

ROBERTA MORAES CURAN

**CARACTERIZAÇÃO E ORIGEM DA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA DA INCRUSTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE
CENÁRIOS DE PERDA DE ENERGIA EM SETOR DA
REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE
DE RIO CLARO - SP**

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências
Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como
parte das exigências para o cumprimento da disciplina
Trabalho de Formatura no ano letivo de 2010*

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro – SP

2010

ROBERTA MORAES CURAN

**CARACTERIZAÇÃO E ORIGEM DA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA DA INCRUSTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE
CENÁRIOS DE PERDA DE ENERGIA EM SETOR DA
REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE
DE RIO CLARO - SP**

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheira
Ambiental.*

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro – SP

2010

628.1 Curan, Roberta Moraes
C975c Caracterização e origem da composição química da
incrustação e simulação de cenários de perda de energia em
setor da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro
- SP / Roberta Moraes Curan. - Rio Claro : [s.n.], 2010
66 f. : il., figs., tabs., mapas + 1 mapa

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas
Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. Abastecimento de água. 2. Rugosidade. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi pela orientação neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição e ao Guilherme R. B. Navarro por me ajudarem a elaborar este trabalho.

À empresa SANIT por proporcionar a possibilidade de desenvolvimento deste trabalho; e ao DAAE de Rio Claro pelos dados disponibilizados e a ajuda oferecida.

Queria agradecer aos meus pais que me ajudaram a me tornar a pessoa que sou hoje, por sempre me auxiliarem nas minhas decisões e apoiá-las. À minha mãe, Suely C. M. Curan, que sempre, sempre mesmo esteve ao meu lado desde os momentos mais felizes aos momentos de crise e desespero! Por sempre dizer que no fim tudo ia dar certo e também pela lancheirinha e pela roupa lavada nos finais de semana. Ao meu pai, João Alberto Curan, por me proporcionar estes cinco anos em que fiquei estudando, por sempre me apoiar e se mostrar orgulhoso de mim.

À minha irmã, Renata M. Curan, que considero minha amiga de sempre. Pelos momentos de diversão nos finais de semana, nos momentos de gordisse, fofocas, fotos, vídeos e viagens. Tenho certeza que minha vida seria bem mais triste sem minha pestinha querida.

A todos meus familiares que me acompanharam tios e tias, primos e primas, avôs e avós. Especialmente à minha madrinha Cássia C. Turci, que me ajudou e ajuda a tomar decisões e me dá ótimos conselhos.

Aos amigos que permaneceram, mesmo depois destes cinco anos um pouco distante. Sofia, amiga de infância; Eduardo, o irmão que não tive; Sarah, por todos os momentos que aproveitamos juntas; Cauê, pela amizade, compreensão e carinho; e Andressa, que sempre mesmo que sumida estava lá para mim.

Às pessoas que me mostraram que podemos sim escolher uma segunda família, as meninas da República Cabeças, “mais que uma república, um estilo de vida”. A começar pelas veteranas, que no começo me assustaram um pouco, mas que na verdade me mostraram o que é viver: Knela (Aline), Paulinha, Ana, Maíba (Maíla), e Chati (Tatiana). À minha parceira da classe, discussões e corrida, Cóki (Isabel). E às minhas bixetes que eu amo muito; Carreteira (Lívia), parceira para o que der e vier; He-man (Amanda), minha irmãzinha; Bolinho (Aline), que também encontrou sua Família aqui; Bia, que me surpreende sempre; Globeleza (Marília), por ser ela mesma; e She-ra (Michele), meu neném. A cada uma dessas meninas, obrigada por ajudarem a melhorar meu eu, e por terem feito parte da minha vida, por fazerem parte hoje e sempre.

Aos colegas de classe que de alguma forma contribuíram para hoje estar onde estou. Principalmente à Paola Bello, Aline Frederice e aos meninos da República 7 Anões e República Atoas, por participarem incansavelmente da minha vida universitária. A todos as outras repúblicas, amigos, e “Irmãos”: Hashi (Pedro), Alfinete (Pedro Henrique), Diego, Tony (Renato), Brunão (Bruno), Porps (Matheus), Gulosa (Wagner), Rep. Pocas e Boas (Record), Rep. Várzea, Rep. Entrometemos, Rep. 51 e Rep. Mansão.

A um Pilantra muito especial que de alguma forma em tão pouco tempo mudou muito minha vida e me mostrou as coisas boas dela.

RESUMO

O objetivo do trabalho foi caracterizar as incrustações presentes em tubulações pertencentes à rede do sistema de abastecimento de água da cidade de Rio Claro, SP bem como avaliar o efeito do envelhecimento da rede no desempenho do sistema. Para tal, foram extraídas amostras de incrustações que foram submetidas a análises químicas e de Espectrometria de Difração por Raio-X. O histórico da qualidade da água do manancial também foi analisado visando identificar as possíveis origens dos depósitos nas tubulações. Para avaliação do desempenho hidráulico da rede foram simulados diferentes cenários empregando o programa EPANET, variando o valor do coeficiente de resistência da Rede de Abastecimento de Água da cidade de Rio Claro – SP. Os resultados das caracterizações indicaram a presença basicamente de óxido/hidróxidos de ferro (Magnetita e Goethita) e quartzo, que são de alta dureza. As simulações hidráulicas demonstraram que os cenários simulados variaram de ~2000% em termos de perdas de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Incrustação, Rugosidade, Redes de Abastecimento de Água, Simulações

ABSTRACT

The purpose of this work was the inlay's characterization from the water supply networks of Rio Claro-SP city; as well analyze the influence of network's aging in the actual system. To do this, some samples of inlays were collected and made chemistry analysis and X-Ray Diffraction Spectrometry. The history of the source water quality was also analyzed, to make possible to known the origins of the inlays. To evaluate the performance of the network, some different scenarios have been simulated, varying the resistance coefficient of the water supply networks of Rio Claro-SP. The characterization results showed that there are basically oxide and hydroxide of iron (magnetite and goethite) and quartz in the inlays, which are materials of high hardness. The hydraulic simulations indicated that the simulated scenarios had a variation of ~2000% in terms of loss of energy.

KEYWORDS: Inlay, Rugosity, Water Supply Network, Simulations

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Amostras de pedaços de tubos de FoFo com incrustações retirados do sistema de abastecimento no município de Rio Claro – SP. (Fonte: DAAE - Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Rio Claro).....	18
Figura 2: Janela de introdução de dados no Software Epanet 2.0	28
Figura 3: Difratoograma da amostra do tubo 1. (Fonte: UNESP; SANIT, 2009)	30
Figura 4: Difratoograma da amostra do tubo 2.	31
Figura 5: Difratoograma da amostra do tubo 3.	32
Figura 6: Fotografias das lâminas polidas utilizando microscópio preparadas a partir dos fragmentos extraídos da tubulação da rede de abastecimento e formulação tridimensional das estruturas dos minerais. a) Goethita b) Magnetita, c) Quartzo. (Fonte: Relatório Preliminar de “Determinação da viabilidade da aplicação do processo de limpeza e revestimento com resina epoxídica pela técnica de turbilhonamento em tubulações de ferro fundido objetivando a recuperação hidráulica do sistema de distribuição de rede secundária de água potável no município de Rio Claro-SP”)......	34
Figura 7: Gráfico de normalização, em relação ao tubo limpo, dos elementos nos quais a incrustação é enriquecida.....	36
Figura 8: Gráfico de normalização, em relação ao tubo limpo, dos elementos nos quais o tubo é enriquecido.....	37
Figura 9: Gráfico com todos os elementos detectados no tubo limpo e nas amostras de incrustação.	37
Figura 10: Gráfico de concentração de ferro na água tratada das ETAs I e II.	39
Figura 11: Gráfico de concentração de sílica na água tratada das ETAs I e II.....	39
Figura 12: Pressão nos nós do Cenário 1.....	44
Figura 13: Vazão nos trechos do Cenário 1 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)	44
Figura 14: Velocidade nos trechos do Cenário 1.....	45
Figura 15: Perda de Carga nos trechos do Cenário 1	45
Figura 16: Pressão nos nós do Cenário 2.....	46
Figura 17: Vazão nos trechos do Cenário 2 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)	46

Figura 18: Velocidade nos trechos do Cenário 2.....	47
Figura 19: Perda de carga nos trechos do Cenário 2	47
Figura 20: Pressão nos nós do Cenário 3.....	48
Figura 21: Vazão nos trechos do Cenário 3 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)	48
Figura 22: Velocidade nos trechos do Cenário 3.....	49
Figura 23: Perda de carga nos trechos do Cenário 3	49
Figura 24: Pressão nos nós do Cenário 4.....	50
Figura 25: Vazão nos trechos do Cenário 4 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)	50
Figura 26: Velocidade nos trechos do Cenário 4.....	51
Figura 27: Perda de Carga nos trechos do Cenário 4	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Valores do coeficientes de Hazen-Williams para os distintos cenários.	23
Tabela 2: Dados de entrada dos trechos no Cenário 1.....	24
Tabela 3: Dados de entrada dos trechos no Cenário 2.....	25
Tabela 4: Dados de entrada dos trechos no Cenário 3.....	26
Tabela 5: Dados de entrada dos trechos no Cenário 4.....	27
Tabela 6: Teores de elementos maiores (em %) de três amostras de incrustação extraídas da rede de abastecimento de Rio Claro, SP e uma amostra da tubulação limpa da mesma rede. .	33
Tabela 7: Média da concentração e desvio padrão de alguns elementos na água tratada, no período de análise de janeiro de 2004 a dezembro de 2009.	40
Tabela 8: Resultados de análises químicas da água bruta no ponto de captação da ETA I, durante julho, setembro e novembro de 1999.....	40
Tabela 9: Valores correspondentes a espessura média da incrustação medida nas amostras de trechos removidos da rede de abastecimento da cidade de Rio Claro, SP. (Fonte: Curan et. al. 2010, p. 6).....	41
Tabela 10: Valor do consumo base ($l.s^{-1}$) em cada nó.....	42
Tabela 11: Dados de entradas no Software Epanet 2.0 dos nós em todos os cenários.....	43
Tabela A 1: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 1.....	56
Tabela A 2: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 1.	57
Tabela A 3: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 2.....	58
Tabela A 4: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 2.	59
Tabela A 5: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 3.....	60
Tabela A 6: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 3.	61
Tabela A 7: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 4.....	62
Tabela A 8: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 4.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	Redes de abastecimento de água	11
3.1.1	Classificação.....	12
3.1.2	Materiais.....	12
3.1.3	Coeficiente de Hazen-Williams (C)	12
3.2	Manutenção e Substituição.....	13
3.3	Corrosão e Incrustações	14
3.3.1	Corrosão	14
3.3.2	Incrustações.....	15
4	MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1	Acompanhamento da troca das tubulações	17
4.2	Análises Mineralógicas	17
4.3	Rugosidade.....	18
4.4	Simulações da Rede de Abastecimento.....	19
4.4.1	Elaboração das simulações.....	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Análises Mineralógicas	29
5.1.1	Análises das Águas.....	38
5.2	Rugosidade.....	41
5.3	Simulações da Rede de Abastecimento.....	41
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	53
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
8	APÊNDICE A	56
9	ANEXO 1.....	64

1 INTRODUÇÃO

Hoje, a grande maioria dos mananciais utilizados como fonte de água para abastecimento humano pode enquadrar-se de acordo com a Resolução CONAMA N° 357, de 17 de Março de 2005, em diferentes classes que necessitam de tratamentos para o consumo humano.

Assim, para que estes tratamentos sejam efetuados é necessário conhecer as características biológicas, físicas, organolépticas, químicas e radiológicas da água bruta captada. Esta caracterização é um dos elementos necessários para que seja possível determinar um tratamento adequado para o consumo humano.

Após o tratamento, a qualidade da água obtida deve ser preservada até o momento do consumo. Por isso, as redes de abastecimento de água tornam-se um componente muito importante do sistema de abastecimento de água para que esta qualidade seja preservada, além de serem a parte do sistema de abastecimento de água que se localiza mais próxima ao consumidor. Podem-se caracterizar as redes de abastecimento como sendo “[...] a parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinados a colocar a água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressões adequadas” (TSUTIYA, 2004, p. 389). Entretanto, sem a manutenção das mesmas, suas condições hidráulicas (pressões, velocidades, diâmetros e outros) podem ser danificadas e prejudicar os consumidores.

Quando combinadas determinadas características da água, com os insumos utilizados para o tratamento desta, pode haver geração de resíduos, os quais se depositam na forma de incrustações na superfície interna das tubulações nas redes de abastecimento de água. Tais incrustações podem ocasionar problemas no desempenho hidráulico da rede, além de que seu acúmulo provocado durante o tempo gera rugosidades que podem reduzir em muito a área da seção transversal da tubulação. Estas incrustações fazem com que o coeficiente C de Hazen-Williams seja influenciado e tenha valor reduzido, já que se trata de um coeficiente que depende da natureza do material da tubulação.

A Cidade de Rio Claro, conta com dois mananciais para seu abastecimento, o Ribeirão Claro (águas captadas pela Estação de Tratamento de Água I (ETA I)) e o Rio Corumbataí (águas captadas pela ETA II). A ETA I localiza-se na parte central da cidade, e apresenta uma capacidade nominal de tratamento da ordem de 350 l/s, com um tratamento convencional (Floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação). A ETA II se localiza no Km 8 da Estrada Municipal Rio Claro/ Ajapi, tem capacidade nominal de 500 l/s, e também usa o tratamento convencional. (DAAE Rio Claro)

Devido à idade da tubulação de ferro fundido (FoFo) da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro - SP, que em alguns casos chega a datar do final do século XIX, e nos demais datam da década de 70 do século XX, às perdas, tanto de água, como de condições hidráulicas; e à influência na qualidade da água que pode chegar aos consumidores, a cidade de Rio Claro está desenvolvendo um processo de troca e de limpeza da tubulação. O momento foi oportuno para a realização do presente trabalho, uma vez que raramente pode-se encontrar esta situação de troca das tubulações nas cidades.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar o grau e a composição mineralógica das incrustações presentes em amostras de tubos de ferro fundido do sistema de abastecimento de água de Rio Claro, bem como verificar uma relação entre os minerais encontrados nas incrustações e as características das águas bruta e tratada.

Além de, analisar o comportamento hidráulico de diferentes cenários da Rede de Abastecimento de Água de Rio Claro de acordo com o estado de conservação do material e o grau de incrustação. Para assim, comparar os valores de pressão, velocidade de escoamento e perda de carga da situação atual da rede de abastecimento de água, com cenários que envolvem recuperação e troca da rede.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Redes de abastecimento de água

As Redes de Abastecimento de Água têm como principal função “[...] colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressão adequadas” (TSUTIYA, 2004, p. 389). Para que isso seja feito, são gastos de 50 a 75% da verba total das obras do Sistema de Abastecimento de Água (TSUTIYA, 2004).

Estas redes podem ser classificadas de acordo com o arranjo das canalizações primárias e secundárias; além disso, as tubulações são fabricadas usando-se diversos tipos de materiais, os quais sofrem deterioração com o passar do tempo, sendo necessária uma constante manutenção da Rede de Abastecimento de Água. A seguir estão especificados os tipos de classificação das redes, os possíveis materiais usados para sua composição, os métodos de manutenção e substituição e, alguns problemas que ocorrem com a deterioração das tubulações.

3.1.1 *Classificação*

As redes são geralmente compostas por dois tipos de canalizações, as principais e as secundárias. A primeira apresenta maior diâmetro e abastece as canalizações secundárias. Estas últimas, com diâmetro menor, abastecem diretamente os pontos de consumo de água. De acordo com o arranjo destes dois tipos de canalizações, as redes podem ser classificadas como ramificada, malhada ou mista (TSUTIYA, 2004).

As redes ramificadas são caracterizadas por apresentar um reservatório ou estação elevatória a partir do qual parte uma tubulação tronco, desta última saem os condutos secundários pelos quais a distribuição é feita, ou seja, o sentido do escoamento é do tronco para os condutos secundários até as extremidades mortas ou pontas secas. Apresentam um inconveniente: com a ocorrência de um acidente, todo o abastecimento é comprometido devido ao seu traçado. As redes ramificadas ainda podem ser classificadas como redes ramificadas com traçado em espinha de peixe ou redes ramificadas com traçado em grelha (TSUTIYA, 2004).

As redes malhadas são formadas por tubulações principais que formam anéis ou blocos, os quais permitem reversibilidade do fluxo de água. Podem ser classificadas em rede malhada em anéis, ou rede malhada em blocos (TSUTIYA, 2004).

As redes mistas tratam-se de uma associação entre as redes ramificadas e malhadas (TSUTIYA, 2004).

3.1.2 *Materiais*

O material utilizado nas redes também é um fator importante a ser determinado. Para esta escolha deve ser levada em conta a resistência dos materiais, para suportar pressões internas e externas, as variações de pressões a que irão ser submetidas, a durabilidade, o material da superfície interna e externa, a instalação (peso das tubulações e peças, tipos de juntas, diâmetro da tubulação, facilidades em fazer interligações) entre outros fatores (TSUTIYA, 2004).

Entre os principais materiais atualmente utilizados para a composição das redes estão: tubos de ferro fundido cinzento e ferro fundido dúctil, tubos de policloreto de vinila (PVC), tubos de polietileno (PE) e tubos de fibrocimento (TSUTIYA, 2004, p. 432).

3.1.3 *Coeficiente de Hazen-Williams (C)*

Trata-se de um coeficiente que depende da natureza (material e estado) das paredes dos tubos, utilizado na fórmula de Hazen-Williams. Deve haver uma escolha criteriosa do C, já que sua negligência pode reduzir em muito a precisão da fórmula (NETO, 1998).

“Para tubos de ferro ou de aço, o coeficiente C é uma função do tempo, de modo que o seu valor deve prever a vida útil que se espera na canalização” (NETO, 1998, p. 151). No presente trabalho, como a tubulação analisada é de ferro fundido, o valor de C varia de acordo com a idade da tubulação, valendo ressaltar que partes da rede de abastecimento de água de Rio Claro são muito antigas, e que apresentam um coeficiente C muito baixo.

3.2 Manutenção e Substituição

Devido à idade das tubulações, algumas condições hidráulicas, tais como pressões, velocidades e diâmetros podem ser modificadas, ocasionadas pela deterioração do sistema de abastecimento de água, e acarretando em altos índices de perdas de água, aumento dos custos operacionais e diminuição da qualidade da água (ABRANCHES, 2009). Frente a isso, tornam-se necessárias “medidas preventivas, tais como estabilização química da água e o emprego de técnicas de proteção de tubulações metálicas contra a corrosão” (HELLER; PÁDUA, 2006, p. 736), e a recuperação ou troca das redes.

As técnicas empregadas para substituição da rede podem ser as convencionais, tais como assentamento com abertura de valas, ou as não-convencionais, conhecidas por métodos não destrutivos. Estes últimos constituem uma “ [...] opção de execução de obras ligadas à instalação, reparação e reforma de tubos, dutos e cabos subterrâneos utilizando técnicas que minimizam ou eliminam a necessidade de escavações” (ABRATT, 2009). Em sua maioria apresentam vantagens quando comparado aos métodos convencionais, tais como poderem ser aplicados em regiões centrais das cidades e com infra-estrutura subterrânea já consolidada, devido a não presença de valas; economia de até 70% em comparação às técnicas destrutivas; e redução de riscos ambientais e custos sociais (ABRANCHES, 2009).

Estas técnicas visam à recuperação da capacidade de adução, e para que isto seja feito corretamente, podem ser colocadas em prática algumas alternativas, tais como

[...] limpeza periódica das tubulações existentes; reabilitação das tubulações; aumento da capacidade de recalque pela substituição dos conjuntos elevatórios ou troca de rotores das bombas; instalação de *boosters*; construção de nova adutora em paralelo à que apresenta problemas; substituição integral da tubulação existente (HELLER; PÁDUA, 2006, p. 737).

As principais são a reabilitação e a recuperação que se tratam de “métodos de recuperação da integridade de tubulações defeituosas e de estruturas subterrâneas, bem como a extensão de sua vida útil” (ABRATT, 2009), e são feitas quando as paredes da tubulação não se encontram comprometidas estruturalmente, porém apresentam-se incrustadas internamente. A técnica compreende em fazer a limpeza e posteriormente o revestimento da superfície interior do tubo, geralmente com argamassa acrílica ou com resina epoxídica.

3.3 Corrosão e Incrustações

Pode-se notar que “[...] hoje no Brasil as maiores deficiências dos sistemas de abastecimento de água devem-se principalmente à deterioração dos sistemas mais antigos especialmente na parte de distribuição de água” (ABRANCHES, 2009, p. 23). Com este envelhecimento das tubulações, há uma acentuação do fenômeno da corrosão e de formação de incrustação.

Estas incrustações constituem um dos principais problemas nas redes de distribuição de água potável, podendo ter origem no meio externo onde a tubulação foi instalada ou nas características do próprio líquido transportado (HELLER; PÁDUA, 2006). Devido a isso é necessário que se conheça as características da água bruta captada e da água tratada (características biológicas, químicas, físicas e radiológicas), para que seja realizado um tratamento adequado, que retire o excesso de impurezas que são as prováveis causadoras das incrustações e da corrosão. Além do envelhecimento e das características da água bruta, deve-se considerar os insumos utilizados para o tratamento da água (cal hidratada, cloreto férrico, cloro e flúor) como um dos fatores que pode ocasionar estes problemas nas tubulações.

3.3.1 Corrosão

A corrosão pode ser definida como sendo “[...] a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos.” (GENTIL, 2007, p.1). Esta deterioração pode ocasionar inconvenientes como desgastes, variações químicas e modificações estruturais, que podem tornar o material inadequado para o uso. Na maioria das vezes com a corrosão, os metais retornam ao composto original do minério, no caso do ferro, retorna à forma de óxido (forma mais estável) (GENTIL, 2007).

Os problemas causados por este fenômeno podem influenciar em diversas atividades, como a indústria, petrolífera, petroquímica, meios de transporte e de comunicação, na construção civil e em diversas outras. As perdas que atingem estas atividades podem ser diretas ou indiretas. As primeiras podem ser caracterizadas pelos custos de troca do material deteriorado; e os custos e a manutenção das formas de proteção contra corrosão. As perdas indiretas, englobam muitas vezes aspectos que nem sempre podem ser quantificados e que podem totalizar elevados custos, entre estas perdas estão: as paralisações da atividade para manutenção ou substituição dos materiais; perda de produto; perda de eficiência; contaminação de produtos; e superdimensionamento nos projetos. (GENTIL, 2007)

A corrosão estudada no presente trabalho é aquela causada pela água, a qual é o eletrólito no caso. Esta corrosão depende de alguns fatores como gases dissolvidos (oxigênio,

nitrogênio, dióxido de carbono, cloro, amônia, dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e gás sulfídrico) quantidade de sais dissolvidos (cloretos de sódio, de ferro e de magnésio, bicarbonatos de cálcio, de magnésio e de ferro, carbonato de sódio e outros); quantidade de ácidos ou bases dissolvidas (influência do pH); matéria orgânica (de origem animal ou vegetal); presença de bactérias, limos e algas; sólidos suspensos (de fundamental controle para a qualidade sanitária da água potável); taxa de aeração; temperatura; velocidade e ação mecânica. (GENTIL, 2007)

Devido ao fato de que a corrosão ocasiona diversas perdas e problemas, devem-se considerar formas para evitar este processo. Para as tubulações que se encontram enterradas (no caso as redes de abastecimento de água), podem ser propostos vários métodos para a diminuição da taxa de corrosão nos materiais metálicos, tais como os métodos baseados na modificação do processo (projeto da estrutura, condições da superfície e aplicação de proteção catódica); método baseado na modificação do metal (aumento da pureza e tratamento térmico) e métodos baseados nos revestimentos protetores (revestimentos orgânicos, como tintas, polímeros ou resinas; revestimentos inorgânicos, como esmaltes e cimento; e revestimentos metálicos) (GENTIL, 2007).

3.3.2 Incrustações

O estado da superfície interna dos tubos da rede de abastecimento, as características da água bruta e da água tratada, os insumos utilizados para o tratamento da água, a temperatura e a velocidade da água, são fatores que quando combinados podem ocasionar a geração de resíduos que se depositam na superfície interna das tubulações e formam as conhecidas incrustações (em forma de tubérculos).

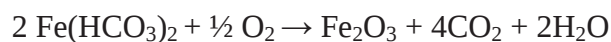
O termo incrustação deve ser reservado ao fenômeno da constituição de camadas ou crostas devidas a certas substâncias presentes em quantidades excessivas na água, que vão se depositando ou aderindo às paredes dos tubos, especialmente os tubos metálicos, diminuindo o diâmetro interno. (NETO, 1998, p. 151)

“A prática tem demonstrado que em tubos de ferro fundido dúctil não revestido verifica-se o depósito de ferro insolúvel, formando tubérculos, devido à ação de bactérias oxidantes [...]” (TSUTIYA, 2004, p. 203). Estes tubérculos se acumulam e formam uma rugosidade na tubulação que pode comprometer o desempenho hidráulico.

Na maioria das vezes os tubérculos são constituídos principalmente de óxidos e hidróxidos de ferro: $\text{Fe}(\text{OH})_2$, Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou FeOOH . O ferro encontrado nestes

tubérculos pode ser originado do ferro solúvel presente na água, ou da corrosão das tubulações (GENTIL, 2007).

O ferro solúvel na água está geralmente nas formas de Fe^{2+} e Fe^{3+} , entretanto na presença de oxigênio, o bicarbonato de ferro (II), $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, presente na água sofre oxidação formando um composto insolúvel, o óxido férrico (Fe_2O_3):



As incrustações também podem sofrer influência das bactérias utilizadoras de ferro, tais como *Gallionella ferruginea*, ou dos gêneros *Crenotrix*, *Leptothrix*, *Siderocapsa* e *Sideromonas* que aceleram a oxidação do ferro.

Como conseqüências dos tubérculos depositados na forma de incrustação podem ocorrer problemas nas redes de distribuição e para os consumidores (GENTIL, 2007; HELLER; PÁDUA, 2006), tais como:

- Diminuição da capacidade hidráulica da rede, ocasionando o entupimento da mesma após um determinado período de uso;
- Diminuição da capacidade de vazão das tubulações;
- Criação de condições para corrosão por aeração diferencial, ocorrendo corrosão embaixo dos tubérculos e com possível formação de resíduo preto de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ou Fe_3O_4 ;
- Criação de condições para corrosão microbiológica devido ao possível desenvolvimento de bactérias anaeróbias embaixo dos tubérculos;
- Problemas econômicos, tais como troca das tubulações, manutenção da rede e acréscimo no consumo de energia elétrica, para superar a perda de carga adicional causada pelas incrustações e pelo aumento da rugosidade das tubulações;
- Problemas organolépticos devido ao desprendimento dos tubérculos das tubulações, como resultado de alterações hidráulicas, tais como aumento da velocidade de escoamento e admissão de ar nas bombas, e possível ocorrência do fenômeno *água vermelha*, no qual a água obtém uma coloração castanho-alaranjada.

Este último fenômeno conhecido por água vermelha pode ocasionar inconvenientes para os consumidores tais como aspecto visual desagradável, alteração de sabor da água, manchas em lavagens de tecidos, manchas em instalações sanitárias de material cerâmico, necessidade de limpeza freqüente dos reservatórios e bloqueamento das resinas trocadoras ou permutadoras usadas em desmineralização de águas.

Devido aos fatores acima mencionados, cabe ressaltar a importância do presente trabalho para que se consiga estabelecer uma relação entre os minerais encontrados nas

incrustações e as características das águas tratadas, propondo uma solução para que este fenômeno seja minimizado após as substituições ou recuperação das tubulações da rede de abastecimento de água que estão sendo realizadas na cidade de Rio Claro.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Acompanhamento da troca das tubulações

Para a realização do presente trabalho foi feito um acompanhamento da troca das tubulações de FoFo da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro, durante o segundo semestre de 2009. Além disso, foram selecionados alguns pedaços intactos das tubulações, para que fossem feitas as análises mineralógicas dos depósitos (incrustações).

4.2 Análises Mineralógicas

O método utilizado para a realização das análises mineralógicas foi a Difratomia por Raios – X, que se qualifica por ser um método não destrutivo na caracterização e identificação de fases minerais. Trata-se de um “fenômeno de interação entre a radiação eletromagnética e a matéria ordenada” (LABORATÓRIO DE CRISTALOGRAFIA, 2009), no qual se analisa o espalhamento elástico de radiação em todas as direções, provocado pela incidência dos raios x no átomo. Quando ocorre o espalhamento coerente destes, nota-se um ângulo de difração bem definido, a partir do qual se obtém informação sobre o arranjo atômico do cristal (KAHN, 2009).

Este método tem a finalidade, portanto de determinar a estrutura cristalina da matéria. Quando as amostras são expostas aos feixes de raios, sofrem diferentes tipos de interação, caracterizando um tipo de mineral.

Para as análises de Difratomia por Raios – X coletaram-se três amostras compostas de incrustação presentes em tubulações de ferro fundido do sistema de abastecimento de água da cidade de Rio Claro e se elaboraram lâminas de 0,03mm de espessura com material. Para a interpretação dos resultados utilizou-se o software *Siemens DifracPlus EVA*. As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica (LABOGEO) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Rio Claro, o qual dispõe de um Difratomômetro Siemens D5000 com goniômetro de textura acoplado.

As determinações analíticas foram realizadas no laboratório *Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd.*, no Canadá. A dureza dos minerais foi determinada com base

na escala de Mohs e serviu de referência para a determinação da resistência dos materiais que compõem a incrustação.

4.3 Rugosidade

Para a estimativa da rugosidade relativa dos tubos de FoFo, foram medidos o diâmetro interno do tubo e a espessura de várias incrustações ao longo de cada tubo, de acordo com a Equação 1.

$$\lambda = \varepsilon_{\text{méd}} / d \quad \text{Equação (1)}$$

sendo: d = Diâmetro interno; $\varepsilon_{\text{méd}}$ = Espessura média da incrustação e λ = Rugosidade Relativa.

A Figura 1 apresenta fotografias de alguns pedaços da tubulação de ferro fundido que compõe a rede do sistema de abastecimento de Rio Claro, SP.



Figura 1: Amostras de pedaços de tubos de FoFo com incrustações retirados do sistema de abastecimento no município de Rio Claro – SP. (Fonte: DAAE - Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Rio Claro).

4.4 Simulações da Rede de Abastecimento

Para a proposição de diferentes cenários considerando diferentes valores do coeficiente de resistência de Hazen-Williams da Rede de Abastecimento de Água do município de Rio Claro, foram realizadas quatro simulações com a utilização do Software Epanet 2.0 de modelagem hidráulica e de qualidade de água, desenvolvido pela U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA) e, adaptado para o português pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) pertencente ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

4.4.1 Elaboração das simulações

A área utilizada para o presente trabalho é o setor quatro da cidade de Rio Claro, cuja planta foi disponibilizada pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Rio Claro (DAAE) e encontra-se no ANEXO 1.

Para que as simulações fossem realizadas com êxito, foi necessário seguir as equações de equilíbrio da rede, expressas nas Equações 2, 3 e 4, seguindo os seguintes princípios:

- A soma algébrica das perdas de carga nos trechos i-j num circuito hidráulico devem ser nulos, sendo i o nó inicial do trecho e j o nó final (Equação 2) (TSUTIYA, 2004, p. 407).

$$\sum \Delta H_{i,j} = 0 \quad \text{Equação (2)}$$

- A soma das vazões que afluem a um nó deve ser igual a soma das vazões que saem do nó, sendo $Q_{i,j}$ a vazão no trecho entre o nó i-j e E_i a vazão concentrada no nó (Equação 3) (TSUTIYA, 2004, p. 408).

$$\sum Q_{i,j} + E_i = 0 \quad \text{Equação (3)}$$

- Em cada elemento de cada sub-circuito deve ser satisfeita a lei de perda de carga Equação 4 (TSUTIYA, 2004, p. 408).

$$\Delta H_{i,j} = r_{ij} Q_{i,j}^m \quad \text{Equação (4)}$$

O método utilizado pelo software Epanet 2.0 para possibilitar uma solução numérica para estas condições de equilíbrio hidráulico foi o método proposto por Todini e Pilati (1987), que segue as equações 5, 6, 7, 8, 9 e 10 (GOMNES; SALVINO, 2000, p.181).

$$H_i - H_j = h_{ij} = r_{ij} Q_{ij}^n + m_{ij} Q_{ij}^2 \quad \text{Equação (5)}$$

onde:

H = cota piezométrica no nó

h = perda de carga total

r = termo de perda de carga

Q = vazão

n = expoente da vazão

m = coeficiente de perda de carga localizada.

O segundo conjunto de equações que devem ser especificado refere-se a conservação das vazões nos nós (GOMNES; SALVINO, 2000, p.182):

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, N \quad \text{Equação (6)}$$

onde:

D_i = consumo no nó “i” e, por convenção a vazão que chega ao nó é positiva. Assim, conhecendo a cota piezométrica em determinados nós (nós de cota piezométrica fixa), pretende-se obter os valores de cota piezométrica, H_i , e de vazão, Q_{ij} , na rede que satisfaçam as equações.

Neste método, é arbitrada primeiramente uma distribuição de vazões nas tubulações que não tem necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo a seguinte matriz (GOMNES; SALVINO, 2000, p.182):

$$\mathbf{A} * \mathbf{H} = \mathbf{F} \quad \text{Equação (7)}$$

onde:

$\mathbf{A}$ = matriz Jacobiana de ($N \times N$)

$\mathbf{H}$ = vetor de incógnitas em termos de cota piezométrica ($N \times 1$)

$\mathbf{F}$ = vetor dos termos do lado direito da equação ($N \times 1$).

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são:

$$A_{ij} = \sum p_{ij}$$

Enquanto que os elementos não nulos fora da diagonal são:

$$A_{ij} = - p_{ij}$$

Onde:

p_{ij} = inverso da derivada da perda de carga total no trecho entre os nós i e j em relação a vazão.

Cada termo do lado direito da matriz é composto por uma parcela referente ao balanço de vazão no nó à qual é adicionado um fator de correção de vazão:

$$F_i = (\sum_j Q_{ij} - D_i) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad \text{Equação (8)}$$

Sendo o ultimo termo aplicável a qualquer trecho que ligue um no i a um no f de cota piezométrica fixa e o fator de correção de vazão, y_{ij} , é dado pela seguinte expressão para tubulações (GOMNES; SALVINO, 2000, p.183):

$$y_{ij} = p_{ij} (r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2) \operatorname{sgn}(Q_{ij}) \quad \text{Equação (9)}$$

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, as novas vazões podem ser obtidas de acordo com a Equação 10 (GOMNES; SALVINO, 2000, p.183):

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \quad \text{Equação (10)}$$

Para que fossem realizadas as simulações com os diferentes cenários, foi necessária primeiramente a elaboração de diversas etapas, as quais estão listadas e especificadas abaixo:

- Traçado da Rede: o sistema simulado neste trabalho considera uma rede principal hipotética, com nove anéis, uma vez que o setor não é de fato abastecido somente por um reservatório. Para definição do traçado baseou-se nos maiores valores de diâmetro e numa rede principal possível de atingir todos os pontos do setor;
- Cálculo da área do setor: a área do setor foi calculada utilizando o Software AutoCad;
- Densidade populacional: foi considerada a densidade demográfica de saturação para Região Metropolitana de São Paulo, para bairros residenciais populares com lote padrão de 250m², já que não há dados oficiais de cidades do interior de São Paulo ;
- Consumo per capita (l.hab⁻¹.dia⁻¹): foi feita uma média dos valores de consumo per capita em municípios do interior do Estado de São Paulo (TSUTIYA, 2004, p. 50);
- Vazão específica de distribuição:

$$q_d = (K_1 K_2 d q) / 86400 \quad \text{Equação (11)}$$

Sendo:

$K_1=1,25$ - Valor recomendado para projeto para no interior de São Paulo (TSUTIYA, 2004, p. 53).

$K_2=1,5$ - Valor recomendado para projeto no Brasil (TSUTIYA, 2004, p. 54).

q = Consumo per capita (l.hab⁻¹.dia⁻¹)

d = Densidade populacional (hab.ha⁻¹)

- Reservatório: Foi escolhido o reservatório de nível fixo (RNF) cujas propriedades são totalmente independentes do funcionamento da rede. A localização do mesmo foi na maior cota do setor, e com entrada de água pelas tubulações de maior diâmetro da rede.
- Cálculos das áreas de influencia de cada nó: foram calculadas com o software AutoCAD dividindo-se o terreno do setor da maneira mais proporcional possível.
- Cálculo do Consumo-Base em cada nó:

$$\text{Consumo} = A \times q_d \quad \text{Equação (12)}$$

Sendo:

A= área de influencia de cada nó (ha);

q_d = vazão específica de distribuição ($\text{l.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$).

- Cotas dos nós: de acordo com Amanco (2009) as cotas foram determinadas baseadas nas cotas do terreno e nas recomendações de recobrimento mínimo e profundidade mínima e máxima das valas. De acordo com a norma NBR 12262/1992, a profundidade máxima das valas retangulares de abastecimento de água deve ser de 1,30 m, sendo que a tubulação de água deve ficar no mínimo, 0,20 m acima da tubulação de esgoto e a distância mínima entre as tubulações de água e de esgoto deve ser de 1,00 m, como consultado no manual de PVC *Amanco*.

De acordo com o fabricante de tubos de PVC *Amanco*, recomenda-se instalar os tubos em valas com no mínimo 60 cm de profundidade. Portanto foi adotado como profundidade de todas as valas 0,60 m. Tal valor está adequado à profundidade máxima estabelecida pela norma NBR 12262/1992, ao recobrimento mínimo para tubos de ferro fundido e à profundidade mínima das valas dos tubos de PVC

- Comprimento dos trechos: foram utilizados os comprimentos estabelecidos no mapa do setor disponibilizado pelo DAAE de Rio Claro.

- Cenários: para as quatro simulações foram utilizados os seguintes cenários:

Cenário 1: tubulação no estado atual (10467,4 m), com valores de diâmetros disponíveis no mapa do setor disponibilizado pelo DAAE de Rio Claro, sendo, portanto os valores atuais;

Cenário 2: tubulação parcialmente trocada (500m; 4,78%) e recuperada (1609,4m; 15,37%), com valores de diâmetros disponíveis no mapa do setor disponibilizado pelo DAAE de Rio Claro, sendo, portanto os valores atuais;

Cenário 3: tubulação totalmente nova (10467,4 m), com valores de diâmetros disponíveis no mapa do setor disponibilizado pelo DAAE de Rio Claro, sendo, portanto os valores atuais;

Cenário 4: tubulação totalmente nova (10467,4 m) e com diâmetros adaptados às recomendações da antiga norma PNB 594/77 da ABNT para as tubulações principais, na qual o diâmetro mínimo deve ser de 150mm quando abastecer zonas comerciais ou residenciais com densidade igual ou superior a 150hab.ha⁻¹ (TSUTIYA, 2004, p. 403). Foi consultada esta norma, uma vez que a atual norma NBR 12218/1994 da ABNT não recomenda diâmetros mínimos para as tubulações principais.

A Tabela 1 apresenta os Coeficientes de Hazen-Williams (C) utilizados nos diferentes cenários.

Tabela 1: Valores do coeficientes de Hazen-Williams para os distintos cenários.

	C Ferro Fundido	C PVC	C PEAD	Diâmetros utilizados
Cenário 1	3,87 ¹	130 ²	-	Atuais
Cenário 2	13,99 ¹ (Para tubulação recuperada) 3,87 ¹ (Para tubulação não trocada)	130 ²	140 ³	Atuais
Cenário 3	-	140 ²	140 ³	Atuais
Cenário 4	-	140	140	Adequado para tubulações principais ²

1- Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP), SANIT. **Relatório Preliminar de “Determinação da viabilidade da aplicação do processo de limpeza e revestimento com resina epoxídica pela técnica de turbilhonamento em tubulações de ferro fundido objetivando a recuperação hidráulica do sistema de distribuição de rede secundária de água potável no município de Rio Claro-SP”**. Rio Claro.

2- TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

3-DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE JUNDIAÍ (DAE S/A). **Normas Técnicas**. Disponível em: <[http://www.daejundiai.com.br/daesite/biblio.nsf/V03.01/normas/\\$file/Pag%2001_10%20-%20NormasRedeAgua.pdf](http://www.daejundiai.com.br/daesite/biblio.nsf/V03.01/normas/$file/Pag%2001_10%20-%20NormasRedeAgua.pdf)>. Acesso em: jun. 2010.

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os dados de entrada dos trechos no Software Epanet 2.0 para os cenários um, dois, três e quatro respectivamente.

Tabela 2: Dados de entrada dos trechos no Cenário 1.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
T1	25	250	3,87
T2	500	60	130
T3	200	150	3,87
T4	500	50	3,87
T5	200	200	3,87
T6	510	150	3,87
T7	510	200	3,87
T8	420	200	3,87
T9	270	50	3,87
T10	180	50	3,87
T11	176	150	3,87
T12	300	150	130
T13	268	60	130
T14	236	60	130
T15	428	100	3,87
T16	140	150	3,87
T17	400	100	3,87
T18	429	60	130
T19	384	60	130
T20	185	60	130
T21	355	60	130
T22	300	100	130
T23	200	60	130
T24	200	160	130
T25	335	60	130
T26	100	60	130
T27	299,4	100	3,87
T28	382	100	3,87
T29	200	60	130
T30	400	60	130
T31	105	50	3,87
T32	100	60	3,87
T33	330	60	130
T34	200	60	130
T35	100	50	130
T36	100	60	130
T37	100	160	3,87
T38	100	150	3,87
T39	300	60	130

Tabela 3: Dados de entrada dos trechos no Cenário 2.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
T1	25	250	3,87
T2	500	60	140
T3	200	150	3,87
T4	500	50	3,87
T5	200	200	3,87
T6	510	150	3,87
T7	510	200	3,87
T8	420	200	3,87
T9	270	50	3,87
T10	180	50	3,87
T11	176	150	3,87
T12	300	150	130
T13	268	60	130
T14	236	60	130
T15	428	100	13,99
T16	140	150	3,87
T17	400	100	13,99
T18	429	60	130
T19	384	60	130
T20	185	60	130
T21	355	60	130
T22	300	100	140
T23	200	60	130
T24	200	160	130
T25	335	60	130
T26	100	60	130
T27	299,4	100	13,99
T28	382	100	13,99
T29	200	60	130
T30	400	60	130
T31	105	50	3,87
T32	100	60	13,99
T33	330	60	130
T34	200	60	130
T35	100	50	130
T36	100	60	130
T37	100	160	3,87
T38	100	150	3,87
T39	300	60	130

Tabela 4: Dados de entrada dos trechos no Cenário 3.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
T1	25	250	140
T2	500	60	140
T3	200	150	140
T4	500	50	140
T5	200	200	140
T6	510	150	140
T7	510	200	140
T8	420	200	140
T9	270	50	140
T10	180	50	140
T11	176	150	140
T12	300	150	140
T13	268	60	140
T14	236	60	140
T15	428	100	140
T16	140	150	140
T17	400	100	140
T18	429	60	140
T19	384	60	140
T20	185	60	140
T21	355	60	140
T22	300	100	140
T23	200	60	140
T24	200	160	140
T25	335	60	140
T26	100	60	140
T27	299,4	100	140
T28	382	100	140
T29	200	60	140
T30	400	60	140
T31	105	50	140
T32	100	60	140
T33	330	60	140
T34	200	60	140
T35	100	50	140
T36	100	60	140
T37	100	160	140
T38	100	150	140
T39	300	60	140

Tabela 5: Dados de entrada dos trechos no Cenário 4.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
T1	25	250	140
T2	500	150	140
T3	200	150	140
T4	500	150	140
T5	200	200	140
T6	510	150	140
T7	510	200	140
T8	420	200	140
T9	270	150	140
T10	180	150	140
T11	176	150	140
T12	300	150	140
T13	268	150	140
T14	236	150	140
T15	428	100	140
T16	140	150	140
T17	400	100	140
T18	429	150	140
T19	384	150	140
T20	185	150	140
T21	355	150	140
T22	300	150	140
T23	200	150	140
T24	200	160	140
T25	335	150	140
T26	100	150	140
T27	299,4	150	140
T28	382	150	140
T29	200	150	140
T30	400	150	140
T31	105	150	140
T32	100	150	140
T33	330	150	140
T34	200	150	140
T35	100	150	140
T36	100	150	140
T37	100	160	140
T38	100	150	140
T39	300	150	140

Para a realização das simulações, foi necessária a introdução de diversos dados iniciais no programa, tais como a equação a ser utilizada para o cálculo da perda de carga, a unidade de vazão a ser adotada durante a utilização do programa, a viscosidade relativa, entre outros como pode ser visto na Figura 2.

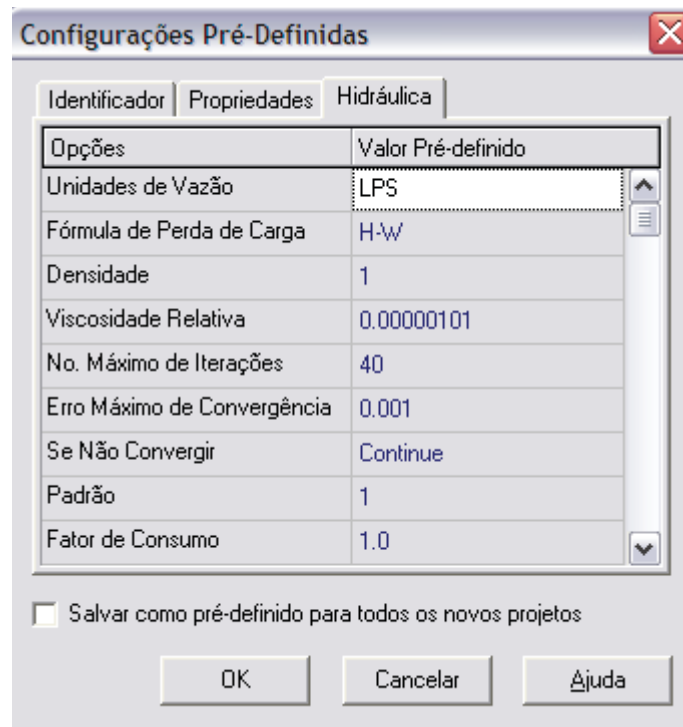


Figura 2: Janela de introdução de dados no Software Epanet 2.0

Como mencionado anteriormente, para o cálculo das perdas de carga e das velocidades nos trechos, foi utilizado no software Epanet 2.0 a fórmula de Hazen-Williams, cuja expressão é dada pela Equação 13.

$$J = 10,65 Q^{1,85} C^{-1,85} D^{-4,87} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

J = perda de carga unitária (m.m⁻¹)

Q = vazão (m³s⁻¹)

D = diâmetro interno do tubo (m)

C = coeficiente de resistência (m^{0,367}.s⁻¹)

Tal fórmula também pode ser expressa explicitando-se a velocidade, como mostrado na Equação 14.

$$V = 0,355CD^{0,63} J^{0,54} \quad \text{Equação (14)}$$

- Para o cálculo da potência da bomba necessária em cada um dos cenários, considerou-se um rendimento global médio da bomba de 67%, e utilizou-se a Equação 15 (NETO, 1998. p.271).

$$P = (Q H_{\text{man}})/50 \quad \text{Equação (15)}$$

Sendo:

P= potência em cv;

Q= vazão (l/s);

H_{man}= altura manométrica (m).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análises Mineralógicas

A caracterização mineralógica das amostras compostas extraídas de diferentes pontos da rede do sistema de abastecimento pôde ser observada nos espectrogramas gerados, por meio da Difração por Raios – X, os quais detectaram a presença de magnetita (óxido de ferro), goethita (hidróxido de ferro) e quartzo (óxido de silício) em diferentes concentrações e, em menor quantidade, verificou-se a presença de alophanos (silicato hidratado de alumínio). Encontraram-se os seguintes minerais nos três tubos utilizados como amostras:

Tubo 1 - goethita (FeO (OH)), magnetita (Fe₃O₄), quartzo(SiO₂) (Figura 3: Difratoograma da amostra do tubo 1);

Tubo 2 – magnetita (Fe₃O₄), goethita (FeO (OH)), quartzo(SiO₂) (Figura 4: Difratoograma da amostra do tubo 2);

Tubo 3 – goethita (FeO (OH)), magnetita (Fe₃O₄), quartzo (SiO₂) (Figura 5: Difratoograma da amostra do tubo 3);

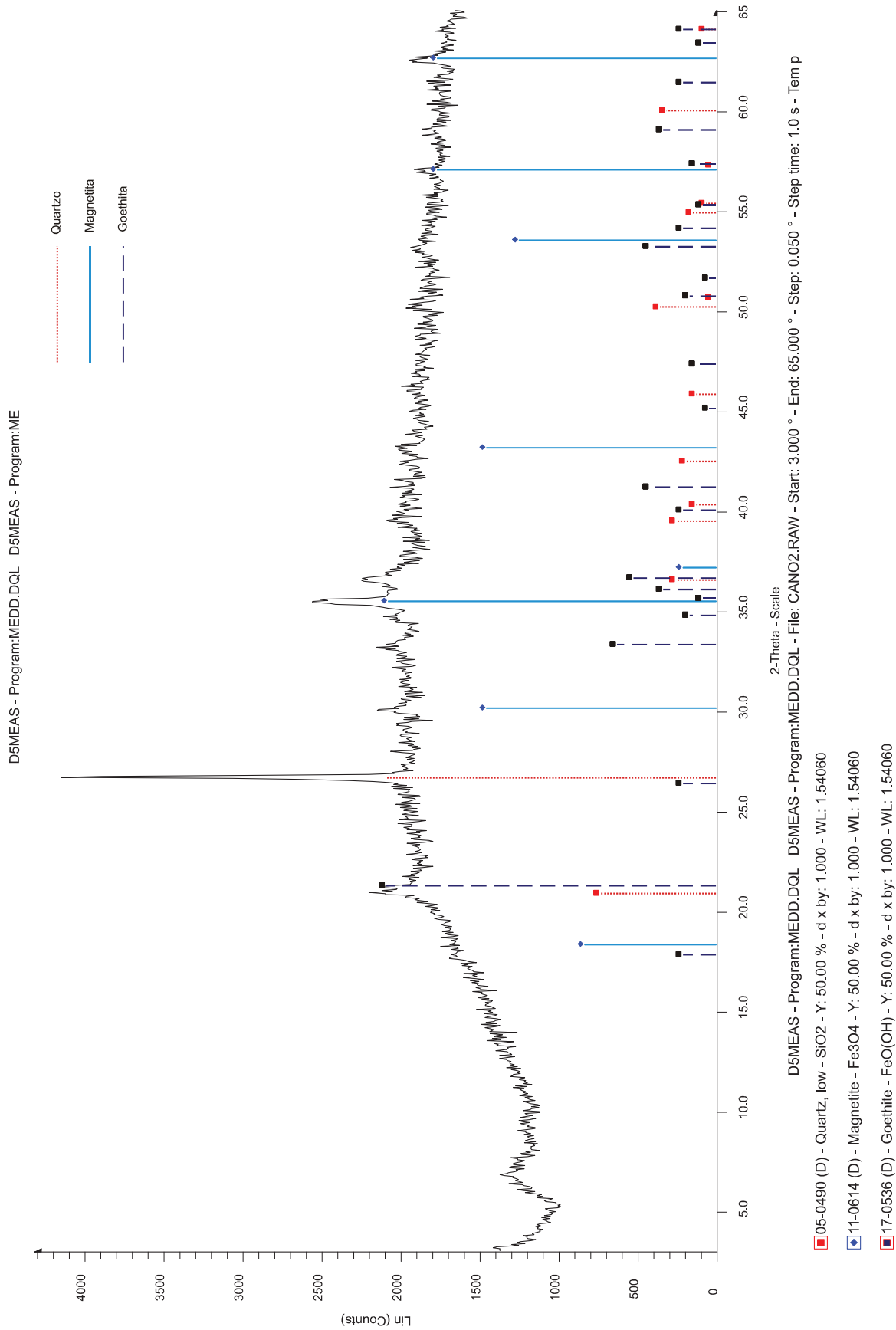


Figura 3: Difractograma da amostra do tubo 1. (Fonte: UNESP; SANIT, 2009)

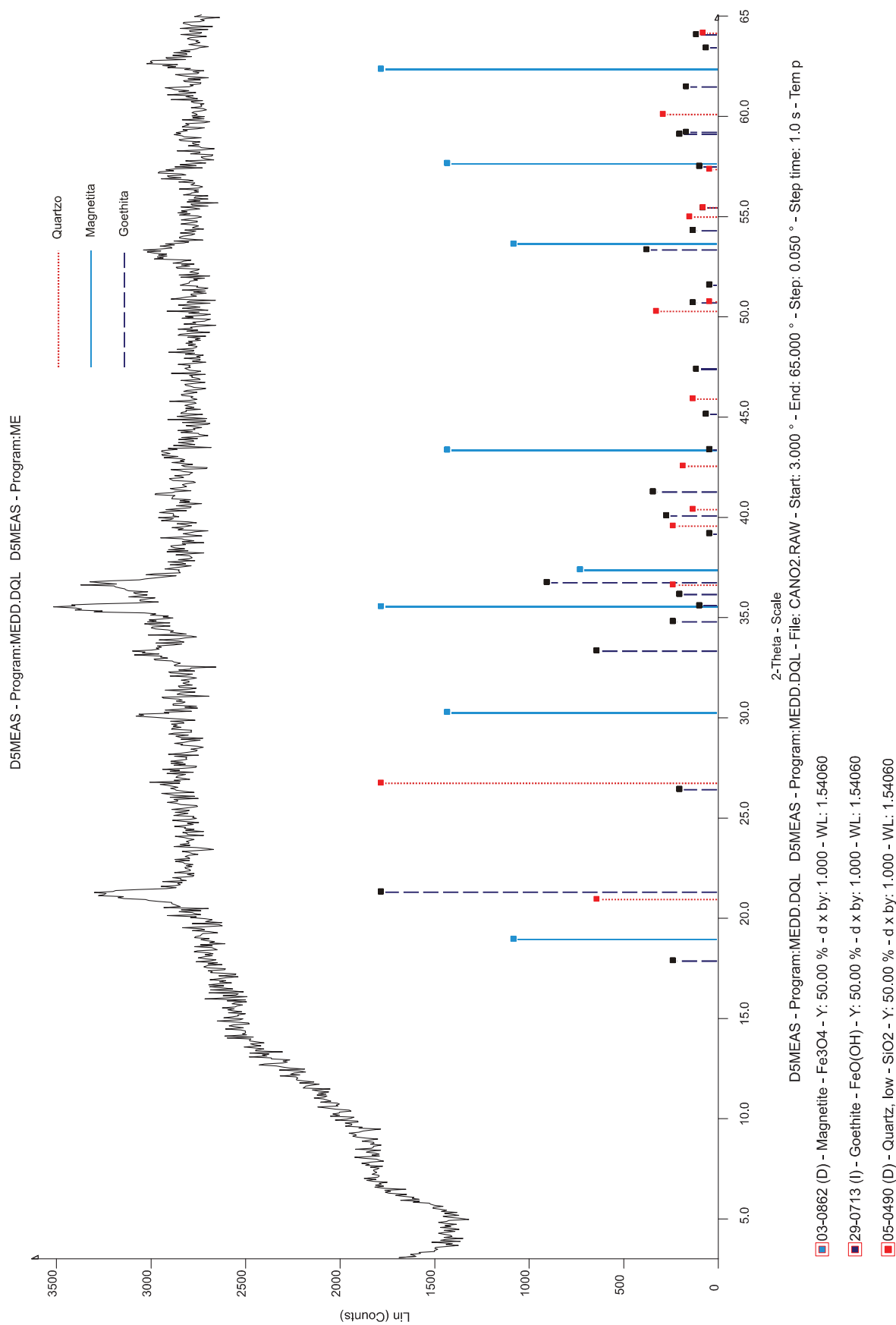


Figura 4: Difratoograma da amostra do tubo 2.

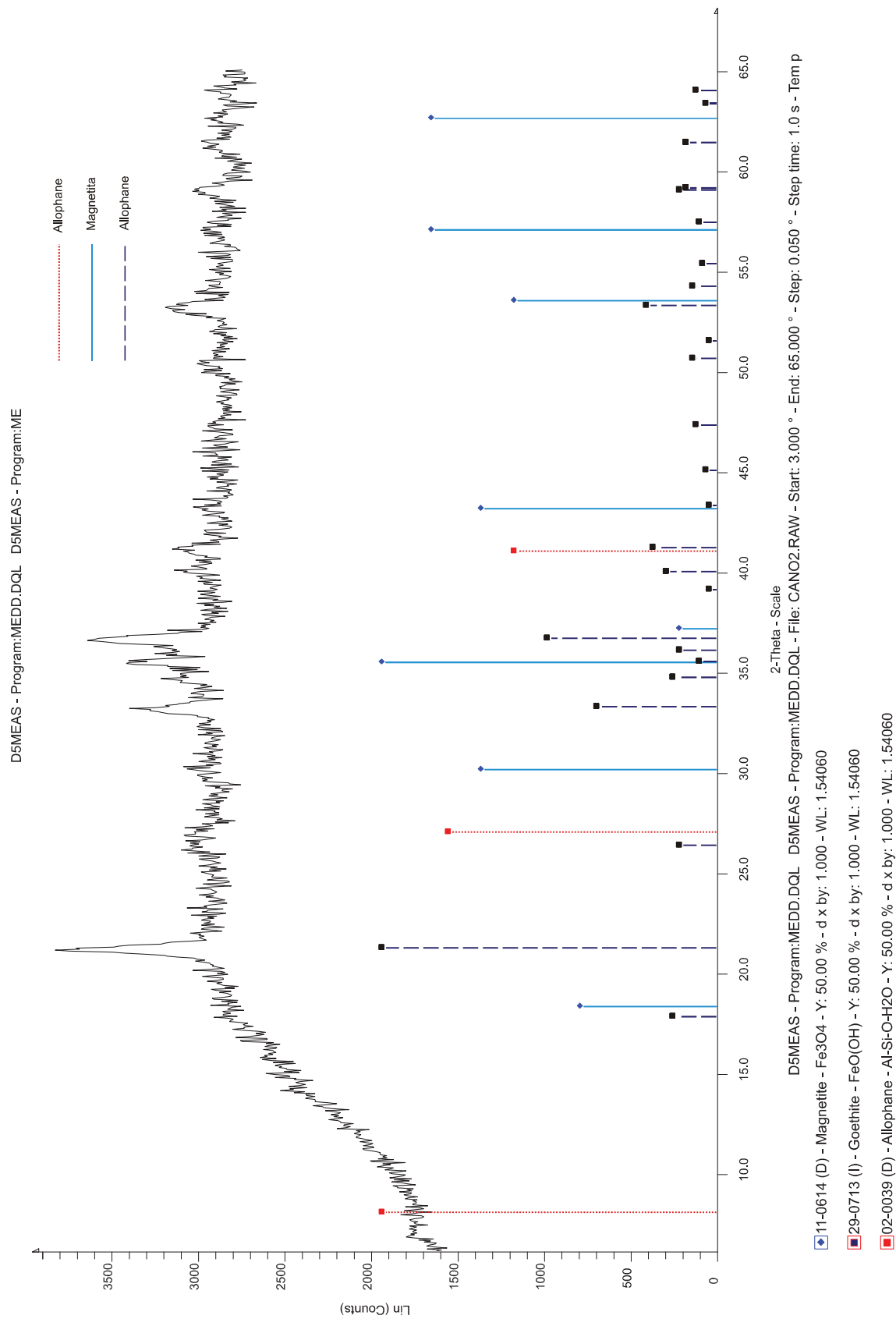


Figura 5: Difractograma da amostra do tubo 3.

Os ruídos presentes nos difratogramas das amostras podem indicar a presença de substâncias amorfas ou mal cristalizadas (como por exemplo sílica amorfa), ou seja, sem estrutura cristalina característica dos minerais, passíveis de detecção pelos Raios-X. As imagens das lâminas extraídas dos fragmentos de depósitos bem como a estrutura tridimensional dos minerais encontrados e sua fórmula química, podem ser visualizadas nas ilustrações da Figura 6.

Por meio da análise das lâminas puderam-se confirmar os resultados apontados nos difratogramas, referentes à grande concentração de óxidos e hidróxidos de ferro presentes na forma de magnetita e goethita respectivamente. O quartzo não foi detectado nos ensaios de laminação, provavelmente devido a sua baixa concentração relativa, quando comparado à magnetita e à goethita.

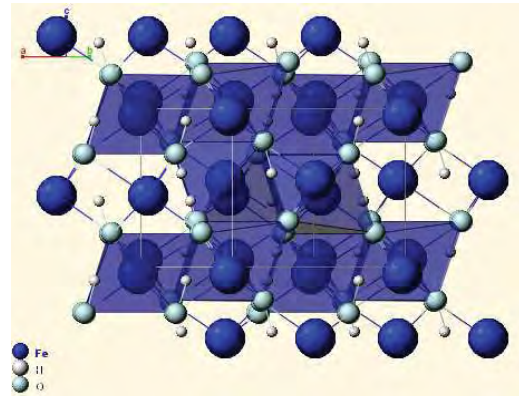
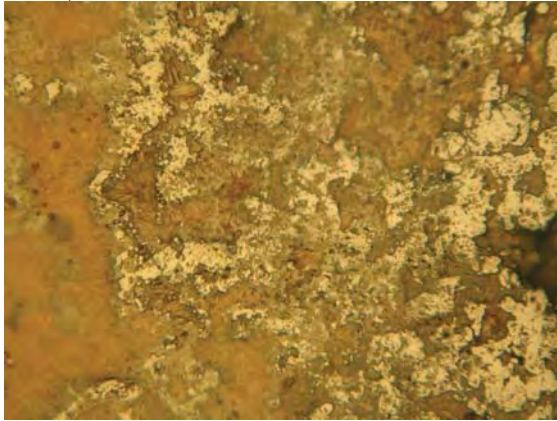
Três amostras compostas das incrustações presentes nas tubulações e uma amostra de tubo (limpo, sem nenhum resíduo de incrustação) foram encaminhadas para análise química no laboratório Acme – Canadá. Os resultados analíticos para elementos maiores das amostras de incrustações analisadas são apresentados na Tabela 6.

As amostras apresentam baixas concentrações de álcalis (Na_2O = <0,01 – 0,11% e K_2O = <0,01 – 0,02), de TiO_2 (0,02 – 0,03%), Al_2O_3 (0,83 – 1,29%), MnO (0,09 – 0,22%), MgO (<0,01 – 0,08%), CaO (0,01–0,14%) e de P_2O_5 (0,23 –0,30%). O conteúdo de SiO_2 varia de 3,11– 4,34%, e o de $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{T}}$ é muito alto, varia de 80,93 a 83,74%. O tubo limpo é mais enriquecido em $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{T}}$ (93%), SiO_2 (5,36%), TiO_2 (0,18%), MnO (0,41%) e P_2O_5 (0,56%) em relação as amostras das incrustações.

Tabela 6: Teores de elementos maiores (em %) de três amostras de incrustação extraídas da rede de abastecimento de Rio Claro, SP e uma amostra da tubulação limpa da mesma rede.

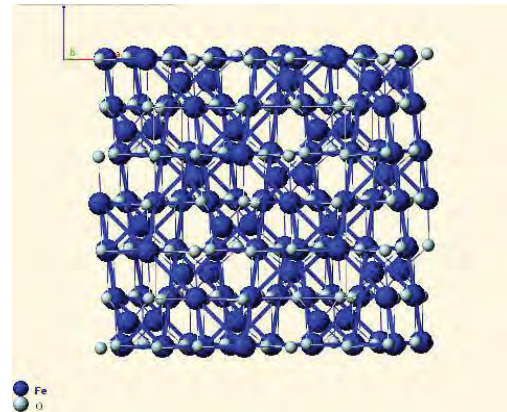
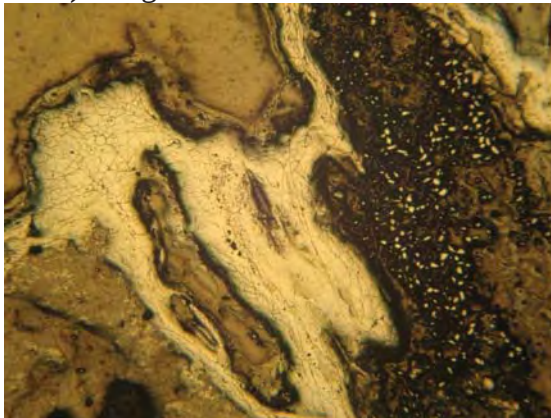
Amostra (%)	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	P_2O_5
1	3,11	0,02	0,83	80,93	0,22	0,23
2	3,30	0,03	1,29	80,02	0,09	0,30
3	4,34	0,02	0,83	83,74	0,09	0,29
Tubo Limpo	5,36	0,18	<0,01	93,4	0,41	0,56

a) Goethita



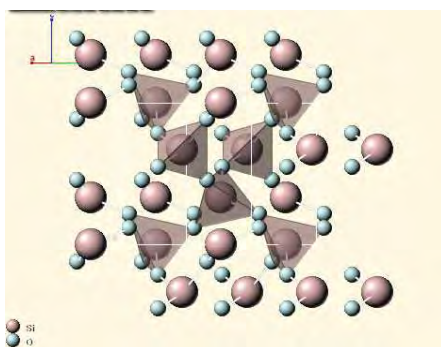
(Fonte: Gualtieri A , Venturelli P , American Mineralogist , 84 (1999) p.895-904, In situ study of the goethite-hematite phase transformation by real time, synchrotron powder diffraction, Sample at T = 156);

b) Magnetita



(Fonte: Wechsler B A , Lindsley D H , Prewitt C T , American Mineralogist , 69 (1984) p.754-770, Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites ($\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$), MT100-1350)

c) Quartzo



(Fonte: Levien L , Prewitt C T , Weidner D J , American Mineralogist , 65 (1980) p.920-930, Structure and elastic properties of quartz at pressure, P = 1 atm).

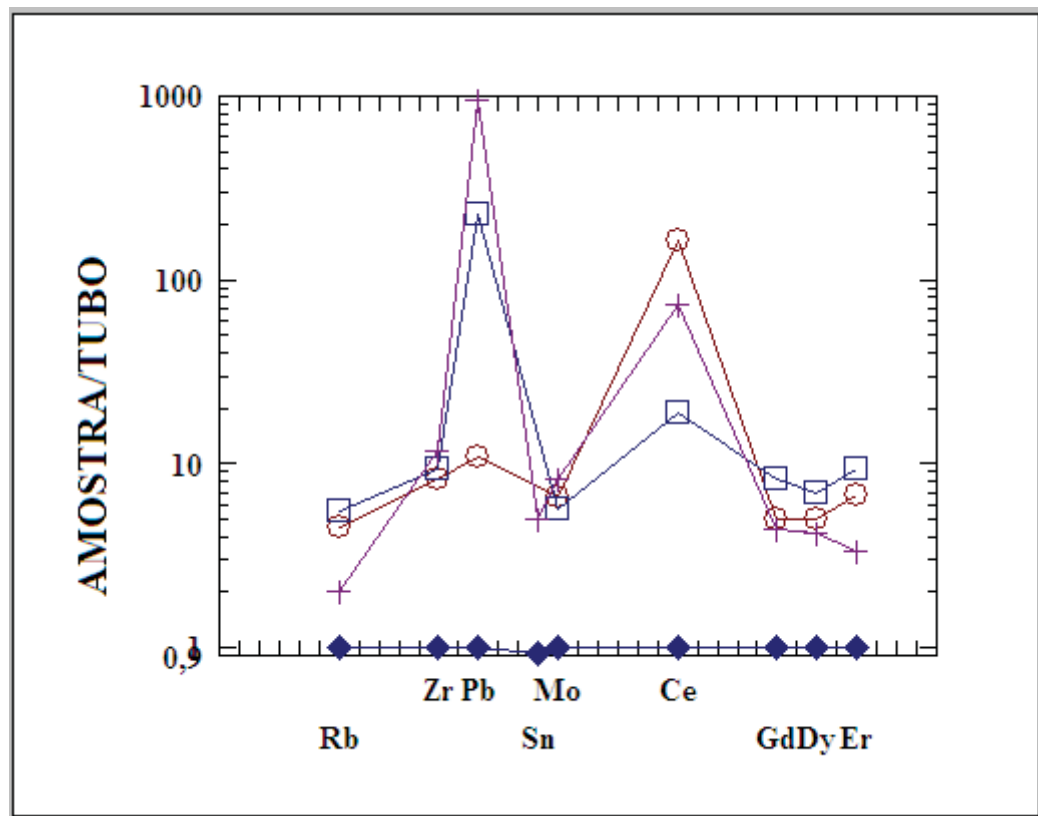
Figura 6: Fotografias das lâminas polidas utilizando microscópio preparadas a partir dos fragmentos extraídos da tubulação da rede de abastecimento e formulação tridimensional das estruturas dos minerais. a) Goethita b) Magnetita, c) Quartzo. (Fonte: Relatório Preliminar de “Determinação da viabilidade da aplicação do processo de limpeza e revestimento com resina epoxídica pela técnica de turbilhonamento em tubulações de ferro fundido objetivando a recuperação hidráulica do sistema de distribuição de rede secundária de água potável no município de Rio Claro-SP”.)

Pela composição mineralógica obtida dos ensaios, pode-se dizer que as incrustações são compostas basicamente por óxido e/ou hidróxidos de ferro e quartzo. Esta composição mineralógica possui uma dureza relativamente alta (5,0-5,5, 5,5-6,5 e 7, para a goethita, magnetita e quartzo, respectivamente), segundo a Escala de Mohs, que varia entre 1 (talco) e 10 (diamante). A dureza de um mineral é geralmente definida como a sua resistência ao risco, ou seja, é a resistência que sua superfície lisa oferece ao ser riscado por outro mineral. A dureza de um mineral depende da estrutura do cristal, quanto mais fortes as forças de união entre os átomos, tanto mais duro será o mineral.

Além da análise da composição mineralógica da incrustação, nota-se na Tabela 6 que o tubo limpo é composto fundamentalmente por ferro, sendo que os outros minerais como SiO_2 (Sílica), TiO_2 (Dióxido de Titânio) Al_2O_3 (Óxido de Alumínio), MnO (Óxido de Manganês), P_2O_5 (Pentóxido de Fósforo) apresentam-se em quantidades muito pequenas.

Conforme apontaram os resultados dos difratogramas e das análises químicas, as estruturas minerais presentes caracterizam uma incrustação de grande resistência mecânica, tornando difícil a remoção por meio físico.

Apresentando um exame mais detalhado das análises químicas, por meio da comparação das três amostras de incrustação e uma amostra do tubo limpo, pode-se verificar que o tubo não é enriquecido, ou seja, apresenta menores teores que as incrustações, nos seguintes elementos: Al_2O_3 (Trióxido de Alumínio), MgO (Óxido de Magnésio), CaO (Óxido de Cálcio), Na_2O (Óxido de Sódio), Zn (Zinco), Rb (Rubídio), Cs (Césio), Sr (Estrôncio), Ba (Bário), Y (Ítrio), Zr (Zircônio), Hf (Háfio), Pb (Chumbo), Th (Tório), U (Urânio), Sn (Estanho), Mo (Molibdênio), Au (Ouro), Cd (Cádmio), Hg (Mercúrio), Sb (Antimônio), Se (Selênio), Tl (Tálio), La (Lantânio), Ce (Cério), Pr (Praseodímio), Nd (Neodímio), Sm (Samário), Eu (Európio), Gd (Gadolínio), Tb (Térbio), Dy (Disprósio), Ho (Hólmio), Er (Érbio), Tm (Túlio), Yb (Itérbio), Lu (Lutécio). Na Figura 7 pode se ver o gráfico de normalização, em relação ao tubo limpo, dos elementos nos quais a incrustação é enriquecida.

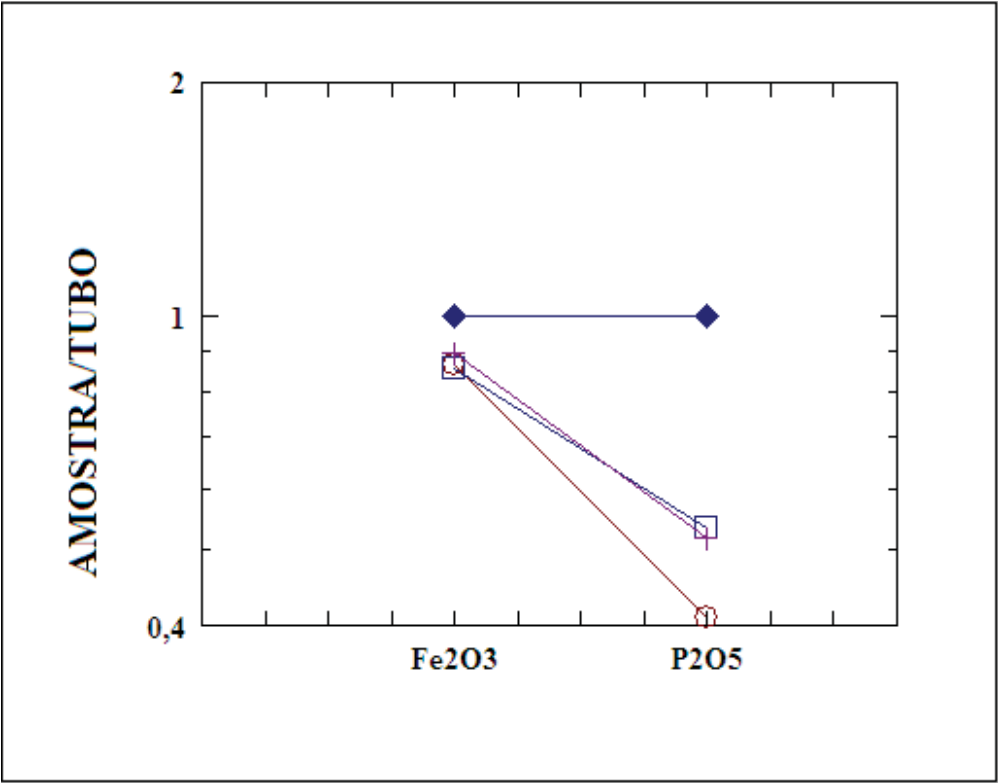


Legenda: ◆ Amostra do tubo limpo; ○ Amostra do tubo 1; □ Amostra do tubo 2; + Amostra do tubo 3.

Figura 7: Gráfico de normalização, em relação ao tubo limpo, dos elementos nos quais a incrustação é enriquecida.

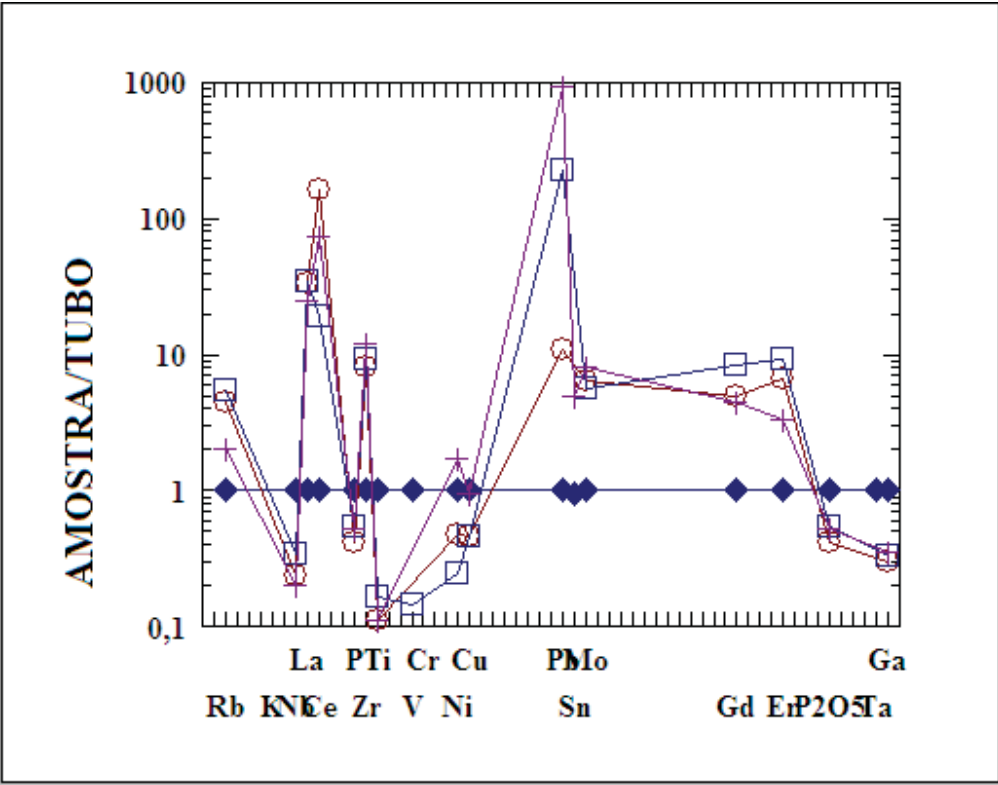
Entretanto, em relação a alguns elementos o tubo está enriquecido quando comparado às amostras de incrustação, são eles: SiO_2 (Sílica), TiO_2 (Dióxido de Titânio), Fe_2O_3 (Óxido de Ferro III), MnO (Óxido de Manganês), P_2O_5 (Pentóxido de Fósforo), Cr_2O_3 (Trióxido de Crômio), V (Vanádio), Nb (Nióbio), Cu (Cobre), Ta (Tântalo), Ga (Gálio), W (Tungstênio). Como pode ser verificado na Figura 8, que mostra um gráfico de normalização, em relação ao tubo limpo, dos elementos nos quais o tubo é enriquecido.

Na Figura 9 está apresentado um gráfico com todos os elementos detectados no tubo limpo e nas amostras de incrustação.



Legenda: ◆ Amostra do tubo limpo; ○ Amostra do tubo 1; □ Amostra do tubo 2; + Amostra do tubo 3.

Figura 8: Gráfico de normalização, em relação ao tubo limpo, dos elementos nos quais o tubo é enriquecido.



Legenda: ◆ Amostra do tubo limpo; ○ Amostra do tubo 1; □ Amostra do tubo 2; + Amostra do tubo 3.

Figura 9: Gráfico com todos os elementos detectados no tubo limpo e nas amostras de incrustação.

Nota-se que a maioria dos elementos não aparece em maior quantidade no tubo, o que lava a crer que os elementos em excesso, formadores das incrustações, vieram de outra fonte, provavelmente a água.

5.1.1 *Análises das Águas*

De acordo com as análises dos dados obtidos pelo DAAE de Rio Claro do monitoramento da qualidade das águas tratadas das ETAs I e II, durante o período de janeiro de 2004 até Dezembro de 2009, pode-se inferir que a qualidade da água oferecida para a população atende aos padrões de potabilidade físico-químico e microbiológico da Portaria nº 518 de 2004. Entretanto alguns elementos, mesmo que dentro dos padrões de potabilidade, ficam disponíveis na água e tornam possível a formação de incrustações, tanto por meio de sua oxidação, como pela ação de bactérias utilizadoras de ferro.

Alguns destes elementos são o ferro e a Sílica, que como visto neste trabalho, representam a maior porcentagem das incrustações, sendo o ferro se encontrado como óxidos e hidróxido de ferro, na forma de magnetita e goethita e, a sílica na forma de quartzo. Nas Figuras 10 e 11 pode-se verificar, a presença destes dois elementos na água, mesmo após o tratamento nas Estações de Tratamento de Água.

Sendo o ferro o elemento de maior porcentagem nas incrustações, deve-se analisar mais atentamente tal elemento. Como se pode notar, os valores de concentração do ferro estão abaixo do Valor Máximo Permitido (VMP) pela Portaria nº518/2004, como mostrado na Figura 10, entretanto, é possível que haja ainda mais ferro na água do que o detectado nas análises disponibilizadas pelo DAAE. Isso se deve ao fato de que o tratamento da água não envolve digestão em meio ácido, permitindo que o ferro esteja complexado em alguma molécula orgânica da água, não podendo ser detectado pelo método utilizado para determinar a concentração de ferro na água tratada.

Desta forma pode haver ainda mais disponibilidade de ferro na água, o que facilita a formação das incrustações.

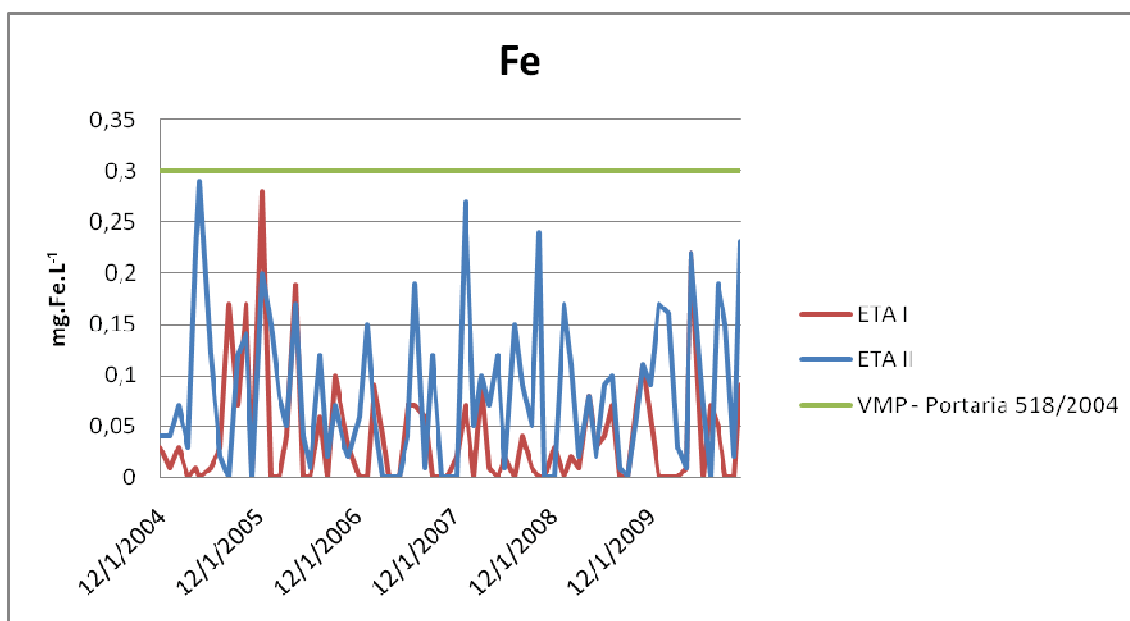


Figura 10: Gráfico de concentração de ferro na água tratada das ETAs I e II.

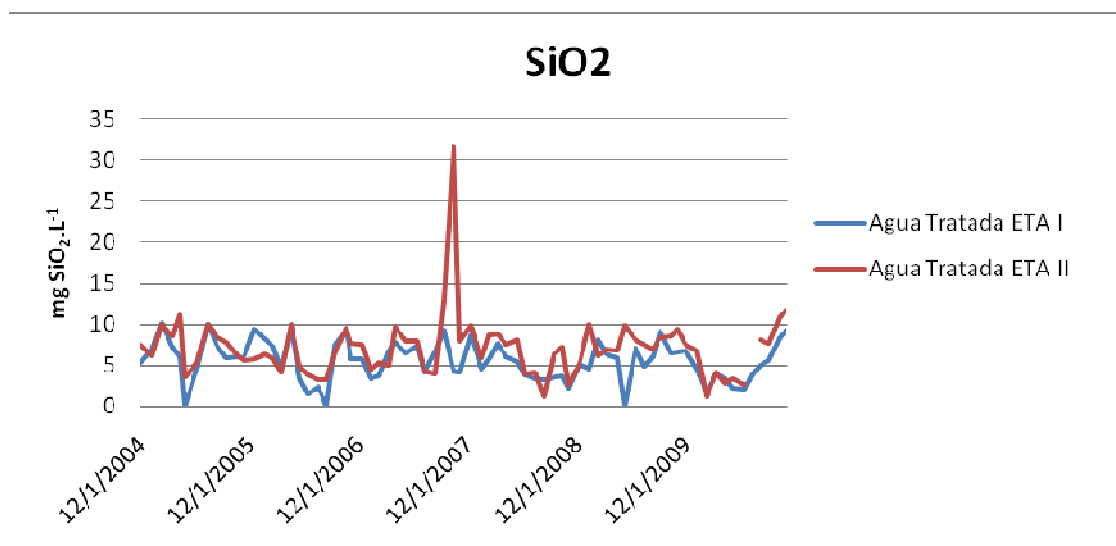


Figura 11: Gráfico de concentração de sílica na água tratada das ETAs I e II.

Os parâmetros de água bruta e tratada analisados mensalmente nas ETAs são: aspecto da água, pH, cor, odor, turbidez, alcalinidade HCO_3^- , alcalinidade CO_3^{2-} , alcalinidade OH^- , alumínio, cloreto, fosfato, ferro, fluoreto, fósforo, manganês, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, oxigênio dissolvido, sílica, sulfato, CO_2 livre e cloro. A Tabela 7 apresenta uma média da concentração dos elementos na água tratada, durante o período de análise de janeiro de 2004 a dezembro de 2009, dos elementos os quais pode ser feita uma comparação com as análises mineralógicas.

Tabela 7: Média da concentração e desvio padrão de alguns elementos na água tratada, no período de análise de janeiro de 2004 a dezembro de 2009.

	Média ETA I	Média ETA II	Desvio padrão ETA I	Desvio padrão ETA II
Ferro (Fe)	0,04	0,08	0,06	0,08
Manganês (Mn)	0,01	0,01	0,02	0,01
Sílica (SiO₂)	5,59	7,11	2,34	3,91
Fosfato (PO₄)	1,09	0,98	0,92	0,68

A Tabela 7 mostra que estes elementos presentes na água são também os elementos em que o tubo limpo é enriquecido, ou seja, os elementos, que compõem a maioria da incrustação podem ter origem na água.

Além disso, de acordo com a Tabela 8 que apresenta dados de alguns elementos, baseado em análises químicas realizadas com água bruta no ponto de captação da ETA I, em julho, setembro e novembro de 1999, nota-se a presença de elementos na água, os quais também estão presentes nas incrustações. De acordo com Cunha (2000) este ponto (ponto de captação da ETA I) no qual foram coletadas as amostras para estas análises, apresentou-se com grande similaridade em relação ao ponto de referência para interpretação dos dados, que seria um ponto próximo às nascentes, com águas límpidas e sob baixa atividade antrópica. Este fato mostra que os elementos presentes na água, podem ser procedentes da formação litológica da região.

Cabe ressaltar que, mesmo que os dados apresentados sejam referentes à água bruta, pode-se inferir a possibilidade destes elementos presentes na água bruta, permanecerem na água tratada, e possivelmente constituírem as incrustações detectadas nas tubulações.

Tabela 8: Resultados de análises químicas da água bruta no ponto de captação da ETA I, durante julho, setembro e novembro de 1999.

(mg/L)	Mg	Al	Ca	Cu	Sr	Ba	Na	K
jul/99	1,26	0,05	3,53		0,02	0,05	2,2	1,1
set/99	0,84	0,04	2,83	0,02	0,01	0,05	6,58	1,32
nov/99	1,81	0,04	6,79	0,002	0,04	0,03	3,88	1,16
MEDIA	1,303333	0,043333	4,383333	0,011	0,023333	0,043333	4,22	1,193333
(mg/L)	Si	Zn	P	Pb	Mn	Fe	Cr	
jul/99	5,15	0,01	0,09		0,02	0,84		
set/99	3,64	0,01	0,11		0,01	0,61		
nov/99	4,2	0,01	0,08	0,001	0,02	0,33	0,001	
MEDIA	4,33	0,01	0,093333	0,001	0,016667	0,593333	0,001	

Fonte: Adaptado de Cunha (2000).

5.2 Rugosidade

Considerando os parâmetros, diâmetro interno (d); espessura média da incrustação ($\epsilon_{\text{méd}}$); rugosidade relativa (λ), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 9, a partir de medidas realizadas em diferentes amostras de fragmentos extraídos da rede de abastecimento. Vale mencionar que a literatura reporta valores de rugosidade média relativa para ferro fundido velho da ordem de 3 a 5mm (PORTO, 1998).

Tabela 9: Valores correspondentes a espessura média da incrustação medida nas amostras de trechos removidos da rede de abastecimento da cidade de Rio Claro, SP. (Fonte: Curan et. al. 2010, p. 6)

Tubo	Diâmetro interno do tubo (d) – cm	Espessura média da incrustação ($\epsilon_{\text{méd}}$) - mm	Rugosidade Relativa(λ)
1	5,5	8,37	0,152
2	5,5	10,87	0,197
3	5,0	9,12	0,182

Com os valores obtidos da rugosidade relativa, pode-se perceber que as incrustações representaram rugosidade relativa média em torno de 18%, ocasionando redução média de 66% da área da seção transversal de escoamento, decorrente da rugosidade média de 0,17mm para D50mm. Trata-se de um valor tão alto de rugosidade, que se pode considerar como um bloqueio à vazão da água. (UNESP; SANIT, 2009)

Nessas condições, a capacidade de veiculação da vazão desejada pode ser seriamente comprometida e as medidas para manutenção da vazão, mantido o estágio atual de conservação dos tubos, podem ocasionar em sérios problemas para o sistema de abastecimento de água, tais como o aumento das perdas físicas de água tratada, decorrente do rompimento de trechos da rede. (UNESP; SANIT, 2009, p. 22)

5.3 Simulações da Rede de Abastecimento

Parâmetros de Simulação:

- Traçado da Rede Principal está apresentado no ANEXO 1.
- Cálculo da área do setor: A= 207,8 ha.
- Densidade populacional: d= 150 hab.ha⁻¹ (TSUTIYA, 2004, p. 62);

- Consumo per capita ($\text{l.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$): $q = 156,64 \text{ l.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$;
- Vazão específica de distribuição: $Q_d = 0,51 \text{ l.ha}^{-1}.\text{s}^{-1}$
- Cálculo do Consumo-Base em cada nó: apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Valor do consumo base (l.s^{-1}) em cada nó.

Nó	Área de influência (ha)	Consumo Base (l.s^{-1})
1	6,85	3,4935
2	3,96	2,0196
3	9,35	4,7685
4	9,29	4,7379
5	7,86	4,0086
6	11,59	5,9109
7	5,41	2,7591
8	4,07	2,0757
9	2,5	1,275
10	4,67	2,3817
11	9,47	4,8297
12	9,28	4,7328
13	5,43	2,7693
14	8,78	4,4778
15	4,75	2,4225
16	3,76	1,9176
17	6,67	3,4017
18	5,36	2,7336
19	8,13	4,1463
20	6,66	3,3966
21	5,3	2,703
22	7,82	3,9882
23	14,72	7,5072
24	11,97	6,1047
25	4,38	2,2338
26	8,13	4,1463
27	4,58	2,3358
28	7,81	3,9831
29	2,45	1,2495
30	5,68	2,8968

Os dados de entrada dos nós para todos os cenários estão apresentados na Tabela 11, apenas a cota do RNF (Reservatório de Nível Fixo) que varia para os diferentes cenários.

Tabela 11: Dados de entradas no Software Epanet 2.0 dos nós em todos os cenários.

Nó	Cota (m)	Consumo-Base (L.s⁻¹)
N1	611,4	3,4935
N2	607	2,0196
N3	609,1	4,7685
N4	610,9	4,7379
N5	609,7	4,0086
N6	608,4	5,9109
N7	607,2	2,7591
N8	607,4	2,0757
N9	606	1,275
N10	603,9	2,3817
N11	605,8	4,8297
N12	607,1	4,7328
N13	601,3	2,7693
N14	604,8	4,4778
N15	605	2,4225
N16	602,3	1,9176
N17	606,7	3,4017
N18	606,4	2,7336
N19	606,6	4,1463
N20	607,5	3,3966
N21	606,2	2,703
N22	596	3,9882
N23	607	7,5072
N24	596,2	6,1047
N25	602	2,2338
N26	610,2	4,1463
N27	607,7	2,3358
N28	609,5	3,9831
N29	609,6	1,2495
N30	600,2	2,8968
RFN	VARIA	

Com os dados de entrada, foi feita uma simulação para cada cenário, com o objetivo de apresentar os valores de pressão, perda de carga, carga hidráulica e velocidade em cada um deles e analisar a viabilidade ou inviabilidade da atual situação da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro – SP permanecer como está.

Nas Figuras de 12 a 31 estão apresentados, em forma de gráfico, os resultados das simulações para os cenários um, dois, três e quatro, as Tabelas A1 a A8 referentes a este resultados estão apresentadas no Apêndice A.

Cenário 1:

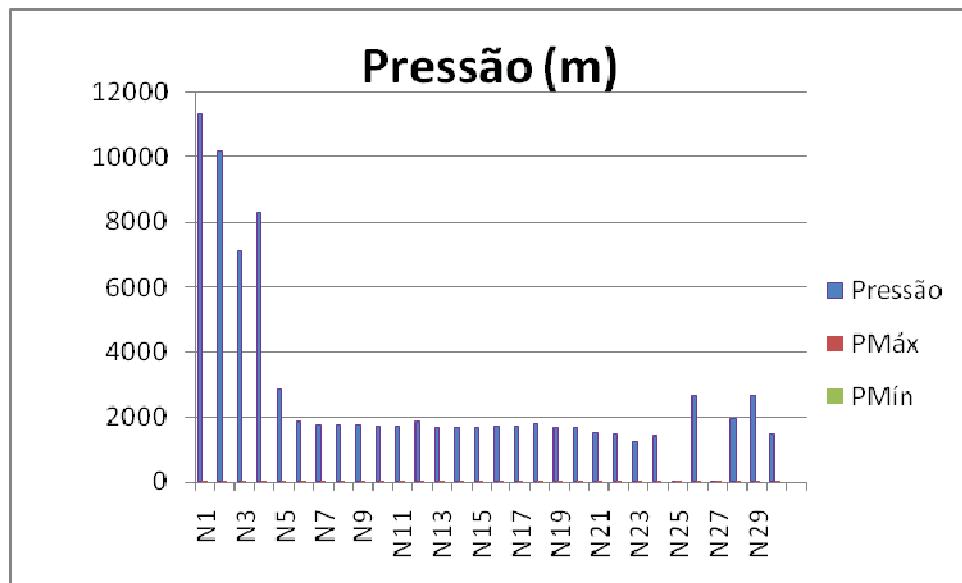


Figura 12: Pressão nos nós do Cenário 1

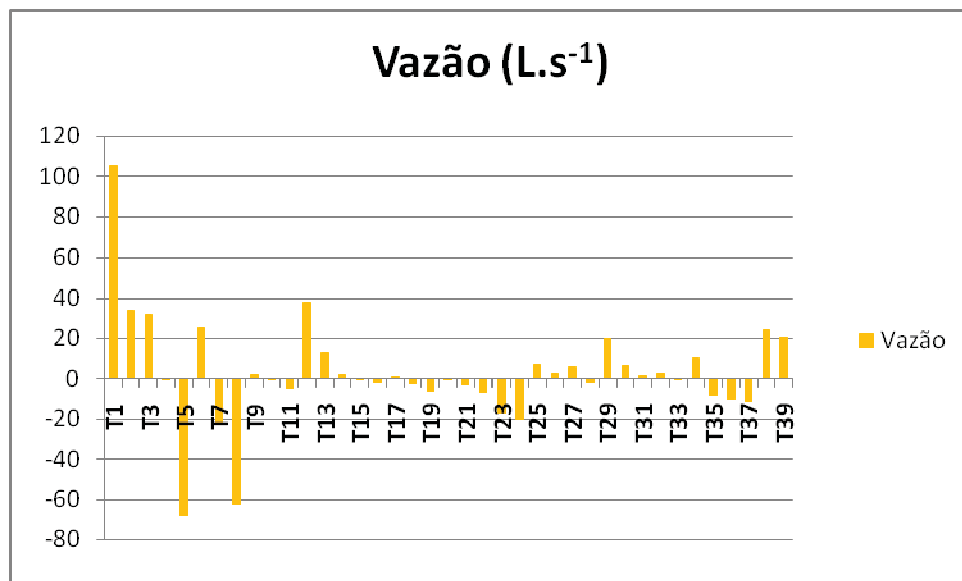


Figura 13: Vazão nos trechos do Cenário 1 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)

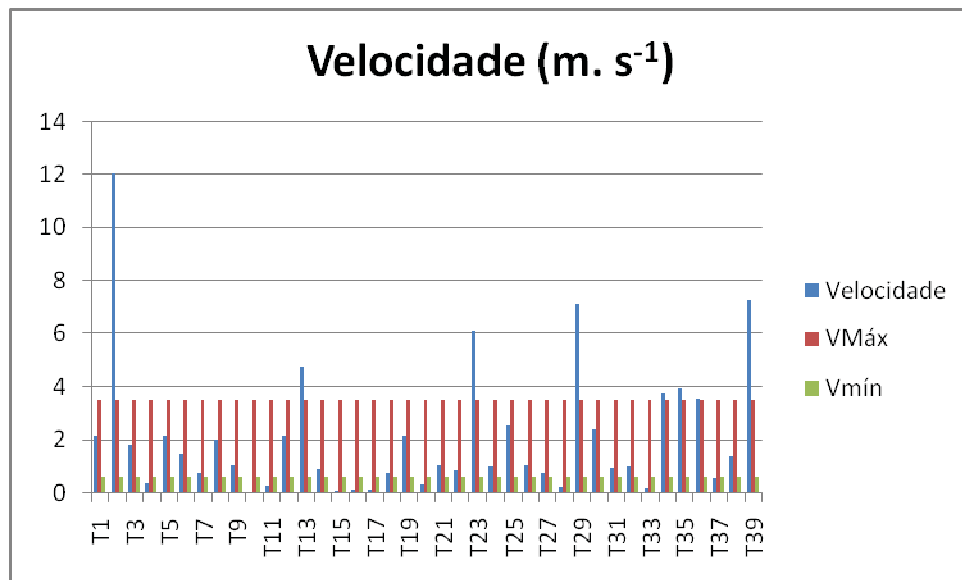


Figura 14: Velocidade nos trechos do Cenário 1

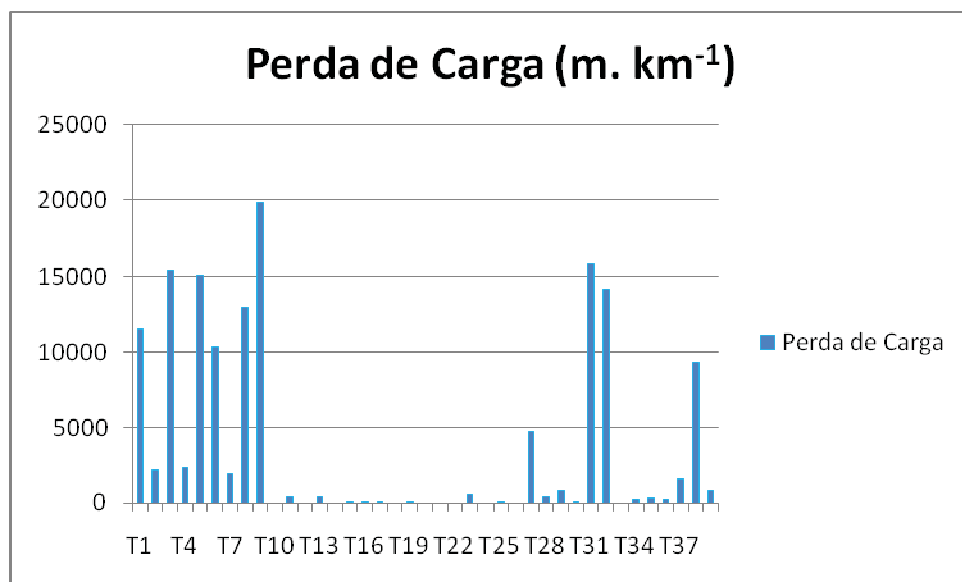


Figura 15: Perda de Carga nos trechos do Cenário 1

Para este cenário, a cota do nível de água do reservatório foi de 12200m. Considerando que o reservatório se encontra numa cota de 612m, seria necessária uma bomba com potência de aproximadamente:

$$P = (105,41 \times (12200 - 612)) / 50$$

$$P = 24430 \text{ cv} = 18000 \text{ kW}$$

Cenário 2:

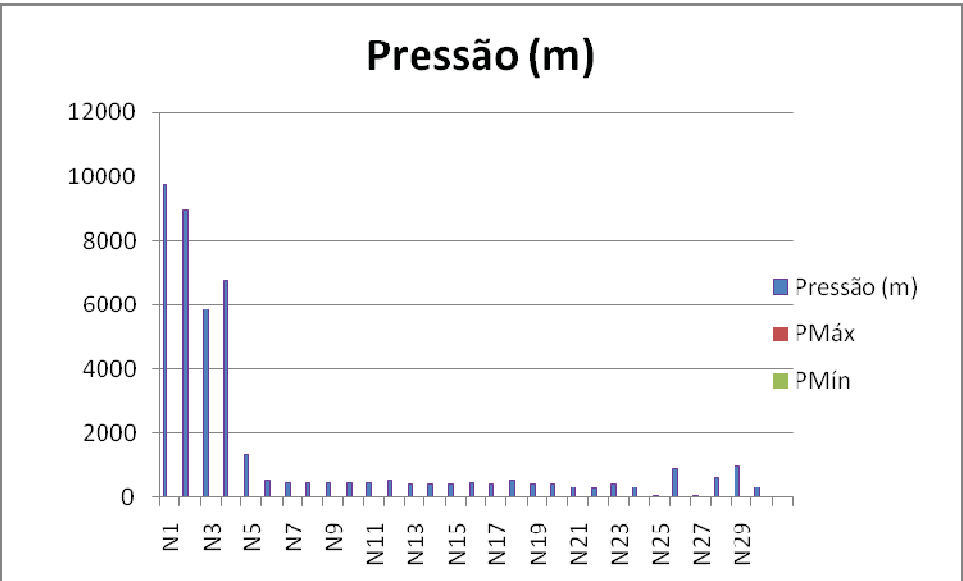


Figura 16: Pressão nos nós do Cenário 2

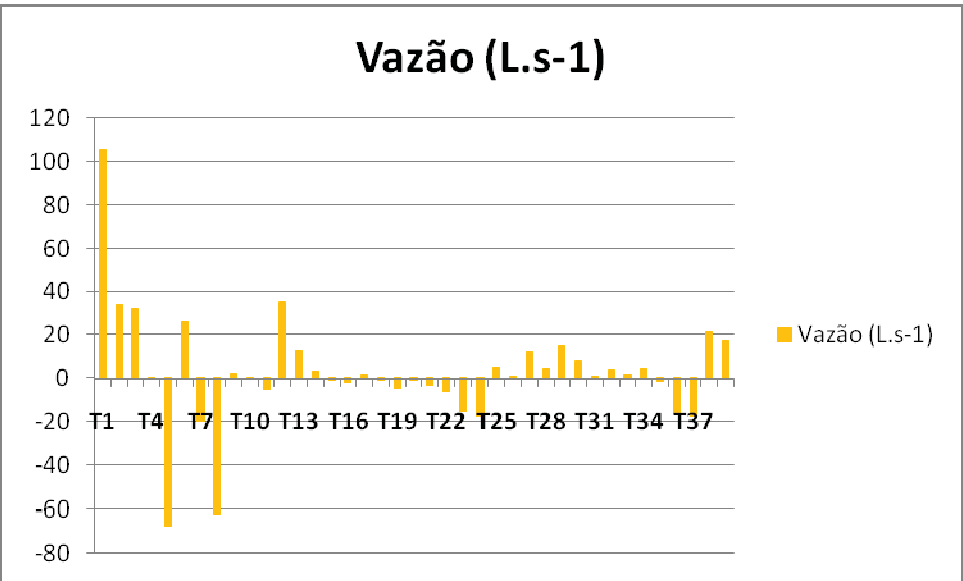


Figura 17: Vazão nos trechos do Cenário 2 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)

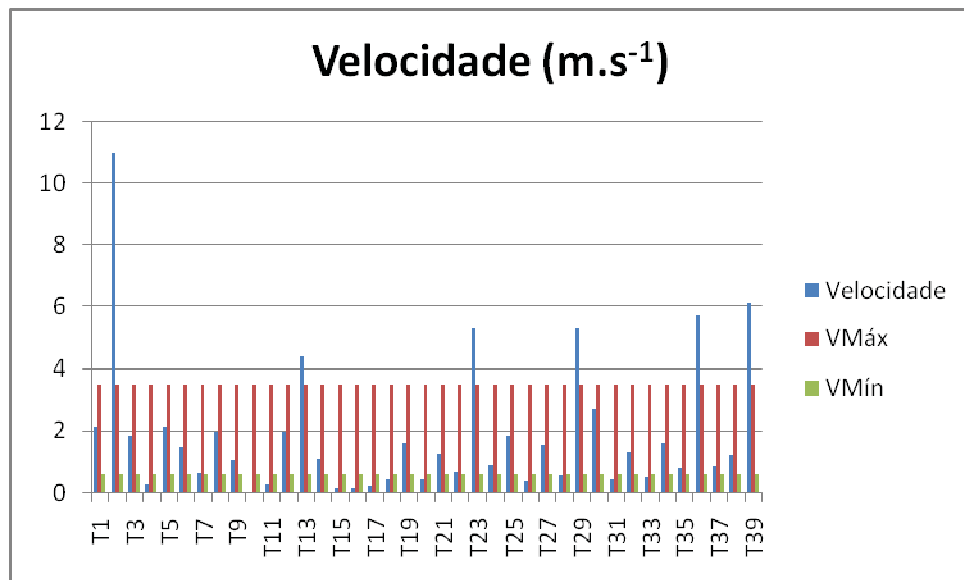


Figura 18: Velocidade nos trechos do Cenário 2

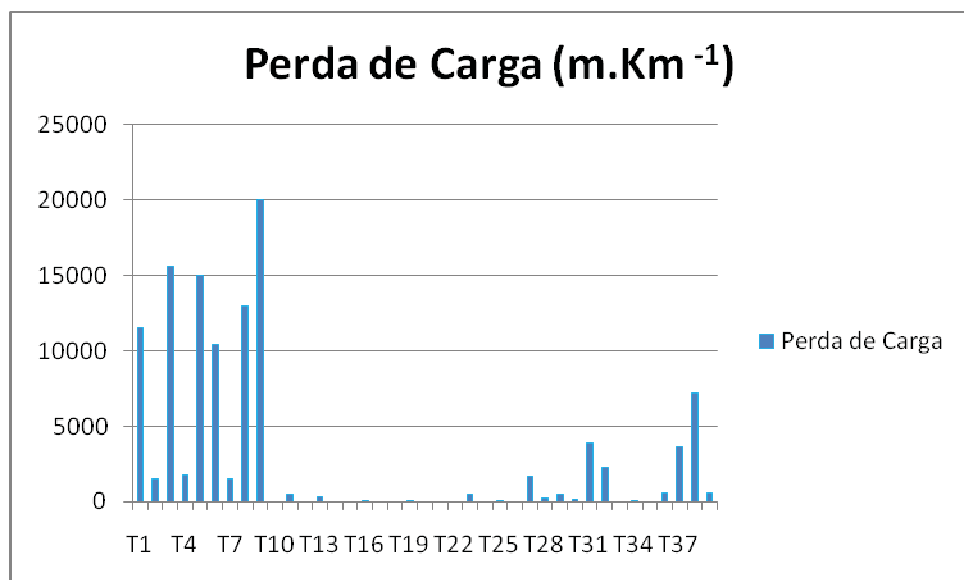


Figura 19: Perda de carga nos trechos do Cenário 2

No cenário dois, a cota do nível de água do reservatório foi de 10650m. Considerando que o reservatório se encontra numa cota de 612m, seria necessária uma bomba com potência de aproximadamente:

$$P = (105,41 \times (10650 - 612)) / 50$$

$$P = 21162 \text{ cv} = 15600 \text{ kW}$$

Cenário 3:

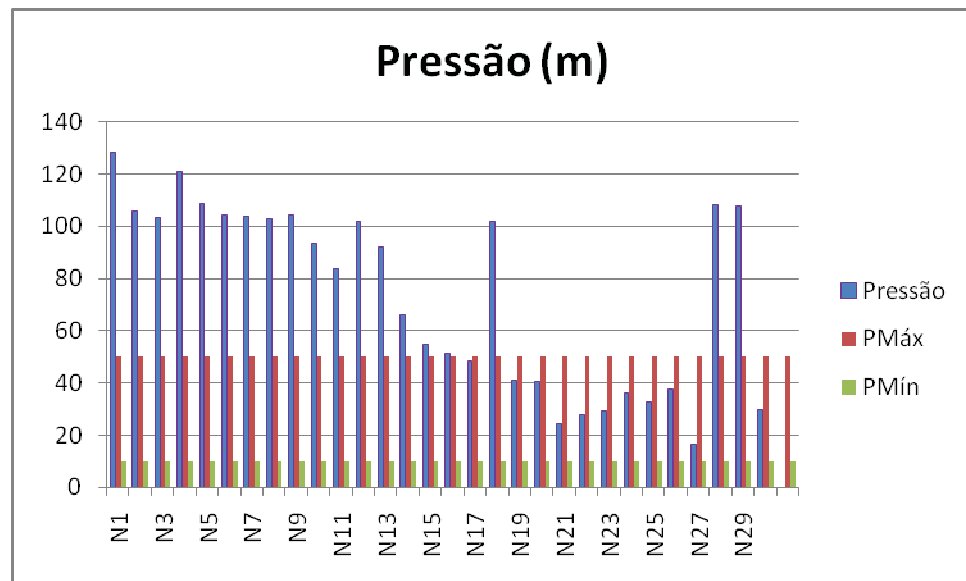


Figura 20: Pressão nos nós do Cenário 3

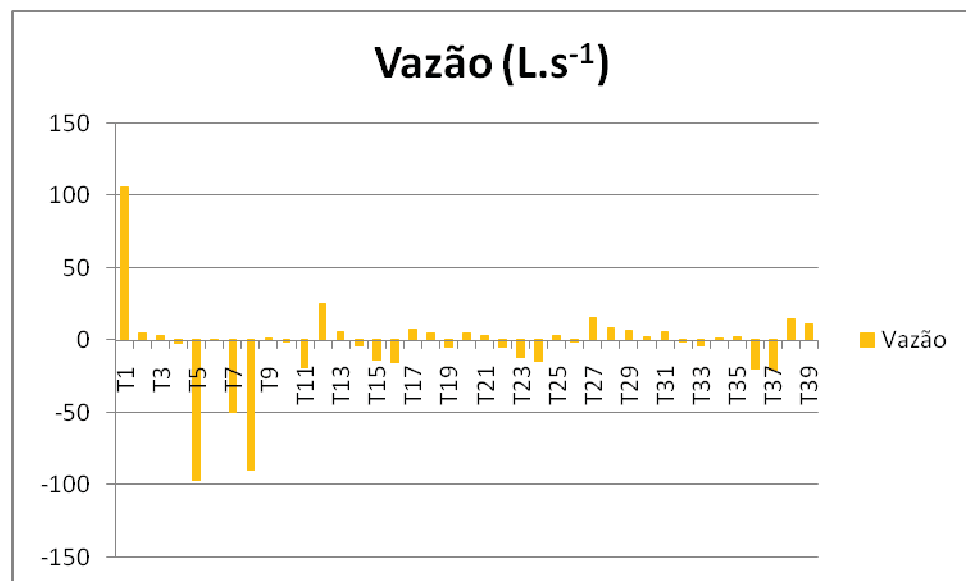


Figura 21: Vazão nos trechos do Cenário 3 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)

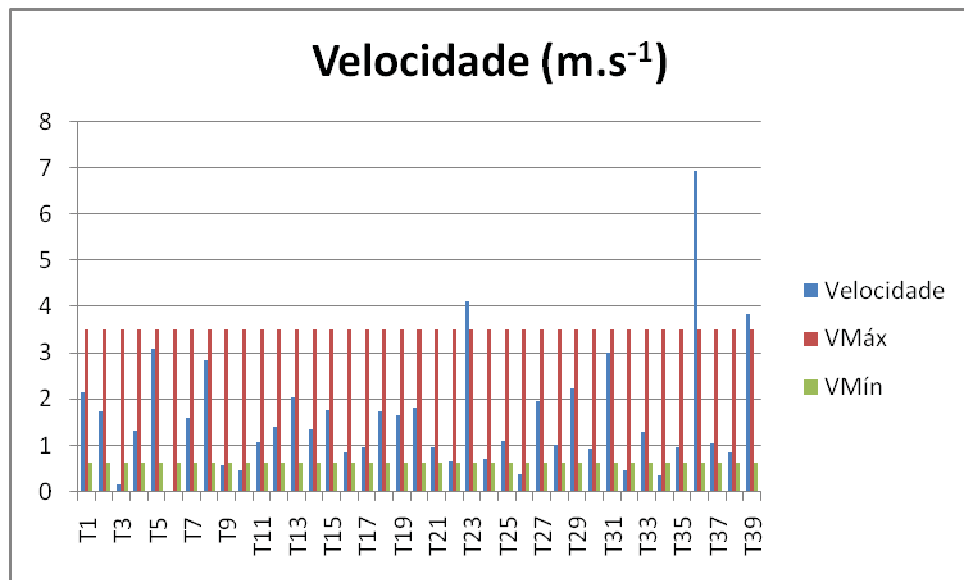


Figura 22: Velocidade nos trechos do Cenário 3

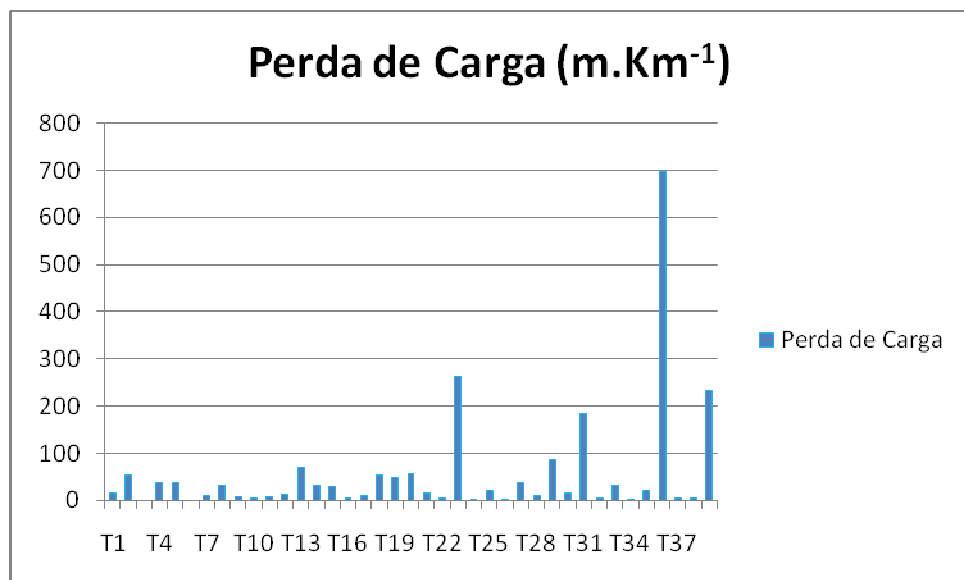


Figura 23: Perda de carga nos trechos do Cenário 3

Neste cenário, a cota do nível de água do reservatório foi de 740 m. Considerando que o reservatório se encontra numa cota de 612m, seria necessária uma bomba com potência de aproximadamente:

$$P = (105,41 \times (740 - 612)) / 50$$

$$P = 270 \text{ cv} = 200 \text{ kW}$$

Cenário 4:

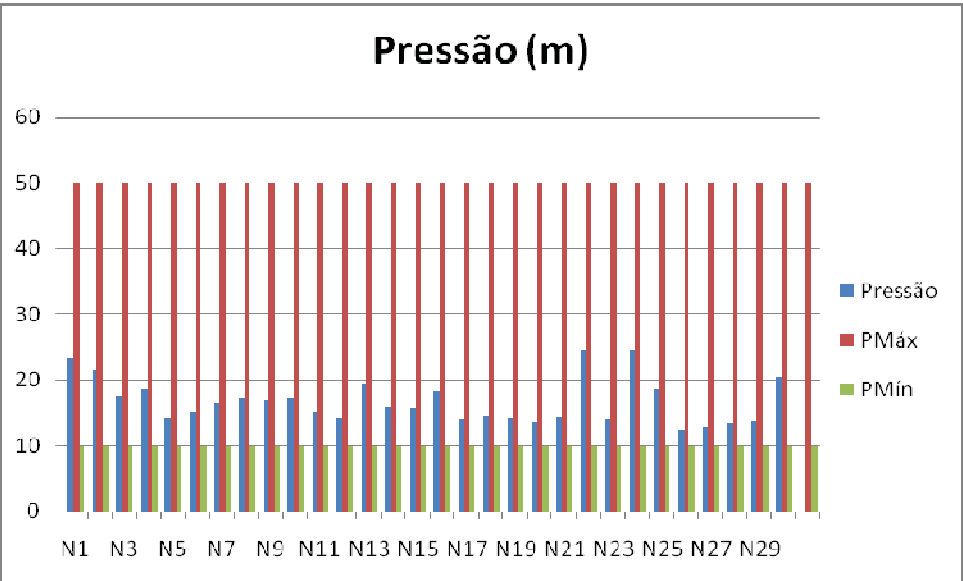


Figura 24: Pressão nos nós do Cenário 4

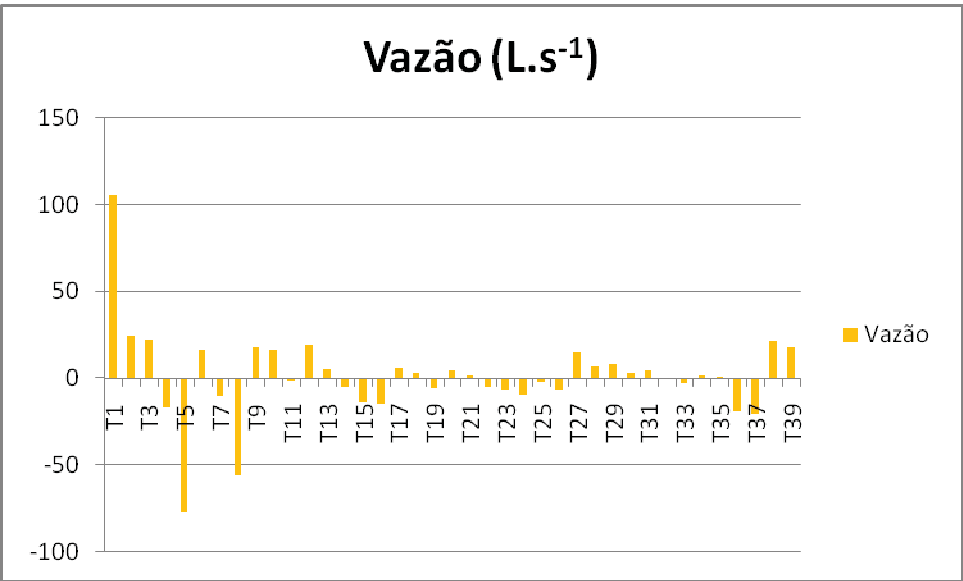


Figura 25: Vazão nos trechos do Cenário 4 (sinais negativos indicam sentido contrário ao arbitrado)

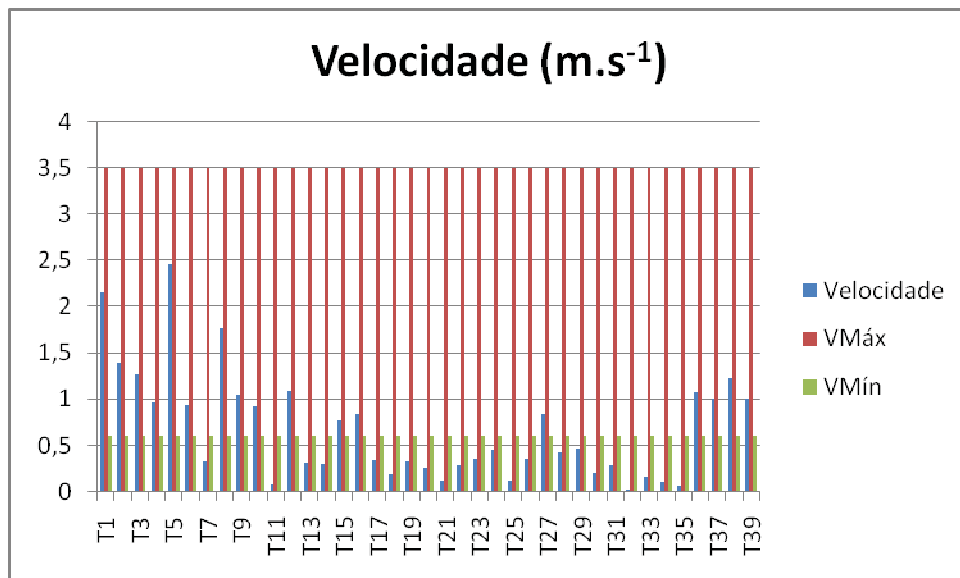


Figura 26: Velocidade nos trechos do Cenário 4

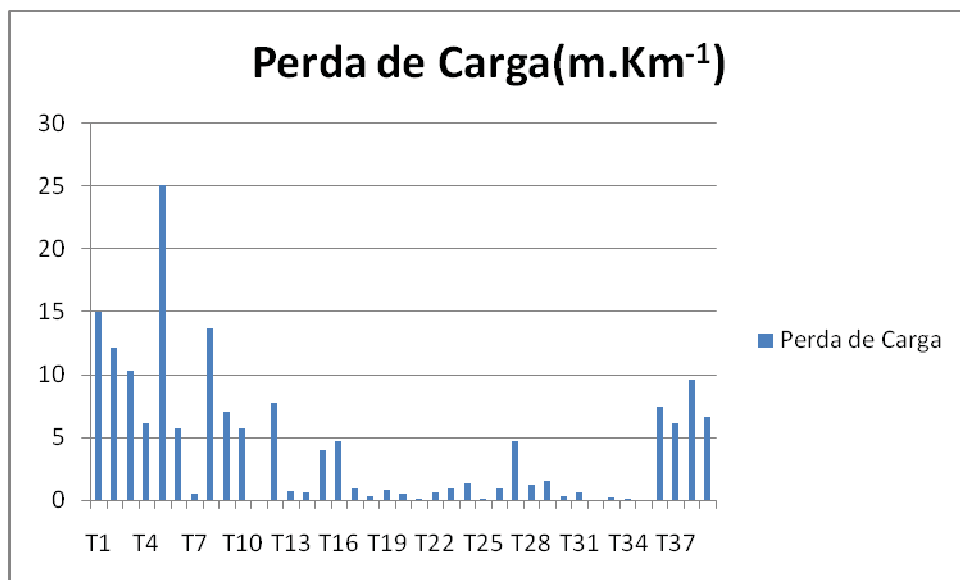


Figura 27: Perda de Carga nos trechos do Cenário 4

Para este cenário (cenário quatro), a cota do nível de água do reservatório foi de 635 m. Considerando que o reservatório se encontra numa cota de 612m, seria necessária uma bomba com potência de aproximadamente:

$$P = (105,41 \times (635 - 612)) / 50$$

$$P = 50 \text{ cv} = 36 \text{ kW}$$

Por definição, de acordo com a norma NBR 12218/1994, pressão estática é a pressão, que se refere ao nível do eixo da via pública, em determinado ponto da rede, sob condição de consumo nulo; e pressão dinâmica é a pressão que se refere ao nível do eixo da via pública, em determinado ponto da rede, sob condição de consumo não nulo.

Pode-se verificar que os resultados de pressões obtidos nos cenários um, dois e três, não estão adequados a esta norma, que considera como pressão estática máxima na rede de distribuição 50 mH₂O e, pressão dinâmica mínima de 10 mH₂O. Tampouco seguem a relação entre diâmetro, velocidade máxima e vazão máxima determinadas por Tsutiya, (2004, p.402).

Além dos problemas relacionados com as pressões, as velocidades encontradas nos trechos no cenários um, dois e três, também não se enquadram na norma NBR 12218/1994, na qual a velocidade mínima nas tubulações deve ser de 0,6 m/s e, a máxima 3,5 m/s.

Outro importante ponto a ser analisado é a cota do nível de água do reservatório. Nos cenários um e dois, esta cota é muito alta, 12200 m e 10650 m respectivamente, quando feita uma relação com a cota do primeiro nó, que é de 611.4m. Tais valores resultam na realidade, na utilização de uma possível bomba com alta potência e muito gasto de energia para poder levar água a todos os pontos da rede. Isto se deve ao coeficiente C de Hazen-Williams da atual situação da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro – SP ou do mesmo após a recuperação das tubulações, que são valores inadmissíveis, sob o ponto de vista da hidráulica de redes, sem nenhum respaldo na literatura.

No cenário três, a cota do nível de água do reservatório é admissível (740 m), pois neste caso a tubulação seria totalmente trocada, apresentando coeficiente C de Hazen-Williams adequados.

Tais considerações podem ser justificadas, tanto pelo baixo valor do coeficiente C de Hazen-Williams, como pelo fato de que as simulações executadas não serem cópias da realidade. Além disso, os setores da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro, inclusive o setor utilizado neste trabalho (setor quatro), não são setores isolados que se auto-sustentam, e sim setores interligados, com distintos reservatórios e fontes de entrada de água no sistema.

No cenário quatro, os diâmetros foram adequados às recomendações da antiga norma PNB 594/77 da ABNT para as tubulações principais, na qual o diâmetro mínimo deve ser de 150mm. E os coeficientes C de Hazen-Williams utilizados são de tubulação nova. Neste caso, a simulação apresenta melhores resultados, entretanto não são ideais.

As pressões estão em acordo com os valores estabelecidos pela norma NBR 12218/1994. Porém as velocidades não respeitam os limites estabelecidos pela norma NBR 12218/1994, estando na maioria das vezes abaixo do valor mínimo estabelecido. Além disso, a cota do nível de água do reservatório refere-se ao valor de 635 m, com reservatório a 23m, ou por meio de uma bomba com 50cv de potência. A relação encontrada entre o menor gasto de energia (Cenário 4) e os outros cenários foi: $C1/C4 = 20$; $C2/C4 = 17$; $C3/C4 = 1,2$. Tais

resultados demonstram a importância do projeto e da manutenção da rede de abastecimento para aumentar a eficiência energética do sistema de abastecimento de água.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se concluir pelas análises mineralógicas que as incrustações são compostas basicamente por óxidos/ hidróxidos de ferro e quartzo. Tais minerais podem ser caracterizados por terem uma dureza relativamente alta quando usada a Escala de Mohs, com valores de 5,0-5,5 para goethita, 5,5-6,5 para magnetita e 7 para quartzo. A incrustação apresentou rugosidade relativa média de 18% em relação ao diâmetro da tubulação, nas amostras retiradas da rede de abastecimento.

Comparando as análises químicas das incrustações e do tubo, com as análises das águas brutas e tratadas, nota-se que a incrustação é constituída por alguns elementos que se apresentam em baixos valores de concentração no tubo limpo são estes: Al_2O_3 (Trióxido de Alumínio), MgO (Óxido de Magnésio), CaO (Óxido de Cálcio), Na_2O (Óxido de Sódio), Zn (Zinco), Rb (Rubídio), Cs (Césio), Sr (Estrôncio), Ba (Bário), Y (Ítrio), Zr (Zircônio), Hf (Háfio), Pb (Chumbo), Th (Tório), U (Urânio), Sn (Estanho), Mo (Molibdênio), Au (Ouro), Cd (Cádmio), Hg (Mercúrio), Sb (Antimônio), Se (Selênio), Tl (Tálio), La (Lantânio), Ce (Cério), Pr (Praseodímio), Nd (Neodímio), Sm (Samário), Eu (Európio), Gd (Gadolínio), Tb (Térbio), Dy (Disprósio), Ho (Hólmio), Er (Érbio), Tm (Túlio), Yb (Ítérbio), Lu (Lutécio); entretanto alguns estão presentes na água, ou seja, pode-se inferir que os elementos constituintes das incrustações provavelmente são originárias da água tratada.

A partir das simulações pôde-se perceber claramente que a atual situação (Cenário 1) da rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro não é mais viável. Também se constatou que a recuperação das tubulações (Cenário 2) não apresenta resultados satisfatórios, verificando assim, a impossibilidade de recuperação da capacidade hidráulica da rede do sistema de abastecimento. Estes cenários são inviáveis, pois, geram um grande gasto de energia para bombear a água a todos os pontos da rede. A razão entre potências, considerando o Cenário 4 como referência, apresentou a seguinte relação:

O cenário 1 necessita de 20 vezes mais potência;

O cenário 2 de 17 vezes mais potência;

O cenário 3, necessita de 1,2 vezes a potência.

Assim, considerando todos os fatores envolvidos no processo para as condições simuladas neste trabalho bem como as hipóteses simplificadoras apresentadas, recomenda-se a troca dos trechos da rede bem como a adequação dos diâmetros como medida eficaz para a redução da energia necessária a operação do sistema.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANCHES, R. **Reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento público: avaliação e controle**. 2009. 146 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia: Gestão e Desenvolvimento de Tecnologias Ambientais) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2009.

ABRATT (Associação Brasileira De Tecnologia Não Destrutiva). **Métodos não destrutivos**. Disponível em: <<http://www.abratt.org.br>>. Acesso em: 15 out. 2009.

AMANCO. **Manual Técnico Amanco Celfort Tubos**. 2009. Disponível em: <http://www.amanco.com.br/web/image/texto/Manual_Tecnico_Celfort-Rev_jan.09.pdf>. Acesso em: jul. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de Rede de Distribuição de água para Abastecimento Público**. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357 de 17 de Março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília.

BRASIL. **Portaria nº518 de 25 de Março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília.

CUNHA, M. A. A. **Diagnóstico da Qualidade das águas da bacia do Ribeirão Claro (SP) através de diversas análises inclusive Multivariadas**. Rio Claro, 2000.

CURAN, R.M. et al. **Caracterização da incrustação presente na rede de abastecimento de água da cidade de Rio Claro, SP**. In: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, n 10, 2010, Maceió.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE RIO CLARO (DAAE). **DAAE Rio Claro**. Rio Claro. Disponível em: <<http://www.daaeriolclaro.sp.gov.br>>. Acesso em: diferentes datas.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5ª. Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GOMES, H. P.; SALVINO M.M. **Manual do usuários Epanet 2.0 Brasil**. Paraíba, 2000.

HELLER, L.; PÁDUA, V.L., organizadores. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

KAHN, H. **Difração de Raios X**. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRACAO.pdf>. Acesso em: 6 out. 2009.

LABORATÓRIO DE CRISTALOGRAFIA – USP. **Difração de Raios X**. Disponível em : <<http://www.if.usp.br/cristal/XRD.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2009.

NETO, J.M. de A. et. al. **Manual de Hidráulica**. 8ª Edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. São Carlos, 1998.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO” (UNESP), SANIT. **Relatório Preliminar de “Determinação da viabilidade da aplicação do processo de limpeza e revestimento com resina epoxídica pela técnica de turbilhonamento em tubulações de ferro fundido objetivando a recuperação hidráulica do sistema de distribuição de rede secundária de água potável no município de Rio Claro-SP”**. Rio Claro, 2009.

8 APÊNDICE A

Tabela A 1: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 1.

Nó	Consumo (l.s⁻¹)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (m)
N1	3,49	11911,25	11299,85
N2	2,02	10796,62	10189,62
N3	4,77	7717,98	7108,89
N4	4,74	8888,09	8277,19
N5	4,01	3441,68	2831,98
N6	5,91	2430,58	1822,18
N7	2,76	2354,5	1747,3
N8	2,08	2353,4	1746
N9	1,27	2343,25	1737,25
N10	2,38	2312,85	1708,95
N11	4,83	2316,88	1711,08
N12	4,73	2421,18	1814,08
N13	2,77	2277,16	1675,86
N14	4,48	2282,55	1677,75
N15	2,42	2282,75	1677,75
N16	1,92	2291,36	1689,07
N17	3,4	2294,09	1687,39
N18	2,73	2419,79	1813,39
N19	4,15	2253,07	1646,48
N20	3,4	2250,64	1643,14
N21	2,7	2083,78	1477,58
N22	3,99	2039,55	1443,55
N23	7,51	1827,71	1220,71
N24	6,1	1997,71	1401,51
N25	2,23	626,05	24,05
N26	4,15	3256,99	2646,79
N27	2,34	626,27	18,57
N28	3,98	2510,67	1901,17
N29	1,25	3280,03	2670,43
N30	2,9	2032,37	1432,17
RFN	-105,41	12200	0

Tabela A 2: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 1.

Trecho	Vazão (l.s⁻¹)*	Velocidade (m.s⁻¹)	Perda de Carga (m.km⁻¹)
T1	105,41	2,15	11549,87
T2	34,14	12,07	2229,27
T3	32,12	1,82	15393,19
T4	-0,65	0,33	2340,22
T5	-67,78	2,16	15115,81
T6	25,94	1,47	10367,45
T7	-22,63	0,72	1982,55
T8	-62,39	1,99	12967,65
T9	2,05	1,04	19868,81
T10	-0,03	0,01	6,09
T11	-4,67	0,26	432,28
T12	38	2,15	31,33
T13	13,3	4,7	389,16
T14	2,46	0,87	17,09
T15	-0,61	0,08	71,02
T16	-1,88	0,11	80,36
T17	0,69	0,09	89,22
T18	-2,08	0,74	12,57
T19	-6,01	2,13	89,4
T20	-0,55	0,29	1,07
T21	-2,97	1,05	24,26
T22	-6,71	0,85	9,09
T23	-17,23	6,09	628,49
T24	-19,96	0,99	6,95
T25	7,12	2,52	122,44
T26	2,98	1,05	24,34
T27	5,88	0,75	4773,82
T28	-1,63	0,21	445,02
T29	20,08	7,1	834,28
T30	6,74	2,38	110,58
T31	1,81	0,92	15860,11
T32	2,75	0,97	14132,88
T33	0,42	0,15	0,64
T34	10,63	3,76	257,05
T35	-7,74	3,94	346,65
T36	-10,02	3,54	230,35
T37	-11,27	0,56	1616,52
T38	24,48	1,39	9310,04
T39	20,5	7,25	866,78

Tabela A 3: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 2.

Nó	Consumo (l.s⁻¹)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (m)
N1	3,49	10361,25	9749,85
N2	2,02	9586,82	8979,82
N3	4,77	6472,77	5863,68
N4	4,74	7354,5	6743,6
N5	4,01	1925,44	1315,74
N6	5,91	1148,31	539,91
N7	2,76	1063,26	456,06
N8	2,08	1062,78	455,38
N9	1,27	1048,47	442,47
N10	2,38	1042,55	438,65
N11	4,83	1048,65	442,85
N12	4,73	1140,32	533,22
N13	2,77	118026,7	425,4
N14	4,48	1028,55	423,75
N15	2,42	1029,32	424,32
N16	1,92	1041,4	439,1
N17	3,4	1042,75	436,05
N18	2,73	1139,21	532,81
N19	4,15	1019,84	413,24
N20	3,4	1019,48	411,98
N21	2,7	923,09	316,89
N22	3,99	866,38	270,38
N23	7,51	1013,04	406,04
N24	6,1	910,65	314,45
N25	2,23	635,9	33,9
N26	4,15	1508,94	898,74
N27	2,34	637,86	30,16
N28	3,98	1208,83	599,33
N29	1,25	1564,61	955,01
N30	2,9	912,57	312,37
RFN	-105,41	10650	0

Tabela A 4: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 2.

Trecho	Vazão (l.s⁻¹)*	Velocidade (m.s⁻¹)	Perda de Carga (m.km⁻¹)
T1	105,41	2,15	11549,87
T2	34,14	11,01	1548,87
T3	32,12	1,83	15570,21
T4	-0,55	0,28	1763,45
T5	-67,78	2,15	15033,76
T6	26,04	1,47	10440,12
T7	-19,63	0,62	1523,77
T8	-62,29	1,98	12926,35
T9	2,05	1,05	20037,02
T10	-0,03	0,01	2,66
T11	-4,96	0,28	483,28
T12	34,81	1,97	26,64
T13	12,41	4,39	342,06
T14	3,07	1,09	25,83
T15	-0,91	0,12	13,83
T16	-2,18	0,12	105,61
T17	1,6	0,2	39,64
T18	-1,17	0,41	4,32
T19	-4,5	1,59	52,34
T20	-1,15	0,41	4,15
T21	-3,57	1,26	34,04
T22	-6,33	0,67	4,48
T23	-14,94	5,28	482,33
T24	-17,67	0,88	5,54
T25	5,2	1,84	68,39
T26	1,06	0,37	3,57
T27	11,99	1,53	1656,32
T28	4,49	0,57	268,02
T29	14,93	5,28	481,95
T30	7,71	2,73	141,78
T31	0,85	0,43	3861,9
T32	3,72	1,32	2285,25
T33	1,39	0,49	5,92
T34	4,52	1,6	52,63
T35	-1,62	0,82	19,14
T36	-16,14	5,71	556,71
T37	-17,39	0,86	3608,25
T38	21,25	1,2	7166,01
T39	17,27	6,11	631,18

Tabela A 5: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 3.

Nó	Consumo (l.s⁻¹)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (m)
N1	3,49	739,62	128,22
N2	2,02	712,49	105,49
N3	4,77	712,45	103,35
N4	4,74	732	121,1
N5	4,01	718,14	108,44
N6	5,91	712,45	104,05
N7	2,76	711,14	103,94
N8	2,08	710,07	102,67
N9	1,27	710,45	104,45
N10	2,38	697,48	93,58
N11	4,83	689,62	83,82
N12	4,73	708,73	101,63
N13	2,77	693,43	92,13
N14	4,48	670,67	65,87
N15	2,42	660,02	55,02
N16	1,92	653,82	51,52
N17	3,4	655,27	48,57
N18	2,73	708,07	101,67
N19	4,15	647,71	41,11
N20	3,4	648,03	40,53
N21	2,7	630,67	24,47
N22	3,99	623,8	27,8
N23	7,51	636,48	29,48
N24	6,1	632,29	36,09
N25	2,23	634,59	32,59
N26	4,15	647,67	37,47
N27	2,34	624,28	16,58
N28	3,98	717,66	108,16
N29	1,25	717,48	107,88
N30	2,9	630,09	29,89
RFN	-105,41	740	0

Tabela A 6: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 3.

Trecho	Vazão (L.s⁻¹)*	Velocidade (m.s⁻¹)	Perda de Carga (m.km⁻¹)
T1	105,41	2,15	15,01
T2	4,94	1,75	54,26
T3	2,92	0,17	0,24
T4	-2,56	1,31	39,1
T5	-96,97	3,09	38,14
T6	-0,43	0,02	0,01
T7	-49,95	1,59	11,16
T8	-89,67	2,85	32,99
T9	1,15	0,58	8,8
T10	-0,93	0,47	5,97
T11	-18,8	1,06	7,42
T12	24,81	1,4	12,41
T13	5,73	2,03	71,28
T14	-3,8	1,34	33,3
T15	-13,83	1,76	30,3
T16	-15,11	0,86	4,95
T17	7,65	0,97	10,12
T18	4,88	1,73	53,06
T19	-4,7	1,66	49,36
T20	5,1	1,81	57,57
T21	2,68	0,95	17,48
T22	-5,14	0,65	4,84
T23	-11,62	4,11	264,02
T24	-14,35	0,71	3,29
T25	3,08	1,09	22,56
T26	-1,07	0,38	3,18
T27	15,49	1,97	37,38
T28	7,99	1,02	10,96
T29	6,37	2,25	86,82
T30	2,65	0,94	17,15
T31	5,9	3,01	183,11
T32	-1,33	0,47	4,79
T33	-3,67	1,3	31,23
T34	1,01	0,36	2,89
T35	1,88	0,96	22,05
T36	-19,64	6,95	698,15
T37	-20,89	1,04	6,59
T38	14,82	0,84	4,78
T39	10,84	3,83	232,12

Tabela A 7: Resultado de consumo, carga hidráulica e pressão em todos os pontos da rede para o cenário 4.

Nó	Consumo (l.s⁻¹)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (m)
N1	3,49	634,62	23,22
N2	2,02	628,57	21,57
N3	4,77	626,51	17,41
N4	4,74	629,6	18,7
N5	4,01	623,87	14,17
N6	5,91	623,58	15,18
N7	2,76	623,57	16,37
N8	2,08	624,6	17,2
N9	1,27	622,92	16,92
N10	2,38	621,22	17,32
N11	4,83	621,06	15,26
N12	4,73	621,27	14,17
N13	2,77	620,87	19,57
N14	4,48	620,75	15,95
N15	2,42	620,65	15,65
N16	1,92	620,61	18,31
N17	3,4	620,8	14,1
N18	2,73	620,99	14,59
N19	4,15	620,84	14,24
N20	3,4	620,93	13,43
N21	2,7	620,62	14,42
N22	3,99	620,48	24,48
N23	7,51	621,09	14,09
N24	6,1	620,6	24,4
N25	2,23	620,55	18,55
N26	4,15	622,5	12,3
N27	2,34	620,48	12,78
N28	3,98	622,91	13,41
N29	1,25	623,25	13,65
N30	2,9	620,6	20,4
RFN	-105,41	635	0

Tabela A 8: Resultado de vazão, velocidade e perda de carga de todos os trechos da rede no cenário 4.

Trecho	Vazão (L.s⁻¹)*	Velocidade (m.s⁻¹)	Perda de Carga (m.km⁻¹)
T1	105,41	2,15	15,01
T2	24,48	1,39	12,1
T3	22,46	1,27	10,32
T4	-17,02	0,96	6,17
T5	-77,43	2,46	25,14
T6	16,37	0,93	5,74
T7	-9,91	0,32	0,56
T8	-55,67	1,77	13,65
T9	18,35	1,04	7,09
T10	16,27	0,92	5,68
T11	-1,17	0,07	0,04
T12	19,2	1,09	7,72
T13	5,47	0,31	0,76
T14	-5,08	0,29	0,66
T15	-13,41	0,76	3,97
T16	-14,68	0,83	4,69
T17	5,94	0,34	0,88
T18	3,18	0,18	0,28
T19	-5,72	0,32	0,82
T20	4,42	0,25	0,51
T21	2	0,11	0,12
T22	-4,87	0,28	0,61
T23	-6,26	0,35	0,97
T24	-9	0,45	1,38
T25	-2,01	0,11	0,12
T26	-6,15	0,35	0,94
T27	14,74	0,83	4,73
T28	7,23	0,41	1,26
T29	8,08	0,46	1,55
T30	3,61	0,2	0,35
T31	4,95	0,28	0,63
T32	-0,38	0,02	0,01
T33	-2,72	0,15	0,21
T34	1,77	0,1	0,09
T35	1,13	0,06	0,04
T36	-18,89	1,07	7,48
T37	-20,14	1	6,15
T38	21,61	1,22	9,61
T39	17,63	1	6,59

