



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ROBERTO VON PAUMGARTTEN DE GALIZA

CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADE DE TUBULAÇÕES DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA, VIA MÉTODO TRANSIENTE  
INVERSO COM APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO

FORTALEZA  
2009

ROBERTO VON PAUMGARTTEN DE GALIZA

**CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADE DE TUBULAÇÕES DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA, VIA MÉTODO TRANSIENTE  
INVERSO COM APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação Submetida à Coordenação do  
Curso de Mestrado em Engenharia Civil,  
da Universidade Federal do Ceará como  
Requisito parcial para Obtenção do grau  
de Mestre.

Área de concentração: Recursos  
Hídricos.

Orientador: Prof. Dr.  
John Kenedy de Araújo

FORTALEZA  
2009

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade. A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

---

Roberto Von Paumgartten de Galiza

Dissertação aprovada em 03 de setembro 2009.

Examinadores:

---

Professor Doutor John Kenedy de Araújo (Orientador).  
Universidade Federal do Ceará

---

Professor Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D.  
Universidade Federal do Ceará

---

Professor Doutor Mariano da Franca Alencar Neto.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado a oportunidade de estar vivo e ter tido uma formação que me possibilitou desenvolver este trabalho.

Aos meus pais, João Maria Cacho de Galiza (in memorian) e Maria Odete Von Paumgartten de Galiza, que sempre me orientaram e me apoiaram em todos momentos da minha vida, sendo antes de tudo exemplos de competência, honestidade e perseverança.

A Ruth Von Paumgartten (in memorian), minha eterna e saudosa “voinha”, a quem devo boa parte dos conhecimentos recebidos no meu ensino fundamental.

A minha esposa Daniely Barroso de Galiza e meus filhos Larissa Barroso de Galiza (Larissinha) e João Maria Cacho de Galiza Neto (Galiza Neto), por sempre me apoiarem e compreenderem a minha ausência.

Ao Prof. Dr. John Kenedy de Araújo, pela orientação e credibilidade que depositou na elaboração deste trabalho.

Aos meus irmãos Edson, Fernando Antônio e Sergio.

Ao meu sócio, primo e amigo Marcio Galiza, com quem eu sempre contei com o apoio para fazer este curso.

Ao meus parentes e amigos pelo apoio.

A banca examinadora por valorizar o trabalho com sua presença.

A todos os professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A calibração é um passo importante na modelagem de uma rede hidráulica, através desta é possível conhecer o comportamento de características físicas da rede de grande importância nas tomadas de decisão. Este trabalho consiste em utilizar o método transiente inverso aplicado com algoritmo genético, para calibração das rugosidades das tubulações de uma rede de distribuição de água por meio de simulações a partir da variação de parâmetros como: mutação, número de cromossomos, número de gerações, quantidade de nós medidos, tempo do transiente e tipo de variação da demanda (brusca e suave). As simulações foram divididas em casos, onde cada solução encontrada pelo modelo computacional foi avaliada por uma função objetiva, baseada na diferença quadrática entre resultados observados e calculados para as cargas transientes no(s) nó(s) monitorados. As análises das soluções encontradas demonstram como o método inverso, o algoritmo genético e a escolha de seus parâmetros influenciam o resultado final. Por meio dos casos, observou-se que para a rede estudada, não adianta simplesmente aumentar isoladamente os valores dos parâmetros do algoritmo genético no intuito de melhorar a eficiência do método. Como se trata de um método inverso, uma combinação específica de rugosidades foi gerada a partir da média das soluções obtidas, sob os mesmos parâmetros, em dez aplicações sucessivas do algoritmo genético (sementes). Os resultados apresentados para as cargas hidráulicas no(s) nó(s) monitorado(s) foram bem próximas das cargas consideradas reais (observadas), tendo em alguns trechos das tubulações valores para a rugosidade bem próximos dos considerados reais. A eficiência dos resultados encontrados foi medida por meio do Erro Médio Relativo, ou seja, da média dos erros relativos entre as rugosidades reais (observadas) e estimadas (calculadas) de cada tubo. O melhor resultado do EMR encontrado foi de 18.9%, onde observou-se um menor erro relativo (1%) para o tubo 2, e um maior erro relativo (59.1%) detectado no tubo 10.

**Palavras-chave:** calibração, rugosidade, transiente, algoritmos genéticos.

## ABSTRACT

An important step in the modelling of hydraulic networks, calibration makes it possible to predict the behavior of physical parameters essential to decision-making. The present study used inverse transient analysis with a genetic algorithm to calibrate pipe roughness in a water distribution network with simulations based on variable parameters such as mutation, number of chromosomes, number of generations, number of nodes, transient time and type of demand variation (abrupt or smooth). Simulations were divided into cases, and each solution given by the computer model was evaluated by an objective function, based on the squared difference between estimated and actual results for the transient loads in the monitored node(s). An analysis of the solutions given by the model shows how the inverse method, the genetic algorithm and the choice of parameters influenced final results. A study of the cases revealed that for the network under study the efficiency of the method could not be improved by increasing isolated parameters of the genetic algorithm alone. In accordance with the inverse method employed, a set of roughness values was created by averaging the solutions found for the same parameters in ten successive runs of the genetic algorithm (seeds). The estimated hydraulic loads in the monitored node(s) were close to the actual loads, with calculated roughness values very similar to actual roughness values in some of the pipe sections. The efficiency of the method was evaluated by mean relative error (MRE) testing (comparing the mean relative errors of estimated and actual roughness values for each pipe). The best MRE result was 18.9%. The smallest relative error (1%) was observed in pipe 2, the biggest (59.1%) in pipe 10.

**Key words:** calibration, roughness, transient, genetic algorithms.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Linhas Características no plano x-t .....  | 26 |
| Figura 2 – Definição da malha de discretização do método das características.....   | 27 |
| Figura 3 – Malha de cálculo. ....   | 31 |
| Figura 4 – Reservatório de nível constante a montante de uma tubulação genérica <i>i</i> .....  | 33 |
| Figura 5 – Esquema de um nó de consumo genérico <i>S</i> .....  | 34 |
| Figura 6 – Mutação simples para representação binária.....  | 44 |
| Figura 7 - Fluxograma do método indireto.....   | 50 |
| Figura 8 – cadeia binária na representação das rugosidades. ....  | 53 |
| Figura 9 – Rede Exemplo .....   | 56 |
| Figura 10 – Média dos valores da função objetivo do melhor caso (caso 33). .....  | 61 |
| Figura 11 – Melhor solução da função objetivo do melhor caso (caso 33).....   | 62 |
| Figura 12 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 33 .....   | 65 |
| Figura 13 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 33)..... | 65 |
| Figura 14 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 37.....  | 67 |
| Figura 15 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 37)..... | 67 |
| Figura 16 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 38.....  | 69 |
| Figura 17 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso38).....  | 69 |
| Figura 18 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 39 .....   | 71 |
| Figura 19 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso39).....  | 71 |
| Figura 20 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso39).....  | 72 |
| Figura 21 - variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 40.....  | 74 |
| Figura 22 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 40)..... | 74 |
| Figura 23 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 40)..... | 75 |
| Figura 24 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 41.....  | 77 |
| Figura 25 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 41)..... | 77 |
| Figura 26 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 41)..... | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 42 .....   | 80 |
| Figura 28 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 42)..... | 80 |
| Figura 29 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 42)..... | 81 |
| Figura 30 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 42)..... | 81 |
| Figura 31 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 42)..... | 82 |
| Figura 32 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 42)..... | 82 |
| Figura 33 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 42)..... | 83 |
| Figura 34 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 42)..... | 83 |
| Figura 35 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 43 .....   | 85 |
| Figura 36 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 43)..... | 85 |
| Figura 37 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 43)..... | 86 |
| Figura 38 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 43)..... | 86 |
| Figura 39 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 43)..... | 87 |
| Figura 40 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 43)..... | 87 |
| Figura 41 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 43)..... | 88 |
| Figura 42 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 43)..... | 88 |
| Figura 43 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 44 .....   | 90 |
| Figura 44 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 44)..... | 90 |
| Figura 45 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 44)..... | 91 |
| Figura 46 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 44)..... | 91 |
| Figura 47 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 44)..... | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 48 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 44).....       | 92  |
| Figura 49 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 44).....       | 93  |
| Figura 50 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 44).....       | 93  |
| Figura 51 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 13 Suave. ....   | 95  |
| Figura 52 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 13 Suave)..... | 96  |
| Figura 53 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 42 Suave. ....   | 98  |
| Figura 54 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 42 Suave)..... | 98  |
| Figura 55 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 42 Suave)..... | 99  |
| Figura 56 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 42 Suave)..... | 99  |
| Figura 57 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 42 Suave)..... | 100 |
| Figura 58 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 42 Suave)..... | 100 |
| Figura 59 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 42 Suave)..... | 101 |
| Figura 60 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 42 Suave)..... | 101 |
| Figura 61 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 43 Suave .....   | 103 |
| Figura 62 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 43 Suave)..... | 103 |
| Figura 63 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 43 Suave)..... | 104 |
| Figura 64 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 43 Suave)..... | 104 |
| Figura 65 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 43 Suave)..... | 105 |
| Figura 66 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 43 Suave)..... | 105 |
| Figura 67 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 43 Suave)..... | 106 |
| Figura 68 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 43 Suave)..... | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 69 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 44 Suave .....  | 108 |
| Figura 70 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 44 Suave). .... | 108 |
| Figura 71 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 44 Suave). .... | 109 |
| Figura 72 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 44 Suave). .... | 109 |
| Figura 73 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 44 Suave). .... | 110 |
| Figura 74 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 44 Suave). .... | 110 |
| Figura 75 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 44 Suave). .... | 111 |
| Figura 76 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 44 Suave). .... | 111 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Procedimento do Algoritmo Genético Padrão de Holland .....                    | 39 |
| Tabela 2 – Relação entre valores decimais e binários para rugosidade.....                | 54 |
| Tabela 3 – características físicas dos tubos da rede hipotética.....                     | 56 |
| Tabela 4 – Vazões iniciais para condições permanentes consideradas reais.....            | 57 |
| Tabela 5 – Cargas hidráulicas iniciais para condições permanentes consideradas reais.... | 57 |
| Tabela 6 – Parâmetros alterados para fase 1.....   | 58 |
| Tabela 7 – Parâmetros alterados para fase 2.....   | 58 |
| Tabela 8 – Resultados dos casos para a fase 1 .....                                      | 60 |
| Tabela 9 – Resultados dos casos para a fase 2 .....                                      | 63 |
| Tabela 10 – Resultados da rugosidade (mm) por semente simulada (Caso33).....             | 64 |
| Tabela 11 – Resultados da rugosidade média estimada (Caso 33).....                       | 64 |
| Tabela 12 – Resultados da rugosidade (mm) por semente simulada (Caso37).....             | 66 |
| Tabela 13 – Resultados da rugosidade média estimada (Caso 37).....                       | 66 |
| Tabela 14 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 38).....                 | 68 |
| Tabela 15 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 38).....                       | 68 |
| Tabela 16 – Resultados da rugosidade por semente simulada (Caso39).....                  | 70 |
| Tabela 17 – Resultados da rugosidade média estimada (Caso39).....                        | 70 |
| Tabela 18 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 40).....                 | 73 |
| Tabela 19 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 40).....                       | 73 |
| Tabela 20 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 41).....                 | 76 |
| Tabela 21 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 41).....                       | 76 |
| Tabela 22 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 42).....                 | 79 |
| Tabela 23 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 42).....                       | 79 |
| Tabela 24 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 43).....                 | 84 |
| Tabela 25 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 43).....                       | 84 |
| Tabela 26 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 44).....                 | 89 |
| Tabela 27 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 44).....                       | 89 |
| Tabela 28 – Resultados para manobra suave (40 s).....                                    | 94 |
| Tabela 29 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 13 Suave).....           | 94 |
| Tabela 30 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 13 Suave).....                 | 95 |
| Tabela 31 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 42 Suave).....           | 97 |
| Tabela 32 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 42 Suave).....                 | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 33 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 43 Suave)..... | 102 |
| Tabela 34 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 43 Suave).....       | 102 |
| Tabela 35 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 44 Suave)..... | 107 |
| Tabela 36 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 44 Suave).....       | 107 |

## LISTA DE SIMBOLOS

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>[M]</b>                         | Unidade de massa   |
| <b>[L]</b>                         | Unidade cumprimento  |
| <b>[T]</b>                         | Unidade de tempo   |
| <i>A</i>                           | Área da seção transversal do tubo,[L] <sup>2</sup>                   |
| <i>a</i>                           | Celeridade da onda,[L] / [T]   |
| <i>a<sub>j</sub></i>               | Celeridade da onda ajustada,[L] / [T]                                |
| <i>B</i>                           | Variável auxiliar [T] / [L] <sup>2</sup>                             |
| <i>D</i>                           | Diâmetro do tubo[L]  |
| <i>E</i>                           | Módulo de elasticidade de Young - GPa                                |
| <i>e'</i>                          | Espessura da parede do tubo [L]                                      |
| <i>f</i>                           | Fator de atrito de Darcy-Weisbach - adimensional                     |
| <i>g</i>                           | Aceleração da gravidade [L] / [T] <sup>2</sup>                       |
| <i>H</i>                           | Carga hidráulica [L]   |
| <i>H<sub>i,j</sub><sup>c</sup></i> | Carga calculada para o nó <i>i</i> e tempo <i>j</i> [L]              |
| <i>H<sub>i,j</sub><sup>m</sup></i> | Carga medida para o nó <i>i</i> e tempo <i>j</i> [L]                 |
| <i>H<sub>J</sub></i>               | Carga no ponto <i>J</i> [L]  |
| <i>H<sub>M</sub></i>               | Carga no ponto de nó de consumo <i>M</i> [L]                         |
| <i>H<sub>P</sub></i>               | Carga na seção <i>P</i> [L]  |
| <i>k</i>                           | Nível de iteração <i>k</i>   |
| <i>K</i>                           | Módulo de elasticidade do fluido - GPa                               |
| <i>k+1</i>                         | Nível de iteração ( <i>k</i> + 1)                                    |
| <i>Q</i>                           | Vazão [L] <sup>3</sup> / [T]   |
| <i>Q<sub>EXT;M</sub></i>           | Vazão de consumo no nó <i>M</i> [L] <sup>3</sup> / [T]               |
| <i>Q<sub>i,s</sub></i>             | Vazão na seção <i>s</i> da tubulação <i>i</i> [L] <sup>3</sup> / [T] |
| <i>Q<sub>J</sub></i>               | Vazão na seção <i>J</i> [L] <sup>3</sup> / [T]                       |
| <i>Q<sub>M</sub></i>               | Vazão na seção <i>M</i> [L] <sup>3</sup> / [T]                       |
| <i>Q<sub>P</sub></i>               | Vazão na seção <i>P</i> [L] <sup>3</sup> / [T]                       |
| <i>R</i>                           | Constante do termo do atrito [T] <sup>2</sup> / [L] <sup>5</sup>     |
| <i>Re</i>                          | Número de Reynolds - adimensional                                    |
| <i>t</i>                           | Tempo [T]  |

|               |   |
|---------------|---|
| $\rho$        | Massa específica do fluido [M] / [L] <sup>3</sup>         |
| $\lambda$     | Operador do MOC   |
| $\gamma$      | Peso específico do fluido [M] / ([T][L] <sup>2</sup> )    |
| $\varepsilon$ | Rugosidade absoluta do tubo [L]                           |
| $\nu$         | Viscosidade cinemática [L] <sup>2</sup> [T] <sup>-1</sup> |
| $\psi$        | Parâmetro adimensional                                    |
| $\nu'$        | Razão de Poisson - adimensional                           |
| $\Delta t$    | Intervalo de tempo [T]                                    |
| $\Delta x$    | Intervalo de espaço [L]                                   |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>14</b> |
| 1.1 HISTÓRICO .....   | 14        |
| 1.2 OBJETIVO .....  | 15        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                 | <b>17</b> |
| 2.1 CALIBRAÇÃO.....   | 17        |
| 2.1.1 GENERALIDADES.....  | 17        |
| 2.1.2 TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO .....                                    | 20        |
| 2.2 ESCOAMENTO TRANSIENTE EM TUBULAÇÕES .....                         | 22        |
| 2.2.1 HISTÓRICO .....   | 22        |
| 2.2.2 EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS DO TRANSIENTE HIDRÁULICO.....          | 24        |
| 2.2.3 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS E DE COMPATIBILIDADE ..... | 27        |
| 2.2.4 CÁLCULO DA CELERIDADE.....                                      | 30        |
| 2.2.5 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA .....                                     | 30        |
| 2.2.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO .....                                     | 32        |
| 2.2.7 RESERVATÓRIO DE NÍVEL CONSTANTE A MONTANTE.....                 | 32        |
| 2.2.8 NÓ DE CONSUMO OU DEMANDA .....                                  | 33        |
| 2.2.9 CONSIDERAÇÕES .....   | 35        |
| 2.3 ALGORITMO GENÉTICO.....   | 36        |
| 2.3.1 INTRODUÇÃO .....  | 36        |
| 2.3.2 CONCEITOS BIOLÓGICOS .....                                      | 37        |
| 2.3.3 ESTRUTURA DOS AG's.....   | 38        |
| 2.3.4 SELEÇÃO .....   | 40        |
| 2.3.5 CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO AG .....                         | 41        |
| 2.3.5.1 REPRESENTAÇÃO BINÁRIA .....                                   | 41        |
| 2.3.5.2 CRUZAMENTO .....  | 42        |
| 2.3.5.3 MUTAÇÃO .....   | 43        |
| 2.3.5.4 NÚMERO DE CROMOSSOMOS (NC).....                               | 44        |
| 2.3.5.5 NÚMERO DE GERAÇÕES (NG) .....                                 | 45        |
| 2.3.5.6 CRITÉRIO DE PARADA .....                                      | 45        |
| 2.3.5.7 FUNÇÃO OBJETIVA.....  | 45        |
| 2.3.5.8 ALGUMAS VANTAGENS DO ALGORITMO GENÉTICO .....                 | 46        |
| <b>3. METODOLOGIA .....</b>   | <b>48</b> |
| 3.1 PROBLEMA INVERSO .....  | 48        |
| 3.1.1 DEFINIÇÃO .....   | 48        |
| 3.1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....                                    | 51        |
| 3.1.3 RESOLUÇÃO .....   | 51        |
| 3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS RUGOSIDADES .....                               | 53        |
| 3.3 AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO .....                                     | 54        |
| 3.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....                                  | 55        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. RESULTADOS .....</b>              | <b>60</b>  |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>               | <b>112</b> |
| 5.1 RECOMENDAÇÕES .....                 | 114        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>115</b> |
| <b>APÊNDICE A .....</b>                 | <b>118</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Histórico

Com a evolução das civilizações que procuravam sempre se instalarem próximo a fontes naturais de água como rios e lagos, os sistemas de distribuição tiveram que evoluir para atender a demanda causada pelo crescimento da população e pela evolução industrial. Inicialmente condutos livres tiveram que ser substituídos por tubulações sob pressão, que a princípio eram ramificadas, posteriormente foram formando malhas. Equipamentos foram agregados para garantir um melhor controle sobre o gerenciamento deste recurso.

Denomina-se rede de distribuição de água ao conjunto de tubulações, válvulas, registros, conexões, bombas, reservatórios de alimentação; cujo objetivo é o abastecimento através de ramais de ligação com a finalidade de uso doméstico, industrial e público (GOMES, 2002). Ao encontro de dois ou mais trechos de tubulações, chama-se de nó; que também pode ser considerado como ponto de demanda.

A princípio, para se dimensionar uma rede de distribuição de água, bastava calcular somente o diâmetro e a vazão das tubulações, porém com a escassez da água devido não só ao aumento da demanda, mas também à falta de preservação dos recursos hídricos, que torna este bem cada vez mais valioso, este passou a ser um problema para pesquisadores que vêm a necessidade de otimizar cada vez mais esse processo de forma a atender a demanda reduzindo o desperdício.

Dentre os vários métodos disponíveis para a resolução de sistemas hidráulicos, um dos mais difundidos é o de Hardy Cross, o qual consiste no cálculo do escoamento de uma rede malhada de modo a satisfazer duas condições para o equilíbrio do sistema:

- A soma algébrica das vazões em cada nó da rede é igual a zero.
- A soma algébrica das perdas de carga (partindo e chegando ao mesmo nó) em qualquer circuito fechado dentro do sistema (malha ou anel) é igual a zero.

Durante algum tempo o estudo em redes de distribuição de água só levava em conta o regime permanente, onde a solução é obtida através do cálculo de vazões que atendam às equações da continuidade em cada nó e as equações da energia nos diversos elementos. As

variações de vazão e de pressão em função do tempo que ocorrem durante o regime não-permanente eram erroneamente desprezadas, pois alguns acreditavam que o sistema era capaz de absorver o impacto do transitório. As pressões causadas pelo transiente podem atingir um valor até três vezes maior do que o observado durante uma operação normal (KARNEY, 1990), fenômeno este que pode causar prejuízos financeiros consideráveis e transtornos por parte de quem precisa dos sistemas para os mais diversos fins. A dificuldade para a solução em regime transiente, deve-se ao grande esforço matemático e a dificuldade de se construir um modelo não-permanente alimentado por dados verificados em campo

A evolução da computação permitiu que modelos de redes de distribuição de água fossem testados exaustivamente, dentro de certos parâmetros, através de simulações.

A calibração de uma rede pode ser obtida através de modelos baseados em algoritmos computacionais, que permitem a determinação de parâmetros físicos e operacionais capazes de reproduzirem resultados próximos do real, essenciais para o cálculo de medidas de vazão e carga hidráulica.

## 1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo calibrar uma rede de distribuição de água, para o caso do regime transiente, ocasionado pela variação de demanda no nó, analisando o coeficiente de rugosidade do material da tubulação. Para o cálculo das cargas nos nós e vazão nas tubulações será utilizado o método das características, que serão comparados com as cargas hidráulicas observados. O método transiente também será utilizado para o cálculo das condições do regime permanente que são desconhecidos.

Segundo Araújo (2003), os modelos aplicados em redes tanto para regimes permanentes como para não permanentes, são encarados sob dois tipos de análises: o problema direto e o inverso. No direto, o comportamento hidráulico do sistema (isto é, a vazão em cada tubo, a pressão em cada nó, as cargas hidráulicas e vazões nas bombas) é determinado pelas características do sistema, bem como pelas condições de operação e variação de demanda. No problema inverso, os parâmetros do sistema são tratados como variáveis e são determinados estabelecendo-se especificações de vazões e/ou pressão. Os problemas inversos têm sido usados em diferentes tipos de aplicações na análise de redes,

incluindo calibração. O Método Transiente Inverso foi aplicado com um Algoritmo Genético na identificação de parâmetros de uma rede hidráulica.

O método do Algoritmo Genético que permite trabalhar com parâmetros discretos bem como com representações binária e real. Para parâmetros contínuos o método permite trabalhar conforme uma precisão pré-determinada, com consequente aumento de esforço computacional.

Será aplicado juntamente com o método transiente inverso, para identificação da rugosidade absoluta, gerando um processo de substituição de indivíduos, por meio de operadores genéticos, operadores de seleção, mutação e recombinação (crossover); que servirá para minimizar os parâmetros observados e simulados. A análise da influência da escolha da quantidade da polulação, do número de gerações, do número de nós monitorados, do tempo do transiente e do tipo de manobra (suave ou brusca) na qualidade do resultado final também será observado.

Uma rede de abastecimento de água será escolhida para obtenção de valores para pressão e rugosidade que serão considerados reais, a fim de que se possa compará-los com resultados obtidos complementando o processo de calibração.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Calibração

#### 2.1.1 Generalidades

A fim de se racionalizar o uso dos recursos hídricos, a utilização de modelos matemáticos de previsão do comportamento hidráulico via computador vem se mostrando fundamental na análise das redes de distribuição de água. A calibração é uma etapa decisiva na consistência dos resultados obtidos a partir do modelo de simulação hidráulico da rede em estudo. Este trabalho apresenta um modelo de calibração de rede de abastecimento de água que considera as rugosidades nos trechos da rede como variáveis de decisão. Para a obtenção destas variáveis, utilizou-se os Algoritmos Genéticos.

Shamir e Howard (1977) destacam a importância da calibração para a determinação de características físicas e operacionais de um sistema existente e obtenção de dados, que quando inseridos ao modelo matemático da rede, produzem dados realísticos. A calibração pode ser considerada como parte integrante da modelagem, onde após o primeiro passo é possível dar continuidade para se tentar operar e controlar o sistema estudado.

Cesario e Davis (1984) definem calibração como sendo o processo de ajuste fino de modelo até que esse simule as condições de campo para um horizonte de tempo específico, e para as condições de demanda máxima horária, com uma precisão razoável.

Walski (1983,1986) e Bhave (1988) propuseram técnicas analíticas que requerem informações do campo para ajustarem simultaneamente os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas dos nós. Estes dados podem ser obtidos durante testes de rotina nas redes de distribuição de água. A aplicação feita por Walski (1983), foi modificada por Bhave (1983), que ajustou simultaneamente as demandas nos nós e os coeficientes de resistência dos tubos por meio de um processo iterativo de calibração. Através de um processo de tentativas foi possível ajustar os coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas nos nós, fazendo uma previsão das pressões nos nós e comparando-as com as respectivas pressões observadas. Enquanto na técnica de Bhave (1988) a vazão de entrada no nó de origem pode ser medida e permanecer fixa durante a calibração, na proposta de Walski (1983) as demandas

nos nós e as vazões de entrada nos nós de origem (próximo ao reservatório), crescem ou decrescem, dependendo do valor do fator de ajuste de demanda.

Boulos e Wood (1990) determinaram diretamente parâmetros de projetos, operação e calibração de redes de abastecimento de água por meio de um processo de algoritmo explícito. Através deste processo valores ótimos para estes parâmetros de projetos, operação e calibração puderam ser determinados para encontrar as restrições específicas de vazão e pressão. Todos os tipos de sistema de distribuição podem ser considerados neste modelo. O método adotado para resolver simultaneamente o sistema de equações lineares e não lineares foi o de Newton-Raphson. As variáveis de decisão para o algoritmo de otimização são representados pelos parâmetros indeterminados da rede. A medida que estes parâmetros são explicitamente determinados, o algoritmo explícito se torna bastante eficiente para satisfazer especificações limites.

Ferreri, Napoli e Tumbiolo (1994) destacam a importância de avaliar com precisão os parâmetros da rede, essenciais para a calibração, onde o coeficiente de rugosidade assume grande importância; uma vez que estes parâmetros se alteram consideravelmente com o tempo.

Gambale (2000) definiu calibração em redes de água como sendo a determinação das características físicas do modelo, particularmente dos coeficientes de rugosidade dos tubos, que inseridos no modelo simulador produziram resultados realísticos. A calibração é uma tarefa impressindível à simulação e envolve um grande consumo de tempo dos profissionais para sua realização. Devido a este fato, nos últimos anos, a calibração tem sido objeto do estudo de vários pesquisadores. Em sua pesquisa Gambale calibrou uma rede de abastecimento de água, adaptada do exemplo criado por Walski (1983), aplicando sua técnica utilizando o Algoritmo Genético em regime permanente. Segundo ele os modelos de calibração são modelos otimizadores que têm como escopo a determinação, de forma automática, dos coeficientes de rugosidade das redes ou das demandas nodais, ou seja, calibração de rede. Atualmente, a otimização genética tem sido objeto de estudo para operar nestes modelos. Em seu trabalho, ele cita alguns modelos disponíveis no mercado, tais como:

- EPANET – Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (*Environmental Protection Agency - EPA*). Este programa de distribuição livre possui vários recursos como Controles, Padrões e as simulações em Período Extensivo e de

Qualidade de Água. Encontra-se disponível em bibliotecas voltadas para a plataforma em WINDOWS.

- BOSS SEM – (Epanet Modeling System) – Desenvolvido no ambiente WINDOWS pela empresa “Boss International”, este simulador utiliza o cálculo do EPANET, contando com todos os recursos disponíveis naquele modelo, tendo as vantagens da interface do WINDOWS para a criação da rede e visualização dos resultados.
- CFOR – O programa criado pela “Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo” foi desenvolvido em ambiente WINDOWS e possui os módulos de cálculo em regime permanente, extensivo e transitório.
- H2ONET – Pertencente a “MW Soft, Inc” este programa é um dos mais completos existentes no mercado. Trabalha diretamente no ambiente AUTOCAD, dispondo dos módulos de cálculo de qualidade de água , regime permanente e extensivo. Possui , também , um vasto grupo de recursos, destacando-se o gerenciador de cenários e a interface com os sistemas GIS (*Geographic Information System*) e SCADA (*Supervisory Control And Data Aquisition*) . A despeito de ser um programa de grandes recursos, seu manejo não é simples, necessitando do programa AUTOCAD para funcionar.
- PIPE 2000 – Esta versão para WINDOWS do programa KYPIPE, produzida pela Universidade do Kentucky (USA), dispõe de uma grande variedade de recursos, cumprindo destacar a utilização de imagens RASTER (*background*) e a calibração automática. Trata-se de um programa de fácil assimilação.
- WATERCAD – Criado pela empresa “*Haestad Methods*”, é um programa desenvolvido em WINDOWS, tendo uma extensa gama de recursos, dentre eles, o gerenciador de cenários. Talvez, a maior virtude deste programa seja a facilidade com que o operador aprenda a utilizá-lo.

### 2.1.2 Técnicas de calibração

Desde a década de 70, numerosas técnicas de calibração tem sido usadas em redes, como nos seguintes casos:

Eggener e Polkowski (1976) sugeriram que as condições de vazão podem ser melhor definidas que o fator de atrito, segundo eles o método mais lógico de se modelar um sistema malhado, seria dar entrada no computador com dados de vazão, juntamente com as pressões nodais observadas em pontos determinados e uma série de valores de rugosidades assumidos.

A idéia é que o computador realize o balanço da rede para cada condição de carga, armazene os resultados, examine o ajuste global do modelo, explore as melhores estimativas e realize um outro balanço com as novas rugosidades. Este processo deve se repetir de forma iterativa até que alguma condição de aceitação seja satisfeita. Segundo os autores, naquela época um esquema ainda pouco divulgado, havia sido descrito por Donachie, na Inglaterra.

Segundo Sharp e Walski (1988) a rugosidade dos condutos de água é um fator crítico para o dimensionamento das tubulações. Existem vários métodos para obtenção deste parâmetro, entre eles utilizar valores da literatura tradicional, porém estes valores variam muito de um sistema para outro. Um segundo método seria determinar a rugosidade de uma tubulação já instalada, ajustando valores que façam um modelo computacional atender várias condições pré-determinadas. Um terceiro método e mais preciso seria medir em campo a rugosidade real dos tubos por meio das perdas de cargas. Este método apesar de fornecer resultados mais confiáveis, é também o mais dispendioso em tempo e custo. No entanto, segundo os autores, nenhum destes métodos são capazes de garantir no futuro a rugosidade das tubulações.

Garcia-Serra (1988) em sua tese de doutorado apresenta várias técnicas e variações para calibração de modelos matemáticos de distribuição de água, dividindo-as em determinísticos e não-determinísticos. Primeiramente aborda métodos mais simples, que proporcionam um ajuste não tão preciso do modelo. Discorre ainda desta fase, técnicas matemáticas de minimização, que são úteis para o cálculo de certas funções objetivas. Posteriormente, apresenta técnicas de calibração mais refinadas, as quais são apoiadas em base analítica fundamentada na própria formulação do sistema de equações que definem o comportamento da rede. Também foram utilizadas técnicas de análise que permitem determinar a variação de certa grandeza ao se modificar parâmetros de ajuste. Segundo o

autor, em muitos casos inicialmente se aplicou um técnica de precalibração e a seguir se aplicou uma técnica mais apurada.

Cheung e Souza (2001) definiram como finalidade de um processo de calibração de uma rede de abastecimento de água como sendo o ajuste dos dados de entrada do modelo com a finalidade de reduzir os desvios entre os valores observados e prognosticados. Em seu trabalho dois métodos foram utilizados e comparados, o Analítico (Bhave 1988) que ajusta os coeficientes de rugosidade das tubulações e/ou demandas nos nós através de um processo iterativo até alcançar a calibração da rede, e o Explícito, proposto por Boulos e Wood (1990), que determina diretamente os parâmetros de calibração. Neste processo as condições de pressão e vazão em regime permanente são determinadas por técnicas fornecidas pelas equações da energia e da continuidade. A solução do problema é dada em termo da reformulação da equação de equilíbrio da rede.

Araújo e Chaudhry (2003) utilizaram o Método Transiente Inverso, que determina os parâmetros pela minimização dos desvios entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas, para a calibração das rugosidades em redes hidráulicas, observando dados tanto em regime permanente como em regime transiente. Durante o transiente, fenômeno que ocorre quando há uma variação da pressão e vazão devido a algum distúrbio como a abertura ou fechamento de válvula, é possível obter-se uma quantidade muito maior de informações no tempo, com um menor número de locais observados que no escoamento permanente. Liggett e Chen (1994) fizeram o ajuste entre cargas medidas e calculadas, aplicando o MTI em conjunto com o método de Levenberg-Marquardt. Goldberg (1989) e Michalewicz (1994) usaram outros métodos de ajuste de parâmetros que incluíram como algoritmo estocástico o genético (AG).

Silva (2006) definiu Métodos Explícitos como sendo aqueles em que os parâmetros de equilíbrio da rede a serem calculados pelos modelos matemáticos, são determinados por meio da resolução analítica do sistema de equações não lineares; onde o número de medidas de pressão e/ou vazão é igual ao número de parâmetros. Já o método implícito, desenvolvido por Ormsbee (1989) que utiliza uma técnica não linear para calibração da rugosidade de tubulações baseado em condições de carga em regime permanente, consiste em minimizar uma função objetiva que geralmente é o módulo da diferença entre os valores observados e calculados de pressão e/ou vazão.

## 2.2 Escoamento Transiente em Tubulações

### 2.2.1 Histórico

Considerando os condutos forçados de uma maneira geral, as situações que ocasionem danos na sua estrutura, impossibilitando o seu bom funcionamento e consequentemente causando prejuízos financeiros, devem ser tratadas com prudência. Um dos fenômenos que podem ocorrer é o transiente hidráulico, que segundo Araújo (2003) pode ser definido como a situação de fluxo não permanente quando o fluxo varia de um estado permanente para outra situação de estado permanente. Entre as diversas causas das quais se origina o fluxo transitório pode-se citar:

- Operações de abertura ou fechamento de válvula;
- Parada de eletrobombas causadas por interrupção de energia elétrica no motor;
- Abertura ou fechamento de turbinas ;
- Variação na demanda ou no consumo;
- Alteração no nível de um reservatório.

O transiente hidráulico, também conhecido como golpe de aríete, leva em consideração os efeitos elásticos da água e da tubulação, sendo portanto enquadrado como um modelo elástico. Durante o regime, a variação de pressão poderá atingir níveis indesejáveis que poderão trazer danos ao conduto ou aos dispositivos que nele estiverem instalados. Este fenômeno está relacionado com a propagação de ondas de sobrepressão e subpressão que conduzem informações para todo sistema hidráulico, onde as variações de pressão são menores quando o fluxo muda lentamente e maiores quando ocorre uma mudança mais rápida.

De acordo com Camargo (1991), possivelmente teria sido Michaud, no século XIX, por volta de 1878, quem primeiro realizou estudos sobre o fenômeno. Posteriormente, ainda no século XIX, em 1897, Joukowsky deu importantes contribuições ao desenvolvimento da análise do golpe de aríete. Em seguida, com base nestes trabalhos, Allievi em sua “Teoria del colpo d’ariete” publicado em Milão no ano de 1903, apresentou a fundamentação teórica das perturbações do fluxo de água em tubos, sem, no entanto, considerar as perdas de carga, simplificação esta nem sempre justificável. Mais tarde, próximo de 1930, as perdas de carga haveriam de ser consideradas com o surgimento dos métodos gráficos desenvolvidos por

Schnyder-Bergeron. Mais recentemente, com o aparecimento dos computadores, o cálculo pode ser automatizado e possibilitou a análise computadorizada do golpe de arête, mesmo em condições de funcionamento de maior complexidade, tais como os circuitos ramificados e malhados, com um mínimo de simplificação e com menor tempo de cálculo.

As equações do movimento transiente são obtidas basicamente de duas equações diferenciais parciais que são a equação de conservação da massa (2.1) e da quantidade de movimento (2.2).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.2)$$

onde  $H$  [L] é a carga piezométrica,  $Q$  [ $L^3T^{-1}$ ] é a vazão volumétrica,  $A$  [ $L^2$ ] é a área da seção transversal do tubo,  $a$  [ $LT^{-1}$ ] é a celeridade (velocidade) da onda de pressão,  $D$  [L] é o diâmetro interno da tubulação,  $f$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach,  $g$  [ $LT^{-2}$ ] é a aceleração da gravidade,  $x$  é a distância e  $t$  o tempo.

Estas equações parciais necessitam de um método numérico para resolvê-las, pois normalmente não há uma solução analítica simples que atenda a esse conjunto de equações. Este trabalho utilizou o modelo elástico para um sistema de distribuição de água, onde as equações diferenciais parciais (2.1) e (2.2) são discretizadas e linearizadas através do método das características.

Segundo Chaudhry (1987) várias técnicas numéricas e gráficas de solução para este sistema de equações já foram propostas, sendo o método das características uma das técnicas mais difundidas.

## 2.2.2 Equações Características do Transiente Hidráulico

O cálculo dos valores da vazão  $Q$  e da carga piezométrica  $H$  ao longo da tubulação  $x$  e do tempo  $t$ , para o transiente hidráulico, são obtidos a partir da resolução destas duas equações diferenciais (2.1) e (2.2). As deduções para estas equações bem como o uso delas em simulações com fluxo de redes hidráulicas, são demonstrados em várias referências como por exemplo Chaudhry (1987) .

Para resolução deste sistema de equações diferenciais, necessita-se além de um método numérico, especificar as condições de contorno. Dentre os vários métodos disponíveis, o das características é um dos mais utilizados, pelo fato de o fenômeno transitório seguir uma lei de propagação de onda que associa o tempo com a abscissa  $x$ , definido ao longo da canalização, por meio da celeridade  $a$ . Este fato permite o método eliminar uma das variáveis independentes, sendo assim possível trabalhar apenas com a variável  $x$  ou  $t$ , dependendo da formulação adotada. A principal vantagem do método é a possibilidade de determinação das cargas e vazões, por meio de equações explícitas. Quando a velocidade de propagação da onda ou celeridade  $a$ , assume valores muito maiores que a velocidade média de escoamento, o método se apresenta ainda mais eficiente.

As equações (2.1) e (2.2) podem ser reescritas em função da vazão  $Q$  e da carga piezométrica  $H$ , da seguinte forma:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q |Q| = 0 \quad (2.3)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

Onde  $L_1$  e  $L_2$  são as equações diferenciais de derivadas parciais, respectivamente da quantidade de movimento e da continuidade (conservação da massa), para líquidos compressíveis escoando em condutos de material com comportamento elástico, em regime variável.

Realizando-se uma combinação linear das equações (2.3) e (2.4) através de um multiplicador  $\lambda$ , pode ser escrito:

$$L = L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (2.5)$$

Após a substituição de valores e a realização de operações, tem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \lambda gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

ou

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.7)$$

se a carga  $H(x,t)$  a vazão  $Q(x,t)$  são funções da posição x e do tempo t, então as derivadas totais podem ser escritas como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.8)$$

e

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.9)$$

Definindo o multiplicador  $\lambda$  de forma que  $\lambda a = 1$ , tem-se:

$$\lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

e utilizando as equações (2.8), (2.9) e (2.10), as equações características tornam-se:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.11)$$

se

$$\frac{dx}{dt} = a \quad (2.12)$$

e

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (2.13)$$

Se

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (2.14)$$

Assim as equações diferenciais parciais (2.1) e (2.2) se transformam nas equações diferenciais totais (2.11) e (2.13) válidas sempre que satisfeitas as equações (2.12) e (2.14). Em outras palavras, impondo as relações dadas por  $(dx/dt) = a$  e  $(dx/dt) = -a$ , elimina-se a variável independente  $x$ , e convertem-se as equações diferenciais parciais (2.3) e (2.4) em equações diferenciais ordinárias na variável independente  $t$ . A solução e o desenvolvimento destas equações ficam bem visualizados num plano  $x-t$ , Figura 1, onde  $x$  localiza um ponto no conduto e  $t$  o instante no qual as variáveis dependentes  $Q$  e  $H$  devem ser determinadas. As Eqs. (2.12) e (2.14) representam, respectivamente, as retas AP (de inclinação  $1/a$ ) e PB (de inclinação  $-1/a$ ). Essas linhas são chamadas linhas características, positiva e negativa, onde são válidas as Eqs. (2.11) e (2.13). Matematicamente, essas linhas dividem o plano  $x-t$  em duas regiões. Por exemplo, um distúrbio no ponto  $A$  (Figura 1) em  $t_o$  alcançaria o ponto  $P$  depois de um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

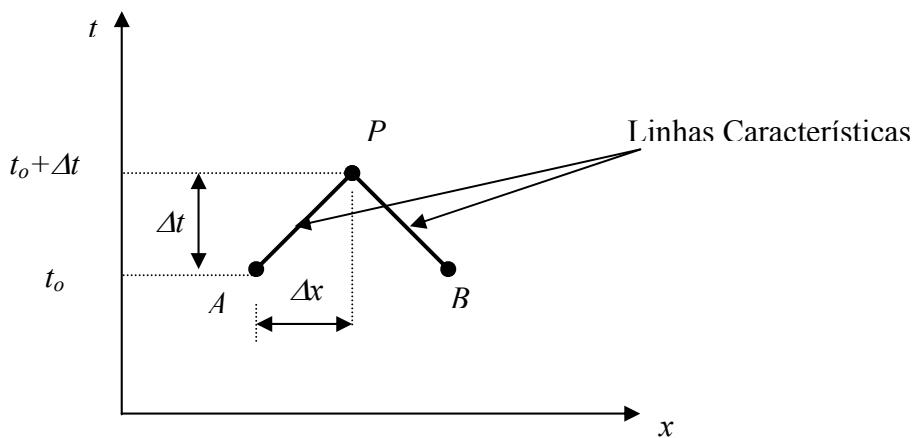


Figura 1 – Linhas Características no plano x-t.

### 2.2.3 Solução das equações características e de compatibilidade

Uma solução numérica das equações (2.11) e (2.13) pode ser obtida discretizando-se o domínio em trecho  $\Delta x$  e o tempo em intervalo de tempo  $\Delta t$ , respectivamente. Assim, têm-se os valores discretos de  $x$ , que indicam as seções consideradas:  $x_0 = 0, x_1 = 1\Delta x, x_2 = 2\Delta x, \dots, x_N = N\Delta x$ . Para o tempo  $t$ , tem-se:  $t_0 = 0, t_1 = 1\Delta t, t_2 = 2\Delta t, \dots, t_M = M\Delta t$ . Necessariamente, por imposição do método das características, tem-se que  $\Delta x = a\Delta t$ . A

Figura 2 ilustra a discretização de  $x$  e  $t$ .

Os pontos  $M, J$  e  $P$  correspondem, respectivamente, aos pontos de coordenadas  $(x_{i-1}, t_j)$ ,  $(x_{i+1}, t_j)$ ,  $(x_i, t_{j+1})$ . A Eq. (2.11) é usada para relacionar os valores de  $H_P$  e  $Q_P$  com o par de valores  $H_M$  e  $Q_M$  e a Eq. (2.13) para relacionar  $H_P$  e  $Q_P$  com  $H_J$  e  $Q_J$ .

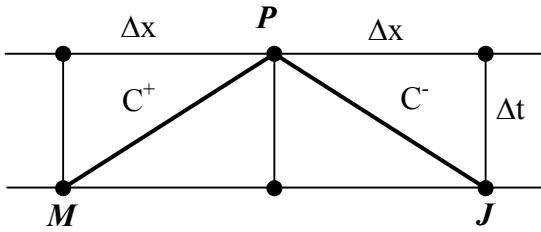


Figura 2 – Definição da malha de discretização do método das características.

Multiplicando as equações (2.11) e (2.13) por  $dt$  e por  $\frac{a}{gA}$ , as equações características tornam-se:

$$C^+ : dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{fa}{2gDA^2} Q|Q|dt = 0, \quad \text{para} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (2.15)$$

$$C^- : -dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{fa}{2gDA^2} Q|Q|dt = 0, \quad \text{para} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (2.16)$$

Integrando as equações (2.15) e (2.16) ao longo de  $MP$  e  $JP$  respectivamente (Figura 2):

$$C^+ : \int_M^P dH + \frac{a}{gA} \int_M^P dQ + \frac{fa}{2gDA^2} \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.17)$$

$$C^- : - \int_J^P dH + \frac{a}{gA} \int_J^P dQ + \frac{fa}{2gDA^2} \int_J^P Q|Q|dt = 0 \quad (2.18)$$

Os dois primeiros termos das equações (2.17) e (2.18) podem ser facilmente avaliados, entretanto o terceiro termo destas, representando perdas por atrito, apresenta uma certa dificuldade, pois não se conhece explicitamente a variação de  $Q$  com  $t$ . O termo de atrito em geral é pequeno e nele faz-se  $Q$  constante e igual ao valor conhecido que tinha em  $M$  na equação (2.17) e em  $J$  na equação (2.18). Como os intervalos de tempo usados para resolver essas equações em problemas práticos são usualmente pequenos, uma técnica de primeira ordem sugerida por WYLIE e STREETER (1978) satisfaz à maioria dos problemas. Usando esta técnica para o termo do atrito, será obtida a seguinte aproximação:

$$\int_M^P Q_M |Q_M| dt \approx Q_M |Q_M| \Delta t \quad \text{para } C^+ \quad (2.19)$$

e

$$\int_J^P Q_J |Q_J| dt \approx Q_J |Q_J| \Delta t \quad \text{para } C^- \quad (2.20)$$

As equações (2.17) e (2.18) tornam-se:

$$C^+ : (H_p - H_M) + B(Q_p - Q_M) + RQ_M |Q_M| = 0 \quad (2.21)$$

$$C^- : -(H_p - H_J) + B(Q_p - Q_J) + RQ_J |Q_J| = 0 \quad (2.22)$$

onde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad (2.23)$$

$$R = \frac{fa\Delta t}{2gDA^2} = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (2.24)$$

Explicitando-se os valores de  $H_P$ , tem-se que:

$$C^+ : H_p = C_p - BQ_p \quad (2.25)$$

$$C^- : H_p = C_m + BQ_p \quad (2.26)$$

Onde:

$$C_p = H_m + BQ_m - RQ_m|Q_m| \quad (2.27)$$

$$C_m = H_j - BQ_j + RQ_j|Q_j| \quad (2.28)$$

A equação característica  $C^+$  se aplica ao longo da linha MP (Figura 2) e a equação característica  $C^-$  se aplica ao longo da linha JP. Os valores dos parâmetros  $C_p$  e  $C_m$  dependem das condições do sistema no instante  $t = t_o$  e servem de base para determinação dos mesmos no instante  $t = t_o + \Delta t$ .

Com  $C_p$  e  $C_m$  conhecidos, então resolvendo-se as equações (2.25) e (2.26) encontram-se:

$$H_p = \frac{C_p + C_m}{2} \quad (2.29)$$

$$Q_p = \frac{C_p - C_m}{2B} \quad (2.30)$$

Desta maneira, os valores de  $H_p$  e  $Q_p$  podem ser calculados em todas as seções do conduto. Esse método é conhecido como explícito e produz usualmente resultados satisfatórios em aplicações na engenharia.

#### 2.2.4 Cálculo da Celeridade

As propriedades do fluido e do conduto são incluídas através da velocidade de propagação da onda ou celeridade  $a$ . Halliwell apud Chaudhry (1987) apresenta uma expressão geral para o cálculo da velocidade da onda:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (2.31)$$

onde:  $\psi$  é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto;  $E$  [ $ML^{-1}T^{-2}$ ] é o módulo de elasticidade de Young da parede do conduto;  $K$  [ $ML^{-1}T^{-2}$ ] e  $\rho$  [ $ML^{-3}$ ] são o módulo de elasticidade e a massa específica do fluido, respectivamente. Existem várias expressões que calculam o parâmetro  $\psi$  para diferentes condições dos condutos. Neste trabalho, os condutos serão considerados como elásticos de paredes finas. A expressão é a seguinte:

$$\psi = \frac{D}{e'} (1 - 0,5\nu') \quad (2.32)$$

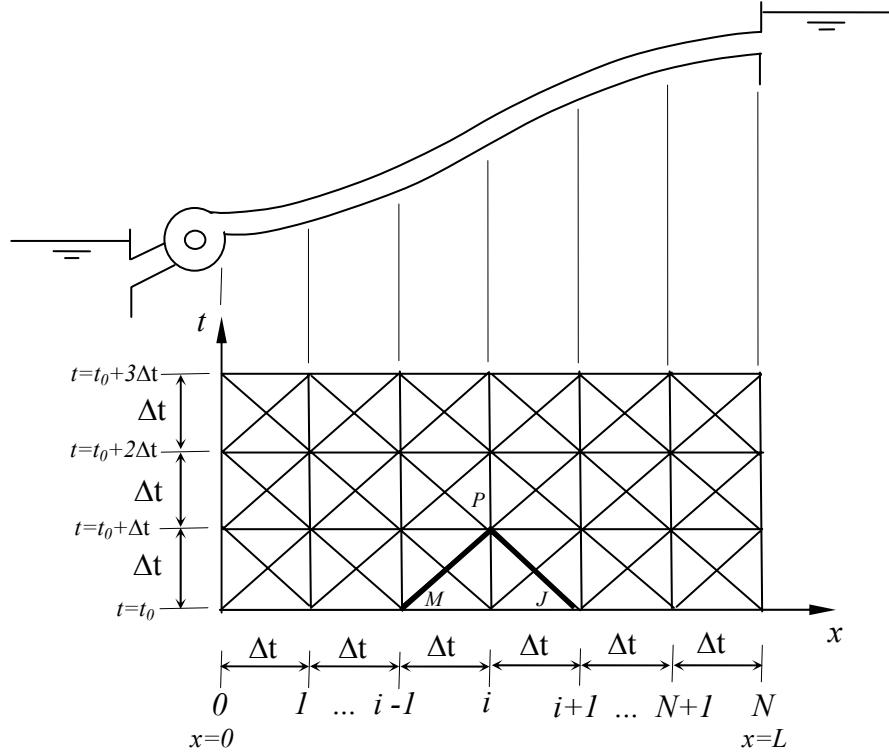
onde  $D$  [L] é o diâmetro do conduto,  $e'$  [L] é a espessura da parede e  $\nu'$  é a razão de Poisson (adimensional).

#### 2.2.5 Representação Gráfica

Para se compreender melhor este método, considere o exemplo de Camargo (1991) da

Figura 3, onde um conduto simples de comprimento total  $L$  será dividido em  $N-1$  segmentos de comprimento  $\Delta x$  com  $N$  seções tal que  $\Delta x = L/(N-1)$  e  $\Delta t = \Delta x/a$ . Em seguida são determinados em cada seção  $i$  os valores  $H_0$  e  $Q_0$  para as condições de fluxo permanente inicial, que se verifica no sistema quando  $t = t_0$  (sobre o eixo  $x$ ), ao longo de todo o

comprimento  $L$ . A partir dos valores conhecidos dos pontos anteriores e posteriores no instante anterior  $t$ , é possível calcular as variáveis  $H_p$  e  $Q_p$  em um ponto genético  $P$ , no instante posterior  $t + \Delta t$ , utilizando equações válidas ao longo das retas característica  $C^+$  e  $C^-$



**Figura 3 – Malha de cálculo.**

Uma vez conhecidos os valores  $H_0$  e  $Q_0$ , isto é, os valores  $H_p$  e  $Q_p$  no instante  $t = t_0$ , a partir dos mesmos se calculam os valores  $H_p$  e  $Q_p$  nos pontos interiores da malha no instante  $t = t_0 + \Delta t$ . Estes últimos depois de conhecidos possibilitam o cálculo dos valores de  $H_p$  e  $Q_p$  nos pontos interiores da malha no instante  $t = t_0 + 2\Delta t$ . E assim sucessivamente. Estes passos devem ser aplicados repetidamente em todos os pontos interiores da malha, ou seja, de forma sequencial em todas as seções  $i$  do conduto, desde  $i = 1$  até  $i = N-1$ , determinando-se, desta forma, todos os valores  $H_p$  e  $Q_p$  para o atual instante de cálculo. Estes valores, conforme dito anteriormente, servirão de base para se determinar as condições ( $H_p$  e  $Q_p$ ) no instante seguinte.

Esse procedimento possibilita a determinação da evolução da altura piezométrica  $H_p$  e da evolução da vazão  $Q_p$ , ao longo de todo o conduto, em quantas seções se desejar,

mediante acréscimo de tempo  $\Delta t$ , numa sequência de cálculos que com a utilização de processamento computacional pode ser automatizado. A interrupção poderá ocorrer no instante que convier.

Cabe ressaltar que esta metodologia até agora empregada, refere-se aos pontos interiores da malha de cálculo, devendo neste passo ser incluído o cálculo nos pontos exteriores da malha, nas seções  $i=0$  e  $i=N$ , extremidades de montante e de jusante do conduto, relativas às condições de contorno do sistema, que ficam definidas associando-se as equações  $C^+$  e  $C^-$  a uma condição adicional que reflete o comportamento do contorno.

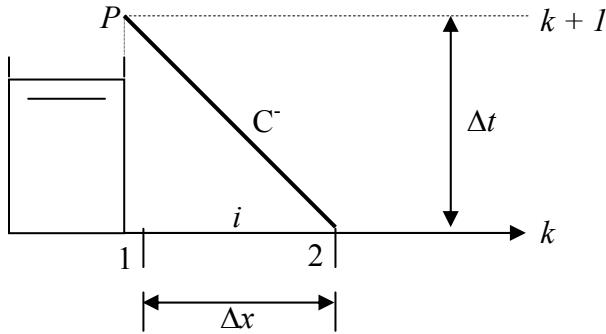
### 2.2.6 Condições de Contorno

O comportamento das extremidades de cada tubulação, é representado pela condição de contorno. Estas extremidades podem apresentar-se associadas a válvulas, reservatórios ou a outras tubulações, como no caso de junções, nós ou interligações de dois ou mais condutos. Como as equações  $C^+$  e  $C^-$ , respectivamente em cada extremidade, estabelecem uma relação entre duas incógnitas, então surge a necessidade de uma condição adicional que representa, através das mesmas variáveis, a interação entre o contorno e o fluido, de forma a surgir a solução.

Muitas são as condições de contorno como comentado anteriormente, algumas mais frequentes. Dentre as citadas na tese de Araújo (2003) em condutos por gravidade, destacamos as seguintes:

### 2.2.7 Reservatório de Nível Constante a Montante

Considere um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica  $i$  (Figura 4).



**Figura 4 – Reservatório de nível constante a montante de uma tubulação genérica  $i$ .**

Para esta situação os pontos  $P$  e  $J$ , da equação (2.22) correspondem respectivamente aos pontos das coordenadas  $_{i,1}(k+1)$  e  $_{i,2}(k)$ . O nível constante do reservatório implicará na seguinte condição de contorno:

$$H_{i,1}(k+1) = H_1 = \text{constante} \quad (2.33)$$

Apenas a equação característica negativa será utilizada, pois o **ponto** monitorado está a jusante do reservatório, dada por:

$$C^- : -[H_{i,1}(k+1) - H_{i,2}(k)] + B_i [Q_{i,1}(k+1) - Q_{i,2}(k)] + R_i Q_{i,2}(k) | Q_{i,2}(k) = 0 \quad (2.34)$$

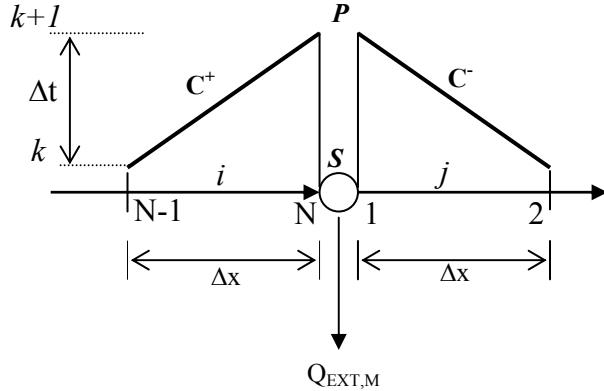
Das equações (3.29) e (3.30):

$$Q_{i,1}(k+1) = \frac{H_1}{B_i} - \frac{H_{i,2}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i | Q_{i,2}(k)]}{B_i} Q_{i,2}(k) \quad (2.35)$$

## 2.2.8      **Nó de Consumo ou Demanda**

Considere um nó de consumo genérico  $S$  com vazão de demanda igual a  $Q_{EXT,M}$  e duas tubulações  $i$  e  $j$  representando as tubulações que chegam (conjunto  $N_I$  – sentido positivo)

e as tubulações que saem (conjunto  $N_2$  – sentido negativo) do nó  $S$  respectivamente (Figura 5).



**Figura 5 – Esquema de um nó de consumo genérico  $S$ .**

As equações características são dadas por:

A equação característica  $C^+$  (2.21), onde os pontos  $P$  e  $M$  da referida equação, correspondem aos pontos das coordenadas  $_{i,N}(k+1)$  e  $_{i,N-1}(k)$  para o caso analisado da Figura 5, será reescrita da seguinte maneira:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| = 0 \quad (2.36)$$

Assim como no caso anterior a equação característica  $C^-$  (2.22) , onde os pontos  $P$  e  $J$  correspondem aos pontos das coordenadas  $_{j,1}(k+1)$  e  $_{j,2}(k)$  para o caso analisado da Figura 5, será reescrita da seguinte forma:

$$C^- : -[H_{j,1}(k+1) - H_{j,2}(k)] + B_j [Q_{j,1}(k+1) - Q_{j,2}(k)] + R_j Q_{j,2}(k) |Q_{j,2}(k)| = 0 \quad (2.37)$$

contorno:

$$\sum_{i \in N_1} Q_{i,N}(k+1) - \sum_{j \in N_2} Q_{j,1}(k+1) - Q_{EXT,M} = 0 \quad (2.38)$$

$$H_{i,N}(k+1) = H_{j,1}(k+1) = H_m(k+1) \quad (2.39)$$

Das equações (2.36) e (2.37):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_{i,N}(k+1)}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (2.40)$$

$$Q_{j,1}(k+1) = \frac{H_{j,1}(k+1)}{B_j} + \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \frac{[B_j - R_j |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) \quad (2.41)$$

Substituindo as equações (2.40) e (2.41) na equação (2.38) e usando a equação (2.39):

$$\begin{aligned} H_M(k+1) = & B_M \sum_{i \in N_1} \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + B_M \sum_{j \in N_2} \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \\ & B_M \sum_{i \in N_1} \frac{[B_i - R_i |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) - \\ & B_M \sum_{j \in N_2} \frac{[B_j - R_j |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) - B_M Q_{EXT,M} \end{aligned} \quad (2.42)$$

onde:

$$B_M = \left[ \sum_{i \in N_1} \frac{1}{B_i} + \sum_{j \in N_2} \frac{1}{B_j} \right]^{-1} \quad (2.43)$$

## 2.2.9 Considerações

Estes dois casos de condições de contorno demonstrados anteriormente, são os que se aplicam na rede hidráulica calibrada neste trabalho. O método das características se apresenta satisfatório para a determinação direta dos valores de carga nos nós e vazão nas tubulações, por meio de equações explícitas, onde os resultados obtidos em cada passo de tempo ocorrem em função dos valores encontrados no passo de tempo anterior.

## 2.3 Algoritmo Genético

### 2.3.1 Introdução

Motivados pela idéia que a evolução de uma determinada população de soluções possíveis para um problema poderia ocorrer baseada na variação genética e na seleção natural, por volta dos anos 50 e 60, vários cientistas na área computacional utilizaram este conceito em suas pesquisas a fim de otimizarem soluções para problemas na área de engenharia.

Nos anos 60, as *estratégias evolutivas* foram introduzidas por Rechenberg (1965, 1973) apud Mitchell (1996), onde valores reais para modelos de aerofólios de aeronaves foram otimizados. Mais adiante Schewefel (1975, 1977) apud Mitchell (1996) desenvolveram esta idéia. O campo das estratégias evolutivas permanece ativo, não dependendo do campo dos algoritmos genéticos. A técnica que utiliza mutações aleatórias para modificar candidatos à solução do problema, foi desenvolvida na *programação evolutiva* por Fogel; Owens, Walsh (1966) apud Mithell (1996). A base do campo da computação evolutiva é formada por estes três métodos juntos: as estratégias evolutivas, programação evolutiva e algoritmo genético.

Os algoritmos Genéticos criados por John Holland (1975) e divulgados por David Goldberg (1989), um de seus alunos, baseiam-se no processo de seleção natural do naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”. Ao contrário do observado nas técnicas das estratégias evolutivas e da programação evolutiva que visavam obter resultados para problemas específicos, o algoritmo genético estuda os fenômenos de adaptação como eles ocorrem na natureza. O objetivo original deste algoritmo é importar para os sistemas de computação os mecanismos da adaptação natural. Uma técnica de aleatoriedade é aplicada para se determinar a melhor solução de um problema, utilizando-se um conjunto de regras e operações baseadas no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto.

Este método consiste em alterar uma população inicial de cromossomos (bits – cadeias formadas por strings de um e zero), utilizando mecanismos de seleção natural e operadores de cruzamento e mutação para se obter novas populações. Os genes, que assumem valores de um ou zero, formam o cromossomo. O operador seleção escolhe quais cromossomos da

população serão selecionados para reprodução, onde aqueles mais aptos gerarão mais descendentes que os menos aptos. Assim como ocorre nos organismos biológicos, parte dos dois cromossomos são trocadas durante o cruzamento.

A principal inovação da idéia de Holland em relação as estratégias da evolução, era a de utilizar uma população inicial para gerar outras populações a partir de operadores inspirados na genética, como cruzamento e mutação.

### 2.3.2 Conceitos biológicos

Os termos empregados no algoritmo genético (AG's) são adaptados da conceituação biológica. A seguir uma lista com aqueles mais encontrados na literatura.

- Gene: na biologia é a unidade genética transmitida pelo cromossomo, que determina características do indivíduo. Nos AG's é um elemento de vetor que representa o cromossomo.
- Alelo: na biologia em um gene podem existir vários alelos, como por exemplo: para os genes que definem a cor dos olhos, existem os alelos preto, azul, verde e castanho. Nos AG's os alelos são 1 e 0 para representação binária e 0 a 9 para representação decimal.
- Cromossomo e genoma: na biologia, genoma é o conjunto completo de genes de um organismo. Um genoma pode ter vários cromossomos. Nos AG's, os dois representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema.
- Indivíduo: na biologia é representado por um simples membro da população, nos AG's é representado pelo cromossomo e sua aptidão.
- População: na biologia representa um conjunto de indivíduos da mesma espécie que vivem em uma determinada região, nos AG's representa uma matriz formada por vetores contidos no espaço de busca e respectivas aptidões.
- Genótipo: na biologia representa a constituição genética de um indivíduo, nos AG's representa a informação contida no cromossomo.
- Fenótipo: na biologia representa as características determinadas pelo genótipo e pelo meio ambiente, nos AG's representa as características de cada vetor no contexto do problema real.
- Elitismo: consiste na preservação do melhor membro de uma população de uma geração para outra.

- Epistasia: ocorrem quando um valor de gene influencia o valor de outro. Situações com alta Epistasia se tornam de difícil resolução para AG's.

### 2.3.3 Estrutura dos AG's

O processo de otimização, consiste na busca de uma melhor solução para um determinado problema, a partir da tentativa de várias resultados, utilizando as informações das soluções encontradas na busca de outras melhores. Normalmente esta técnica apresenta um espaço de busca (onde estão todas possíveis soluções) e uma função objetiva ou de aptidão (que é utilizada para avaliar as soluções obtidas através de um valor). Em termos matemáticos, a otimização consiste em encontrar uma solução que corresponda a um valor máximo ou mínimo para uma determinada função objetiva.

Divergindo das técnicas convencionais, o algoritmo genético inicia gerando de maneira aleatória uma população inicial, onde cada indivíduo da população é um cromossomo, representando uma possível solução para o problema. Esta população é avaliada e cada cromossomo recebe um nota (aptidão) através da função objetiva. Por meio de uma operação de recombinação (*crossover*) de dois indivíduos (cromossomos) da população atual e/ou pela modificação usando o operador de mutação de um indivíduo também selecionado da população corrente, uma próxima população de novos cromossomos denominados descendentes ou filhos será gerada, mantendo o tamanho da população constante. Os indivíduos mais aptos da população tem maior probabilidade de serem selecionados. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

O algoritmo proposto por Holland, citado por Mota (2007) é conhecido na literatura como *Simple Genetic Algorithm* ou *Standart Genetic Algorithm*, ou simplesmente SGA. Pode-se descrever o algoritmo, sucintamente, em seis passos, (Davis, 1991):

- 1 – inicie uma população de tamanho N com soluções geradas aleatoriamente;
- 2 – avalie a função aptidão para cada solução desta população;
- 3 – selecione cromossomos da população para recombinação e mutação;
- 4 – aplique a recombinação e a mutação nos cromossomos (indivíduos) selecionados, obtendo soluções filhas, mantendo o mesmo numero N de soluções;
- 5 – avalie os novos cromossomos (indivíduos) através da função aptidão, e

6 – se a solução ideal for encontrada ou, um número pré-estabelecido de gerações for desenvolvido, retorne a solução com a melhor aptidão. Caso contrário, volte ao passo 3.

**Tabela 1 – Procedimento do Algoritmo Genético Padrão de Holland**

---

Seja  $S(t)$  a população de cromossomos na geração  $t$ .

$t \rightarrow 0$   
inicializar  $S(t)$   
avaliar  $S(t)$   
enquanto o critério de parada não for satisfeito faça  
 $t \rightarrow t + 1$   
selecionar  $S(t)$  a partir de  $S(t-1)$   
aplicar cruzamento sobre  $S(t)$   
aplicar mutação sobre  $S(t)$   
avaliar  $S(t)$   
fim enquanto

---

### 2.3.4 Seleção

A população inicial é gerada dentro dos limites do espaço de busca, por meio da aleatoriedade.

O processo de seleção natural de Darwin, fundamenta-se no fato de que os melhores indivíduos, aqueles mais aptos, sobrevivem para gerar filhos para a próxima geração. O algoritmo genético é uma versão computacional deste processo, onde os cromossomos são considerados aptos de acordo com o valor de sua função objetiva, que representa uma medida de benefício, onde aqueles que tiveram um alto valor para o benefício estipulado, contribuirão com um ou mais descendentes para a próxima geração. No processo natural, os indivíduos mais aptos, são aqueles mais resistentes a doenças, mais habilidosos para sobreviver situações de risco como escapar de predadores, portanto, com maior capacidade de atingir a fase adulta e consequentemente reproduzirem. No algoritmo genético a sobrevivência do cromossomo será determinada pelo valor de sua função objetiva.

Neste trabalho a população inicial foi gerada dentro dos limites do espaço de busca, por meio da aleatoriedade. Dentre as várias maneiras de escolha dos cromossomos mais apto, a adotada foi a seleção por ordenamento baseada no Elitismo.

No processo de ordenamento os cromossomos são classificados do melhor para o pior, conforme o valor de sua função objetiva. Quando se trata de um problema de maximização os valores da função objetiva se dispõe na ordem decrescente, quando se trata de um problema de minimização, estes valores deverão se apresentar na ordem crescente. O Elitismo, desenvolvido por DeJong (1975), consiste na transferência sem alteração dos melhores cromossomos de uma geração para outra.

O procedimento adotado da seleção por elitismo, consta que para uma população de  $NC$  indivíduos ( $a_1, a_2, \dots, a_{NC}$ ); a função objetiva de cada indivíduo determinará a sua aptidão  $F_{obj}(a_i)$ . Para problemas de maximização o ordenamento será decrescente, para o problema de minimização o ordenamento será crescente. O objetivo é formar uma população de  $p_e \times NC$  indivíduos, onde  $p_e$  é a taxa de elitismo. O restante da população de pais será formada por indivíduos dentre os melhores, de uma maneira aleatória. O objetivo deste procedimento é melhorar o desempenho do algoritmo genético.

### 2.3.5 Configuração dos Parâmetros do AG

Na busca do melhor desempenho para a solução de um problema, os AG's necessitam de dados de entrada, denominados parâmetros. O tempo de processamento, o esforço computacional e a proximidade ou convergência de um dado resultado ótimo são essenciais para se avaliar este desempenho.

#### 2.3.5.1 Representação Binária

O primeiro parâmetro analisado será a representação binária, utilizada neste trabalho, onde Gambale (2000) demonstrou da seguinte forma:

Se  $V$  varia no intervalo de  $\{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$  então pode-se codificá-lo usando a representação binária,  $e = [b_0, \dots, b_l]$ , com  $l$  “bits”, onde  $bin_i \in \{0, 1\}$  de tal forma que:

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (2.44)$$

Se  $V \in \{m, m + 1, \dots, m + 2^l - 1\}$  então pode-se codificar a variável  $V - m$  da mesma forma.

As operações com números binários podem ser entendidas da seguinte forma

#### Representação de um número na base dois

Escrever um número inteiro em binário, isto é, na base dois, não apresenta problema. Cada posição digital representará uma potência de dois, da mesma forma que nos números decimais cada posição, uma potência de dez. Assim, o número 23457 significa:

$$2 \times 10^4 + 3 \times 10^3 + 4 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 7 \times 10^0.$$

Na base dois, a base usada nos computadores binários, o número 1 1 0 1 0 1 representa:

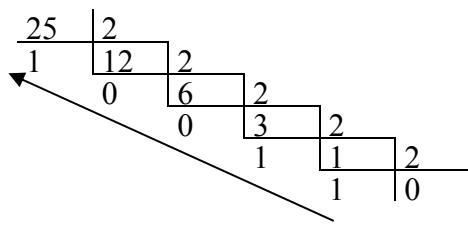
$$1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (53)_{\text{decimal}}$$

### Conversão decimal - binário

A conversão do número inteiro, na base dez para binário, será feita da direita para a esquerda, isto é, determina-se primeiro os algarismos das unidades (o que vai ser multiplicado por  $2^0$ ), em seguida o segundo algarismo da direita (o que vai ser multiplicado por  $2^1$ ), e assim por diante.

O importante é observar se o número é par ou ímpar. Em binário, o número par termina em 0 e o ímpar em 1. Assim, determina-se o algarismo da direita, pela simples divisão do número por 2; se o resto for 0 (número par) o algarismo da direita é 0; se for 1 (número ímpar) o algarismo da direita é 1.

Exemplo, o número 25 pode ser convertido para binário da seguinte forma:



$$25 = 11001$$

A representação binária, além de fácil manuseio também tem um grande valor histórico, pois foi utilizada por Holland (1975) em seus trabalhos iniciais. Apesar da sua análise teórica ser bastante simples, não se obtém resultados precisos quando se trabalha com variáveis contínuas, pois este método precisaria armazenar longos cromossomos na memória. São muitas as técnicas desenvolvidas para a manipulação de binários, já que a linguagem de máquina (computadores) se baseiam em binários.

#### 2.3.5.2 Cruzamento

O processo de cruzamento ou reprodução é o responsável pela troca de parte dos cromossomos dos pais, que irão formar os filhos, sendo tão importante para a evolução das espécies quanto a mutação. No algoritmo genético o cruzamento é representado pela recombinação (*crossover*). Como ocorre a troca de informações genéticas entre dois

indivíduos da população intermediária que irão gerar filhos com características dos pais, este se torna o principal mecanismo de exploração do espaço de busca.

O cruzamento de um ponto, que será adotado neste trabalho, é o operador de recombinação mais tradicional na representação binária. Esta operação consiste em cortar a cadeia de bits dos cromossomos pais em um ponto aleatório, formando duas cabeças e duas caldas. Dois novos cromossomos são formados com a permutação das caldas. O exemplo a seguir mostra como funciona esta operação:

A cada par de cromossomos pais, serão gerados dois cromossomos filhos com uma probabilidade  $p_c$ .

$$pai_1 = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.45)$$

$$pai_2 = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.46)$$

Um número inteiro  $J_x$  é gerado de forma aleatória, variando entre 1 e NB-1, onde NB é o número de bits no cromossomos, separando os pais no posição  $J_x$  de seus strings, produzindo pela troca da segunda parte, os dois filhos  $filho_1$  e  $filho_2$ :

$$filho_1 = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.47)$$

$$filho_2 = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.48)$$

A escolha do ponto de corte  $J_x$  ocorre de forma aleatória, gerando um novo número inteiro para cada par de pais. Quando não ocorre cruzamento os filhos serão iguais aos pais, preservando algumas soluções. Neste trabalho foi utilizado uma probabilidade de cruzamento de 100%.

### 2.3.5.3 Mutação

O operador de mutação é aplicado com uma probabilidade PM, em cada cromossomo filho gerado, após a operação de cruzamento. A mutação ocorre quando alterações normalmente pequenas são feitas num dado cromossomo, onde um ou mais genes

são alterados. Geralmente se usa uma probabilidade pequena de mutação que seja suficiente para assegurar a diversidade, sem prejudicar muito as informações contidas nos cromossomos. O recomendado é que a probabilidade esteja na ordem de 0.5% (LINDEN, 2006).

Neste trabalho se utilizou-se mutação simples, que consiste em inverter de forma aleatória os valores dos bits do genótipo, mudando o valor de um dado bit de 1 para 0 ou de 0 para 1.

O exemplo a seguir da Figura 6 mostra como ocorre:

|        |                           |                         |
|--------|---------------------------|-------------------------|
| Antes  | <i>filho</i> <sub>1</sub> | (010101101001)          |
|        | <i>filho</i> <sub>2</sub> | (111101010000)          |
| Depois | <i>filho</i> <sub>1</sub> | (0 <u>0</u> 101101001)  |
|        | <i>filho</i> <sub>2</sub> | (111101 <u>0</u> 00000) |

**Figura 6 – Mutação simples para representação binária**

A mutação no algoritmo genético é vista mais como um método para se recuperar material perdido, do que uma forma de se encontrar uma melhor solução. Também pode ser encarada como responsável pela introdução de material novo no processo, levando a exploração de diferentes pontos do domínio do problema.

#### 2.3.5.4 Número de Cromossomos (NC)

Quanto maior a população gerada, maior representatividade do espaço de busca terá. Este fato favorece a busca de uma solução ótima, no entanto, surgirão componentes como um maior esforço computacional, consequentemente será necessário mais tempo.

A variação deste parâmetro e a permanência dos demais fixos, possibilita por meio da análise de resultados determinar o tamanho da população que satisfaça o equilíbrio para estas componentes.

### 2.3.5.5 Número de Gerações (NG)

Este parâmetro assim como o citado anteriormente relaciona-se ao favorecimento do resultado com o processamento do maior número de gerações. Da mesma forma do parâmetro anterior, uma maior quantidade de tempo será exigido, consequentemente a análise de sensibilidade dos resultados igual ao caso anterior deve ser adotada.

### 2.3.5.6 Critério de Parada

O critério de parada do processamento do algoritmo genético adotado para os casos estudados neste trabalho, foi para que ele ocorresse quando atingisse o número de gerações pré-determinadas.

### 2.3.5.7 Função Objetiva

As técnicas de otimização consistem na maximização ou minimização de uma função objetiva. Neste trabalho será adotada uma técnica de calibração para uma rede de distribuição de água, utilizando o Método Transiente Inverso em conjunto com um Algoritmo Genético, onde serão medidas as cargas hidráulicas em um, dois e todos os pontos para um determinado intervalo de tempo, afim de que com estes dados se possa identificar parâmetros físicos (rugosidade). A vantagem de se trabalhar com carga hidráulica é analisar o método inverso e facilitar a elaboração da função objetiva.

A identificação deste parâmetro ocorre pela minimização da soma representada pela função erro F:

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (2.49)$$

onde:  $TS$  = duração do transitório,  $NL$  = número de locais de medida na rede,  $H_{i,j}^m$  = carga hidráulica medida,  $H_{i,j}^c$  = carga hidráulica calculada,  $i = 1, 2, \dots, NL$  e  $j = 1, 2, \dots, TS$ .

### 2.3.5.8 Algumas vantagens do Algoritmo Genético

Algumas vantagens do algoritmo genético são citadas por Mota (2007), conforme relação abaixo:

- trabalham com o código dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos;
- funcionam com parâmetros contínuos e discretos ou uma combinação destes;
- realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de pesquisa, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- utilizam informações de custo ou recompensa, não necessitando de derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- facilidade de implementação, sem a necessidade de conhecimento matemático aprofundado do problema;
- otimizam um grande número de variáveis, trabalhando com funções objetivo com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais;
- fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas na identificação de soluções alternativas;
- trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- são modulares e portáteis, no sentido que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro;
- são flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes; e
- são também facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas, podendo realizar naturalmente interface com softwares simuladores a cada iteração.
- Permitem atingir bons resultados simulando um número pequeno de soluções, diante do espaço de busca.

Os Algoritmos Genéticos, apesar de oferecerem muitas vantagens como as citadas acima, são bastante lentos, não sendo eficientes em muitos casos. Sua principal área de atuação, seria para problemas complexos que não fosse conhecido um algoritmo de otimização eficiente, onde houvesse várias variáveis mínimas/máximas de decisão. Basicamente o AG's são recomendados onde a lógica determinística falha ou é impraticável.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Problema Inverso

##### 3.1.1 Definição

Na análise de redes de distribuição de água, seja para qual fim for, como por exemplo a calibração, dois problemas são abordados: o direto e o inverso. No problema direto, mais clássico, se conhece as características da rede, bem como as demandas, e a partir destes dados iniciais se calcula as cargas nos nós e as vazões nos tubos. O problema inverso procede de maneira contrária, onde a partir de cargas conhecidas em um, alguns ou todos os nós se deseja calcular ou estimar algum parâmetro físico da rede. As características da rede no problema inverso são consideradas variáveis. Neste trabalho adotaremos a rugosidade como parâmetro a ser analisado.

Problemas inversos são resolvidos por meio de métodos diretos e indiretos. O método direto consiste em resolver o sistema de equações diferenciais, considerando os parâmetros como variáveis dependentes. No método indireto a resolução é obtida pela variação de parâmetros por meio de um processo iterativo, onde as simulações se repetem até que resultados satisfatórios sejam encontrados. Por ser menos sensível a erros nos dados de entrada e apresentar uma formulação matemática mais simples, este método é o mais utilizado.

Em redes hidráulicas onde as vazões, demandas e pressões em alguns pontos são conhecidas, pode-se calcular as características da rede (rugosidade, diâmetro, fator de atrito, etc.) baseada nestes dados. Para este tipo de problema existem mais de uma solução, sendo necessário acrescentar mais medições de determinadas variáveis (Pudar & Liggett, 1992)

A instabilidade é o problema mais comum na solução do problema inverso, causada pela oscilação da solução provocada pelas variações dos dados de entrada. As cargas hidráulicas podem sofrer alterações devido a mudanças leves nas condições de contorno ou nos parâmetros hidráulicos, tornando esta solução instável. Ressalta-se que o problema inverso pode apresentar mais de uma solução possível, conforme a quantidade de dados de entrada.

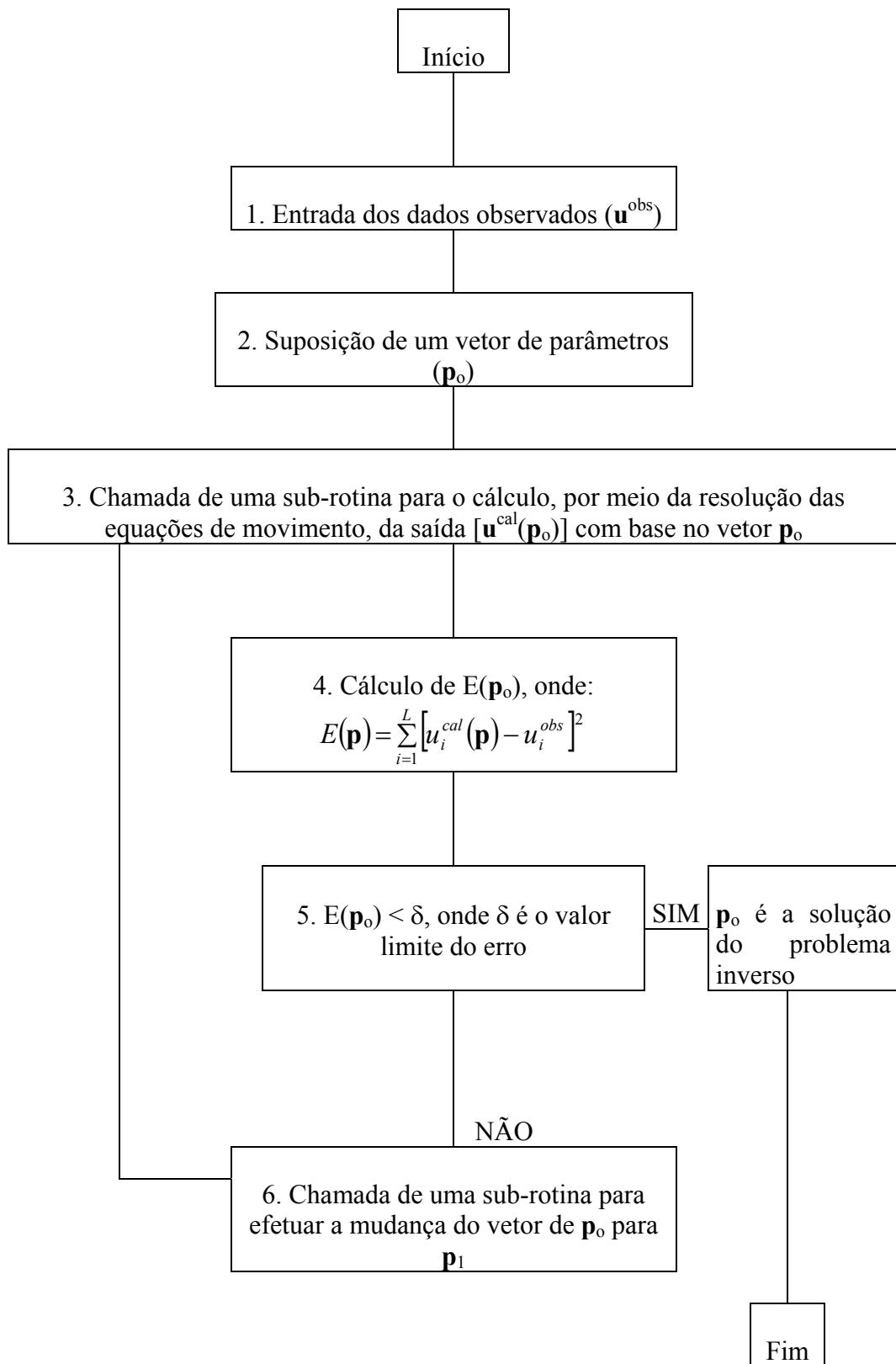
Segundo Pudar e Liggett (1992), os problemas inversos podem ser classificados em:

- exatamente determinado (o número de parâmetros desconhecidos é igual ao número de equações)
- subdeterminado (existem mais incógnitas do que equações)
- sobredeterminado (existem mais medidas de cargas e equações do que incógnitas)

Conforme Neuman (1973) definiu, os métodos de resolução do problema inverso se classificam em diretos e indiretos. A aproximação direta minimiza os erros gerados na resolução das equações, procedendo de forma não iterativa. No método indireto, utilizado neste estudo, a minimização do erro residual existente entre os dados observados e os dados estimados, ocorrem de maneira iterativa.

Segundo Sun (1994) o método indireto visa retirar a participação humana na escolha da decisão final. Este método seria um procedimento de tentativa e erro que por meio de um processo iterativo procura melhorar a resposta do modelo, de forma que ela esteja suficientemente próxima ao sistema real, através do aperfeiçoamento de uma estimativa existente dos parâmetros. O método baseia-se na minimização entre a diferença dos dados observados e calculados, para o qual será definida uma função objetiva. Após uma estimativa inicial dos parâmetros, uma simulação completa deve ser realizada, onde o resultado calculado deve ser comparado com o resultado medido no sistema real. Caso os resultados estejam próximos, obedecendo um critério de comportamento de acordo com a função objetivo, o processo é finalizado e o conjunto atual de parâmetros estimados será adotado. No entanto, se os resultados não estiverem suficientemente próximos, um conjunto corrigido de parâmetros em uma nova simulação será utilizado, e o processo continua iterativamente.

Carrera e Neuman (1986a) salientam que a solução indireta conduz a melhores soluções do problema inverso, já que conseguem filtrar partes dos ruídos dos dados de carga hidráulica devido ao uso do método de mínimos quadrados ou similares. O fluxograma do método indireto é apresentado na Figura 7.



**Figura 7 - Fluxograma do método indireto.**  
Fonte: SUN (1994)

### 3.1.2 Formulação do Problema

Neste trabalho abordaremos o seguinte problema inverso: a partir de medidas das cargas hidráulicas transientes observadas em um, dois e todos os nós de uma rede hidráulica; ajustaremos estes valores observados das cargas com outros calculados, de forma a resultar uma relação ótima capaz de fornecer valores para a rugosidade. Alguns parâmetros do algoritmo genético, serão alterados e avaliados. Estes dados serão gerados para uma manobra brusca de redução de demanda (10 s), onde o pior caso encontrado e os três melhores, passarão por uma manobra suave (40 s). Os dados destas quatro simulações, bem como todas efetuadas, serão analisadas conforme o método indireto de resolução do problema inverso. A eficiência de cada resolução será analisada pela minimização da diferença quadrática entre as cargas medidas e calculadas será avaliada conforme a seguinte equação:

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (3.1)$$

onde:  $TS$  = duração do transiente;  $NL$  = número de locais de medida na rede;  $H_{i,j}^m$  = carga medida;  $H_{i,j}^c$  = carga calculada;  $i = 1, 2, \dots, NL$ ; e  $j = 1, 2, \dots, TS$ .

### 3.1.3 Resolução

No presente trabalho dados observados foram pré-determinados. Assim, consideraremos valores para o parâmetro físico, rugosidade, aos quais a partir deles obteremos cargas hidráulicas transientes que serão ditas como reais ou observadas em campo. O método inverso será usado para identificar estas rugosidades que serão consideradas desconhecidas, sendo objeto de busca da calibração. Somente após a calibração, os parâmetros estimados ou calculados serão comparados com os parâmetros observados ou reais.

A variação da demanda causada por uma redução do consumo, causará o fenômeno transitório em um dos nós da rede de distribuição de água, que produzirão as cargas hidráulicas transientes. A fim de se encontrar uma melhor eficiência da calibração das rugosidades das tubulações, casos serão simulados a partir de alterações nos seguintes parâmetros do algoritmo genético: número de cromossomos, número de gerações, tempo de transiente e percentual de mutação. Será considerada a combinação do melhor resultado encontrado, que passará pelo mesmo procedimento, adotando-se desta vez o transiente para

dois nós e para todos os nós. Todos estes casos analisados serão para uma busca variação de demanda. De posse do pior resultado e dos três melhores encontrados até então, serão simulados novos casos, considerando agora uma manobra suave. A comparação entre os resultados permitirá analisar a influência dos parâmetros do algoritmo genético, da quantidade de nós monitorados, e do tipo de manobra na calibração das rugosidades das tubulações de uma rede de distribuição de água. A fim de se ampliar a exploração de espaço de busca, serão criados em todos os casos simulados, dez sementes ou populações. Isto implica em dizer que, para cada combinação de parâmetros analisada, resultarão dez conjuntos de respectivas rugosidades das tubulações da rede, cuja média será considerada como resultado da simulação.

As vazões nos tubos e a carga nos nós durante o estado permanente são condições iniciais para o funcionamento dos modelos transitentes. Em um problema de calibração através de dados observados via transiente, somente as cargas hidráulicas no nó ou nos nós de medida são conhecidas, enquanto nos demais nós e tubos as condições reais de regime permanente são desconhecidas. Daí a necessidade de se estabelecer uma estimativa inicial de vazões nos tubos e cargas nos nós em estado permanente. Para o cálculo de cargas e vazões de uma rede em estado permanente, pode-se usar simuladores computacionais como do EPANET 2.0. Neste trabalho o critério de inicialização adotado será a escolha da rugosidade como parâmetro de calibração para os tubos da rede. Um modelo hidráulico transiente será empregado para calcular as vazões e as cargas permanentes, utilizando o método das características.

### 3.2 Identificação das Rugosidades

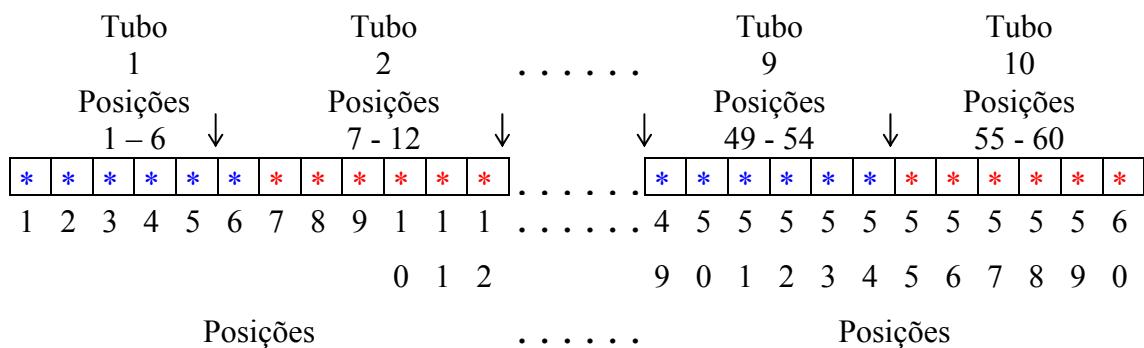
O fator de atrito de Darcy-Weisbach é geralmente considerado como um parâmetro constante na maioria dos modelos hidráulicos. No entanto, durante um regime não-permanente, onde as vazões sofrem alterações em decorrer do tempo, o fator de atrito tende a sofrer modificações também. Isto ocorre pelo fato do fator de atrito depender tanto da vazão, por meio do Número de Reynolds, como da rugosidade relativa ( $\epsilon / D$ ). Esta relação pode ser observada pela equação de Swamee (1993):

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{\text{Re}} \right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{\text{Re}} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (3.2)$$

onde:  $\epsilon$  [L] é a rugosidade absoluta;  $D$  [L] é o diâmetro do tubo;  $Re$  é o número de Reynolds  $[4Q/(\pi D \nu)]$ ;  $\nu$  [L]<sup>2</sup>[T]<sup>-1</sup> é a viscosidade cinemática do fluido.

A identificação das rugosidades serão abordadas como parâmetros a serem calibrados, uma vez que para cada valor da vazão corresponderá um número de Reynolds que resultará em um fator de atrito correspondente.

Neste trabalho será utilizado o método transiente inverso aplicando o algoritmo genético para a calibração da rugosidade. Será adotada uma representação binária. A rugosidade de cada tubo será codificada para um número binário de seis dígitos, que formará um grupo de dez tubos com sessenta posições conforme Figura 8:



**Figura 8 – cadeia binária na representação das rugosidades.**

As rugosidades tratadas neste estudo foram codificadas como discretas, onde o espaço de busca para sua identificação baseou-se na Tabela 2, que relaciona os valores decimais e binários:

**Tabela 2 – Relação entre valores decimais e binários para rugosidade.**

| Número | Número Binário | Rugosidade (mm) |
|--------|----------------|-----------------|
| 0      | 0 0 0 0 0 0    | 0.0015          |
| 1      | 0 0 0 0 0 1    | 0.005           |
| 2      | 0 0 0 0 1 0    | 0.025           |
| 3      | 0 0 0 0 1 1    | 0.04            |
| 4      | 0 0 0 1 0 0    | 0.045           |
| 5      | 0 0 0 1 0 1    | 0.05            |
| 6      | 0 0 0 1 1 0    | 0.06            |
| 7      | 0 0 0 1 1 1    | 0.07            |
| 8      | 0 0 1 0 0 0    | 0.08            |
| 9      | 0 0 1 0 0 1    | 0.09            |
| 10     | 0 0 1 0 1 0    | 0.10            |
| 11     | 0 0 1 0 1 1    | 0.11            |
| 12     | 0 0 1 1 0 0    | 0.12            |
| 13     | 0 0 1 1 0 1    | 0.13            |
| 14     | 0 0 1 1 1 0    | 0.14            |
| •      | • • • • • •    | •               |
| •      | • • • • • •    | •               |
| •      | • • • • • •    | •               |
| 59     | 1 1 1 0 1 1    | 0.59            |
| 60     | 1 1 1 1 0 0    | 0.60            |
| 61     | 1 1 1 1 0 1    | 0.61            |
| 62     | 1 1 1 1 1 0    | 1.0             |
| 63     | 1 1 1 1 1 1    | 2.0             |

### 3.3 Avaliação da Calibração

No processo de calibração da rede estudada, serão criadas dez sementes pelo algoritmo genético, ou seja, para cada caso de determinados parâmetros simulados, dez populações serão criadas e testadas simultaneamente. Serão considerados como resultados estimados ou calculados para cada tubo, a média das respectivas rugosidades encontradas nas sementes de cada tubo. Veja a expressão a seguir:

$$\mathcal{E}_i^{\text{estimado}} = \frac{\sum_{\text{semente}=1}^{10} \mathcal{E}_i^{\text{semente}}}{10} \quad (3.3)$$

onde:  $\varepsilon_i^{estimado}$  = representa o parâmetro rugosidade estimado ou calculado de um determinado tubo  $i$ ,  $\varepsilon_i^{semente}$  = representa o parâmetro rugosidade da semente (varia de um a dez) gerada para um determinado tubo  $i$  ( $i$ = número do tubo).

Após o processo de simulação, os resultados encontrados para as rugosidades dos tubos terão sua eficiência avaliada pelo valor encontrado para o Erro Médio Relativo (EMR). Estes valores serão calculados conforme a equação a seguir:

$$EMR(\%) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{|\varepsilon_i^{real} - \varepsilon_i^{estimado}|}{\varepsilon_i^{real}} \times 100 \right] \quad (3.4)$$

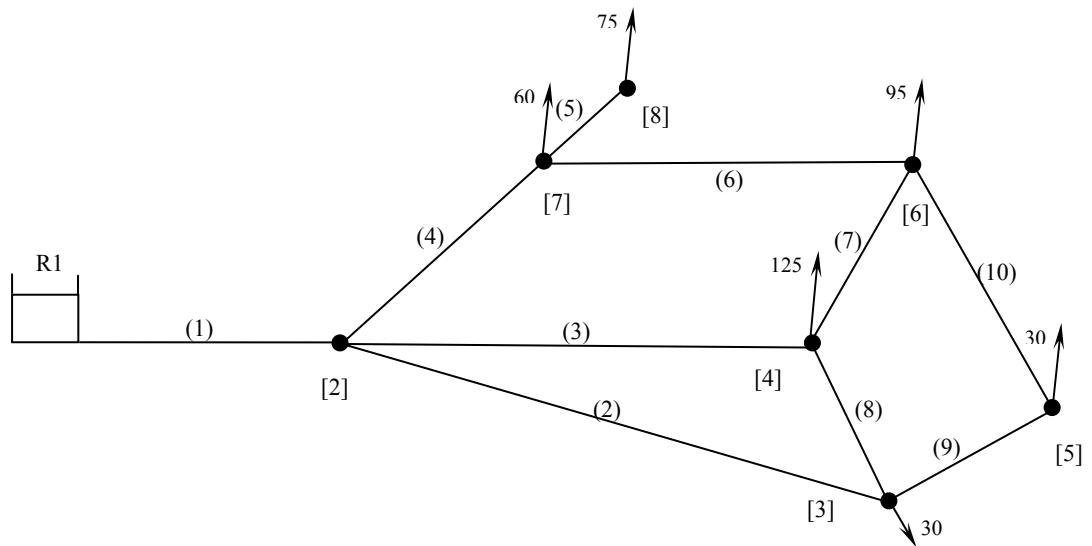
onde:  $\varepsilon$  = representa o parâmetro rugosidade a ser identificado,  $i$  = número do tubo e  $n$  = número total de tubos na rede.

### 3.4 Procedimentos metodológicos

Para a realização das simulações foram utilizados dois programas desenvolvidos por Araújo (2003), onde o primeiro calcula o transiente pelo Método das Características e o segundo gera resultados para a calibração da rugosidade, via algoritmo genético, trabalhando em conjunto com o primeiro programa. Sendo assim, é possível para cada avaliação da função objetiva, o cálculo do transiente da rede e uma auto-correção das condições do estado permanente.

A rede exemplo, Figura 9, foi adaptado do exemplo criado por Walski (1983) para aplicação de sua técnica, posteriormente utilizado por Gambale (2000) e Silva (2006). Nesses casos as calibrações foram realizadas considerando o estado permanente. Neste trabalho usaremos o método transiente inverso e o Algoritmo Genético para identificação não só das rugosidades absolutas previamente determinadas a partir de características físicas conhecidas e corretas, denominadas aqui por reais (ou observadas), mas também para a obtenção dos valores das rugosidades após a calibração, aqui denominadas estimadas (ou calculadas). O indicador básico de eficiência do procedimento da calibração será o Erro Médio Relativo (EMR), entre as rugosidades reais e estimadas. A rede contém 10 tubos, 1 reservatório, 1 nó comum (nó 2) e 6 nós de demandas conforme Figura 9. O reservatório terá cota da linha

piezométrica de 60 m, os nós estarão na mesma cota topográfica (elevação igual a zero). As demandas (litro por segundo) dos nós, será de acordo com a Figura 9.



Legenda:

( ) n° do tubo  
[ ] n° do nó



Demanda

**Figura 9 – Rede Exemplo**

Todas as variáveis do problema, tais como: topografia, diâmetro (D), comprimento (L) e rugosidade das tubulações ( $\varepsilon$ ), demandas nodais e nível do reservatório que abastece o sistema da rede de abastecimento de água estudada, serão conhecidas. As características físicas da rede estão apresentadas na Tabela 3, a seguir:

**Tabela 3 – características físicas dos tubos da rede hipotética.**

| Tubo | D (m) | L (m) | $\varepsilon$ (mm) | $a$ (m/s) | $n_i$ | $a_i$ (m/s) | $\Delta t$ (s) |
|------|-------|-------|--------------------|-----------|-------|-------------|----------------|
| 1    | 500   | 700   | 0.04               | 5832.1    | 5     | 1400        | 0.1            |
| 2    | 250   | 1800  | 0.3                | 1899.3    | 12    | 1500        | 0.1            |
| 3    | 400   | 1520  | 0.1                | 4284.8    | 10    | 1520        | 0.1            |
| 4    | 300   | 1220  | 0.05               | 7195.1    | 8     | 1525        | 0.1            |
| 5    | 300   | 600   | 0.5                | 4016.1    | 4     | 1500        | 0.1            |
| 6    | 200   | 1220  | 0.3                | 3860.5    | 8     | 1525        | 0.1            |
| 7    | 250   | 920   | 0.2                | 5776.8    | 6     | 1533.3      | 0.1            |
| 8    | 150   | 300   | 0.25               | 9376.1    | 2     | 1500        | 0.1            |
| 9    | 200   | 600   | 0.55               | 5021.0    | 4     | 1500        | 0.1            |
| 10   | 100   | 1220  | 0.6                | 3421.9    | 8     | 1525        | 0.1            |

Os valores apresentados na Tabela 3 para  $a$  (celeridade) nos tubos, não atendem a exigência de que o mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$  seja usado para todos os condutos a fim de que as condições de contorno para junções possam ser usadas. Para evitar interpolações no cálculo de  $\Delta t$ , a seguinte equação (Chaudhry, 1987) deve ser adotada:

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N) \quad (3.5)$$

onde  $n_i$  é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o  $i$ -ésimo conduto é dividido;  $L_i$  é o comprimento do  $i$ -ésimo conduto;  $a_i$  é a celeridade do  $i$ -ésimo conduto e  $N$  é o número de tubos no sistema. Como a celeridade não é conhecida de forma precisa, aceita-se ajustes menores nos seus valores. Para os casos da Tabela 3, foram ajustados para  $a_j$ .

As condições iniciais do modelo permanente, vazão das tubulações e cargas dos nós, equivalentes as rugosidades consideradas reais ou observadas foram determinadas através do modelo computacional que calcula o transiente pelo método das características. Para a rede estudada, foram encontrados os seguintes dados:

**Tabela 4 – Vazões iniciais para condições permanentes consideradas reais.**

| Tubo | $Q_{\text{inicial}}(\text{m}^3/\text{s})$ |
|------|---|
| 1    | 0.413035                                  |
| 2    | 0.052908                                  |
| 3    | 0.209243                                  |
| 4    | 0.152932                                  |
| 5    | 0.075005                                  |
| 6    | 0.017913                                  |
| 7    | 0.074106                                  |
| 8    | 0.010102                                  |
| 9    | 0.033000                                  |
| 10   | 0.002992                                  |

**Tabela 5 – Cargas hidráulicas iniciais para condições permanentes consideradas reais.**

| Nó | $H_0(\text{m})$ |
|----|-----------------|
| 1  | 60.00           |
| 2  | 54.34           |
| 3  | 45.22           |
| 4  | 49.14           |
| 5  | 40.89           |
| 6  | 37.74           |
| 7  | 40.10           |
| 8  | 37.38           |

De posse destes dados, um modelo hidráulico que usa o método das características foi utilizado para calcular as cargas transientes para o(s) nó(s) monitorado(s). Inicialmente foi considerada uma variação brusca, variações estas nas demandas do(s) no(s) nó(s) monitorado(s) duraram 10 s, com intervalo de tempo (DT) de 0.1 segundos. Estes resultados serão considerados reais ou observados, e utilizados pela função objetiva para calcular a eficiência de cada solução gerada, comparando com as respectivas cargas hidráulicas transientes, a partir de alterações dos parâmetros do algoritmo genético conforme relacionadas abaixo:

Primeiramente foi considerado variações no número de gerações (NG), número de cromossomos (NC) e probabilidade de mutação (PM) – Tabela 6, totalizando 36 casos. Para esta primeira análise será considerado um tempo de 10s do transiente, sendo o nó monitorado (NM) 5 .

**Tabela 6 – Parâmetros alterados para fase 1.**

| Parâmetro                       | Valores Adotados      |
|---------------------------------|-----------------------|
| NG                              | 10 – 20 – 40 – 80     |
| NC                              | 10 – 50 – 100         |
| PM                              | 0.0005 – 0.005 – 0.05 |
| Número de combinações possíveis | <b>4 x 3 x 3 = 36</b> |

Para a rede contendo dez condutos e sessenta e quatro variações de rugosidade para cada conduto, leva a uma busca determinística envolvendo  $64^{10}$  simulações. A fase 1 explorará 73 332 simulações, sendo esta uma representação mínima do espaço de busca.

Será considerado o conjunto de parâmetros que apresentar o menor Erro Médio Relativo (EMR) para nova análise onde sofrerá variações no tempo para o transiente (TS) e para o número de locais de medida da rede (NL), conforme Tabela 7:

**Tabela 7 – Parâmetros alterados para fase 2.**

| Parâmetro                             | Valores Adotados           |
|---------------------------------------|----------------------------|
| TS :Tempo do transiente (s)           | 10 – 20 – 40               |
| NL:Número de locais de medida da rede | 1 – 2 – 8 (todos)          |
| Número de combinações possíveis       | $3 \times 3 = 9 - 1 = 8^*$ |

\* Uma das simulações já foi contemplado na fase anterior

Tanto para a primeira análise como para a segunda, foram consideradas:

- Representação binária
- Um percentual de cruzamento de 100%, onde a recombinação dos cromossomos ocorre de dois a dois, pelo método de cruzamento de um ponto.
- A taxa de elitismo adotada será de 50%.
- A mutação adotada será a simples, única adequada a representação binária.
- Para cada caso simulado, dez sementes serão criadas, ou seja, dez populações serão criadas pelo programa, gerando no final dez soluções. A solução para a rugosidade dos tubos de cada caso será a média dos valores encontrados para cada semente.

## 4. RESULTADOS

Os resultados das simulações previstas dos procedimentos metodológicos, serão apresentados no formato de tabelas e gráficos, sendo brevemente comentados ao longo deste capítulo. A seguir a Tabela 8 mostra os resultados (EMR) dos casos simulados para a primeira fase:

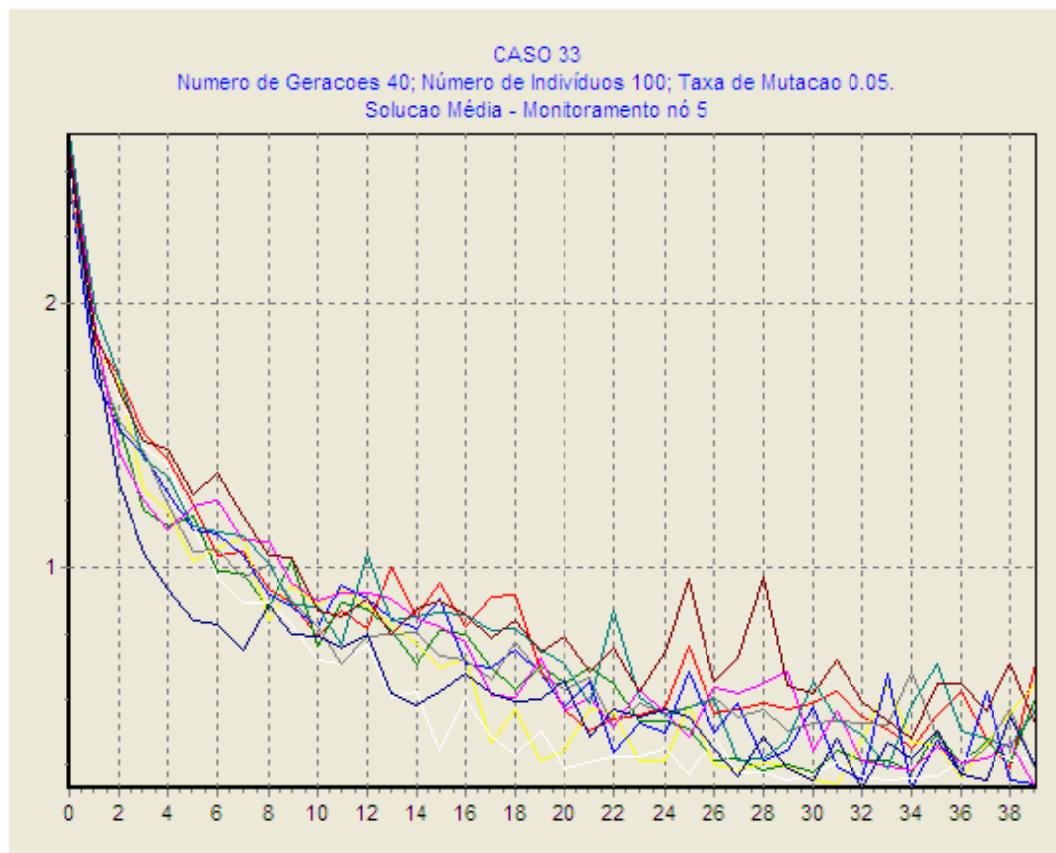
**Tabela 8 – Resultados dos casos para a fase 1**

|         | FASE 1 |        |     |    |    |     |    |        |
|---------|--------|--------|-----|----|----|-----|----|--------|
|         | PC (%) | PM     | DT  | TS | NG | NC  | NM | EMR(%) |
| CASO 01 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 10 | 10  | 5  | 73.2   |
| CASO 02 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 10 | 50  | 5  | 64     |
| CASO 03 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 10 | 100 | 5  | 54.6   |
| CASO 04 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 20 | 10  | 5  | 65.9   |
| CASO 05 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 20 | 50  | 5  | 74     |
| CASO 06 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 20 | 100 | 5  | 51.77  |
| CASO 07 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 40 | 10  | 5  | 90.8   |
| CASO 08 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 40 | 50  | 5  | 112.5  |
| CASO 09 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 40 | 100 | 5  | 73.7   |
| CASO 10 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 80 | 10  | 5  | 89.1   |
| CASO 11 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 80 | 50  | 5  | 89.9   |
| CASO 12 | 100    | 0.0005 | 0.1 | 10 | 80 | 100 | 5  | 57.9   |
| CASO 13 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 10 | 10  | 5  | 112.6  |
| CASO 14 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 10 | 50  | 5  | 59.2   |
| CASO 15 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 10 | 100 | 5  | 36.75  |
| CASO 16 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 20 | 10  | 5  | 82     |
| CASO 17 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 20 | 50  | 5  | 63.7   |
| CASO 18 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 20 | 100 | 5  | 72     |
| CASO 19 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 40 | 10  | 5  | 76.5   |
| CASO 20 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 40 | 50  | 5  | 61.2   |
| CASO 21 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 40 | 100 | 5  | 57.5   |
| CASO 22 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 80 | 10  | 5  | 86.1   |
| CASO 23 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 80 | 50  | 5  | 61.2   |
| CASO 24 | 100    | 0.005  | 0.1 | 10 | 80 | 100 | 5  | 82.9   |
| CASO 25 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 10 | 10  | 5  | 68.6   |
| CASO 26 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 10 | 50  | 5  | 80     |
| CASO 27 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 10 | 100 | 5  | 65.2   |
| CASO 28 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 20 | 10  | 5  | 104.3  |
| CASO 29 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 20 | 50  | 5  | 59     |
| CASO 30 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 20 | 100 | 5  | 58.1   |
| CASO 31 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 40 | 10  | 5  | 56.3   |
| CASO 32 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 40 | 50  | 5  | 71.2   |
| CASO 33 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 40 | 100 | 5  | 34.6   |
| CASO 34 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 80 | 10  | 5  | 60.9   |
| CASO 35 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 80 | 50  | 5  | 58.9   |
| CASO 36 | 100    | 0.05   | 0.1 | 10 | 80 | 100 | 5  | 64.1   |

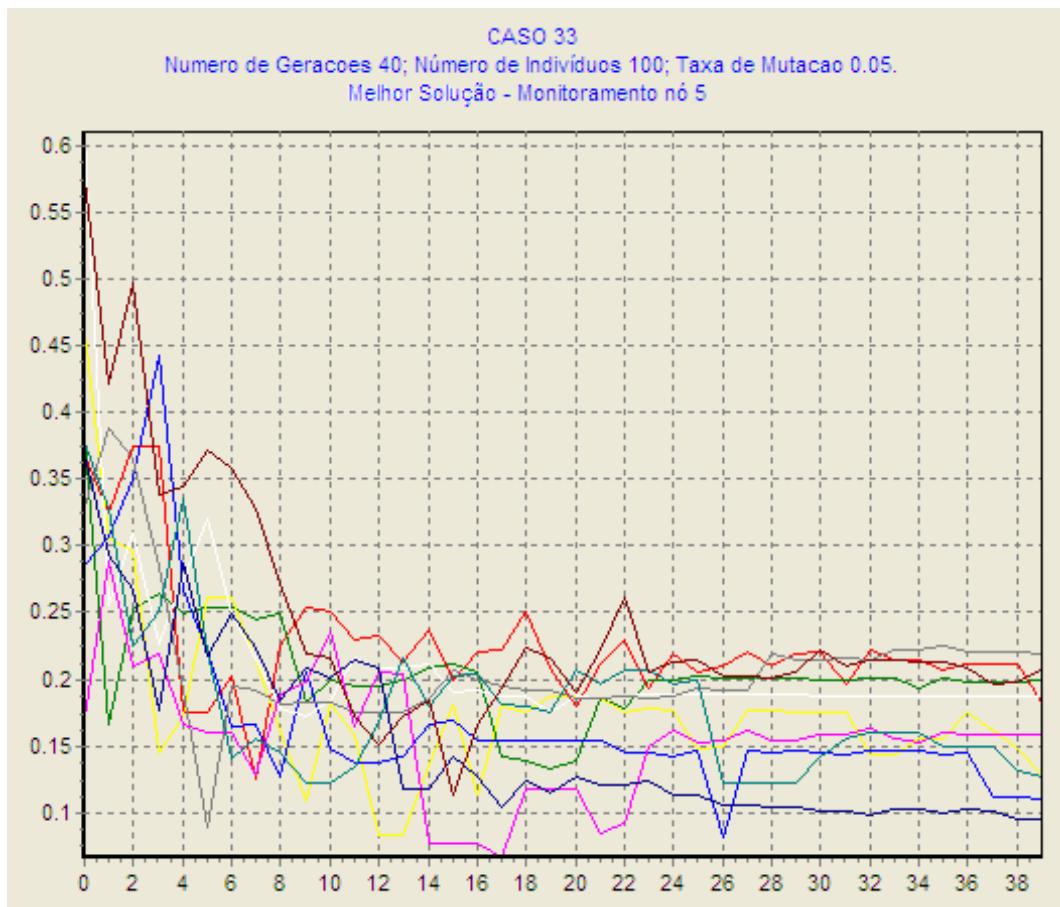
O melhor resultado, observado foi no caso 33, onde os parâmetros variados e utilizados pelo algoritmo genético foram os seguintes:

- PM=0.05
- NG=40
- NC=100

A convergência do método é ilustrada na Figura 10 e Figura 11, mostrando o comportamento da função objetivo (média e melhor valor) para o caso 33. De maneira geral o valor da função objetivo de cada semente simulada tende a melhorar ao longo das gerações até atingir certa estabilidade.



**Figura 10 – Média dos valores da função objetivo do melhor caso (caso 33).**



**Figura 11 – Melhor solução da função objetivo do melhor caso (caso 33).**

Os demais casos apresentaram comportamento similar apontando de forma geral para a convergência do método.

Apesar de serem adequados para esta condição hidráulica, o caso 33 apresenta valores que podem ser utilizados como valores iniciais para análise de outras redes com o mesmo perfil hidráulico.

Com os parâmetros observados para o melhor resultado da fase 1, prossegue a fase 2, onde os parâmetros a serem variados serão: tempo de transiente (TS) e nó monitorado (NM), conforme citado anteriormente. Os resultados obtidos foram de acordo com a Tabela 9 abaixo:

**Tabela 9 – Resultados dos casos para a fase 2**

|                | FASE 2     |             |            |           |           |            |              |             |
|----------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|--------------|-------------|
|                | PC (%)     | PM          | DT         | TS        | NG        | NC         | NM           | EMR(%)      |
| CASO 37        | 100        | 0.05        | 0.1        | 20        | 40        | 100        | 5            | 54.7        |
| CASO 38        | 100        | 0.05        | 0.1        | 40        | 40        | 100        | 5            | 29.1        |
| CASO 39        | 100        | 0.05        | 0.1        | 10        | 40        | 100        | 5 e 8        | 26.8        |
| CASO 40        | 100        | 0.05        | 0.1        | 20        | 40        | 100        | 5 e 8        | 23.5        |
| CASO 41        | 100        | 0.05        | 0.1        | 40        | 40        | 100        | 5 e 8        | 22.4        |
| CASO 42        | 100        | 0.05        | 0.1        | 10        | 40        | 100        | TODOS        | 23.2        |
| CASO 43        | 100        | 0.05        | 0.1        | 20        | 40        | 100        | TODOS        | 21.3        |
| <b>CASO 44</b> | <b>100</b> | <b>0.05</b> | <b>0.1</b> | <b>40</b> | <b>40</b> | <b>100</b> | <b>TODOS</b> | <b>20.9</b> |

A melhor solução pelo critério de minimização do EMR, foi o caso 44. A seguir serão mostrados de forma detalhada para o caso 33 da fase 1 e para os casos 37 a 44 da fase 2: os gráficos das variações das cargas transientes observadas ou reais, em relação as cargas transientes calculadas ou estimadas; e o cálculo do EMR entre as rugosidades reais (ou observadas) dos tubos e as estimadas (ou calculadas). O que pode ser observado através dos gráficos da variação das cargas transientes observadas e calculado nos nós, é que apesar de estarem bem próximos, combinações diferentes de rugosidades para os casos foram apresentados. Estas situações foram melhorando conforme o aumento do número de nós monitorados, como pode ser observado nos gráficos a seguir.

O Apêndice A, mostra os resultados detalhados das rugosidades de cada caso acima mencionado.

### CASO 33

A Tabela 10 mostra a melhor combinação de rugosidades encontradas para cada semente gerada, com funções objetivas, tempo da simulação e geração ótima de cada semente:

**Tabela 10 – Resultados da rugosidade (mm) por semente simulada (Caso33).**

| Tubo      | Semente |         |        |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1       | 2       | 3      | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0050  | 0.0900  | 0.0400 | 0.0050  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0400  | 0.0500  | 0.0600  | 0.1200  |
| 2         | 0.0900  | 0.3900  | 0.2600 | 0.2700  | 0.3100  | 0.2700  | 0.5400  | 0.1800  | 0.4300  | 0.2200  |
| 3         | 0.2700  | 0.0250  | 0.1000 | 0.2000  | 0.1400  | 0.1300  | 0.0700  | 0.1600  | 0.1000  | 0.0400  |
| 4         | 0.0800  | 0.2900  | 0.1000 | 0.0600  | 0.0600  | 0.0015  | 0.0050  | 0.0250  | 0.0250  | 0.2300  |
| 5         | 0.6000  | 0.4600  | 0.5800 | 0.3600  | 0.5100  | 0.4300  | 0.5200  | 0.3400  | 0.4900  | 0.5300  |
| 6         | 0.0015  | 0.3800  | 0.1400 | 0.1300  | 0.3800  | 0.6000  | 0.1700  | 0.0050  | 0.0500  | 0.2300  |
| 7         | 0.3100  | 0.0900  | 1.0000 | 0.3100  | 0.3000  | 0.3600  | 0.2000  | 0.4600  | 0.4300  | 0.5100  |
| 8         | 0.1700  | 0.5800  | 0.3300 | 0.3600  | 0.3700  | 0.2800  | 0.5500  | 0.0900  | 0.0500  | 0.5600  |
| 9         | 0.5800  | 0.1900  | 0.4500 | 0.4500  | 0.2600  | 0.6100  | 0.4200  | 0.4800  | 0.3700  | 0.2500  |
| 10        | 0.5800  | 0.5100  | 0.3300 | 0.5100  | 0.5600  | 0.5300  | 0.2600  | 0.3000  | 0.5800  | 0.3400  |
| Fobj      | 0.12482 | 0.13346 | 0.0834 | 0.08193 | 0.17212 | 0.08903 | 0.06645 | 0.12184 | 0.09468 | 0.11326 |
| Geração   | 8       | 20      | 13     | 27      | 10      | 6       | 18      | 27      | 39      | 16      |
| Tempo (s) | 529.62  | 526.98  | 606.69 | 620.16  | 526.2   | 531.55  | 598.64  | 555.53  | 561.22  | 544.45  |

A seguir a Tabela 11, que apresenta as rugosidades reais e as estimadas (ou calculadas), determinadas a partir da média das rugosidades de cada semente para respectiva tubulação.

**Tabela 11 – Resultados da rugosidade média estimada (Caso 33).**

| $\varepsilon_{\text{real}}$ (mm) | $\varepsilon_{\text{estimado}}$ (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------|-------------|
| 0.04000                          | 0.0515                               | 0.0115 | 28.8        |
| 0.30000                          | 0.2960                               | 0.0040 | 1.3         |
| 0.10000                          | 0.1235                               | 0.0235 | 23.5        |
| 0.05000                          | 0.0877                               | 0.0377 | 75.3        |
| 0.50000                          | 0.4820                               | 0.0180 | 3.6         |
| 0.30000                          | 0.2087                               | 0.0914 | 30.5        |
| 0.20000                          | 0.3970                               | 0.1970 | 98.5        |
| 0.25000                          | 0.3340                               | 0.0840 | 33.6        |
| 0.55000                          | 0.4060                               | 0.1440 | 26.2        |
| 0.60000                          | 0.4500                               | 0.1500 | 25.0        |
| <b>EMR (%)</b>                   |                                      |        | <b>34.6</b> |

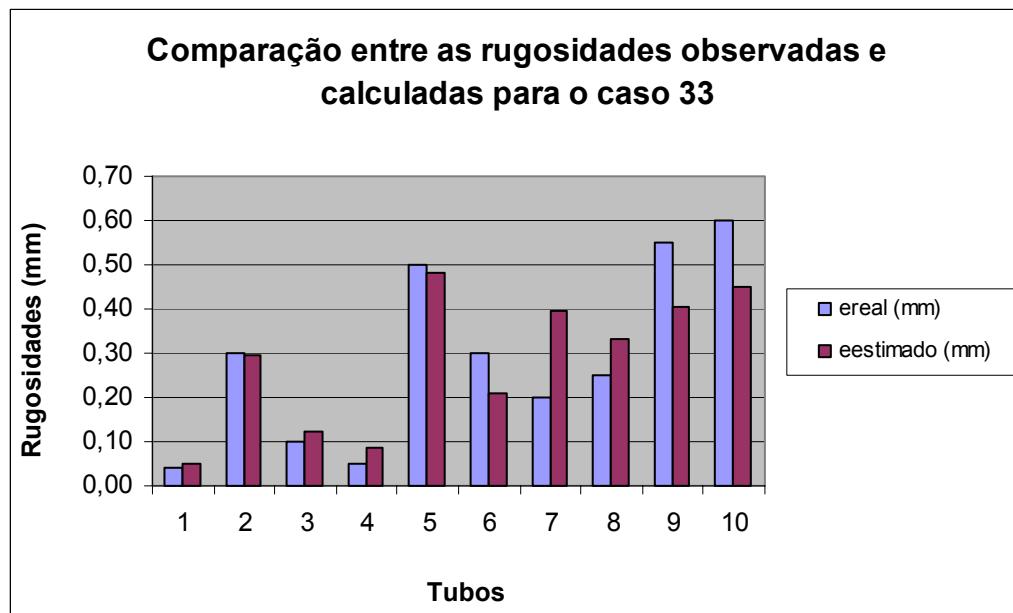


Figura 12 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 33

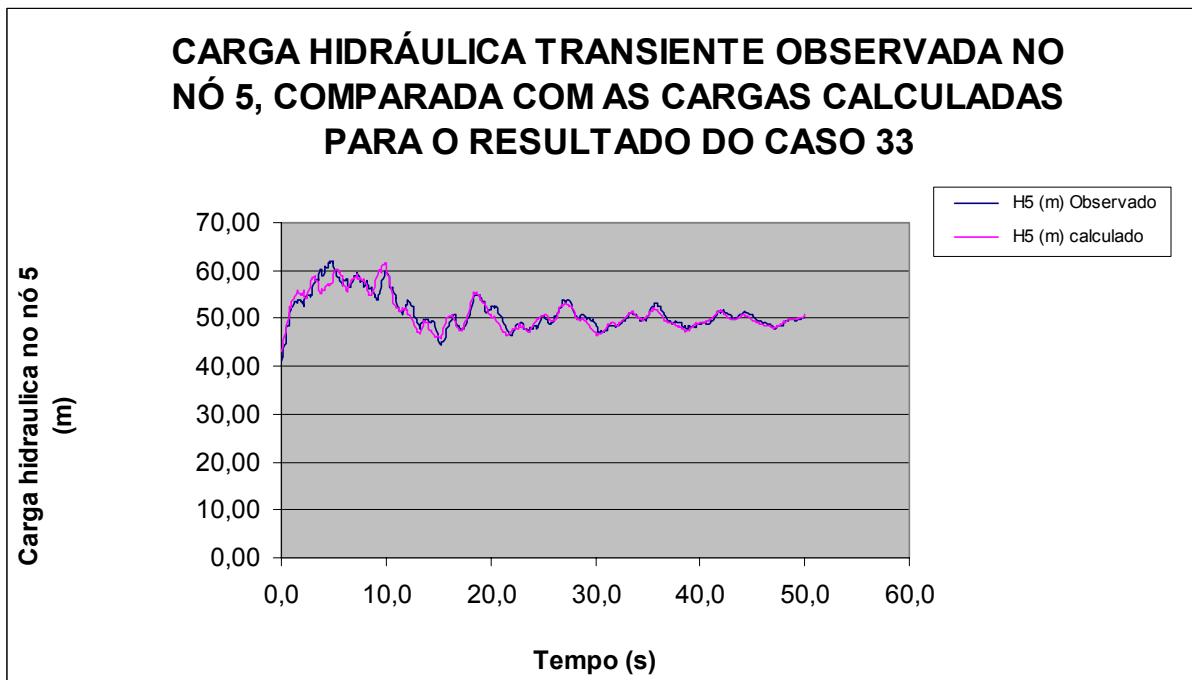


Figura 13 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 33).

### CASO 37

A Tabela 12 mostra a melhor combinação de rugosidades encontradas para cada semente gerada, com funções objetivas, tempo da simulação e geração ótima de cada semente:

**Tabela 12 – Resultados da rugosidade (mm) por semente simulada (Caso37).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0450  | 0.0800  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0450  | 0.0500  | 0.0250  | 0.0050  | 0.2100  |
| 2         | 0.5300   | 0.1000  | 0.1400  | 0.4400  | 0.1300  | 0.3000  | 0.5000  | 0.2000  | 0.4100  | 0.2300  |
| 3         | 0.0250   | 0.3600  | 0.1000  | 0.0700  | 0.2800  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1500  | 0.1100  | 0.0050  |
| 4         | 0.0800   | 0.0250  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0700  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1100  | 0.0700  | 0.0250  |
| 5         | 0.3800   | 0.5100  | 0.6000  | 0.5200  | 0.4000  | 0.3800  | 0.5800  | 0.0450  | 0.0500  | 0.4600  |
| 6         | 0.2800   | 0.2300  | 0.3400  | 0.3800  | 0.2900  | 0.5800  | 0.0600  | 0.5100  | 0.6000  | 0.5400  |
| 7         | 0.0050   | 0.5000  | 0.0050  | 0.3300  | 0.1200  | 0.2000  | 0.0050  | 0.0250  | 0.4300  | 0.5900  |
| 8         | 0.1600   | 0.5100  | 0.3000  | 0.3700  | 0.0250  | 0.5300  | 0.3900  | 0.3500  | 0.3600  | 0.4900  |
| 9         | 0.5400   | 0.0900  | 0.5900  | 0.2600  | 0.2300  | 0.5100  | 0.3100  | 0.2800  | 0.3800  | 0.2400  |
| 10        | 0.4800   | 0.6000  | 0.5500  | 0.3700  | 0.3300  | 0.5900  | 0.2800  | 0.1700  | 0.2400  | 0.0250  |
| Fobj      | 0.10671  | 0.20636 | 0.14349 | 0.13669 | 0.22014 | 0.12012 | 0.09921 | 0.17675 | 0.15921 | 0.27182 |
| Geração   | 23       | 37      | 40      | 13      | 12      | 18      | 34      | 9       | 8       | 12      |
| Tempo (s) | 555.08   | 570.5   | 564.84  | 626.03  | 557.69  | 565.66  | 556.83  | 606.14  | 554.44  | 567.72  |

A seguir a Tabela 13, que apresenta as rugosidades reais e as estimadas (ou calculadas), determinadas a partir da média das rugosidades de cada semente para respectiva tubulação.

**Tabela 13 – Resultados da rugosidade média estimada (Caso 37).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0330                      | 0.0070 | 17.5        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3020                      | 0.0020 | 0.7         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1090                      | 0.0090 | 9.0         |
| 4              | 0.05000                 | 0.2080                      | 0.1580 | 316.0       |
| 5              | 0.50000                 | 0.3590                      | 0.1410 | 28.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2060                      | 0.0940 | 31.3        |
| 7              | 0.20000                 | 0.3300                      | 0.1300 | 65.0        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3260                      | 0.0760 | 30.4        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4000                      | 0.1500 | 27.3        |
| 10             | 0.60000                 | 0.4720                      | 0.1280 | 21.3        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>54.7</b> |

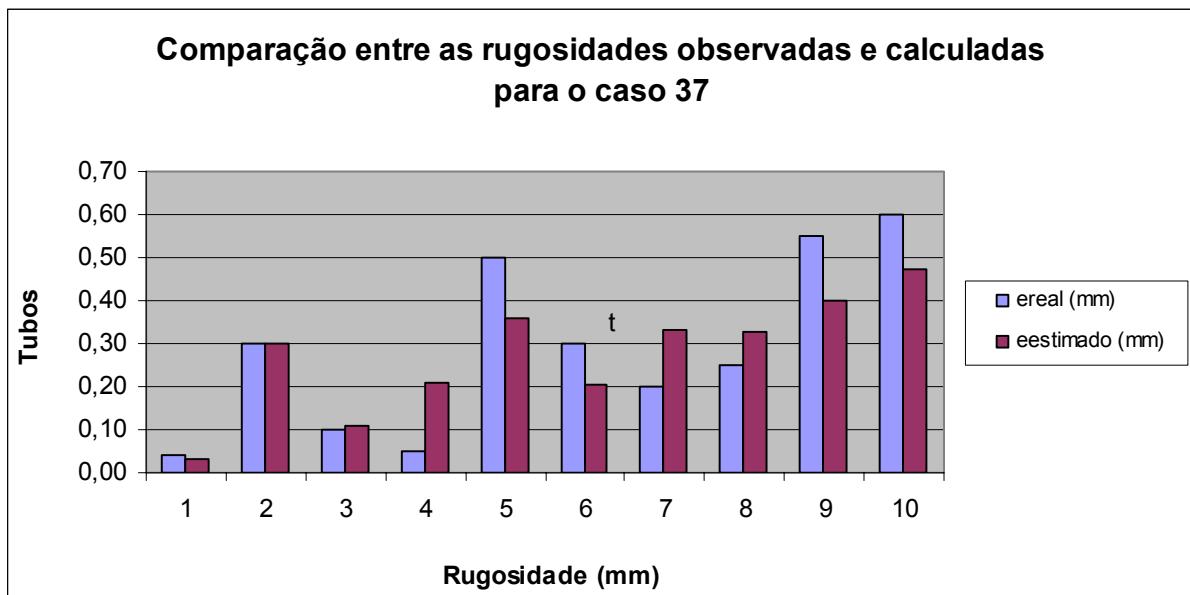


Figura 14 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 37.

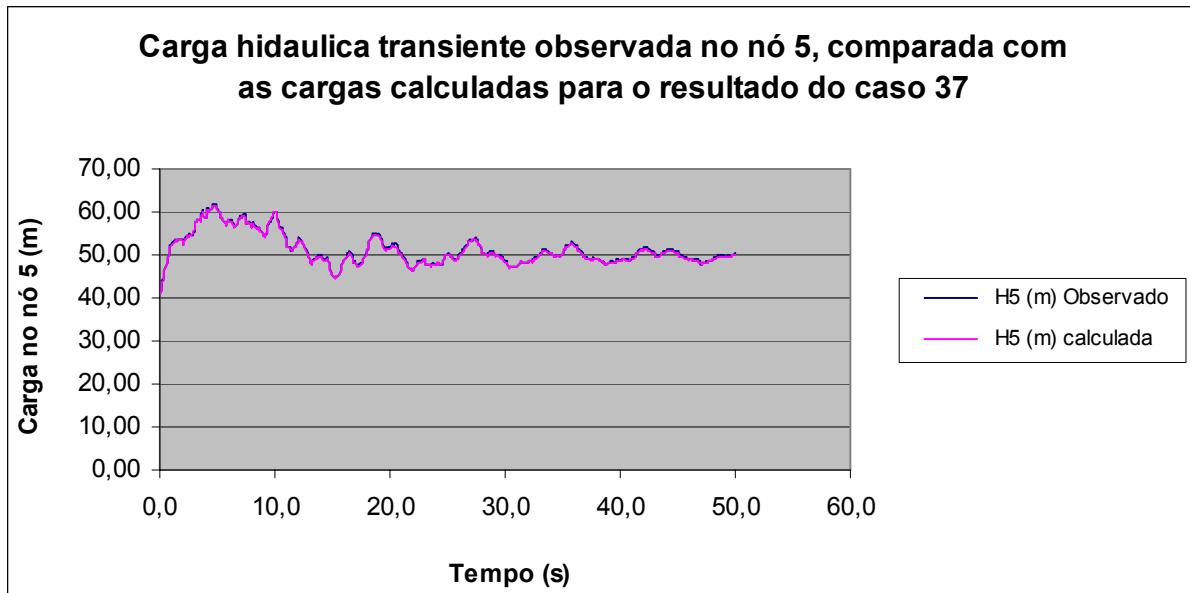


Figura 15 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 37).

### CASO 38

**Tabela 14 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 38).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |        |         |         |         |          |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5      | 6       | 7       | 8       | 9        | 10      |
| 1         | 0.0400   | 0.0400  | 0.0600  | 0.0500  | 0.0500 | 0.0250  | 0.0500  | 0.0450  | 0.0500   | 0.0450  |
| 2         | 0.2000   | 0.1600  | 0.3500  | 0.0450  | 0.1000 | 0.4900  | 0.4800  | 0.3200  | 0.2500   | 0.5600  |
| 3         | 0.1800   | 0.1500  | 0.0600  | 0.2600  | 0.1900 | 0.0600  | 0.0700  | 0.0450  | 0.0900   | 0.0800  |
| 4         | 0.0050   | 0.1100  | 0.0600  | 0.0250  | 0.0800 | 0.1300  | 0.0050  | 0.2000  | 0.0800   | 0.0015  |
| 5         | 0.2800   | 0.6000  | 0.4500  | 2.0000  | 0.0050 | 0.2900  | 0.1300  | 0.2600  | 0.4800   | 0.4500  |
| 6         | 0.4400   | 0.3300  | 0.5000  | 2.0000  | 0.0900 | 0.3100  | 0.2800  | 0.2100  | 0.6100   | 0.1100  |
| 7         | 0.5800   | 0.6000  | 0.2600  | 0.5200  | 0.5500 | 0.2500  | 0.2000  | 0.1200  | 0.3800   | 0.1900  |
| 8         | 0.3500   | 0.2400  | 0.1600  | 0.0600  | 0.0900 | 0.3600  | 0.5500  | 0.4600  | 0.4200   | 0.5000  |
| 9         | 0.4500   | 0.3500  | 0.6000  | 0.5900  | 0.5400 | 0.4000  | 0.4100  | 0.4400  | 0.4400   | 0.4400  |
| 10        | 0.2800   | 0.4200  | 0.4300  | 0.4700  | 0.4600 | 0.2500  | 0.5600  | 0.4600  | 0.3300   | 0.6000  |
| Fobj      | 0.06565  | 0.07765 | 0.06319 | 0.13986 | 0.0863 | 0.06323 | 0.07248 | 0.09435 | 0.050525 | 0.04638 |
| Geração   | 27       | 18      | 19      | 13      | 14     | 29      | 15      | 35      | 13       | 35      |
| Tempo (s) | 664.14   | 624.23  | 657.95  | 605.66  | 711.14 | 723.2   | 690.34  | 684.62  | 738.42   | 664.05  |

**Tabela 15 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 38).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0455                      | 0.0055 | 13.8        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2955                      | 0.0045 | 1.5         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1185                      | 0.0185 | 18.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0697                      | 0.0197 | 39.3        |
| 5              | 0.50000                 | 0.4945                      | 0.0055 | 1.1         |
| 6              | 0.30000                 | 0.4880                      | 0.1880 | 62.7        |
| 7              | 0.20000                 | 0.3650                      | 0.1650 | 82.5        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3190                      | 0.0690 | 27.6        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4660                      | 0.0840 | 15.3        |
| 10             | 0.60000                 | 0.4260                      | 0.1740 | 29.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>29.1</b> |

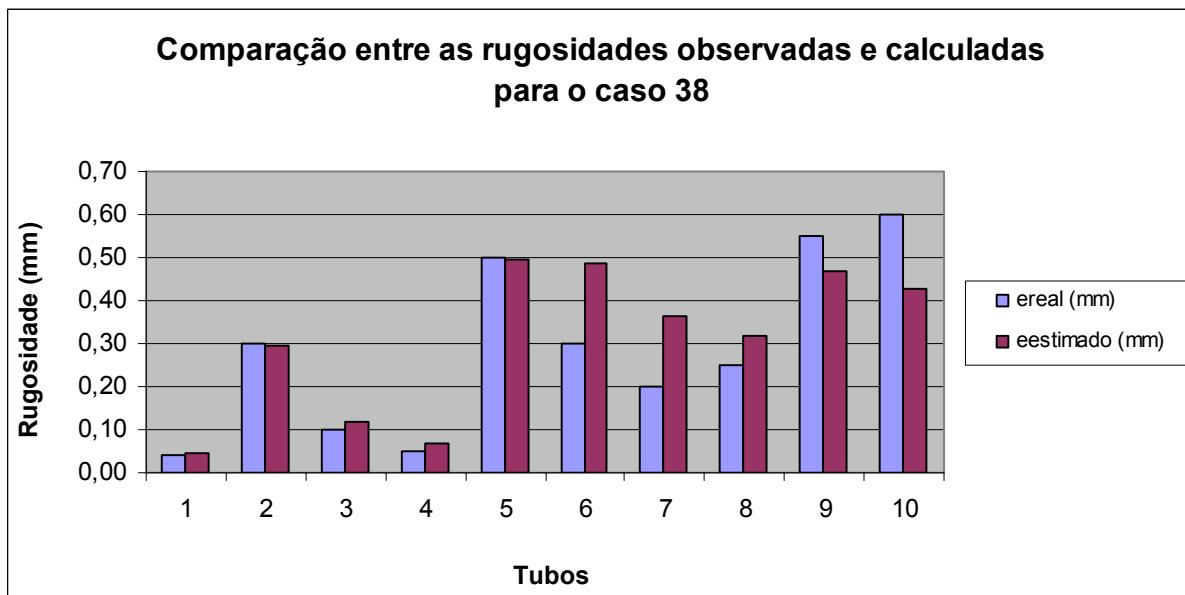


Figura 16 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 38.

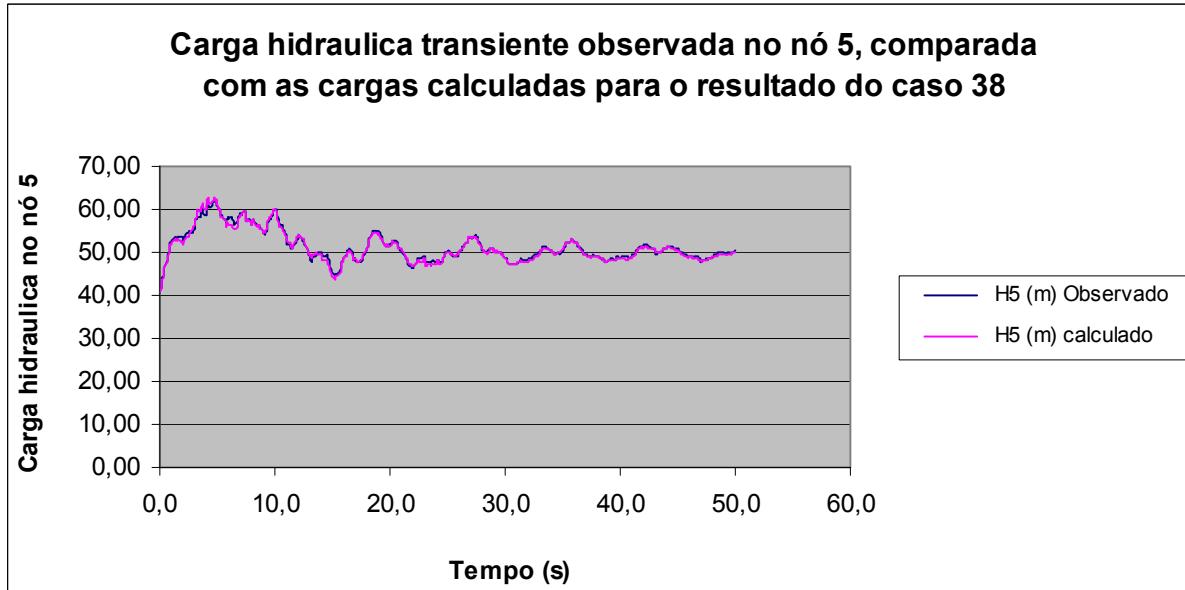


Figura 17 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso38).

### CASO 39

**Tabela 16 – Resultados da rugosidade por semente simulada (Caso39).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0450  | 0.0800  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0450  | 0.0500  | 0.0250  | 0.0050  | 0.2100  |
| 2         | 0.5300   | 0.1000  | 0.1400  | 0.4400  | 0.1300  | 0.3000  | 0.5000  | 0.2000  | 0.4100  | 0.2300  |
| 3         | 0.0250   | 0.3600  | 0.1000  | 0.0700  | 0.2800  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1500  | 0.1100  | 0.0050  |
| 4         | 0.0800   | 0.0250  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0700  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1100  | 0.0700  | 0.0250  |
| 5         | 0.3800   | 0.5100  | 0.6000  | 0.5200  | 0.4000  | 0.3800  | 0.5800  | 0.0450  | 0.0500  | 0.4600  |
| 6         | 0.2800   | 0.2300  | 0.3400  | 0.3800  | 0.2900  | 0.5800  | 0.0600  | 0.5100  | 0.6000  | 0.5400  |
| 7         | 0.0050   | 0.5000  | 0.0050  | 0.3300  | 0.1200  | 0.2000  | 0.0050  | 0.0250  | 0.4300  | 0.5900  |
| 8         | 0.1600   | 0.5100  | 0.3000  | 0.3700  | 0.0250  | 0.5300  | 0.3900  | 0.3500  | 0.3600  | 0.4900  |
| 9         | 0.5400   | 0.0900  | 0.5900  | 0.2600  | 0.2300  | 0.5100  | 0.3100  | 0.2800  | 0.3800  | 0.2400  |
| 10        | 0.4800   | 0.6000  | 0.5500  | 0.3700  | 0.3300  | 0.5900  | 0.2800  | 0.1700  | 0.2400  | 0.0250  |
| Fobj      | 0.10671  | 0.20636 | 0.14349 | 0.13669 | 0.22014 | 0.12012 | 0.09921 | 0.17675 | 0.15921 | 0.27182 |
| Geração   | 23       | 37      | 40      | 13      | 12      | 18      | 34      | 9       | 8       | 12      |
| Tempo (s) | 555.08   | 570.5   | 564.84  | 626.03  | 557.69  | 565.66  | 556.83  | 606.14  | 554.44  | 567.72  |

**Tabela 17 – Resultados da rugosidade média estimada (Caso39).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0585                      | 0.0185 | 46.3        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2980                      | 0.0020 | 0.7         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1230                      | 0.0230 | 23.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0615                      | 0.0115 | 23.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3925                      | 0.1075 | 21.5        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3810                      | 0.0810 | 27.0        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2210                      | 0.0210 | 10.5        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3485                      | 0.0985 | 39.4        |
| 9              | 0.55000                 | 0.3430                      | 0.2070 | 37.6        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3635                      | 0.2365 | 39.4        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>26.8</b> |

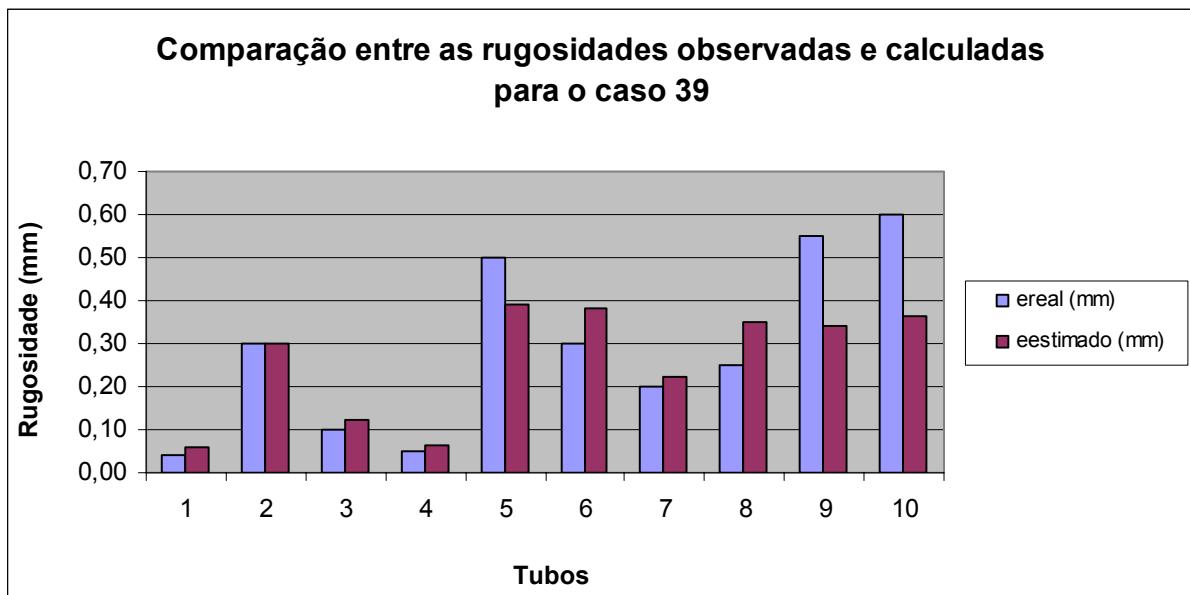


Figura 18 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 39.

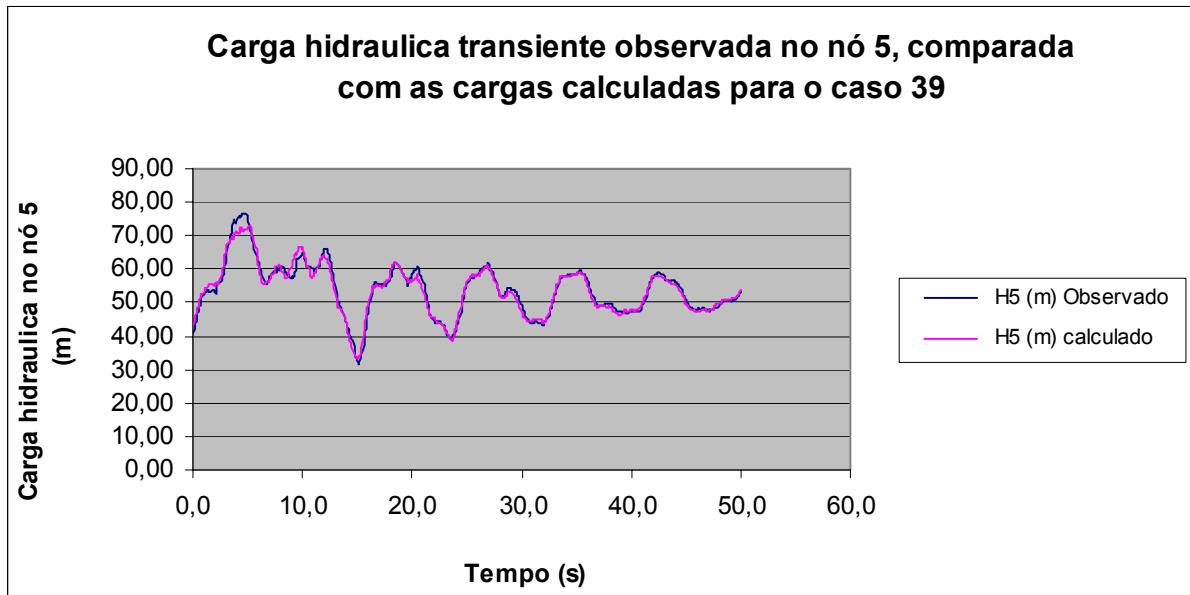
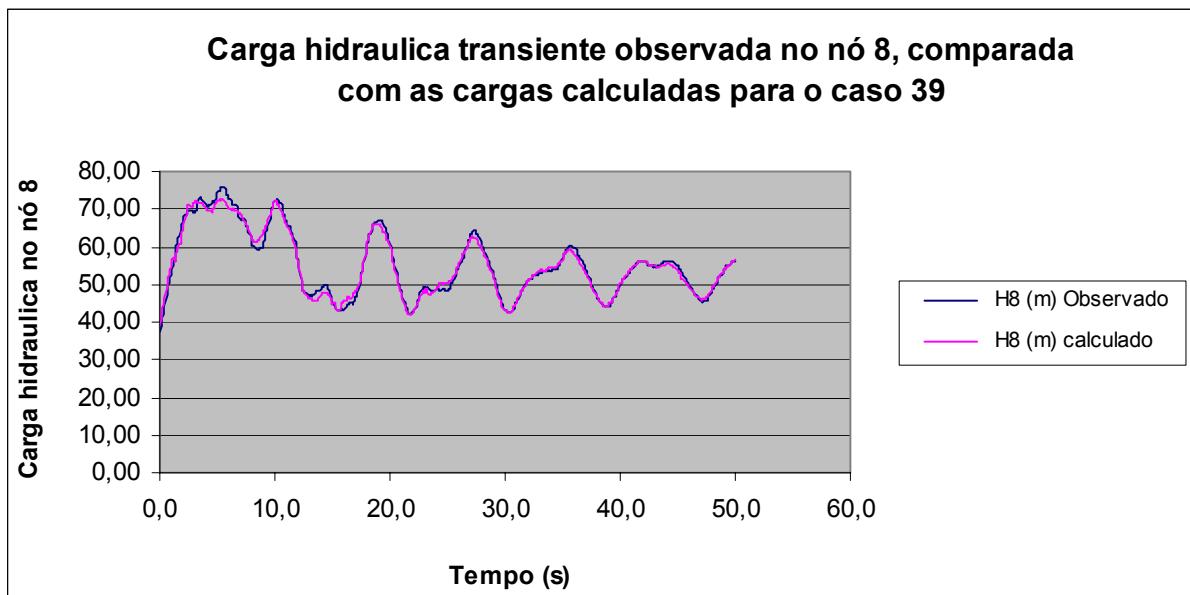


Figura 19 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso39).



**Figura 20 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso39).**

### CASO 40

**Tabela 18 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 40).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0400   | 0.0500  | 0.0400  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0500  | 0.0500  | 0.0050  | 0.0500  | 0.0050  |
| 2         | 0.5900   | 0.5900  | 0.2900  | 0.1100  | 0.4600  | 0.4800  | 0.5900  | 0.2400  | 0.5500  | 0.6000  |
| 3         | 0.0700   | 0.0600  | 0.0700  | 0.1600  | 0.0500  | 0.0500  | 0.0700  | 0.1500  | 0.0600  | 0.0900  |
| 4         | 0.0800   | 0.0600  | 0.0700  | 0.0600  | 0.0600  | 0.0500  | 0.0400  | 0.1100  | 0.0450  | 0.0800  |
| 5         | 0.6000   | 0.5600  | 0.0600  | 0.1200  | 0.4800  | 0.4600  | 0.5100  | 0.2000  | 0.5200  | 0.3200  |
| 6         | 0.3100   | 0.4300  | 0.4700  | 0.4900  | 0.3700  | 0.6000  | 0.2000  | 0.5900  | 0.1400  | 0.5300  |
| 7         | 0.0015   | 0.0700  | 0.2100  | 0.0600  | 0.1600  | 0.2400  | 0.1400  | 0.0450  | 0.1200  | 0.3400  |
| 8         | 0.0900   | 0.0500  | 0.0900  | 0.6000  | 0.1300  | 0.0600  | 0.1700  | 0.0450  | 0.1500  | 0.5900  |
| 9         | 0.5800   | 0.5600  | 0.5900  | 0.4900  | 0.5500  | 0.6100  | 0.3900  | 0.5600  | 0.4200  | 0.2700  |
| 10        | 2.0000   | 0.4100  | 0.0800  | 0.5600  | 0.2400  | 0.3500  | 0.2500  | 0.6100  | 0.3300  | 0.3300  |
| Fobj      | 0.10569  | 0.15649 | 0.12897 | 0.13638 | 0.12102 | 0.11012 | 0.16517 | 0.12037 | 0.14483 | 0.14914 |
| Geração   | 36       | 40      | 40      | 27      | 30      | 22      | 13      | 39      | 38      | 39      |
| Tempo (s) | 604.73   | 606.39  | 592.66  | 592.27  | 602.98  | 612.08  | 570.74  | 602.86  | 597.03  | 627.28  |

**Tabela 19 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 40).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0395                      | 0.0005 | 1.3         |
| 2              | 0.30000                 | 0.4500                      | 0.1500 | 50.0        |
| 3              | 0.10000                 | 0.0830                      | 0.0170 | 17.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0655                      | 0.0155 | 31.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3830                      | 0.1170 | 23.4        |
| 6              | 0.30000                 | 0.4130                      | 0.1130 | 37.7        |
| 7              | 0.20000                 | 0.1387                      | 0.0614 | 30.7        |
| 8              | 0.25000                 | 0.1975                      | 0.0525 | 21.0        |
| 9              | 0.55000                 | 0.5020                      | 0.0480 | 8.7         |
| 10             | 0.60000                 | 0.5160                      | 0.0840 | 14.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>23.5</b> |

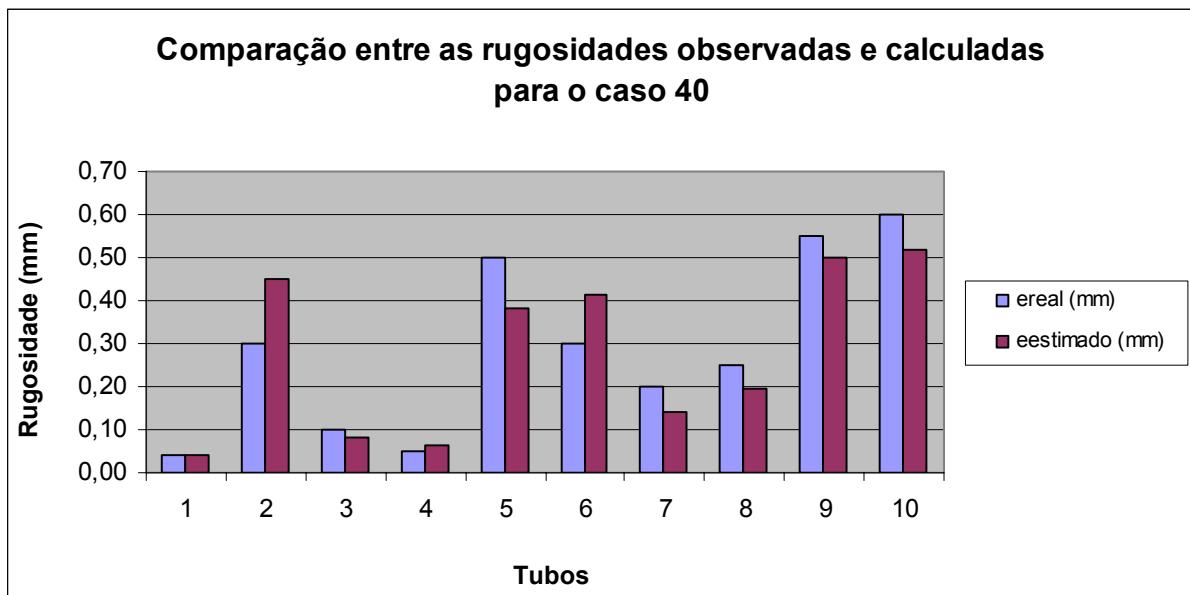


Figura 21 - variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 40.

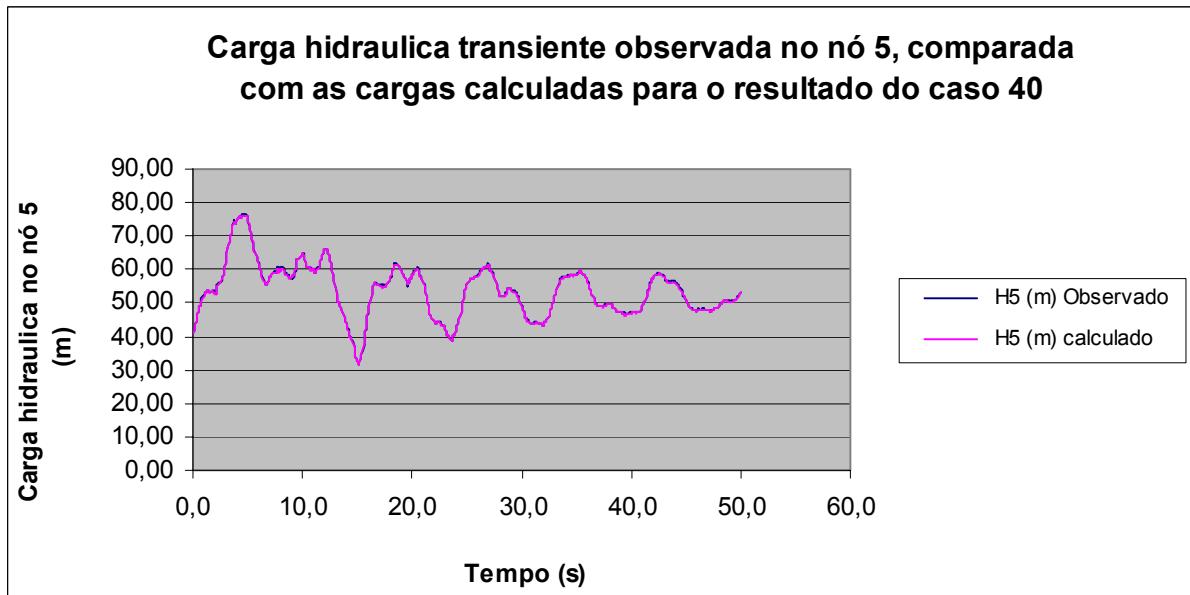
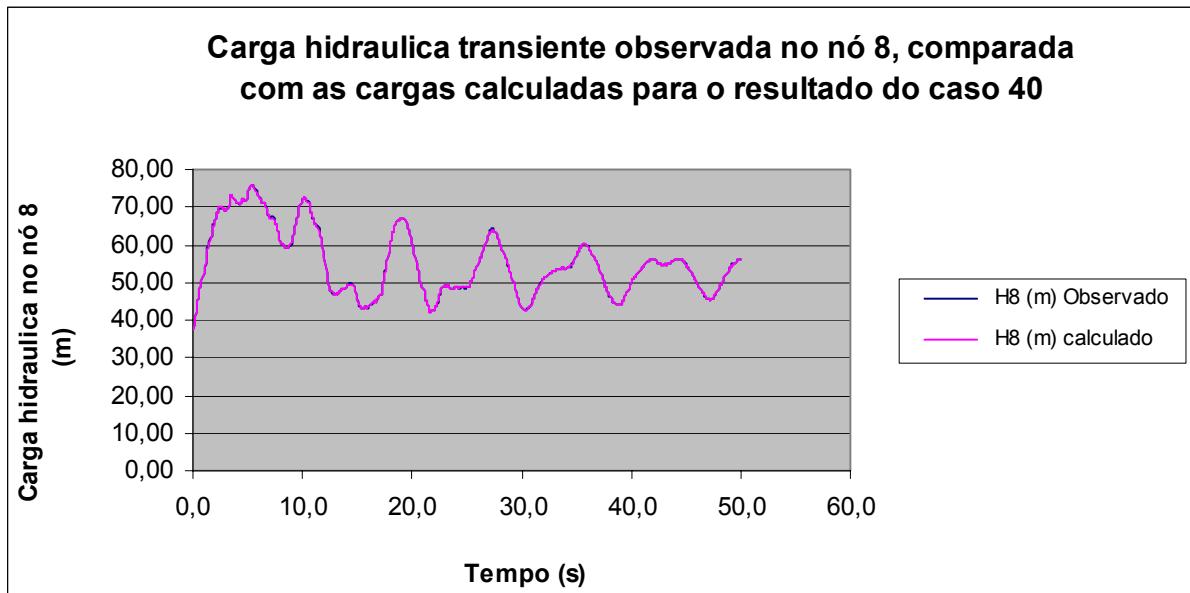


Figura 22 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 40).



**Figura 23 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 40).**

### CASO 41

**Tabela 20 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 41).**

| Tubo      | Sementes |         |         |        |         |         |         |         |        |         |
|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4      | 5       | 6       | 7       | 8       | 9      | 10      |
| 1         | 0.0015   | 0.0450  | 0.0600  | 0.0700 | 0.0600  | 0.0500  | 0.0500  | 0.0450  | 0.0600 | 0.0015  |
| 2         | 0.5800   | 0.3500  | 0.5600  | 0.2700 | 0.1500  | 0.1100  | 0.4600  | 0.5800  | 0.0600 | 0.0600  |
| 3         | 0.1700   | 0.0450  | 0.0500  | 0.0450 | 0.1300  | 0.1400  | 0.0450  | 0.0400  | 0.2300 | 0.5000  |
| 4         | 0.0500   | 0.1200  | 0.0400  | 0.0500 | 0.0600  | 0.0500  | 0.0600  | 0.0600  | 0.0250 | 0.0450  |
| 5         | 0.2100   | 0.2200  | 0.5500  | 0.2600 | 0.2700  | 0.4500  | 0.3700  | 0.2600  | 0.6100 | 0.4500  |
| 6         | 0.0800   | 0.6000  | 0.2600  | 0.6100 | 0.4000  | 0.4200  | 0.5200  | 0.4300  | 0.2200 | 0.2100  |
| 7         | 0.2900   | 0.0015  | 0.1400  | 0.3500 | 0.0800  | 0.1800  | 0.2200  | 0.3300  | 0.3400 | 0.2700  |
| 8         | 0.3800   | 0.5000  | 0.5100  | 0.0600 | 0.4000  | 0.4900  | 0.0800  | 0.0450  | 0.3800 | 0.2400  |
| 9         | 0.2700   | 0.5900  | 0.3300  | 0.5100 | 0.3800  | 0.2200  | 0.5100  | 0.4700  | 0.4300 | 0.0900  |
| 10        | 0.6100   | 0.4100  | 0.5900  | 0.5400 | 0.5100  | 0.0800  | 0.1400  | 0.0400  | 0.2400 | 0.4800  |
| Fobj      | 0.17208  | 0.13013 | 0.13795 | 0.1829 | 0.09154 | 0.11147 | 0.09936 | 0.12069 | 0.1182 | 0.16674 |
| Geração   | 23       | 39      | 40      | 6      | 39      | 16      | 36      | 39      | 38     | 19      |
| Tempo (s) | 640.77   | 646.42  | 655.83  | 624.06 | 613.17  | 611.64  | 647.09  | 666.5   | 621.59 | 684.89  |

**Tabela 21 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 41).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0443                      | 0.0043 | 10.8        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3180                      | 0.0180 | 6.0         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1395                      | 0.0395 | 39.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0560                      | 0.0060 | 12.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3650                      | 0.1350 | 27.0        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3750                      | 0.0750 | 25.0        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2202                      | 0.0202 | 10.1        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3085                      | 0.0585 | 23.4        |
| 9              | 0.55000                 | 0.3800                      | 0.1700 | 30.9        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3640                      | 0.2360 | 39.3        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>22.4</b> |

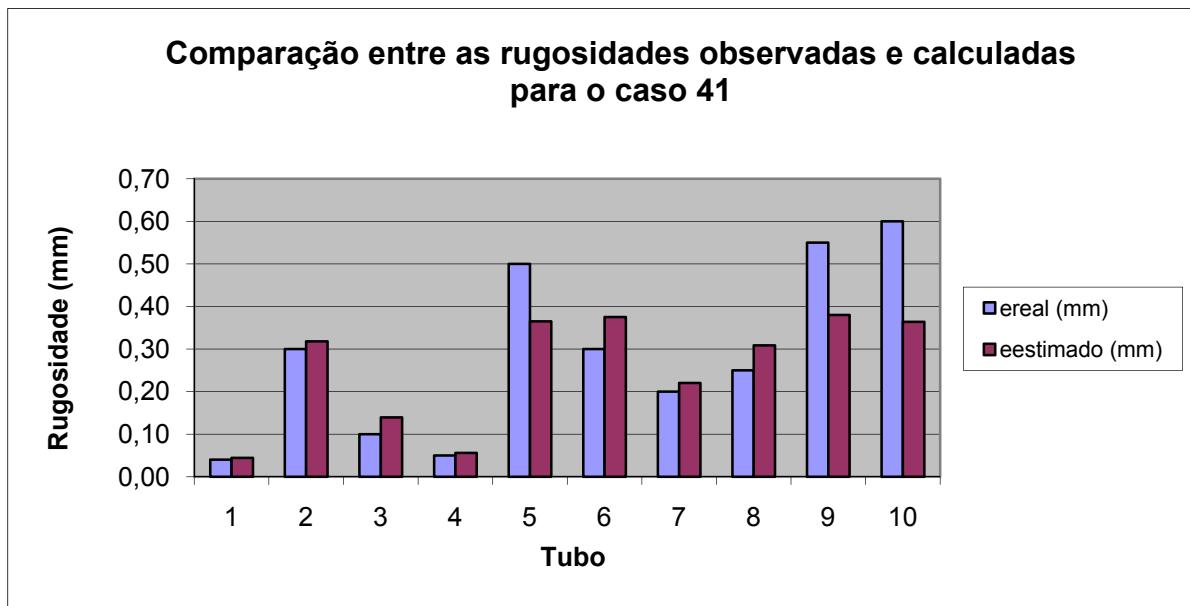


Figura 24 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 41.

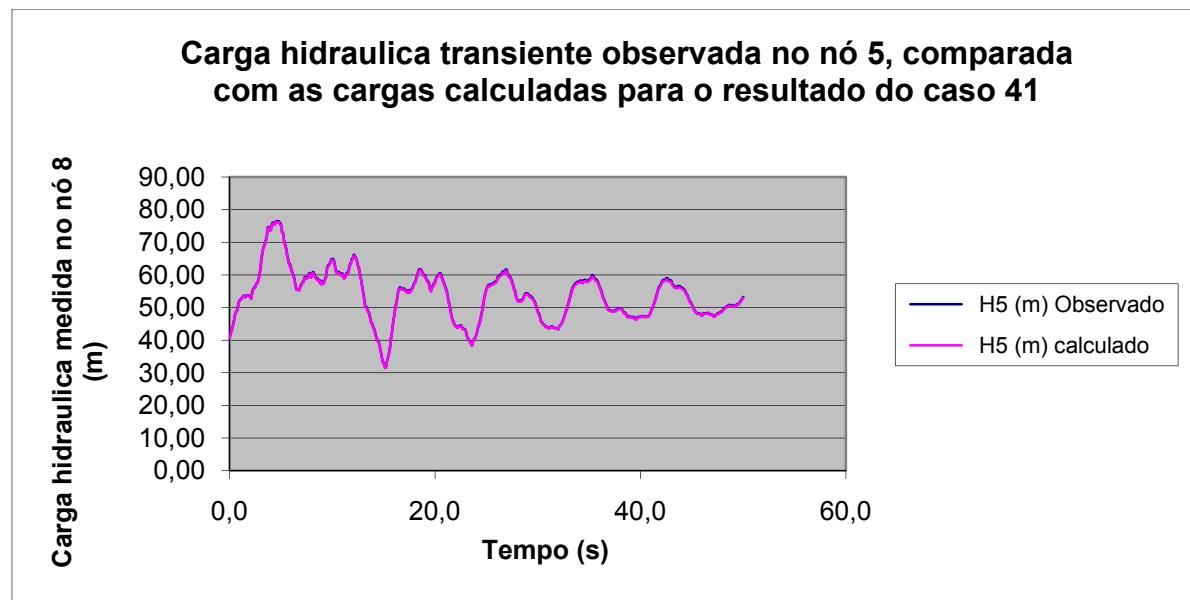
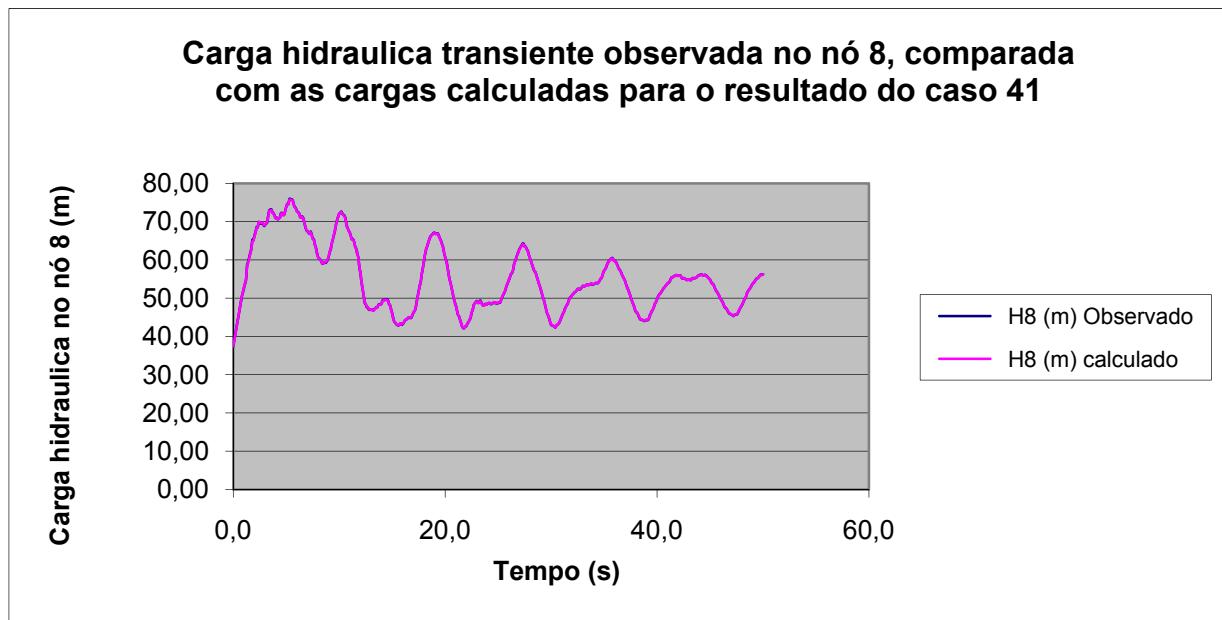


Figura 25 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 41).



**Figura 26 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 41).**

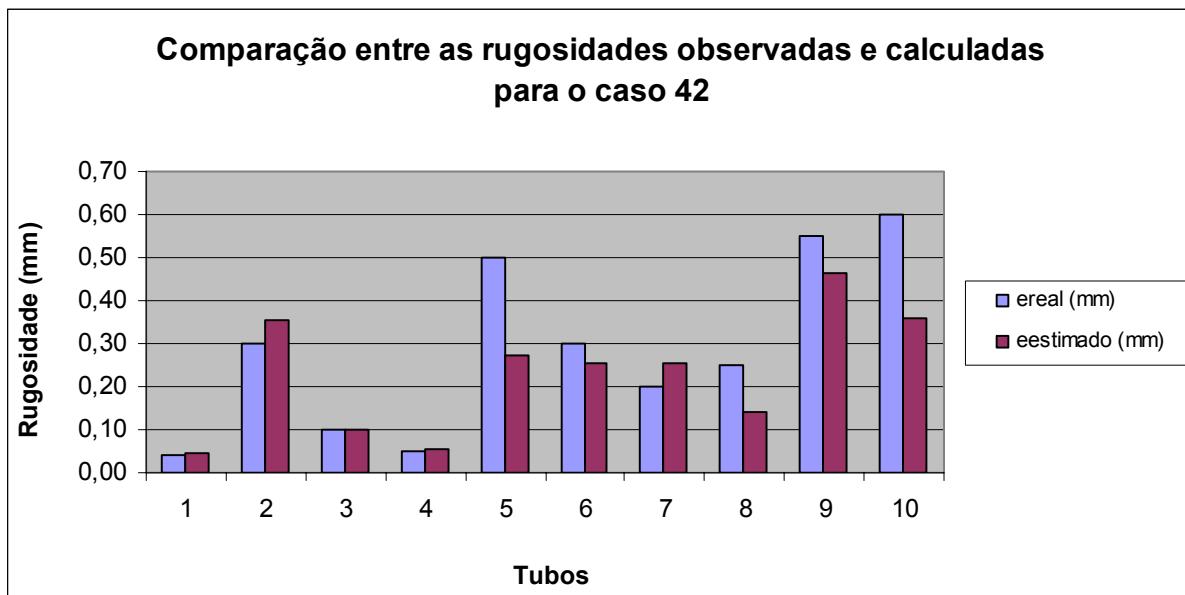
## CASO 42

**Tabela 22 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 42).**

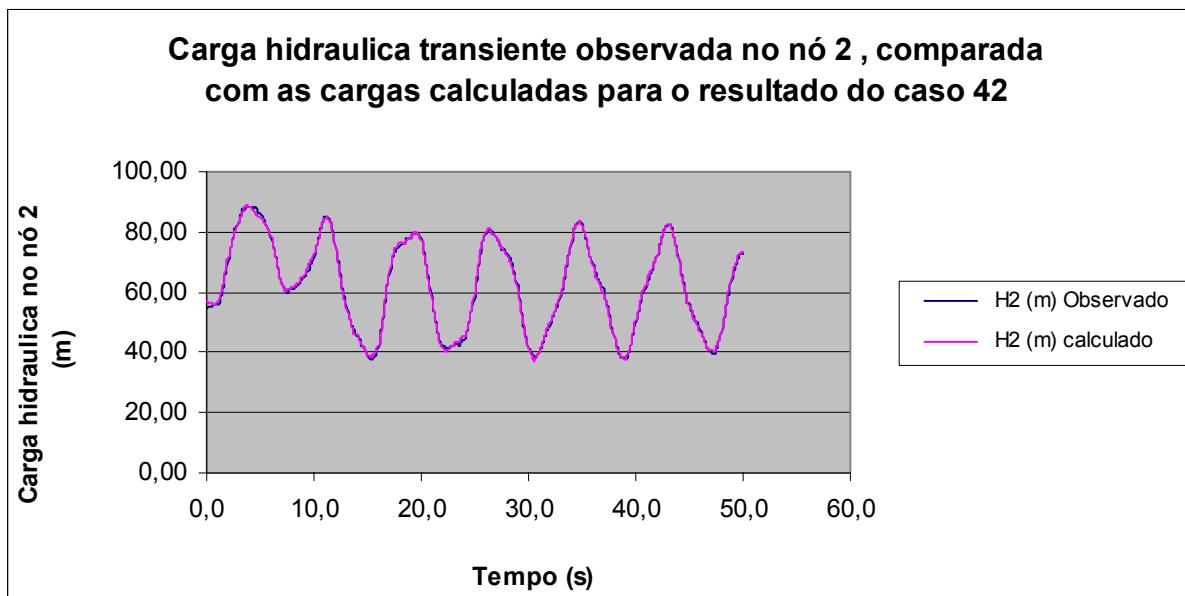
| Tubo      | Sementes |         |         |        |         |         |        |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4      | 5       | 6       | 7      | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0450   | 0.0400  | 0.0400  | 0.0450 | 0.0450  | 0.0400  | 0.0250 | 0.0500  | 0.0450  | 0.0800  |
| 2         | 0.3100   | 0.5600  | 0.2400  | 0.3500 | 0.1800  | 0.2300  | 0.5800 | 0.3300  | 0.3600  | 0.3900  |
| 3         | 0.0800   | 0.0600  | 0.1300  | 0.1600 | 0.1700  | 0.1200  | 0.0400 | 0.0800  | 0.0900  | 0.0600  |
| 4         | 0.0900   | 0.1200  | 0.0400  | 0.0250 | 0.0450  | 0.0250  | 0.1000 | 0.0400  | 0.0450  | 0.0250  |
| 5         | 0.1700   | 0.0800  | 0.2200  | 0.3000 | 0.4800  | 0.2500  | 0.0700 | 0.3700  | 0.3600  | 0.4100  |
| 6         | 0.0700   | 0.5800  | 0.0600  | 0.1700 | 0.1400  | 0.0450  | 0.1800 | 0.3300  | 0.3500  | 0.6000  |
| 7         | 0.0450   | 0.0450  | 0.2700  | 0.3200 | 0.1100  | 0.5000  | 0.1700 | 0.2500  | 0.2300  | 0.6100  |
| 8         | 0.1100   | 0.1600  | 0.0500  | 0.4900 | 0.0600  | 0.2400  | 0.0450 | 0.2200  | 0.0015  | 0.0250  |
| 9         | 0.6000   | 0.2700  | 0.6100  | 0.1300 | 0.5100  | 0.4900  | 0.3900 | 0.6000  | 0.4300  | 0.5900  |
| 10        | 0.0015   | 0.5900  | 0.4800  | 0.5300 | 0.5600  | 0.1000  | 0.1000 | 0.3900  | 0.3000  | 0.5600  |
| Fobj      | 0.13469  | 0.17425 | 0.06811 | 0.1671 | 0.10954 | 0.10122 | 0.1707 | 0.06462 | 0.04813 | 0.20902 |
| Geração   | 24       | 40      | 34      | 40     | 36      | 16      | 28     | 32      | 27      | 40      |
| Tempo (s) | 584.67   | 593.59  | 580.8   | 568.94 | 559.16  | 593.34  | 612.74 | 575.36  | 599.5   | 583.8   |

**Tabela 23 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 42).**

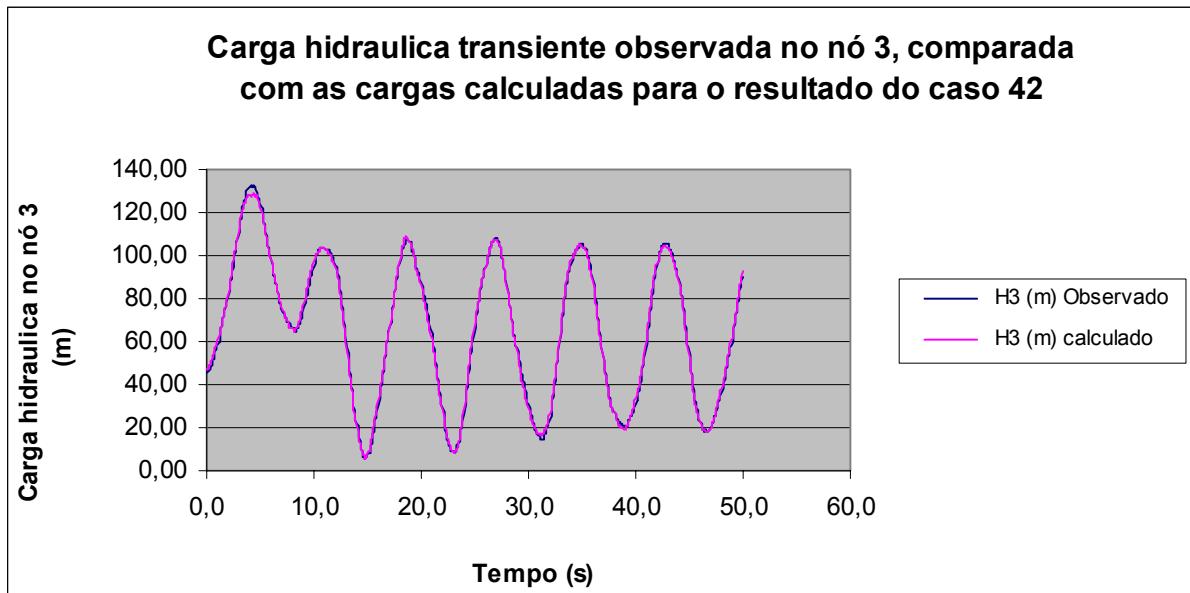
| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0455                      | 0.0055 | 13.8        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3530                      | 0.0530 | 17.7        |
| 3              | 0.10000                 | 0.0990                      | 0.0010 | 1.0         |
| 4              | 0.05000                 | 0.0555                      | 0.0055 | 11.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.2710                      | 0.2290 | 45.8        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2525                      | 0.0475 | 15.8        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2550                      | 0.0550 | 27.5        |
| 8              | 0.25000                 | 0.1402                      | 0.1099 | 43.9        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4620                      | 0.0880 | 16.0        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3612                      | 0.2389 | 39.8        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>23.2</b> |



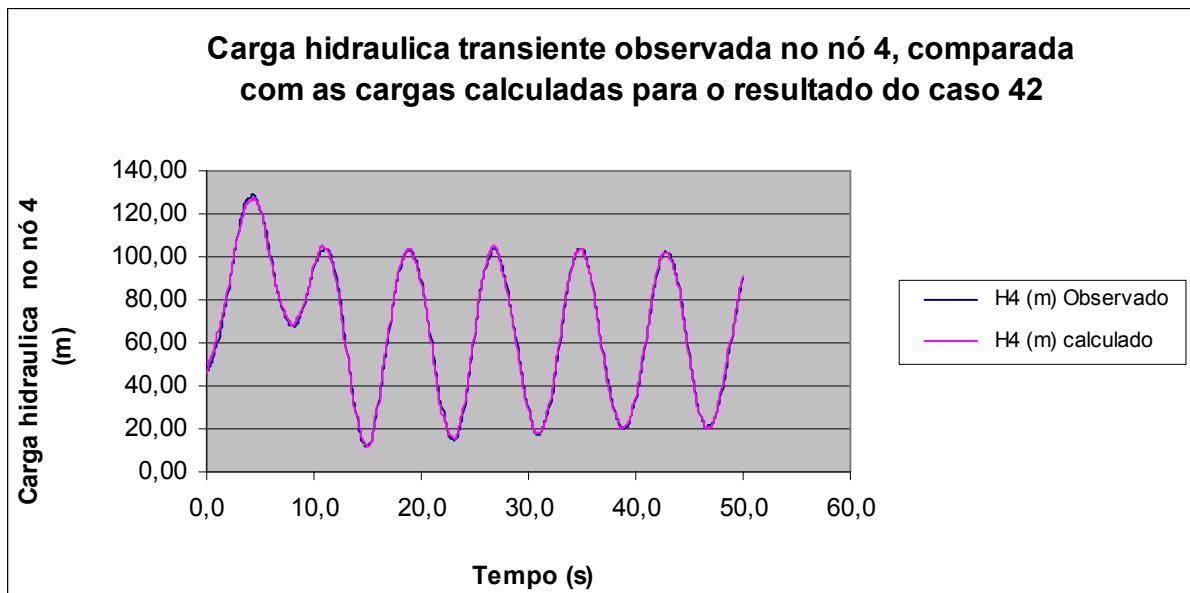
**Figura 27 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 42**



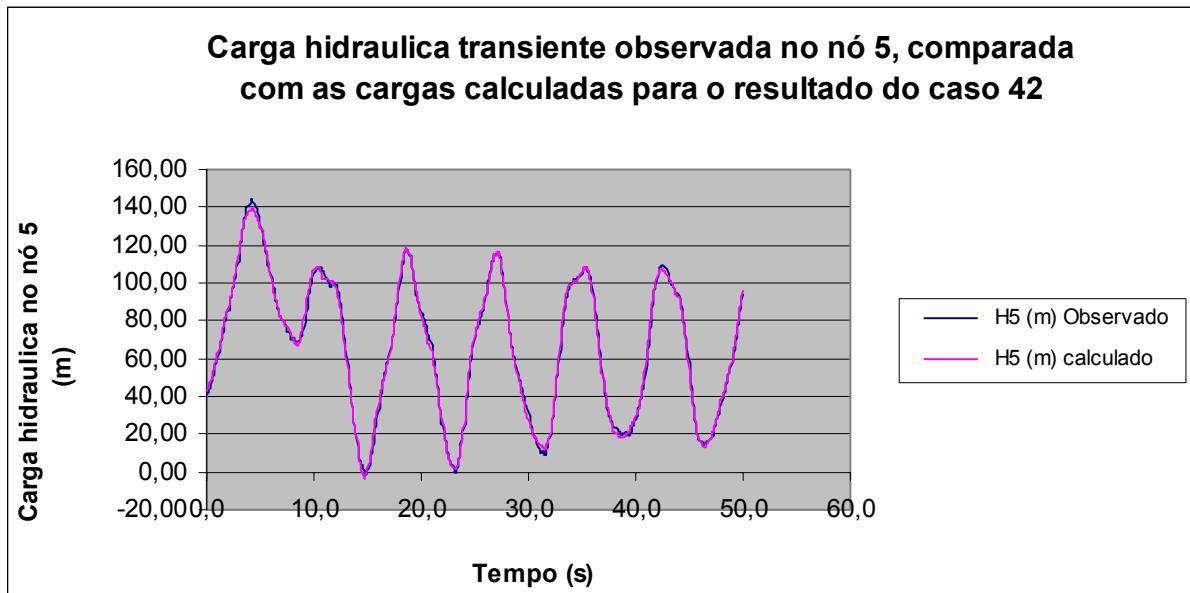
**Figura 28 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 42).**



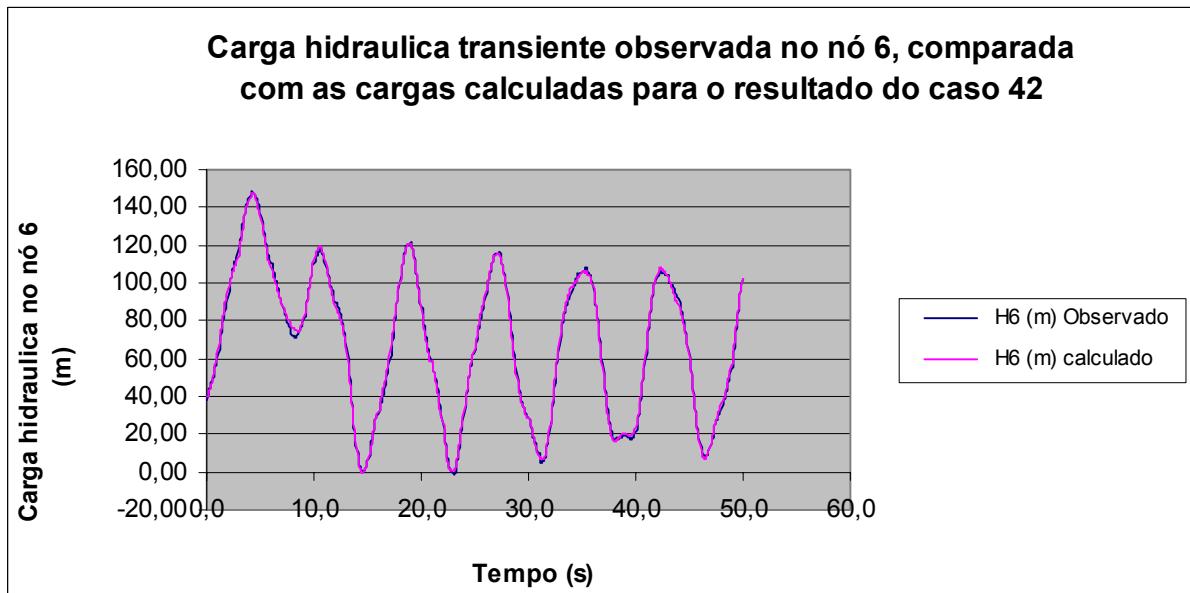
**Figura 29 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 42).**



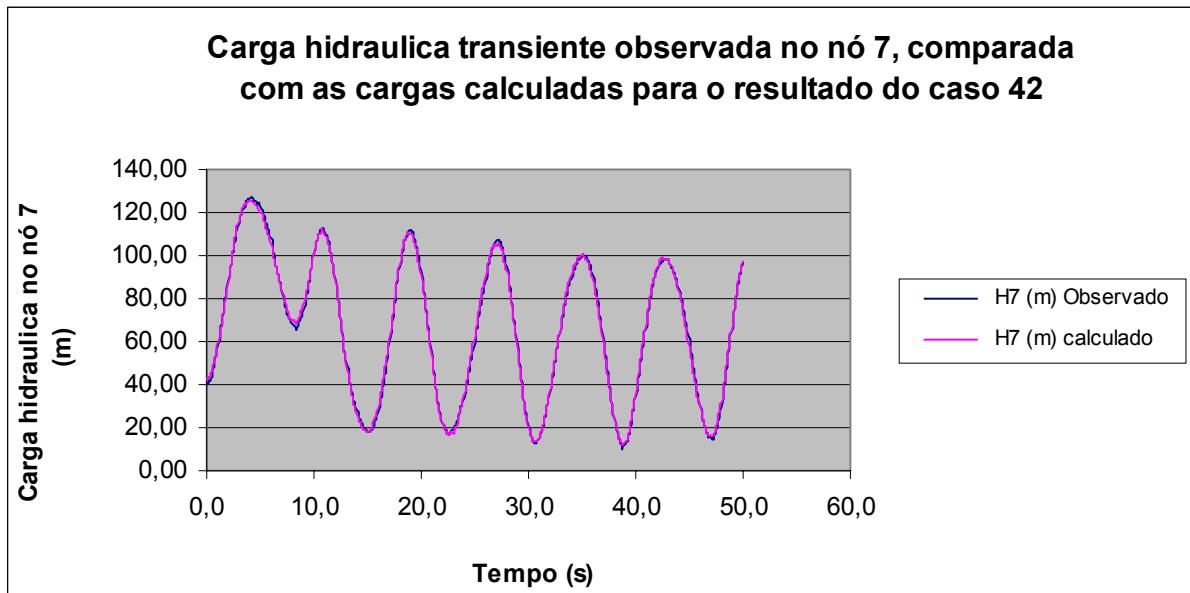
**Figura 30 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 42).**



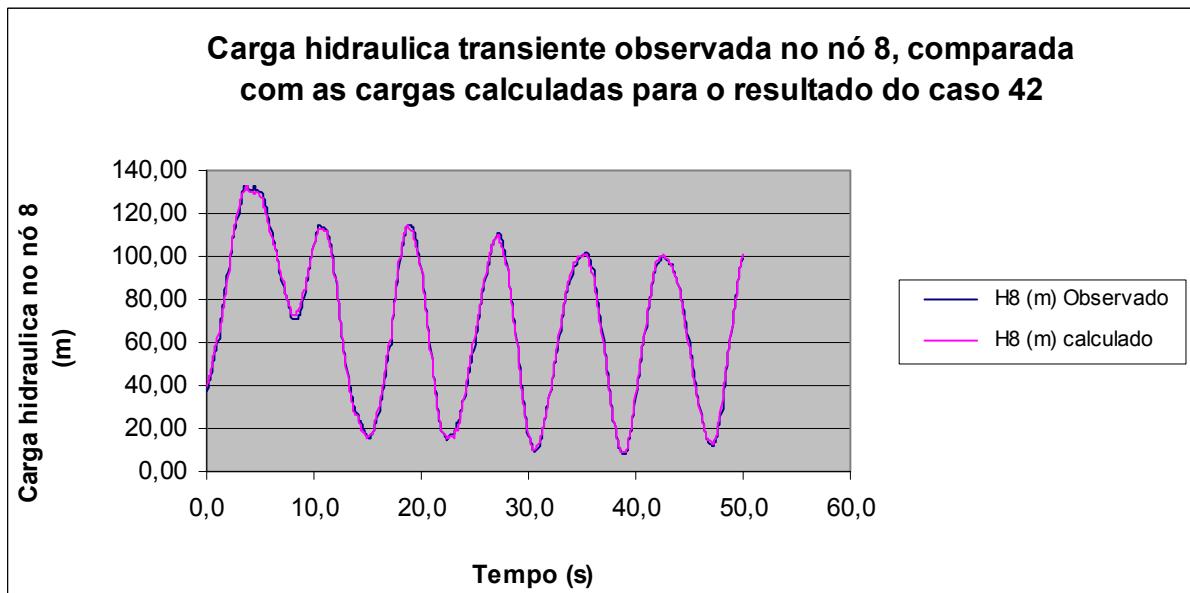
**Figura 31 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 42).**



**Figura 32 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 42).**



**Figura 33 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 42).**



**Figura 34 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 42).**

### CASO 43

**Tabela 24 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 43).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |        |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5      | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0250   | 0.0250  | 0.0500  | 0.0400  | 0.0250 | 0.1200  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0500  | 0.0450  |
| 2         | 0.3900   | 0.2900  | 0.2600  | 0.1100  | 0.3800 | 0.1900  | 0.2100  | 0.4900  | 0.2900  | 0.2800  |
| 3         | 0.0700   | 0.1600  | 0.0800  | 0.2100  | 0.1600 | 0.0700  | 0.2600  | 0.0800  | 0.1400  | 0.1300  |
| 4         | 0.0900   | 0.0800  | 0.0250  | 0.0500  | 0.0800 | 0.0500  | 0.0400  | 0.0500  | 0.0600  | 0.0400  |
| 5         | 0.0500   | 0.3700  | 0.3900  | 0.2100  | 0.3300 | 0.1200  | 0.5300  | 0.4300  | 0.3500  | 0.4100  |
| 6         | 0.1300   | 0.2600  | 0.0050  | 0.1600  | 0.3500 | 0.2800  | 0.1900  | 0.2300  | 1.0000  | 0.2000  |
| 7         | 0.1800   | 0.0700  | 0.3800  | 0.2000  | 0.1000 | 0.3200  | 0.1600  | 0.1700  | 0.1000  | 0.2600  |
| 8         | 0.2900   | 0.1600  | 0.2100  | 0.5900  | 0.2300 | 0.2300  | 0.2900  | 0.1200  | 0.5000  | 0.5800  |
| 9         | 0.3800   | 0.5500  | 0.6000  | 0.4700  | 0.2700 | 0.3900  | 0.3000  | 0.4600  | 0.0600  | 0.4700  |
| 10        | 0.2200   | 0.6000  | 0.4300  | 0.2200  | 0.1600 | 0.4500  | 0.0015  | 0.2200  | 0.4800  | 0.4000  |
| Fobj      | 0.09525  | 0.11492 | 0.13332 | 0.12983 | 0.1261 | 0.13111 | 0.13593 | 0.10754 | 0.14771 | 0.07251 |
| Geração   | 40       | 37      | 2       | 18      | 40     | 33      | 7       | 34      | 14      | 38      |
| Tempo (s) | 598.86   | 607.25  | 579.44  | 607.26  | 606.81 | 542.76  | 650.53  | 609.55  | 597.67  | 584.08  |

**Tabela 25 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 43).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0445                      | 0.0045 | 11.3        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2890                      | 0.0110 | 3.7         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1360                      | 0.0360 | 36.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0565                      | 0.0065 | 13.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3190                      | 0.1810 | 36.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2805                      | 0.0195 | 6.5         |
| 7              | 0.20000                 | 0.1940                      | 0.0060 | 3.0         |
| 8              | 0.25000                 | 0.3200                      | 0.0700 | 28.0        |
| 9              | 0.55000                 | 0.3950                      | 0.1550 | 28.2        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3182                      | 0.2819 | 47.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>21.3</b> |

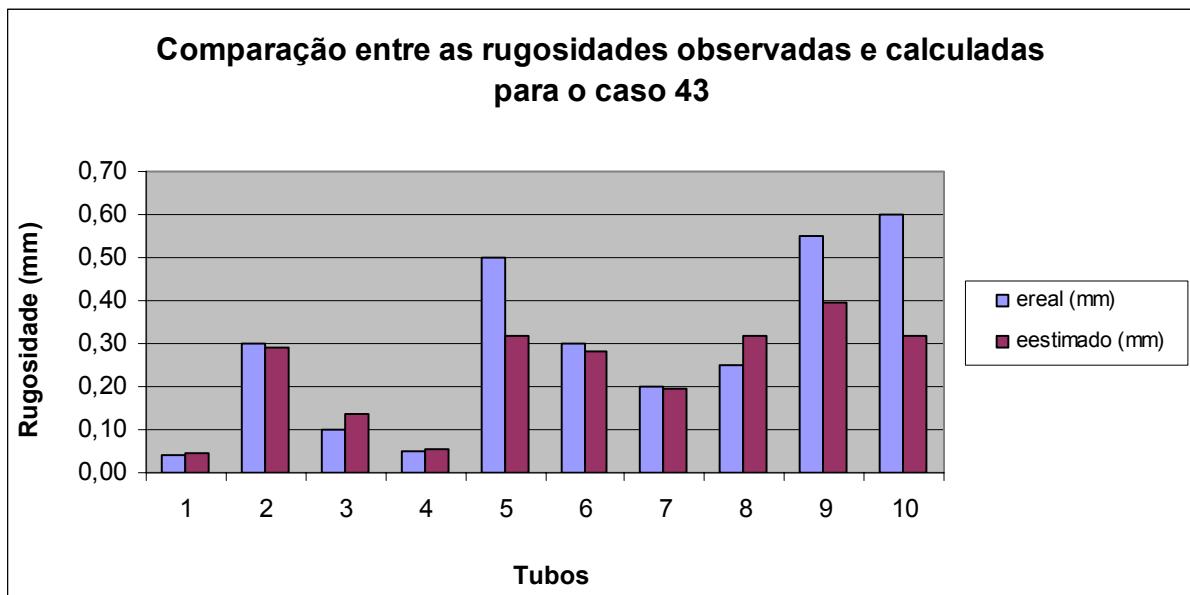


Figura 35 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 43.

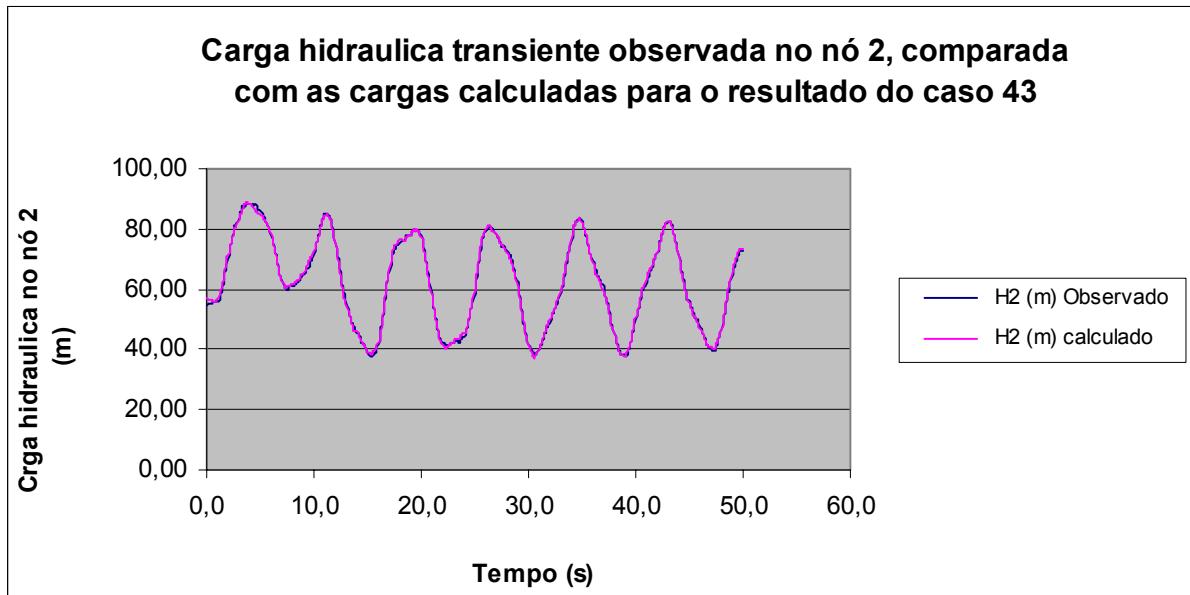


Figura 36 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 43).

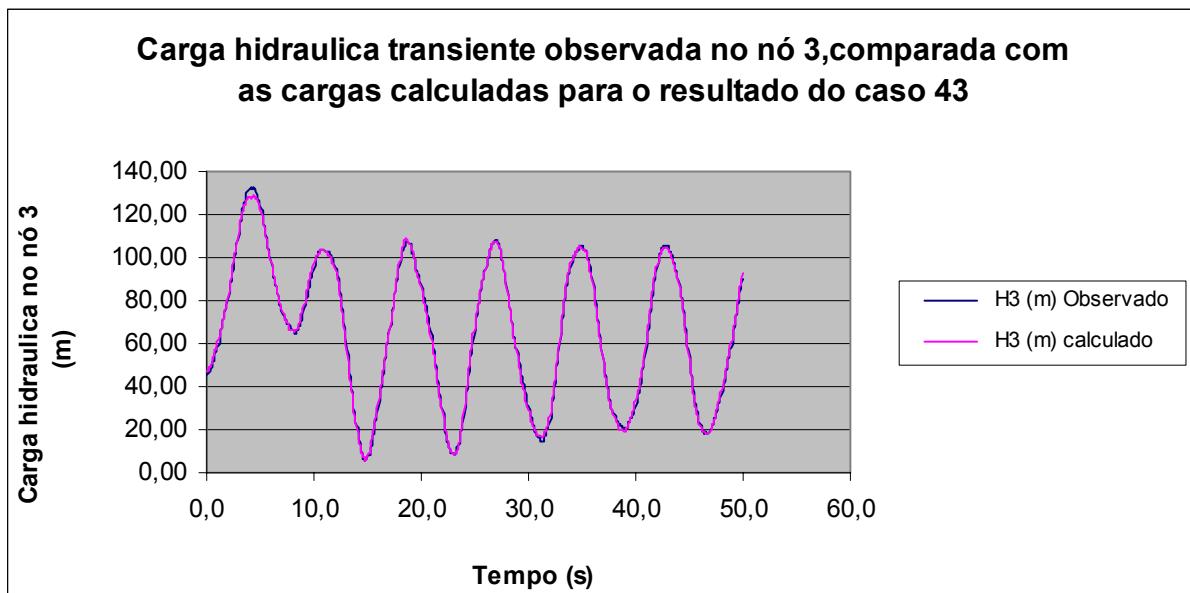


Figura 37 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 43).

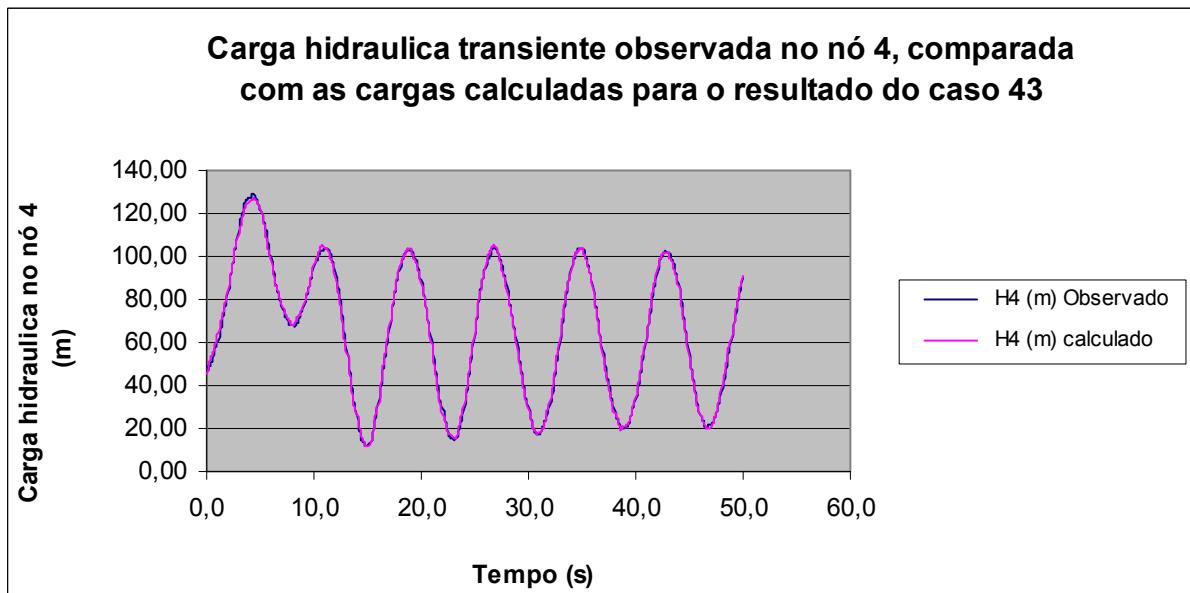


Figura 38 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 43).

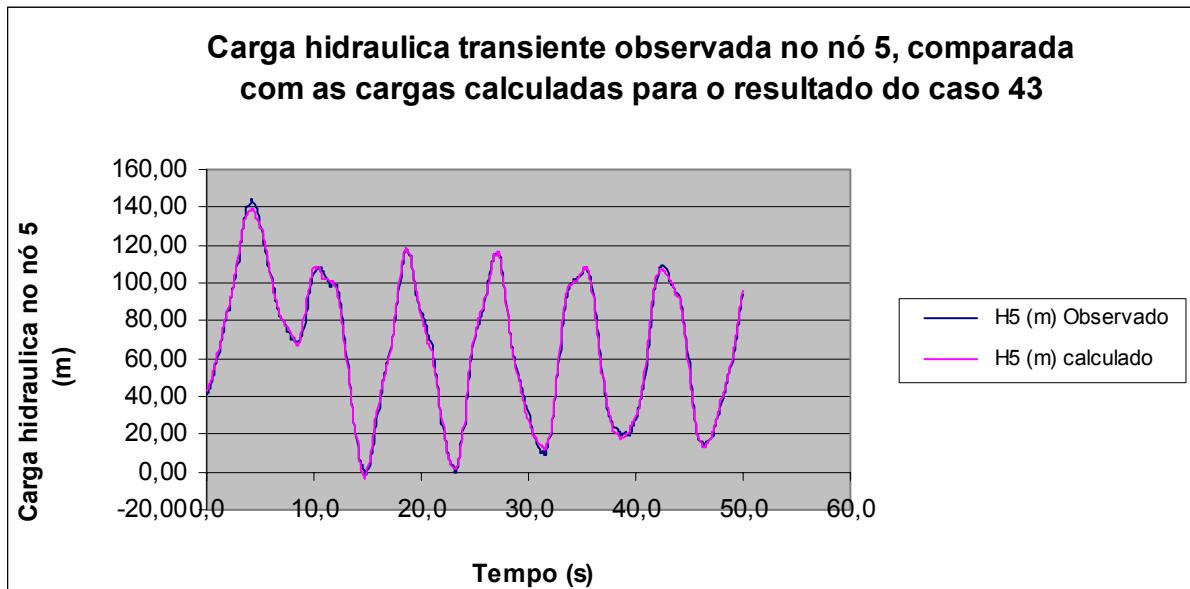


Figura 39 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 43).

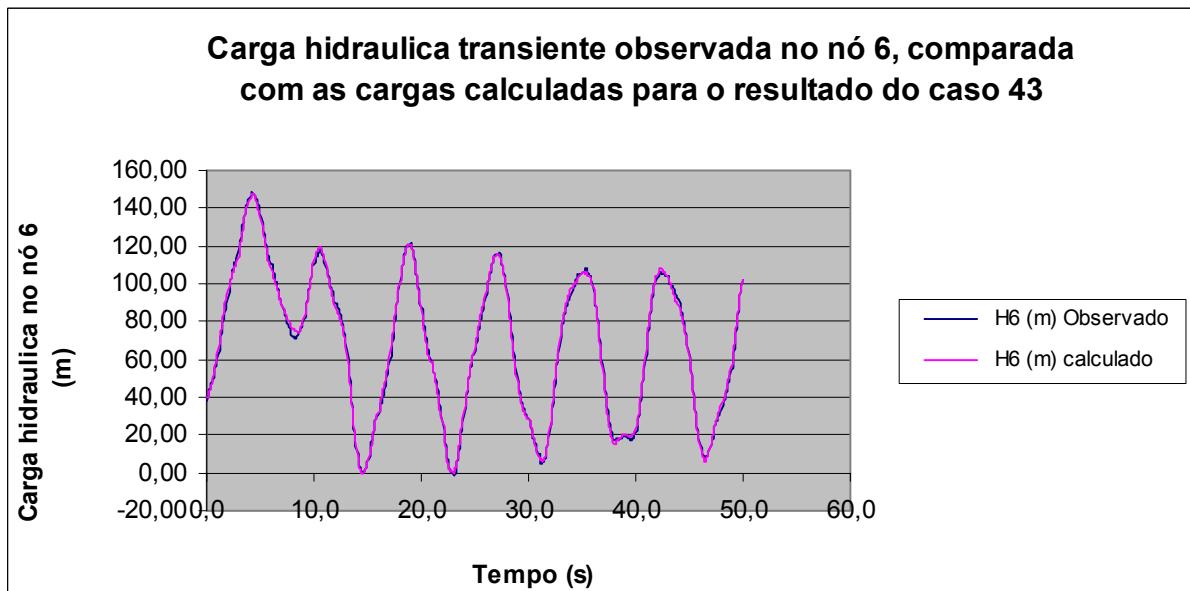
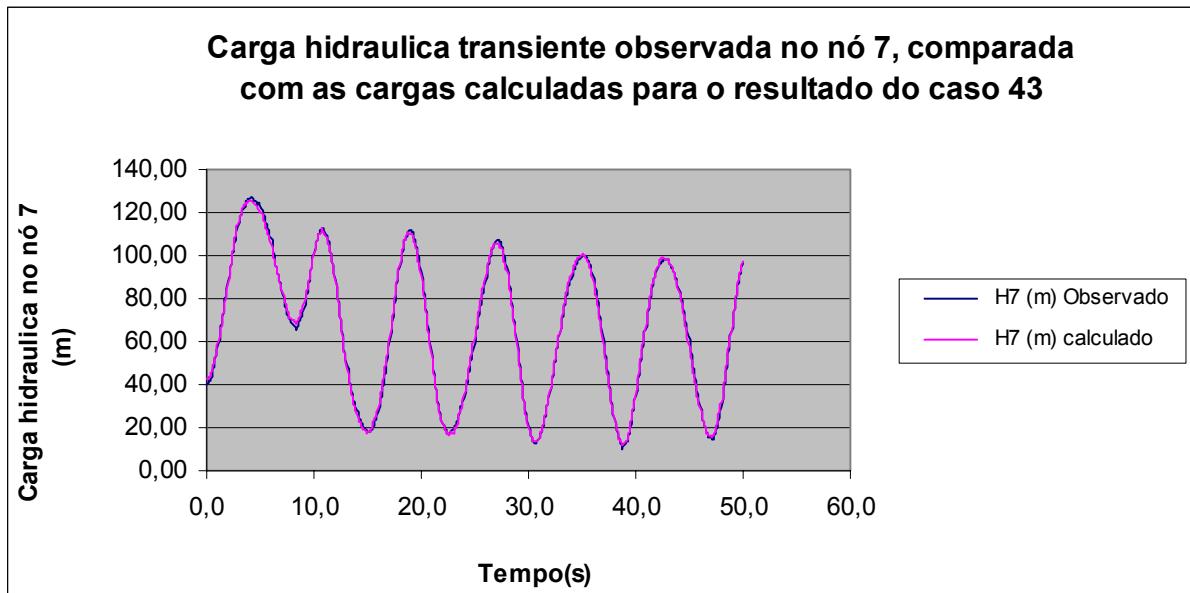
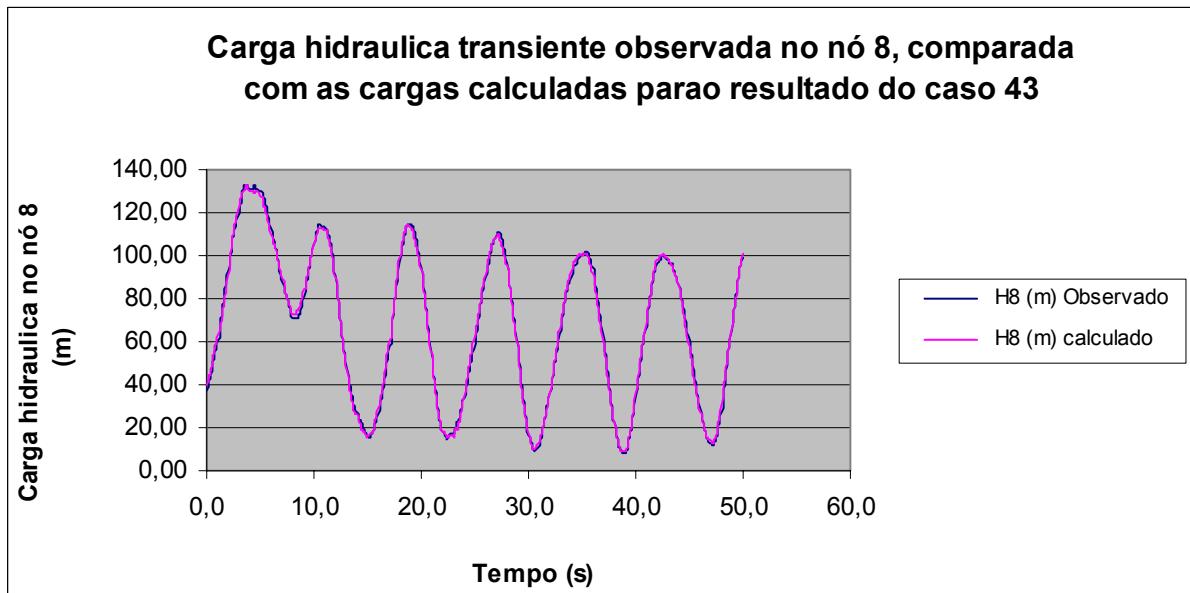


Figura 40 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 43).



**Figura 41 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 43).**



**Figura 42 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 43).**

### CASO 44

**Tabela 26 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 44).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0500  | 0.0500  | 0.0050  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0450  | 0.0250  | 0.0400  |
| 2         | 0.2600   | 0.3600  | 0.2900  | 0.2700  | 0.3600  | 0.2500  | 0.3600  | 0.3600  | 0.3300  | 0.3100  |
| 3         | 0.1500   | 0.1000  | 0.0450  | 0.3000  | 0.0700  | 0.0500  | 0.2400  | 0.1200  | 0.1100  | 0.3200  |
| 4         | 0.0400   | 0.0450  | 0.0700  | 0.1200  | 0.0700  | 0.0800  | 0.0600  | 0.0250  | 0.0700  | 0.0250  |
| 5         | 0.4900   | 0.3400  | 0.5200  | 0.0600  | 0.1800  | 0.4100  | 0.4500  | 0.5100  | 0.5800  | 0.4500  |
| 6         | 0.4500   | 0.2700  | 0.3900  | 0.1400  | 0.3800  | 0.2900  | 0.3200  | 0.4200  | 0.2300  | 1.0000  |
| 7         | 0.0500   | 0.3200  | 0.3100  | 0.0700  | 0.3600  | 0.3500  | 0.1700  | 0.2200  | 0.2000  | 0.1700  |
| 8         | 0.3600   | 0.0900  | 0.0900  | 0.3700  | 0.3900  | 0.1200  | 0.3900  | 0.5300  | 0.3500  | 0.3800  |
| 9         | 0.6000   | 0.5600  | 0.4700  | 0.1800  | 0.4300  | 1.0000  | 0.4000  | 0.5600  | 0.4800  | 0.4500  |
| 10        | 0.6100   | 0.2300  | 0.4600  | 0.4900  | 0.1700  | 0.4600  | 0.4700  | 0.0015  | 0.5400  | 0.5400  |
| Fobj      | 0.11353  | 0.11188 | 0.10923 | 0.15095 | 0.09418 | 0.09495 | 0.08495 | 0.10943 | 0.08053 | 0.13718 |
| Geração   | 14       | 39      | 19      | 34      | 18      | 35      | 37      | 18      | 38      | 39      |
| Tempo (s) | 615.17   | 658.52  | 643.42  | 660.34  | 649.03  | 599.08  | 658.92  | 610.37  | 655.16  | 631.97  |

**Tabela 27 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 44).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0365                      | 0.0035 | 8.8         |
| 2              | 0.30000                 | 0.3150                      | 0.0150 | 5.0         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1505                      | 0.0505 | 50.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0605                      | 0.0105 | 21.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3990                      | 0.1010 | 20.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3890                      | 0.0890 | 29.7        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2220                      | 0.0220 | 11.0        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3070                      | 0.0570 | 22.8        |
| 9              | 0.55000                 | 0.5130                      | 0.0370 | 6.7         |
| 10             | 0.60000                 | 0.3972                      | 0.2029 | 33.8        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>20.9</b> |

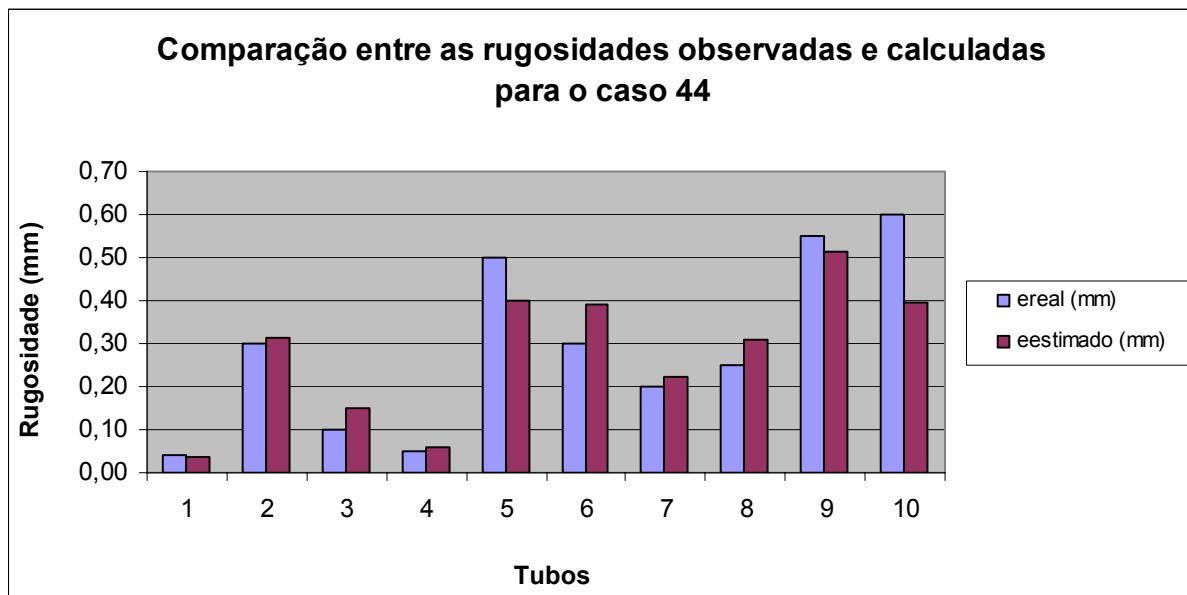


Figura 43 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 44.

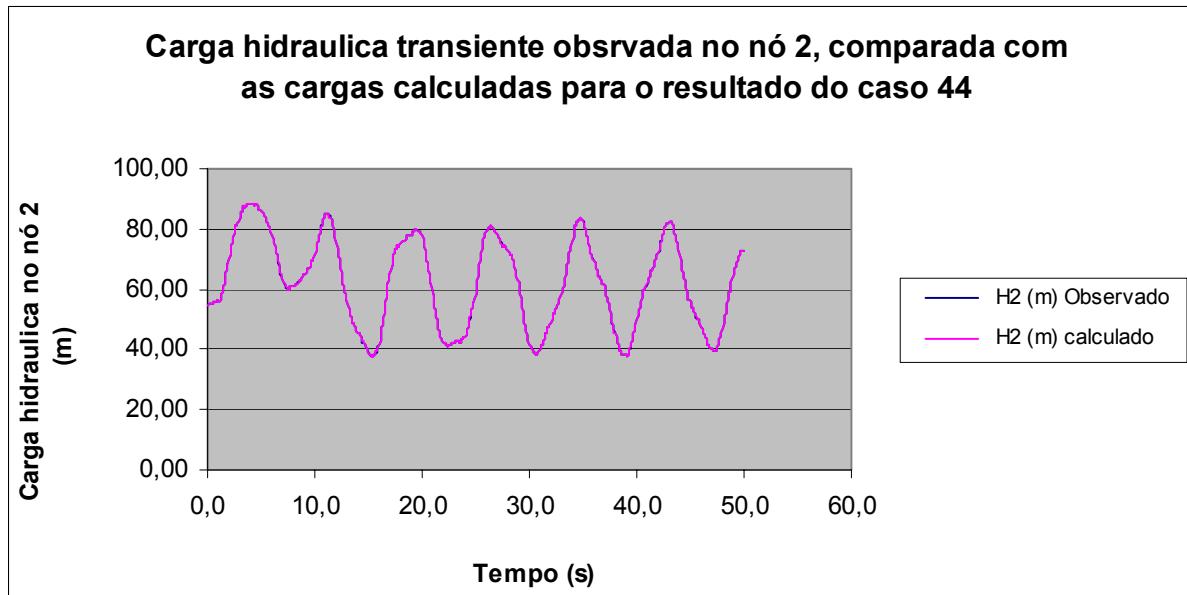


Figura 44 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 44).

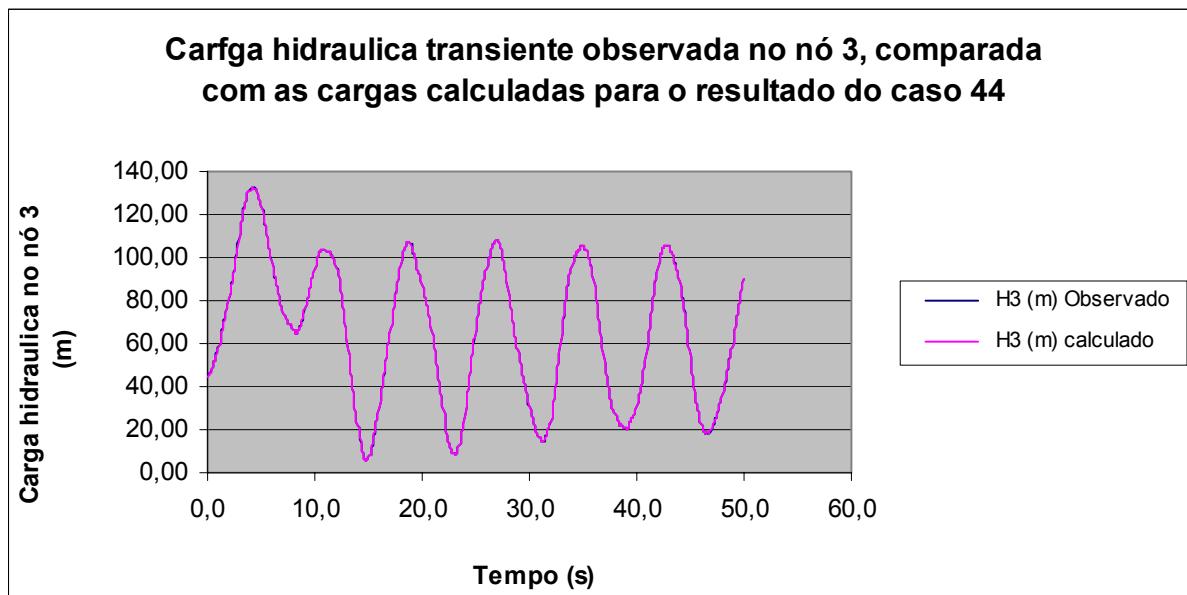


Figura 45 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 44).

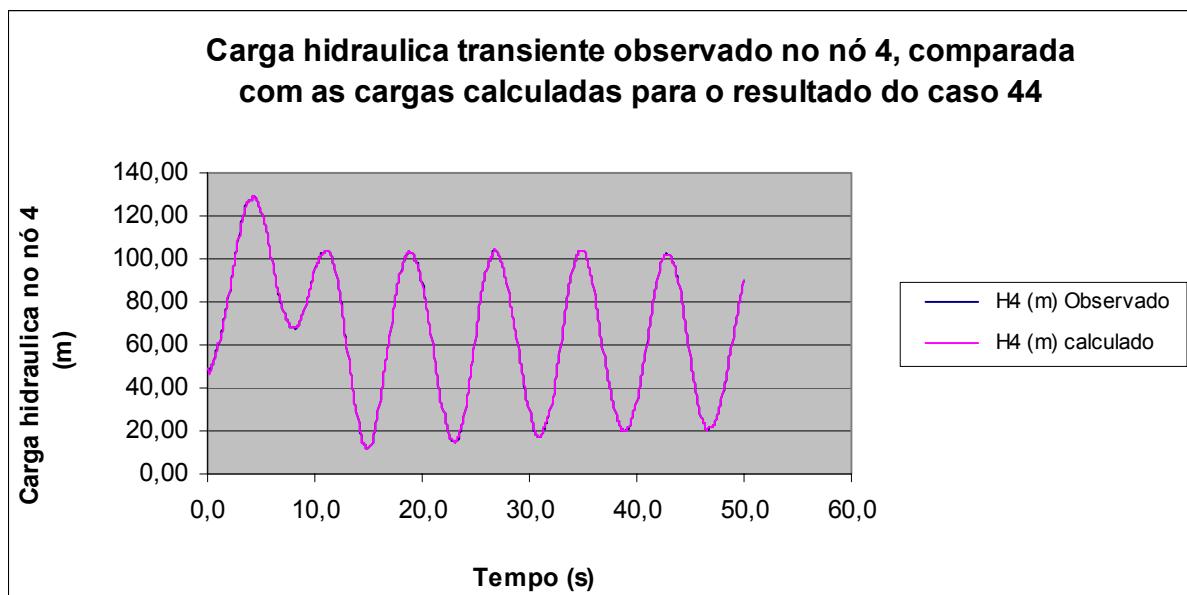
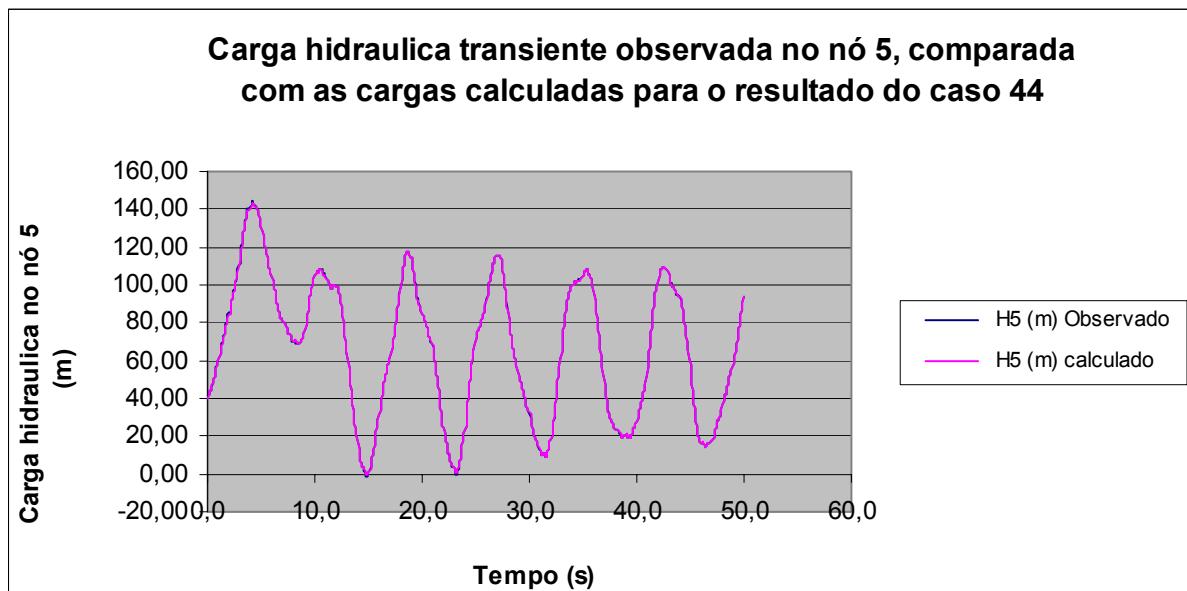
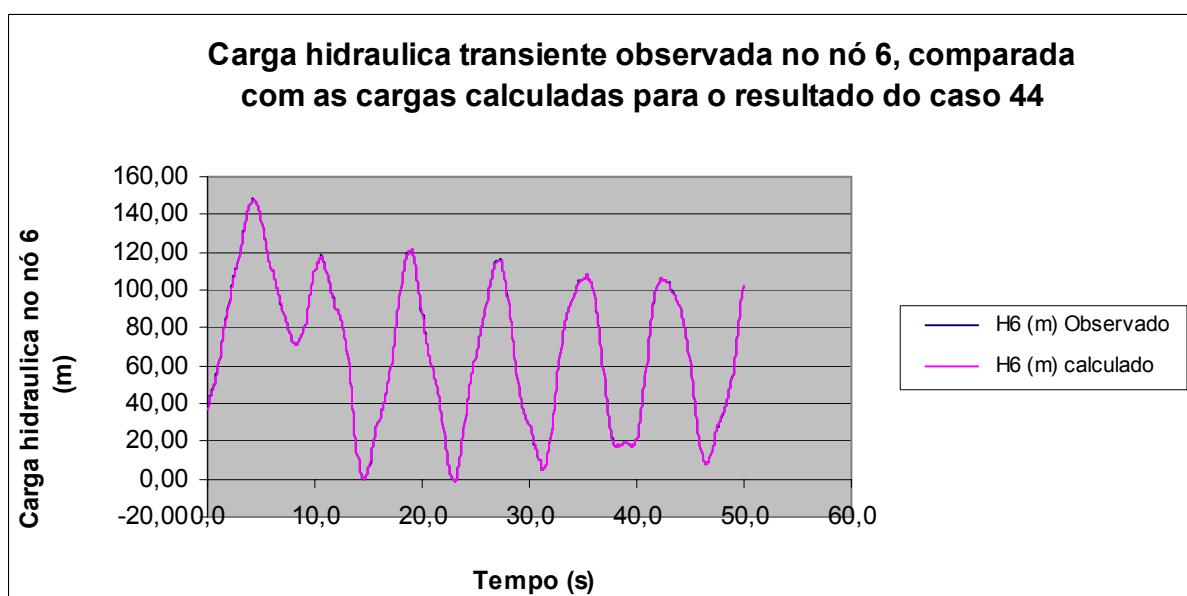


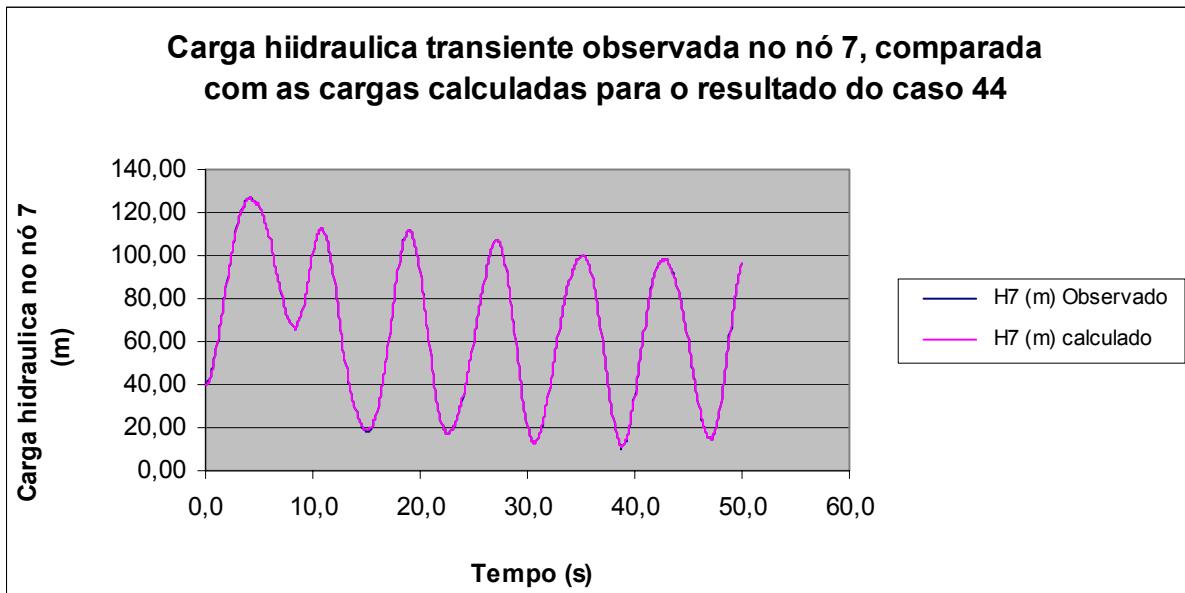
Figura 46 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 44).



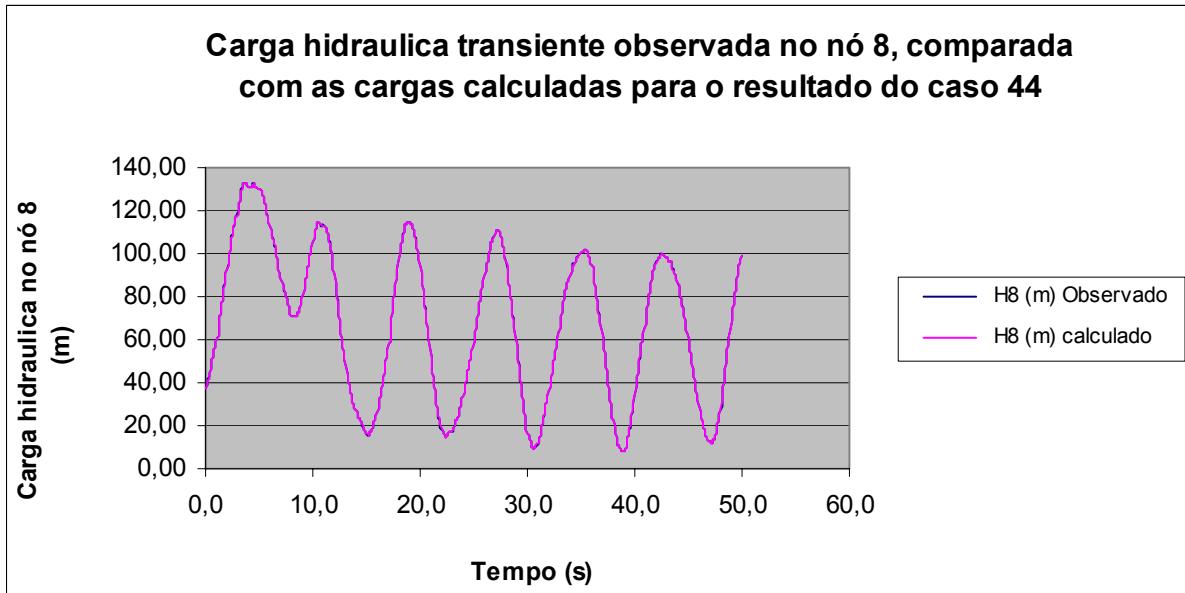
**Figura 47 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 44).**



**Figura 48 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 44).**



**Figura 49 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 44).**



**Figura 50 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 44).**

Com o objetivo de se avaliar a influência do tipo de variação de demanda na eficiência da calibração, os seguintes procedimentos foram adotados para o pior caso (13) e para os três melhores encontrados (42,43 e 44). O tipo de manobra da variação de demanda desta vez será suave, com uma duração de 40 segundos. Os resultados dos EMR para estes casos suaves foram melhores para os casos 13, 42 e 43. Para o caso 44 praticamente ficou estável, como percebe-se ao comparar os dados da fase 2 com os da fase 3 a seguir, conforme Tabela 28:

**Tabela 28 – Resultados para manobra suave (40 s).**

|              | FASE 3 |       |     |    |    |     |       |        |
|--------------|--------|-------|-----|----|----|-----|-------|--------|
|              | PC (%) | PM    | DT  | TS | NG | NC  | NM    | EMR(%) |
| CASO 13Suave | 100    | 0.005 | 0.1 | 10 | 10 | 10  | 5     | 99.5   |
| CASO 42Suave | 100    | 0.05  | 0.1 | 10 | 40 | 100 | TODOS | 20.9   |
| CASO 43Suave | 100    | 0.05  | 0.1 | 20 | 40 | 100 | TODOS | 18.9   |
| CASO 44Suave | 100    | 0.05  | 0.1 | 40 | 40 | 100 | TODOS | 21     |

Assim como ocorreu para os melhores casos na variação brusca de demanda, pode-se observar também que nos melhores casos para a manobra suave, as cargas hidráulicas transientes também tiveram uma grande aproximação, apesar de fornecerem resultados distintos para a rugosidade. Este fato pode ser constatado, observando os gráficos dos casos a seguir.

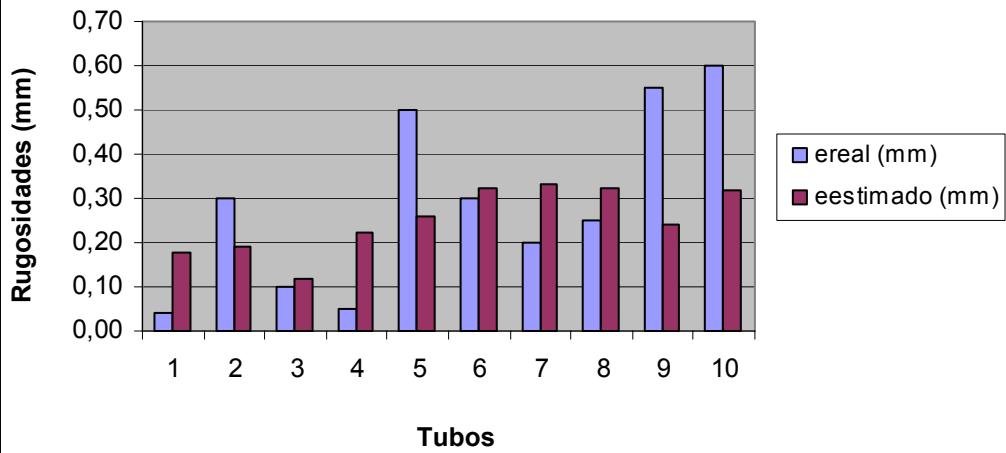
### **CASO 13 SUAVE**

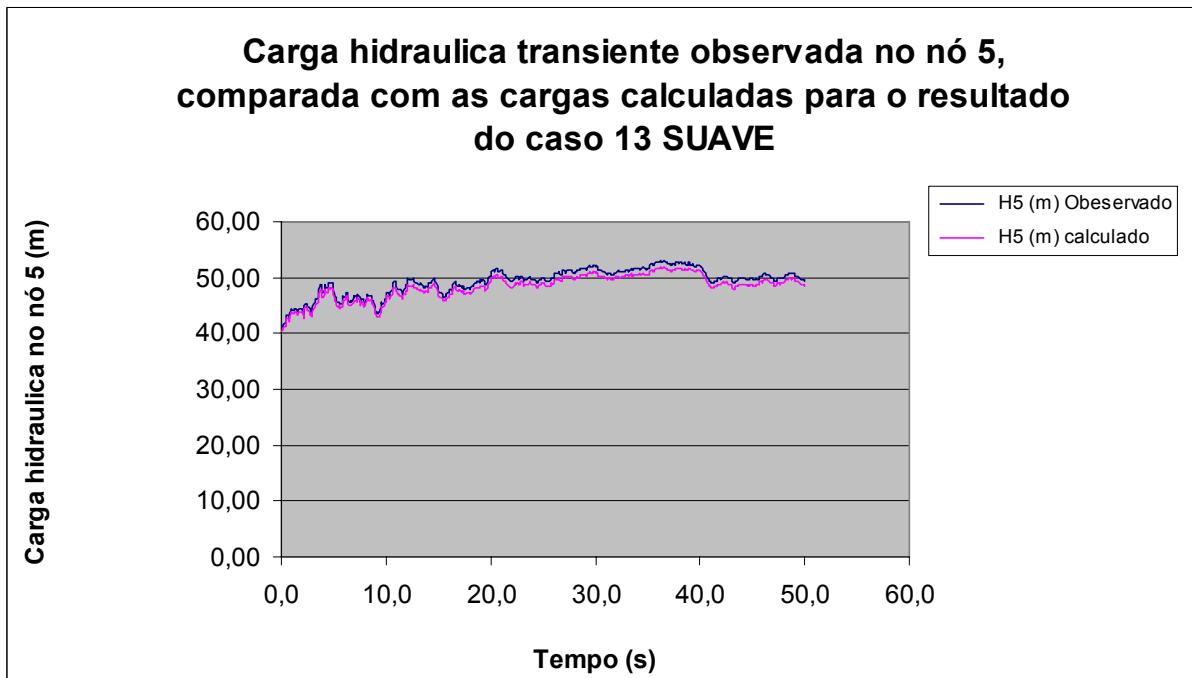
**Tabela 29 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 13 Suave).**

| Tubo      | Sementes |        |         |         |         |         |        |         |         |         |
|-----------|----------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2      | 3       | 4       | 5       | 6       | 7      | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0050   | 0.0050 | 0.3900  | 0.2800  | 0.0015  | 0.2000  | 0.1900 | 0.3000  | 0.1000  | 0.2900  |
| 2         | 0.4300   | 0.2200 | 0.3000  | 0.2100  | 0.2000  | 0.2300  | 0.0800 | 0.2000  | 0.0450  | 0.0050  |
| 3         | 0.0900   | 0.0400 | 0.0250  | 0.0250  | 0.4600  | 0.0900  | 0.0500 | 0.1300  | 0.0900  | 0.1900  |
| 4         | 0.2400   | 0.4500 | 0.0800  | 0.0600  | 0.3700  | 0.0050  | 0.1000 | 0.3000  | 0.2300  | 0.4000  |
| 5         | 0.6100   | 0.5200 | 0.4700  | 0.3100  | 0.3000  | 0.0015  | 0.0400 | 0.0050  | 0.2600  | 0.0900  |
| 6         | 0.1500   | 0.4100 | 0.5200  | 0.3700  | 0.0450  | 0.5100  | 0.2500 | 0.0700  | 0.4600  | 0.4200  |
| 7         | 0.4700   | 0.4800 | 0.1800  | 0.0900  | 0.5200  | 0.3300  | 0.3100 | 0.4200  | 0.0900  | 0.4300  |
| 8         | 0.0500   | 0.5700 | 0.1700  | 0.4200  | 0.0800  | 0.1800  | 0.4600 | 0.1700  | 0.12    | 1.0000  |
| 9         | 0.3400   | 0.5600 | 0.1800  | 0.2100  | 0.0250  | 0.2200  | 0.2600 | 0.0400  | 0.34    | 0.2200  |
| 10        | 0.1100   | 0.3600 | 0.6100  | 0.5700  | 0.1600  | 0.0400  | 0.2200 | 0.3000  | 0.3000  | 0.5100  |
| Fobj      | 0.094    | 0.3112 | 0.53545 | 0.38983 | 0.38401 | 0.39676 | 0.3067 | 0.76086 | 0.21889 | 0.85889 |
| Geração   | 10       | 1      | 2       | 1       | 2       | 10      | 6      | 10      | 2       | 1       |
| Tempo (s) | 14.58    | 14.37  | 16.47   | 14.67   | 12.97   | 13.48   | 13.98  | 12.77   | 14.95   | 13.34   |

**Tabela 30 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 13 Suave).**

| Tubo | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA             | ER (%)      |
|------|-------------------------|-----------------------------|----------------|-------------|
| 1    | 0.04000                 | 0.1762                      | 0.1362         | 340.4       |
| 2    | 0.30000                 | 0.1920                      | 0.1080         | 36.0        |
| 3    | 0.10000                 | 0.1190                      | 0.0190         | 19.0        |
| 4    | 0.05000                 | 0.2235                      | 0.1735         | 347.0       |
| 5    | 0.50000                 | 0.2607                      | 0.2394         | 47.9        |
| 6    | 0.30000                 | 0.3205                      | 0.0205         | 6.8         |
| 7    | 0.20000                 | 0.3320                      | 0.1320         | 66.0        |
| 8    | 0.25000                 | 0.3220                      | 0.0720         | 28.8        |
| 9    | 0.55000                 | 0.2395                      | 0.3105         | 56.5        |
| 10   | 0.60000                 | 0.3180                      | 0.2820         | 47.0        |
|      |                         |                             | <b>EMR (%)</b> | <b>99.5</b> |

**Comparação entre as rugosidades observadas e calculadas para o caso 13 SUAVE****Figura 51 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 13 Suave.**



**Figura 52 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 13 Suave).**

### Caso 42 SUAVE

**Tabela 31 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 42 Suave).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |        |        |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9      | 10     |
| 1         | 0.0450   | 0.0450  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0250  | 0.0015  | 0.0450  | 0.0500 | 0.1600 |
| 2         | 0.4300   | 0.1300  | 0.1800  | 0.2300  | 0.3700  | 0.4200  | 0.3600  | 0.3200  | 0.4900 | 0.0400 |
| 3         | 0.1000   | 0.1400  | 0.1300  | 0.1200  | 0.1600  | 0.0900  | 0.1500  | 0.0800  | 0.0700 | 0.1300 |
| 4         | 0.0450   | 0.0400  | 0.0500  | 0.0450  | 0.0800  | 0.1200  | 0.0600  | 0.1200  | 0.0450 | 0.0050 |
| 5         | 0.2100   | 0.4200  | 0.5500  | 0.2100  | 0.3000  | 0.0450  | 0.4600  | 0.1600  | 0.4000 | 0.4900 |
| 6         | 0.1500   | 0.0500  | 0.0800  | 0.2600  | 0.4500  | 0.5800  | 0.2000  | 1.0000  | 0.3500 | 0.1200 |
| 7         | 0.2400   | 0.3100  | 0.2200  | 0.1900  | 0.1300  | 0.1200  | 0.1400  | 0.1200  | 0.2200 | 0.2700 |
| 8         | 0.0250   | 0.0450  | 0.2400  | 0.4900  | 0.3600  | 0.0500  | 0.1700  | 0.1900  | 0.1100 | 0.2500 |
| 9         | 0.5000   | 0.5400  | 0.5200  | 0.4300  | 0.3100  | 0.3400  | 0.3500  | 0.3500  | 0.2800 | 0.5700 |
| 10        | 0.0900   | 0.1600  | 0.3300  | 0.4300  | 0.2600  | 0.0400  | 0.0450  | 0.2800  | 0.0250 | 0.3200 |
| Fobj      | 0.16633  | 0.11449 | 0.13817 | 0.12018 | 0.18413 | 0.18244 | 0.22044 | 0.28087 | 0.1609 | 0.3351 |
| Geração   | 19       | 40      | 39      | 34      | 39      | 39      | 10      | 4       | 28     | 18     |
| Tempo (s) | 613.89   | 594.69  | 574.37  | 591.09  | 645.81  | 603.12  | 593.28  | 569     | 631.84 | 580.64 |

**Tabela 32 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 42 Suave).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0442                      | 0.0042 | 10.4        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2970                      | 0.0030 | 1.0         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1170                      | 0.0170 | 17.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0610                      | 0.0110 | 22.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3245                      | 0.1755 | 35.1        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3240                      | 0.0240 | 8.0         |
| 7              | 0.20000                 | 0.1960                      | 0.0040 | 2.0         |
| 8              | 0.25000                 | 0.1930                      | 0.0570 | 22.8        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4190                      | 0.1310 | 23.8        |
| 10             | 0.60000                 | 0.1980                      | 0.4020 | 67.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>20.9</b> |

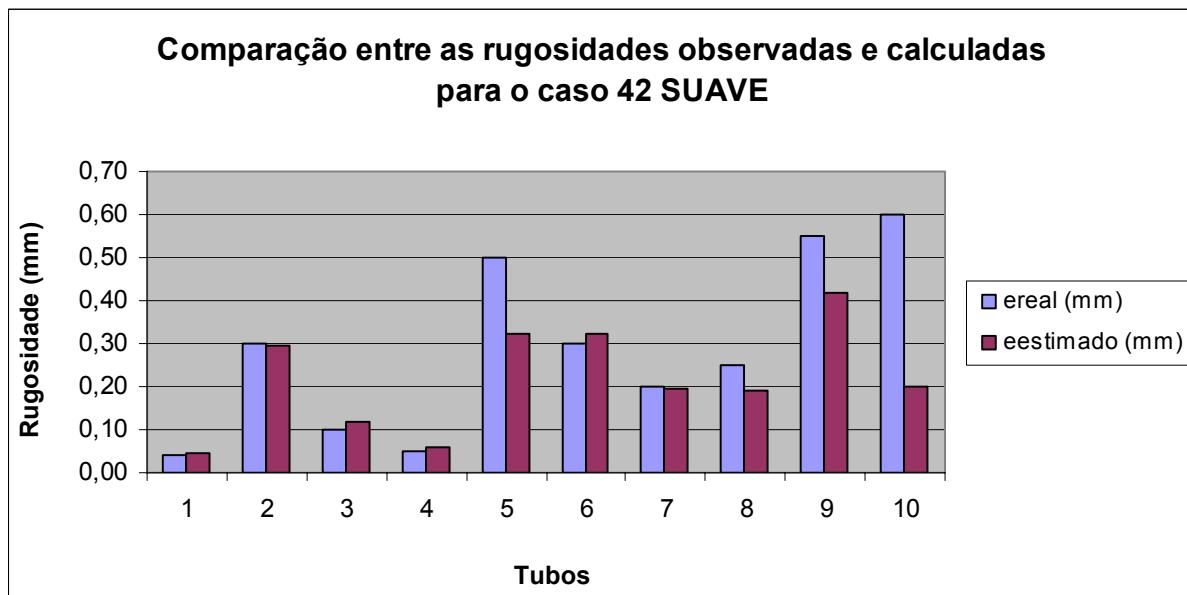


Figura 53 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 42 Suave.

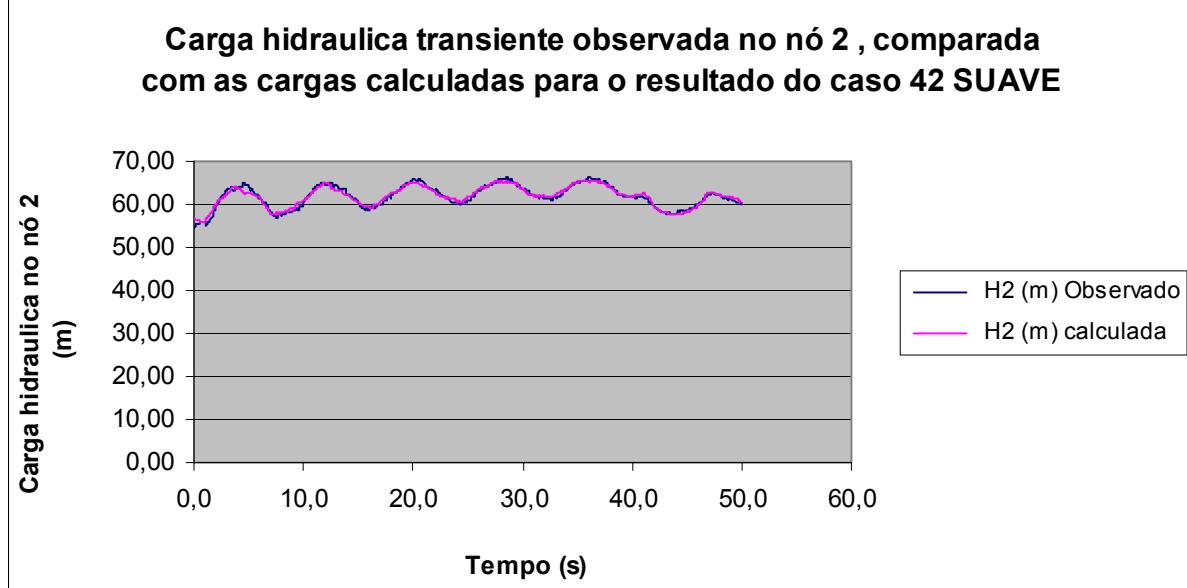
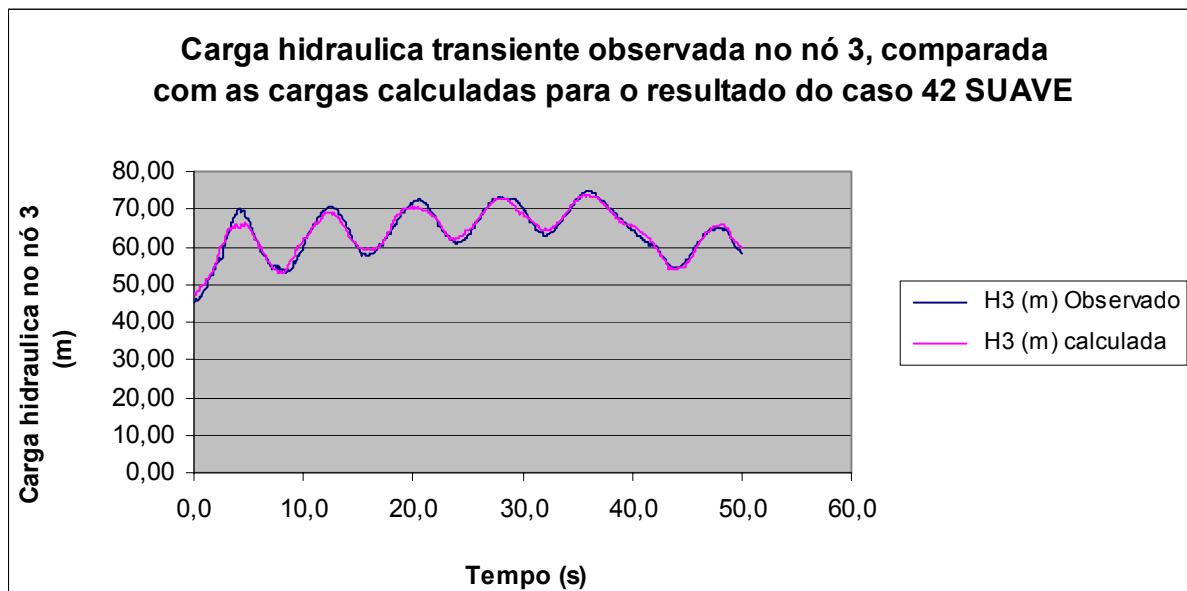
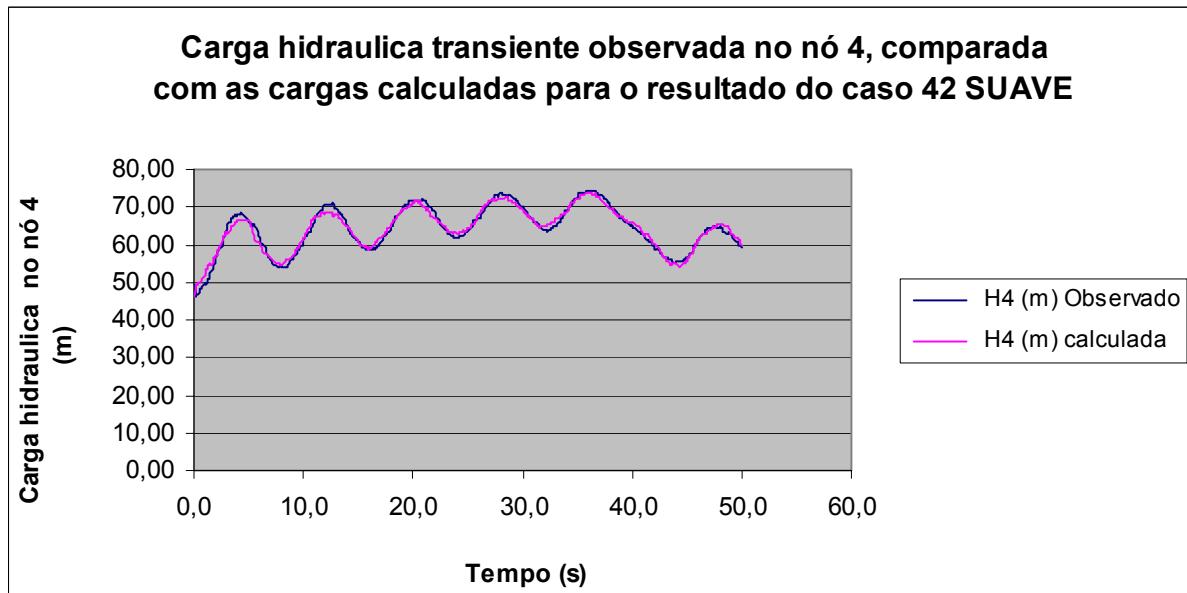


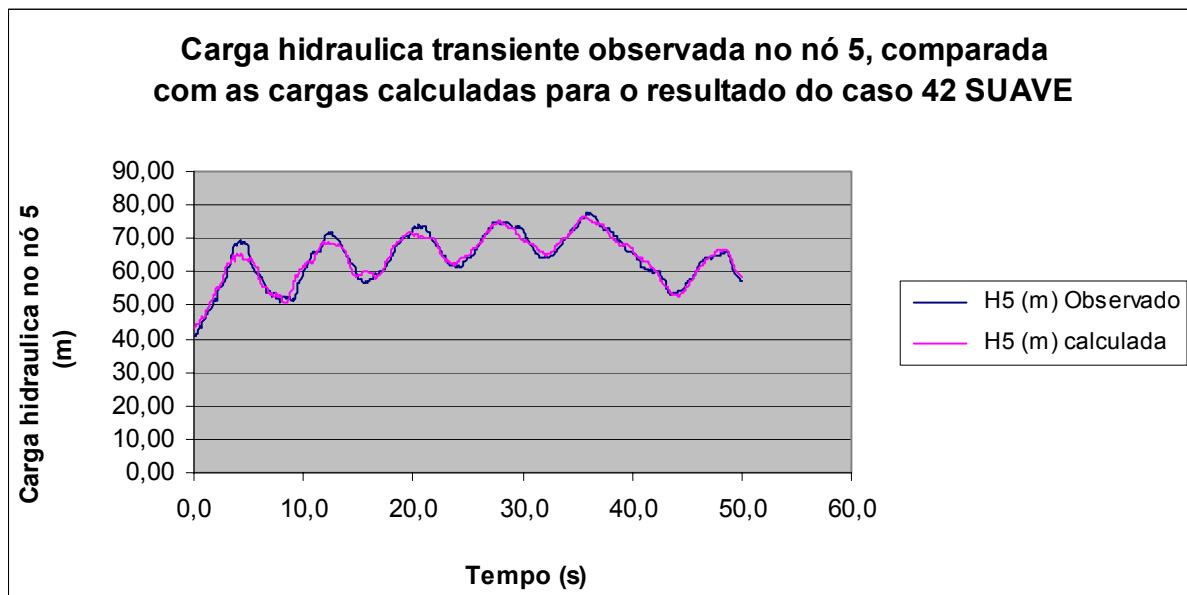
Figura 54 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 42 Suave).



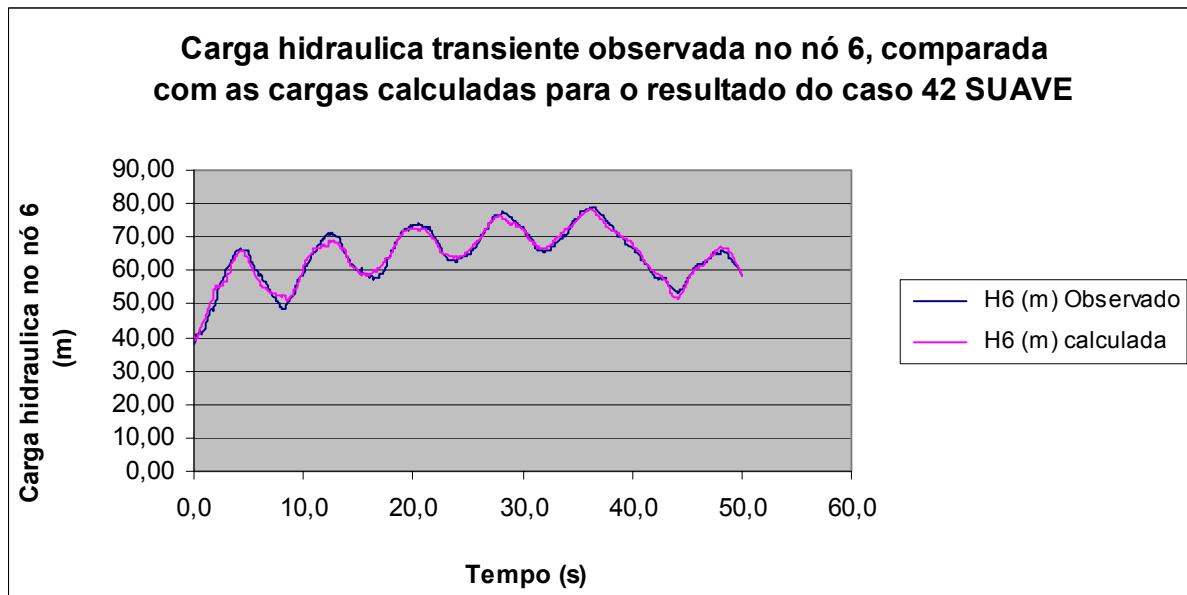
**Figura 55 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 42 Suave).**



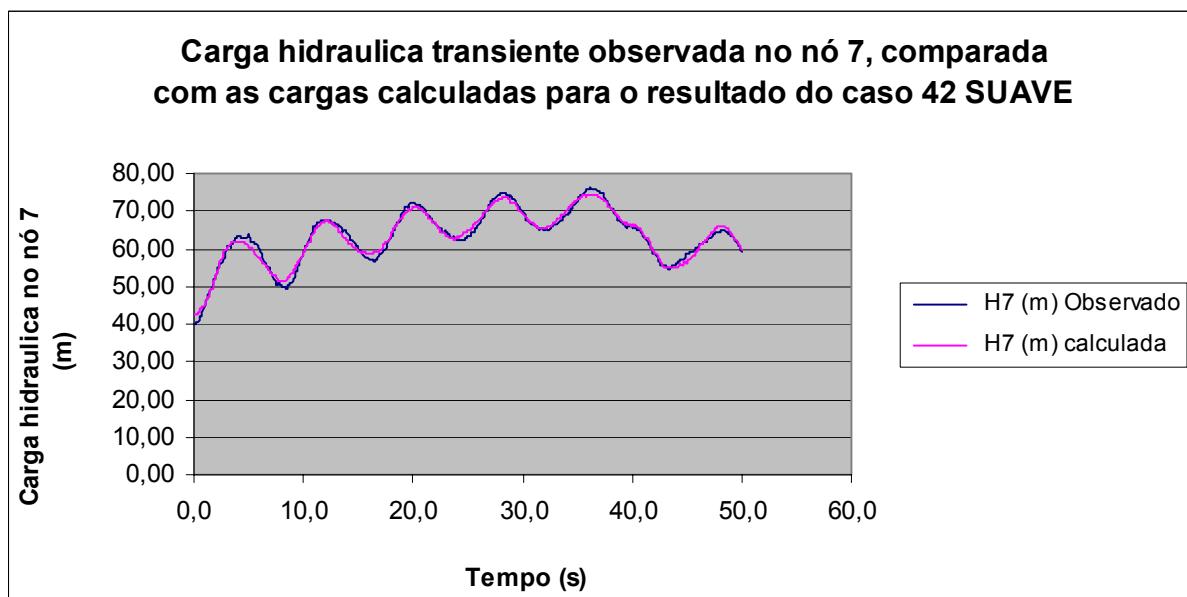
**Figura 56 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 42 Suave).**



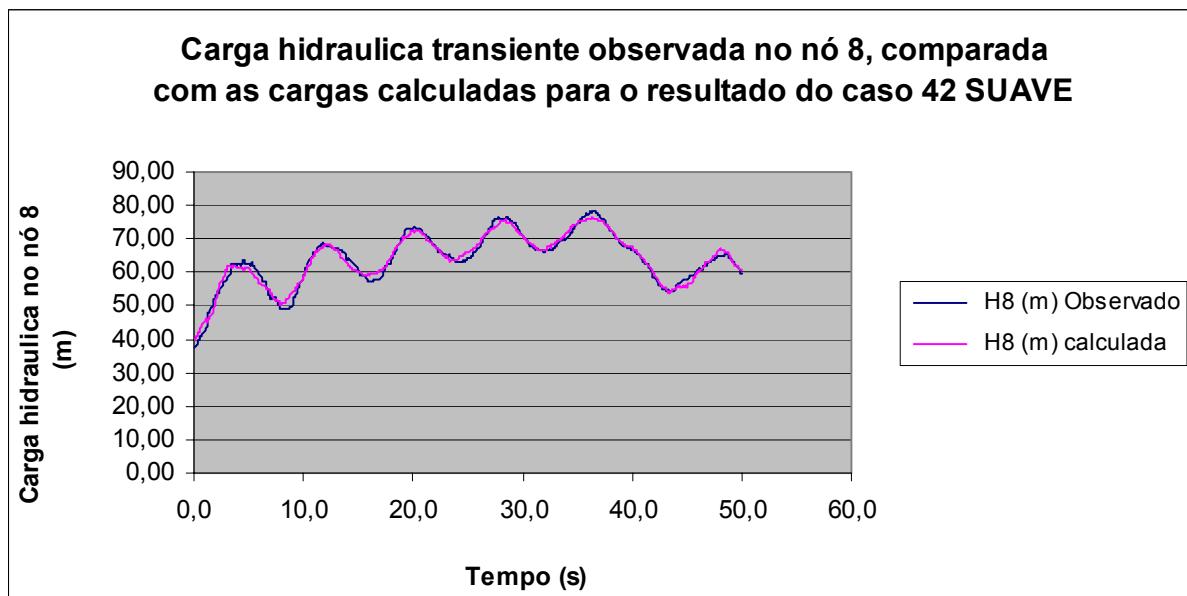
**Figura 57 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 42 Suave).**



**Figura 58 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 42 Suave).**



**Figura 59 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 42 Suave).**



**Figura 60 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 42 Suave).**

### Caso 43 SUAVE

**Tabela 33 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 43 Suave).**

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0700   | 0.0450  | 0.0400  | 0.0450  | 0.0450  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0500  | 0.0450  | 0.0400  |
| 2         | 0.0900   | 0.3400  | 0.3800  | 0.1700  | 0.3600  | 0.4900  | 0.5200  | 0.1700  | 0.0500  | 0.4600  |
| 3         | 0.1100   | 0.0800  | 0.0800  | 0.1400  | 0.0900  | 0.0700  | 0.0700  | 0.1500  | 0.2800  | 0.0450  |
| 4         | 0.0500   | 0.0900  | 0.0700  | 0.0500  | 0.0600  | 0.0700  | 0.0700  | 0.0250  | 0.0250  | 0.1100  |
| 5         | 0.3600   | 0.4600  | 0.4200  | 0.2700  | 0.3400  | 0.4200  | 0.2500  | 0.5500  | 0.5800  | 0.1900  |
| 6         | 0.1500   | 0.2900  | 0.5700  | 0.3800  | 0.4000  | 0.5500  | 0.1600  | 0.0050  | 0.1300  | 0.5900  |
| 7         | 0.1500   | 0.0500  | 0.1100  | 0.1500  | 0.1600  | 0.1800  | 0.2200  | 0.3400  | 0.2200  | 0.0800  |
| 8         | 0.3200   | 0.1600  | 0.0800  | 0.5200  | 0.3300  | 0.0250  | 0.2500  | 0.2700  | 0.4000  | 0.4600  |
| 9         | 0.5000   | 0.2900  | 0.6000  | 0.3600  | 0.3400  | 0.6100  | 0.2600  | 0.5900  | 0.3900  | 0.3700  |
| 10        | 0.3000   | 0.1200  | 0.5600  | 0.1300  | 0.0400  | 0.5900  | 0.0450  | 0.0600  | 0.4400  | 0.1700  |
| Fobj      | 0.14358  | 0.16881 | 0.09776 | 0.10382 | 0.10268 | 0.08715 | 0.13873 | 0.06588 | 0.15846 | 0.17646 |
| Geração   | 36       | 37      | 39      | 21      | 40      | 40      | 39      | 35      | 5       | 24      |
| Tempo (s) | 578.42   | 571.28  | 637.37  | 637.25  | 680.77  | 696.3   | 688.5   | 661.36  | 665.56  | 629.98  |

**Tabela 34 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 43 Suave).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0445                      | 0.0045 | 11.3        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3030                      | 0.0030 | 1.0         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1115                      | 0.0115 | 11.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0620                      | 0.0120 | 24.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3840                      | 0.1160 | 23.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3225                      | 0.0225 | 7.5         |
| 7              | 0.20000                 | 0.1660                      | 0.0340 | 17.0        |
| 8              | 0.25000                 | 0.2815                      | 0.0315 | 12.6        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4310                      | 0.1190 | 21.6        |
| 10             | 0.60000                 | 0.2455                      | 0.3545 | 59.1        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>18.9</b> |

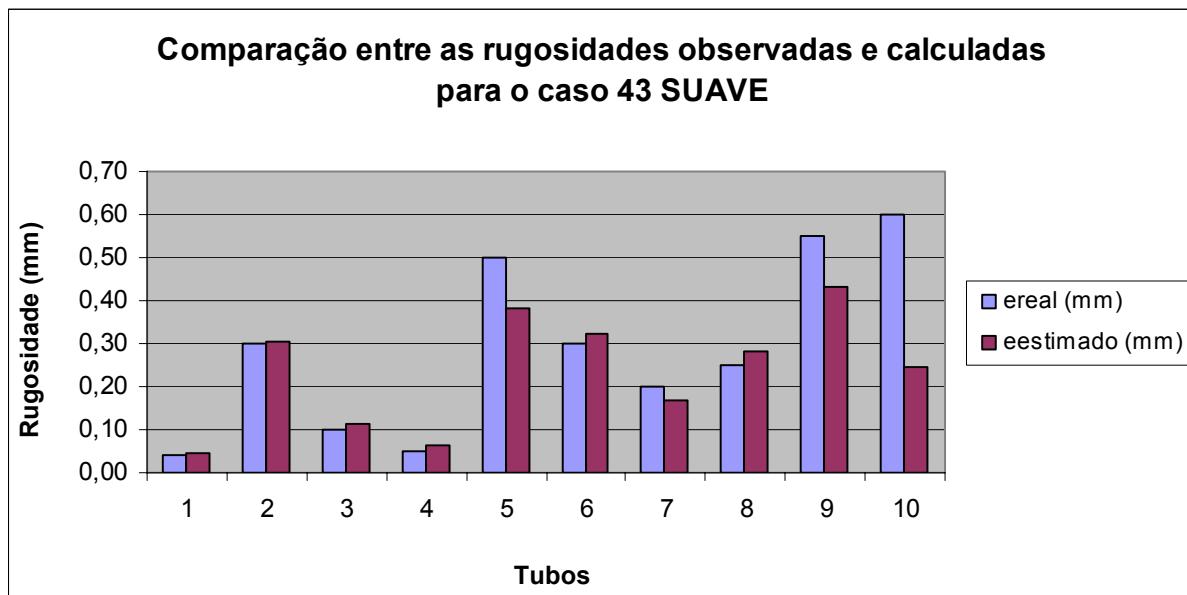


Figura 61 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 43 Suave

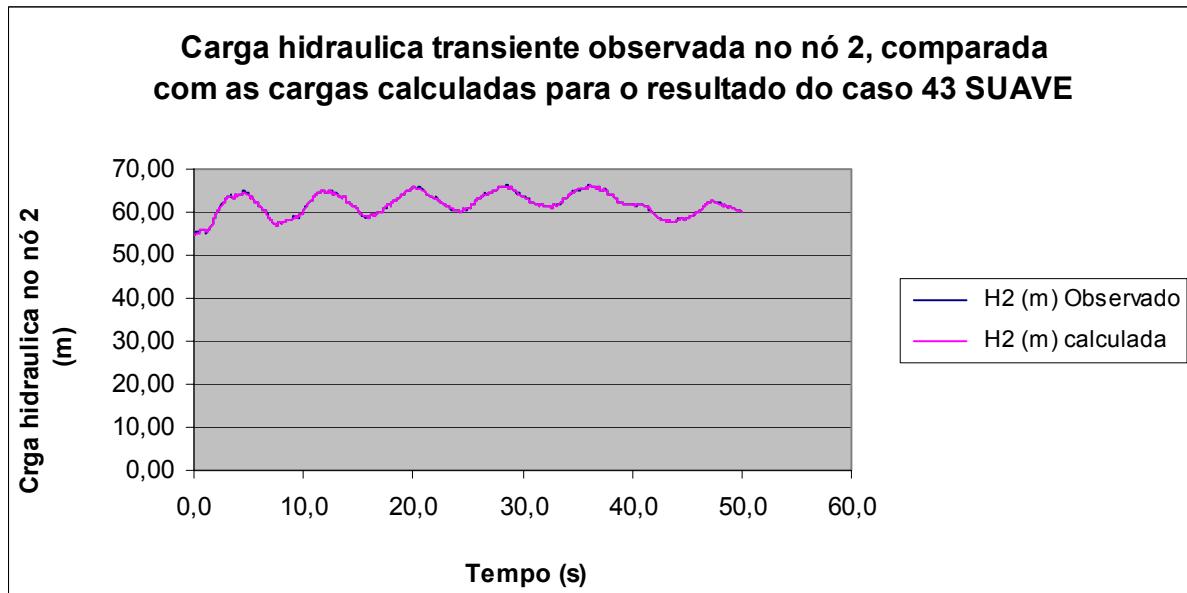


Figura 62 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 43 Suave).

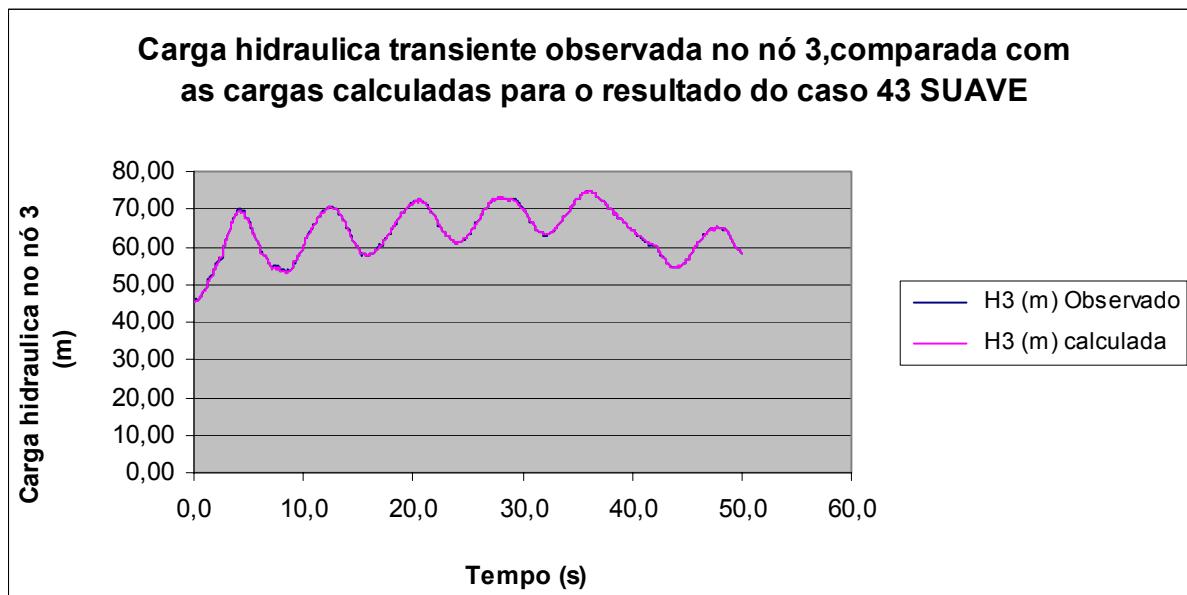


Figura 63 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 43 Suave).

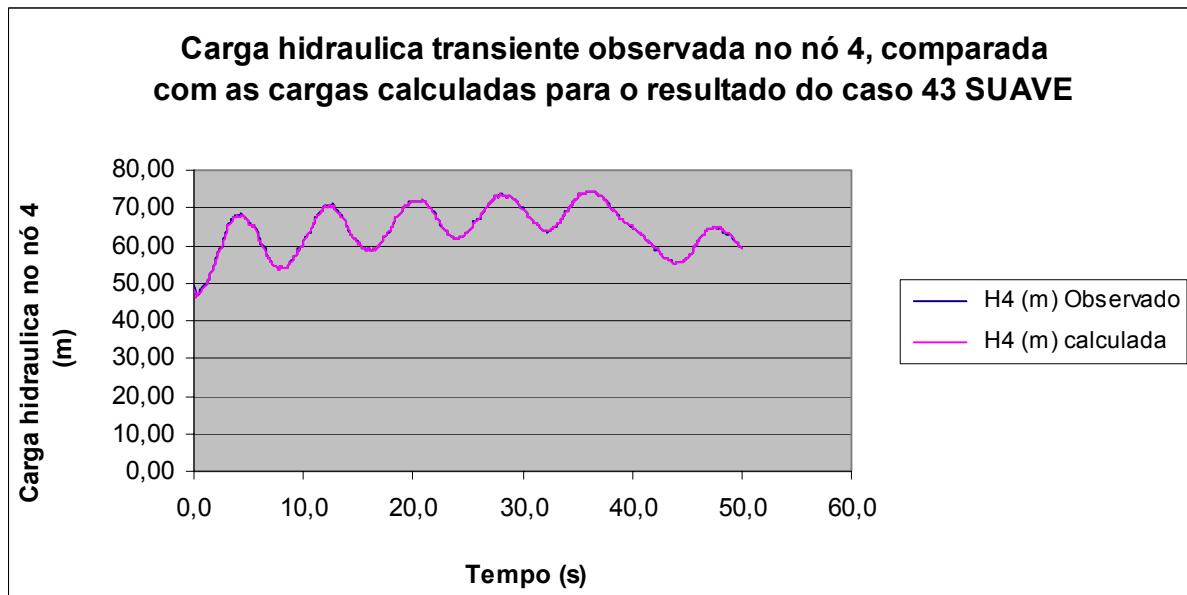
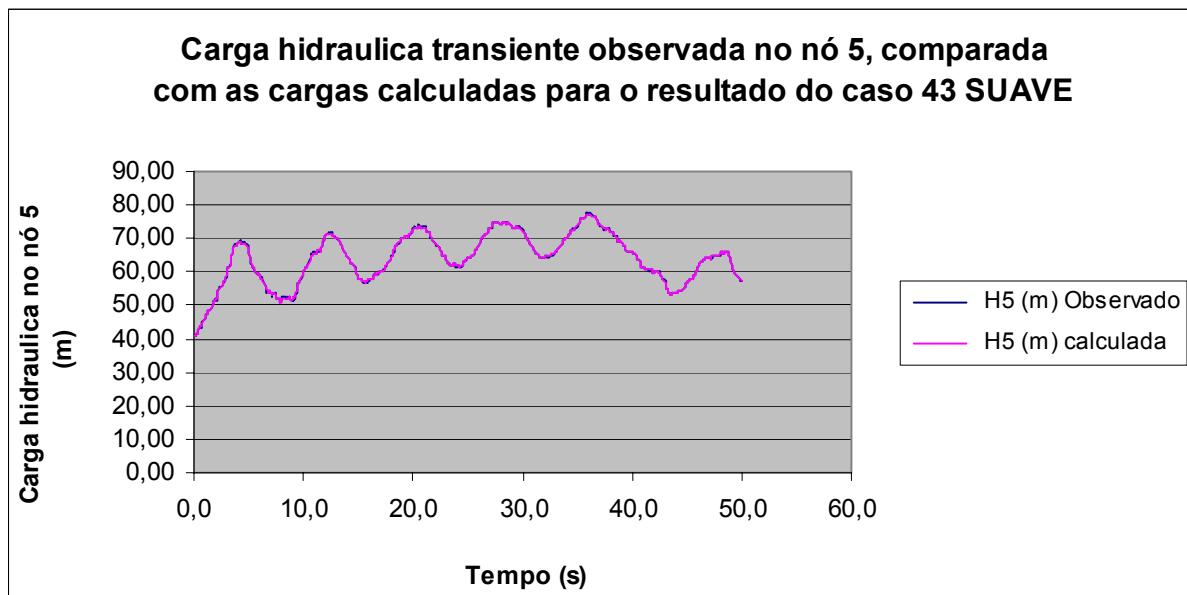
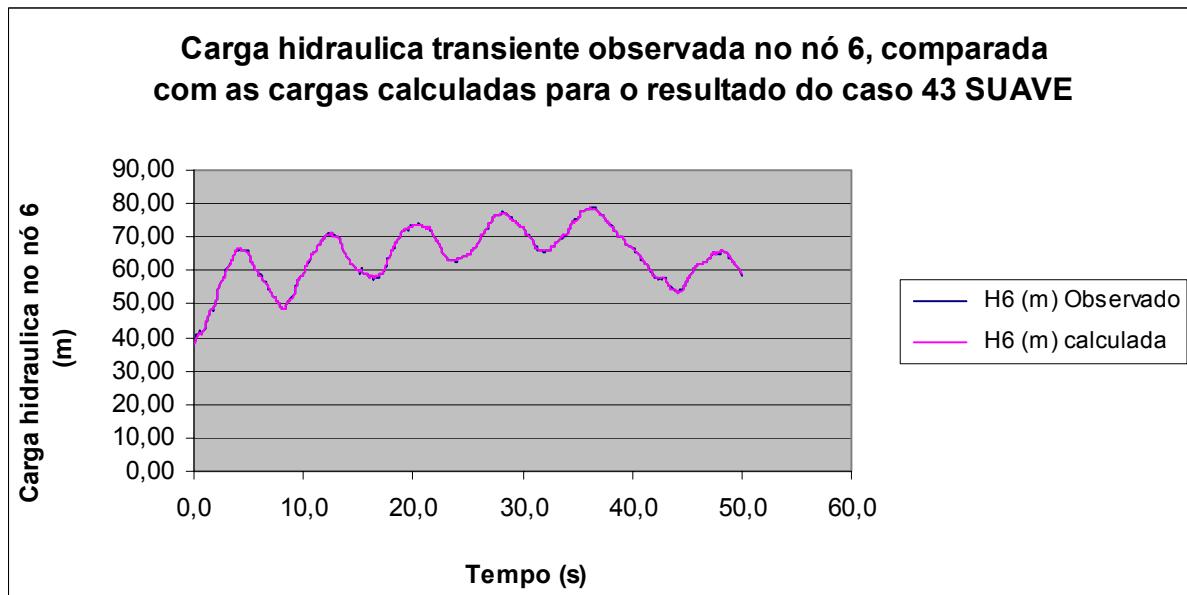


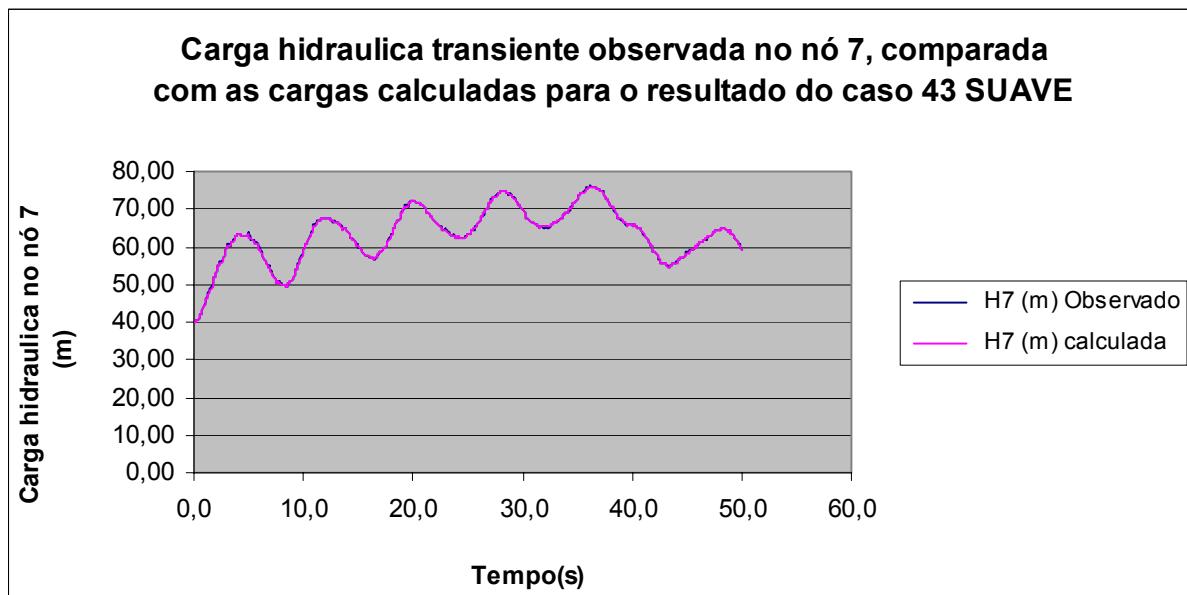
Figura 64 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 43 Suave).



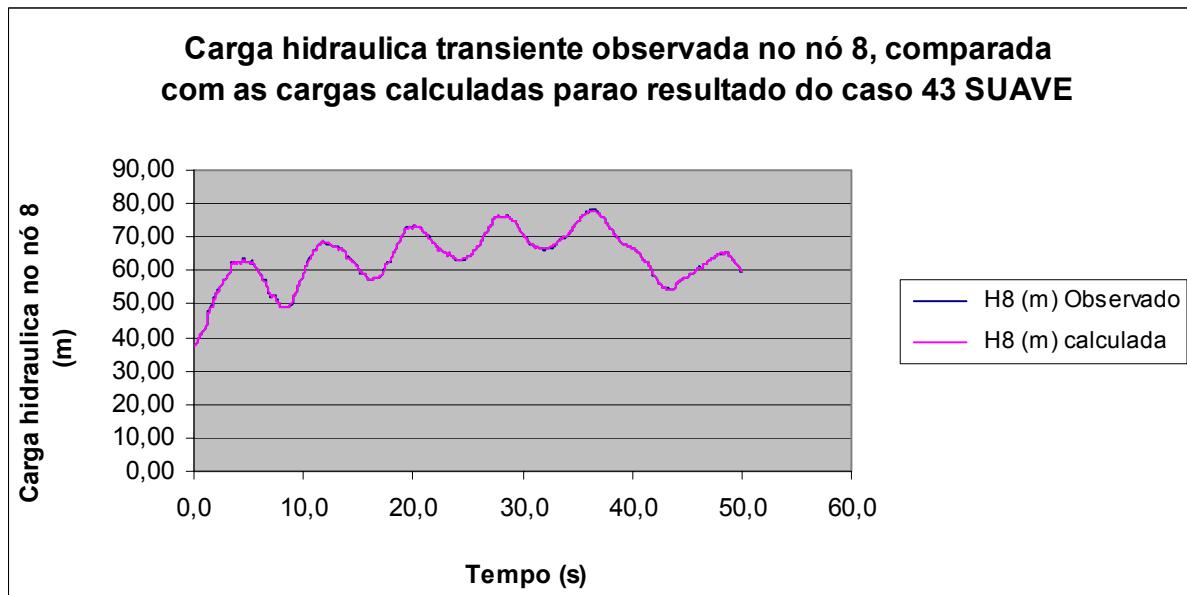
**Figura 65 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 43 Suave).**



**Figura 66 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 43 Suave).**



**Figura 67 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 43 Suave).**



**Figura 68 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 43 Suave).**

### Caso 44 Suave

**Tabela 35 – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 44 Suave).**

| Tubo      | Sementes |         |         |        |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4      | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0400  | 0.0400  | 0.0050 | 0.0015  | 0.0400  | 0.0400  | 0.0400  | 0.0250  | 0.0450  |
| 2         | 0.1200   | 0.5600  | 0.5700  | 0.4400 | 0.1500  | 0.1300  | 0.3500  | 0.3200  | 0.2300  | 0.0050  |
| 3         | 0.0800   | 0.0600  | 0.0600  | 0.1800 | 0.2700  | 0.1700  | 0.1900  | 0.1700  | 0.1700  | 0.1800  |
| 4         | 0.0450   | 0.1200  | 0.0600  | 0.0600 | 0.0450  | 0.0450  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0450  | 0.0500  |
| 5         | 0.5000   | 0.0800  | 0.3700  | 0.1900 | 0.4900  | 0.4900  | 0.5700  | 0.6100  | 0.5800  | 0.4700  |
| 6         | 0.3800   | 0.5100  | 0.4200  | 0.0250 | 0.0015  | 0.0800  | 0.0015  | 0.2100  | 0.0900  | 0.5900  |
| 7         | 0.1400   | 0.0900  | 0.1800  | 0.4000 | 0.4300  | 0.2000  | 0.3200  | 0.1500  | 0.2300  | 0.2800  |
| 8         | 0.1500   | 0.0015  | 0.0015  | 0.4000 | 0.4300  | 0.3800  | 0.3700  | 0.0500  | 0.4500  | 0.4200  |
| 9         | 0.3900   | 0.3600  | 0.5900  | 0.3400 | 0.3600  | 0.5600  | 0.2300  | 0.3700  | 0.5200  | 0.4500  |
| 10        | 0.1000   | 0.1700  | 0.4200  | 0.4200 | 0.4600  | 0.2900  | 0.3500  | 0.2500  | 0.2200  | 0.4800  |
| Fobj      | 0.12491  | 0.11024 | 0.06472 | 0.1328 | 0.15368 | 0.05057 | 0.08307 | 0.07403 | 0.06608 | 0.14322 |
| Geração   | 38       | 37      | 39      | 38     | 29      | 39      | 19      | 40      | 40      | 21      |
| Tempo (s) | 630.28   | 658.12  | 660.84  | 653.63 | 636.23  | 617.83  | 649.03  | 612.75  | 629.58  | 650.77  |

**Tabela 36 – Resultados da rugosidade média estimada (caso 44 Suave).**

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0357                      | 0.0044 | 10.9        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2875                      | 0.0125 | 4.2         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1530                      | 0.0530 | 53.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0535                      | 0.0035 | 7.0         |
| 5              | 0.50000                 | 0.4350                      | 0.0650 | 13.0        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2308                      | 0.0692 | 23.1        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2420                      | 0.0420 | 21.0        |
| 8              | 0.25000                 | 0.2653                      | 0.0153 | 6.1         |
| 9              | 0.55000                 | 0.4170                      | 0.1330 | 24.2        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3160                      | 0.2840 | 47.3        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>21.0</b> |

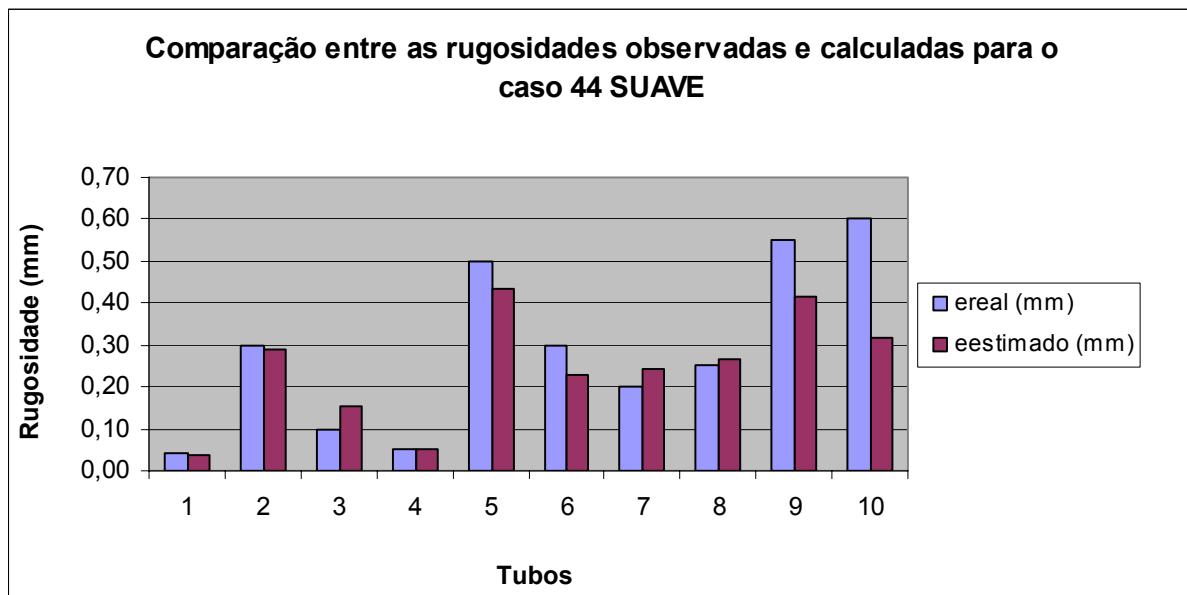


Figura 69 – Variação entre rugosidades reais e estimadas para o caso 44 Suave

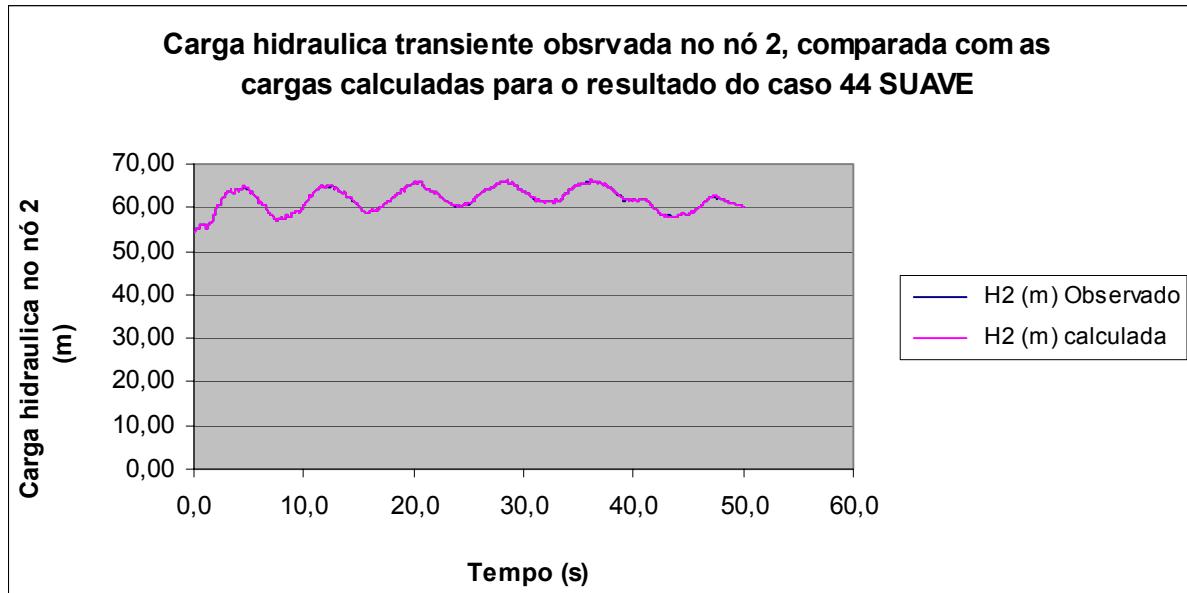


Figura 70 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 2 (caso 44 Suave).

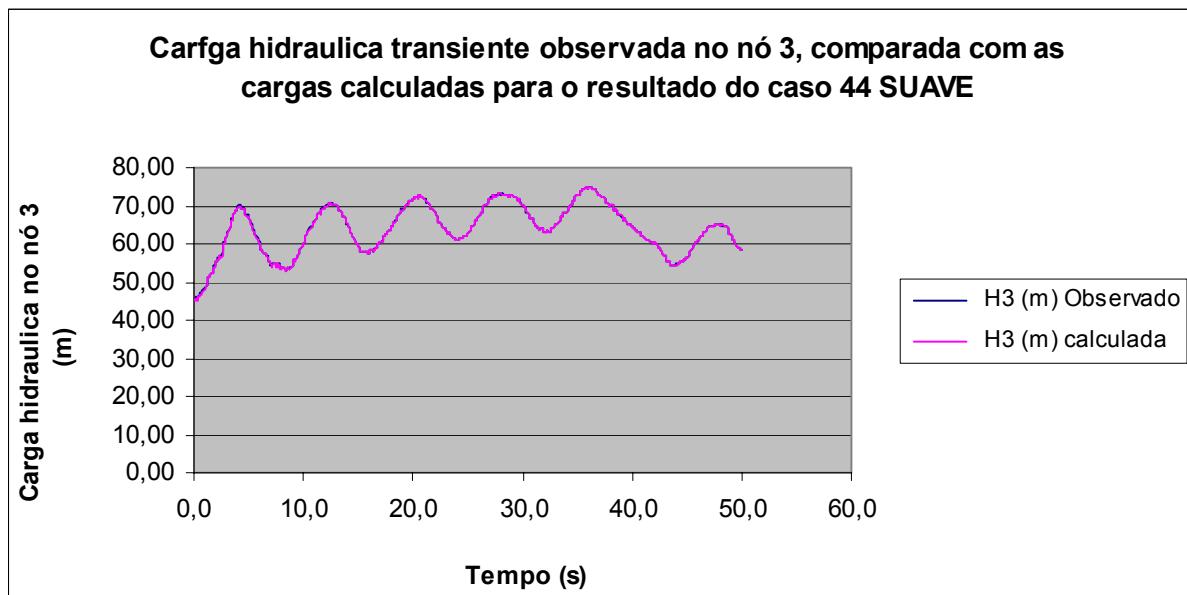


Figura 71 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 3 (caso 44 Suave).

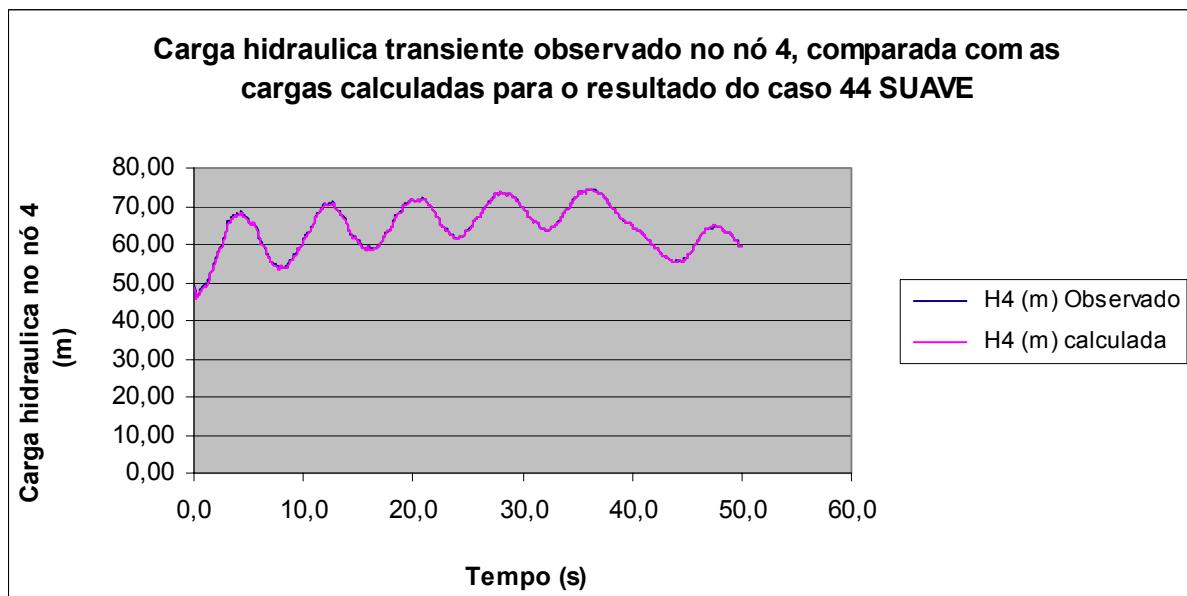


Figura 72 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 4 (caso 44 Suave).

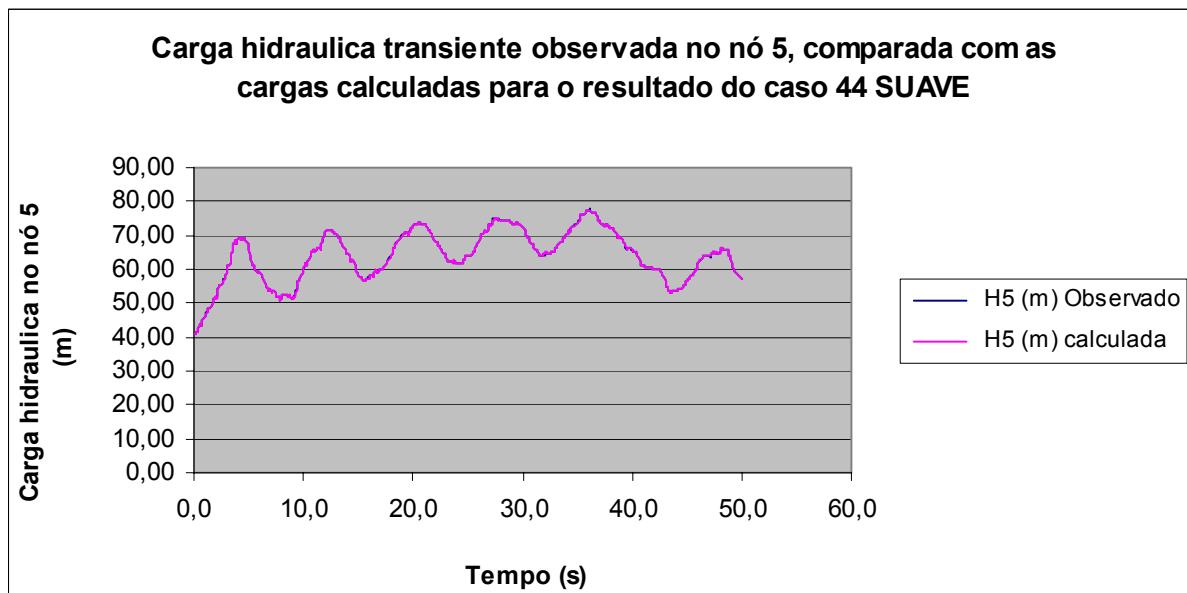


Figura 73 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 5 (caso 44 Suave).

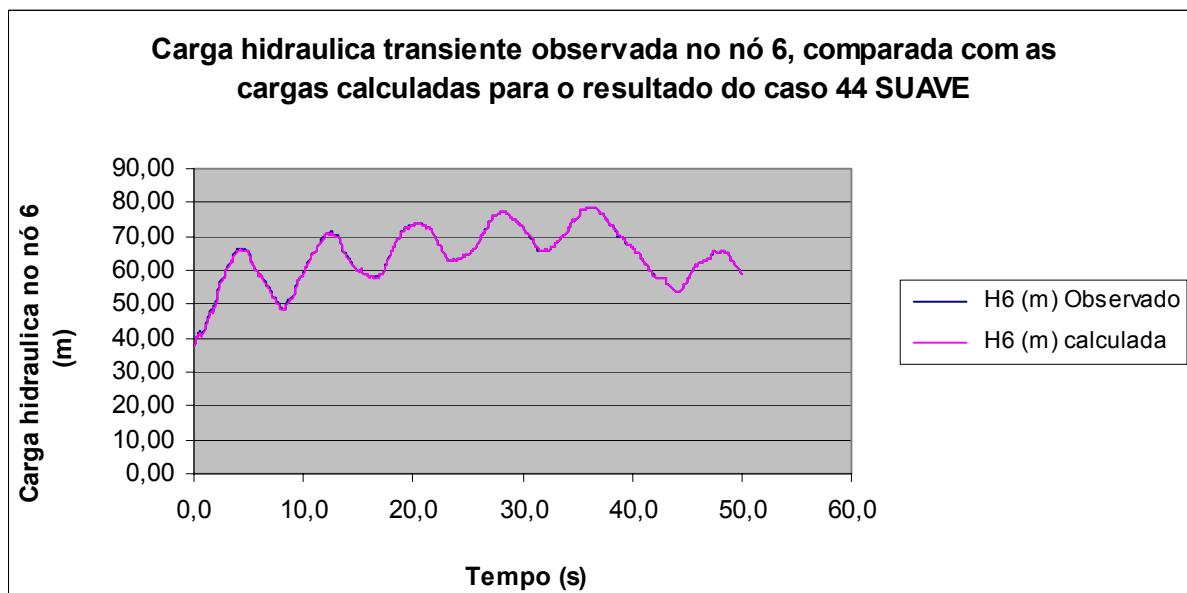


Figura 74 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 6 (caso 44 Suave).

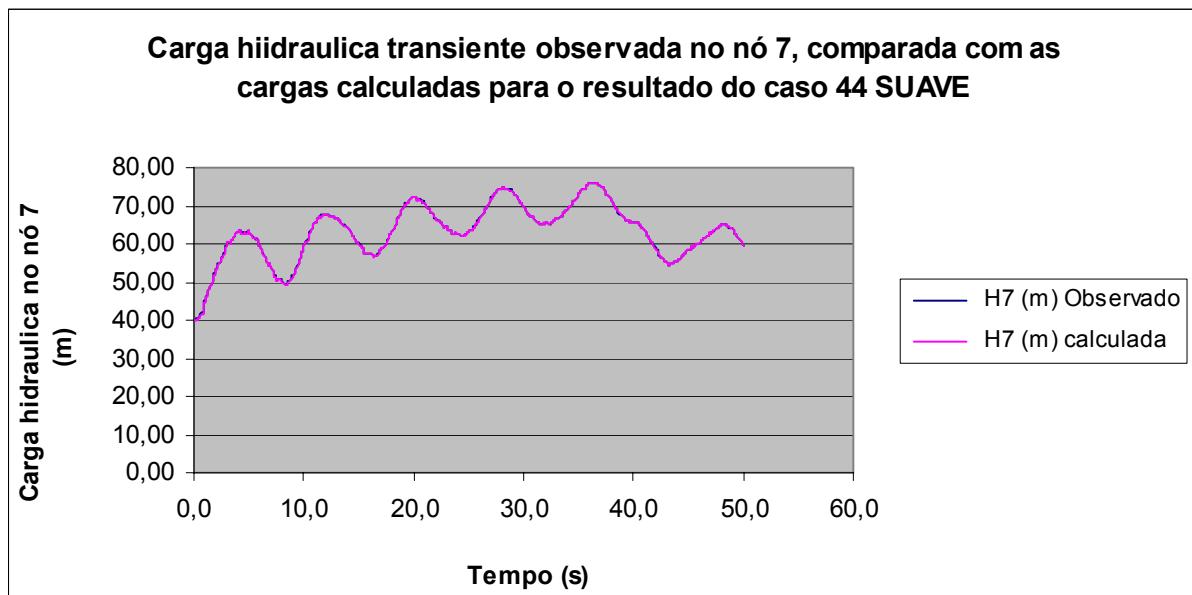


Figura 75 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 7 (caso 44 Suave).

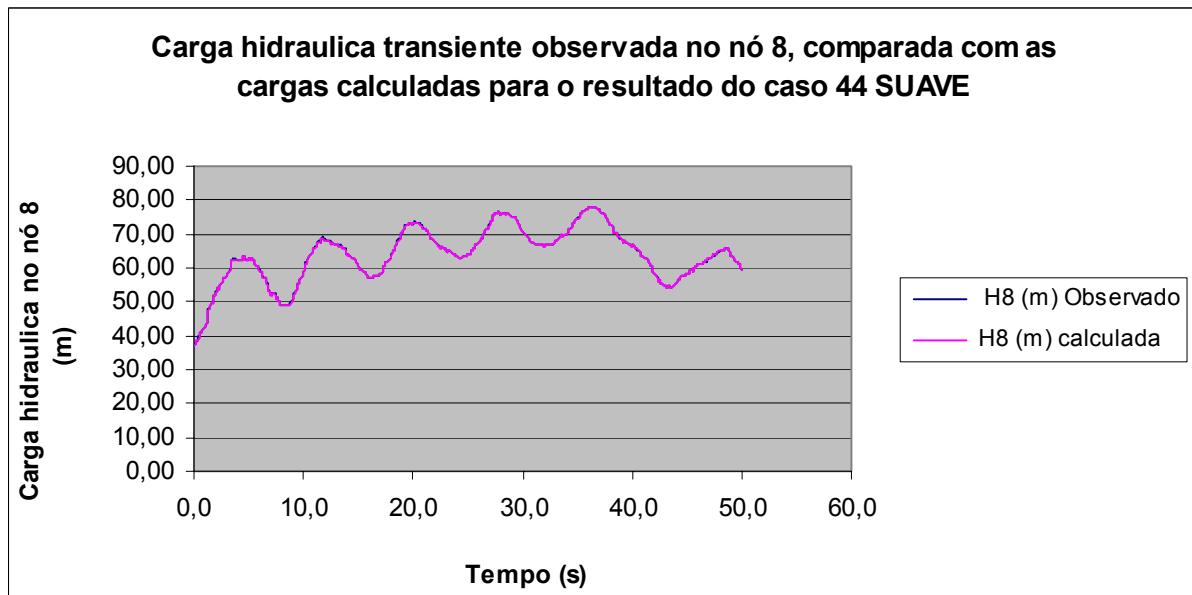


Figura 76 – Variação entre as cargas hidráulicas transientes observadas (ou reais) e calculadas (ou estimados) para o nó monitorado – nó 8 (caso 44 Suave).

## 5. CONCLUSÃO

No problema exposto, o objetivo era identificar as rugosidades absolutas das tubulações a partir das cargas calculadas para várias soluções geradas pelo algoritmo genético, onde dois programas trabalharam conjuntamente. Um calcula o transiente e o outro aplica o algoritmo genético para calcular as soluções aproximadas. Na busca de resultados ótimos, parâmetros do algoritmo genético foram alterados. A eficiência de cada solução encontrada foi medida por meio do Erro Médio Relativo (EMR), que consiste em uma média dos erros relativos da rugosidade de cada tubo, para determinada solução encontrada.

Inicialmente foi considerada a geração de dez sementes, ou seja, para cada procedimento adotado, dez populações foram criadas de forma aleatória, seguindo os mesmos parâmetros estabelecidos para a simulação, onde a solução do caso para as rugosidades estimadas (ou calculadas), foi a média dos melhores resultados de cada semente. Este procedimento, permitiu que os valores finais das soluções não ficassem restritas aos discretizados inicialmente na Tabela 2.

A primeira fase do trabalho consistiu em identificar quais combinações de parâmetros iriam apresentar os melhores resultados para esta rede. Em vista disto, foi considerada uma variação brusca de demanda de dez segundos no nó monitorado, que foi o nó 5. Com as rugosidades reais calculou-se as cargas transitórias reais, onde o tempo de transiente monitorado foi de dez segundos. De posse destes dados, o programa identificador de rugosidade via algoritmo genético, calcula a função objetiva de cada solução criada, onde no final das gerações mostra aquela com menor valor.

Observou-se que a carga hidráulica no nó 5 para as condições permanentes (Tabela 5), variaram durante o transiente causado em todos os nós, conforme gráficos das cargas hidráulicas transitórias para o nó 5 apresentadas nos casos 42, 43 e 44, de um valor que chegou a superar em mais de três vezes aquele observado no estado permanente. Confirmando, assim, a afirmação de Karney em 1990.

Para a primeira fase optou-se por variações no número de cromossomos, no número de gerações e na taxa de mutação. O que se observou é que não basta simplesmente

aumentar os valores para estes parâmetros, pois isso não assegura que um melhor resultado será encontrado. Uma série de combinações (casos) foi feita, objetivando identificar o melhor resultado.

Para a segunda fase, a melhor combinação de parâmetros da primeira fase foram considerados, onde novas simulações foram testadas, aumentando o tempo de transiente e o número de nós monitorados. O que se percebeu foi que o aumento no tempo de transiente não melhorou os resultados. Entretanto, com o aumento do número de nós monitorados apresentou uma melhora nos resultados.

Um terceiro passo foi adotado, onde o pior caso encontrado e os três melhores passaram pelo mesmo processo que já haviam sido submetidos, porém desta vez para uma manobra suave de variação de demanda de quarenta segundos. Observou-se uma melhora nos resultados da pior simulação gerada, duas das três melhores. Apenas o caso 44 ficou quase estabilizado pois tinha apresentado um EMR de 20.9% para a variação brusca e passou para 21.0% para a suave.

Ao analisar os gráficos de comparação das cargas transientes nos nós observados (ou reais) e calculados (ou estimados), percebe-se que os valores das cargas estão bem próximos em vários casos, mesmo estes casos apresentando resultados diferentes. Este fato nos faz crer, que para as cargas transientes observadas nos nós para a situação real, o método através do algoritmo genético encontra uma combinação de resultados para as rugosidades dos tubos, que apesar de diferentes do real, geram uma variação de cargas bem próximas das observadas (ou reais). Este fenômeno se deve ao método inverso indireto adotado.

Para o caso 43 suave que forneceu o melhor resultado, EMR de 18.9%, observou-se valores para a rugosidade bem próximos do real como ocorreu no tubo 2, onde o erro relativo foi de apenas 1.0%. O maior erro relativo encontrado foi para o tubo 10, que apresentou um valor de 59.1%.

Podemos concluir que para uma melhor calibração através de um método transiente inverso, é necessário o monitoramento de todos os nós, evidentemente este fato aumenta a dificuldade da análise de redes maiores. Pelo fato de as cargas hidráulicas calculadas apresentarem valores bem próximos das cargas hidráulicas reais, isto não nos garante que os valores encontrados para a rugosidade são os correspondentes as rugosidades reais (ou observadas). O tempo utilizado para as simulações, também é outro fator complicador do método, confirmando a tendência de lentidão do AG.

## 5.1 Recomendações

Recomenda-se:

- Com base nestes resultados encontrados, para os casos simulados, que outros trabalhos futuros possam investigar a mesma rede variando não apenas um parâmetro físico, mas dois de forma paralela, no intuito de verificar se resultados mais precisos vão ser obtidos.
- Que simulações usando a mesma técnica apresentada aqui sejam realizadas para outras redes de diferentes configurações e tamanhos, com o objetivo de extrair padrões para a determinação de um conjunto de parâmetros eficiente.
- Trabalhar com rugosidades que não estejam discretizadas no espaço de busca, valores intermediários, avaliando a convergência do uso da média das sementes.
- Fazer uma comparação do método apresentado com outros métodos de calibração, como por exemplo o Método Inverso do Gradiente Hidráulico (MIGH). Objetivando uma análise sob o ponto de vista de precisão e eficiência computacional.
- Analisar mais profundamente a relação do número de nós necessários para se obter resultados satisfatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J. K. – **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicada à escoamento transiente.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H.- **Incertezas na calibração de redes de distribuição de água com dados transientes.** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, 2001.
- BOULOS, P. F., WOOD, D. J. - Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.
- BHAVE, P. R. - Calibrating water distribution network models. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- CARRERA, J., NEUMAN, S. P. – Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. maximun likelihood method incorporating prior information. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 199-210, 1986a.
- CAMARGO, L. A. - **O golpe de aríete em condutos. Analise pelo método das características.** Encontro de engenheiros de assintencia técnica. Joinville , 1991.
- CESARIO, A. L.; DAVIS, J. O.- **Calibrating Water System Models.** Journal of american water works association, 1984.
- CHAUDHRY, M. H. - **Applied hydraulic transients.** New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- CHEUNG, P. B.; SOUZA, R. S. – **Influencia do zoneamento de uma rede hidráulica na acurácia de um modelo de calibração.** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa , 2001.
- DAVIS, L. – **Handbook of genetic algorithma.** New York, Van Nostrand Reinhold, 1991
- EGGNER , C. L. ; POLKOWSKI, L. B. – **Network models and the impact of modeling assumptions.** Journal of AWMA, 1976.
- FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBIOLI, A. **Calibration of roughness in water distribution networks.** In :MILLER, D.S. (ed.):2<sup>nd</sup> International Conference on Water Pipeline System, BHR Group Conference Series. Edinburgh, Scotland, 1994.

- GAMBALE, S. R. – **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água**. São Paulo. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- GARCIA-SERRA, J. – **Estudio y mejore de las técnicas de calibration de modelos de redes hidráulicas**. Tese de doutorado. Universidade Politécnica de Valencia, 1988.
- GOLDBERG, D. E. – **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**, 412 pp., Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.
- HOLLAND, J. H. – **Adaptation in natural and Artificial systems**. MIT Press, 1975.
- KARNEY, B. W., MCINNIS, D- Transient Analysis of Water Distribution Systems. **Journal of the American Water Works Association**, v.82, n.7, p.62-70, 1990.
- LIGGETT, J. A., CHEN, L-C. – Inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.
- LINDEN, R., **Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional**. Rio de Janeiro, Brasport, 2006. 348 pp.
- MICHALEWICZ, Z. – **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.
- MITCHELL, M. – **Introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit, 1996.
- MOTA, H.J.S. – **Dimensionamento econômico de redes de distribuição de água aplicando algoritmo genético**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2007
- NEUMAN, S. – Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. **Water Resources Research**, v. 9, n. 4, p. 1006-1021, 1973.
- ORMSBEE, L. E. - Implicit network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.
- PUDAR, R. S., LIGGETT, J. A – Leaks in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 118, n. 7, p. 1031-1046, 1992.
- SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D. – Engineering analysis of water-distribution systems. **Journal American Water Works Association**, v. 69, nº 9, p. 510-514, 1977.

- SHARP, W. W.; WALSKI, T. M. – **Predicting internal roughness in water mains** . Journal of AWMA , 1988.
- SILVA, A.C.A. – **Calibração automática de rugosidade de tubulações em sistema de distribuição de água com algoritmos genéticos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2006
- SUN, N. Z. – **Inverse problems in groundwater modeling.** Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- SWAMEE, P. K. – Design of a submarine pipeline. **J. Transp Eng.**, ASCE, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.
- WALSKI, T. M. - Technique for calibrating network models. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.
- WALSKI, T. M. - Case study: pipe network model calibration issues. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 112, n. 2, p. 238-249, 1986.
- WYLIE, E. B., STREETER, V. L. - **Fluid transients**. New York, McGraw-Hill, 1978, 384p.

## **Apêndice A**

---

Resultados das simulações  
dos casos de 1 a 44.

## CASO 01

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 01).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.00500  | 0.34000 | 0.34000 | 0.07000 | 0.05000 | 0.07000 | 0.00500 | 0.15000 | 0.16000 | 0.06000 |
| 2         | 0.43000  | 0.10000 | 0.15000 | 0.04000 | 0.20000 | 0.56000 | 0.14000 | 0.57000 | 0.07000 | 0.40000 |
| 3         | 0.07000  | 0.38000 | 0.00500 | 0.20000 | 0.07000 | 0.05000 | 0.19000 | 0.21000 | 0.11000 | 0.02500 |
| 4         | 0.10000  | 0.00150 | 0.17000 | 0.25000 | 0.14000 | 0.27000 | 0.21000 | 0.00500 | 0.00150 | 0.46000 |
| 5         | 0.11000  | 0.23000 | 0.57000 | 0.13000 | 1.00000 | 0.24000 | 0.35000 | 0.46000 | 0.40000 | 0.23000 |
| 6         | 0.05000  | 0.21000 | 0.06000 | 0.14000 | 0.34000 | 0.21000 | 0.34000 | 0.00150 | 0.33000 | 0.10000 |
| 7         | 0.29000  | 0.50000 | 0.45000 | 0.30000 | 0.51000 | 0.07000 | 0.60000 | 0.15000 | 0.33000 | 0.15000 |
| 8         | 0.54000  | 0.10000 | 0.47000 | 0.24000 | 0.51000 | 0.22000 | 0.43000 | 0.16000 | 0.16000 | 0.32000 |
| 9         | 0.52000  | 0.00500 | 0.17000 | 0.00500 | 0.52000 | 0.33000 | 0.61000 | 0.37000 | 0.42000 | 0.57000 |
| 10        | 0.10000  | 0.22000 | 0.42000 | 0.00150 | 0.11000 | 0.24000 | 0.44000 | 0.34000 | 0.41000 | 0.14000 |
| Fobj      | 0.12228  | 1.23264 | 0.62315 | 0.52430 | 0.24096 | 0.54415 | 0.23795 | 1.29464 | 0.50547 | 0.54679 |
| Geração   | 7        | 3       | 3       | 4       | 6       | 1       | 4       | 2       | 1       | 1       |
| Tempo (s) | 14.58    | 19.17   | 13.77   | 12.28   | 13.58   | 14.23   | 14.44   | 13.33   | 16.41   | 15.39   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 01).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.12500                     | 0.08500 | 212.50       |
| 2              | 0.30000                 | 0.26600                     | 0.03400 | 11.33        |
| 3              | 0.10000                 | 0.13100                     | 0.03100 | 31.00        |
| 4              | 0.05000                 | 0.16080                     | 0.11080 | 221.60       |
| 5              | 0.50000                 | 0.37200                     | 0.12800 | 25.60        |
| 6              | 0.30000                 | 0.17815                     | 0.12185 | 40.62        |
| 7              | 0.20000                 | 0.33500                     | 0.13500 | 67.50        |
| 8              | 0.25000                 | 0.31500                     | 0.06500 | 26.00        |
| 9              | 0.55000                 | 0.35200                     | 0.19800 | 36.00        |
| 10             | 0.60000                 | 0.24215                     | 0.35785 | 59.64        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |         | <b>73.18</b> |

## CASO 02

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 02).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.05000  | 0.12000 | 0.13000 | 0.12000 | 0.05000 | 0.02500 | 0.06000 | 0.24000 | 0.04500 | 0.14000 |
| 2         | 0.50000  | 0.05000 | 0.35000 | 0.16000 | 0.42000 | 0.04500 | 0.38000 | 0.43000 | 0.28000 | 0.06000 |
| 3         | 0.00500  | 0.14000 | 0.04500 | 0.10000 | 0.11000 | 0.16000 | 0.05000 | 0.02500 | 0.17000 | 0.11000 |
| 4         | 0.52000  | 0.14000 | 0.20000 | 0.07000 | 0.23000 | 0.57000 | 0.10000 | 0.11000 | 0.06000 | 0.07000 |
| 5         | 0.00500  | 0.31000 | 0.50000 | 0.46000 | 0.44000 | 0.24000 | 2.00000 | 0.34000 | 0.25000 | 0.19000 |
| 6         | 0.48000  | 0.54000 | 0.43000 | 0.23000 | 0.39000 | 0.22000 | 0.00150 | 0.29000 | 0.17000 | 0.55000 |
| 7         | 0.11000  | 0.50000 | 0.52000 | 0.16000 | 0.46000 | 0.21000 | 0.32000 | 0.48000 | 0.49000 | 0.38000 |
| 8         | 0.06000  | 0.36000 | 0.26000 | 0.00150 | 0.19000 | 0.41000 | 0.42000 | 0.18000 | 0.26000 | 0.61000 |
| 9         | 0.55000  | 0.31000 | 0.13000 | 0.39000 | 0.17000 | 0.33000 | 0.60000 | 0.05000 | 0.20000 | 0.24000 |
| 10        | 0.37000  | 1.00000 | 0.23000 | 1.00000 | 0.46000 | 0.47000 | 0.53000 | 0.45000 | 0.52000 | 0.46000 |
| Fobj      | 0.23728  | 0.20425 | 0.18990 | 0.26625 | 0.23650 | 0.13476 | 0.26927 | 0.24746 | 0.14898 | 0.19197 |
| Geração   | 4        | 10      | 8       | 7       | 6       | 5       | 4       | 10      | 6       | 10      |
| Tempo (s) | 67.66    | 68.39   | 76.86   | 68.78   | 75.02   | 67.91   | 71.30   | 64.95   | 67.59   | 65.81   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 02).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.09800                     | 0.05800 | 145.00       |
| 2              | 0.30000                 | 0.26750                     | 0.03250 | 10.83        |
| 3              | 0.10000                 | 0.09150                     | 0.00850 | 8.50         |
| 4              | 0.05000                 | 0.20700                     | 0.15700 | 314.00       |
| 5              | 0.50000                 | 0.47350                     | 0.02650 | 5.30         |
| 6              | 0.30000                 | 0.33015                     | 0.03015 | 10.05        |
| 7              | 0.20000                 | 0.36300                     | 0.16300 | 81.50        |
| 8              | 0.25000                 | 0.27515                     | 0.02515 | 10.06        |
| 9              | 0.55000                 | 0.29700                     | 0.25300 | 46.00        |
| 10             | 0.60000                 | 0.54900                     | 0.05100 | 8.50         |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |         | <b>63.97</b> |

### CASO 03

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 03).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.12000  | 0.02500 | 0.05000 | 0.17000 | 0.02500 | 0.02500 | 0.00150 | 0.02500 | 0.12000 | 0.02500 |
| 2        | 0.19000  | 0.56000 | 0.31000 | 0.37000 | 0.40000 | 0.18000 | 0.25000 | 0.20000 | 0.59000 | 0.45000 |
| 3        | 0.02500  | 0.04000 | 0.20000 | 0.02500 | 0.17000 | 0.10000 | 0.16000 | 0.23000 | 0.02500 | 0.04000 |
| 4        | 0.22000  | 0.20000 | 0.07000 | 0.16000 | 0.04000 | 0.26000 | 0.23000 | 0.00500 | 0.10000 | 0.19000 |
| 5        | 0.54000  | 0.32000 | 0.20000 | 0.60000 | 0.41000 | 0.20000 | 0.47000 | 0.52000 | 0.30000 | 0.20000 |
| 6        | 0.44000  | 0.33000 | 0.15000 | 0.04500 | 0.06000 | 0.26000 | 0.16000 | 0.36000 | 0.24000 | 0.51000 |
| 7        | 0.34000  | 0.34000 | 0.57000 | 0.45000 | 0.55000 | 0.23000 | 0.28000 | 0.38000 | 0.41000 | 0.53000 |
| 8        | 0.32000  | 0.22000 | 0.10000 | 0.12000 | 0.53000 | 0.42000 | 0.60000 | 1.00000 | 0.44000 | 0.59000 |
| 9        | 0.26000  | 0.42000 | 0.16000 | 0.14000 | 0.28000 | 0.47000 | 0.42000 | 0.31000 | 0.16000 | 0.45000 |
| 10       | 0.27000  | 0.30000 | 0.47000 | 0.61000 | 0.59000 | 0.41000 | 0.58000 | 0.61000 | 0.48000 | 0.19000 |
| Fobj     | 0.18731  | 0.13641 | 0.22102 | 0.17943 | 0.10958 | 0.12561 | 0.12438 | 0.11867 | 0.15901 | 0.16673 |
| Geração  | 10       | 10      | 10      | 10      | 10      | 1       | 3       | 8       | 8       | 2       |
| Tempo(s) | 135.36   | 149.22  | 148.28  | 135.14  | 136.02  | 141.45  | 139.89  | 149.25  | 137.12  | 150.53  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 03).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA      | ER (%) |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------|--------|
| 1              | 0.04000                 | 0.05865                     | 0.01865 | 46.63  |
| 2              | 0.30000                 | 0.35000                     | 0.05000 | 16.67  |
| 3              | 0.10000                 | 0.10150                     | 0.00150 | 1.50   |
| 4              | 0.05000                 | 0.14750                     | 0.09750 | 195.00 |
| 5              | 0.50000                 | 0.37600                     | 0.12400 | 24.80  |
| 6              | 0.30000                 | 0.25550                     | 0.04450 | 14.83  |
| 7              | 0.20000                 | 0.40800                     | 0.20800 | 104.00 |
| 8              | 0.25000                 | 0.43400                     | 0.18400 | 73.60  |
| 9              | 0.55000                 | 0.30700                     | 0.24300 | 44.18  |
| 10             | 0.60000                 | 0.45100                     | 0.14900 | 24.83  |
| <b>EMR (%)</b> |                         | <b>54.60</b>                |         |        |

### CASO 04

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 04).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.00500 | 0.02500 | 0.36000 | 0.11000 | 0.00150 | 0.26000 | 0.10000 | 0.04500 | 0.00500 |
| 2        | 0.43000  | 0.23000 | 0.43000 | 0.19000 | 0.16000 | 0.25000 | 0.04000 | 0.00150 | 0.06000 | 0.27000 |
| 3        | 0.07000  | 0.36000 | 0.24000 | 0.10000 | 0.40000 | 0.15000 | 0.05000 | 0.09000 | 0.13000 | 0.21000 |
| 4        | 0.10000  | 0.04000 | 0.17000 | 0.00500 | 0.17000 | 0.17000 | 0.04000 | 0.15000 | 0.29000 | 0.36000 |
| 5        | 0.11000  | 0.20000 | 1.00000 | 0.31000 | 0.27000 | 0.11000 | 0.33000 | 0.28000 | 0.26000 | 0.13000 |
| 6        | 0.05000  | 0.12000 | 0.52000 | 0.28000 | 0.51000 | 0.38000 | 0.27000 | 0.05000 | 0.19000 | 0.47000 |
| 7        | 0.29000  | 0.14000 | 0.30000 | 0.59000 | 0.59000 | 0.44000 | 0.05000 | 0.04000 | 0.40000 | 0.21000 |
| 8        | 0.54000  | 0.09000 | 0.47000 | 0.57000 | 0.57000 | 0.06000 | 0.33000 | 0.32000 | 0.26000 | 0.26000 |
| 9        | 0.52000  | 0.20000 | 0.14000 | 0.00150 | 0.04000 | 0.47000 | 0.42000 | 0.25000 | 0.34000 | 0.30000 |
| 10       | 0.10000  | 0.25000 | 1.00000 | 0.60000 | 0.52000 | 0.18000 | 0.58000 | 0.15000 | 0.20000 | 0.49000 |
| Fobj     | 0.12228  | 0.44231 | 0.44687 | 0.68549 | 0.93522 | 0.13249 | 0.47750 | 0.50516 | 0.28849 | 0.46458 |
| Geração  | 7        | 4       | 2       | 5       | 2       | 2       | 4       | 1       | 1       | 1       |
| Tempo(s) | 29.86    | 32.81   | 24.22   | 27.61   | 25.06   | 30.12   | 27.11   | 22.66   | 30.45   | 26.27   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 04).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.09165                     | 0.05165 | 129.13       |
| 2              | 0.30000                 | 0.20615                     | 0.09385 | 31.28        |
| 3              | 0.10000                 | 0.18000                     | 0.08000 | 80.00        |
| 4              | 0.05000                 | 0.14950                     | 0.09950 | 199.00       |
| 5              | 0.50000                 | 0.30000                     | 0.20000 | 40.00        |
| 6              | 0.30000                 | 0.28400                     | 0.01600 | 5.33         |
| 7              | 0.20000                 | 0.30500                     | 0.10500 | 52.50        |
| 8              | 0.25000                 | 0.34700                     | 0.09700 | 38.80        |
| 9              | 0.55000                 | 0.26815                     | 0.28185 | 51.25        |
| 10             | 0.60000                 | 0.40700                     | 0.19300 | 32.17        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |         | <b>65.95</b> |

## CASO 05

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 05).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.05000  | 0.00150 | 0.06000 | 0.00500 | 0.08000 | 0.21000 | 0.00500 | 0.05000 | 0.17000 | 0.04500 |
| 2         | 0.50000  | 0.44000 | 0.25000 | 0.26000 | 0.35000 | 0.43000 | 0.14000 | 0.35000 | 0.25000 | 0.22000 |
| 3         | 0.00500  | 0.04000 | 0.14000 | 0.14000 | 0.07000 | 0.04000 | 0.37000 | 0.00500 | 0.02500 | 0.13000 |
| 4         | 0.52000  | 0.50000 | 0.10000 | 0.33000 | 0.17000 | 0.15000 | 0.00150 | 0.59000 | 0.17000 | 0.11000 |
| 5         | 0.00500  | 0.31000 | 0.11000 | 0.34000 | 0.10000 | 0.39000 | 0.35000 | 0.58000 | 0.45000 | 0.48000 |
| 6         | 0.48000  | 0.28000 | 0.51000 | 0.30000 | 0.23000 | 0.24000 | 0.60000 | 0.08000 | 0.24000 | 0.55000 |
| 7         | 0.11000  | 0.23000 | 0.57000 | 0.41000 | 0.35000 | 0.56000 | 0.47000 | 0.23000 | 0.49000 | 0.32000 |
| 8         | 0.06000  | 0.00150 | 0.44000 | 0.43000 | 0.27000 | 0.28000 | 0.31000 | 0.25000 | 0.52000 | 0.51000 |
| 9         | 0.55000  | 0.51000 | 0.18000 | 0.29000 | 0.17000 | 0.05000 | 0.26000 | 0.42000 | 0.31000 | 0.34000 |
| 10        | 0.37000  | 0.29000 | 0.60000 | 0.56000 | 0.33000 | 0.60000 | 0.52000 | 0.20000 | 0.47000 | 0.58000 |
| Fobj      | 0.23728  | 0.16466 | 0.17062 | 0.12423 | 0.19951 | 0.22337 | 0.16834 | 0.14419 | 0.16132 | 0.08614 |
| Geração   | 4        | 1       | 18      | 15      | 7       | 11      | 12      | 17      | 11      | 12      |
| Tempo (s) | 135.30   | 143.33  | 144.30  | 151.16  | 130.80  | 131.41  | 148.03  | 153.16  | 132.16  | 148.76  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 05).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.06765                     | 0.02765 | 69.13        |
| 2              | 0.30000                 | 0.31900                     | 0.01900 | 6.33         |
| 3              | 0.10000                 | 0.09650                     | 0.00350 | 3.50         |
| 4              | 0.05000                 | 0.26415                     | 0.21415 | 428.30       |
| 5              | 0.50000                 | 0.31150                     | 0.18850 | 37.70        |
| 6              | 0.30000                 | 0.35100                     | 0.05100 | 17.00        |
| 7              | 0.20000                 | 0.37400                     | 0.17400 | 87.00        |
| 8              | 0.25000                 | 0.30715                     | 0.05715 | 22.86        |
| 9              | 0.55000                 | 0.30800                     | 0.24200 | 44.00        |
| 10             | 0.60000                 | 0.45200                     | 0.14800 | 24.67        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |         | <b>74.05</b> |

### CASO 06

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 06).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |           |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6         | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.12000  | 0.14000 | 0.10000 | 0.10000 | 0.04000 | 0.00500   | 0.04500 | 0.00150 | 0.04500 | 0.02500 |
| 2        | 0.19000  | 0.51000 | 0.20000 | 0.09000 | 0.35000 | 0.59000   | 0.02500 | 0.57000 | 0.14000 | 0.50000 |
| 3        | 0.02500  | 0.05000 | 0.02500 | 0.08000 | 0.13000 | 0.11000   | 0.25000 | 0.07000 | 0.15000 | 0.04000 |
| 4        | 0.22000  | 0.15000 | 0.25000 | 0.34000 | 0.04500 | 0.06000   | 0.29000 | 0.04500 | 0.12000 | 0.16000 |
| 5        | 0.54000  | 0.40000 | 0.04000 | 0.35000 | 0.13000 | 0.35000   | 0.26000 | 0.18000 | 0.13000 | 0.04500 |
| 6        | 0.44000  | 0.15000 | 0.41000 | 0.29000 | 0.40000 | 0.36000   | 0.10000 | 0.36000 | 0.59000 | 0.26000 |
| 7        | 0.34000  | 0.50000 | 0.12000 | 0.57000 | 0.38000 | 0.22000   | 0.16000 | 0.33000 | 0.53000 | 0.04000 |
| 8        | 0.32000  | 0.39000 | 0.20000 | 0.27000 | 0.48000 | 0.16000   | 0.13000 | 0.12000 | 0.52000 | 0.21000 |
| 9        | 0.26000  | 0.07000 | 0.51000 | 0.20000 | 0.34000 | 0.39000   | 0.19000 | 0.51000 | 0.30000 | 0.51000 |
| 10       | 0.27000  | 0.54000 | 0.45000 | 0.23000 | 0.56000 | 0.40000   | 0.55000 | 0.15000 | 0.23000 | 0.31000 |
| Fobj     | 0.18731  | 0.16380 | 0.08465 | 0.17623 | 0.04937 | 0.09253   | 0.18145 | 0.17421 | 0.13949 | 0.04765 |
| Geração  | 10       | 6       | 4       | 2       | 13      | 20        | 12      | 1       | 5       | 20      |
| Tempo(s) | 273.94   | 275.64  | 286.89  | 277.45  | 309.27  | -86094.98 | 267.33  | 290.61  | 264.28  | 298.14  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 06).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06215                       | 0.02215 | 55.38        |
| 2              | 0.30000                   | 0.31650                       | 0.01650 | 5.50         |
| 3              | 0.10000                   | 0.09300                       | 0.00700 | 7.00         |
| 4              | 0.05000                   | 0.16800                       | 0.11800 | 236.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.24250                       | 0.25750 | 51.50        |
| 6              | 0.30000                   | 0.33600                       | 0.03600 | 12.00        |
| 7              | 0.20000                   | 0.31900                       | 0.11900 | 59.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.28000                       | 0.03000 | 12.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.32800                       | 0.22200 | 40.36        |
| 10             | 0.60000                   | 0.36900                       | 0.23100 | 38.50        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>51.77</b> |

### CASO 07

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 07).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.00500  | 0.02500 | 0.09000 | 0.06000 | 0.02500 | 0.32000 | 0.14000 | 0.00500 | 0.04500 | 0.16000 |
| 2         | 0.43000  | 0.57000 | 0.11000 | 0.13000 | 1.00000 | 0.27000 | 0.00150 | 0.33000 | 0.15000 | 0.02500 |
| 3         | 0.07000  | 0.07000 | 0.13000 | 0.46000 | 0.04500 | 0.00500 | 0.16000 | 0.12000 | 0.16000 | 0.07000 |
| 4         | 0.10000  | 0.19000 | 0.08000 | 0.40000 | 0.09000 | 0.39000 | 0.54000 | 0.37000 | 0.27000 | 0.49000 |
| 5         | 0.11000  | 0.45000 | 0.30000 | 0.29000 | 0.41000 | 0.38000 | 0.17000 | 0.59000 | 0.16000 | 0.56000 |
| 6         | 0.05000  | 0.39000 | 0.19000 | 0.38000 | 0.09000 | 0.22000 | 0.09000 | 0.45000 | 0.29000 | 0.02500 |
| 7         | 0.29000  | 0.36000 | 0.10000 | 1.00000 | 0.46000 | 0.31000 | 0.56000 | 0.58000 | 0.06000 | 0.42000 |
| 8         | 0.54000  | 0.48000 | 0.14000 | 0.02500 | 0.16000 | 0.22000 | 0.57000 | 0.46000 | 0.11000 | 0.61000 |
| 9         | 0.52000  | 0.22000 | 0.18000 | 0.15000 | 0.12000 | 0.10000 | 0.33000 | 0.30000 | 0.52000 | 0.44000 |
| 10        | 0.10000  | 0.37000 | 0.46000 | 0.41000 | 0.39000 | 0.56000 | 0.52000 | 0.56000 | 0.52000 | 0.35000 |
| Fobj      | 0.12228  | 0.10920 | 0.39131 | 1.21276 | 0.33387 | 0.51457 | 0.39019 | 0.20961 | 0.60323 | 0.35073 |
| Geração   | 7        | 2       | 2       | 2       | 2       | 4       | 5       | 3       | 1       | 2       |
| Tempo (s) | 60.53    | 59.72   | 56.53   | 52.55   | 60.86   | 57.56   | 45.62   | 52.12   | 51.39   | 71.44   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 07).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.08750                       | 0.04750 | 118.75       |
| 2              | 0.30000                   | 0.30165                       | 0.00165 | 0.55         |
| 3              | 0.10000                   | 0.12900                       | 0.02900 | 29.00        |
| 4              | 0.05000                   | 0.29200                       | 0.24200 | 484.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.34200                       | 0.15800 | 31.60        |
| 6              | 0.30000                   | 0.21750                       | 0.08250 | 27.50        |
| 7              | 0.20000                   | 0.41400                       | 0.21400 | 107.00       |
| 8              | 0.25000                   | 0.33150                       | 0.08150 | 32.60        |
| 9              | 0.55000                   | 0.28800                       | 0.26200 | 47.64        |
| 10             | 0.60000                   | 0.42400                       | 0.17600 | 29.33        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>90.80</b> |

## CASO 08

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 08).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.05000  | 0.28000 | 0.10000 | 0.23000 | 0.06000 | 0.07000 | 0.11000 | 0.23000 | 0.14000 | 0.09000 |
| 2        | 0.50000  | 0.25000 | 0.29000 | 0.12000 | 0.09000 | 0.06000 | 0.26000 | 0.09000 | 0.55000 | 0.04500 |
| 3        | 0.00500  | 0.00150 | 0.02500 | 0.00500 | 0.20000 | 0.25000 | 0.06000 | 0.00500 | 0.00150 | 0.27000 |
| 4        | 0.52000  | 0.12000 | 0.48000 | 0.14000 | 0.35000 | 0.36000 | 0.22000 | 0.33000 | 0.13000 | 0.13000 |
| 5        | 0.00500  | 0.18000 | 0.30000 | 0.02500 | 0.24000 | 0.15000 | 0.45000 | 0.17000 | 0.09000 | 0.32000 |
| 6        | 0.48000  | 0.60000 | 0.32000 | 0.42000 | 0.32000 | 0.49000 | 0.06000 | 0.55000 | 0.48000 | 0.36000 |
| 7        | 0.11000  | 0.42000 | 0.26000 | 0.49000 | 0.40000 | 2.00000 | 0.58000 | 0.41000 | 0.57000 | 0.33000 |
| 8        | 0.06000  | 0.58000 | 0.60000 | 0.35000 | 0.35000 | 0.17000 | 0.53000 | 0.34000 | 0.00150 | 0.59000 |
| 9        | 0.55000  | 0.16000 | 0.22000 | 0.51000 | 0.19000 | 0.16000 | 0.17000 | 0.44000 | 0.35000 | 0.08000 |
| 10       | 0.37000  | 0.43000 | 0.33000 | 0.35000 | 1.00000 | 0.46000 | 0.58000 | 0.61000 | 0.17000 | 0.58000 |
| Fobj     | 0.23728  | 0.21878 | 0.12565 | 0.20710 | 0.22675 | 0.22035 | 0.13166 | 0.24011 | 0.18167 | 0.21791 |
| Geração  | 4        | 23      | 11      | 8       | 2       | 9       | 39      | 11      | 7       | 29      |
| Tempo(s) | 265.39   | 247.83  | 2247.42 | 256.20  | 255.09  | 251.81  | 238.05  | 233.45  | 245.78  | 250.16  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 08).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%) |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------|
| 1              | 0.04000                   | 0.13600                       | 0.09600 | 240.00 |
| 2              | 0.30000                   | 0.22550                       | 0.07450 | 24.83  |
| 3              | 0.10000                   | 0.08230                       | 0.01770 | 17.70  |
| 4              | 0.05000                   | 0.27800                       | 0.22800 | 456.00 |
| 5              | 0.50000                   | 0.19300                       | 0.30700 | 61.40  |
| 6              | 0.30000                   | 0.40800                       | 0.10800 | 36.00  |
| 7              | 0.20000                   | 0.55700                       | 0.35700 | 178.50 |
| 8              | 0.25000                   | 0.35715                       | 0.10715 | 42.86  |
| 9              | 0.55000                   | 0.28300                       | 0.26700 | 48.55  |
| 10             | 0.60000                   | 0.48800                       | 0.11200 | 18.67  |
| <b>EMR (%)</b> |                           | <b>112.45</b>                 |         |        |

### CASO 09

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 09).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.12000  | 0.15000 | 0.13000 | 0.09000 | 0.00500 | 0.02500 | 0.02500 | 0.06000 | 0.04000 | 0.02500 |
| 2        | 0.51000  | 0.16000 | 0.54000 | 0.06000 | 0.12000 | 0.36000 | 0.17000 | 0.36000 | 0.29000 | 0.02500 |
| 3        | 0.00150  | 0.04500 | 0.00150 | 0.09000 | 0.30000 | 0.07000 | 0.19000 | 0.00500 | 0.13000 | 0.36000 |
| 4        | 0.30000  | 0.27000 | 0.33000 | 0.28000 | 0.18000 | 0.25000 | 0.15000 | 0.57000 | 0.04000 | 0.00500 |
| 5        | 0.05000  | 1.00000 | 0.47000 | 0.51000 | 0.37000 | 0.18000 | 0.28000 | 0.60000 | 0.60000 | 0.58000 |
| 6        | 0.47000  | 0.31000 | 0.12000 | 2.00000 | 0.21000 | 0.33000 | 0.49000 | 0.47000 | 0.21000 | 0.04000 |
| 7        | 0.07000  | 0.39000 | 0.04500 | 0.40000 | 0.54000 | 0.36000 | 0.55000 | 0.14000 | 0.43000 | 0.47000 |
| 8        | 0.53000  | 0.42000 | 0.07000 | 0.50000 | 1.00000 | 0.24000 | 0.30000 | 0.21000 | 0.39000 | 0.14000 |
| 9        | 0.21000  | 0.20000 | 0.21000 | 0.27000 | 0.23000 | 0.40000 | 0.30000 | 0.39000 | 0.27000 | 0.56000 |
| 10       | 0.61000  | 0.37000 | 0.59000 | 0.30000 | 0.44000 | 0.37000 | 0.61000 | 0.26000 | 0.23000 | 0.23000 |
| Fobj     | 0.14488  | 0.15519 | 0.16925 | 0.09589 | 0.16230 | 0.10606 | 0.10236 | 0.14337 | 0.13048 | 0.19197 |
| Geração  | 37       | 13      | 17      | 15      | 19      | 10      | 1       | 7       | 9       | 3       |
| Tempo(s) | 519.73   | 509.64  | 498.47  | 505.53  | 557.28  | 499.00  | 605.97  | 527.36  | 594.78  | 520.61  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 09).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06700                       | 0.02700 | 67.50        |
| 2              | 0.30000                   | 0.25950                       | 0.04050 | 13.50        |
| 3              | 0.10000                   | 0.11930                       | 0.01930 | 19.30        |
| 4              | 0.05000                   | 0.23750                       | 0.18750 | 375.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.46400                       | 0.03600 | 7.20         |
| 6              | 0.30000                   | 0.46500                       | 0.16500 | 55.00        |
| 7              | 0.20000                   | 0.33950                       | 0.13950 | 69.75        |
| 8              | 0.25000                   | 0.38000                       | 0.13000 | 52.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.30400                       | 0.24600 | 44.73        |
| 10             | 0.60000                   | 0.40100                       | 0.19900 | 33.17        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>73.71</b> |

## CASO 10

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 10).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.05000 | 0.47000 | 0.22000 | 0.00500 | 0.18000 | 0.09000 | 0.51000 | 0.12000 | 0.35000 |
| 2        | 0.43000  | 0.14000 | 0.07000 | 0.48000 | 0.20000 | 0.00150 | 0.50000 | 0.00500 | 0.24000 | 0.24000 |
| 3        | 0.07000  | 0.15000 | 0.04500 | 0.08000 | 0.18000 | 0.10000 | 0.07000 | 0.20000 | 0.06000 | 0.00500 |
| 4        | 0.10000  | 0.14000 | 0.05000 | 0.15000 | 0.06000 | 0.10000 | 0.34000 | 0.36000 | 0.26000 | 0.31000 |
| 5        | 0.11000  | 0.11000 | 0.42000 | 0.56000 | 0.41000 | 0.15000 | 0.31000 | 0.55000 | 0.42000 | 0.40000 |
| 6        | 0.05000  | 0.16000 | 0.49000 | 0.02500 | 0.35000 | 0.52000 | 0.58000 | 0.34000 | 0.12000 | 0.34000 |
| 7        | 0.29000  | 0.16000 | 0.24000 | 0.18000 | 0.10000 | 0.51000 | 0.29000 | 0.05000 | 0.47000 | 0.19000 |
| 8        | 0.54000  | 0.34000 | 0.25000 | 0.02500 | 0.44000 | 0.54000 | 0.26000 | 0.16000 | 0.04000 | 0.55000 |
| 9        | 0.52000  | 0.20000 | 0.27000 | 0.18000 | 0.36000 | 0.37000 | 0.14000 | 0.24000 | 0.00150 | 0.04500 |
| 10       | 0.10000  | 0.43000 | 0.31000 | 0.30000 | 0.44000 | 0.30000 | 0.08000 | 0.25000 | 0.38000 | 0.41000 |
| Fobj     | 0.12228  | 0.35531 | 0.79683 | 0.95114 | 0.26901 | 0.25383 | 0.67465 | 2.22824 | 0.63821 | 0.50237 |
| Geração  | 7        | 1       | 2       | 2       | 3       | 1       | 2       | 3       | 1       | 4       |
| Tempo(s) | 122.19   | 507.62  | 110.62  | 119.20  | 111.47  | 93.83   | 103.36  | 507.45  | 118.64  | 102.36  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 10).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.20000                       | 0.16000 | 400.00       |
| 2              | 0.30000                   | 0.23065                       | 0.06935 | 23.12        |
| 3              | 0.10000                   | 0.09600                       | 0.00400 | 4.00         |
| 4              | 0.05000                   | 0.18700                       | 0.13700 | 274.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.34400                       | 0.15600 | 31.20        |
| 6              | 0.30000                   | 0.29750                       | 0.00250 | 0.83         |
| 7              | 0.20000                   | 0.24800                       | 0.04800 | 24.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.31450                       | 0.06450 | 25.80        |
| 9              | 0.55000                   | 0.23265                       | 0.31735 | 57.70        |
| 10             | 0.60000                   | 0.30000                       | 0.30000 | 50.00        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>89.07</b> |

## CASO 11

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 11).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.05000  | 0.26000 | 0.12000 | 0.13000 | 0.14000 | 0.00150 | 0.25000 | 0.04000 | 0.11000 | 0.00500 |
| 2        | 0.50000  | 0.02500 | 0.27000 | 0.44000 | 0.41000 | 0.16000 | 0.42000 | 0.31000 | 0.31000 | 0.23000 |
| 3        | 0.00500  | 0.08000 | 0.00150 | 0.00500 | 0.04500 | 0.18000 | 0.00500 | 0.06000 | 0.09000 | 0.12000 |
| 4        | 0.52000  | 0.32000 | 0.15000 | 0.25000 | 0.11000 | 0.36000 | 0.08000 | 0.19000 | 0.27000 | 0.32000 |
| 5        | 0.00500  | 0.35000 | 0.29000 | 0.47000 | 0.17000 | 0.30000 | 0.47000 | 0.00150 | 0.23000 | 0.53000 |
| 6        | 0.48000  | 0.06000 | 0.34000 | 0.00500 | 0.04500 | 0.07000 | 0.21000 | 0.54000 | 0.05000 | 0.51000 |
| 7        | 0.11000  | 0.58000 | 0.40000 | 0.08000 | 0.43000 | 0.27000 | 0.55000 | 0.37000 | 0.55000 | 0.60000 |
| 8        | 0.06000  | 0.55000 | 0.07000 | 0.39000 | 0.10000 | 0.60000 | 0.50000 | 0.35000 | 0.07000 | 0.26000 |
| 9        | 0.55000  | 0.02500 | 0.49000 | 0.24000 | 0.17000 | 0.27000 | 0.02500 | 0.43000 | 0.19000 | 0.41000 |
| 10       | 0.37000  | 0.30000 | 0.06000 | 0.32000 | 0.51000 | 0.36000 | 0.32000 | 0.26000 | 1.00000 | 0.46000 |
| Fobj     | 0.23728  | 0.35618 | 0.19736 | 0.20019 | 0.17594 | 0.15147 | 0.25906 | 0.14952 | 0.20888 | 0.17277 |
| Geração  | 4        | 6       | 52      | 3       | 7       | 34      | 4       | 20      | 52      | 1       |
| Tempo(s) | 526.69   | 566.36  | 473.72  | 480.69  | 477.41  | 603.19  | 530.86  | 618.17  | 556.77  | 513.95  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 11).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.11065                       | 0.07065 | 176.63       |
| 2              | 0.30000                   | 0.30750                       | 0.00750 | 2.50         |
| 3              | 0.10000                   | 0.05915                       | 0.04085 | 40.85        |
| 4              | 0.05000                   | 0.25700                       | 0.20700 | 414.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.28165                       | 0.21835 | 43.67        |
| 6              | 0.30000                   | 0.23100                       | 0.06900 | 23.00        |
| 7              | 0.20000                   | 0.39400                       | 0.19400 | 97.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.29500                       | 0.04500 | 18.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.28000                       | 0.27000 | 49.09        |
| 10             | 0.60000                   | 0.39600                       | 0.20400 | 34.00        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>89.87</b> |

## CASO 12

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 12).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.12000  | 0.00150 | 0.02500 | 0.00500 | 0.02500 | 0.06000 | 0.11000 | 0.00500 | 0.09000 | 0.12000 |
| 2        | 0.51000  | 0.44000 | 0.43000 | 0.50000 | 0.26000 | 0.15000 | 0.39000 | 0.05000 | 0.38000 | 0.47000 |
| 3        | 0.00150  | 0.15000 | 0.05000 | 0.12000 | 0.19000 | 0.13000 | 0.00150 | 0.23000 | 0.06000 | 0.00500 |
| 4        | 0.30000  | 0.09000 | 0.31000 | 0.06000 | 0.04000 | 0.06000 | 0.37000 | 0.59000 | 0.06000 | 0.24000 |
| 5        | 0.05000  | 0.55000 | 0.59000 | 0.00500 | 0.34000 | 0.32000 | 0.24000 | 0.47000 | 0.42000 | 0.47000 |
| 6        | 0.47000  | 0.09000 | 0.41000 | 0.46000 | 0.00500 | 0.00150 | 0.60000 | 0.60000 | 0.61000 | 0.47000 |
| 7        | 0.07000  | 0.52000 | 0.13000 | 0.26000 | 0.59000 | 0.56000 | 0.07000 | 0.22000 | 0.51000 | 0.18000 |
| 8        | 0.53000  | 0.16000 | 0.15000 | 0.11000 | 0.26000 | 0.61000 | 0.36000 | 0.13000 | 0.17000 | 0.52000 |
| 9        | 0.21000  | 0.38000 | 0.37000 | 0.44000 | 0.49000 | 0.58000 | 0.34000 | 0.23000 | 0.32000 | 0.23000 |
| 10       | 0.61000  | 0.44000 | 0.43000 | 0.58000 | 0.46000 | 0.56000 | 0.35000 | 0.45000 | 0.31000 | 0.39000 |
| Fobj     | 0.14488  | 0.09581 | 0.13062 | 0.09903 | 0.11818 | 0.10176 | 0.15344 | 0.20784 | 0.16204 | 0.15414 |
| Geração  | 37       | 28      | 9       | 5       | 2       | 2       | 5       | 76      | 7       | 8       |
| Tempo(s) | 997.00   | 1292.23 | 1193.45 | 1168.26 | 949.58  | 939.37  | 953.41  | 1106.73 | 1013.36 | 973.69  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 12).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.05615                       | 0.01615 | 40.38        |
| 2              | 0.30000                   | 0.35800                       | 0.05800 | 19.33        |
| 3              | 0.10000                   | 0.09380                       | 0.00620 | 6.20         |
| 4              | 0.05000                   | 0.21200                       | 0.16200 | 324.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.34550                       | 0.15450 | 30.90        |
| 6              | 0.30000                   | 0.37165                       | 0.07165 | 23.88        |
| 7              | 0.20000                   | 0.31100                       | 0.11100 | 55.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.30000                       | 0.05000 | 20.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.35900                       | 0.19100 | 34.73        |
| 10             | 0.60000                   | 0.45800                       | 0.14200 | 23.67        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>57.86</b> |

### CASO 13

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 13).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.04000  | 0.00500 | 0.39000 | 0.28000 | 0.14000 | 0.20000 | 0.21000 | 0.35000 | 0.10000 | 0.29000 |
| 2        | 0.31000  | 0.22000 | 0.30000 | 0.21000 | 0.23000 | 0.23000 | 0.29000 | 0.29000 | 0.04500 | 0.00500 |
| 3        | 0.04500  | 0.04000 | 0.02500 | 0.02500 | 0.00500 | 0.09000 | 0.04500 | 0.10000 | 0.09000 | 0.19000 |
| 4        | 0.10000  | 0.45000 | 0.08000 | 0.06000 | 0.42000 | 0.09000 | 0.36000 | 0.16000 | 0.23000 | 0.40000 |
| 5        | 0.11000  | 0.52000 | 0.47000 | 0.23000 | 0.22000 | 0.00150 | 0.11000 | 0.52000 | 0.26000 | 0.09000 |
| 6        | 0.05000  | 0.41000 | 0.52000 | 0.36000 | 0.02500 | 0.29000 | 0.24000 | 0.33000 | 0.46000 | 0.42000 |
| 7        | 0.29000  | 0.48000 | 0.18000 | 0.53000 | 0.56000 | 0.35000 | 0.31000 | 0.32000 | 0.09000 | 0.43000 |
| 8        | 0.54000  | 0.57000 | 0.21000 | 0.38000 | 0.24000 | 0.17000 | 0.46000 | 0.21000 | 0.12000 | 1.00000 |
| 9        | 0.52000  | 0.56000 | 0.00500 | 0.21000 | 0.45000 | 0.08000 | 0.06000 | 0.11000 | 0.34000 | 0.22000 |
| 10       | 0.10000  | 0.36000 | 0.21000 | 0.57000 | 0.02500 | 0.12000 | 0.22000 | 0.48000 | 0.30000 | 0.51000 |
| Fobj     | 0.15286  | 0.44352 | 0.64763 | 0.32482 | 0.58864 | 0.56023 | 0.52861 | 1.13089 | 0.23193 | 0.87950 |
| Geração  | 5        | 1       | 2       | 4       | 1       | 7       | 10      | 1       | 2       | 1       |
| Tempo(s) | 14.67    | 28.67   | 14.64   | 13.48   | 12.94   | 13.37   | 13.83   | 12.64   | 14.95   | 12.19   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 13).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)        |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|---------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.20050                       | 0.16050 | 401.25        |
| 2              | 0.30000                   | 0.21300                       | 0.08700 | 29.00         |
| 3              | 0.10000                   | 0.06550                       | 0.03450 | 34.50         |
| 4              | 0.05000                   | 0.23500                       | 0.18500 | 370.00        |
| 5              | 0.50000                   | 0.25315                       | 0.24685 | 49.37         |
| 6              | 0.30000                   | 0.31050                       | 0.01050 | 3.50          |
| 7              | 0.20000                   | 0.35400                       | 0.15400 | 77.00         |
| 8              | 0.25000                   | 0.39000                       | 0.14000 | 56.00         |
| 9              | 0.55000                   | 0.25550                       | 0.29450 | 53.55         |
| 10             | 0.60000                   | 0.28950                       | 0.31050 | 51.75         |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>112.59</b> |

### CASO 14

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 14).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.08000  | 0.04000 | 0.12000 | 0.15000 | 0.05000 | 0.08000 | 0.04000 | 0.02500 | 0.02500 | 0.04000 |
| 2        | 0.09000  | 0.36000 | 0.14000 | 0.10000 | 0.40000 | 0.26000 | 0.59000 | 0.39000 | 0.36000 | 0.29000 |
| 3        | 0.06000  | 0.06000 | 0.04500 | 0.07000 | 0.05000 | 0.07000 | 0.09000 | 0.08000 | 0.07000 | 0.05000 |
| 4        | 0.36000  | 0.10000 | 0.30000 | 0.10000 | 0.22000 | 0.24000 | 0.21000 | 0.05000 | 0.10000 | 0.21000 |
| 5        | 0.04000  | 0.23000 | 0.47000 | 0.26000 | 0.18000 | 1.00000 | 0.37000 | 0.30000 | 0.17000 | 0.00500 |
| 6        | 1.00000  | 0.49000 | 0.26000 | 0.31000 | 0.56000 | 0.34000 | 0.40000 | 0.04500 | 0.47000 | 0.00500 |
| 7        | 0.11000  | 0.60000 | 0.33000 | 0.24000 | 0.07000 | 0.21000 | 0.54000 | 0.16000 | 0.11000 | 0.17000 |
| 8        | 0.16000  | 0.37000 | 0.48000 | 0.41000 | 0.32000 | 0.14000 | 0.54000 | 0.46000 | 0.15000 | 0.34000 |
| 9        | 0.36000  | 0.44000 | 0.36000 | 0.34000 | 0.07000 | 0.11000 | 0.12000 | 0.59000 | 0.45000 | 0.41000 |
| 10       | 0.43000  | 0.27000 | 0.56000 | 0.46000 | 0.05000 | 0.23000 | 0.55000 | 0.43000 | 0.15000 | 0.22000 |
| Fobj     | 0.19763  | 0.21188 | 0.11249 | 0.24847 | 0.33736 | 0.27471 | 0.17351 | 0.17040 | 0.12083 | 0.13913 |
| Geração  | 5        | 2       | 10      | 7       | 7       | 2       | 8       | 8       | 9       | 4       |
| Tempo(s) | 70.01    | 72.45   | 68.76   | 70.69   | 70.09   | 67.67   | 76.73   | 69.91   | 76.88   | 71.83   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 14).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06500                       | 0.02500 | 62.50        |
| 2              | 0.30000                   | 0.29800                       | 0.00200 | 0.67         |
| 3              | 0.10000                   | 0.06450                       | 0.03550 | 35.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.18900                       | 0.13900 | 278.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.30250                       | 0.19750 | 39.50        |
| 6              | 0.30000                   | 0.38800                       | 0.08800 | 29.33        |
| 7              | 0.20000                   | 0.25400                       | 0.05400 | 27.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.33700                       | 0.08700 | 34.80        |
| 9              | 0.55000                   | 0.32500                       | 0.22500 | 40.91        |
| 10             | 0.60000                   | 0.33500                       | 0.26500 | 44.17        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>59.24</b> |

## CASO 15

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 15).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.09000  | 0.04000 | 0.02500 | 0.02500 | 0.04500 | 0.00500 | 0.02500 | 0.02500 | 0.04500 | 0.02500 |
| 2        | 0.39000  | 0.57000 | 0.59000 | 0.26000 | 0.49000 | 0.48000 | 0.58000 | 0.21000 | 0.44000 | 0.34000 |
| 3        | 0.00150  | 0.04500 | 0.05000 | 0.18000 | 0.09000 | 0.14000 | 0.15000 | 0.17000 | 0.10000 | 0.08000 |
| 4        | 0.26000  | 0.07000 | 0.17000 | 0.00500 | 0.00150 | 0.07000 | 0.07000 | 0.05000 | 0.08000 | 0.11000 |
| 5        | 0.37000  | 0.17000 | 0.44000 | 0.23000 | 0.00150 | 0.06000 | 0.53000 | 0.56000 | 0.07000 | 0.09000 |
| 6        | 0.12000  | 0.26000 | 0.50000 | 0.23000 | 0.20000 | 0.20000 | 0.00150 | 0.19000 | 0.60000 | 0.06000 |
| 7        | 0.08000  | 0.31000 | 0.34000 | 0.54000 | 0.30000 | 0.30000 | 0.58000 | 0.15000 | 0.29000 | 0.41000 |
| 8        | 0.36000  | 0.33000 | 0.10000 | 0.15000 | 0.58000 | 0.07000 | 0.55000 | 0.52000 | 0.25000 | 0.25000 |
| 9        | 0.33000  | 0.27000 | 0.32000 | 0.58000 | 0.57000 | 0.40000 | 0.14000 | 0.43000 | 0.32000 | 0.42000 |
| 10       | 0.23000  | 0.06000 | 0.16000 | 0.54000 | 0.39000 | 0.56000 | 0.45000 | 0.60000 | 0.61000 | 0.09000 |
| Fobj     | 0.16580  | 0.17440 | 0.10205 | 0.05318 | 0.17215 | 0.09052 | 0.15870 | 0.11280 | 0.20479 | 0.09770 |
| Geração  | 10       | 5       | 3       | 8       | 6       | 2       | 10      | 7       | 10      | 8       |
| Tempo(s) | 138.92   | 140.81  | 144.66  | 143.59  | 143.30  | 139.42  | 141.51  | 142.58  | 145.27  | 142.66  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 15).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.03500                       | 0.00500 | 12.50        |
| 2              | 0.30000                   | 0.43500                       | 0.13500 | 45.00        |
| 3              | 0.10000                   | 0.10065                       | 0.00065 | 0.65         |
| 4              | 0.05000                   | 0.08865                       | 0.03865 | 77.30        |
| 5              | 0.50000                   | 0.25215                       | 0.24785 | 49.57        |
| 6              | 0.30000                   | 0.23615                       | 0.06385 | 21.28        |
| 7              | 0.20000                   | 0.33000                       | 0.13000 | 65.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.31600                       | 0.06600 | 26.40        |
| 9              | 0.55000                   | 0.37800                       | 0.17200 | 31.27        |
| 10             | 0.60000                   | 0.36900                       | 0.23100 | 38.50        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>36.75</b> |

## CASO 16

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 16).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.02500  | 0.38000 | 0.15000 | 0.11000 | 0.02500 | 0.07000 | 0.12000 | 0.19000 | 0.17000 | 0.00150 |
| 2        | 0.51000  | 0.39000 | 0.05000 | 0.19000 | 0.32000 | 0.04500 | 0.37000 | 0.34000 | 0.17000 | 0.32000 |
| 3        | 0.04000  | 0.00500 | 0.00500 | 0.04000 | 0.10000 | 0.53000 | 0.18000 | 0.06000 | 0.07000 | 0.10000 |
| 4        | 0.08000  | 0.23000 | 0.52000 | 0.28000 | 0.19000 | 0.24000 | 0.18000 | 0.19000 | 0.07000 | 0.31000 |
| 5        | 2.00000  | 0.36000 | 0.04500 | 0.56000 | 0.15000 | 0.58000 | 0.54000 | 0.22000 | 0.21000 | 0.40000 |
| 6        | 0.47000  | 0.04000 | 0.14000 | 0.57000 | 0.06000 | 0.10000 | 0.34000 | 0.19000 | 0.24000 | 0.04500 |
| 7        | 0.36000  | 0.43000 | 0.50000 | 0.46000 | 0.58000 | 0.48000 | 0.20000 | 0.26000 | 0.56000 | 0.42000 |
| 8        | 0.30000  | 0.18000 | 0.13000 | 0.13000 | 0.12000 | 0.55000 | 0.08000 | 0.12000 | 0.09000 | 0.12000 |
| 9        | 0.48000  | 0.12000 | 0.47000 | 0.44000 | 0.33000 | 0.00500 | 0.06000 | 0.58000 | 0.27000 | 0.57000 |
| 10       | 0.10000  | 0.57000 | 0.59000 | 0.32000 | 0.56000 | 0.12000 | 1.00000 | 0.52000 | 0.53000 | 0.42000 |
| Fobj     | 0.14404  | 0.61264 | 0.58154 | 0.34755 | 0.22405 | 0.69869 | 0.60874 | 0.94304 | 0.23417 | 0.13846 |
| Geração  | 18       | 16      | 18      | 20      | 19      | 6       | 10      | 6       | 20      | 1       |
| Tempo(s) | 30.58    | 22.05   | 28.98   | 32.69   | 36.11   | 27.00   | 26.20   | 23.97   | 24.02   | 25.51   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 16).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.12415                       | 0.08415 | 210.38       |
| 2              | 0.30000                   | 0.27050                       | 0.02950 | 9.83         |
| 3              | 0.10000                   | 0.11300                       | 0.01300 | 13.00        |
| 4              | 0.05000                   | 0.22900                       | 0.17900 | 358.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.50650                       | 0.00650 | 1.30         |
| 6              | 0.30000                   | 0.21950                       | 0.08050 | 26.83        |
| 7              | 0.20000                   | 0.42500                       | 0.22500 | 112.50       |
| 8              | 0.25000                   | 0.18200                       | 0.06800 | 27.20        |
| 9              | 0.55000                   | 0.33250                       | 0.21750 | 39.55        |
| 10             | 0.60000                   | 0.47300                       | 0.12700 | 21.17        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>81.98</b> |

## CASO 17

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 17).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.08000  | 0.12000 | 0.04500 | 0.00150 | 0.16000 | 0.10000 | 0.10000 | 0.04000 | 0.04500 | 0.04000 |
| 2        | 0.09000  | 0.46000 | 0.37000 | 0.45000 | 0.61000 | 0.06000 | 0.38000 | 0.49000 | 0.14000 | 0.10000 |
| 3        | 0.06000  | 0.04000 | 0.25000 | 0.13000 | 0.00500 | 0.18000 | 0.07000 | 0.08000 | 0.11000 | 0.22000 |
| 4        | 0.36000  | 0.37000 | 0.00150 | 0.17000 | 0.11000 | 0.09000 | 0.17000 | 0.35000 | 0.24000 | 0.00500 |
| 5        | 0.04000  | 0.31000 | 0.44000 | 0.27000 | 0.39000 | 0.23000 | 0.44000 | 0.17000 | 0.38000 | 0.49000 |
| 6        | 1.00000  | 0.52000 | 0.40000 | 0.28000 | 0.52000 | 0.36000 | 0.06000 | 2.00000 | 0.02500 | 0.04000 |
| 7        | 0.11000  | 0.09000 | 0.52000 | 0.34000 | 0.53000 | 0.46000 | 0.52000 | 0.26000 | 0.33000 | 0.25000 |
| 8        | 0.16000  | 0.11000 | 0.36000 | 0.46000 | 0.59000 | 0.38000 | 0.30000 | 0.07000 | 0.55000 | 0.07000 |
| 9        | 0.36000  | 0.17000 | 0.04000 | 0.31000 | 0.09000 | 0.23000 | 0.12000 | 0.19000 | 0.45000 | 0.50000 |
| 10       | 0.43000  | 2.00000 | 0.55000 | 0.47000 | 0.33000 | 0.55000 | 0.56000 | 0.60000 | 0.39000 | 0.34000 |
| Fobj     | 0.19763  | 0.13770 | 0.27582 | 0.13115 | 0.16055 | 0.17790 | 0.15557 | 0.18039 | 0.08745 | 0.14357 |
| Geração  | 5        | 5       | 20      | 4       | 20      | 18      | 13      | 9       | 14      | 17      |
| Tempo(s) | 141.44   | 137.11  | 136.87  | 131.12  | 142.56  | 137.50  | 147.17  | 133.08  | 139.47  | 147.06  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 17).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.07315                       | 0.03315 | 82.88        |
| 2              | 0.30000                   | 0.31500                       | 0.01500 | 5.00         |
| 3              | 0.10000                   | 0.11450                       | 0.01450 | 14.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.18665                       | 0.13665 | 273.30       |
| 5              | 0.50000                   | 0.31600                       | 0.18400 | 36.80        |
| 6              | 0.30000                   | 0.52050                       | 0.22050 | 73.50        |
| 7              | 0.20000                   | 0.34100                       | 0.14100 | 70.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.30500                       | 0.05500 | 22.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.24600                       | 0.30400 | 55.27        |
| 10             | 0.60000                   | 0.62200                       | 0.02200 | 3.67         |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>63.74</b> |

### CASO 18

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 18).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.10000  | 0.07000 | 0.00500 | 0.08000 | 0.04500 | 0.11000 | 0.02500 | 0.04500 | 0.02500 | 0.04500 |
| 2        | 0.55000  | 0.07000 | 0.52000 | 0.22000 | 0.16000 | 0.00150 | 0.11000 | 0.35000 | 0.39000 | 0.15000 |
| 3        | 0.00150  | 0.13000 | 0.16000 | 0.05000 | 0.07000 | 0.06000 | 0.34000 | 0.11000 | 0.14000 | 0.20000 |
| 4        | 0.26000  | 0.32000 | 0.09000 | 0.26000 | 0.33000 | 0.47000 | 0.11000 | 0.04000 | 0.37000 | 0.13000 |
| 5        | 0.37000  | 0.52000 | 0.45000 | 0.27000 | 0.17000 | 0.15000 | 0.24000 | 0.44000 | 0.48000 | 0.41000 |
| 6        | 0.28000  | 0.57000 | 0.11000 | 0.00150 | 0.37000 | 0.14000 | 0.13000 | 0.37000 | 0.17000 | 0.38000 |
| 7        | 0.08000  | 1.00000 | 0.59000 | 0.48000 | 0.05000 | 0.23000 | 0.40000 | 0.26000 | 0.52000 | 0.37000 |
| 8        | 0.53000  | 0.19000 | 0.22000 | 0.33000 | 0.32000 | 0.43000 | 0.53000 | 0.47000 | 0.60000 | 0.23000 |
| 9        | 0.27000  | 0.38000 | 0.27000 | 0.43000 | 0.40000 | 0.47000 | 0.18000 | 0.30000 | 0.15000 | 0.20000 |
| 10       | 0.47000  | 0.46000 | 0.44000 | 0.49000 | 0.37000 | 0.17000 | 0.60000 | 0.56000 | 0.60000 | 0.60000 |
| Fobj     | 0.15231  | 0.10873 | 0.08801 | 0.11856 | 0.12694 | 0.13094 | 0.18152 | 0.09043 | 0.18536 | 0.18357 |
| Geração  | 15       | 17      | 20      | 19      | 6       | 2       | 20      | 12      | 20      | 2       |
| Tempo(s) | 271.84   | 271.77  | 306.98  | 282.73  | 269.55  | 298.66  | 274.47  | 302.89  | 266.56  | 298.33  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 18).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.05500                       | 0.01500 | 37.50        |
| 2              | 0.30000                   | 0.25215                       | 0.04785 | 15.95        |
| 3              | 0.10000                   | 0.12615                       | 0.02615 | 26.15        |
| 4              | 0.05000                   | 0.23800                       | 0.18800 | 376.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.35000                       | 0.15000 | 30.00        |
| 6              | 0.30000                   | 0.25215                       | 0.04785 | 15.95        |
| 7              | 0.20000                   | 0.39800                       | 0.19800 | 99.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.38500                       | 0.13500 | 54.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.30500                       | 0.24500 | 44.55        |
| 10             | 0.60000                   | 0.47600                       | 0.12400 | 20.67        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>71.98</b> |

### CASO 19

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 19).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.02500  | 0.00150 | 0.12000 | 0.16000 | 0.16000 | 0.16000 | 0.12000 | 0.32000 | 0.08000 | 0.11000 |
| 2        | 0.51000  | 0.08000 | 0.22000 | 0.13000 | 0.34000 | 0.48000 | 0.59000 | 0.21000 | 0.32000 | 0.53000 |
| 3        | 0.04000  | 0.36000 | 0.12000 | 0.10000 | 0.17000 | 0.06000 | 0.00500 | 0.00150 | 0.13000 | 0.02500 |
| 4        | 0.08000  | 0.00150 | 0.12000 | 0.22000 | 0.21000 | 0.37000 | 0.02500 | 0.32000 | 0.18000 | 0.25000 |
| 5        | 1.00000  | 1.00000 | 0.00500 | 0.57000 | 0.48000 | 1.00000 | 0.40000 | 0.53000 | 0.11000 | 0.49000 |
| 6        | 0.47000  | 0.37000 | 0.08000 | 0.05000 | 0.00150 | 0.33000 | 0.11000 | 0.52000 | 1.00000 | 0.25000 |
| 7        | 0.36000  | 0.13000 | 0.55000 | 0.47000 | 2.00000 | 0.58000 | 0.05000 | 0.22000 | 0.38000 | 0.11000 |
| 8        | 0.30000  | 0.51000 | 0.45000 | 0.18000 | 0.49000 | 0.44000 | 0.54000 | 0.46000 | 0.04500 | 0.16000 |
| 9        | 0.49000  | 0.58000 | 0.10000 | 0.11000 | 0.49000 | 0.00500 | 0.43000 | 0.07000 | 0.17000 | 0.20000 |
| 10       | 0.10000  | 0.53000 | 0.30000 | 0.59000 | 0.52000 | 0.51000 | 0.33000 | 1.00000 | 0.17000 | 0.42000 |
| Fobj     | 0.14032  | 0.26238 | 0.28436 | 0.39680 | 1.25263 | 0.56332 | 0.17633 | 0.35106 | 0.51239 | 0.21596 |
| Geração  | 30       | 2       | 40      | 38      | 37      | 38      | 37      | 40      | 2       | 4       |
| Tempo(s) | 62.63    | 53.42   | 53.55   | 48.97   | 58.03   | 60.33   | 53.53   | 49.92   | 44.95   | 50.05   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 19).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.12565                       | 0.08565 | 214.13       |
| 2              | 0.30000                   | 0.34100                       | 0.04100 | 13.67        |
| 3              | 0.10000                   | 0.10115                       | 0.00115 | 1.15         |
| 4              | 0.05000                   | 0.17765                       | 0.12765 | 255.30       |
| 5              | 0.50000                   | 0.55850                       | 0.05850 | 11.70        |
| 6              | 0.30000                   | 0.31815                       | 0.01815 | 6.05         |
| 7              | 0.20000                   | 0.48500                       | 0.28500 | 142.50       |
| 8              | 0.25000                   | 0.35750                       | 0.10750 | 43.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.26450                       | 0.28550 | 51.91        |
| 10             | 0.60000                   | 0.44700                       | 0.15300 | 25.50        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>76.49</b> |

## CASO 20

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 20).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.08000  | 0.10000 | 0.04000 | 0.22000 | 0.00500 | 0.11000 | 0.12000 | 0.06000 | 0.00150 | 0.00500 |
| 2        | 0.55000  | 0.56000 | 0.31000 | 0.40000 | 0.26000 | 0.16000 | 0.41000 | 0.04000 | 0.43000 | 0.55000 |
| 3        | 0.06000  | 0.04500 | 0.10000 | 0.00500 | 0.19000 | 0.08000 | 0.00500 | 0.19000 | 0.16000 | 0.10000 |
| 4        | 0.00150  | 0.34000 | 0.04000 | 0.08000 | 0.10000 | 0.07000 | 0.34000 | 0.48000 | 0.14000 | 0.12000 |
| 5        | 0.26000  | 0.19000 | 0.50000 | 0.18000 | 0.05000 | 0.37000 | 0.08000 | 0.59000 | 0.00150 | 0.36000 |
| 6        | 0.08000  | 0.23000 | 0.11000 | 0.23000 | 0.02500 | 0.61000 | 0.42000 | 2.00000 | 0.48000 | 0.45000 |
| 7        | 0.15000  | 0.26000 | 0.44000 | 0.47000 | 0.56000 | 0.40000 | 0.09000 | 0.57000 | 0.52000 | 0.34000 |
| 8        | 0.04500  | 0.24000 | 0.60000 | 0.29000 | 0.05000 | 0.00500 | 0.14000 | 0.28000 | 0.27000 | 0.00150 |
| 9        | 0.50000  | 0.23000 | 0.40000 | 0.15000 | 0.51000 | 0.53000 | 0.21000 | 0.22000 | 0.42000 | 0.49000 |
| 10       | 0.61000  | 2.00000 | 0.31000 | 0.29000 | 0.60000 | 0.61000 | 0.42000 | 0.57000 | 0.53000 | 0.43000 |
| Fobj     | 0.10630  | 0.15456 | 0.07775 | 0.20087 | 0.07964 | 0.16192 | 0.15433 | 0.15523 | 0.16977 | 0.09174 |
| Geração  | 40       | 16      | 4       | 37      | 16      | 36      | 40      | 12      | 3       | 32      |
| Tempo(s) | 278.45   | 299.33  | 249.76  | 252.89  | 301.22  | 265.50  | 277.91  | 250.78  | 329.53  | 315.05  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 20).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.07415                       | 0.03415 | 85.38        |
| 2              | 0.30000                   | 0.36700                       | 0.06700 | 22.33        |
| 3              | 0.10000                   | 0.09350                       | 0.00650 | 6.50         |
| 4              | 0.05000                   | 0.17115                       | 0.12115 | 242.30       |
| 5              | 0.50000                   | 0.25815                       | 0.24185 | 48.37        |
| 6              | 0.30000                   | 0.46350                       | 0.16350 | 54.50        |
| 7              | 0.20000                   | 0.38000                       | 0.18000 | 90.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.19215                       | 0.05785 | 23.14        |
| 9              | 0.55000                   | 0.36600                       | 0.18400 | 33.45        |
| 10             | 0.60000                   | 0.63700                       | 0.03700 | 6.17         |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>61.21</b> |

## CASO 21

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 21).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.10000  | 0.14000 | 0.02500 | 0.04500 | 0.08000 | 0.00150 | 0.08000 | 0.02500 | 0.12000 | 0.06000 |
| 2        | 0.55000  | 0.27000 | 0.51000 | 0.43000 | 0.51000 | 0.17000 | 0.37000 | 0.10000 | 0.42000 | 0.30000 |
| 3        | 0.00150  | 0.04000 | 0.04000 | 0.17000 | 0.04500 | 0.12000 | 0.07000 | 0.27000 | 0.00150 | 0.08000 |
| 4        | 0.26000  | 0.17000 | 0.11000 | 0.04500 | 0.33000 | 0.16000 | 0.00150 | 0.11000 | 0.37000 | 0.12000 |
| 5        | 0.37000  | 0.18000 | 0.19000 | 0.56000 | 0.34000 | 0.37000 | 0.49000 | 0.07000 | 0.37000 | 0.46000 |
| 6        | 0.28000  | 0.23000 | 0.24000 | 0.12000 | 0.57000 | 0.39000 | 0.04500 | 0.20000 | 0.45000 | 0.00500 |
| 7        | 0.08000  | 0.46000 | 0.16000 | 0.55000 | 0.17000 | 0.06000 | 0.26000 | 0.49000 | 0.06000 | 0.07000 |
| 8        | 0.53000  | 0.58000 | 0.54000 | 0.47000 | 0.51000 | 0.32000 | 0.36000 | 0.59000 | 0.50000 | 0.57000 |
| 9        | 0.27000  | 0.24000 | 0.43000 | 0.14000 | 0.05000 | 0.60000 | 0.49000 | 0.31000 | 0.24000 | 0.31000 |
| 10       | 0.47000  | 0.54000 | 0.13000 | 0.61000 | 0.54000 | 0.22000 | 0.25000 | 0.55000 | 0.59000 | 0.61000 |
| Fobj     | 0.15231  | 0.12307 | 0.08796 | 0.13538 | 0.14567 | 0.14514 | 0.12671 | 0.09959 | 0.13484 | 0.13509 |
| Geração  | 15       | 40      | 38      | 40      | 11      | 5       | 10      | 39      | 38      | 40      |
| Tempo(s) | 523.50   | 507.61  | 611.59  | 558.30  | 503.97  | 501.95  | 530.37  | 550.70  | 520.27  | 549.87  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 21).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06765                       | 0.02765 | 69.13        |
| 2              | 0.30000                   | 0.36300                       | 0.06300 | 21.00        |
| 3              | 0.10000                   | 0.08380                       | 0.01620 | 16.20        |
| 4              | 0.05000                   | 0.16765                       | 0.11765 | 235.30       |
| 5              | 0.50000                   | 0.34000                       | 0.16000 | 32.00        |
| 6              | 0.30000                   | 0.25300                       | 0.04700 | 15.67        |
| 7              | 0.20000                   | 0.23600                       | 0.03600 | 18.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.49700                       | 0.24700 | 98.80        |
| 9              | 0.55000                   | 0.30800                       | 0.24200 | 44.00        |
| 10             | 0.60000                   | 0.45100                       | 0.14900 | 24.83        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>57.49</b> |

## CASO 22

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 22).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.02500  | 0.18000 | 0.18000 | 0.08000 | 0.00150 | 0.08000 | 0.04000 | 0.00500 | 0.09000 | 0.14000 |
| 2        | 0.51000  | 0.06000 | 0.12000 | 0.51000 | 0.61000 | 0.42000 | 0.24000 | 0.41000 | 0.08000 | 0.30000 |
| 3        | 0.04000  | 0.08000 | 0.00150 | 0.06000 | 0.09000 | 0.02500 | 0.12000 | 0.16000 | 0.14000 | 0.02500 |
| 4        | 0.08000  | 0.32000 | 0.61000 | 0.02500 | 0.48000 | 0.15000 | 0.42000 | 0.23000 | 0.13000 | 0.12000 |
| 5        | 1.00000  | 0.58000 | 1.00000 | 0.24000 | 0.50000 | 0.37000 | 0.58000 | 0.59000 | 0.18000 | 0.54000 |
| 6        | 0.47000  | 0.00150 | 0.08000 | 0.53000 | 0.53000 | 0.29000 | 0.41000 | 0.07000 | 2.00000 | 0.14000 |
| 7        | 0.36000  | 0.59000 | 0.53000 | 0.59000 | 0.29000 | 0.25000 | 0.31000 | 0.44000 | 0.34000 | 0.07000 |
| 8        | 0.30000  | 0.48000 | 0.40000 | 0.04000 | 0.52000 | 0.36000 | 1.00000 | 0.38000 | 0.47000 | 0.24000 |
| 9        | 0.49000  | 0.15000 | 0.37000 | 0.14000 | 0.04000 | 0.44000 | 0.12000 | 0.22000 | 0.22000 | 0.51000 |
| 10       | 0.10000  | 0.59000 | 0.10000 | 0.07000 | 0.44000 | 0.56000 | 0.31000 | 0.52000 | 0.41000 | 0.59000 |
| Fobj     | 0.14032  | 0.22810 | 0.58044 | 0.23262 | 0.23567 | 0.22106 | 0.21037 | 0.12339 | 0.16397 | 0.24240 |
| Geração  | 30       | 51      | 3       | 77      | 3       | 70      | 65      | 57      | 78      | 1       |
| Tempo(s) | 126.55   | 90.61   | 131.06  | 111.53  | 113.06  | 101.23  | 104.12  | 127.08  | 100.36  | 98.61   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 22).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.08215                       | 0.04215 | 105.38       |
| 2              | 0.30000                   | 0.32600                       | 0.02600 | 8.67         |
| 3              | 0.10000                   | 0.07415                       | 0.02585 | 25.85        |
| 4              | 0.05000                   | 0.25650                       | 0.20650 | 413.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.55800                       | 0.05800 | 11.60        |
| 6              | 0.30000                   | 0.45215                       | 0.15215 | 50.72        |
| 7              | 0.20000                   | 0.37700                       | 0.17700 | 88.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.41900                       | 0.16900 | 67.60        |
| 9              | 0.55000                   | 0.27000                       | 0.28000 | 50.91        |
| 10             | 0.60000                   | 0.36900                       | 0.23100 | 38.50        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>86.07</b> |

### CASO 23

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 23).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.08000  | 0.02500 | 0.16000 | 0.04000 | 0.00150 | 0.08000 | 0.12000 | 0.14000 | 0.00150 | 0.12000 |
| 2        | 0.53000  | 0.54000 | 0.45000 | 0.22000 | 0.36000 | 0.35000 | 0.56000 | 0.29000 | 0.55000 | 0.09000 |
| 3        | 0.06000  | 0.11000 | 0.04500 | 0.15000 | 0.12000 | 0.09000 | 0.02500 | 0.00500 | 0.17000 | 0.11000 |
| 4        | 0.00150  | 0.16000 | 0.16000 | 0.12000 | 0.20000 | 0.04500 | 0.21000 | 0.24000 | 0.10000 | 0.10000 |
| 5        | 0.19000  | 0.12000 | 0.33000 | 0.20000 | 0.26000 | 0.09000 | 0.32000 | 0.00500 | 0.09000 | 0.53000 |
| 6        | 0.09000  | 0.16000 | 0.35000 | 0.48000 | 0.07000 | 0.40000 | 0.30000 | 2.00000 | 0.50000 | 0.46000 |
| 7        | 0.15000  | 0.44000 | 0.47000 | 0.50000 | 0.37000 | 0.47000 | 0.15000 | 0.09000 | 0.54000 | 0.55000 |
| 8        | 0.05000  | 1.00000 | 0.16000 | 0.23000 | 0.34000 | 0.39000 | 0.59000 | 0.33000 | 0.15000 | 0.47000 |
| 9        | 0.55000  | 0.15000 | 0.04000 | 0.39000 | 0.40000 | 0.31000 | 0.07000 | 0.43000 | 0.20000 | 0.31000 |
| 10       | 0.61000  | 0.59000 | 0.47000 | 0.49000 | 0.47000 | 0.60000 | 0.47000 | 0.56000 | 0.61000 | 0.58000 |
| Fobj     | 0.10038  | 0.11738 | 0.18989 | 0.13384 | 0.11863 | 0.13284 | 0.18486 | 0.15329 | 0.14698 | 0.13379 |
| Geração  | 69       | 78      | 78      | 14      | 13      | 80      | 70      | 74      | 9       | 80      |
| Tempo(s) | 558.95   | 591.08  | 511.42  | 526.00  | 504.80  | 554.83  | 496.16  | 563.76  | 507.00  | 487.47  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 23).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.07680                       | 0.03680 | 92.00        |
| 2              | 0.30000                   | 0.39400                       | 0.09400 | 31.33        |
| 3              | 0.10000                   | 0.08850                       | 0.01150 | 11.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.13365                       | 0.08365 | 167.30       |
| 5              | 0.50000                   | 0.21350                       | 0.28650 | 57.30        |
| 6              | 0.30000                   | 0.48100                       | 0.18100 | 60.33        |
| 7              | 0.20000                   | 0.37300                       | 0.17300 | 86.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.37100                       | 0.12100 | 48.40        |
| 9              | 0.55000                   | 0.28500                       | 0.26500 | 48.18        |
| 10             | 0.60000                   | 0.54500                       | 0.05500 | 9.17         |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>61.20</b> |

### CASO 24

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 24).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.10000  | 0.16000 | 0.13000 | 0.04500 | 0.02500 | 0.08000 | 0.00500 | 0.12000 | 0.16000 | 0.02500 |
| 2        | 0.55000  | 0.07000 | 0.27000 | 0.53000 | 0.45000 | 0.45000 | 0.61000 | 0.17000 | 0.16000 | 0.44000 |
| 3        | 0.00150  | 0.02500 | 0.00500 | 0.02500 | 0.05000 | 0.04500 | 0.10000 | 0.12000 | 0.04500 | 0.10000 |
| 4        | 0.26000  | 0.18000 | 0.31000 | 0.22000 | 0.28000 | 0.34000 | 0.15000 | 0.08000 | 0.29000 | 0.16000 |
| 5        | 0.37000  | 2.00000 | 0.00500 | 0.05000 | 0.06000 | 0.12000 | 2.00000 | 0.59000 | 0.55000 | 0.11000 |
| 6        | 0.28000  | 2.00000 | 0.18000 | 1.00000 | 0.04000 | 2.00000 | 0.34000 | 0.30000 | 0.45000 | 0.04500 |
| 7        | 0.08000  | 0.29000 | 0.14000 | 0.04500 | 0.14000 | 0.23000 | 0.38000 | 0.54000 | 0.39000 | 0.32000 |
| 8        | 0.53000  | 0.00500 | 0.60000 | 0.12000 | 0.40000 | 0.54000 | 0.32000 | 1.00000 | 0.17000 | 0.32000 |
| 9        | 0.27000  | 0.61000 | 0.18000 | 0.47000 | 0.30000 | 0.11000 | 0.23000 | 0.22000 | 0.16000 | 0.31000 |
| 10       | 0.47000  | 0.46000 | 0.27000 | 0.48000 | 0.39000 | 0.61000 | 0.33000 | 1.00000 | 0.49000 | 0.49000 |
| Fobj     | 0.15231  | 0.16773 | 0.19600 | 0.11107 | 0.10187 | 0.09665 | 0.09534 | 0.10811 | 0.16255 | 0.09503 |
| Geração  | 15       | 74      | 10      | 58      | 36      | 75      | 80      | 62      | 14      | 65      |
| Tempo(s) | 1027.30  | 1001.55 | 1030.50 | 1159.95 | 1189.91 | 1083.25 | 1213.58 | 986.33  | 1031.59 | 1230.34 |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 24).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.08500                       | 0.04500 | 112.50       |
| 2              | 0.30000                   | 0.37000                       | 0.07000 | 23.33        |
| 3              | 0.10000                   | 0.05165                       | 0.04835 | 48.35        |
| 4              | 0.05000                   | 0.22700                       | 0.17700 | 354.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.58550                       | 0.08550 | 17.10        |
| 6              | 0.30000                   | 0.66350                       | 0.36350 | 121.17       |
| 7              | 0.20000                   | 0.25550                       | 0.05550 | 27.75        |
| 8              | 0.25000                   | 0.40050                       | 0.15050 | 60.20        |
| 9              | 0.55000                   | 0.28600                       | 0.26400 | 48.00        |
| 10             | 0.60000                   | 0.49900                       | 0.10100 | 16.83        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>82.92</b> |

## CASO 25

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 25).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.02500 | 0.04500 | 0.05000 | 0.04500 | 0.10000 | 0.10000 | 0.02500 | 0.41000 | 0.09000 |
| 2        | 0.11000  | 0.20000 | 0.15000 | 0.33000 | 0.60000 | 0.10000 | 0.07000 | 0.41000 | 0.05000 | 0.24000 |
| 3        | 0.56000  | 0.21000 | 0.24000 | 0.05000 | 0.07000 | 0.12000 | 0.04500 | 0.04000 | 0.00150 | 0.07000 |
| 4        | 0.04000  | 0.33000 | 0.17000 | 0.08000 | 0.23000 | 0.20000 | 0.40000 | 0.17000 | 0.35000 | 0.04000 |
| 5        | 0.39000  | 0.36000 | 1.00000 | 0.51000 | 0.23000 | 0.02500 | 0.40000 | 0.51000 | 0.07000 | 0.54000 |
| 6        | 0.30000  | 0.15000 | 0.52000 | 0.15000 | 0.34000 | 0.29000 | 0.04500 | 0.51000 | 0.29000 | 0.14000 |
| 7        | 0.59000  | 0.41000 | 0.30000 | 0.31000 | 0.31000 | 0.47000 | 0.10000 | 0.56000 | 0.44000 | 0.14000 |
| 8        | 0.30000  | 0.37000 | 0.47000 | 0.44000 | 0.06000 | 0.41000 | 0.23000 | 0.07000 | 0.35000 | 0.04500 |
| 9        | 0.00150  | 0.21000 | 0.14000 | 0.49000 | 0.13000 | 0.08000 | 0.44000 | 0.46000 | 0.36000 | 0.55000 |
| 10       | 0.59000  | 0.16000 | 1.00000 | 0.31000 | 0.59000 | 0.07000 | 0.41000 | 0.05000 | 0.57000 | 0.59000 |
| Fobj     | 0.35329  | 0.58667 | 0.25960 | 0.25492 | 0.23801 | 0.39947 | 0.14826 | 0.24113 | 0.43463 | 0.16576 |
| Geração  | 9        | 4       | 2       | 2       | 5       | 3       | 5       | 2       | 7       | 2       |
| Tempo(s) | 13.34    | 16.83   | 13.02   | 14.38   | 13.56   | 14.39   | 14.66   | 14.47   | 13.3    | 15.42   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 25).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.08950                     | 0.04950 | 123.75       |
| 2              | 0.30000                 | 0.22600                     | 0.07400 | 24.67        |
| 3              | 0.10000                 | 0.14065                     | 0.04065 | 40.65        |
| 4              | 0.05000                 | 0.20100                     | 0.15100 | 302.00       |
| 5              | 0.50000                 | 0.40350                     | 0.09650 | 19.30        |
| 6              | 0.30000                 | 0.27350                     | 0.02650 | 8.83         |
| 7              | 0.20000                 | 0.36300                     | 0.16300 | 81.50        |
| 8              | 0.25000                 | 0.27450                     | 0.02450 | 9.80         |
| 9              | 0.55000                 | 0.28615                     | 0.26385 | 47.97        |
| 10             | 0.60000                 | 0.43400                     | 0.16600 | 27.67        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |         | <b>68.61</b> |

### CASO 26

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 26).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.12000  | 0.02500 | 0.10000 | 0.16000 | 0.00500 | 0.16000 | 0.23000 | 0.06000 | 0.14000 | 0.19000 |
| 2        | 0.38000  | 0.39000 | 0.10000 | 0.22000 | 0.42000 | 0.13000 | 0.56000 | 0.10000 | 0.04000 | 0.38000 |
| 3        | 0.00500  | 0.09000 | 0.10000 | 0.02500 | 0.24000 | 0.04000 | 0.00500 | 0.09000 | 0.09000 | 0.02500 |
| 4        | 0.08000  | 0.29000 | 0.09000 | 0.23000 | 0.10000 | 0.36000 | 0.05000 | 0.24000 | 0.32000 | 0.10000 |
| 5        | 0.41000  | 0.36000 | 0.17000 | 0.44000 | 0.00150 | 0.04500 | 0.04500 | 0.28000 | 0.34000 | 0.08000 |
| 6        | 0.04000  | 0.30000 | 2.00000 | 0.24000 | 0.42000 | 0.53000 | 0.24000 | 2.00000 | 0.12000 | 0.50000 |
| 7        | 0.04500  | 0.49000 | 0.29000 | 0.50000 | 0.14000 | 0.18000 | 0.45000 | 0.23000 | 0.45000 | 0.33000 |
| 8        | 0.05000  | 0.36000 | 0.41000 | 0.06000 | 0.61000 | 0.33000 | 0.24000 | 0.08000 | 0.44000 | 0.42000 |
| 9        | 0.56000  | 0.40000 | 0.47000 | 0.32000 | 0.20000 | 0.19000 | 0.08000 | 0.35000 | 0.26000 | 0.14000 |
| 10       | 0.33000  | 0.53000 | 0.59000 | 0.39000 | 2.00000 | 0.51000 | 0.45000 | 0.31000 | 0.58000 | 0.38000 |
| Fobj     | 0.20038  | 0.18070 | 0.20625 | 0.13606 | 0.12996 | 0.22525 | 0.22745 | 0.10375 | 0.20242 | 0.19888 |
| Geração  | 9        | 5       | 3       | 7       | 8       | 7       | 10      | 10      | 7       | 10      |
| Tempo(s) | 69.11    | 70.27   | 71.58   | 69.25   | 73.45   | 69.80   | 69.47   | 70.58   | 81.92   | 71.06   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 26).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.11900                       | 0.07900 | 197.50       |
| 2              | 0.30000                   | 0.27200                       | 0.02800 | 9.33         |
| 3              | 0.10000                   | 0.07100                       | 0.02900 | 29.00        |
| 4              | 0.05000                   | 0.18600                       | 0.13600 | 272.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.21715                       | 0.28285 | 56.57        |
| 6              | 0.30000                   | 0.63900                       | 0.33900 | 113.00       |
| 7              | 0.20000                   | 0.31050                       | 0.11050 | 55.25        |
| 8              | 0.25000                   | 0.30000                       | 0.05000 | 20.00        |
| 9              | 0.55000                   | 0.29700                       | 0.25300 | 46.00        |
| 10             | 0.60000                   | 0.60700                       | 0.00700 | 1.17         |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>79.98</b> |

## CASO 27

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 27).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.07000 | 0.04000 | 0.21000 | 0.06000 | 0.15000 | 0.00150 | 0.00500 | 0.02500 | 0.05000 |
| 2        | 0.09000  | 0.32000 | 0.37000 | 0.37000 | 0.35000 | 0.30000 | 0.20000 | 0.45000 | 0.28000 | 0.30000 |
| 3        | 0.27000  | 0.02500 | 0.13000 | 0.00500 | 0.08000 | 0.02500 | 0.19000 | 0.21000 | 0.11000 | 0.13000 |
| 4        | 0.08000  | 0.19000 | 0.16000 | 0.16000 | 0.31000 | 0.14000 | 0.22000 | 0.11000 | 0.33000 | 0.16000 |
| 5        | 0.60000  | 0.54000 | 0.15000 | 0.35000 | 0.11000 | 0.20000 | 0.02500 | 0.42000 | 0.05000 | 0.58000 |
| 6        | 0.00150  | 0.29000 | 0.20000 | 0.52000 | 1.00000 | 0.22000 | 0.44000 | 0.18000 | 0.00500 | 0.57000 |
| 7        | 0.31000  | 0.00150 | 2.00000 | 0.57000 | 0.47000 | 0.47000 | 0.29000 | 0.50000 | 0.21000 | 0.56000 |
| 8        | 0.17000  | 0.23000 | 0.21000 | 0.04000 | 0.27000 | 0.23000 | 0.42000 | 0.15000 | 0.48000 | 0.04500 |
| 9        | 0.58000  | 0.52000 | 0.20000 | 0.20000 | 0.18000 | 0.16000 | 0.33000 | 0.18000 | 0.27000 | 0.30000 |
| 10       | 0.58000  | 0.39000 | 0.31000 | 0.25000 | 0.43000 | 0.30000 | 0.34000 | 0.57000 | 0.59000 | 0.61000 |
| Fobj     | 0.12482  | 0.21596 | 0.07610 | 0.18379 | 0.25045 | 0.18670 | 0.15480 | 0.14756 | 0.11790 | 0.12735 |
| Geração  | 8        | 3       | 8       | 8       | 9       | 5       | 7       | 4       | 6       | 8       |
| Tempo(s) | 138.67   | 142.53  | 144.89  | 146.50  | 135.23  | 147.33  | 151.11  | 147.97  | 144.73  | 143.12  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 27).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06165                       | 0.02165 | 54.13        |
| 2              | 0.30000                   | 0.30300                       | 0.00300 | 1.00         |
| 3              | 0.10000                   | 0.11750                       | 0.01750 | 17.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.18600                       | 0.13600 | 272.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.30250                       | 0.19750 | 39.50        |
| 6              | 0.30000                   | 0.34265                       | 0.04265 | 14.22        |
| 7              | 0.20000                   | 0.53815                       | 0.33815 | 169.08       |
| 8              | 0.25000                   | 0.22450                       | 0.02550 | 10.20        |
| 9              | 0.55000                   | 0.29200                       | 0.25800 | 46.91        |
| 10             | 0.60000                   | 0.43700                       | 0.16300 | 27.17        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>65.17</b> |

## CASO 28

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 28).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.20000 | 0.14000 | 0.19000 | 0.39000 | 0.11000 | 0.17000 | 0.08000 | 0.02500 | 0.09000 |
| 2        | 0.11000  | 0.23000 | 0.47000 | 0.30000 | 0.09000 | 0.36000 | 0.16000 | 0.02500 | 0.53000 | 0.59000 |
| 3        | 0.40000  | 0.05000 | 0.04000 | 0.00150 | 0.02500 | 0.11000 | 0.10000 | 0.11000 | 0.04000 | 0.07000 |
| 4        | 0.20000  | 0.17000 | 0.12000 | 0.50000 | 0.50000 | 0.22000 | 0.05000 | 0.34000 | 0.19000 | 0.34000 |
| 5        | 0.04500  | 0.59000 | 0.22000 | 0.08000 | 0.00500 | 0.35000 | 0.51000 | 0.42000 | 1.00000 | 0.07000 |
| 6        | 0.12000  | 0.00500 | 0.31000 | 0.53000 | 0.59000 | 0.18000 | 0.40000 | 0.39000 | 0.60000 | 0.20000 |
| 7        | 0.46000  | 0.51000 | 0.44000 | 0.33000 | 0.61000 | 0.60000 | 0.51000 | 2.00000 | 0.26000 | 0.25000 |
| 8        | 0.06000  | 0.47000 | 1.00000 | 0.54000 | 0.27000 | 0.20000 | 0.44000 | 0.34000 | 0.12000 | 0.00150 |
| 9        | 0.11000  | 0.10000 | 0.12000 | 0.20000 | 0.05000 | 0.04000 | 0.13000 | 0.41000 | 0.47000 | 0.08000 |
| 10       | 0.60000  | 0.61000 | 0.58000 | 0.51000 | 0.60000 | 0.42000 | 0.39000 | 0.10000 | 0.61000 | 2.00000 |
| Fobj     | 0.31559  | 0.19656 | 0.16516 | 0.24111 | 0.41675 | 0.28377 | 0.24388 | 0.14964 | 0.21530 | 0.12470 |
| Geração  | 18       | 12      | 18      | 17      | 20      | 12      | 13      | 12      | 7       | 19      |
| Tempo(s) | 29.30    | 28.11   | 37.95   | 28.26   | 27.34   | 28.08   | 27.03   | 26.83   | 27.26   | 27.77   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 28).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%) |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------|
| 1              | 0.04000                   | 0.14000                       | 0.10000 | 250.00 |
| 2              | 0.30000                   | 0.28650                       | 0.01350 | 4.50   |
| 3              | 0.10000                   | 0.09465                       | 0.00535 | 5.35   |
| 4              | 0.05000                   | 0.26300                       | 0.21300 | 426.00 |
| 5              | 0.50000                   | 0.32900                       | 0.17100 | 34.20  |
| 6              | 0.30000                   | 0.33250                       | 0.03250 | 10.83  |
| 7              | 0.20000                   | 0.59700                       | 0.39700 | 198.50 |
| 8              | 0.25000                   | 0.34415                       | 0.09415 | 37.66  |
| 9              | 0.55000                   | 0.17100                       | 0.37900 | 68.91  |
| 10             | 0.60000                   | 0.64200                       | 0.04200 | 7.00   |
| <b>EMR (%)</b> |                           | <b>104.30</b>                 |         |        |

### CASO 29

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 29).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.04500  | 0.09000 | 0.00500 | 0.02500 | 0.00150 | 0.05000 | 0.04000 | 0.09000 | 0.00500 | 0.02500 |
| 2        | 0.39000  | 0.04000 | 0.53000 | 0.44000 | 0.12000 | 0.44000 | 0.58000 | 0.47000 | 0.36000 | 0.40000 |
| 3        | 0.00500  | 0.12000 | 0.09000 | 0.10000 | 0.35000 | 0.08000 | 0.06000 | 0.11000 | 0.13000 | 0.07000 |
| 4        | 0.24000  | 0.60000 | 0.10000 | 0.17000 | 0.18000 | 0.02500 | 0.24000 | 0.00150 | 0.21000 | 0.15000 |
| 5        | 0.43000  | 0.51000 | 0.14000 | 0.58000 | 0.26000 | 0.28000 | 0.08000 | 0.23000 | 0.00500 | 0.28000 |
| 6        | 0.09000  | 0.61000 | 0.60000 | 0.48000 | 0.22000 | 0.53000 | 0.05000 | 0.07000 | 0.14000 | 0.23000 |
| 7        | 0.21000  | 0.23000 | 0.52000 | 0.26000 | 0.36000 | 0.21000 | 0.10000 | 0.47000 | 0.59000 | 0.20000 |
| 8        | 0.42000  | 0.58000 | 0.11000 | 0.54000 | 2.00000 | 0.18000 | 0.54000 | 0.19000 | 0.21000 | 0.14000 |
| 9        | 0.53000  | 0.19000 | 0.37000 | 0.23000 | 0.17000 | 0.40000 | 0.22000 | 0.27000 | 0.38000 | 0.52000 |
| 10       | 0.14000  | 0.55000 | 0.25000 | 0.45000 | 0.61000 | 0.30000 | 1.00000 | 0.61000 | 0.30000 | 0.29000 |
| Fobj     | 0.18142  | 0.13696 | 0.12999 | 0.11496 | 0.18370 | 0.07998 | 0.11457 | 0.21255 | 0.11862 | 0.10481 |
| Geração  | 15       | 15      | 3       | 14      | 20      | 1       | 19      | 18      | 1       | 16      |
| Tempo(s) | 141.61   | 141.34  | 156.19  | 158.44  | 152.50  | 145.39  | 157.27  | 150.34  | 153.38  | 166.72  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 29).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.03765                       | 0.00235 | 5.87         |
| 2              | 0.30000                   | 0.37700                       | 0.07700 | 25.67        |
| 3              | 0.10000                   | 0.11150                       | 0.01150 | 11.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.19165                       | 0.14165 | 283.30       |
| 5              | 0.50000                   | 0.27950                       | 0.22050 | 44.10        |
| 6              | 0.30000                   | 0.30200                       | 0.00200 | 0.67         |
| 7              | 0.20000                   | 0.31500                       | 0.11500 | 57.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.49100                       | 0.24100 | 96.40        |
| 9              | 0.55000                   | 0.32800                       | 0.22200 | 40.36        |
| 10             | 0.60000                   | 0.45000                       | 0.15000 | 25.00        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>59.04</b> |

### CASO 30

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 30).

| Tubo     | Sementes |         |         |           |         |         |         |         |         |         |   |
|----------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---|
|          | 1        | 2       | 3       | 4         | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |   |
| 1        | 0.00500  | 0.19000 | 0.00150 | 0.02500   | 0.12000 | 0.15000 | 0.00500 | 0.02500 | 0.04500 | 0.11000 |   |
| 2        | 0.09000  | 0.50000 | 0.47000 | 0.15000   | 0.24000 | 0.55000 | 0.17000 | 0.32000 | 0.19000 | 0.33000 |   |
| 3        | 0.27000  | 0.02500 | 0.13000 | 0.17000   | 0.06000 | 0.00150 | 0.18000 | 0.11000 | 0.18000 | 0.04000 |   |
| 4        | 0.08000  | 0.13000 | 0.09000 | 0.13000   | 0.26000 | 0.12000 | 0.16000 | 0.17000 | 0.09000 | 0.20000 |   |
| 5        | 0.60000  | 0.32000 | 0.16000 | 0.02500   | 0.47000 | 0.53000 | 0.33000 | 0.24000 | 0.06000 | 0.50000 |   |
| 6        | 0.00150  | 0.35000 | 0.28000 | 0.45000   | 0.61000 | 0.35000 | 0.02500 | 0.12000 | 0.00500 | 0.24000 |   |
| 7        | 0.31000  | 0.50000 | 0.37000 | 0.39000   | 0.25000 | 0.42000 | 0.08000 | 0.31000 | 2.00000 | 0.34000 |   |
| 8        | 0.17000  | 0.33000 | 0.05000 | 0.12000   | 0.50000 | 0.18000 | 0.50000 | 0.61000 | 0.16000 | 0.59000 |   |
| 9        | 0.58000  | 0.05000 | 0.41000 | 0.42000   | 0.12000 | 0.22000 | 0.44000 | 0.25000 | 0.37000 | 0.22000 |   |
| 10       | 0.58000  | 0.43000 | 0.28000 | 0.54000   | 0.44000 | 0.22000 | 0.39000 | 0.34000 | 0.29000 | 0.46000 |   |
| Fobj     | 0.12482  | 0.17835 | 0.10381 | 0.08201   | 0.18095 | 0.16517 | 0.14000 | 0.14671 | 0.07882 | 0.13587 |   |
| Geração  |          | 8       | 10      | 5         | 15      | 7       | 9       | 18      | 12      | 9       | 3 |
| Tempo(s) | 279.05   | 287.66  | 316.48  | -86096.16 | 286.81  | 361.77  | 427.66  | 404.63  | 352.30  | 307.95  |   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 30).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06765                       | 0.02765 | 69.13        |
| 2              | 0.30000                   | 0.30100                       | 0.00100 | 0.33         |
| 3              | 0.10000                   | 0.11665                       | 0.01665 | 16.65        |
| 4              | 0.05000                   | 0.14300                       | 0.09300 | 186.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.32350                       | 0.17650 | 35.30        |
| 6              | 0.30000                   | 0.24315                       | 0.05685 | 18.95        |
| 7              | 0.20000                   | 0.49700                       | 0.29700 | 148.50       |
| 8              | 0.25000                   | 0.32100                       | 0.07100 | 28.40        |
| 9              | 0.55000                   | 0.30800                       | 0.24200 | 44.00        |
| 10             | 0.60000                   | 0.39700                       | 0.20300 | 33.83        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>58.11</b> |

### CASO 31

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 31).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.00150 | 0.07000 | 0.11000 | 0.09000 | 0.09000 | 0.04000 | 0.09000 | 0.29000 | 0.02500 |
| 2        | 0.47000  | 0.10000 | 0.29000 | 0.61000 | 0.26000 | 0.08000 | 0.08000 | 0.32000 | 0.26000 | 0.04000 |
| 3        | 0.28000  | 0.38000 | 0.15000 | 0.02500 | 0.04000 | 0.11000 | 0.09000 | 0.02500 | 0.02500 | 0.37000 |
| 4        | 0.04500  | 0.02500 | 0.10000 | 0.15000 | 0.18000 | 0.11000 | 0.36000 | 0.11000 | 0.09000 | 0.05000 |
| 5        | 0.36000  | 0.13000 | 0.47000 | 0.47000 | 0.57000 | 0.51000 | 0.27000 | 0.15000 | 0.27000 | 0.34000 |
| 6        | 0.12000  | 0.34000 | 0.53000 | 0.42000 | 0.52000 | 0.35000 | 0.00150 | 0.00500 | 0.30000 | 0.46000 |
| 7        | 2.00000  | 0.52000 | 0.50000 | 0.23000 | 0.09000 | 0.09000 | 0.00150 | 0.34000 | 0.57000 | 0.55000 |
| 8        | 0.06000  | 0.22000 | 0.11000 | 0.29000 | 0.38000 | 0.34000 | 0.43000 | 0.14000 | 0.50000 | 0.42000 |
| 9        | 0.25000  | 0.37000 | 0.32000 | 0.07000 | 0.28000 | 0.30000 | 0.43000 | 0.58000 | 0.00150 | 0.26000 |
| 10       | 0.60000  | 0.12000 | 2.00000 | 0.52000 | 0.29000 | 0.32000 | 0.57000 | 0.40000 | 0.16000 | 0.20000 |
| Fobj     | 0.18750  | 0.29670 | 0.16659 | 0.19575 | 0.19810 | 0.30530 | 0.12163 | 0.24555 | 0.36602 | 0.15608 |
| Geração  | 21       | 12      | 6       | 3       | 38      | 37      | 31      | 34      | 5       | 23      |
| Tempo(s) | 65.58    | 62.45   | 81.59   | 56.92   | 56.63   | 56.98   | 56.03   | 60.08   | 52.03   | 62.38   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 31).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.08115                       | 0.04115 | 102.88       |
| 2              | 0.30000                   | 0.25100                       | 0.04900 | 16.33        |
| 3              | 0.10000                   | 0.14950                       | 0.04950 | 49.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.12200                       | 0.07200 | 144.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.35400                       | 0.14600 | 29.20        |
| 6              | 0.30000                   | 0.30465                       | 0.00465 | 1.55         |
| 7              | 0.20000                   | 0.48915                       | 0.28915 | 144.58       |
| 8              | 0.25000                   | 0.28900                       | 0.03900 | 15.60        |
| 9              | 0.55000                   | 0.28615                       | 0.26385 | 47.97        |
| 10             | 0.60000                   | 0.51800                       | 0.08200 | 13.67        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>56.53</b> |

### CASO 32

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 32).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.09000  | 0.04000 | 0.07000 | 0.11000 | 0.08000 | 0.07000 | 0.13000 | 0.04000 | 0.17000 | 0.16000 |
| 2        | 0.39000  | 0.47000 | 0.08000 | 0.27000 | 0.30000 | 0.06000 | 0.48000 | 0.27000 | 0.58000 | 0.33000 |
| 3        | 0.00150  | 0.14000 | 0.21000 | 0.00150 | 0.05000 | 0.11000 | 0.05000 | 0.11000 | 0.05000 | 0.04000 |
| 4        | 0.37000  | 0.04000 | 0.12000 | 0.16000 | 0.16000 | 0.37000 | 0.11000 | 0.10000 | 0.09000 | 0.10000 |
| 5        | 0.46000  | 0.23000 | 0.40000 | 0.36000 | 0.37000 | 0.27000 | 0.07000 | 0.40000 | 0.12000 | 0.11000 |
| 6        | 0.07000  | 0.14000 | 0.48000 | 0.33000 | 0.11000 | 0.44000 | 0.51000 | 0.60000 | 0.04000 | 0.38000 |
| 7        | 0.08000  | 0.46000 | 0.60000 | 0.53000 | 0.18000 | 0.54000 | 0.29000 | 0.29000 | 0.58000 | 0.37000 |
| 8        | 0.10000  | 0.09000 | 0.25000 | 0.34000 | 0.52000 | 0.45000 | 0.55000 | 0.61000 | 0.32000 | 2.00000 |
| 9        | 0.48000  | 0.19000 | 0.26000 | 0.45000 | 0.38000 | 0.42000 | 0.04500 | 0.40000 | 0.06000 | 0.11000 |
| 10       | 0.38000  | 0.59000 | 0.56000 | 0.10000 | 0.48000 | 0.45000 | 0.50000 | 0.61000 | 1.00000 | 0.47000 |
| Fobj     | 0.13731  | 0.13503 | 0.18376 | 0.18313 | 0.11140 | 0.20522 | 0.18881 | 0.04254 | 0.14985 | 0.15411 |
| Geração  | 33       | 23      | 30      | 14      | 18      | 6       | 26      | 25      | 30      | 16      |
| Tempo(s) | 269.61   | 294.06  | 269.26  | 294.53  | 289.61  | 268.84  | 281.20  | 281.30  | 274.19  | 258.41  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 32).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.09600                       | 0.05600 | 140.00       |
| 2              | 0.30000                   | 0.32300                       | 0.02300 | 7.67         |
| 3              | 0.10000                   | 0.07630                       | 0.02370 | 23.70        |
| 4              | 0.05000                   | 0.16200                       | 0.11200 | 224.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.27900                       | 0.22100 | 44.20        |
| 6              | 0.30000                   | 0.31000                       | 0.01000 | 3.33         |
| 7              | 0.20000                   | 0.39200                       | 0.19200 | 96.00        |
| 8              | 0.25000                   | 0.52300                       | 0.27300 | 109.20       |
| 9              | 0.55000                   | 0.27950                       | 0.27050 | 49.18        |
| 10             | 0.60000                   | 0.51400                       | 0.08600 | 14.33        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>71.16</b> |

### CASO 33

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 33).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.09000 | 0.04000 | 0.00500 | 0.06000 | 0.04500 | 0.04000 | 0.05000 | 0.06000 | 0.12000 |
| 2        | 0.09000  | 0.39000 | 0.26000 | 0.27000 | 0.31000 | 0.27000 | 0.54000 | 0.18000 | 0.43000 | 0.22000 |
| 3        | 0.27000  | 0.02500 | 0.10000 | 0.20000 | 0.14000 | 0.13000 | 0.07000 | 0.16000 | 0.10000 | 0.04000 |
| 4        | 0.08000  | 0.29000 | 0.10000 | 0.06000 | 0.06000 | 0.00150 | 0.00500 | 0.02500 | 0.02500 | 0.23000 |
| 5        | 0.60000  | 0.46000 | 0.58000 | 0.36000 | 0.51000 | 0.43000 | 0.52000 | 0.34000 | 0.49000 | 0.53000 |
| 6        | 0.00150  | 0.38000 | 0.14000 | 0.13000 | 0.38000 | 0.60000 | 0.17000 | 0.00500 | 0.05000 | 0.23000 |
| 7        | 0.31000  | 0.09000 | 1.00000 | 0.31000 | 0.30000 | 0.36000 | 0.20000 | 0.46000 | 0.43000 | 0.51000 |
| 8        | 0.17000  | 0.58000 | 0.33000 | 0.36000 | 0.37000 | 0.28000 | 0.55000 | 0.09000 | 0.05000 | 0.56000 |
| 9        | 0.58000  | 0.19000 | 0.45000 | 0.45000 | 0.26000 | 0.61000 | 0.42000 | 0.48000 | 0.37000 | 0.25000 |
| 10       | 0.58000  | 0.51000 | 0.33000 | 0.51000 | 0.56000 | 0.53000 | 0.26000 | 0.30000 | 0.58000 | 0.34000 |
| Fobj     | 0.12482  | 0.13346 | 0.08340 | 0.08193 | 0.17212 | 0.08903 | 0.06645 | 0.12184 | 0.09468 | 0.11326 |
| Geração  | 8        | 20      | 13      | 27      | 10      | 6       | 18      | 27      | 39      | 16      |
| Tempo(s) | 529.62   | 526.98  | 606.69  | 620.16  | 526.20  | 531.55  | 598.64  | 555.53  | 561.22  | 544.45  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 33).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.05150                       | 0.01150 | 28.75        |
| 2              | 0.30000                   | 0.29600                       | 0.00400 | 1.33         |
| 3              | 0.10000                   | 0.12350                       | 0.02350 | 23.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.08765                       | 0.03765 | 75.30        |
| 5              | 0.50000                   | 0.48200                       | 0.01800 | 3.60         |
| 6              | 0.30000                   | 0.20865                       | 0.09135 | 30.45        |
| 7              | 0.20000                   | 0.39700                       | 0.19700 | 98.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.33400                       | 0.08400 | 33.60        |
| 9              | 0.55000                   | 0.40600                       | 0.14400 | 26.18        |
| 10             | 0.60000                   | 0.45000                       | 0.15000 | 25.00        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>34.62</b> |

### CASO 34

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 34).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.00500  | 0.11000 | 0.02500 | 0.05000 | 0.12000 | 0.06000 | 0.12000 | 0.04000 | 0.12000 | 0.04500 |
| 2        | 0.39000  | 0.43000 | 0.54000 | 0.05000 | 0.36000 | 0.35000 | 0.35000 | 0.34000 | 0.31000 | 0.39000 |
| 3        | 0.14000  | 0.05000 | 0.07000 | 0.10000 | 0.02500 | 0.00500 | 0.00150 | 0.07000 | 0.05000 | 0.09000 |
| 4        | 0.11000  | 0.14000 | 0.10000 | 0.27000 | 0.17000 | 0.50000 | 0.09000 | 0.29000 | 0.14000 | 0.07000 |
| 5        | 0.21000  | 0.04000 | 0.43000 | 0.57000 | 0.49000 | 0.47000 | 0.21000 | 0.00150 | 0.29000 | 0.04000 |
| 6        | 0.36000  | 0.15000 | 0.11000 | 0.59000 | 0.19000 | 0.55000 | 0.42000 | 0.50000 | 0.05000 | 0.57000 |
| 7        | 0.61000  | 0.47000 | 0.24000 | 0.17000 | 0.43000 | 0.19000 | 0.07000 | 0.11000 | 0.42000 | 0.42000 |
| 8        | 0.33000  | 0.50000 | 0.12000 | 0.00150 | 0.45000 | 0.37000 | 0.45000 | 0.29000 | 0.20000 | 0.05000 |
| 9        | 0.24000  | 0.15000 | 0.32000 | 0.52000 | 0.28000 | 0.38000 | 0.60000 | 0.21000 | 0.24000 | 0.45000 |
| 10       | 0.16000  | 0.61000 | 0.11000 | 0.28000 | 0.43000 | 0.16000 | 0.58000 | 0.59000 | 0.38000 | 0.54000 |
| Fobj     | 0.12234  | 0.36364 | 0.12089 | 0.06764 | 0.14021 | 0.14892 | 0.35338 | 0.14735 | 0.16849 | 0.03666 |
| Geração  | 60       | 4       | 74      | 26      | 25      | 45      | 74      | 72      | 43      | 26      |
| Tempo(s) | 129.20   | 100.89  | 119.09  | 122.36  | 126.53  | 110.50  | 110.09  | 115.37  | 115.58  | 113.69  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 34).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06950                       | 0.02950 | 73.75        |
| 2              | 0.30000                   | 0.35100                       | 0.05100 | 17.00        |
| 3              | 0.10000                   | 0.06015                       | 0.03985 | 39.85        |
| 4              | 0.05000                   | 0.18800                       | 0.13800 | 276.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.27515                       | 0.22485 | 44.97        |
| 6              | 0.30000                   | 0.34900                       | 0.04900 | 16.33        |
| 7              | 0.20000                   | 0.31300                       | 0.11300 | 56.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.27615                       | 0.02615 | 10.46        |
| 9              | 0.55000                   | 0.33900                       | 0.21100 | 38.36        |
| 10             | 0.60000                   | 0.38400                       | 0.21600 | 36.00        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>60.92</b> |

### CASO 35

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 35).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.09000  | 0.05000 | 0.05000 | 0.17000 | 0.00500 | 0.04000 | 0.04000 | 0.06000 | 0.04500 | 0.08000 |
| 2        | 0.39000  | 0.34000 | 0.22000 | 0.36000 | 0.55000 | 0.22000 | 0.06000 | 0.46000 | 0.26000 | 0.22000 |
| 3        | 0.00150  | 0.08000 | 0.16000 | 0.04500 | 0.09000 | 0.15000 | 0.10000 | 0.11000 | 0.17000 | 0.12000 |
| 4        | 0.37000  | 0.00500 | 0.08000 | 0.20000 | 0.11000 | 0.07000 | 0.33000 | 0.02500 | 0.08000 | 0.23000 |
| 5        | 0.46000  | 0.06000 | 0.10000 | 1.00000 | 0.04000 | 0.48000 | 0.57000 | 0.13000 | 0.44000 | 0.43000 |
| 6        | 0.07000  | 0.12000 | 0.33000 | 0.45000 | 0.33000 | 0.42000 | 2.00000 | 0.22000 | 0.47000 | 0.02500 |
| 7        | 0.08000  | 0.51000 | 0.56000 | 0.30000 | 0.27000 | 0.34000 | 0.28000 | 0.40000 | 0.44000 | 0.61000 |
| 8        | 0.10000  | 0.42000 | 0.59000 | 0.52000 | 0.34000 | 0.55000 | 0.59000 | 0.12000 | 0.53000 | 1.00000 |
| 9        | 0.48000  | 0.54000 | 0.31000 | 0.02500 | 0.36000 | 0.34000 | 0.38000 | 0.35000 | 0.22000 | 0.15000 |
| 10       | 0.38000  | 0.11000 | 0.61000 | 0.59000 | 0.20000 | 0.50000 | 0.15000 | 0.60000 | 0.53000 | 0.51000 |
| Fobj     | 0.13731  | 0.06044 | 0.09584 | 0.21269 | 0.12271 | 0.08558 | 0.08758 | 0.09335 | 0.14071 | 0.16085 |
| Geração  | 33       | 1       | 58      | 73      | 45      | 5       | 34      | 6       | 42      | 60      |
| Tempo(s) | 516.83   | 607.64  | 529.95  | 530.31  | 533.52  | 630.48  | 604.31  | 545.44  | 573.61  | 519.98  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 35).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06300                       | 0.02300 | 57.50        |
| 2              | 0.30000                   | 0.30800                       | 0.00800 | 2.67         |
| 3              | 0.10000                   | 0.10265                       | 0.00265 | 2.65         |
| 4              | 0.05000                   | 0.15000                       | 0.10000 | 200.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.37100                       | 0.12900 | 25.80        |
| 6              | 0.30000                   | 0.44350                       | 0.14350 | 47.83        |
| 7              | 0.20000                   | 0.37900                       | 0.17900 | 89.50        |
| 8              | 0.25000                   | 0.47600                       | 0.22600 | 90.40        |
| 9              | 0.55000                   | 0.31550                       | 0.23450 | 42.64        |
| 10             | 0.60000                   | 0.41800                       | 0.18200 | 30.33        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>58.93</b> |

### CASO 36

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 36).

| Tubo     | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1        | 0.16000  | 0.05000 | 0.13000 | 0.04000 | 0.13000 | 0.02500 | 0.04000 | 0.04000 | 0.02500 | 0.00500 |
| 2        | 0.23000  | 0.25000 | 0.52000 | 0.13000 | 0.19000 | 0.54000 | 0.53000 | 0.43000 | 0.61000 | 0.60000 |
| 3        | 0.04000  | 0.04000 | 0.04500 | 0.19000 | 0.05000 | 0.20000 | 0.18000 | 0.13000 | 0.10000 | 0.18000 |
| 4        | 0.24000  | 0.37000 | 0.19000 | 0.09000 | 0.27000 | 0.00500 | 0.04500 | 0.06000 | 0.10000 | 0.07000 |
| 5        | 0.61000  | 0.60000 | 0.39000 | 0.00150 | 0.50000 | 0.52000 | 0.52000 | 0.04000 | 0.15000 | 0.07000 |
| 6        | 0.17000  | 0.56000 | 0.56000 | 0.05000 | 0.19000 | 0.17000 | 0.00150 | 0.51000 | 0.04000 | 0.12000 |
| 7        | 0.34000  | 0.09000 | 0.31000 | 1.00000 | 0.47000 | 2.00000 | 0.44000 | 0.47000 | 0.18000 | 0.49000 |
| 8        | 0.12000  | 0.30000 | 0.25000 | 0.37000 | 0.61000 | 0.58000 | 0.24000 | 0.25000 | 0.32000 | 0.10000 |
| 9        | 0.31000  | 0.43000 | 0.04500 | 0.46000 | 0.23000 | 0.17000 | 0.25000 | 0.21000 | 0.25000 | 0.23000 |
| 10       | 1.00000  | 0.40000 | 0.56000 | 0.53000 | 0.56000 | 0.48000 | 2.00000 | 0.59000 | 0.58000 | 0.54000 |
| Fobj     | 0.12269  | 0.08059 | 0.16370 | 0.06366 | 0.10445 | 0.07641 | 0.06587 | 0.08456 | 0.10006 | 0.10304 |
| Geração  | 68       | 65      | 12      | 78      | 79      | 6       | 26      | 69      | 23      | 14      |
| Tempo(s) | 1035.34  | 1113.83 | 1085.27 | 1091.84 | 967.00  | 982.75  | 1116.11 | 1219.19 | 1264.58 | 1036.80 |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 36).

| Tubo           | $\varepsilon_{real}$ (mm) | $\varepsilon_{estimado}$ (mm) | EA      | ER (%)       |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|---------|--------------|
| 1              | 0.04000                   | 0.06450                       | 0.02450 | 61.25        |
| 2              | 0.30000                   | 0.40300                       | 0.10300 | 34.33        |
| 3              | 0.10000                   | 0.11550                       | 0.01550 | 15.50        |
| 4              | 0.05000                   | 0.14400                       | 0.09400 | 188.00       |
| 5              | 0.50000                   | 0.34015                       | 0.15985 | 31.97        |
| 6              | 0.30000                   | 0.23715                       | 0.06285 | 20.95        |
| 7              | 0.20000                   | 0.57900                       | 0.37900 | 189.50       |
| 8              | 0.25000                   | 0.31400                       | 0.06400 | 25.60        |
| 9              | 0.55000                   | 0.25850                       | 0.29150 | 53.00        |
| 10             | 0.60000                   | 0.72400                       | 0.12400 | 20.67        |
| <b>EMR (%)</b> |                           |                               |         | <b>64.08</b> |

### CASO 37

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 37).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0450  | 0.0800  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0450  | 0.0500  | 0.0250  | 0.0050  | 0.2100  |
| 2         | 0.5300   | 0.1000  | 0.1400  | 0.4400  | 0.1300  | 0.3000  | 0.5000  | 0.2000  | 0.4100  | 0.2300  |
| 3         | 0.0250   | 0.3600  | 0.1000  | 0.0700  | 0.2800  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1500  | 0.1100  | 0.0050  |
| 4         | 0.0800   | 0.0250  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0700  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1100  | 0.0700  | 0.0250  |
| 5         | 0.3800   | 0.5100  | 0.6000  | 0.5200  | 0.4000  | 0.3800  | 0.5800  | 0.0450  | 0.0500  | 0.4600  |
| 6         | 0.2800   | 0.2300  | 0.3400  | 0.3800  | 0.2900  | 0.5800  | 0.0600  | 0.5100  | 0.6000  | 0.5400  |
| 7         | 0.0050   | 0.5000  | 0.0050  | 0.3300  | 0.1200  | 0.2000  | 0.0050  | 0.0250  | 0.4300  | 0.5900  |
| 8         | 0.1600   | 0.5100  | 0.3000  | 0.3700  | 0.0250  | 0.5300  | 0.3900  | 0.3500  | 0.3600  | 0.4900  |
| 9         | 0.5400   | 0.0900  | 0.5900  | 0.2600  | 0.2300  | 0.5100  | 0.3100  | 0.2800  | 0.3800  | 0.2400  |
| 10        | 0.4800   | 0.6000  | 0.5500  | 0.3700  | 0.3300  | 0.5900  | 0.2800  | 0.1700  | 0.2400  | 0.0250  |
| Fobj      | 0.10671  | 0.20636 | 0.14349 | 0.13669 | 0.22014 | 0.12012 | 0.09921 | 0.17675 | 0.15921 | 0.27182 |
| Geração   | 23       | 37      | 40      | 13      | 12      | 18      | 34      | 9       | 8       | 12      |
| Tempo (s) | 555.08   | 570.5   | 564.84  | 626.03  | 557.69  | 565.66  | 556.83  | 606.14  | 554.44  | 567.72  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 37).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0330                      | 0.0070 | 17.5        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3020                      | 0.0020 | 0.7         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1090                      | 0.0090 | 9.0         |
| 4              | 0.05000                 | 0.2080                      | 0.1580 | 316.0       |
| 5              | 0.50000                 | 0.3590                      | 0.1410 | 28.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2060                      | 0.0940 | 31.3        |
| 7              | 0.20000                 | 0.3300                      | 0.1300 | 65.0        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3260                      | 0.0760 | 30.4        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4000                      | 0.1500 | 27.3        |
| 10             | 0.60000                 | 0.4720                      | 0.1280 | 21.3        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>54.7</b> |

### CASO 38

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 38).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |        |         |         |         |          |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5      | 6       | 7       | 8       | 9        | 10      |
| 1         | 0.0400   | 0.0400  | 0.0600  | 0.0500  | 0.0500 | 0.0250  | 0.0500  | 0.0450  | 0.0500   | 0.0450  |
| 2         | 0.2000   | 0.1600  | 0.3500  | 0.0450  | 0.1000 | 0.4900  | 0.4800  | 0.3200  | 0.2500   | 0.5600  |
| 3         | 0.1800   | 0.1500  | 0.0600  | 0.2600  | 0.1900 | 0.0600  | 0.0700  | 0.0450  | 0.0900   | 0.0800  |
| 4         | 0.0050   | 0.1100  | 0.0600  | 0.0250  | 0.0800 | 0.1300  | 0.0050  | 0.2000  | 0.0800   | 0.0015  |
| 5         | 0.2800   | 0.6000  | 0.4500  | 2.0000  | 0.0050 | 0.2900  | 0.1300  | 0.2600  | 0.4800   | 0.4500  |
| 6         | 0.4400   | 0.3300  | 0.5000  | 2.0000  | 0.0900 | 0.3100  | 0.2800  | 0.2100  | 0.6100   | 0.1100  |
| 7         | 0.5800   | 0.6000  | 0.2600  | 0.5200  | 0.5500 | 0.2500  | 0.2000  | 0.1200  | 0.3800   | 0.1900  |
| 8         | 0.3500   | 0.2400  | 0.1600  | 0.0600  | 0.0900 | 0.3600  | 0.5500  | 0.4600  | 0.4200   | 0.5000  |
| 9         | 0.4500   | 0.3500  | 0.6000  | 0.5900  | 0.5400 | 0.4000  | 0.4100  | 0.4400  | 0.4400   | 0.4400  |
| 10        | 0.2800   | 0.4200  | 0.4300  | 0.4700  | 0.4600 | 0.2500  | 0.5600  | 0.4600  | 0.3300   | 0.6000  |
| Fobj      | 0.06565  | 0.07765 | 0.06319 | 0.13986 | 0.0863 | 0.06323 | 0.07248 | 0.09435 | 0.050525 | 0.04638 |
| Geração   | 27       | 18      | 19      | 13      | 14     | 29      | 15      | 35      | 13       | 35      |
| Tempo (s) | 664.14   | 624.23  | 657.95  | 605.66  | 711.14 | 723.2   | 690.34  | 684.62  | 738.42   | 664.05  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 38).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0455                      | 0.0055 | 13.8        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2955                      | 0.0045 | 1.5         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1185                      | 0.0185 | 18.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0697                      | 0.0197 | 39.3        |
| 5              | 0.50000                 | 0.4945                      | 0.0055 | 1.1         |
| 6              | 0.30000                 | 0.4880                      | 0.1880 | 62.7        |
| 7              | 0.20000                 | 0.3650                      | 0.1650 | 82.5        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3190                      | 0.0690 | 27.6        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4660                      | 0.0840 | 15.3        |
| 10             | 0.60000                 | 0.4260                      | 0.1740 | 29.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>29.1</b> |

### CASO 39

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 39).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0450  | 0.0800  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0450  | 0.0500  | 0.0250  | 0.0050  | 0.2100  |
| 2         | 0.5300   | 0.1000  | 0.1400  | 0.4400  | 0.1300  | 0.3000  | 0.5000  | 0.2000  | 0.4100  | 0.2300  |
| 3         | 0.0250   | 0.3600  | 0.1000  | 0.0700  | 0.2800  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1500  | 0.1100  | 0.0050  |
| 4         | 0.0800   | 0.0250  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0700  | 0.0600  | 0.0700  | 0.1100  | 0.0700  | 0.0250  |
| 5         | 0.3800   | 0.5100  | 0.6000  | 0.5200  | 0.4000  | 0.3800  | 0.5800  | 0.0450  | 0.0500  | 0.4600  |
| 6         | 0.2800   | 0.2300  | 0.3400  | 0.3800  | 0.2900  | 0.5800  | 0.0600  | 0.5100  | 0.6000  | 0.5400  |
| 7         | 0.0050   | 0.5000  | 0.0050  | 0.3300  | 0.1200  | 0.2000  | 0.0050  | 0.0250  | 0.4300  | 0.5900  |
| 8         | 0.1600   | 0.5100  | 0.3000  | 0.3700  | 0.0250  | 0.5300  | 0.3900  | 0.3500  | 0.3600  | 0.4900  |
| 9         | 0.5400   | 0.0900  | 0.5900  | 0.2600  | 0.2300  | 0.5100  | 0.3100  | 0.2800  | 0.3800  | 0.2400  |
| 10        | 0.4800   | 0.6000  | 0.5500  | 0.3700  | 0.3300  | 0.5900  | 0.2800  | 0.1700  | 0.2400  | 0.0250  |
| Fobj      | 0.10671  | 0.20636 | 0.14349 | 0.13669 | 0.22014 | 0.12012 | 0.09921 | 0.17675 | 0.15921 | 0.27182 |
| Geração   | 23       | 37      | 40      | 13      | 12      | 18      | 34      | 9       | 8       | 12      |
| Tempo (s) | 555.08   | 570.5   | 564.84  | 626.03  | 557.69  | 565.66  | 556.83  | 606.14  | 554.44  | 567.72  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 39).

| Tubo    | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|---------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1       | 0.04000                 | 0.0585                      | 0.0185 | 46.3        |
| 2       | 0.30000                 | 0.2980                      | 0.0020 | 0.7         |
| 3       | 0.10000                 | 0.1230                      | 0.0230 | 23.0        |
| 4       | 0.05000                 | 0.0615                      | 0.0115 | 23.0        |
| 5       | 0.50000                 | 0.3925                      | 0.1075 | 21.5        |
| 6       | 0.30000                 | 0.3810                      | 0.0810 | 27.0        |
| 7       | 0.20000                 | 0.2210                      | 0.0210 | 10.5        |
| 8       | 0.25000                 | 0.3485                      | 0.0985 | 39.4        |
| 9       | 0.55000                 | 0.3430                      | 0.2070 | 37.6        |
| 10      | 0.60000                 | 0.3635                      | 0.2365 | 39.4        |
| EMR (%) |                         |                             |        | <b>26.8</b> |

### CASO 40

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 40).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0400   | 0.0500  | 0.0400  | 0.0600  | 0.0450  | 0.0500  | 0.0500  | 0.0050  | 0.0500  | 0.0050  |
| 2         | 0.5900   | 0.5900  | 0.2900  | 0.1100  | 0.4600  | 0.4800  | 0.5900  | 0.2400  | 0.5500  | 0.6000  |
| 3         | 0.0700   | 0.0600  | 0.0700  | 0.1600  | 0.0500  | 0.0500  | 0.0700  | 0.1500  | 0.0600  | 0.0900  |
| 4         | 0.0800   | 0.0600  | 0.0700  | 0.0600  | 0.0600  | 0.0500  | 0.0400  | 0.1100  | 0.0450  | 0.0800  |
| 5         | 0.6000   | 0.5600  | 0.0600  | 0.1200  | 0.4800  | 0.4600  | 0.5100  | 0.2000  | 0.5200  | 0.3200  |
| 6         | 0.3100   | 0.4300  | 0.4700  | 0.4900  | 0.3700  | 0.6000  | 0.2000  | 0.5900  | 0.1400  | 0.5300  |
| 7         | 0.0015   | 0.0700  | 0.2100  | 0.0600  | 0.1600  | 0.2400  | 0.1400  | 0.0450  | 0.1200  | 0.3400  |
| 8         | 0.0900   | 0.0500  | 0.0900  | 0.6000  | 0.1300  | 0.0600  | 0.1700  | 0.0450  | 0.1500  | 0.5900  |
| 9         | 0.5800   | 0.5600  | 0.5900  | 0.4900  | 0.5500  | 0.6100  | 0.3900  | 0.5600  | 0.4200  | 0.2700  |
| 10        | 2.0000   | 0.4100  | 0.0800  | 0.5600  | 0.2400  | 0.3500  | 0.2500  | 0.6100  | 0.3300  | 0.3300  |
| Fobj      | 0.10569  | 0.15649 | 0.12897 | 0.13638 | 0.12102 | 0.11012 | 0.16517 | 0.12037 | 0.14483 | 0.14914 |
| Geração   | 36       | 40      | 40      | 27      | 30      | 22      | 13      | 39      | 38      | 39      |
| Tempo (s) | 604.73   | 606.39  | 592.66  | 592.27  | 602.98  | 612.08  | 570.74  | 602.86  | 597.03  | 627.28  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 40).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0395                      | 0.0005 | 1.3         |
| 2              | 0.30000                 | 0.4500                      | 0.1500 | 50.0        |
| 3              | 0.10000                 | 0.0830                      | 0.0170 | 17.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0655                      | 0.0155 | 31.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3830                      | 0.1170 | 23.4        |
| 6              | 0.30000                 | 0.4130                      | 0.1130 | 37.7        |
| 7              | 0.20000                 | 0.1387                      | 0.0614 | 30.7        |
| 8              | 0.25000                 | 0.1975                      | 0.0525 | 21.0        |
| 9              | 0.55000                 | 0.5020                      | 0.0480 | 8.7         |
| 10             | 0.60000                 | 0.5160                      | 0.0840 | 14.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>23.5</b> |

### CASO 41

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 41).

| Tubo      | Sementes |         |         |        |         |         |         |         |        |         |
|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4      | 5       | 6       | 7       | 8       | 9      | 10      |
| 1         | 0.0015   | 0.0450  | 0.0600  | 0.0700 | 0.0600  | 0.0500  | 0.0500  | 0.0450  | 0.0600 | 0.0015  |
| 2         | 0.5800   | 0.3500  | 0.5600  | 0.2700 | 0.1500  | 0.1100  | 0.4600  | 0.5800  | 0.0600 | 0.0600  |
| 3         | 0.1700   | 0.0450  | 0.0500  | 0.0450 | 0.1300  | 0.1400  | 0.0450  | 0.0400  | 0.2300 | 0.5000  |
| 4         | 0.0500   | 0.1200  | 0.0400  | 0.0500 | 0.0600  | 0.0500  | 0.0600  | 0.0600  | 0.0250 | 0.0450  |
| 5         | 0.2100   | 0.2200  | 0.5500  | 0.2600 | 0.2700  | 0.4500  | 0.3700  | 0.2600  | 0.6100 | 0.4500  |
| 6         | 0.0800   | 0.6000  | 0.2600  | 0.6100 | 0.4000  | 0.4200  | 0.5200  | 0.4300  | 0.2200 | 0.2100  |
| 7         | 0.2900   | 0.0015  | 0.1400  | 0.3500 | 0.0800  | 0.1800  | 0.2200  | 0.3300  | 0.3400 | 0.2700  |
| 8         | 0.3800   | 0.5000  | 0.5100  | 0.0600 | 0.4000  | 0.4900  | 0.0800  | 0.0450  | 0.3800 | 0.2400  |
| 9         | 0.2700   | 0.5900  | 0.3300  | 0.5100 | 0.3800  | 0.2200  | 0.5100  | 0.4700  | 0.4300 | 0.0900  |
| 10        | 0.6100   | 0.4100  | 0.5900  | 0.5400 | 0.5100  | 0.0800  | 0.1400  | 0.0400  | 0.2400 | 0.4800  |
| Fobj      | 0.17208  | 0.13013 | 0.13795 | 0.1829 | 0.09154 | 0.11147 | 0.09936 | 0.12069 | 0.1182 | 0.16674 |
| Geração   | 23       | 39      | 40      | 6      | 39      | 16      | 36      | 39      | 38     | 19      |
| Tempo (s) | 640.77   | 646.42  | 655.83  | 624.06 | 613.17  | 611.64  | 647.09  | 666.5   | 621.59 | 684.89  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 41).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0443                      | 0.0043 | 10.8        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3180                      | 0.0180 | 6.0         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1395                      | 0.0395 | 39.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0560                      | 0.0060 | 12.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3650                      | 0.1350 | 27.0        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3750                      | 0.0750 | 25.0        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2202                      | 0.0202 | 10.1        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3085                      | 0.0585 | 23.4        |
| 9              | 0.55000                 | 0.3800                      | 0.1700 | 30.9        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3640                      | 0.2360 | 39.3        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>22.4</b> |

### CASO 42

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 42).

| Tubo      | Sementes |         |         |        |         |         |        |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4      | 5       | 6       | 7      | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0450   | 0.0400  | 0.0400  | 0.0450 | 0.0450  | 0.0400  | 0.0250 | 0.0500  | 0.0450  | 0.0800  |
| 2         | 0.3100   | 0.5600  | 0.2400  | 0.3500 | 0.1800  | 0.2300  | 0.5800 | 0.3300  | 0.3600  | 0.3900  |
| 3         | 0.0800   | 0.0600  | 0.1300  | 0.1600 | 0.1700  | 0.1200  | 0.0400 | 0.0800  | 0.0900  | 0.0600  |
| 4         | 0.0900   | 0.1200  | 0.0400  | 0.0250 | 0.0450  | 0.0250  | 0.1000 | 0.0400  | 0.0450  | 0.0250  |
| 5         | 0.1700   | 0.0800  | 0.2200  | 0.3000 | 0.4800  | 0.2500  | 0.0700 | 0.3700  | 0.3600  | 0.4100  |
| 6         | 0.0700   | 0.5800  | 0.0600  | 0.1700 | 0.1400  | 0.0450  | 0.1800 | 0.3300  | 0.3500  | 0.6000  |
| 7         | 0.0450   | 0.0450  | 0.2700  | 0.3200 | 0.1100  | 0.5000  | 0.1700 | 0.2500  | 0.2300  | 0.6100  |
| 8         | 0.1100   | 0.1600  | 0.0500  | 0.4900 | 0.0600  | 0.2400  | 0.0450 | 0.2200  | 0.0015  | 0.0250  |
| 9         | 0.6000   | 0.2700  | 0.6100  | 0.1300 | 0.5100  | 0.4900  | 0.3900 | 0.6000  | 0.4300  | 0.5900  |
| 10        | 0.0015   | 0.5900  | 0.4800  | 0.5300 | 0.5600  | 0.1000  | 0.1000 | 0.3900  | 0.3000  | 0.5600  |
| Fobj      | 0.13469  | 0.17425 | 0.06811 | 0.1671 | 0.10954 | 0.10122 | 0.1707 | 0.06462 | 0.04813 | 0.20902 |
| Geração   | 24       | 40      | 34      | 40     | 36      | 16      | 28     | 32      | 27      | 40      |
| Tempo (s) | 584.67   | 593.59  | 580.8   | 568.94 | 559.16  | 593.34  | 612.74 | 575.36  | 599.5   | 583.8   |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 42).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0455                      | 0.0055 | 13.8        |
| 2              | 0.30000                 | 0.3530                      | 0.0530 | 17.7        |
| 3              | 0.10000                 | 0.0990                      | 0.0010 | 1.0         |
| 4              | 0.05000                 | 0.0555                      | 0.0055 | 11.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.2710                      | 0.2290 | 45.8        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2525                      | 0.0475 | 15.8        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2550                      | 0.0550 | 27.5        |
| 8              | 0.25000                 | 0.1402                      | 0.1099 | 43.9        |
| 9              | 0.55000                 | 0.4620                      | 0.0880 | 16.0        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3612                      | 0.2389 | 39.8        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>23.2</b> |

### CASO 43

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 43).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |        |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5      | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0250   | 0.0250  | 0.0500  | 0.0400  | 0.0250 | 0.1200  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0500  | 0.0450  |
| 2         | 0.3900   | 0.2900  | 0.2600  | 0.1100  | 0.3800 | 0.1900  | 0.2100  | 0.4900  | 0.2900  | 0.2800  |
| 3         | 0.0700   | 0.1600  | 0.0800  | 0.2100  | 0.1600 | 0.0700  | 0.2600  | 0.0800  | 0.1400  | 0.1300  |
| 4         | 0.0900   | 0.0800  | 0.0250  | 0.0500  | 0.0800 | 0.0500  | 0.0400  | 0.0500  | 0.0600  | 0.0400  |
| 5         | 0.0500   | 0.3700  | 0.3900  | 0.2100  | 0.3300 | 0.1200  | 0.5300  | 0.4300  | 0.3500  | 0.4100  |
| 6         | 0.1300   | 0.2600  | 0.0050  | 0.1600  | 0.3500 | 0.2800  | 0.1900  | 0.2300  | 1.0000  | 0.2000  |
| 7         | 0.1800   | 0.0700  | 0.3800  | 0.2000  | 0.1000 | 0.3200  | 0.1600  | 0.1700  | 0.1000  | 0.2600  |
| 8         | 0.2900   | 0.1600  | 0.2100  | 0.5900  | 0.2300 | 0.2300  | 0.2900  | 0.1200  | 0.5000  | 0.5800  |
| 9         | 0.3800   | 0.5500  | 0.6000  | 0.4700  | 0.2700 | 0.3900  | 0.3000  | 0.4600  | 0.0600  | 0.4700  |
| 10        | 0.2200   | 0.6000  | 0.4300  | 0.2200  | 0.1600 | 0.4500  | 0.0015  | 0.2200  | 0.4800  | 0.4000  |
| Fobj      | 0.09525  | 0.11492 | 0.13332 | 0.12983 | 0.1261 | 0.13111 | 0.13593 | 0.10754 | 0.14771 | 0.07251 |
| Geração   | 40       | 37      | 2       | 18      | 40     | 33      | 7       | 34      | 14      | 38      |
| Tempo (s) | 598.86   | 607.25  | 579.44  | 607.26  | 606.81 | 542.76  | 650.53  | 609.55  | 597.67  | 584.08  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 43).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0445                      | 0.0045 | 11.3        |
| 2              | 0.30000                 | 0.2890                      | 0.0110 | 3.7         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1360                      | 0.0360 | 36.0        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0565                      | 0.0065 | 13.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3190                      | 0.1810 | 36.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.2805                      | 0.0195 | 6.5         |
| 7              | 0.20000                 | 0.1940                      | 0.0060 | 3.0         |
| 8              | 0.25000                 | 0.3200                      | 0.0700 | 28.0        |
| 9              | 0.55000                 | 0.3950                      | 0.1550 | 28.2        |
| 10             | 0.60000                 | 0.3182                      | 0.2819 | 47.0        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>21.3</b> |

### CASO 44

Tabela – Resultados da rugosidade por semente simulada (caso 44).

| Tubo      | Sementes |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
| 1         | 0.0800   | 0.0500  | 0.0500  | 0.0050  | 0.0250  | 0.0400  | 0.0050  | 0.0450  | 0.0250  | 0.0400  |
| 2         | 0.2600   | 0.3600  | 0.2900  | 0.2700  | 0.3600  | 0.2500  | 0.3600  | 0.3600  | 0.3300  | 0.3100  |
| 3         | 0.1500   | 0.1000  | 0.0450  | 0.3000  | 0.0700  | 0.0500  | 0.2400  | 0.1200  | 0.1100  | 0.3200  |
| 4         | 0.0400   | 0.0450  | 0.0700  | 0.1200  | 0.0700  | 0.0800  | 0.0600  | 0.0250  | 0.0700  | 0.0250  |
| 5         | 0.4900   | 0.3400  | 0.5200  | 0.0600  | 0.1800  | 0.4100  | 0.4500  | 0.5100  | 0.5800  | 0.4500  |
| 6         | 0.4500   | 0.2700  | 0.3900  | 0.1400  | 0.3800  | 0.2900  | 0.3200  | 0.4200  | 0.2300  | 1.0000  |
| 7         | 0.0500   | 0.3200  | 0.3100  | 0.0700  | 0.3600  | 0.3500  | 0.1700  | 0.2200  | 0.2000  | 0.1700  |
| 8         | 0.3600   | 0.0900  | 0.0900  | 0.3700  | 0.3900  | 0.1200  | 0.3900  | 0.5300  | 0.3500  | 0.3800  |
| 9         | 0.6000   | 0.5600  | 0.4700  | 0.1800  | 0.4300  | 1.0000  | 0.4000  | 0.5600  | 0.4800  | 0.4500  |
| 10        | 0.6100   | 0.2300  | 0.4600  | 0.4900  | 0.1700  | 0.4600  | 0.4700  | 0.0015  | 0.5400  | 0.5400  |
| Fobj      | 0.11353  | 0.11188 | 0.10923 | 0.15095 | 0.09418 | 0.09495 | 0.08495 | 0.10943 | 0.08053 | 0.13718 |
| Geração   | 14       | 39      | 19      | 34      | 18      | 35      | 37      | 18      | 38      | 39      |
| Tempo (s) | 615.17   | 658.52  | 643.42  | 660.34  | 649.03  | 599.08  | 658.92  | 610.37  | 655.16  | 631.97  |

Tabela – Resultados da rugosidade média estimada (caso 44).

| Tubo           | $\varepsilon$ real (mm) | $\varepsilon$ estimado (mm) | EA     | ER (%)      |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------|-------------|
| 1              | 0.04000                 | 0.0365                      | 0.0035 | 8.8         |
| 2              | 0.30000                 | 0.3150                      | 0.0150 | 5.0         |
| 3              | 0.10000                 | 0.1505                      | 0.0505 | 50.5        |
| 4              | 0.05000                 | 0.0605                      | 0.0105 | 21.0        |
| 5              | 0.50000                 | 0.3990                      | 0.1010 | 20.2        |
| 6              | 0.30000                 | 0.3890                      | 0.0890 | 29.7        |
| 7              | 0.20000                 | 0.2220                      | 0.0220 | 11.0        |
| 8              | 0.25000                 | 0.3070                      | 0.0570 | 22.8        |
| 9              | 0.55000                 | 0.5130                      | 0.0370 | 6.7         |
| 10             | 0.60000                 | 0.3972                      | 0.2029 | 33.8        |
| <b>EMR (%)</b> |                         |                             |        | <b>20.9</b> |