

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA PRIORIZAÇÃO DA REABILITAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Kenya Gomes de Oliveira Lopes¹; Márcia Maria Lara Pinto Coelho² & Marcelo Libânio³

RESUMO – A rede de distribuição de água é um local com alto potencial de degradação para as tubulações. Para preservar e prolongar a vida deste patrimônio, adequadas técnicas de gestão devem ser adotadas. Este trabalho apresenta uma proposição de metodologia para priorizar a reabilitação das tubulações das redes de distribuição de água, utilizando o Método de Análise Hierárquica. Trata-se de uma técnica de auxílio multicritério à decisão, utilizada para a identificação dos fatores e quanto influenciam para a ocorrência das falhas nos trechos da rede. O risco de falhas é determinado por meio de critérios que consideram os efeitos hidráulicos, sanitários e locais. A seleção dos critérios e subcritérios baseou-se em sua representatividade na determinação da priorização das reabilitações, mas que tivessem também fácil obtenção. O método utilizado possui limitações, devido aos julgamentos subjetivos na determinação das comparações paritárias, que são atenuadas pela análise da consistência. Além disso, a realização de uma pesquisa de opinião acerca dos critérios e subcritérios selecionados e dos julgamentos poderá contribuir significativamente com o aperfeiçoamento destes.

ABSTRACT – The water distribution network is a place with high degradation potential to pipes. To preserve and extend the life of the assets, appropriate management techniques should be adopted. This work presents a proposal of methodology to prioritize the rehabilitation of pipes of water distribution networks, using the Analytic Hierarchic Process. This is a multiple attribute decision-making technique, used to identify the factors and how they influence the occurrence of failures in stretches of the network. The risk of failure is determined using criteria that consider hydraulic, sanitary and local effects. The selection of criteria and subcriteria based on their representation in determining the prioritization of rehabilitation, but who had also easily accessible. The method has limitations because of the subjective judgments in determining the pairwise comparisons, which are mitigated by the consistency analysis. Furthermore, the accomplishment of an opinion research about the criteria and subcriteria selected and the judgements could contribute significantly to the improvement of these.

Palavras-chave: Reabilitação, rede de distribuição de água, Método de Análise Hierárquica

¹ Mestranda do Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG. Av. do Contorno, 842, 8º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, 30.110-060. e-mail: kenya_gomes@yahoo.com.br.

² Professora Associada do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. Av. do Contorno, 842, 8º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, 30.110-060, e-mail: lara@ehr.ufmg.br.

³ Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. Av. do Contorno, 842, 8º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, 30.110-060, e-mail: mllibanio@ehr.ufmg.br.

1 - INTRODUÇÃO

A rede de distribuição é a parte do sistema de abastecimento de água formada de tubulação e órgãos acessórios, com a finalidade de abastecer a população local, de forma contínua, de água potável em qualidade, quantidade e pressão adequadas. Quando um novo sistema é implantado, a operação inicial se dá com pequenas taxas de falhas. Dependendo da conjunção de fatores adversos locais, tais como, carga de tráfego, movimento do solo, variação de temperatura e das condições do escoamento no interior da tubulação, falhas nas tubulações começarão a ocorrer. À medida que os anos vão passando, aumentam a intensidade desses fatores e as falhas tornam-se mais frequentes, comprometendo a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias do serviço de abastecimento de água.

Sendo assim, é necessário acompanhar a evolução da degradação dos componentes das redes. Entretanto, os tubos são enterrados, e por isso, não facilmente observáveis. Mesmo que se pudesse vê-los, a grande extensão das redes torna difícil operar a rede acompanhando o estado interno e externo de conservação de cada conduto. Os efeitos da degradação dos componentes são variados e podem levar a riscos sanitários, rupturas, vazamentos, prejuízos financeiros, desperdício de água ou simples transtornos aos usuários. Contudo, a rede de água potável é um local com alto potencial de degradação para as tubulações, e mesmo que os riscos de degradação sejam múltiplos, é necessário atuar com objetivo de minimizar as falhas, reduzindo assim os danos sociais, econômicos e financeiros

O sistema de abastecimento de água tem um valor social inestimável para a população, sendo a rede de distribuição a parte de maior custo do sistema, compreendendo em torno de 50 a 75% do custo total de todas as obras (TSUTIYA, 2005). Assim sendo, é evidente a necessidade de preservar e prolongar a vida deste investimento através de adequadas técnicas de gestão. Este trabalho apresenta uma metodologia para priorizar a reabilitação das tubulações das redes de distribuição de água, que utiliza o Método de Análise Hierárquica para tomada de decisão, sendo a gravidade das falhas determinada por meio de critérios que consideram os efeitos hidráulicos, sanitários e locais.

2 - MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

O Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchic Process, AHP*) é uma técnica de auxílio multicritério à decisão desenvolvida por Thomas L. Saaty, utilizada na definição de prioridades e na escolha da melhor alternativa, podendo ser considerados aspectos quantitativos e qualitativos. Os passos a serem adotados para sua aplicação são descritos a seguir:

- **Definir o problema** e determinar o tipo de conhecimento pretendido;

- **Estruturar uma hierarquia**, de forma que no topo esteja o objetivo e, nos níveis seguintes os critérios, subcritérios e alternativas, conforme Figura 1;

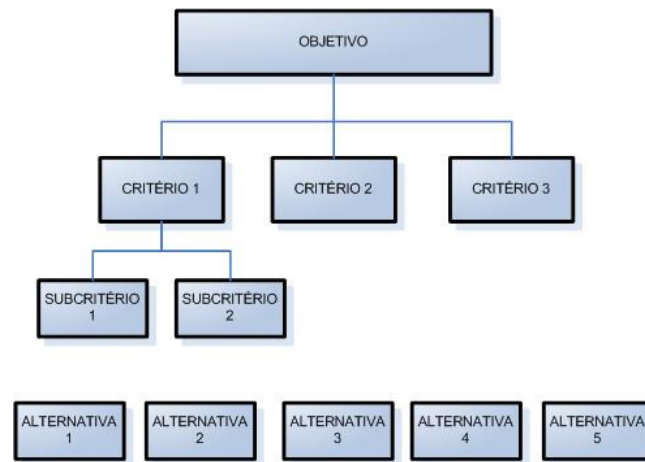


Figura 1 – Estrutura de uma hierarquia

A estruturação do problema em hierarquia proporciona uma visão global do problema, além de facilitar o julgamento sobre a comparação dos elementos (AL-KHALIL, *et al.* 2005). Para a construção da hierarquia é importante observar se os elementos de cada grupo (nível) são independentes.

- **Construir um conjunto de matrizes de comparação paritárias.** Com isso é possível estabelecer prioridades entre os elementos de um mesmo nível e sua influência nos elementos do nível superior.
- **Determinar a consistência dos julgamentos.** Uma coerência perfeita é de difícil obtenção na comparação paritária, porém, um nível aceitável de consistência deve ser obtido na realização dos julgamentos.

3 - APLICAÇÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Utilizando a seqüência dos passos citada anteriormente, o Método de Análise Hierárquica foi aplicado a uma rede de distribuição hipotética, apresentada na Figura 2. O problema consiste na degradação da rede, decorrente da atuação de fatores adversos na mesma. É necessário então, determinar os agentes causadores e o quanto cada um deles contribui para a degradação.

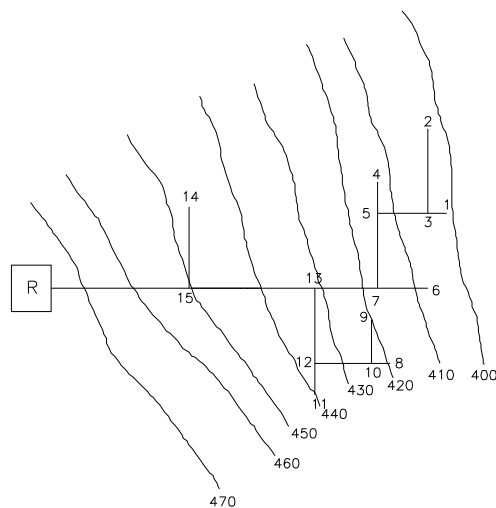


Figura 2 – Rede de distribuição hipotética

3.1 - Fatores de degradação

Os fatores de degradação, causadores dos vazamentos na tubulação, são apresentados a seguir. Apesar de cada um ser tratado separadamente, falhas em condutos são, frequentemente, o resultado de sua associação.

3.1.1 - Pressão

Segundo Tsutiya (2005), a pressão de operação na rede de distribuição de água é o parâmetro operacional mais importante na intensidade dos vazamentos e na frequência de sua ocorrência. Acréscimos na pressão de operação, além de aumentar os vazamentos, também contribuem para a elevação do número de arrebentamentos, tendo assim um duplo efeito.

3.1.2 - Envelhecimento

O envelhecimento dos tubos e seus acessórios são inevitáveis, por natureza. Os materiais se degradam ou se enfraquecem ao longo do tempo. No entanto, o envelhecimento não depende da idade do conduto somente, mas também do seu meio ambiente, das qualidades intrínsecas do material e das condições de funcionamento e instalação da rede.

3.1.3 - Qualidade da água

A rede de distribuição de água potável é frequentemente descrita como um verdadeiro reator, onde a água e o seu recipiente (condutos,...) são a sede das interações físico-químicas e biológicas. A água da torneira pode ter uma qualidade muito diferente da estação de tratamento. As condições que controlam a evolução da qualidade da água na rede são complexas e têm sido nos últimos anos

tema de cuidadosa investigação. Um bom conhecimento dos fatores que podem afetar a qualidade da água nas redes é essencial para os serviços operacionais (em unidades de produção ou na rede), a fim de antecipar e evitar potenciais problemas.

3.1.4 - Carga de tráfego

Os tubos submetidos a carga de tráfego pesado podem ter sua integridade estrutural afetada. Isso se deve à vibração causada pelo trânsito dos veículos, além do acréscimo de carga transmitida à tubulação.

3.1.5 - Movimentação do solo

A movimentação do solo, que muitas vezes é devida à sua acomodação natural, pode ser transmitida à tubulação, causando vazamentos nas redes. Dependendo do movimento, os tubos podem se romper. A fim de evitar problemas, os tubos, assim como as juntas, devem ser cuidadosamente assentados e encaixados.

3.1.6 - Assentamento e encaixes inadequados

A instalação e o assentamento dos tubos devem ser feitos de acordo com as recomendações do fabricante, e são variáveis em função do material da tubulação e de suas condições de trabalho (KURODA E PÁDUA, 2006). Devem ser utilizadas as peças apropriadas, não sendo permitidas adaptações.

3.2 - Hierarquização

Tendo em vista os fatores citados anteriormente, foi construída uma hierarquia, com objetivo de determinar a priorização da reabilitação, conforme Figura 3.

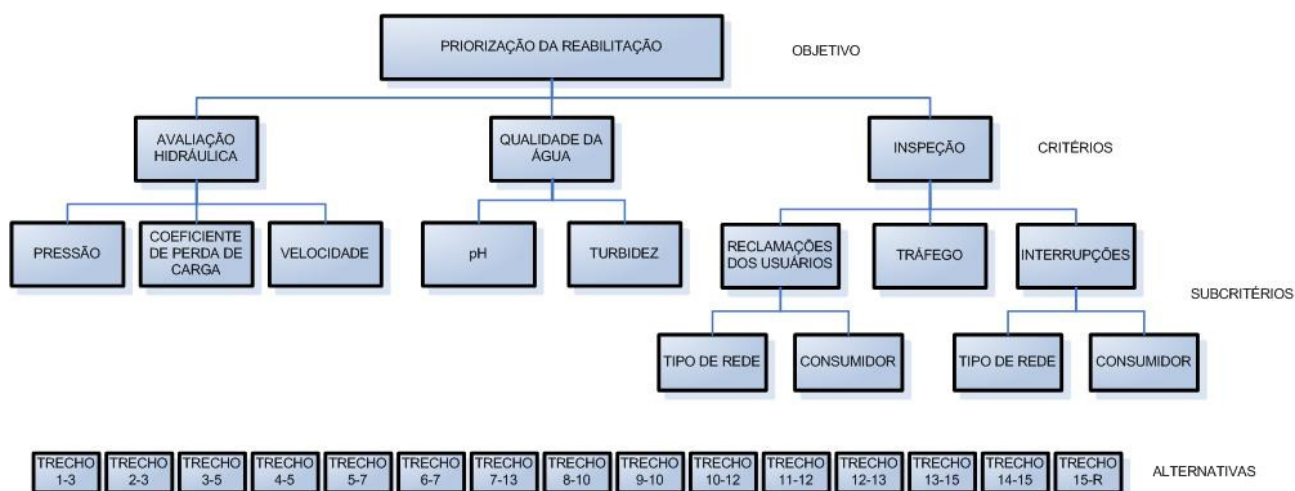


Figura 3 – Hierarquia proposta para priorização da reabilitação de redes de distribuição de água

O desempenho de um sistema de distribuição de água está intimamente relacionado à sua concepção, construção, qualidade dos equipamentos e materiais empregados e às condições ambientais que está submetido, bem como possíveis danos causados por terceiros. A avaliação hidráulica, a qualidade da água e a inspeção são ferramentas valiosas para analisar as condições do sistema e estabelecer as prioridades de reabilitação das tubulações. Considerando como premissa a facilidade de obtenção dos dados, foram então considerados na hierarquização, três critérios: avaliação hidráulica, qualidade da água e inspeção.

A **avaliação hidráulica** traz como subcritérios a pressão, o coeficiente de perda de carga e a velocidade, detalhados a seguir:

- a pressão de interesse é a estática, referida ao nível do eixo da via pública, em determinado ponto da rede, sob condição de consumo nulo. A pressão estática máxima, se não superada, garante a integridade estrutural dos tubos e também a redução das perdas de água (PRINCE, 2006). A NBR 12218/94 estabelece que a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 500 kPa (aproximadamente 50 mca), porém valores da pressão estática superiores à máxima podem ser aceitos, desde que justificados técnica e economicamente.
- a perda de carga é representada pela redução da capacidade de transporte da tubulação, através do coeficiente de perda de carga da mesma, que está diretamente relacionado com o tempo de utilização e material dos tubos. Neste trabalho foi utilizada a equação de Hazen-Williams para a determinação da perda de carga, aplicável a tubos com diâmetro superior a 50 mm. Dessa forma, o coeficiente de perda de carga C obtido deve ser comparado com o seu valor para tubos novos, obtendo a redução percentual.

- a velocidade é um parâmetro que permite prever prováveis tipos de problemas associados ao excesso ou a valores baixos de velocidade. Segundo Prince (2006), a velocidade mínima é estabelecida para minimizar a corrosão interna e evitar a deposição de materiais em suspensão porventura existentes na água, inclusive os decorrentes de processos corrosivos instalados no interior das tubulações. A velocidade máxima, por sua vez, é estabelecida para evitar os efeitos dinâmicos nocivos associados ao escoamento da água (sobrepensões devidas ao golpe de aríete), ao desgaste das tubulações por problemas de erosão, ao controle da corrosão e aos ruídos desagradáveis, assim como para permitir a limitação da perda de carga na tubulação. De acordo com a NBR 12218/94, a velocidade mínima nas tubulações deve ser de 0,6 m/s, e a máxima, de 3,5 m/s; estes limites referem-se às demandas máximas diárias no início e no final da etapa de execução da rede.

A **qualidade da água** através de valores do pH e turbidez podem sinalizar eventuais problemas nas tubulações. A determinação das faixas de classificação para estes índices foi baseada na Portaria 518/2004 (BRASIL, 2004), que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. A avaliação do pH e da turbidez, bem como os padrões utilizados nestes subcritérios, são descritos a seguir:

- nas redes, o pH é importante para o controle da agressividade da água, da corrosão, da ação de desinfetantes e precipitação de elementos dissolvidos. Porém, o pH pode variar ao longo da distribuição, como resultado de mudanças na concentração de gás carbônico dissolvido. Segundo esta Portaria, deve ser mantido na faixa de 6,0 a 9,5 no sistema de distribuição;
- uma alta turbidez da água revela os seguintes problemas na rede: precipitação do ferro, alumínio ou manganês, devido à oxidação na rede; precipitação lenta de CaCO_3 (ou, por vezes, hidróxido de magnésio), devido à má adaptação do pH na estação de tratamento; uma corrosão importante; entre outros (CELERIER *et al.*, s.d.). Desta forma, de acordo com o padrão de aceitação de consumo, o valor máximo permitido para a turbidez da água potável é de 5 uT.

A **inspeção** objetiva identificar as irregularidades existentes na rede de distribuição de água. Para a sua avaliação é de fundamental importância a coleta e o registro sistemático de informações de índices operativos para quantificar e qualificar as perturbações no sistema de distribuição. Tem como subcritérios o tráfego, as reclamações dos usuários e as interrupções, descritos a seguir:

- o tráfego considera o assentamento da tubulação sob passeio ou via de trânsito de veículos que, conforme citado anteriormente, pode transmitir cargas e vibrações aos tubos;

- as reclamações dos usuários permitem evidenciar se no trecho analisado houve clientes insatisfeitos com relação à pressão, qualidade da água e interrupção do serviço;
- as interrupções estão relacionadas às paralisações do sistema, por razões outras que não a manutenção e, portanto, não operadas pela concessionária, tais como acidentes.

As reclamações dos usuários, bem como as interrupções consideram ainda o tipo de rede (principal ou secundária) e o tipo de consumidor (prioritário ou não). A rede principal alimenta outros trechos e por isso deve ter preferência na reabilitação em relação às redes secundárias. Outro fator importante é a existência de consumidores com prioridades para o atendimento, tais como hospitais, indústrias e escolas.

No último nível da hierarquização estão as alternativas, que no presente estudo corresponde aos trechos da rede que serão avaliados e priorizados quanto à reabilitação. A rede hipotética em estudo possui 15 trechos ou alternativas, conforme mostrado na Figura 2, e suas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos trechos da rede hipotética estudada

Trecho	Comprimento (m)	Velocidade (m/s)	Pressão estática (mca)	Redução do coeficiente de perda de carga (%)	pH	Turbidez	Reclamações dos usuários	Tráfego	Interrupções	Tipo de rede	Consumidor prioritário
1-3	30	0,25	64	0	5,5	0,3	não	passeio	não	secundária	não prioritário
2-3	135	1,11	63	0	5,0	0,8	não	via	sim	secundária	não prioritário
3-5	80	2,02	61	0	7,4	1	sim	passeio	não	secundária	não prioritário
4-5	50	0,41	52	0	7,3	0,5	não	passeio	não	secundária	não prioritário
5-7	120	1,52	51	0	7,5	0,8	não	via	não	principal	não prioritário
6-7	80	0,66	58	0	8,1	0,7	sim	passeio	não	secundária	não prioritário
7-13	100	1,23	48	24	8,0	4	sim	via	não	principal	não prioritário
8-10	30	0,25	46	0	6,2	0,5	não	passeio	sim	secundária	não prioritário
9-10	70	0,58	45	0	5,4	2	não	passeio	não	secundária	não prioritário
10-12	90	1,57	41	0	6,6	1	não	passeio	não	secundária	não prioritário
11-12	50	0,41	24	0	8,2	0,8	sim	via	sim	secundária	não prioritário
12-13	120	1,32	28	0	8,2	5	sim	passeio	não	principal	não prioritário
13-15	200	1,06	33	66	8,1	3	não	via	não	principal	não prioritário
14-15	130	0,93	18	0	8,2	0,7	não	via	não	secundária	Prioritário
15-R	220	1,29	15	66	8,6	6	não	via	não	principal	Prioritário

3.3 - Comparação paritária

Para a determinação das prioridades da hierarquia apresentada na Figura 3, é necessária a criação de dezesseis matrizes de comparação paritária: uma para a determinação das prioridades entre os critérios, cinco para a determinação das prioridades entre os subcritérios e dez matrizes para a determinação das prioridades idealizadas das categorias de cada subcritério.

Para a realização das comparações, é necessária uma escala que indique o quanto um elemento é mais importante ou dominante com relação a outro, de acordo com o critério ou propriedade que são comparados. A escala e sua definição, determinadas por Saaty (2008), são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Escala de comparações

Escala de importância	Definição	Descrição
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraco ou pouco importante	
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
4	Um pouco mais que moderada	
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
6	Um pouco mais que forte	
7	Importância muito forte ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
8	Muito, muito forte	
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra como mais alto grau de certeza

Fonte: Adaptado de Saaty (2008)

O preenchimento de cada uma das matrizes é feito com a comparação do elemento que aparece na coluna à esquerda com relação ao da linha superior. Quando são comparados dois critérios iguais, a matriz deve ser preenchida com o valor 1, ou seja, as duas atividades têm a mesma importância. Dessa forma, a diagonal principal da matriz será formada por valores iguais a 1. Os julgamentos considerados para a matriz de comparação dos critérios e para a matriz de comparação dos subcritérios selecionados para a avaliação hidráulica, juntamente com seu vetor prioridade, são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Matriz de comparação paritária dos critérios

Reabilitação	Avaliação hidráulica	Qualidade da água	Inspeção	Vetor prioridade
Avaliação hidráulica	1	3	4	0,634
Qualidade da água	1/3	1	1	0,192
Inspeção	1/4	1	1	0,174

Tabela 4 – Matriz de comparação paritária dos subcritérios selecionados para o critério avaliação hidráulica

Avaliação hidráulica	Pressão	Coef. de perda de carga	Velocidade	Vetor prioridade
Pressão	1	1	3	0,429
Coef. de perda de carga	1	1	3	0,429
Velocidade	1/3	1/3	1	0,143

Na matriz de comparações paritárias dos critérios (Tabela 3), na primeira linha, o critério avaliação hidráulica é comparado com ele mesmo; em seguida, deve ser comparado ao critério

qualidade da água e, posteriormente, ao critério inspeção. Além disso, o valor atribuído ao critério avaliação hidráulica quando comparado ao critério inspeção será sempre recíproco ao valor da comparação do critério inspeção com o critério avaliação hidráulica.

Após a comparação dos elementos de cada matriz, é necessário calcular o vetor prioridade de cada uma delas (Tabelas 3 e 4). Segundo Saaty (1991), a obtenção é feita através da elevação da matriz ao quadrado, somando as linhas e normalizando-as. Este processo deve ser repetido até que a diferença entre os valores obtidos para o vetor prioridade seja pequena, menor que um valor considerado.

Quando a quantidade de alternativas de uma hierarquia é muito grande, muito tempo pode ser gasto para a realização da comparação paritária. Para a simplificação do processo, os subcritérios utilizados podem ser divididos em diferentes categorias, sendo estas priorizadas em seguida, pela determinação do vetor prioridade da matriz de comparações. As prioridades idealizadas são obtidas através da divisão de cada valor do vetor prioridade pelo maior valor obtido no mesmo. Assim, cada alternativa (trecho da rede) deve ser avaliada através da seleção da categoria em cada subcritério, e não pela comparação paritária entre seus elementos. A Tabela 5 apresenta a matriz de comparações do subcritério pressão, juntamente com o vetor prioridade obtido e as prioridades idealizadas.

Tabela 5 – Matriz de comparação paritária do subcritério pressão

Pressão (mca)	P>90	70<P≤90	50<P≤70	P≤50	Vetor prioridade	Prioridades idealizadas
P>90	1	3	6	9	0,572	1,000
70<P≤90	1/3	1	5	7	0,296	0,518
50<P≤70	1/6	1/5	1	3	0,089	0,156
P≤50	1/9	1/7	1/3	1	0,043	0,075

A Tabela 6 apresenta as faixas de classificação dos subcritérios, juntamente com suas prioridades idealizadas.

Tabela 6 – Faixas para classificação dos subcritérios e suas prioridades idealizadas

Subcritério	Categorias	Prioridades idealizadas
Pressão	$P \leq 50$ mca	1,000
	$50 < P \leq 70$ mca	0,518
	$70 < P \leq 90$ mca	0,156
	$P > 90$ mca	0,075
Coeficiente de perda de carga	redução do coeficiente $> 40\%$	1,000
	$40\% \leq$ redução $< 20\%$	0,435
	$20\% \leq$ redução $< 0\%$	0,178
	redução = 0%	0,079
Velocidade	$U < 0,6$ m/s	1,000
	$0,6 \leq U \leq 3,5$ m/s	0,111
	$U > 3,5$ m/s	0,258
pH	$pH < 6,0$	1,000
	$6,0 \leq pH \leq 9,5$	0,200
	$pH > 9,5$	1,000
Turbidez	$> 5,0$ uT	1,000
	$\leq 5,0$ uT	0,111
Reclamações dos clientes/ tipo de rede*	Sim/ rede principal	1,000
	Sim/ rede secundária	0,593
	Não/ rede principal	0,343
	Não/ rede secundária	0,204
Reclamações dos clientes/ tipo de consumidor*	Sim/ prioritário	1,000
	Sim/ não prioritário	0,593
	Não/ prioritário	0,343
	Não/ não prioritário	0,204
Tráfego	Tubulação assentada sob passeio	1,000
	Tubulação assentada sob via com tráfego de veículos	0,250
Interrupções/ tipo de rede*	Sim/ rede principal	1,000
	Sim/ rede secundária	0,593
	Não/ rede principal	0,343
	Não/ rede secundária	0,204
Interrupções/ tipo de consumidor*	Sim/ prioritário	1,000
	Sim/ não prioritário	0,593
	Não/ prioritário	0,343
	Não/ não prioritário	0,204

* as opções Sim e Não nas categorias referem-se à existência de reclamações dos usuários ou interrupções na rede.

Na Tabela 7 apresenta-se a classificação adotada em cada um dos trechos da rede hipotética, para cada subcritério.

Os totais são obtidos pela soma das prioridades idealizadas multiplicadas pelo peso de cada critério/ subcritério. A determinação da prioridade de cada trecho (alternativa) é dada pela normalização, ou seja, o primeiro valor total deve ser dividido pelo somatório de todos os demais, o segundo valor total deve ser dividido pelo mesmo somatório e assim sucessivamente.

Tabela 7 – Classificação adotada para subcritérios na rede hipotética

Trecho	Pressão	Coeficiente de perda de carga	Velocidade	pH	turbidez	Reclamações dos usuários		Tráfego	Interrupções	
						Tipo de rede	Consumidor		Tipo de rede	Consumidor
1-3	50<P≤70 mca	redução=0%	U<0,6 m/s	pH<6,0	≤5,0	não, secundária	não,não prioritário	passseio	não, secundária	não,não prioritário
2-3	50<P≤70 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	pH<6,0	≤5,0	não, secundária	não,não prioritário	via	sim, secundária	sim,não prioritário
3-5	50<P≤70 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	sim, secundária	sim,não prioritário	passseio	não, secundária	não,não prioritário
4-5	50<P≤70 mca	redução=0%	U<0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	não, secundária	não,não prioritário	passseio	não, secundária	não,não prioritário
5-7	50<P≤70 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	não, principal	não,não prioritário	via	não, principal	não,não prioritário
6-7	50<P≤70 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	sim, secundária	sim,não prioritário	passseio	não, secundária	não,não prioritário
7-13	P≤50 mca	40%≤redução <20%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	sim, principal	sim,não prioritário	via	não, principal	não,não prioritário
8-10	P≤50 mca	redução=0%	U<0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	não, secundária	não,não prioritário	passseio	sim, secundária	sim,não prioritário
9-10	P≤50 mca	redução=0%	U<0,6 m/s	pH<6,0	≤5,0	não, secundária	não,não prioritário	passseio	não, secundária	não,não prioritário
10-12	P≤50 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	não, secundária	não,não prioritário	passseio	não, secundária	não,não prioritário
11-12	P≤50 mca	redução=0%	U<0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	sim, secundária	sim,não prioritário	via	sim, secundária	sim,não prioritário
12-13	P≤50 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	sim, principal	sim,não prioritário	passseio	não, principal	não,não prioritário
13-15	P≤50 mca	redução>40%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	não, principal	não,não prioritário	via	não, principal	não,não prioritário
14-15	P≤50 mca	redução=0%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	≤5,0	não, secundária	não, prioritário	via	não, secundária	não, prioritário
15-R	P≤50 mca	redução>40%	3,5≤U≤0,6 m/s	6,0≤pH≤9,5	>5,0	não, principal	não, prioritário	via	não, principal	não, prioritário

3.4 - Análise da consistência dos julgamentos

Uma coerência perfeita é de difícil obtenção na comparação paritária, porém, um nível aceitável de consistência deve ser obtido na realização dos julgamentos. Para determinar a consistência de uma matriz de comparações, a razão de consistência (RC) deve ser calculada, sendo aceitável quando são encontrados valores inferiores a 0,10. O cálculo de RC se inicia com a determinação de $\lambda_{\text{máx}}$, que pode ser estimado conforme descrito a seguir:

- a matriz de comparações paritárias deve ser multiplicada pelo vetor de prioridades, obtendo um novo vetor;
- divide-se o primeiro valor deste vetor pelo primeiro valor do vetor de prioridades, o segundo componente do novo vetor pelo segundo componente do vetor de prioridades, e assim por diante, obtém-se um outro vetor;
- a soma dos valores deste vetor deve ser dividida pelo número de elementos, obtendo-se uma aproximação para $\lambda_{\text{máx}}$.

Quanto mais próximo o valor de $\lambda_{\text{máx}}$ de n (ordem da matriz), mais consistente será o resultado. O desvio de consistência, denominado de índice de consistência (IC) é dado pela equação 1:

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (1)$$

A razão de consistência (RC) é dada pela equação 2:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Onde IR é o índice randômico, obtido através de cálculos utilizando amostras de tamanho 100 e 500, para matrizes de ordem até 15x15. A Tabela 8 apresenta os valores de IR em função da ordem da matriz:

Tabela 8 – Índice Randômico (IR)

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1991).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os pesos dos critérios/ subcritérios são apresentados na Figura 4, juntamente com as razões de consistência. As prioridades idealizadas obtidas para os trechos, em função de suas características, juntamente com a priorização das reabilitações são apresentadas na Tabela 9.

É importante ressaltar que foram selecionados critérios e subcritérios representativos na determinação da priorização das reabilitações, mas que tivessem também fácil obtenção.

O Método de Análise Hierárquica possui limitações, já que há subjetividade na determinação das comparações paritárias, julgadas de acordo com a experiência do avaliador no assunto. Além disso, a simplificação utilizada na determinação das faixas de classificação, apesar de ter a vantagem de relacionar um grande número de alternativas rapidamente, compromete ligeiramente a exatidão dos resultados. Contudo, uma análise da consistência dos julgamentos pode atenuar as restrições do método.

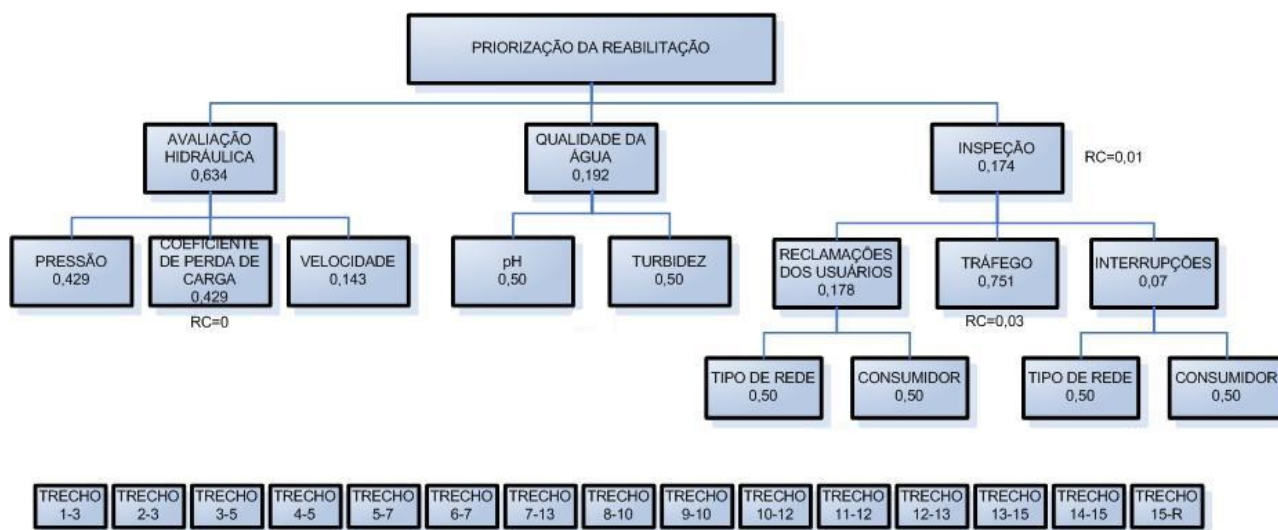


Figura 4 – Pesos dos critérios/ subcritérios e razões de consistência

Tabela 9 – Prioridades idealizadas para cada trecho e priorização das reabilitações

Trecho	Pressão	Coeficiente de perda de carga	Velocidade	pH	Turbidez	Reclamações dos usuários		Interrupções			Total	Priorização
						Tipo de rede	Consumidor	Tráfego	Tipo de rede	Consumidor		
1-3	0,156	0,079	0,258	1,000	0,111	0,204	0,204	1,000	0,204	0,204	0,331	0,088
2-3	0,156	0,079	0,111	1,000	0,111	0,204	0,204	0,250	0,593	0,593	0,224	0,059
3-5	0,156	0,079	0,111	0,200	0,111	0,593	0,593	1,000	0,204	0,204	0,247	0,065
4-5	0,156	0,079	0,258	0,200	0,111	0,204	0,204	1,000	0,204	0,204	0,254	0,067
5-7	0,156	0,079	0,111	0,200	0,111	0,343	0,204	0,250	0,343	0,204	0,145	0,039
6-7	0,156	0,079	0,111	0,200	0,111	0,593	0,593	1,000	0,204	0,204	0,247	0,065
7-13	0,075	0,435	0,111	0,200	0,111	1,000	0,593	0,250	0,343	0,204	0,230	0,061
8-10	0,075	0,079	0,258	0,200	0,111	0,204	0,204	1,000	0,593	0,593	0,236	0,063
9-10	0,075	0,079	0,258	1,000	0,111	0,204	0,204	1,000	0,204	0,204	0,308	0,082
10-12	0,075	0,079	0,111	0,200	0,111	0,204	0,204	1,000	0,204	0,204	0,218	0,058
11-12	0,075	0,079	0,258	0,200	0,111	0,593	0,593	0,250	0,593	0,593	0,144	0,038
12-13	0,075	0,079	0,111	0,200	0,111	1,000	0,593	1,000	0,343	0,204	0,232	0,061
13-15	0,075	1,000	0,111	0,200	0,111	0,343	0,204	0,250	0,343	0,204	0,373	0,099
14-15	0,075	0,079	0,111	0,200	0,111	0,204	0,343	0,250	0,204	0,343	0,121	0,032
15-R	0,075	1,000	0,111	0,200	1,000	0,343	0,343	0,250	0,343	0,343	0,459	0,122
										Σ	3,769	

De acordo com a priorização apresentada na Tabela 9, os trechos devem ser reabilitados na seguinte ordenação: trecho 15-R, trecho 13-15, trecho 1-3, trecho 9-10, trecho 4-5, trechos 6-7 e 3-5, trecho 8-10, trechos 7-13 e 12-13, trecho 2-3, trecho 10-12, trecho 5-7, trecho 11-12 e trecho 14-15.

Os trechos 15-R e 13-15 foram identificados como os primeiros a serem reabilitados, fato este devido principalmente aos subcritérios coeficiente de perda de carga e tráfego, sendo o primeiro deles afetado também pela turbidez. Já o trecho 1-3, o próximo na ordenação, teve como principais causas para reabilitação os subcritérios pressão, velocidade e pH.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da subjetividade que permeou as comparações paritárias que redundaram nos vetores-prioridade e nas prioridades idealizadas, o emprego do Método de Análise Hierárquica pode

conferir aos gestores dos sistemas de abastecimento de água ferramenta adicional que norteie as futuras reabilitações das redes de distribuição. Desta forma, a aplicação dos investimentos em manutenção das redes reveste-se de maior racionalidade, podendo até reduzir a magnitude destes dispêndios.

Tal subjetividade pode ser minimizada por meio de uma pesquisa de opinião acerca dos critérios e subcritérios selecionados para priorização da reabilitação das redes. Adicionalmente, a metodologia proposta no presente artigo permite que os usuários, de acordo com sua experiência, adotem julgamentos diferenciados dos apresentados neste trabalho no que tange às comparações paritárias.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor e produtividade em pesquisa ao terceiro; à CAPES pela concessão de bolsa de Pós-doutorado do segundo autor, e por fim, à Fapemig no contexto do Programa Pesquisador Mineiro (Proc. 4754-6).

BIBLIOGRAFIA

AL-KHALIL, Mohammed; ASSAF, Sadi; AL-ANAZI, Fahad. (2005). “*Risk-Based Maintenance Planning of Cross-Country Pipelines*”. Journal of Performance of Constructed Facilities – ASCE, Vol. 19, No. 2. pp. 124-131.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218/94: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro. 1994.

BRASIL (2004). Ministério da Saúde. Portaria nº518/2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. 2004.

CELERIER, J. L.; FABY, J.A.; LOISEAU, G. ; JUERY, C. La degradation de la qualite de l'eau potable dans les reseaux. Ministere De L'agriculture, De L'alimentation, De La Peche Et Des Affaires Rurales.

KURODA, E. K.; PÁDUA, V. L. (2006). “*Tubulações e Acessórios*”. In: *Abastecimento de água para consumo humano*. Org. por Heller, Léo; Pádua, Valter Lúcio de. Editora UFMG, Belo Horizonte – MG, pp. 683-740.

- PRINCE, A. A. (2006). “*Rede de distribuição*”. In: *Abastecimento de água para consumo humano*. Org. por Heller, Léo; Pádua, Valter Lúcio de. Editora UFMG, Belo Horizonte – MG, pp. 603-681.
- SAATY, T. L. (1991). *Método de Análise Hierárquica*. McGraw-Hill, Makron. São Paulo, 367p.
- SAATY, T.L. (2008). “*Decision making with the analytic hierarchy process*”, Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, pp.83–98.
- TSUTIYA, M.T. (2005). *Abastecimento de água*. 2 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 643p.