processos de intemperismo, isto é, removidas das rochas próximas à superfície terrestre por meio de processos físico-químicos e transportados até os corpos d'água. Além do intemperismo, contribuem para a composição dos sedimentos atividades dos organismos aquáticos, processos vulcânicos e até mesmo detritos de origem extraterrestre (GARRISON, 2016).

Os processos químicos que ocorrem naturalmente em água levam à deposição dos metais, seja por mecanismos de complexação que resultam em precipitação, ou pela baixa solubilidade dos compostos erodidos (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000). Contudo, a ação antrópica tem modificado esta dinâmica, ocasionando a introdução de metais tóxicos nos sedimentos aquáticos pela descarga de rejeitos.

A resolução CONAMA nº454 (BRASIL, 2012) estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. A dragagem é um processo de retirada de sedimentos em fundos de rios, lagoas, mares e canais, para permitir a navegação ou para o desassoreamento. Essa resolução tem como principal objetivo garantir a correta disposição do material removido, evitando assim a contaminação de solos ou águas.

Os valores de referência para presença de metais adotados na resolução foram fundamentados em dados canadenses, que são internacionalmente aceitos para a avaliação da contaminação em amostras de sedimento. O critério canadense foi desenvolvido a partir de um banco de dados do governo do Canadá (CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT, 1995). Foram estabelecidos dois valores denominados *Threshold Effect Level* (TEL) e *Probable Effect Level* (PEL). Concentrações abaixo do TEL indicam que raramente haverá efeito sob a biota. Já concentrações acima do PEL sugerem alta probabilidade de ocorrência de efeitos adversos. O intervalo entre as duas concentrações indica potencial contaminação.

Alguns autores criticam o uso global desses critérios porque acreditam que, em condições tropicais, a dinâmica dos metais nos corpos aquáticos é diferente daquela em que foram estabelecidas, levando a uma interpretação incorreta da contaminação (FRANKLIN; FÁVARO; DAMATO, 2016).

Como não existem estudos suficientemente abrangentes para avaliar o efeito da contaminação sobre a biota existente no Brasil, a própria resolução CONAMA nº 454 (BRASIL, 2012) indica que no caso de valores acima dos orientadores, dentro dos valores basais, definidos como valores naturais que representam concentrações de substâncias químicas de sedimentos de uma determinada região, prevalecem os valores basais. Isto é, a área é considerada não contaminada.

Apesar da dificuldade em obter valores de referência para a avaliação da qualidade de sedimentos brasileiros, a resolução apresenta critérios para garantir a qualidade das análises laboratoriais. Primeiramente foi estabelecido que os laboratórios devessem possuir acreditação pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO), ou que fossem qualificados ou aceitos pelo órgão licenciador.

Quanto ao laudo de análise, destaca-se que o resultado obtido para um material de referência certificado (MRC) de sedimento deve ser informado. Como não existem materiais de referência brasileiros, recorre-se a padrões estrangeiros, ou ainda a fortificações da amostra (*spike*) para avaliar o efeito da matriz da amostra sobre os resultados obtidos.

Essa demanda legal, somada à necessidade de se obter um inventário das concentrações de metais nos sedimentos brasileiros e sua ação toxicológica na biota local, reforça a necessidade de se desenvolver MRC's de sedimentos brasileiros.

Entendemos que os materiais de referência ambientais são cada vez mais necessários, uma vez que a introdução de novos contaminantes nos ecossistemas é crescente e os desafios da análise química acompanham esta tendência. Danos ambientais estão diretamente ligados à preservação de espécies que garantem o equilíbrio ambiental e a qualidade da saúde humana. Assim, por meio de referências metrológicas, podemos apoiar os laboratórios que atuam no controle ambiental, contribuindo para o benefício da sociedade.

A ISO Guide 35 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017), que apresenta os princípios gerais e estatísticos para certificação de materiais de referência, recomenda a realização de um estudo de viabilidade durante o planejamento da produção. Esse estudo é útil para responder questões relacionadas à melhor forma de preparar o material e também para permitir que os laboratórios que serão envolvidos com a certificação efetuem os ajustes necessários em seus equipamentos e procedimentos. O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo de viabilidade a partir da preparação de um lote piloto de sedimento estuarino candidato a material de referência de composição química elementar.

2 Procedimento metodológico

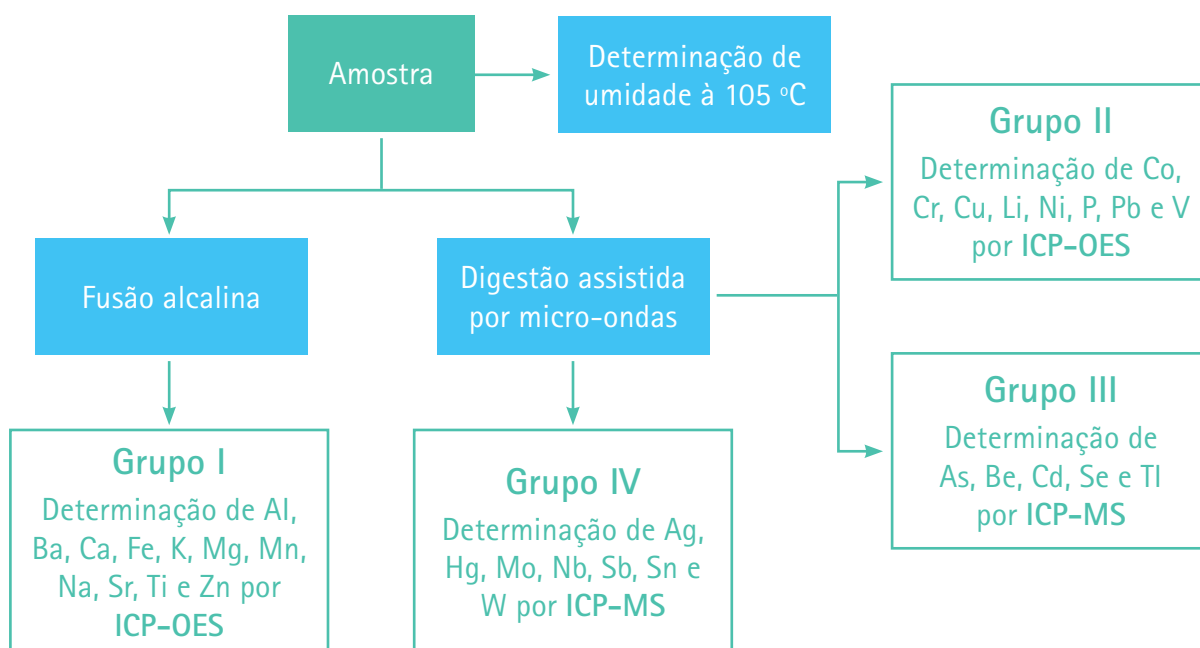
2.1 Determinação de metais

Alguns critérios foram adotados para definir as propriedades que serão candidatas à certificação. Primeiramente, estabeleceu-se que os elementos As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn cujos valores orientadores são estabelecidos pela resolução CONAMA nº 454 (BRASIL, 2012) e monitorados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2017) necessariamente estariam presentes. Além desses, foram incluídos outros elementos potencialmente tóxicos indicados pela Portaria de Consolidação nº5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) e pela Resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011) para água, tais como Sb, Ba, Be, Co, Li, Mn, Ag, Se e V.

Foram incluídos também os metais que majoritariamente compõem os sedimentos dentre eles Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Sr e Ti. Esses metais constituem as principais interferências de matriz do ponto de vista da análise química.

De acordo com o comportamento químico e concentração dos metais em sedimentos foram estabelecidos quatro grupos para a sua determinação. A **Figura 1** ilustra o fluxograma de trabalho adotado. A digestão em micro-ondas foi realizada com 0,25 g de amostra e 9 mL de HNO₃ : 3 mL de HCl : 8 mL de HF em vaso de Teflon® para alta pressão (máx. 100 bar). A fusão alcalina foi realizada em forno mufla a 1000 °C por 30 min com 0,1 g de cinzas da amostra a 450 °C e 1 g do fundente 1 LiBO₃ : 2 LiB₄O₇.

Figura 1 – Fluxograma de trabalho de acordo com o grupo de elementos



Fonte: Elaborado pelos autores

As condições instrumentais para a determinação por ICP-OES e ICP-MS encontram-se nas **Tabelas 1 e 2**, respectivamente. Os comprimentos de onda e os isótopos utilizados são listados nas **Tabelas 3 e 4**. O ICP-OES empregado, modelo Vista MPX, marca Varian, apresenta configuração do tipo radial. O ICP-MS, modelo 7500 ce, marca Agilent, apresenta cela de colisão e reação para supressão de interferências espectrais.

Os materiais de referência empregados no controle de qualidade das metodologias analíticas estão apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 1 – Principais parâmetros instrumentais para determinação por ICP-OES

Parâmetro	Condição	
	Grupo I	Grupo II
Potência da radiofrequência	1000 W	1100 W
Fluxo de gás do plasma	15 L.min ⁻¹	15 L.min ⁻¹
Fluxo de gás auxiliar	1,5 L.min ⁻¹	1,5 L.min ⁻¹
Fluxo do nebulizador	0,7 L.min ⁻¹	0,6 L.min ⁻¹
Altura de observação	8 mm	8 mm
Tempo de leitura	5 s	20 s
Câmara de nebulização	Sturman-Masters	

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 2 – Principais parâmetros instrumentais para determinação por ICP-MS

Parâmetro	Condição
Potência da radiofrequência	1500 W
Profundidade de amostragem	7 mm
Fluxo de gás do plasma	0,8 mL.min ⁻¹
Fluxo de gás auxiliar	0,2 mL.min ⁻¹
Fluxo de gás da cela de colisão	He, 4 mL.min ⁻¹
Cones	Níquel
Temperatura da câmara de nebulização	2 °C
Padrão interno	Re, Rh e In 50 µg.kg ⁻¹

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 3 – Comprimentos de onda empregados na determinação por ICP-OES

Elemento	Comprimento de onda (nm)
Al	308,215
Ba	233,527
Ca	422,673
Co	230,786
Cr	267,716
Cu	327,395
Fe	238,204
K	766,491
Li	670,783
Mg	285,213
Mn	257,610
Na	589,592
Ni	216,555
P	177,434
Pb	220,353
Sr	407,771
Ti	334,188
V	292,401
Zn	213,857

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 4 – Isótopos e modos empregados na determinação por ICP-MS

Elemento	Massa (u.m.a.)	Modo
Ag	109	Padrão
As	75	Colisão
Be	9	Padrão
Cd	111	Padrão
Hg	200	Padrão
Mo	97	Padrão
Nb	93	Padrão
Sb	121	Padrão
Se	82	Padrão
Sn	118	Padrão
Tl	205	Padrão
W	182	Padrão
Zn	66	Padrão

Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 5 – Materiais de referência empregados para controle de qualidade

Material	Origem	Matriz	Elementos
NIST 2702	EUA	Sedimento marinho	Al, Ag, As, Ba, (Be), Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, K, (Li), Mg, Mo, Mn, Na, (Nb), Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, V, (W), Zn
MESS-4	Canadá	Sedimento marinho	Al, Ag, As, (Ba), Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mo, Mn, Na, (Nb), Ni, P, Sb, (Se), Sn, Sr, Ti, Tl, V, (W), Zn
SARM 52	África do Sul	Sedimento de córrego	(Al), (Ba), (Ca), (Co), (Cr), (Cu), (Fe), (K), (Mg), (Mn), (Na), (Ni), (P), (Pb), (Sr), (Ti), (V)
JLk-1	Japão	Sedimento de rio	(Al), (Ag), (As), (Ba), (Be), (Ca), (Cd), (Co), (Cr), (Cu), (Fe), (Hg), (K), (Li), (Mg), (Mo), (Mn), (Na), (Nb), (Ni), (P), (Pb), (Sb), (Se), (Sn), (Sr), (Ti), (Tl), (V), (W), (Zn)
JSd-2	Japão	Sedimento de lago	(Al), (Ag), (As), (Ba), (Be), (Ca), (Cd), (Co), (Cr), (Cu), (Fe), (Hg), (K), (Li), (Mg), (Mn), (Na), (Ni), (P), (Pb), (Sb), (Se), (Sn), (Sr), (Ti), (V), (Zn)

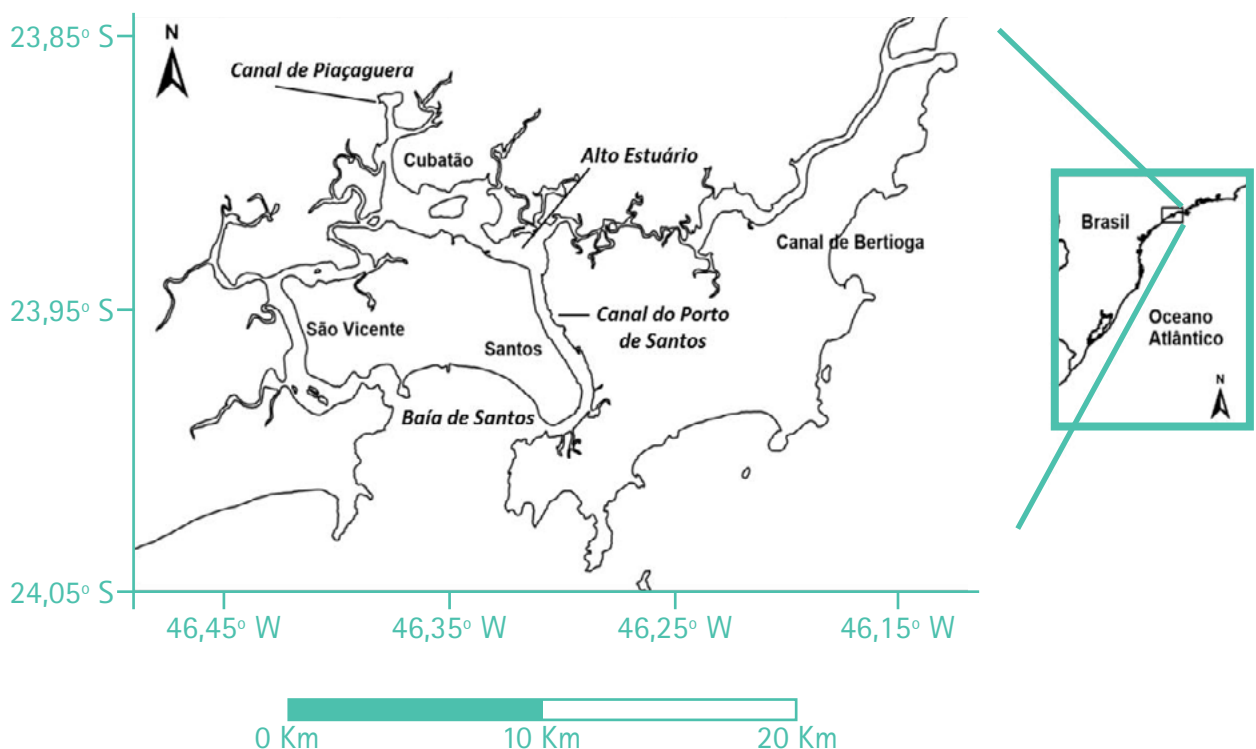
(Valores não certificados, sem atribuição de incerteza)

Fonte: elaborado pelos autores

2.2 Coleta e preparo de material para lote piloto

A região escolhida para a coleta foi o Complexo Estuarino de Santos e São Vicente ilustrada na **Figura 2**. Os canais de São Vicente e de Bertioga são majoritariamente influenciados pelos rejeitos domésticos oriundos destas duas cidades. Assim como a Baía de Santos, além de receber esgoto clandestino do município santista e do Guarujá, concentra as principais atividades de turismo. Já o canal de Piaçaguera foi historicamente contaminado por poluição industrial da região de Cubatão. O canal do Porto de Santos é frequentemente submetido a processos de dragagem para garantir o escoamento da produção agrícola e industrial brasileira através do maior porto do Brasil. Na região do alto estuário de Santos e São Vicente, dá-se o encontro entre as marés e a foz dos rios que desembocam na região.

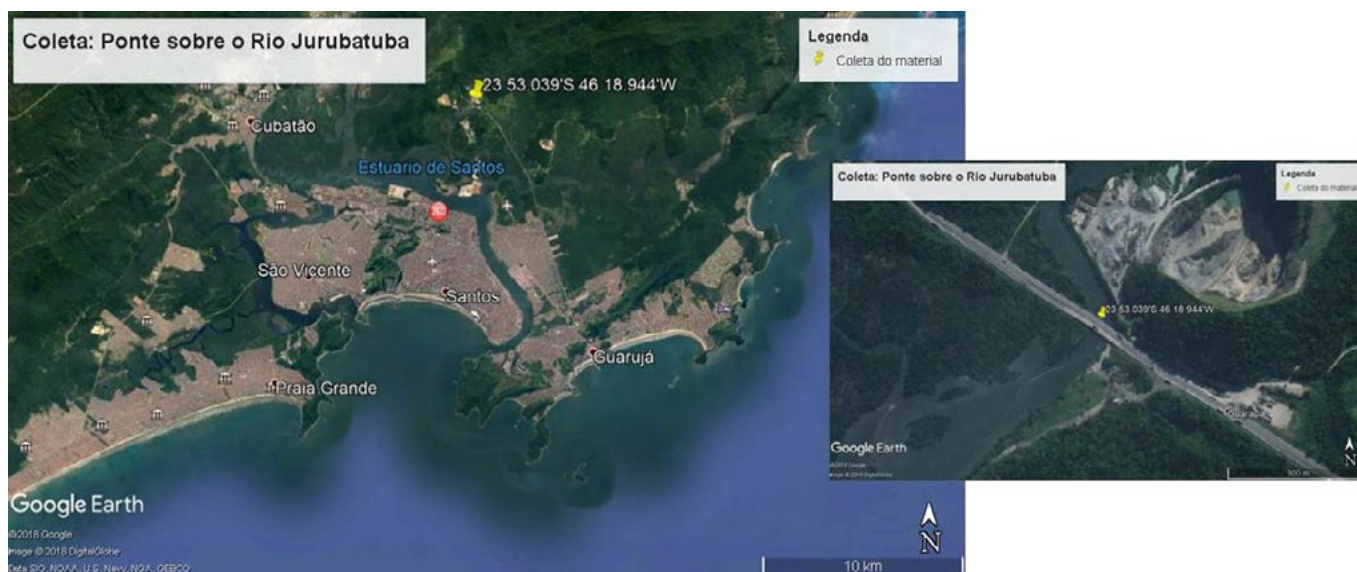
Figura 2 – Região do Complexo Estuarino de Santos e São Vicente



Fonte: elaborado pelos autores

Optou-se pela coleta na região do alto estuário, onde estudos anteriores indicaram a presença de material com maior fração de argilas (KIM et al., 2016). Essa fração tende a acumular maior concentração de metais potencialmente tóxicos. O ponto de coleta foi a Ponte sobre o Rio Jurubatuba, localizada na rodovia Cônego Domênico Rangoni (SP-055 / SPA-248/055 / BR-101), km 253 (**Figura 3**). A coleta foi realizada no dia 11 de julho de 2018, nas coordenadas 23°53,039'S / 46°18,944'W.

Figura 3 – Ponto de Coleta



Fonte: Google Earth (2018)

Utilizou-se uma draga do tipo Van-Veen para retirada do sedimento. Para garantir a manipulação segura, o material foi submetido à esterilização no Irradiador Multipropósito de Cobalto 60 do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), com uma dose de radiação gama de 25 kGy. A secagem foi realizada à temperatura ambiente. Foram obtidos 4,5 kg de material seco. Realizou-se a moagem em moinho de bolas e homogeneização em misturador do tipo V. O material processado foi submetido à caracterização química e à análise do tamanho de partículas por espalhamento de difração a laser.

A dispersão do tamanho de partícula foi determinada em um analisador modelo Mastersizer 2000, marca Malvern, com dispersão em água deionizada em ultrassom por 1 min, com velocidade da bomba de 2500 rpm.

3 Resultados e discussão

3.1 Avaliação do desempenho das metodologias de análise química com materiais de referência

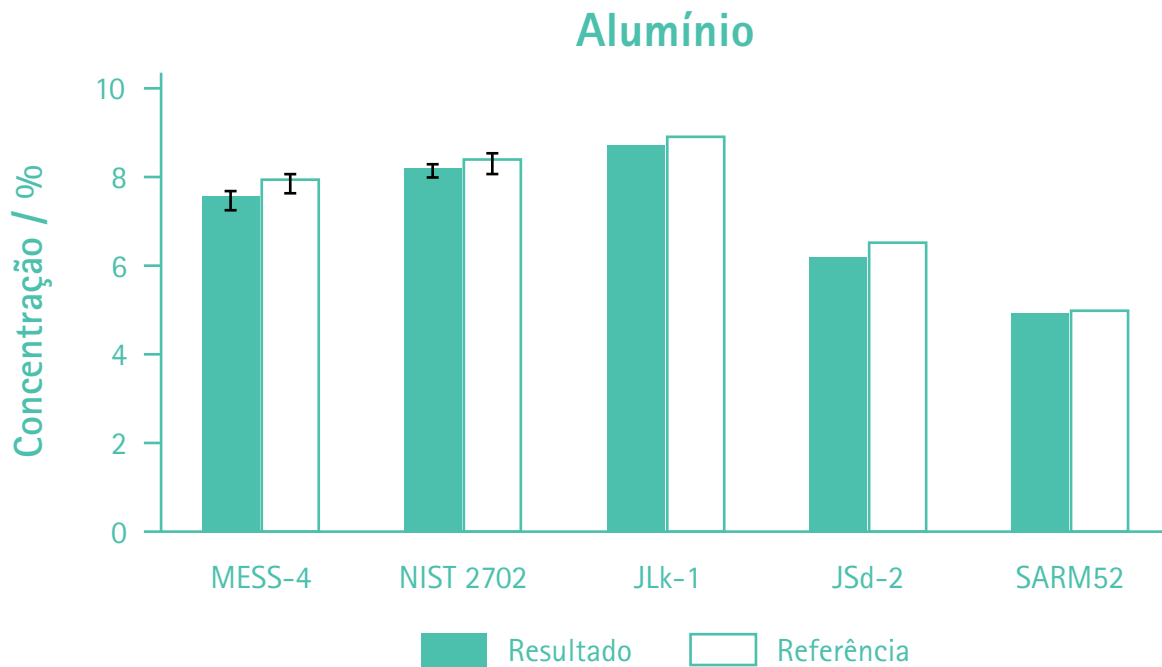
As **Figuras 4 a 34** ilustram os resultados obtidos por elemento para os materiais de referência analisados em relação aos valores de referência. Para os dois materiais que são certificados (apresentam incerteza associada aos valores de referência) MESS-4 e NIST 2702, a incerteza foi representada nas barras de erros. A incerteza para os resultados foi estimada para um fator de abrangência $k = 2$.

Foram obtidas recuperações entre 90 % e 110 % para a maioria dos elementos, com algumas exceções. Para o mercúrio no material de referência NIST 2702, obteve-se uma concentração de $(0,32 \pm 0,09)$ mg.kg⁻¹, sendo o valor certificado de $(0,447 \pm 0,007)$ mg.kg⁻¹. Contudo, para os demais materiais nos quais a concentração de mercúrio é menor que 0,2 mg.kg⁻¹, foram obtidas recuperações de 100 %. Assim, concluímos que para concentrações de mercúrio maiores que este limite deve ocorrer perdas deste elemento por volatilização no processo de dissolução da amostra.

No caso do lítio, foi obtida recuperação de 86 % para o material NIST 2702. Porém, esse elemento não foi certificado no material, assim a comparação entre o resultado (67 ± 4) mg.kg⁻¹ e o valor informativo 78 mg.kg⁻¹ é realizada com menor confiança que para o material MESS-4, em que o resultado (61 ± 4) mg.kg⁻¹ está dentro da faixa de incerteza do valor certificado, que é de (65 ± 8) mg.kg⁻¹.

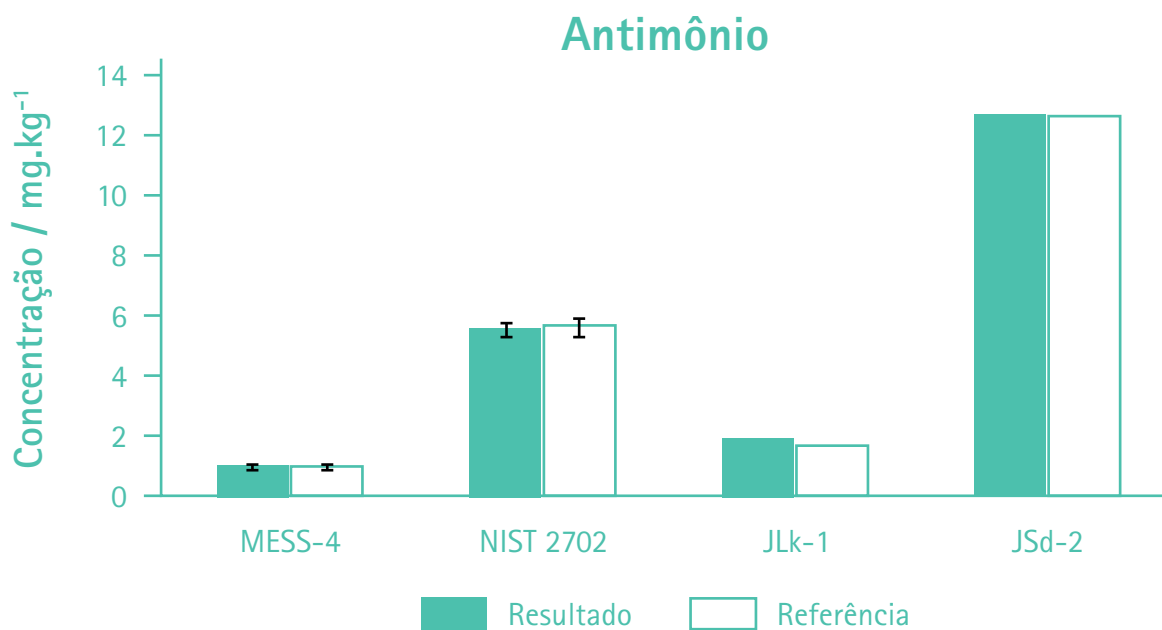
Para os demais elementos, algumas recuperações fora da faixa de 90 % a 110 % foram observadas somente para os materiais Jlk-1, JSd-2 e SARM 52, cujos valores de referência não apresentam incerteza estimada.

Figura 4 - Resultados obtidos para alumínio



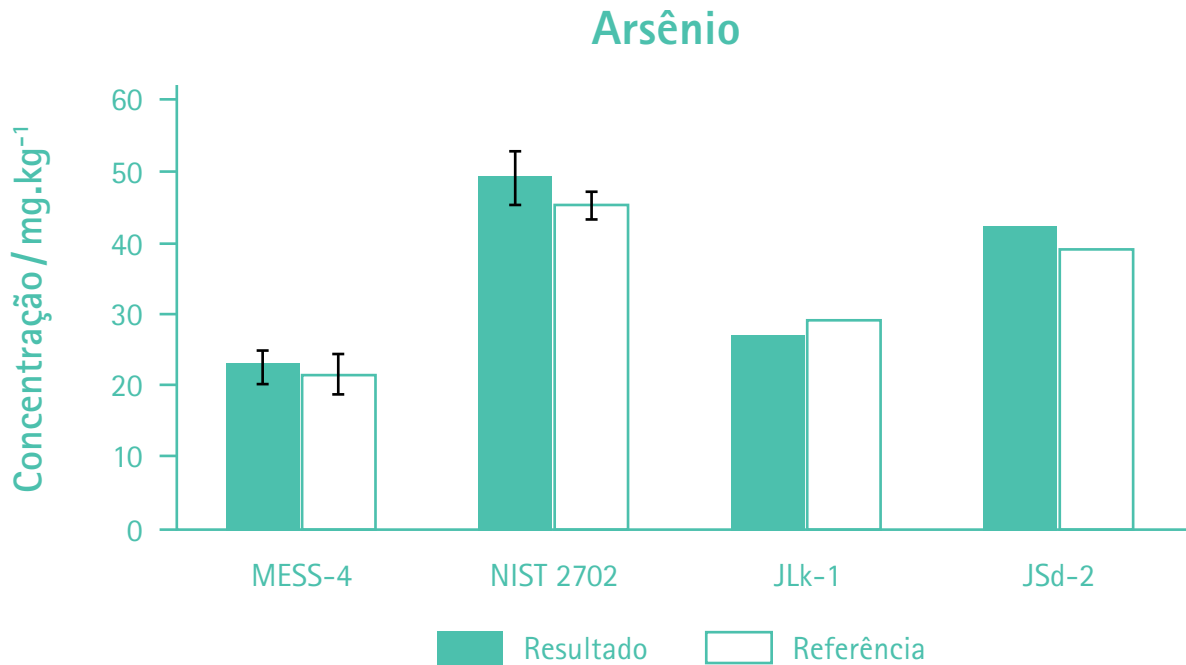
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 5 - Resultados obtidos para antimônio



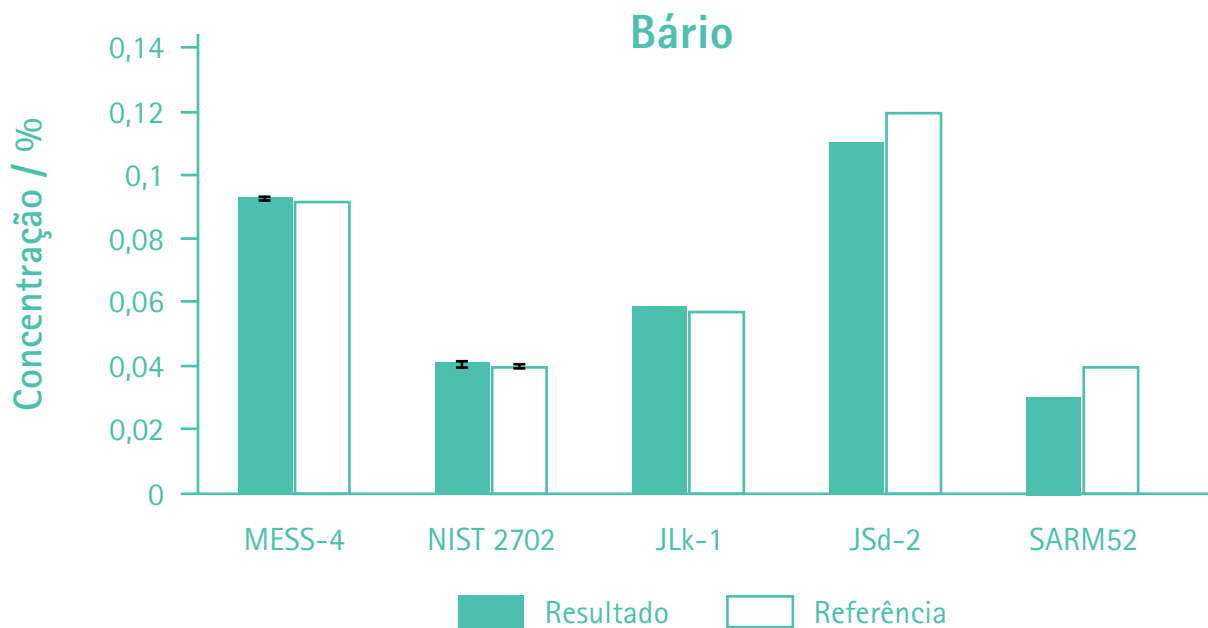
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 6 – Resultados obtidos para arsênio



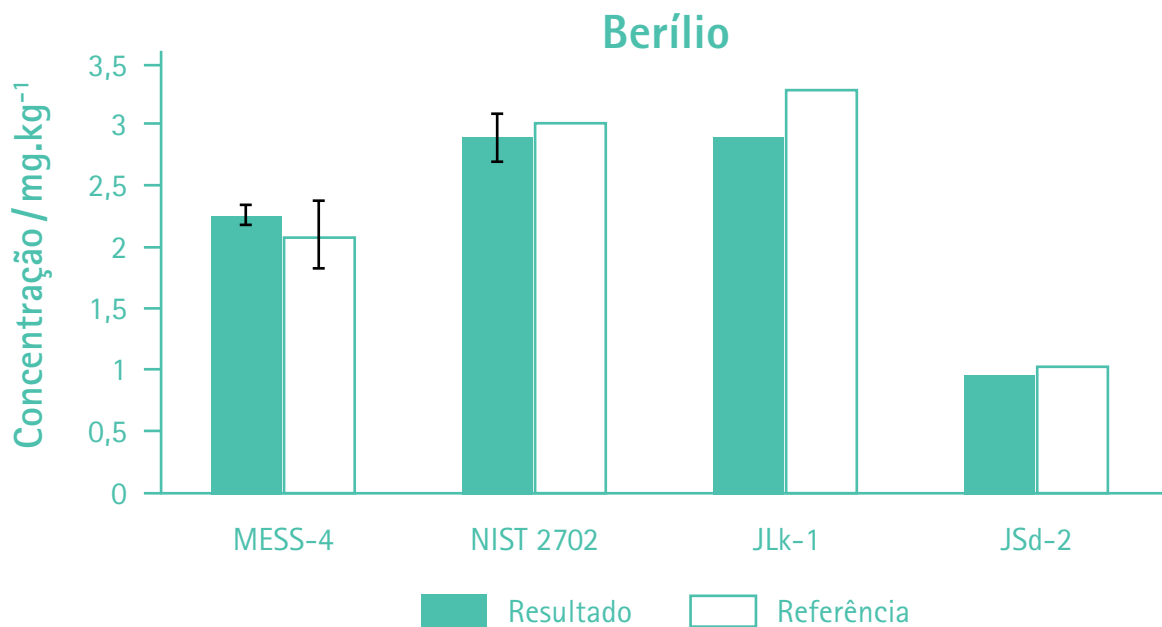
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 7 – Resultados obtidos para bário



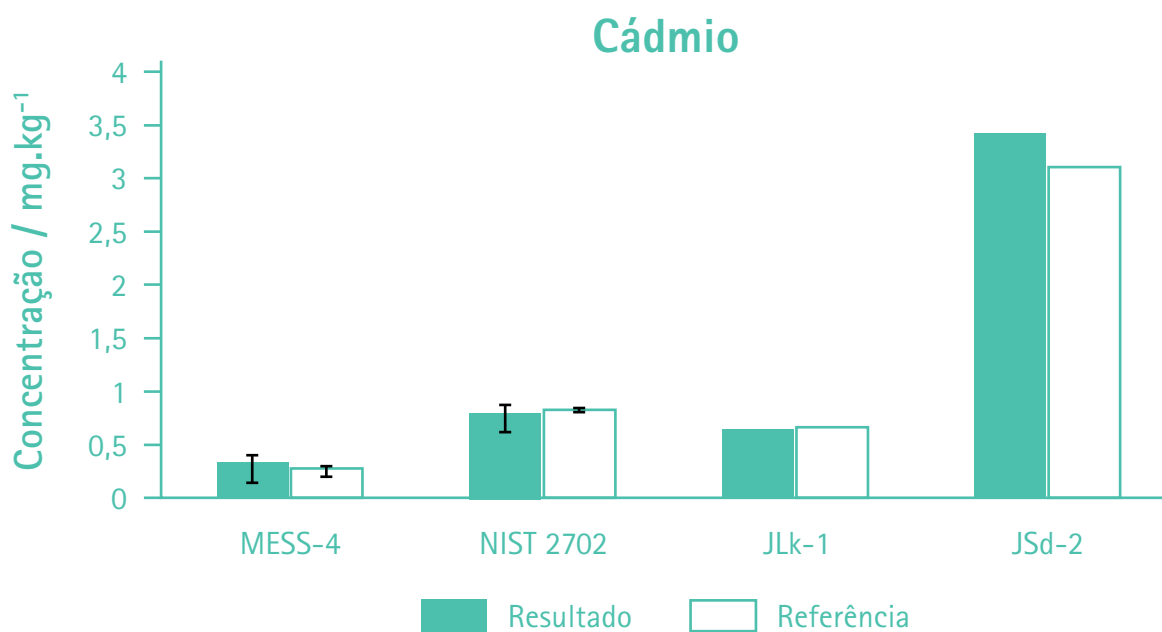
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 8 - Resultados obtidos para berílio



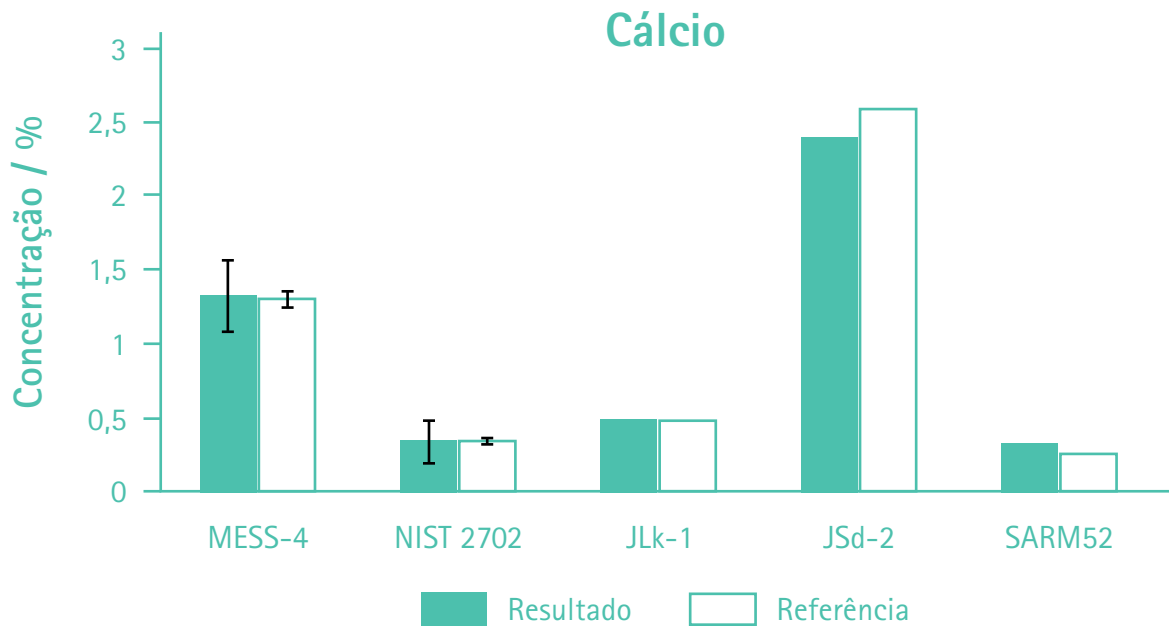
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 9 - Resultados obtidos para cádmio



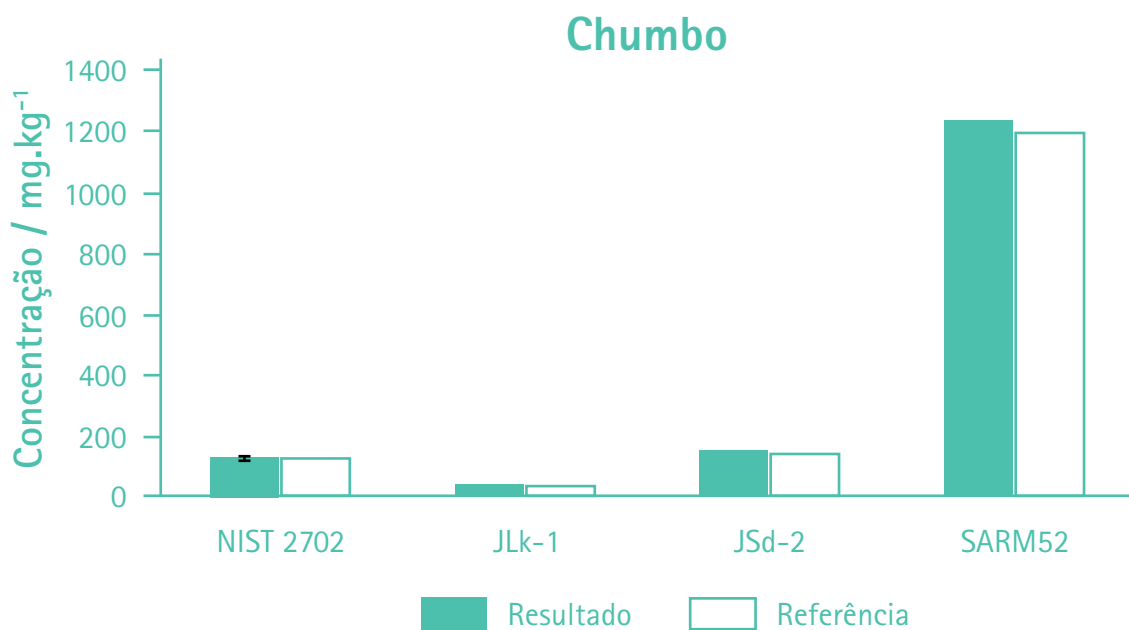
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 10 – Resultados obtidos para cálcio



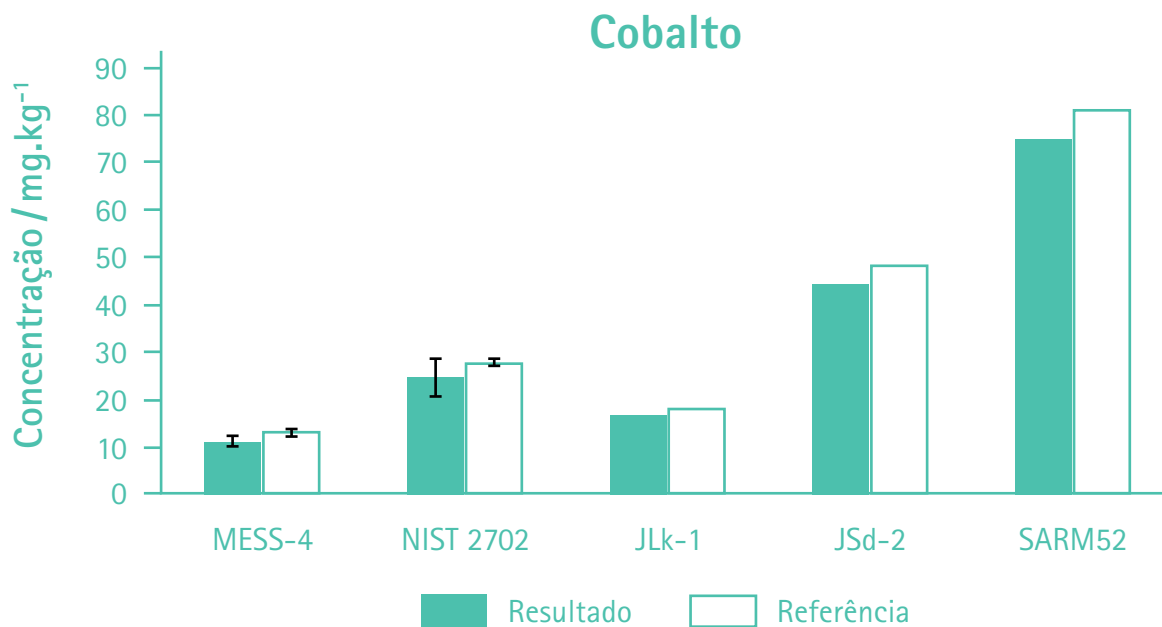
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 11 – Resultados obtidos para chumbo



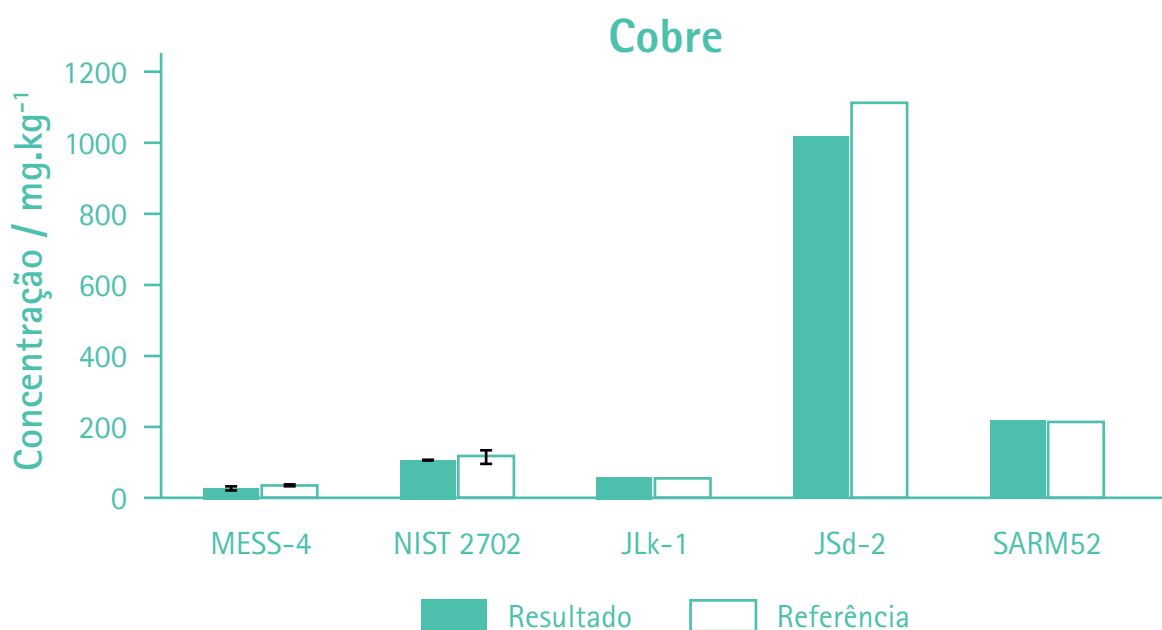
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 12 – Resultados obtidos para cobalto



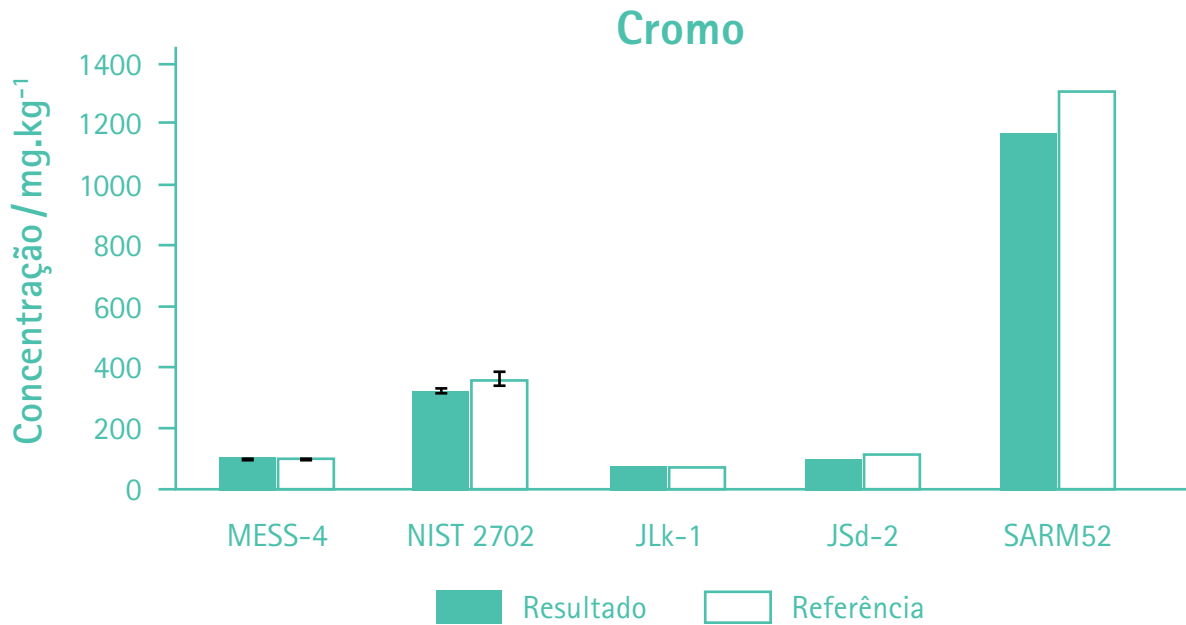
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 13 – Resultados obtidos para cobre



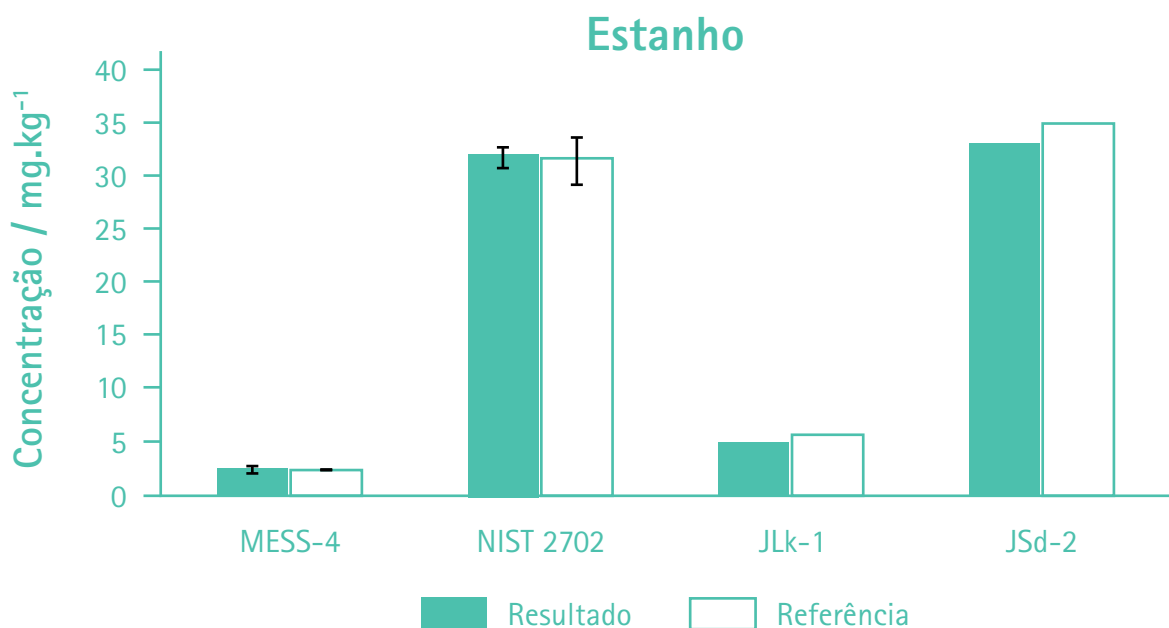
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 14 – Resultados obtidos para cromo



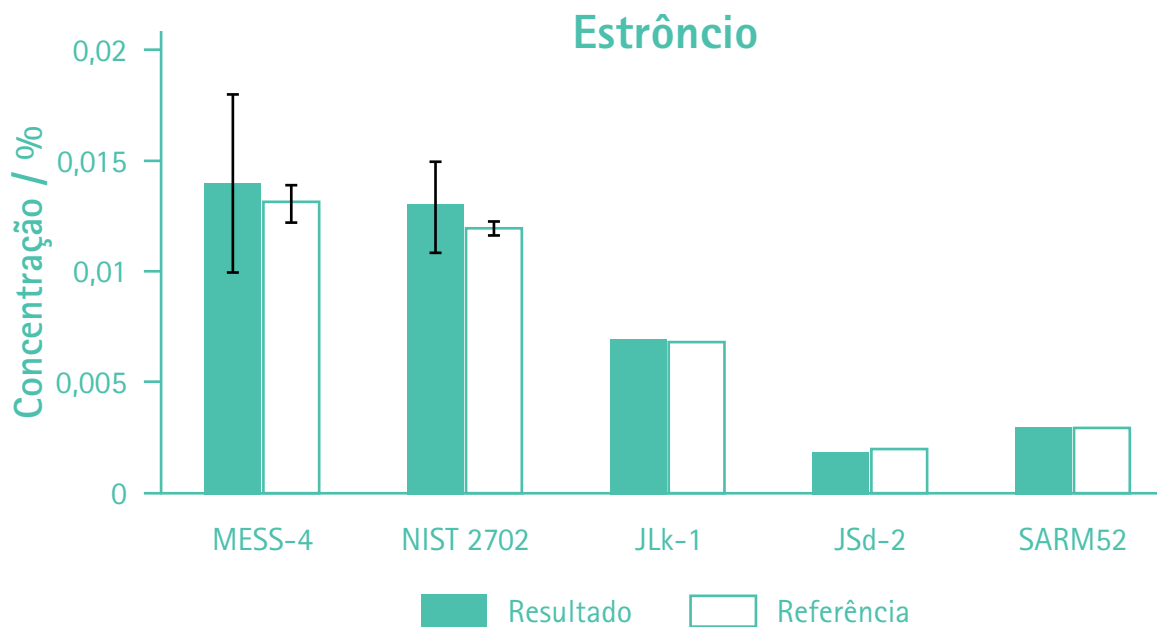
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 15 – Resultados obtidos para estanho



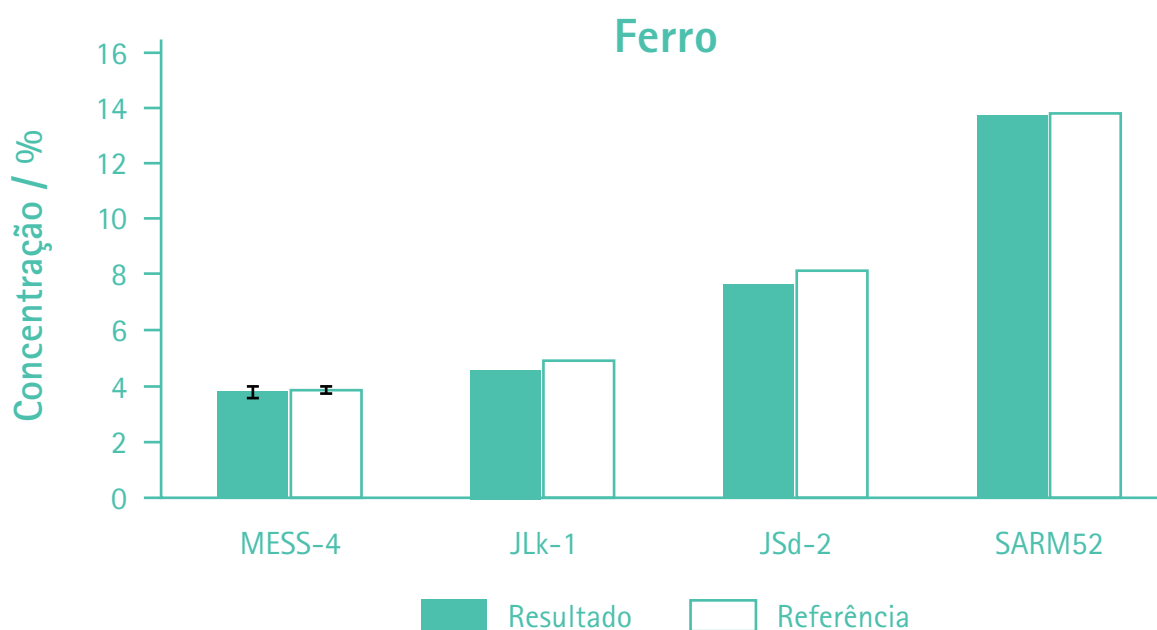
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 16 – Resultados obtidos para estrôncio



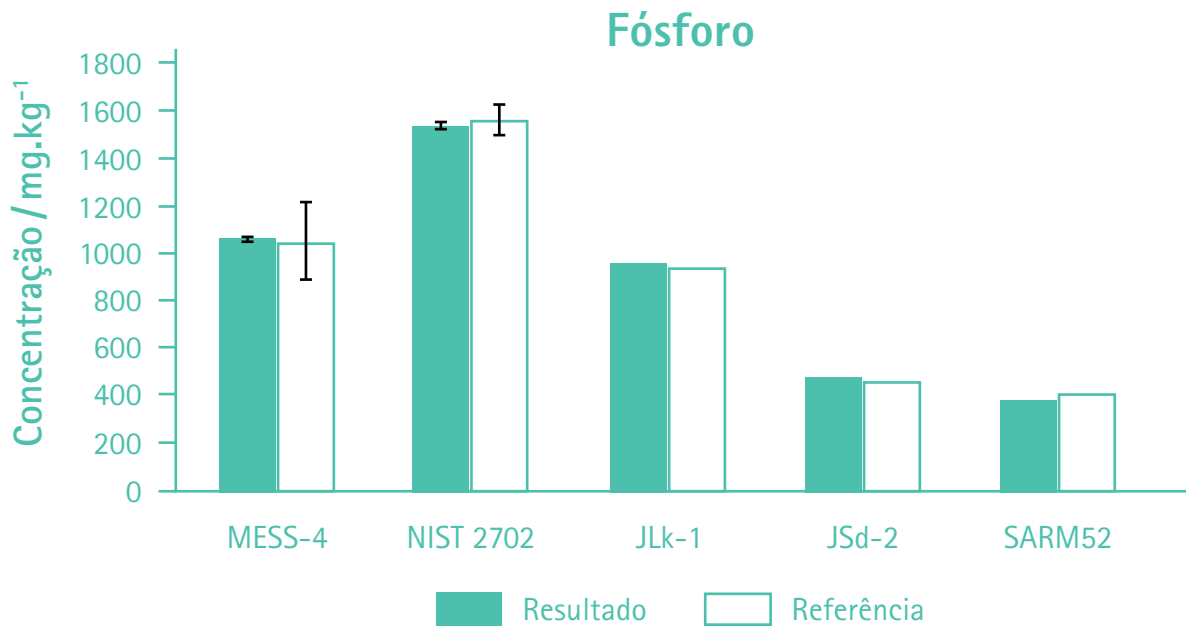
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 17 – Resultados obtidos para ferro



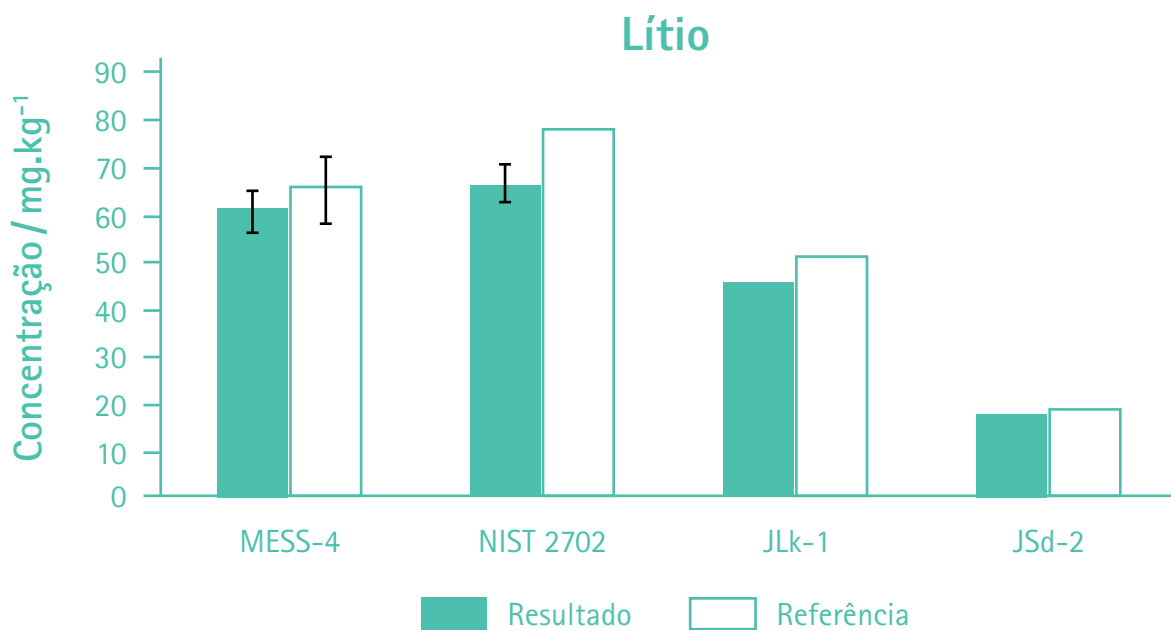
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 18 – Resultados obtidos para fósforo



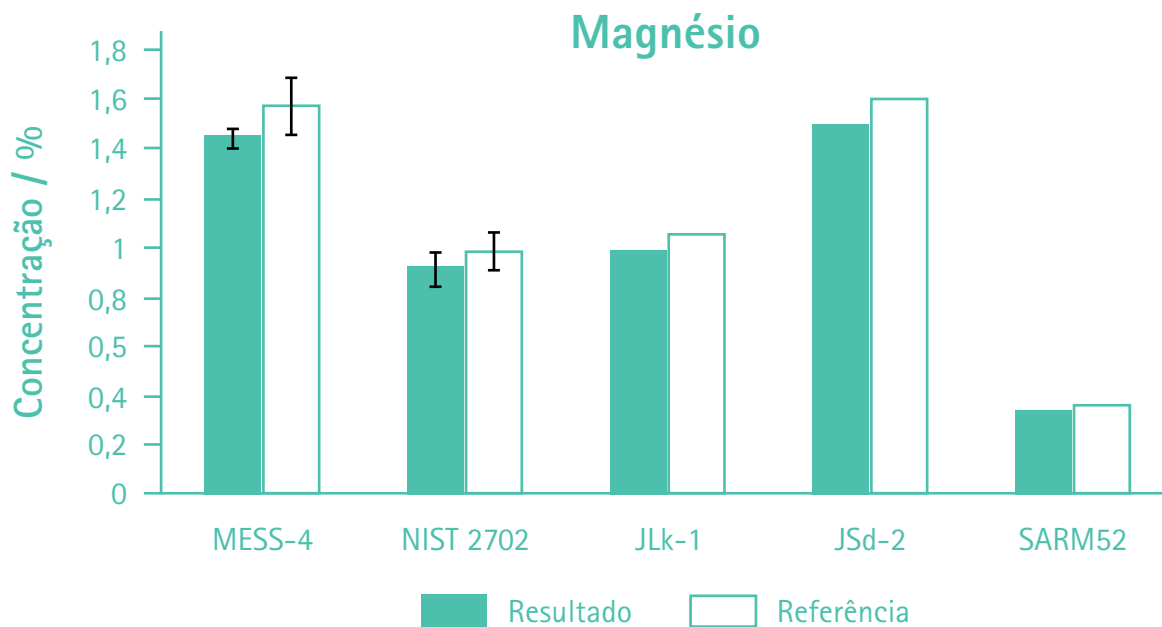
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 19 – Resultados obtidos para lítio



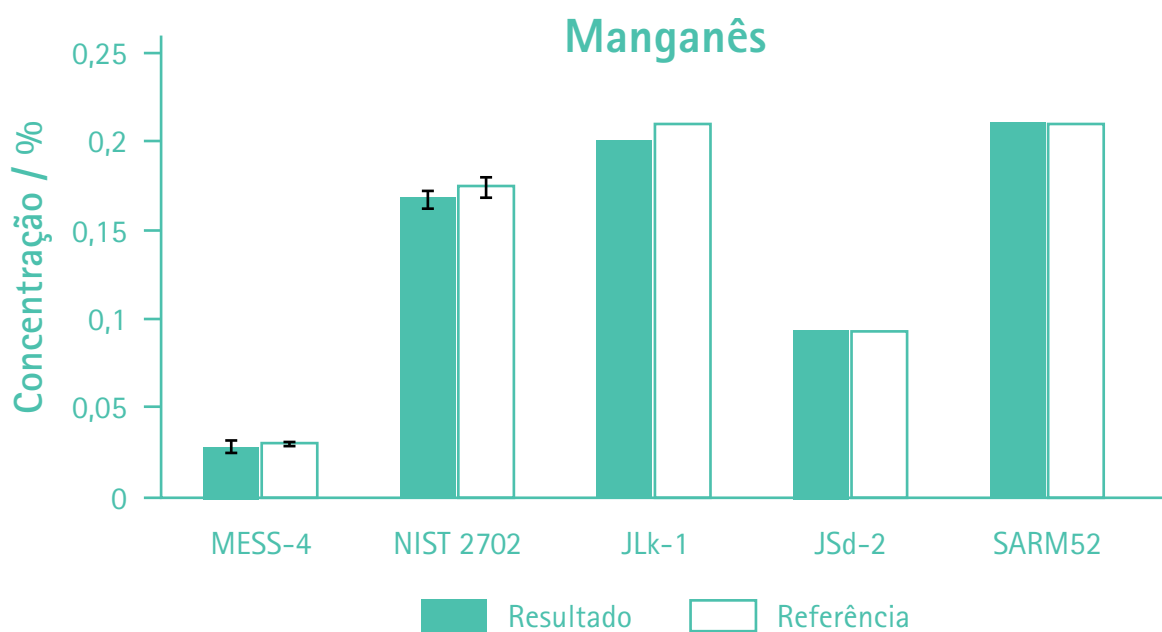
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 20 – Resultados obtidos para magnésio



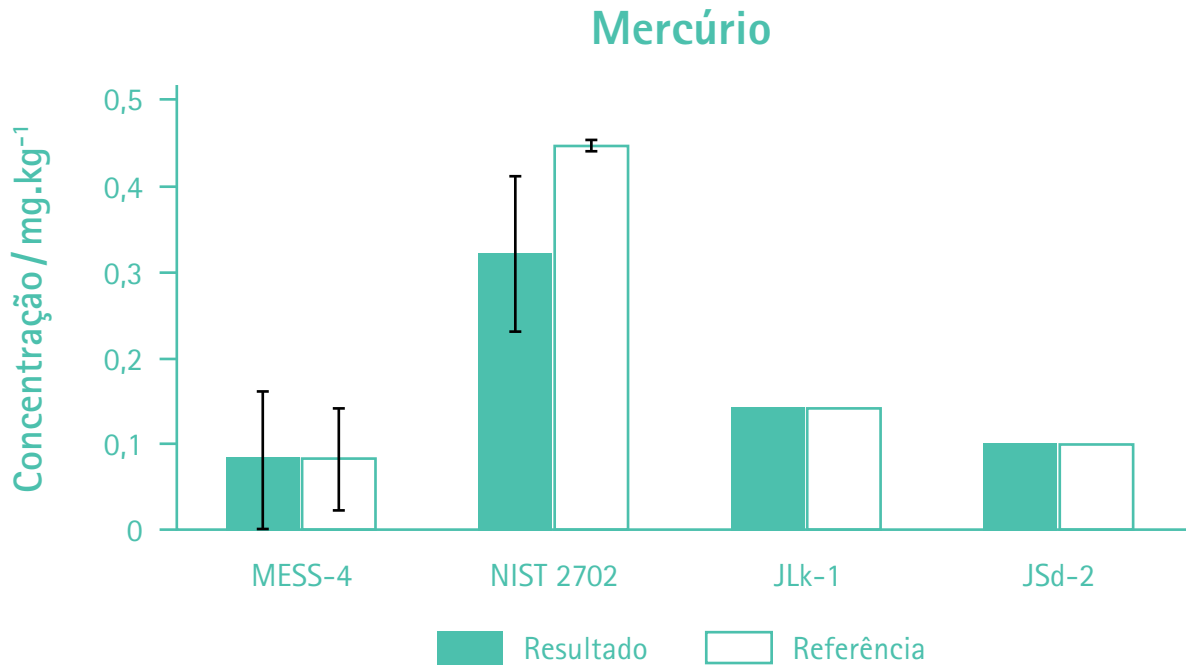
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 21 – Resultados obtidos para manganês



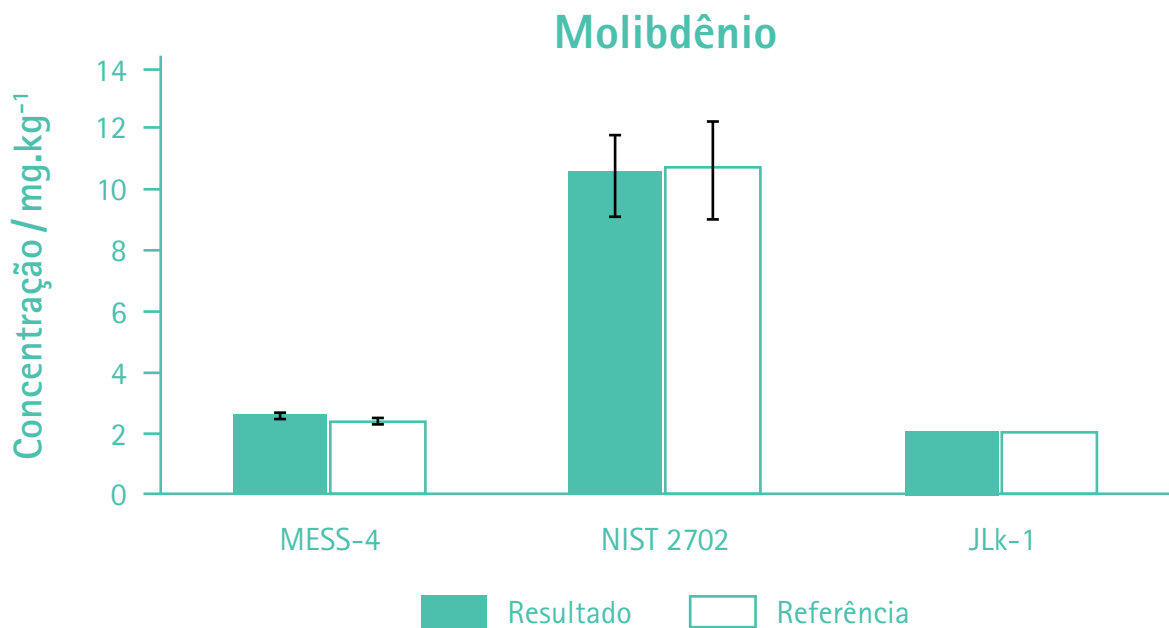
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 22 – Resultados obtidos para mercúrio



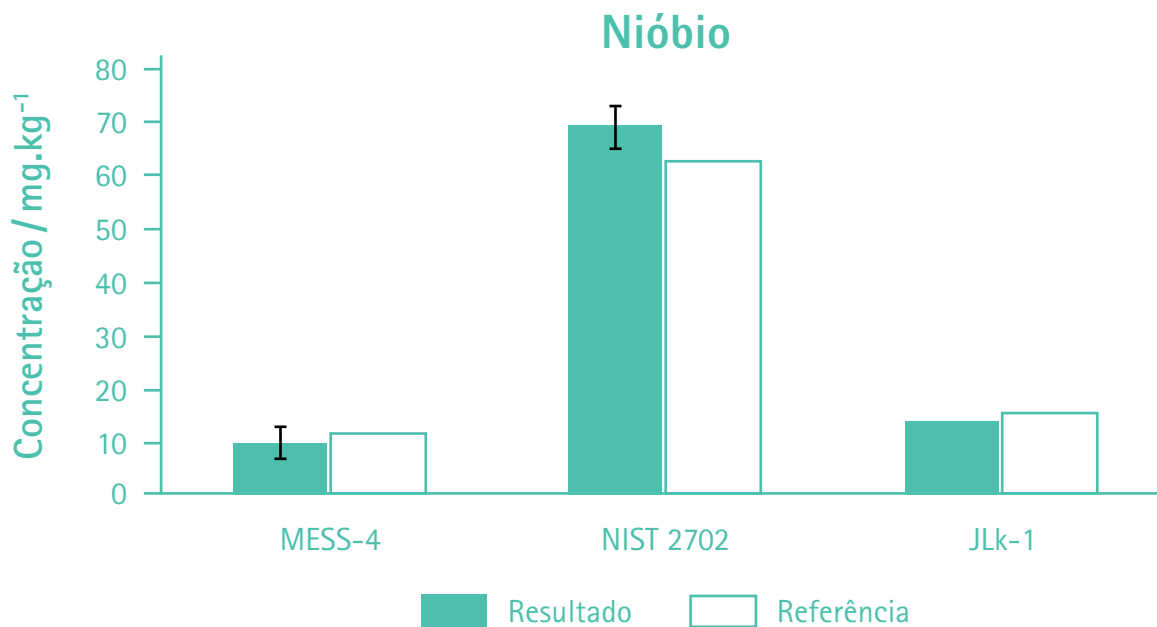
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 23 – Resultados obtidos para molibdênio



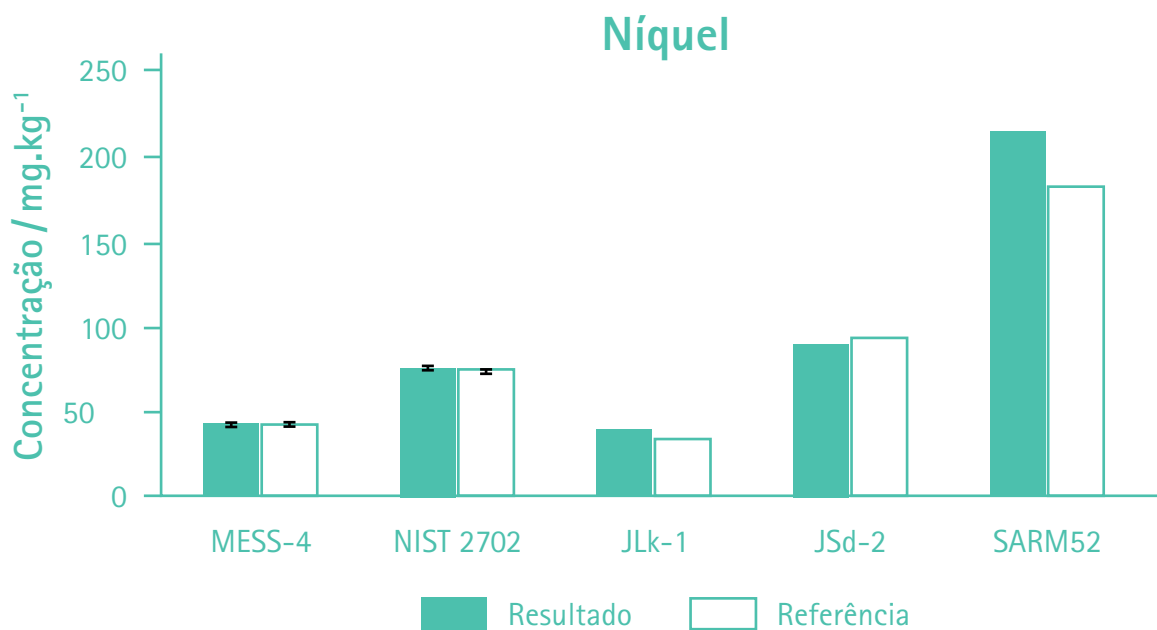
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 24 – Resultados obtidos para nióbio



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 25 – Resultados obtidos para níquel



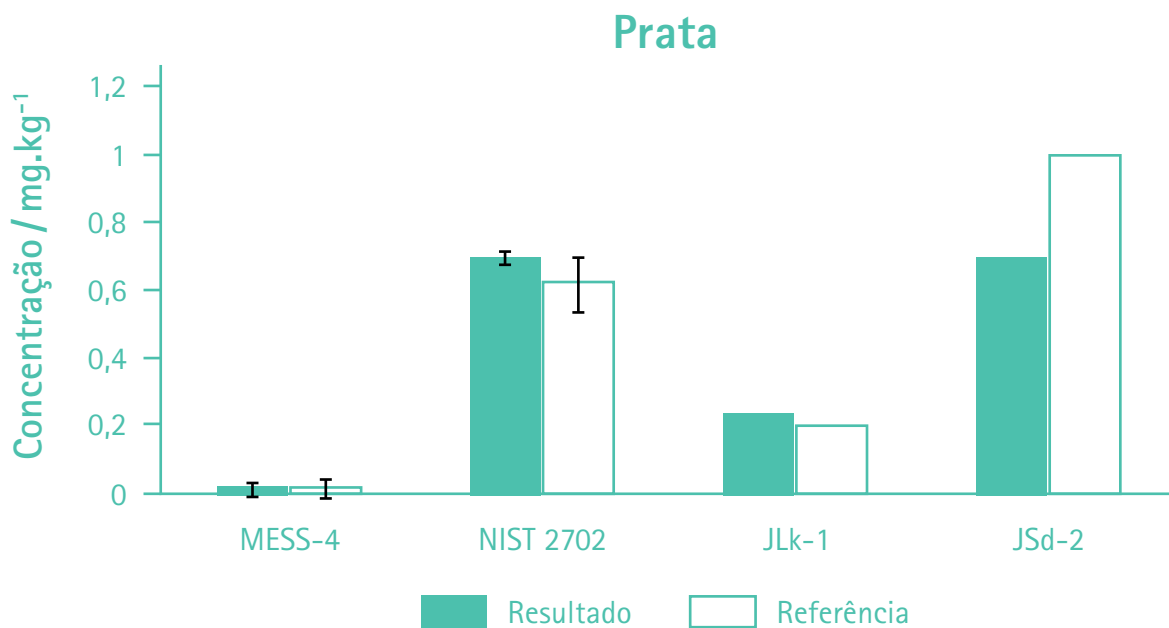
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 26 – Resultados obtidos para potássio



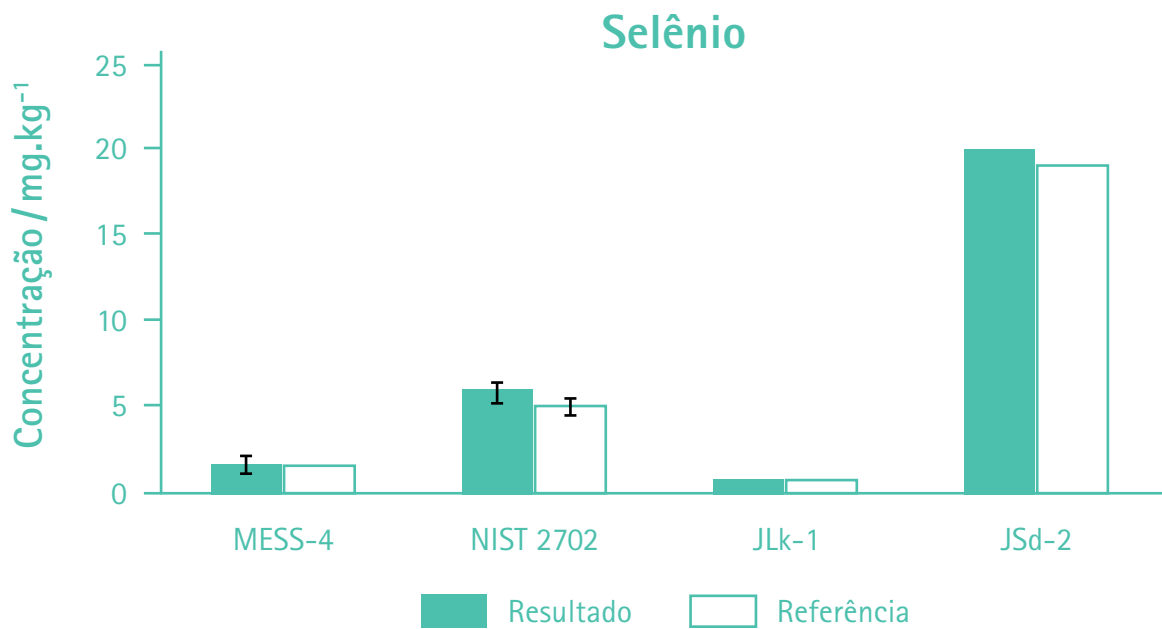
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 27 – Resultados obtidos para prata



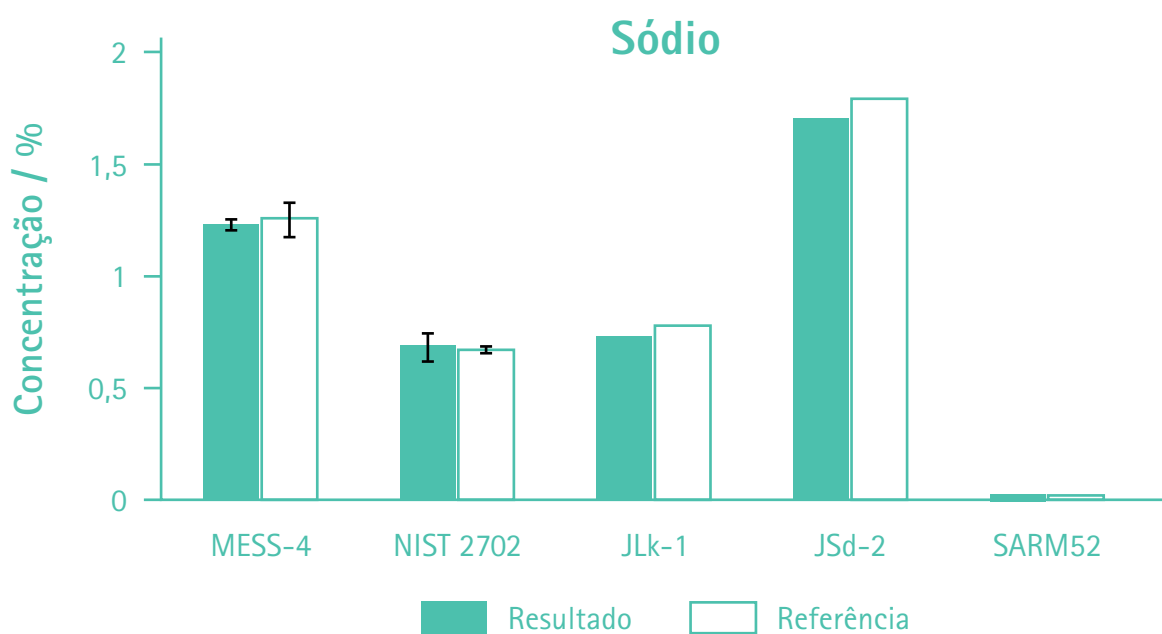
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 28 – Resultados obtidos para selênio



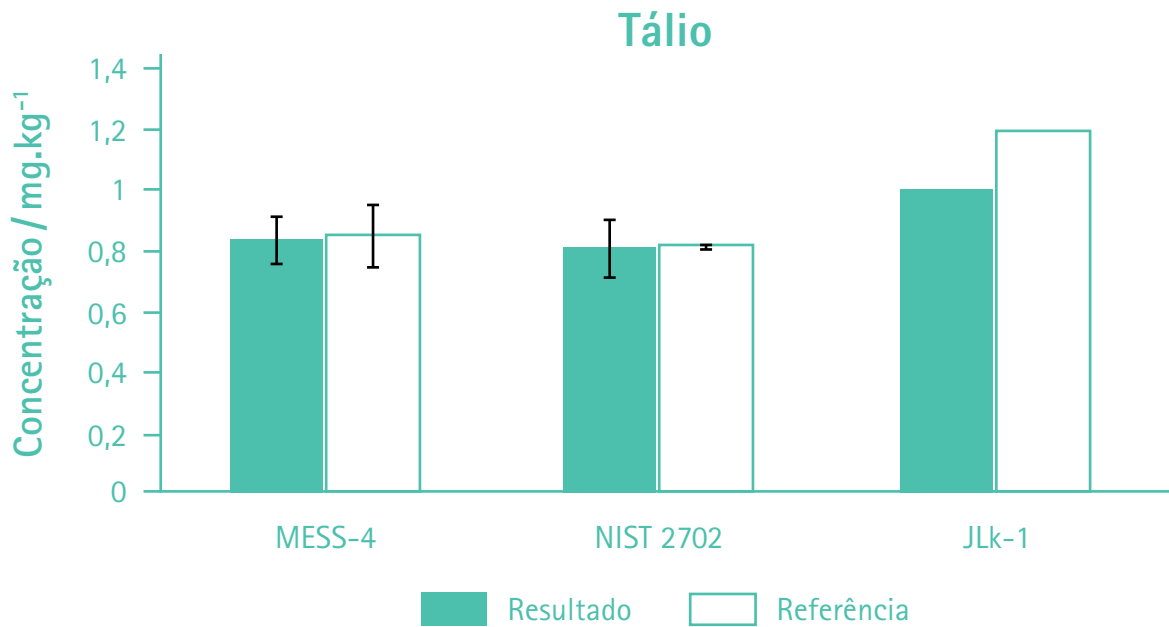
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 29 – Resultados obtidos para sódio



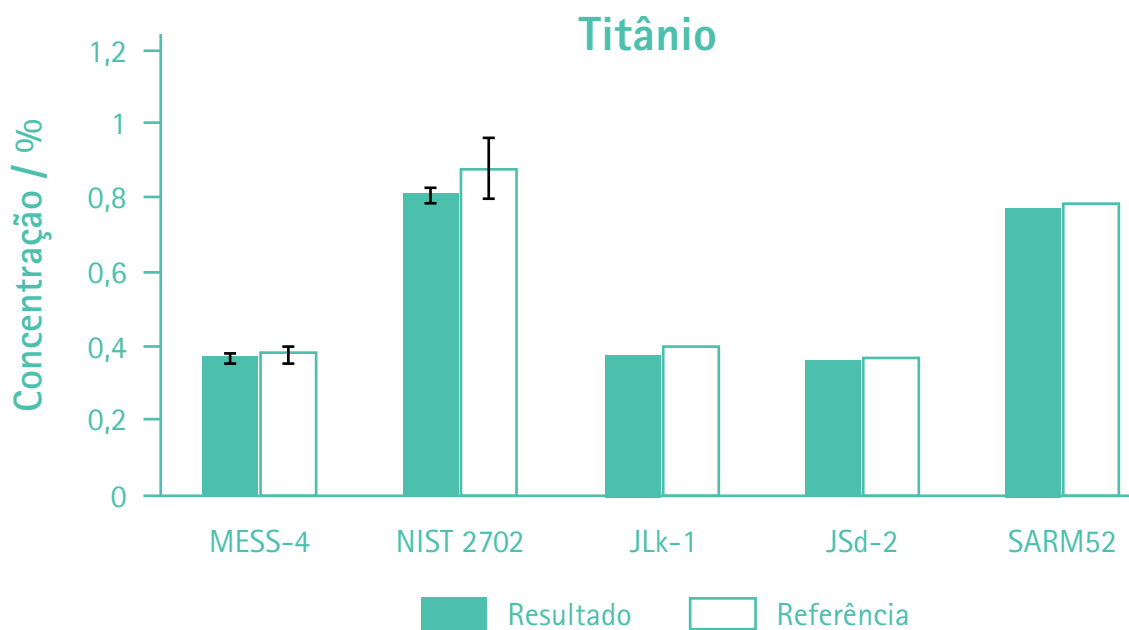
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 30 – Resultados obtidos para tálio



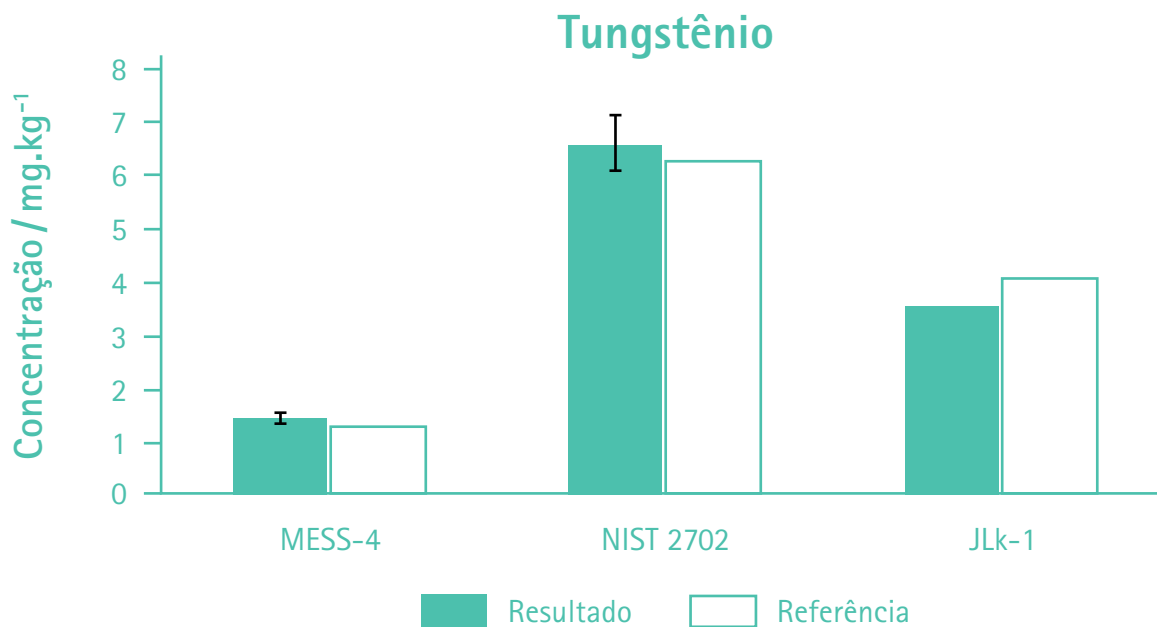
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 31 – Resultados obtidos para titânio



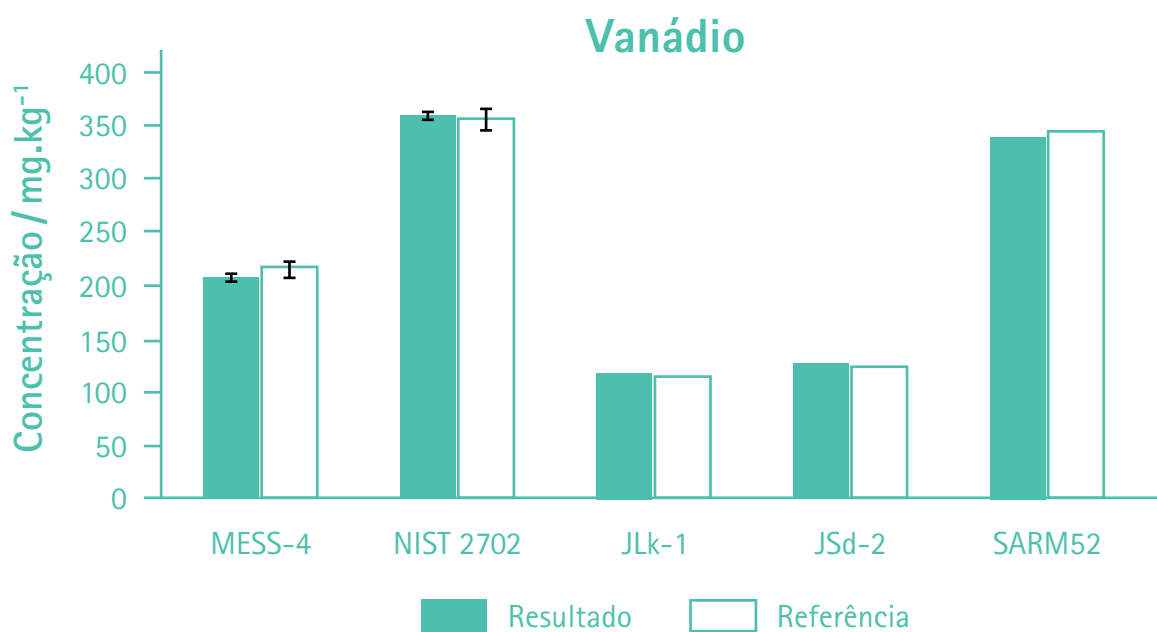
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 32 – Resultados obtidos para tungstênio



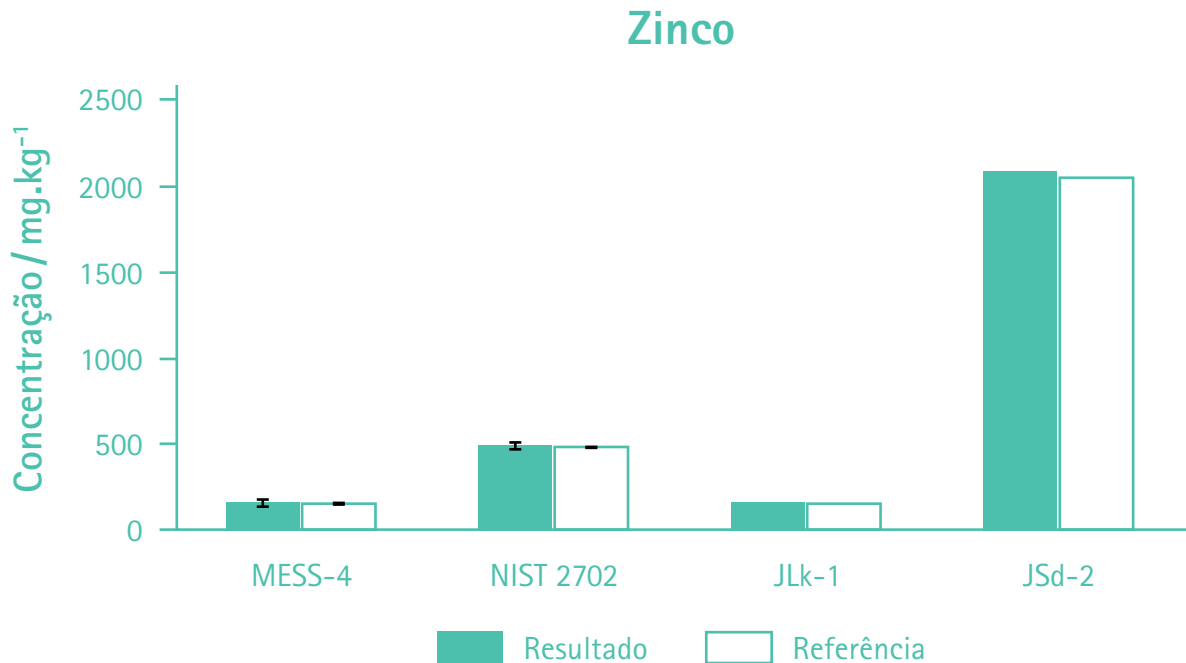
Fonte: elaborado pelos autores

Figura 33 – Resultados obtidos para vanádio



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 34 – Resultados obtidos para zinco



Fonte: elaborado pelos autores

3.2 Resultados de caracterização do lote piloto

A **Tabela 6** apresenta os resultados da caracterização química do lote piloto, em que foi possível verificar que a concentração nos quatro frascos intermediários foi homogênea, indicando eficiência no processo de mistura. O material apresentou teores de metais potencialmente tóxicos abaixo dos valores orientadores estabelecido pelo CONAMA nº 454 (BRASIL, 2012) para água salina ou salobra (Nível II) que são: As = 70 mg.kg⁻¹; Cd = 7,2 mg.kg⁻¹; Cr = 370 mg.kg⁻¹; Cu = 270 mg.kg⁻¹; Hg = 1,0 mg.kg⁻¹; Ni = 51,6 mg.kg⁻¹; Pb = 218 mg.kg⁻¹ e Zn = 410 mg.kg⁻¹. Dessa forma, o material coletado não apresentou nível de contaminação no qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota. Tampouco o processamento contribuiu para elevar os teores desses metais a ponto de ultrapassar os limites estabelecidos.

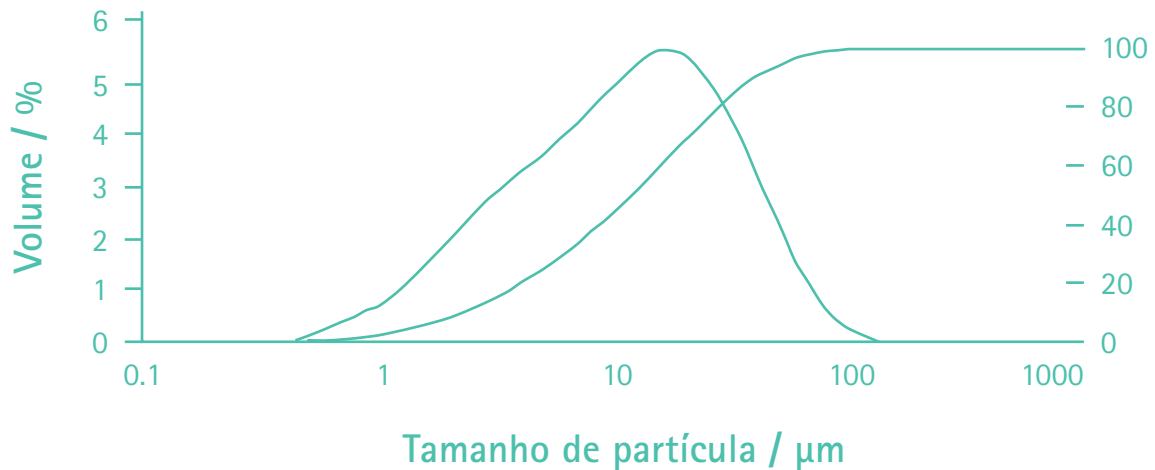
Tabela 6 – Resultados obtidos para o lote piloto

Elemento	Unidade	Frasco 1	Frasco 2	Frasco 3	Frasco 4	Média
Ag	mg.kg ⁻¹	0,15	0,17	0,14	0,14	0,15 ± 0,03
Al	%	9,2	9,2	9,3	9,5	9,3 ± 0,3
As	mg.kg ⁻¹	6,5	6,3	6,4	6,2	6,4 ± 0,3
Ba	mg.kg ⁻¹	364	368	363	367	366 ± 5
Be	mg.kg ⁻¹	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2 ± 0,1
Ca	%	0,75	0,76	0,77	0,80	0,77 ± 0,04
Cd	mg.kg ⁻¹	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24 ± 0,01
Co	mg.kg ⁻¹	9,1	9,6	9,2	9,5	9,4 ± 0,5
Cr	mg.kg ⁻¹	250	261	253	254	255 ± 9
Cu	mg.kg ⁻¹	15	15	14	15	15 ± 1
Fe	%	3,1	3,0	3,1	3,2	3,1 ± 0,2
Hg	mg.kg ⁻¹	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	–
K	%	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9 ± 0,1
Li	mg.kg ⁻¹	50	58	55	54	54 ± 7
Mg	%	0,94	0,93	0,95	0,96	0,95 ± 0,03
Mn	mg.kg ⁻¹	365	361	372	373	368 ± 11
Mo	mg.kg ⁻¹	11,1	11,2	11,4	11,0	11,0 ± 0,3
Na	%	1,7	1,7	1,8	1,9	1,8 ± 0,2
Nb	mg.kg ⁻¹	15,2	15,1	15,2	14,8	15,1 ± 0,4
Ni	mg.kg ⁻¹	29	35	29	30	31 ± 6
P	mg.kg ⁻¹	1054	1057	1040	1030	1045 ± 25
Pb	mg.kg ⁻¹	28	28	26	27	27 ± 2
Sb	mg.kg ⁻¹	0,38	0,38	0,36	0,37	0,37 ± 0,02
Se	mg.kg ⁻¹	1,1	1,0	1,2	1,2	1,1 ± 0,2
Sn	mg.kg ⁻¹	4,4	4,5	4,6	4,4	4,5 ± 0,2
Sr	mg.kg ⁻¹	132	133	132	133	133 ± 1
Ti	%	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38 ± 0,01
Tl	mg.kg ⁻¹	0,60	0,61	0,59	0,59	0,60 ± 0,02
V	mg.kg ⁻¹	87	88	86	88	87 ± 2
W	mg.kg ⁻¹	9,6	9,3	9,2	9,3	9,35 ± 0,30
Zn	mg.kg ⁻¹	71	74	73	73	73 ± 3

Fonte: elaborado pelos autores

A **Figura 35** apresenta o gráfico de distribuição de tamanho de partículas para o lote piloto. Obteve-se, com boa reprodutibilidade, uma mediana de 12 μm , com 90 % do material entre 2 μm e 40 μm .

Figura 35 – Distribuição de tamanho de partículas para o lote piloto



Fonte: elaborado pelos autores

4 Conclusões

O fluxograma de trabalho adotado foi adequado para a caracterização química do material de sedimento estuarino preparado, evidenciado pelos resultados obtidos para com os materiais de referência empregados para controle de qualidade. Foi possível caracterizar o material para 31 elementos, incluindo elementos majoritários (maiores) e traços potencialmente tóxicos.

O material obtido após os processos de moagem e mistura apresentou estreita distribuição de tamanho de partículas. As concentrações determinadas para os metais potencialmente tóxicos foram abaixo dos valores orientadores estabelecidos pela CONAMA nº454 (BRASIL, 2012).

O legado que este projeto gerou amplia nossa capacidade de desenvolver novos materiais de referência necessários para o atendimento de demandas legais relacionadas à saúde e à preservação do meio ambiente, além de necessidades do meio acadêmico-científico.

5 Agradecimentos

À Fundação de Apoio ao IPT - FIPT pelo suporte financeiro (PTC 1060-17/ 500361A). Ao Dr. Pablo Vásquez e ao Bel. Paulo Santos pelo auxílio na esterilização do material realizada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) - Irradiador Multipropósito de ⁶⁰Co. À Msc. Bianca Kim pela elaboração do mapa de Santos. À empresa Subgeo pelo apoio na coleta de sedimento.

6 Referências

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 92, p. 89, 16 maio 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 454, de 1 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 216, 8 nov. 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília: MS, 2017. Disponível em: <<http://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2019.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. **Protocol for the derivation of Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life**. Ottawa: CCME, 1995. (Technical Secretariat of the Ccme Task Group on Water Quality Guidelines).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2016**. São Paulo: CETESB, 2017. 287 p.

FRANKLIN, R. R.; FÁVARO, D. I. T.; DAMATO, S. R. Trace metal and rare earth elements in a sediment profile from the Rio Grande Reservoir, São Paulo, Brazil: determination of anthropogenic contamination, dating, and sedimentation rates. **Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry**, v. 3017, p. 99-110, 2016.

GARRISON, T. Fundamentos de oceanografia. In: GARRISON, T. (Org.). **Sedimentos oceânicos**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. Cap. 5.

GOOGLE EARTH. **Imagem da Ponte sobre o Rio Jurubatuba – Santos**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

KIM, B. S. M.; SALAROLI, A. B.; FERREIRA, P. A. L.; SARTORETTO, J. R.; MAHIQUES, M. M.; FIGUEIRA, R. C. L. Spatial distribution and enrichment assesment of heavy metals in surface sediments from Baixada Santista, Southeastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 103, p. 333-338, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO Guide 35**: Reference Materials – General and statistical principles for certification. Geneve: ISO, 2017. 105 p.

MATSCHULLAT, J.; OTTENSTEIN, R.; REIMANN, C. Geochemical background – can we calculate it? **Environmental Geology**, v. 39, n. 9, p. 990-1000, 2000.

DOI 10.34033/2526-5830-v3n11-96



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

www.ipt.br

Redes sociais

twitter.com/@iptsp
youtube.com/IPTbr
facebook.com/iptsp

