

# CARACTERIZAÇÃO DE INCRUSTAÇÕES EM EQUIPAMENTOS DE BOMBEAMENTO E TUBULAÇÕES INSTALADOS EM POÇOS TUBULARES PROFUNDOS – ESTUDO DE CASO

Didier Gastmans<sup>1</sup>; Márcia Regina Stradioto<sup>2</sup>; Marco Aurélio Z. Pede<sup>1</sup> & Chang Hung Kiang<sup>3</sup>

**Resumo** - Incrustações em tubulações e equipamentos de bombeamento, que podem ou não estar associadas a fenômenos de corrosão, representam um dos maiores problemas para a operação de poços tubulares profundos. A determinação das características químicas da água, aliada à identificação da composição mineralógica destas incrustações, pode facilitar a elaboração de programas específicos para a manutenção de poços tubulares profundos. A análise conjunta da caracterização hidroquímica e da constituição mineralógica de incrustações encontradas na tubulação edutora, determinadas através da Difração de Raios X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi efetuada em poço tubular profundo existente no Campus da UNESP em Rio Claro (SP), possibilitando a determinação das condições necessárias para a precipitação dos carbonatos.

**Abstract** - Incrustations in pipes and well pumps, that can or not be associates to corrosion, represent one of the biggest problems for tubular wells operation. It determines the water chemistry allied of mineralogical composition of these incrustations, can facilitate elaboration of specifics maintenance programs for tubular wells. The joint analysis of hidrochemical characterization and mineralogical constitution of incrustations found in pipes wells, determined through X-Ray Diffractometry a Scan Electronic Microscopy (SEM), ), was effected in existing deep tubular well in the Campus of the UNESP in Rio Claro (SP), making possible the determination of the necessary conditions for the precipitation of carbonates.

**Palavras-Chave** – Incrustação; Difração de Raios X; Microscopia Eletrônica de Varredura.

---

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do IGCE – UNESP – Campus de Rio Claro/LEBAC – [gastmans@rc.unesp.br](mailto:gastmans@rc.unesp.br) - [mpede@yahoo.com.br](mailto:mpede@yahoo.com.br).

<sup>2</sup> Aluna de Graduação do Curso de Geologia do IGCE – UNESP - Campus de Rio Claro/LEBAC – [mstra@rc.unesp.br](mailto:mstra@rc.unesp.br).

<sup>3</sup> Prof. Dr. Do Departamento de Geologia Aplicada – DGA - IGCE – UNESP – Campus de Rio Claro/LEBAC – [chang@rc.unesp.br](mailto:chang@rc.unesp.br) - LEBAC – Av. 24 – A, 1515, Caixa Postal 158, CEP 13506-900, Rio Claro (SP).

## **INTRODUÇÃO**

Um dos maiores problemas envolvidos na operação de poços refere-se à incrustação e à corrosão de tubulações, sejam elas edutoras ou de revestimento (tubos e filtros), bem como em equipamentos de bombeamento instalados, o que pode ocasionar queda de vazão e de níveis de água ao longo do tempo, além de prejuízos e transtornos ao abastecimento de usuários de águas subterrâneas.

O processo de incrustação em poços tubulares profundos pode ser definido como a deposição de materiais, mais ou menos aderentes, nas diversas partes constituintes da captação, enquanto a corrosão representa um conjunto de reações químicas que conduzem à destruição dos materiais por desagregação ou solubilização, que pode ser auxiliado pela ação de microorganismos [1].

Apesar de serem processos com efeitos contrários, existe uma íntima relação entre eles, já que a corrosão pode liberar metais que podem vir a ser precipitados sob a forma de óxidos, hidróxidos e carbonatos.

Os principais tipos de incrustações estão associados a deposições de carbonatos e sulfatos de cálcio e magnésio, além de precipitação de compostos de ferro e manganês, normalmente sob a forma de hidróxidos e/ou óxidos hidratados [2].

Segundo diversos autores [3, 1], os principais fatores causadores de processos de incrustação em poços tubulares profundos estão relacionados às características químicas da água contida no aquífero (águas mais mineralizadas apresentariam maior potencial de incrustação), e às condições operacionais do poço, como velocidade de passagem de água através dos filtros e rebaixamento causado pelo bombeamento. Neste último caso, a redução da pressão parcial de CO<sub>2</sub> acarreta a precipitação de carbonatos.

A análise hidroquímica de águas subterrâneas pode fornecer subsídios para determinação das incrustações e caracterização de suas taxas de deposição, podendo auxiliar na especificação de metodologia de reabilitação a ser empregada no poço.

## **OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é apresentar, através de estudo de caso, alguns métodos analíticos que podem ser empregados para a determinação da composição mineralógica e química de incrustações em tubulações edutoras e equipamentos de bombeamento, bem como estabelecer relações entre as incrustações amostradas e analisadas com os materiais constituintes dos equipamentos e as características físico-químicas da água subterrânea.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas três amostras de incrustações depositadas no conjunto de bombeamento de poço tubular profundo localizado no Campus da UNESP, no município de Rio Claro (SP), quando de realização de intervenção para manutenção corretiva. Durante esta operação, foram verificadas as condições mecânicas da tubulação edutora e do equipamento de bombeamento, em razão da constatação de queda de vazão, de 12 m<sup>3</sup>/h em 1998, para 3,5 m<sup>3</sup>/h em 2004.

As principais características geológicas, construtivas e operacionais deste poço encontram-se sintetizadas na tabela 1, abaixo:

**Tabela 1** – Características Técnicas Construtivas e Hidrogeológicas do Poço Tubular Profundo – UNESP – Campus de Rio Claro.

<b>Profundidade Útil</b>	501, 43 metros	
<b>Perfil Geológico</b>	0 – 12 metros – Formação Rio Claro; 12 – 214 metros – Formação Corumbataí; 214 – 291 metros – Formação Tatuí; 291 – 510,50 metros – Sub-grupo Itararé	
<b>Aquífero Explotado</b>	Aquíferos Tatuí e Itararé	
<b>Seções Filtrantes</b>	Filtros instalados no intervalo 211 a 465 metros	
<b>Bomba</b>	Bomba submersa instalada a 246 metros com tubos de 2”	
<b>Ano</b>	1998	2004
<b>Nível Estático</b>	142 metros	165 metros
<b>Nível Dinâmico<sup>1</sup></b>	231 metros	-
<b>Vazão</b>	12 m <sup>3</sup> /h	3,5 m <sup>3</sup> /h
<b>Vazão Específica<sup>1</sup></b>	0,13 m <sup>3</sup> /h/m	-

1 – O nível dinâmico não foi medido antes da realização da manutenção do poço

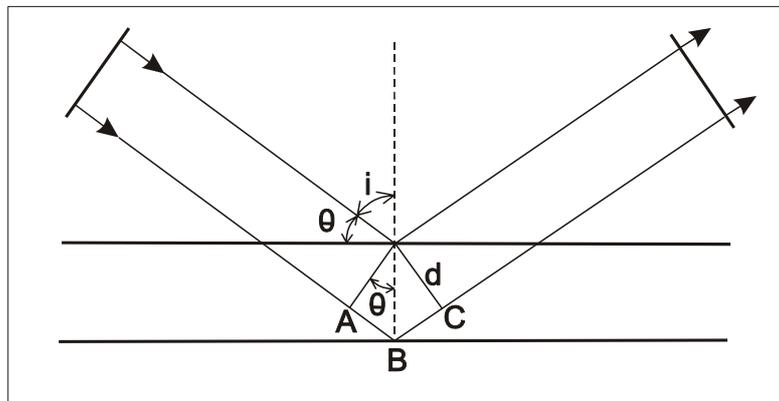
As amostras foram coletadas em três pontos localizados, respectivamente, na tubulação edutora (240 metros de profundidade), no bombeador e no motor da bomba submersa.

Estas amostras foram submetidas à difração de raios X e à análise através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), dos laboratórios dos Departamentos de Geologia Aplicada (DGA) e de Petrologia e Metalogenia (DPM), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP – Campus de Rio Claro, com o objetivo de determinar e caracterizar sua composição mineralógica.

## Difração de Raios X

A difração é uma propriedade física fundamental da substância, servindo à identificação e ao estudo de sua estrutura [4], e é resultado da dispersão de ondas de raios X pelos elétrons dos átomos dos cristais, sem mudança no seu comprimento.

O feixe de raios-X que atinge um plano de átomos sofre difração em duas direções principais: a do prolongamento do feixe incidente e da reflexão pelo plano. Sendo considerados dois ou mais planos, as condições para a difração em fase (interferência com reforço) dependerão da diferença de caminho percorrido pelo feixe de raios-X (Figura 1).



**Figura 1** – Difração de um feixe de raios-X sobre um plano de átomos.

Nesta figura observa-se que a diferença de caminho é  $\Delta = ABC = 2AB$ , sendo:

$$AB = d \cdot \sin \theta \quad (1)$$

onde,

$d$  = distância interplanar para o conjunto de planos reticulares,

$\theta$  = ângulo de Bragg entre o feixe incidente e os planos reticulares.

Tem-se então:

$$\Delta = 2AB = 2d \sin \theta \quad (2)$$

Se os planos difratam em fase, a diferença de caminho  $\Delta$  deve ser um número inteiro de comprimento de onda, ou seja,  $n\lambda$ , em que  $n$  é um número inteiro e a condição de difração em fase será:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \text{ (Lei de Bragg)} \quad (3)$$

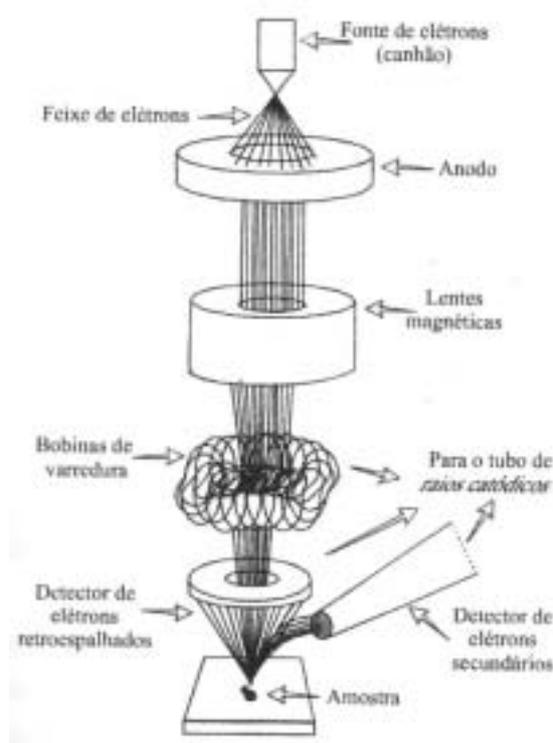
onde,

$\lambda$  = comprimento de onda do raios-X.

## Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura com sua capacidade de ampliação de milhares de vezes e sua elevada resolução, facilita a análise de detalhes mínimos dos minerais, da morfologia dos grãos, dos poros e suas interações.

O MEV consiste de uma coluna ótica (eletrônica), uma câmara para amostra, sistema de vácuo, sistema de controle eletrônico e sistema de obtenção de imagens. Um canhão gera um feixe de elétrons de 20keV que passa por um conjunto de lentes eletromagnéticas que agem como condensadores. Este feixe incide sobre a amostra e, por meio de bobinas deflectoras, percorre uma varredura sobre uma pequena região da amostra (Figura 2).



**Figura 2** – Componentes básicos de um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV [5]

## RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos podem ser analisados sob dois aspectos distintos: o primeiro, com relação às características físico-químicas da amostra de água proveniente do poço tubular profundo e sua relação com a incrustação observada nos equipamentos e o segundo, com relação à caracterização mineralógica destas incrustações pelos métodos descritos anteriormente.

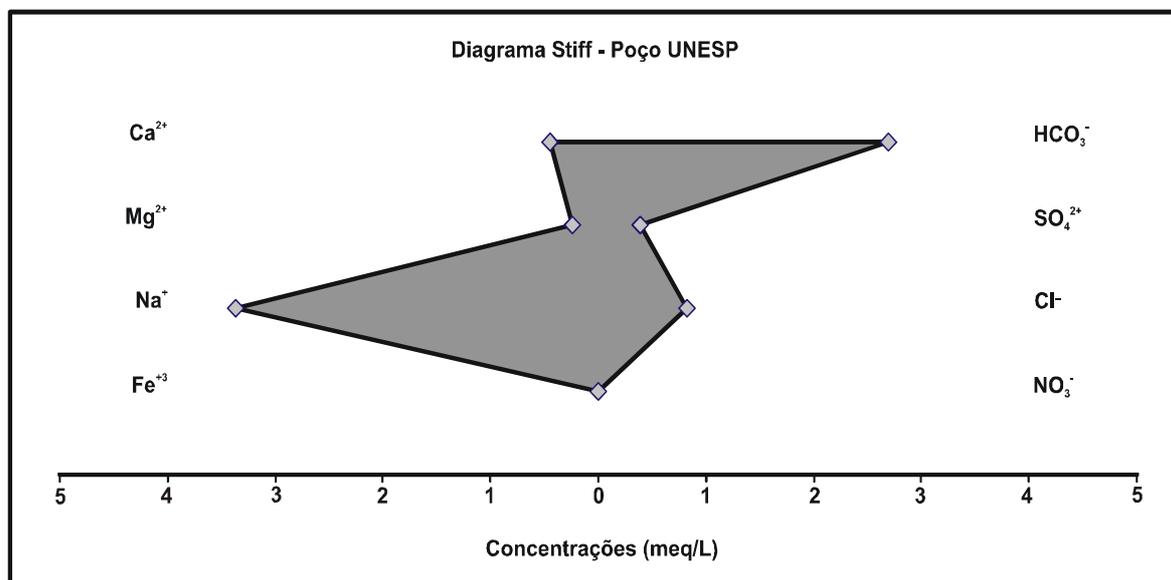
## Caracterização Hidroquímica

A caracterização hidroquímica da água captada no poço estudado foi efetuada a partir de laudo analítico elaborado no ano de 1999 [6]. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2** – Caracterização Hidroquímica.

<b>Condutividade</b>		371 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$			
<b>pH</b>		8			
<b>Temperatura</b>		25° C			
<b>Concentrações (mg/L)</b>					
<b>Alcalinidade</b>	164.85	<b>Cl<sup>-</sup></b>	29.3	<b>F<sup>-</sup></b>	2.87
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	< 0.20	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	18.61	<b>Na<sup>+</sup></b>	76.90
<b>K<sup>+</sup></b>	1.15	<b>SiO<sub>2</sub></b>	12.40	<b>Zn<sup>+2</sup></b>	0.07
<b>Mn<sup>+2</sup></b>	< 0.01	<b>Fe<sup>+3</sup></b>	< 0.01	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	3.00
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	9.08	<b>Sr<sup>+2</sup></b>	0.04	<b>TDS</b>	317.57

Com base neste laudo, a amostra pode ser classificada como do tipo bicarbonatada cálcica, de acordo com o diagrama de Stiff, apresentado na figura 3.



**Figura 3** – Diagrama de Stiff.

Foram efetuados cálculos de especiação desta amostra de água para as espécies minerais da série carbonática (calcita e aragonita), utilizando-se o pacote computacional PhreeqC [7]. Os resultados indicaram que a amostra encontra-se subsaturada em relação a estas espécies, à temperatura de coleta (25,1°C). Entretanto, com o aumento de temperatura a água torna-se saturada

em relação aos carbonatos de cálcio, ocorrendo precipitação de calcita a partir de 40°C e da aragonita a partir dos 50°C. Um resumo dos valores obtidos é apresentado na tabela 3.

**Tabela 3 – Índices de Saturação**

Minerais	Índices de Saturação x Temperatura (°C)			
	25°C	30°C	40°C	50°C
<b>Aragonita</b>	- 0,32	- 0,25	- 0,11	0,01
<b>Calcita</b>	- 0,14	- 0,11	0,02	0,13

Foi efetuado o cálculo do Índice de Langelier [8], que possibilita a verificação do grau de saturação de uma amostra de água com relação a espécies carbonáticas, baseado na relação entre o pH medido na amostra e o pH de equilíbrio, o qual é função da concentração dos íons cálcio e bicarbonato, da constante de solubilidade de carbonatos e da força iônica da solução [9].

Os resultados obtidos com o cálculo do Índice de Langelier são semelhantes àqueles observados através do cálculo dos índices de saturação, apesar de não ser levada em consideração a presença de outras espécies iônicas (Tabela 4).

**Tabela 4 – Índices de Langelier**

Temperatura (°C)	25°C	30°C	40°C	50°C
<b>Índice de Langelier</b>	-0.36	-0.25	-0.03	0.19

## CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

As amostras coletadas foram analisadas pelos métodos de Difração de Raios X e de Microscopia Eletrônica de Varedura (MEV), para determinação de sua constituição mineral. Para a análise de difração, uma pequena porção da amostra é pulverizada e submetida à análise no difratômetro, enquanto que no MEV são observados pequenos fragmentos da amostra para a visualização dos cristais e de estruturas.

A paragênese mineral encontrada nas amostras submetidas aos ensaios é resultado direto da composição das águas subterrâneas, associada à composição do material metálico dos equipamentos (tubulações e bomba submersa). Constituem-se basicamente de carbonatos de cálcio e ferro, óxidos e hidróxidos de ferro diversos, algum sulfato de ferro e zinco, silicatos de ferro, além de quartzo que pode ter sido agregado pela precipitação desse material nos equipamentos.

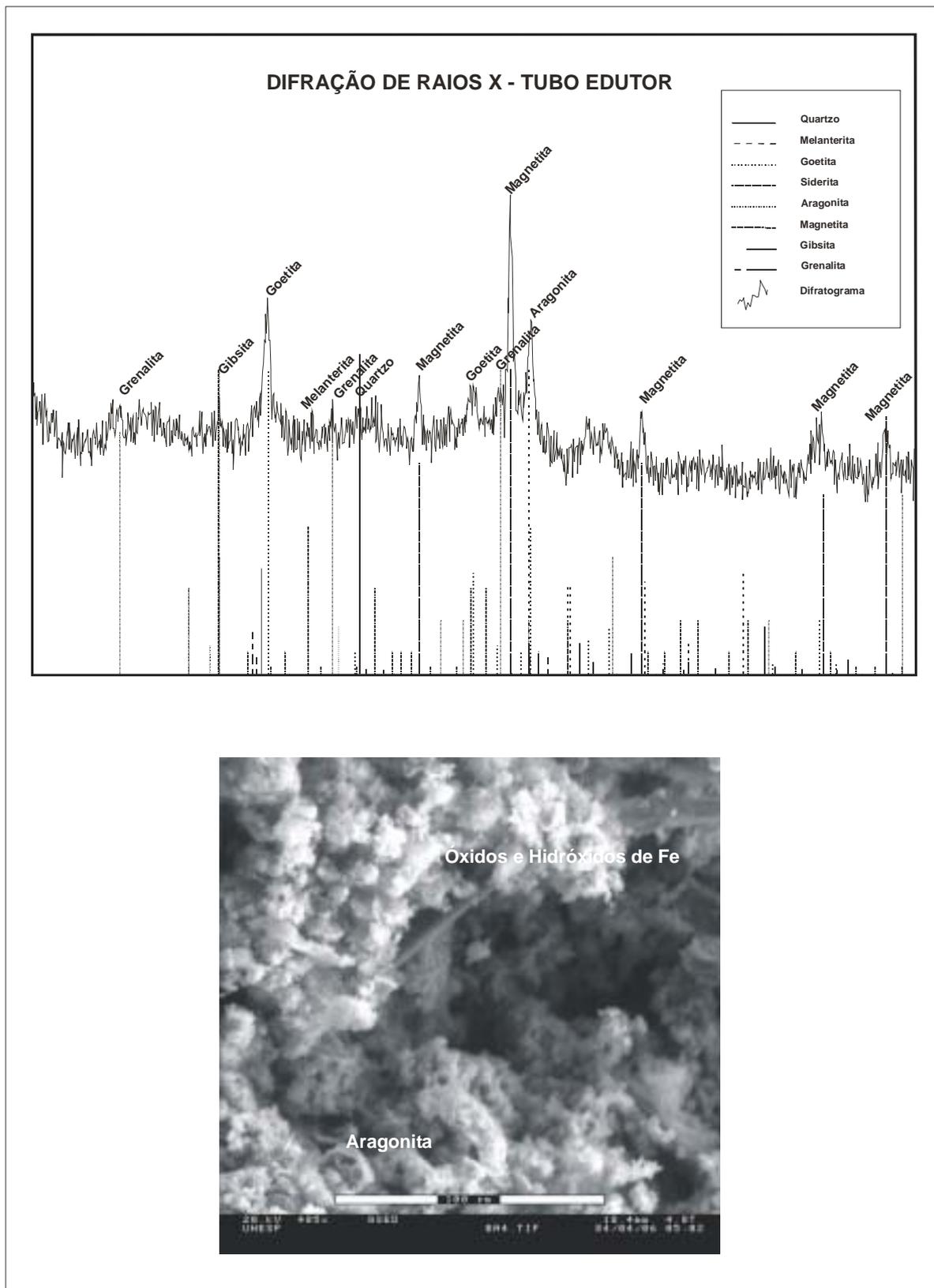
As figuras 4 a 6 apresentam os difratogramas e uma imagem obtida com o microscópio eletrônico de varredura para as amostras recolhidas na tubulação edutora, no bombeador e no motor da bomba submersa. Na tabela 5, são apresentadas as composições mineralógicas destas amostras.

É interessante notar a precipitação do carbonato de cálcio sob a forma de aragonita, que em princípio é mais instável que a calcita. Este fato pode estar associado às condições específicas de pressão e temperatura existentes nas proximidades do ponto de instalação da bomba, que aliado à presença de cátions específicos, como Pb e Sr, pode estar condicionando a precipitação de aragonita ao invés de calcita.

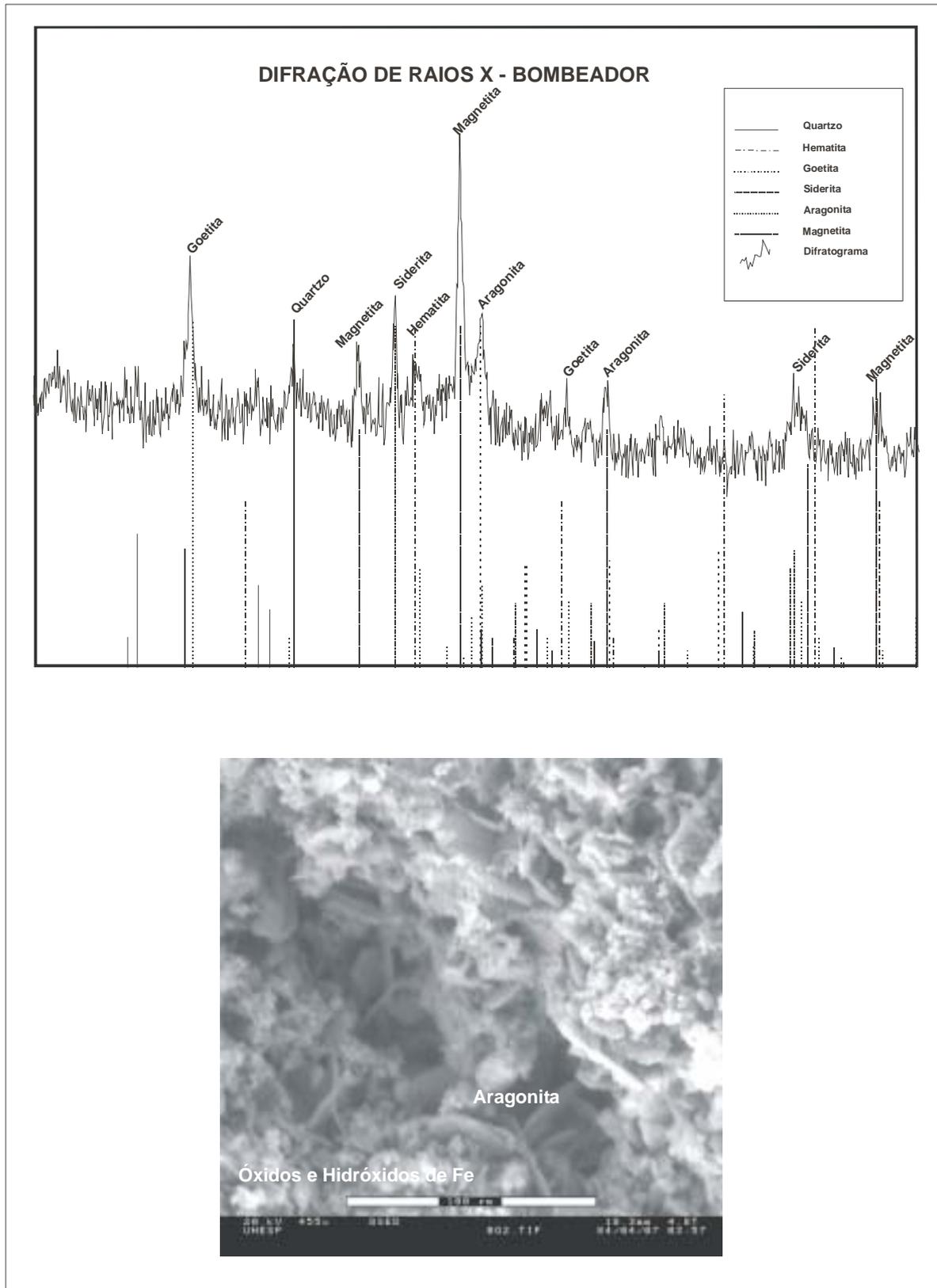
**Tabela 5 – Constituição Mineralógica das Incrustações**

<b>Tubo Edutor</b>	<b>Bombeador</b>	<b>Motor da Bomba</b>
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
Melanterita ((Fe, Cu, Zn)SO <sub>4</sub> )	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Melanterita ((Fe, Cu, Zn)SO <sub>4</sub> )
Goetita (FeO(OH))	Goetita (FeO(OH))	Goetita (FeO(OH))
Aragonita (CaCO <sub>3</sub> )	Aragonita (CaCO <sub>3</sub> )	Aragonita (CaCO <sub>3</sub> )
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
Gibsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	Siderita (FeCO <sub>3</sub> )	Siderita (FeCO <sub>3</sub> )
Grenalita (Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )		

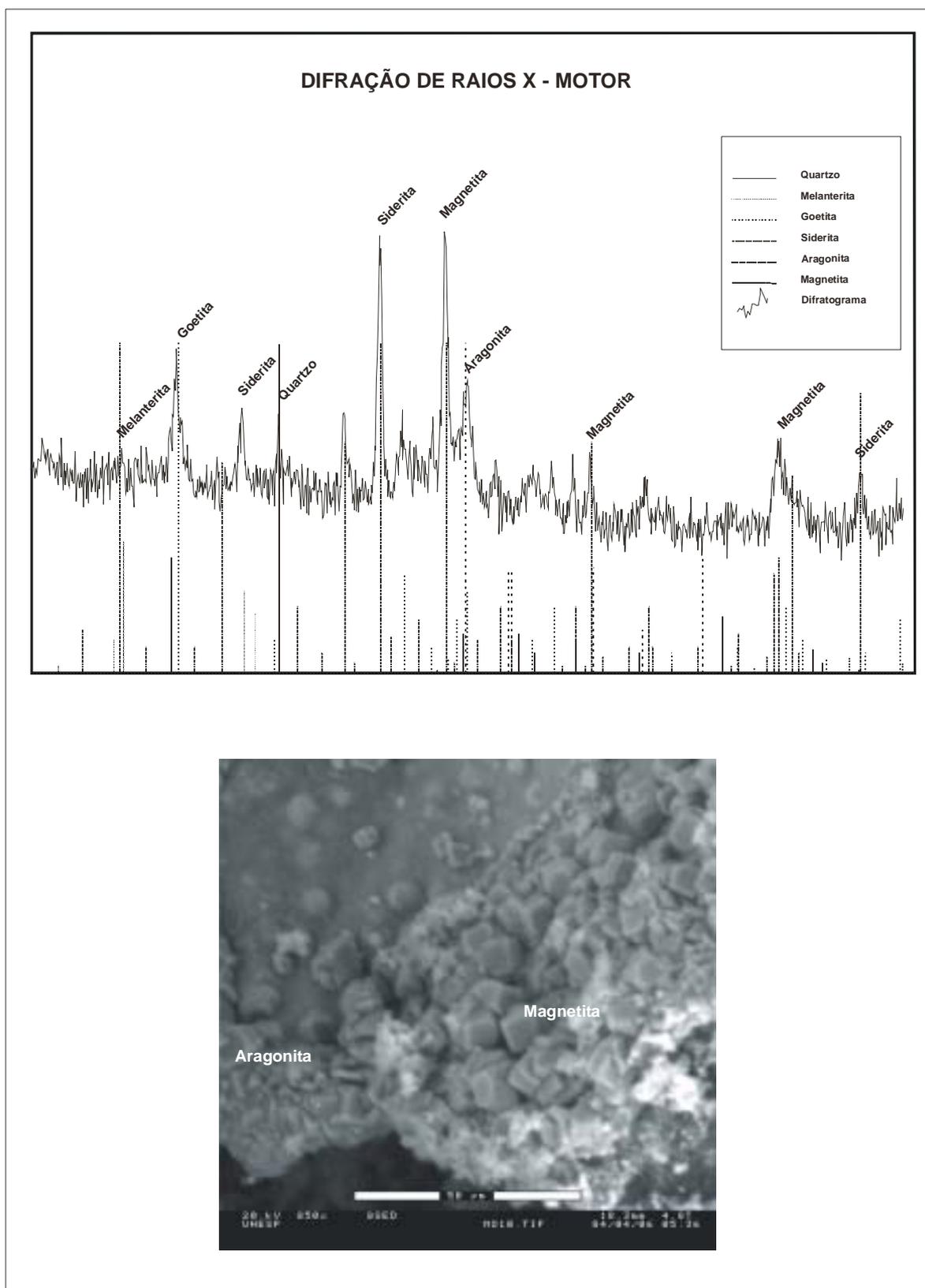
A presença de óxidos hidratados e hidróxidos de ferro e alumínio amorfos é observada nas imagens obtidas com o microscópio eletrônico de varredura, enquanto os carbonatos apresentam cristais melhor desenvolvidos.



**Figura 04** – Difratoograma de Raios X e Imagem de MEV – Barra de Tubo Edutor



**Figura 05** – Difratoograma de Raios X e Imagem de MEV – Bombeador



**Figura 06** – Difratoograma de Raios X e Imagem de MEV – Motor

## CONCLUSÕES

Após 6 anos de operação contínua, sem paralisações para manutenções preventivas, a queda de vazão acentuada em um poço tubular profundo perfurado nas dependências do Campus da UNESP –Rio Claro levou à realização de manutenção corretiva. Quando da retirada do equipamento de bombeamento, observou-se ao longo da tubulação edutora e na bomba a ocorrência de corrosão e presença de crostas de incrustação. Procedeu-se à coleta e análise deste material, através do método da difração de raios X e da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Do ponto de vista hidroquímico, as águas do aquífero captado podem ser classificadas como do tipo bicarbonatada sódica e apresentam-se insaturadas com relação ao carbonato de cálcio à temperatura de 25°C, passando a saturada com o aumento da temperatura. Este estágio de saturação é alcançado nas proximidades do equipamento de bombeamento, onde o motor e o bombeador fornecem o calor necessário à elevação da temperatura da água.

As condições de saturação também podem ser atingidas com a diminuição da  $P_{CO_2}$ , causada pelo rebaixamento excessivo do nível d'água durante o bombeamento, que chega a ser da ordem de 80 metros. A soma destes dois fatores propicia as condições necessárias para que ocorra a saturação com relação aos carbonatos e a sua precipitação.

A determinação da composição mineralógica através da difração de raios X indica que a paragênese mineral é constituída basicamente por carbonatos de cálcio e ferro, óxidos e hidróxidos de ferro, e algum sulfato de ferro.

As características hidroquímicas da água presente no aquífero são responsáveis pelo fornecimento do carbonato de cálcio depositado nos equipamentos, enquanto que a precipitação dos carbonatos e sulfatos de ferro está relacionada a uma associação entre os carbonatos, fornecidos pelas águas, e os metais liberados através do processo de corrosão instalado. Já a precipitação dos óxidos e hidróxidos de ferro ocorre a partir dos metais fornecidos pelo processo de corrosão do material metálico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa – Cnpq, pelo bolsa de estudos concedida através do processo 140471/2003-0, à Prof. Dra. Maria Margarita T. Moreno, pelo auxílio na interpretação dos difratogramas e ao Dr. Flávio de Paula e Silva pelas discussões e leitura do texto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. – 1996 – **Hidrología Subterránea**, Omega, S.A. ISBN 84-282-0446-2 Barcelona, Espanha.
- [2] DRISCOLL, F.G. – 1986 – **Groundwater and Wells**, St. Paul Minnesota, Johnson Division, 2ª ed. 1089p.
- [3] CETESB – 1978 – **Água Subterrânea e Poços Tubulares**, São Paulo, 482p.
- [4] FORMOSO, M.L.L. – 1985 – Difractometria de Raios X. In: GOMES, C.B. (Ed.) **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Secretária do Estado da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia; Edgard Blücher, p 1 – 43.
- [5] NOBREGA, C.A. – 1999 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) em geotecnia: novas perspectivas de utilização. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 9, São Paulo. **Anais...** São Paulo:ABGE.
- [6] OLIVA, A. – 1999 – Caracterização Hidroquímica de Águas Subterrâneas no Município de Rio Claro (SP). Trabalho de formatura – Curso Geologia – IGCE – UNESP – Campus de Rio Claro, 52p.
- [7] PARKHURST, D.L. & APPELO, C.A.J. – 1999 – User's Guide to PHREEQC (Version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. **U.S. Geological Survey Water – Resources Investigations Report, 99-4259**, 312p.
- [8] LANGELIER, W.F. – 1936 – The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment - **American Water Works Association Journal**, V.28, p. 1500 – 1521.
- [9] FENZL, N. – 1988 – **Introdução à Hidrogeoquímica**, Universidade Federal do Pará, ISBN 85-247-0023-8, Belém.