

Recursos Hídricos // Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos // Volume 31# 02

# SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

## WATER PIPE NETWORKS - VULNERABILITY ASSESSMENT

### Jorge Pinto

Prof. Auxiliar // DE, ECT, UTAD // [tiago@utad.pt](mailto:tiago@utad.pt)

### João Varajão

Prof. Auxiliar // DE, ECT, UTAD // [jvarejao@utad.pt](mailto:jvarejao@utad.pt)

### Humberto Varum

Prof. Associado // DECivil, UA // [hvarum@ua.pt](mailto:hvarum@ua.pt)

### António Duarte

Prof. Auxiliar // DEC, UM // [aduarte@civil.uminho.pt](mailto:aduarte@civil.uminho.pt)

### Isabel Bentes

Profa. Associada // DE, ECT, UTAD // [ibentes@utad.pt](mailto:ibentes@utad.pt) // Sócia APRH nº 1318

**RESUMO:** O objectivo deste trabalho de investigação é apresentar a Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA) e, em particular, os seus principais fundamentos teóricos. Esta teoria preconiza que quanto maior for a qualidade de forma de uma rede menor será a sua vulnerabilidade. O conceito de vulnerabilidade é aqui traduzido pela desproporcionalidade existente entre um esforço e o dano resultante numa rede hidráulica de abastecimento de água (RHAA). A aplicação desta teoria permite identificar as partes mais vulneráveis de uma RHAA através de diversos cenários de dano vulneráveis nomeadamente o cenário de dano de colapso total, o cenário de dano de máxima vulnerabilidade, o cenário de dano de mínima vulnerabilidade, o cenário de menor esforço para haver dano e qualquer cenário de dano de interesse específico para o utilizador.

Esta teoria poderá ser aplicada como suporte ao projecto de RHAA, pretendendo-se desta forma obter RHAA mais robustas, reforçando ou redimensionando as zonas da RHAA estruturalmente ou hidraulicamente mais vulneráveis. Por outro lado, entende-se que esta ferramenta também poderá apoiar na gestão destes sistemas tornando-os mais seguros e eficientes.

**Palavras-chave:** teoria da vulnerabilidade, gestão de redes, cenários de dano, sistemas de abastecimento de água.

**ABSTRACT:** The main objective of this research work is to introduce the emerging theory of vulnerability of water pipe networks (TVWPN) and, in particular, its theoretical concepts. This theory considers that the vulnerability decreases when the quality of form increases. The vulnerable concept is associated to the possible existence of a disproportionately between failure demand and failure consequence of water pipe network (WPN). This theory allows figuring out the most vulnerable parts of a WPN by identifying different vulnerable failure scenarios, such as the total, maximum, minimum, minimum demand and interesting failure scenarios. The fundamental contribution of this theory is to design water pipes networks (WPN) more robust by reinforcing or redesign the parts of a WPN which were identified as being vulnerable. On the other hand, the application of this theory may also give guidance to achieve a more efficient management of this type of system.

**Palavras-chave:** redes hidráulicas, teoria da vulnerabilidade, gestão de redes, cenários de dano, sistemas de abastecimento de água.

**Keywords:** theory of vulnerability, systems management, failure scenarios, water pipes networks.

## 1. INTRODUÇÃO

A Teoria da Vulnerabilidade Estrutural tem vindo a ser desenvolvida na Universidade de Bristol, no Reino Unido, Wu et al. (1993) e Pinto et al. (2002). Esta teoria identifica as partes mais vulneráveis de uma estrutura através de cenários de dano. O conceito de vulnerabilidade está associado à desproporcionalidade passível de existir entre esforço e o dano estrutural resultante. Uma estrutura é mais vulnerável quando um pequeno esforço provoca um grande dano estrutural. No contexto das estruturas, a acção que origina esse esforço pode ser de qualquer tipo, desde as acções permanentes, as decorrentes da sua utilização, ou as que resultam de situações excepcionais como erros humanos, acções criminosas, ou acções naturais como os sismos.

Neste contexto, tem vindo a ser desenvolvido na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) um trabalho de investigação que tem como objectivo principal extrapolar os fundamentos teóricos da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, aplicando-os às redes hidráulicas de abastecimento de água (RHAA) resultando, deste modo, uma teoria emergente designada por Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA). Diversos trabalhos de investigação têm sido realizados de forma a estimar a probabilidade de ocorrência de danos em RHAA (Kleiner e Rajani 2000), outros consistiram na realização de uma abordagem da vulnerabilidade de RHAA através de uma análise fuzzy (Zidko e Ramos, 2009). Contudo, a TVRHAA proposta neste trabalho efectua uma análise da vulnerabilidade de RHAA de uma forma mais abrangente, considerando-se que poderá ser uma ferramenta útil para o dimensionamento e a gestão destas redes.

Esta teoria preconiza que quanto maior for a qualidade de forma de uma rede menor será a sua vulnerabilidade. A aplicação desta teoria permite identificar as partes mais vulneráveis de uma RHAA, bem como diversos cenários de dano vulneráveis nomeadamente o cenário de dano de colapso total, o cenário de dano de máxima vulnerabilidade, o cenário de dano de mínima vulnerabilidade, o cenário de menor esforço para haver dano e qualquer cenário de dano de interesse específico para o utilizador.

Neste artigo apresenta-se a TVRHAA, são identificados e descritos os seus fundamentos teóricos, a sua aplicação às RHAA é detalhadamente explicada e complementada com recurso a um exemplo simples de uma RHAA. Para tornar a aplicação da TVRHAA mais expedita procedeu-se à elaboração de um programa

de cálculo automático, designado por VRHAA, e que também será sucintamente descrito.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA TVRHAA

Para melhor entender a TVRHAA apresentam-se sucintamente os conceitos e definições que suportam ou estão relacionados com a base teórica desta teoria e no contexto dos sistemas de abastecimento de água do tipo RHAA, Figura 1-a:

Sub-RHAA primitiva é constituída por um troço (ramo) e os seus respectivos nós.

Sub-RHAA é entendida como sendo um agrupamento de pelo menos dois troços adjacentes e dos respectivos nós de ligação, Figura 1-b.

Sub-RHAA de referência é o reservatório. Por questões de simplificação das aplicações aqui expostas é admitido que a sub-RHAA de referência não sofre qualquer dano.

A sub-RHAA de origem entende-se como sendo toda a RHAA, incluindo o reservatório.

Anel de RHAA é a forma abstracta de representar uma RHAA e entende-se como sendo a forma mais simples de representar uma RHAA, dois troços e nó de ligação, Figura 1-c.

Dano de RHAA, ou evento de deterioração, corresponde a uma deterioração da RHAA que pode impossibilitar o abastecimento de água entre pontos dessa RHAA. Um dano de RHAA é causado por uma determinada acção, podendo ser de diversos tipos tal como excesso de pressão hidráulica, velocidade de escoamento excessiva, assentamento de terreno ou vibrações deste, erro humano na fase de projecto, na fase de construção, na fase de gestão e/ou na fase de manutenção, acto de sabotagem, entre outros. Nesta fase, por simplificação, o dano de RHAA é considerado como sendo a perda de um tubo da RHAA. Contudo, este conceito poderá ser muito mais abrangente porque pode incluir aspectos do tipo desgaste dos tubos, obstruções, falta de qualidade da água, entre os utros.

Qualidade de forma é o indicador da boa forma de uma RHAA ou de uma sub-RHAA.

Conexão nodal é o indicador da interligação de uma sub-RHAA à restante RHAA.

Capacidade resistente ao dano é a grandeza que é directamente proporcional ao esforço necessário para a ocorrência de um determinado dano na

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em Novembro de 2010, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em Setembro de 2010. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 31, Nº 2, 61-71, Novembro de 2010. © APRH, ISSN 0870-1741

RHAA.

Cenário de dano é uma sequência ordenada de danos de RHAA (ou de eventos de deterioração) através dos quais o desempenho da RHAA se degrada.

Capacidade resistente ao dano relativa é entendida como sendo a relação entre o esforço requerido para a ocorrência de um determinado cenário de dano e o esforço necessário para a ocorrência do dano total da RHAA.

Perda de RHAA é uma grandeza relativa à parte de uma RHAA que fica inoperável resultante da ocorrência de um cenário de dano.

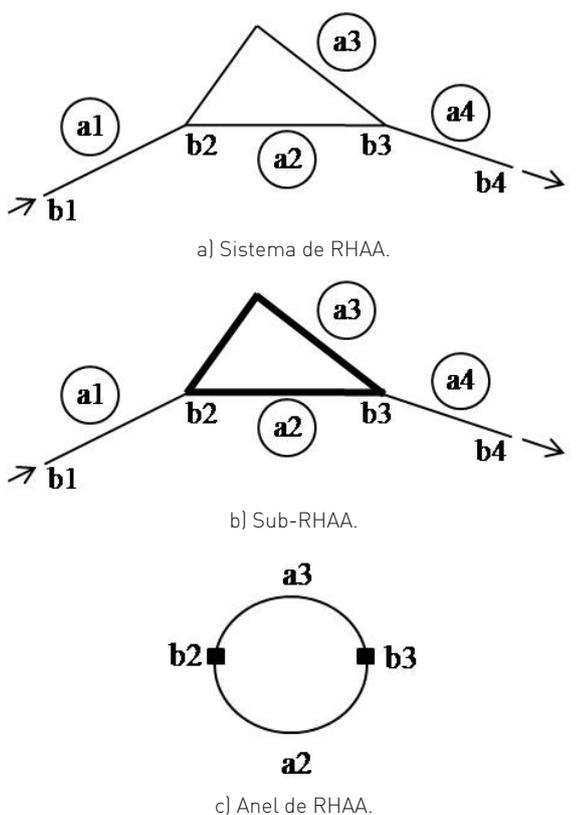


Figura 1 - Alguns conceitos e terminologia nas RHAA.

### 2.1. Qualidade de forma

A qualidade de forma avalia, como o próprio nome indica, a qualidade da forma geométrica de uma sub-RHAA. Esta grandeza é influenciada pelos seguintes aspectos: rigidez dos tubos (Figura 2-a), tipo de uniões entre troços (Figura 2-b), orientação relativa entre troços (Figura 2-c), quantidade de ligações (Figura 2-d).

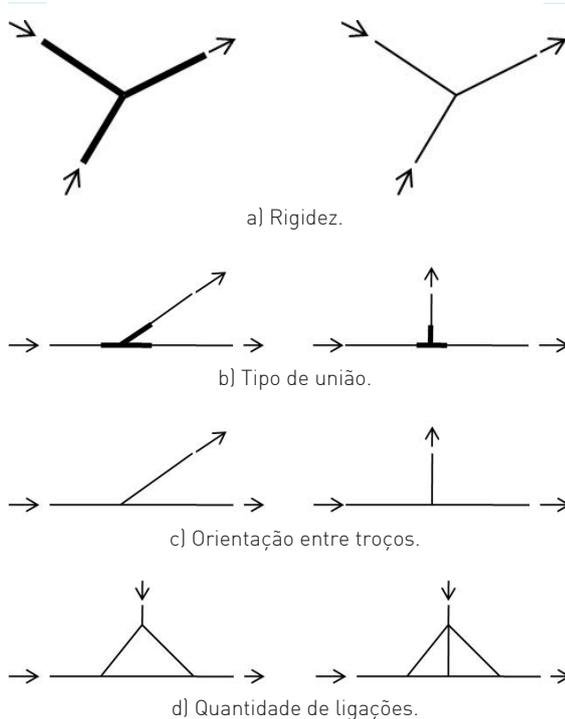


Figura 2 - Factores que influenciam a qualidade de forma de uma RHAA.

Após uma análise exaustiva de todas as variáveis intervenientes no dimensionamento hidráulico de uma RHAA (Bastos, 2008), propôs-se a perda de carga ( $\Delta H_T$ ) como sendo a variável que melhor avalia a qualidade de forma de uma RHAA. Deste modo, considera-se que a qualidade de forma de uma sub-RHAA ou de uma RHAA pode ser quantificada através da Expressão 1.

$$\Delta H_T = \sum_{j=1}^p \Delta H_j + \sum_{i=1}^u \Delta H_{Li} \quad (1)$$

em que:  $\Delta H_T$  é a perda de carga total de uma RHAA ou de uma sub-RHAA (m);  $\Delta H$  é a perda de carga numa sub-rede primitiva (m);  $\Delta H_L$  é a perda de carga localizada (m); p é o número de troços existentes na RHAA ou na sub-RHAA; u é o número de perdas de carga localizadas existentes na RHAA ou na sub-RHAA.

Com esta hipótese, admite-se que quanto menor for a perda de carga total de uma RHAA ou de uma sub-RHAA melhor será a qualidade de forma dessa RHAA ou sub-RHAA.

## 2.2. Capacidade resistente ao dano

De acordo com a própria definição, um elevado valor da capacidade resistente ao dano indica que a RHAA ou sub-RHAA é menos susceptível de se deteriorar. Bastos (2008) considerou que a área da secção transversal dos troços que constituem uma RHAA ou sub-RHAA é directamente proporcional a essa susceptibilidade e, como tal, propôs que a capacidade resistente ao dano de uma RHAA ou de uma sub-RHAA poderia ser quantificada através do somatório da área da secção transversal dos tubos que formam essa RHAA ou sub-RHAA (solução adoptada neste trabalho), expressa em mm<sup>2</sup>. Contudo, essa proposta apresenta como limitação o facto de RHAA ser construída com o mesmo tipo de material. De forma a contornar esta situação poderá considerar-se que a capacidade resistente ao dano seja quantificada através da pressão nominal. Contemplando que um dano possa ser uma obstrução, o desgaste do material ou a perda de qualidade da água as considerações anteriores ainda não permitem ser totalmente abrangentes no que respeita à quantificação da capacidade resistente ao dano e, como tal, será necessário desenvolver ainda mais trabalho de investigação neste sentido.

## 2.3. Conexão nodal

De acordo com a definição anterior, a conexão nodal ( $\eta$ ) traduz a interligação que uma sub-RHAA tem com a restante RHAA ou as alternativas possíveis de abastecimento de água na zona da RHAA relativa a essa sub-RHAA. Representa também a capacidade que essa sub-RHAA tem de formar anéis de RHAA com outras sub-RHAA. No caso mais simples (Figura 3), a sub-RHAA constituída pelo troço 1 e os nós 1 e 2 apresenta uma conexão nodal  $\eta$  correspondente ao somatório das sub-RHAA primitivas que convergem para os nós 1 e 2 (troços 2, 3, 4, 5 e 6) e, por isso, é igual a 5.

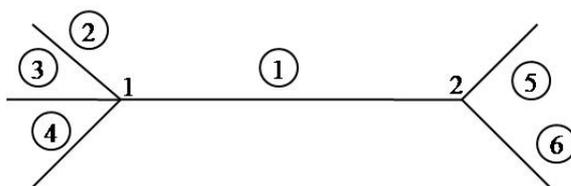


Figura 3 - RHAA para exemplificação da quantificação da conexão nodal.

## 2.4. Distância ao reservatório

A distância ao reservatório (DIS) é a menor distância que a água tem que percorrer entre o reservatório e a sub-RHAA em análise e por isso é o menor valor do somatório dos comprimentos dos troços constituintes de cada um dos diferentes caminhos alternativos existentes na RHAA que permitem o transporte da água entre o reservatório e a sub-RHAA em análise, expresso em m.

## 2.5. Capacidade resistente ao dano relativa

De acordo com o referido anteriormente, a capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) pode ser quantificada através da Expressão 2.

$$E_r = \frac{E}{E_{total}} \quad (2)$$

em que:  $E_r$  é a capacidade resistente ao dano relativa;  $E$  é a capacidade resistente a um dano parcial;  $E_{total}$  é a capacidade resistente ao dano para a ocorrência do dano total da RHAA.

## 2.6. Perda de rede

Tendo em consideração o referido anteriormente relativo à perda de RHAA ( $\gamma$ ) em que esta grandeza traduz numericamente a parte de uma RHAA que fica inoperável devido à ocorrência de um determinado cenário de dano, propõe-se a Expressão 3 para a sua quantificação. Quando  $\gamma=0$  admite-se que toda a RHAA está operacional,  $\gamma=1$  corresponde a uma RHAA completamente inoperável e não é possível abastecer de água nenhum ponto da zona.

$$\gamma = \frac{\Delta H_T(S')}{\Delta H_{total}} \quad (3)$$

em que:  $\gamma$  é a perda de rede;  $\Delta H_T(S')$  é a perda de carga das sub-RHAA que ficam inutilizadas ( $S'$ ); e  $\Delta H_{total}$  representa a perda de carga total de toda a RHAA.

## 2.7. Índice de vulnerabilidade

A vulnerabilidade de uma RHAA em relação a um determinado cenário de dano é quantificada através do índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ), adimensional. Este índice corresponde à desproporção existente entre a perda de RHAA  $\gamma$  e a capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ), e pode ser traduzido pela Expressão 4.

$$\varphi = \frac{\gamma}{E_r} \quad (4)$$

em que:  $\phi$  é o índice de vulnerabilidade;  $\gamma$  é a perda de RHAA;  $E_r$  é a capacidade resistente ao dano relativa. Um elevado valor deste índice, relativo a um determinado cenário de dano, representa que a RHAA é vulnerável em relação a esse cenário de dano porque o valor do esforço necessário para a ocorrência de dano é desproporcional à parte da RHAA que fica inoperacional.

### 3. APLICAÇÃO DA TVRHAA

A aplicação da TVRHAA a uma RHAA é composta essencialmente por três etapas, à semelhança da aplicação da teoria da vulnerabilidade estrutural às estruturas. A primeira etapa consiste no processo de aglutinação, a segunda etapa é a representação da RHAA ou da sub-RHAA através de um modelo hierárquico e, a terceira e última etapa é relativa ao processo de desaglutinação desse modelo hierárquico. O processo de aglutinação é um processo progressivo e selectivo. O primeiro passo consiste na identificação dos primeiros candidatos de sub-RHAA primitivas a serem aglutinados entre si de forma a gerar o primeiro anel de RHAA. O segundo passo consiste na selecção de novos candidatos de sub-RHAA primitivas que possam ser aglutinados entre si, ou à sub-RHAA formada no passo anterior. Este processo desenvolve-se sucessivamente até que toda a RHAA, incluindo o reservatório, esteja toda aglutinada, o que corresponde a ser representada por um único anel de RHAA. O processo de selecção de candidatos do processo de aglutinação recorre a cinco critérios de selecção que serão seguidamente descritos. A formação do modelo hierárquico de uma RHAA recorre à informação resultante do processo de aglutinação dessa RHAA e é fundamental para a realização do processo de desaglutinação. É através do processo de desaglutinação do modelo hierárquico que os cenários de dano vulneráveis da RHAA são identificados e, é através destes, que a parte ou as partes mais vulneráveis de uma RHAA são localizadas.

#### 3.1. Processo de aglutinação da TVRHAA

Tal como foi referido anteriormente, o processo de aglutinação da TVRHAA é iterativo e selectivo. A selecção de candidatos de sub-RHAA a ser aglutinados entre si recorre a cinco critérios de selecção e que são os seguintes por ordem decrescente de importância:

- a) Menor perda de carga total [ $\Delta H_{min}$ ]: O critério de menor perda de carga total é o primeiro critério de selecção a ser aplicado no processo de aglutinação. A perda de carga total traduz a qualidade de forma da RHAA. Para o efeito,

do conjunto de sub-RHAA candidatas a ser aglutinadas deve-se seleccionar o candidato que apresente o menor valor de perda de carga total porque se assume que quanto menor for a perda de carga total de uma RHAA, maior será a sua qualidade de forma. Quando este critério não for suficiente para seleccionar os candidatos a aglutinar então será necessário recorrer ao segundo critério de selecção que é a máxima capacidade resistente ao dano.

- b) Máxima capacidade resistente ao dano ( $E_{máx}$ ): A máxima capacidade resistente ao dano é o segundo critério de selecção do processo de aglutinação da TVRHAA. Quanto maior for a capacidade resistente ao dano de uma RHAA ou sub-RHAA maior será o esforço requerido para haver dano nessa RHAA ou sub-RHAA e, por isso, a RHAA ou sub-RHAA é menos susceptível de se deteriorar. Neste contexto os candidatos a seleccionar para sofrer aglutinação que apresentam maior capacidade resistente ao dano serão escolhidos. Caso este critério não seja suficiente, então, terá que se recorrer ao terceiro critério de selecção que é a máxima conexão nodal.
- c) Máxima conexão nodal ( $\eta_{máx}$ ): A máxima conexão nodal é o terceiro critério de selecção e apenas deverá ser usado quando os dois anteriores não forem suficientes na decisão dos candidatos a seleccionar para uma aglutinação. Este critério consiste em seleccionar os candidatos que conduzem ao maior valor de conexão nodal.
- d) Máxima distância ao reservatório [ $DIS_{máx}$ ]: A máxima distância ao reservatório é o quarto critério, e consiste em escolher os candidatos que quando aglutinados entre si apresentam a maior distância ao reservatório. Considera-se que o facto de uma sub-RHAA estar afastada do reservatório corresponde a essa sub-RHAA ser, de alguma forma, menos vulnerável.
- e) Escolha Livre (Fc): Quando os quatro critérios de selecção anteriores não forem suficientes para seleccionar dois candidatos de sub-RHAA a aglutinar então recorre-se ao último critério de selecção que é a simples escolha livre. Neste caso, todos os candidatos quando aglutinados entre si dois a dois apresentam as mesmas características de vulnerabilidade, como tal, serão escolhidos aleatoriamente.

#### 3.2. Formação do modelo hierárquico

Após a RHAA estar toda aglutinada e, por isso, poder ser representada por um único anel de RHAA, o processo de aglutinação termina. Com base na informação obtida

através deste processo é possível formar o modelo hierárquico dessa RHAA. Tal como já foi referido, o modelo hierárquico de uma RHAA corresponde a uma representação abstracta dessa RHAA em que as sub-RHAA estão arrumadas em termos da sua qualidade de forma. A Figura 4 apresenta um exemplo de um modelo hierárquico de uma RHAA.

Neste modelo, as sub-RHAA primitivas (troços) são representadas por círculos cinzentos. A sub-RHAA de referência (reservatório) é representada por um rectângulo cinzento. As restantes sub-RHAA resultantes do processo de aglutinação são

representadas por círculos brancos. Cada uma destas sub-RHAA tem associado o respectivo anel de RHAA com a indicação do critério de selecção que foi aplicado aquando do processo de aglutinação. A leitura de um modelo hierárquico de uma RHAA deve ser feita de baixo para cima. A sub-RHAA do topo superior de um modelo hierárquico de uma RHAA é aquela que foi a última a ser definida no processo de aglutinação e representa toda a RHAA, incluindo o reservatório (sub-RHAA de origem). No caso do modelo hierárquico da Figura 4 corresponde à sub-RHAA 9.

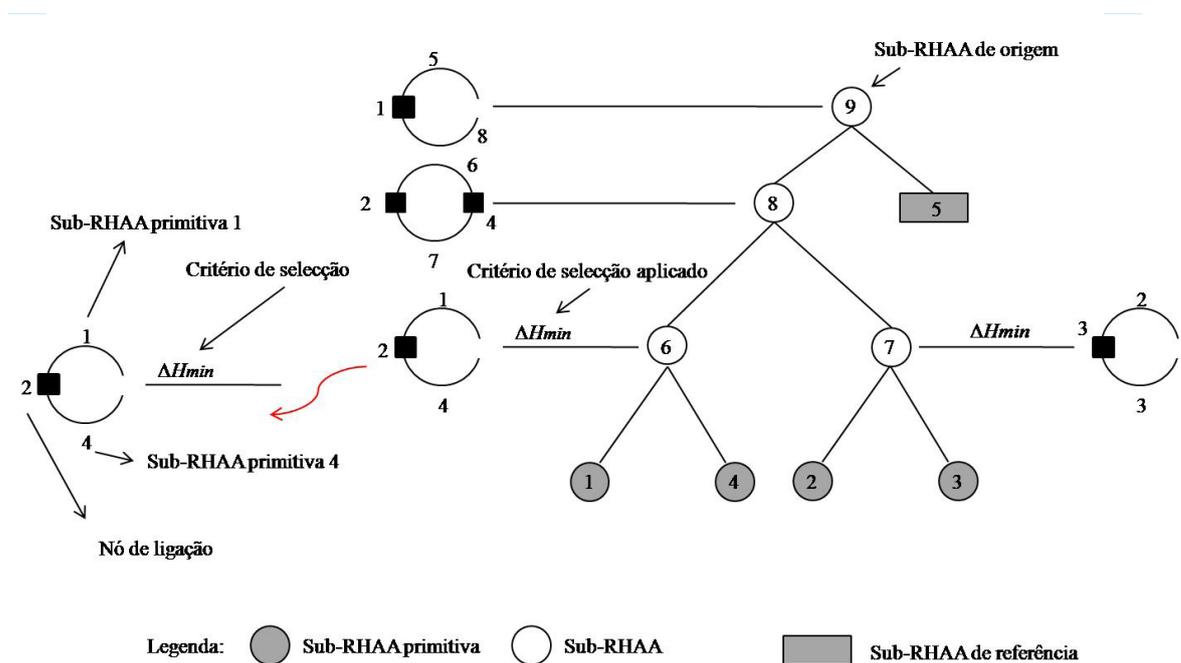


Figura 4 - Modelo hierárquico de uma RHAA.

### 3.3. Processo de desaglutinação

O processo de desaglutinação corresponde à terceira e última etapa da aplicação da TVRHAA a uma RHAA. É através deste processo, que os cenários de dano vulneráveis de uma RHAA são identificados. Este processo tem como base o modelo hierárquico da RHAA pré-definido.

A desaglutinação ou desmembramento do modelo hierárquico de uma RHAA é processado no sentido descendente e tem início na última sub-RHAA definida no processo de aglutinação, procurando em cada anel de rede um possível evento de dano. À semelhança do processo de aglutinação também o processo de desaglutinação assenta num conjunto de critérios

de selecção. Estes critérios são os seguintes, por ordem decrescente de importância: a sub-RHAA não é uma sub-RHAA de referência ( $N_R$ ); a sub-RHAA está ligada directamente à sub-RHAA de referência ( $C_D$ ); seleccionar uma sub-RHAA primitiva (troço) em detrimento de uma sub-RHAA ( $L_C$ ); sub-RHAA apresenta o maior valor de perda de carga total ( $S_{\Delta H}$ ); a sub-RHAA tem o menor valor de capacidade resistente ao dano ( $S_E$ ); a sub-RHAA foi aglutinada posteriormente ( $C_L$ ); escolha livre ( $F_C$ ).

Quando um evento de dano de RHAA é identificado através deste processo é necessário verificar se a sub-RHAA em análise ou a RHAA tem capacidade de abastecer água. Caso uma das condições anteriores

seja cumprida então este processo decorre na busca de outros eventos de dano da sub-RHAA, até que a sub-RHAA em análise ou a RHAA deixem de ter capacidade de abastecer água. Nesta fase, é identificado um cenário de dano vulnerável da RHAA, relativo à sequência ordenada dos eventos de dano detectados. Contudo, o processo de desaglutinação prossegue até que todas as sub-RHAA definidas no processo de aglutinação (círculos brancos da Figura 4) sejam desaglutinadas.

### 3.4. Cenários de dano vulneráveis

Os cenários de dano vulneráveis identificados através da aplicação da TVRHAA a uma RHAA são os que se identificam e que se descrevem seguidamente.

Cenário de dano de colapso total: é o cenário de dano que corresponde à perda da totalidade de uma RHAA. A RHAA fica incapacitada de abastecer água a qualquer ponto. O cenário de dano de colapso total será aquele que, dentro dos cenários de dano de colapso total, apresenta o maior valor de índice de vulnerabilidade  $\phi$ .

Cenário de dano de máxima vulnerabilidade: é aquele que apresenta maior desproporcionalidade entre perda de RHAA e esforço, e por isso apresenta o maior valor de  $\phi$ . Está associado à parte mais vulnerável da RHAA.

Cenário de dano de mínima vulnerabilidade: é o cenário de dano que conduz à menor perda da RHAA, e geralmente corresponde ao dano da última sub-RHAA primitiva que foi aglutinada.

Cenário de menor esforço para haver dano: é aquele que corresponde ao elemento da RHAA que requer o menor esforço para sofrer dano de RHAA.

Cenário de dano de interesse: é um cenário de dano de interesse específico do utilizador.

## 4. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Para RHAA complexas a aplicação analítica da TVRHAA poderá ser morosa e, como tal, procedeu-se à elaboração de um programa de cálculo automático que se designou por Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (VRHAA), de modo a facilitar a aplicação da TVRHAA.

O programa de cálculo automático VRHAA foi desenvolvido em linguagem C (GCC, versão 4.2, 2000). De forma muito sucinta, este programa pode-se dividir em quatro blocos. O primeiro bloco é referente à introdução dos dados (INPUT), o segundo bloco é relativo ao processo de aglutinação, o terceiro bloco elabora o processo de desaglutinação e o quarto bloco

é relativo ao tratamento e apresentação dos resultados (OUTPUT). Os resultados são apresentados sob a forma de tabelas assim como graficamente através de ficheiros em formato Excel (\*.xls) e Drawing Exchange Format (\*.dxf). A Figura 5 representa o fluxograma base do VRHAA.

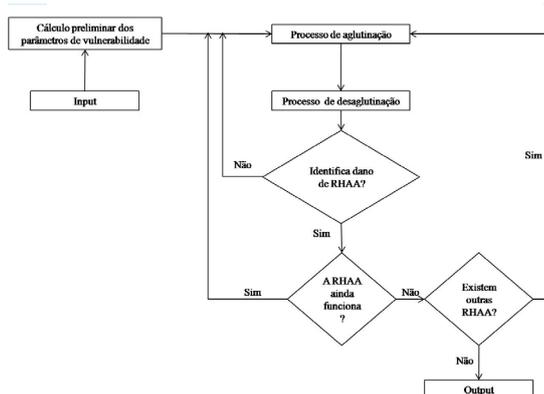


Figura 5 - Fluxograma do VRHAA.

## 5. APLICAÇÃO DA TVRHAA A UMA RHAA

De forma a exemplificar a aplicação da TVRHAA estudou-se a RHAA simples representada na Figura 6. Esta rede é formada por 4 troços, 4 nós e pelo reservatório. O material da tubagem e dos acessórios é o policloreto de vinil (PVC), com uma rugosidade de 0.01 mm. O valor da pressão de serviço adoptada para esta RHAA foi de 6 kgf/cm<sup>2</sup>. Não se apresenta, neste trabalho, o dimensionamento hidráulico da RHAA por simplificação. Algumas características geométricas e hidráulicas principais da RHAA são apresentadas no Quadro 1.

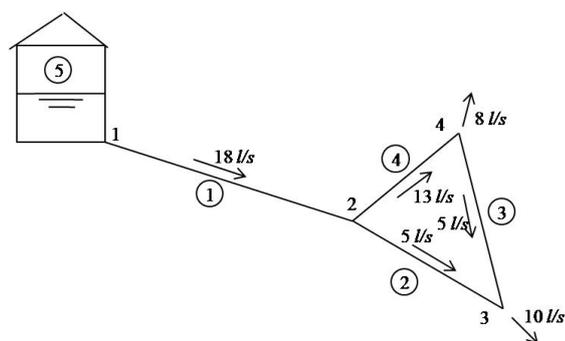


Figura 6 - RHAA adoptada como caso de estudo.

**Quadro 1** - Características geométricas e hidráulicas da RHAA.

Sub-Rede Primitiva	Nós	Comprimento (m)	Diâmetro comercial (mm)	Espessura (mm)	Caudal (l/s)	Perda de carga (m)
1	1; 2	500	200	5.9	18.0	0.995
2	2; 3	300	110	3.2	5.0	1.054
3	3; 4	300	110	3.2	5.0	1.054
4	2; 4	300	160	4.7	13.0	0.972

### 5.1. Processo de aglutinação

No 1º passo existem cinco candidatos da sub-RHAA, a serem aglutinados entre si e que estão identificados na 1ª coluna do Quadro 2. Para cada um destes candidatos a formar uma nova sub-RHAA foram determinadas as grandezas de  $\Delta H_T$ ,  $E$ ,  $\eta$  e  $DIS$ . Aplicando-se os critérios de selecção do processo de aglutinação da TVRHAA conclui-se que o primeiro candidato a ser aglutinado é formado pelos troços 1 e 4 e, porque é o que apresenta menor valor de perda de carga total,  $\Delta H_{min}$ .

**Quadro 2** - 1º passo do processo de aglutinação.

Candidatos	$\Delta H_T$ (m)	$E$ (mm <sup>2</sup> )	$\eta$	$DIS$ (m)	Nova sub-RHAA
1+2	2.049	4671.28	2	0	--
1+4	1.967	5890.66	2	0	6
2+3	2.108	2147.29	3	500	--
2+4	2.108	3366.67	3	500	--
3+4	2.026	3366.67	3	500	--

No Quadro 2 apresentam-se os valores das grandezas relativamente a todos os candidatos. Refere-se que tal não é necessário atendendo a que quando um dos candidatos não é seleccionado não é preciso quantificar essas grandezas por razões de tempo de análise. Após esta aglutinação forma-se a sub-RHAA 6 e dá-se início ao 2º passo. No 2º passo, identificam-se novamente as sub-RHAA candidatas a serem aglutinadas e que neste caso correspondem a 2+3, 2+6 ou 3+6, tal como se mostra no Quadro 3. Para cada um dos candidatos quantificam-se as grandezas que aparecem nesse quadro. Baseado nessas grandezas e usando os critérios de selecção do processo de aglutinação verifica-se que as sub-RHAA 2+3 são

aqueles de deverão ser aglutinadas dando origem à nova sub-RHAA 7 e o critério de selecção adoptado foi novamente o  $\Delta H_{min}$ .

**Quadro 3** - 2º passo do processo de aglutinação.

Candidatos	$\Delta H_T$ (m)	$E$ (mm <sup>2</sup> )	$\eta$	$DIS$ (m)	Nova sub-RHAA
2+3	2.1080	2147.29	2	500	7
2+6	3.0210	--	--	--	--
3+6	3.0210	--	--	--	--

Como a totalidade da RHAA deste exemplo ainda não está totalmente aglutinada então este processo continua e, de forma análoga ao descrito anteriormente, sendo 6+7 o único candidato possível de sub-RHAA a ser aglutinado de modo a formar a nova sub-RHAA 8. O processo de aglutinação termina quando se aglutina 8 com o reservatório dando origem à sub-RHAA 9, que é a sub-RHAA de origem.

### 5.2. Formação do modelo hierárquico

Com base na informação obtida através do processo de aglutinação obtém-se o modelo hierárquico representado na Figura 7 para a RHAA apresentada na Figura 6.

### 5.3. Processo de desaglutinação

Baseado no modelo hierárquico da Figura 7, e recorrendo aos critérios de selecção do processo de desaglutinação, obtém-se o seguinte desenvolvimento tendo em conta que a primeira sub-RHAA a ser desaglutinada é a que surge no topo do modelo

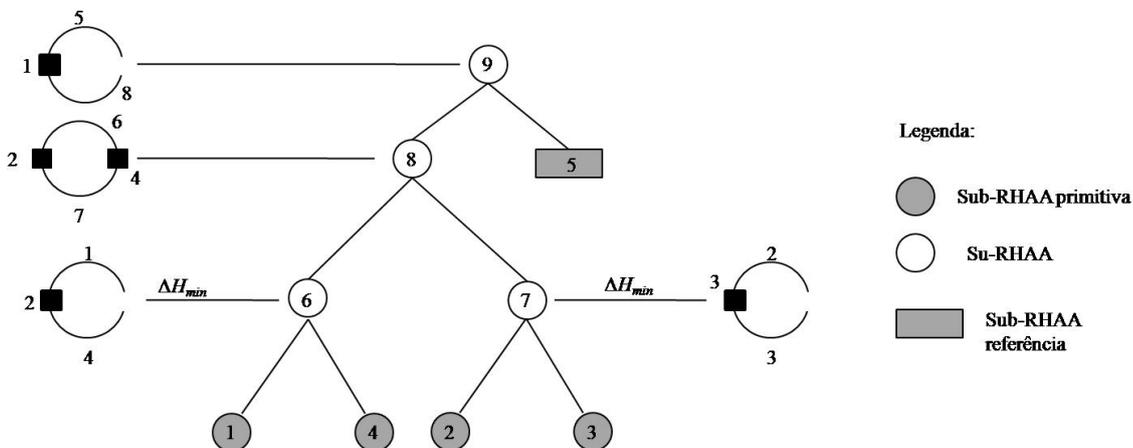


Figura 7 - Modelo hierárquico da RHAA no caos de estudo apresentado.

hierárquico e que é a sub-RHAA 9: Como a sub-RHAA 5 é o reservatório selecciona-se a sub-RHAA 8 para ser desaglutinada e por isso o critério usado foi  $N_R$ . A sub-RHAA 8 é formada pelas sub-RHAAs 6 e 7. Como a sub-RHAA 6 (1+4) está ligada directamente ao reservatório (ver Figura 6), então é a seleccionada ( $C_D$ ). Analisando a sub-RHAA 6 observa-se que esta é formada pelas sub-RHAA primitivas 1 e 4. A sub-RHAA primitiva 1 é a seleccionada como a que poderá potencialmente sofrer dano porque está directamente

ligada ao reservatório ( $C_D$ ), Figura 6. Quando a sub-RHAA primitiva 1 (troço 1) sofre dano, então a RHAA em estudo (Figura 6) fica impedida de efectuar qualquer abastecimento de água. Desta forma, o processo de desaglutinação da sub-RHAA termina. O primeiro cenário de dano vulnerável identificado corresponde ao dano no troço 1 (T1). A Figura 8 representa esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RHAA 9.

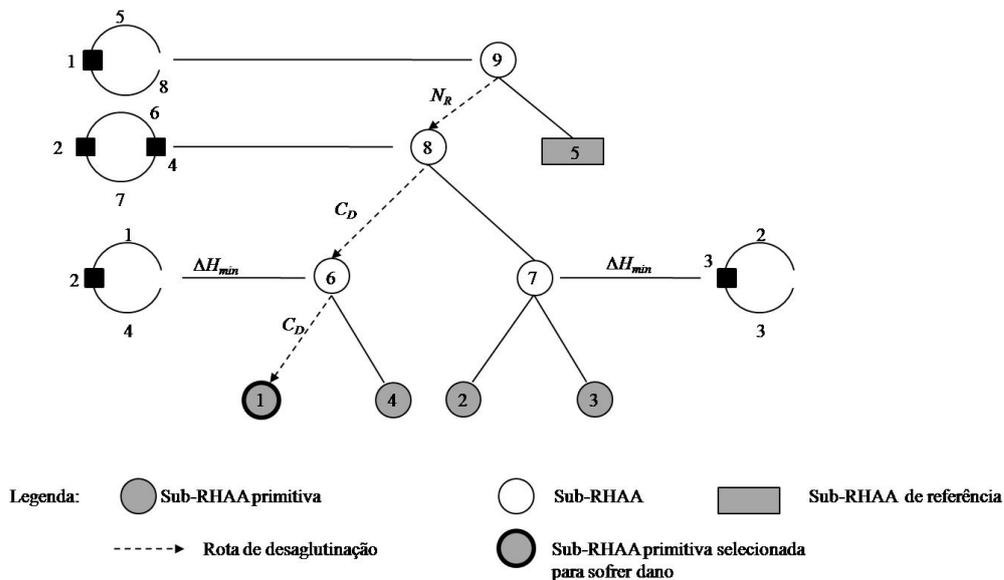


Figura 8 - Desaglutinação da sub-RHAA 9.

Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de vulnerabilidade de  $\gamma$ ,  $E_r$  e  $\phi$ , que se apresentam no Quadro 4.

As sub-RHAA do modelo hierárquico a serem desaglutinadas seguidamente são a 8, 7 e 6, Figura 7. Apenas a desaglutinação da sub-RHAA 7 poderá conduzir a um cenário de dano vulnerável diferente do identificado anteriormente.

A sub-RHAA 7 é vista como sendo uma RHAA autónoma, Figura 9 logo será necessário recorrer ao processo de aglutinação desta nova RHAA. A exemplificação deste processo não será aqui apresentada por razões de simplificação, sendo apenas apresentado o seu modelo hierárquico resultante, Figura 9.

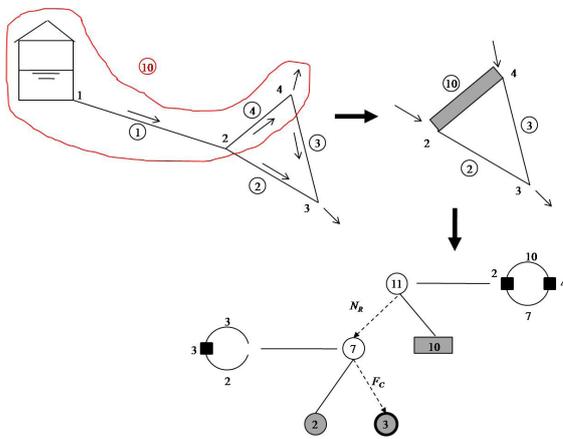


Figura 9 - Sub-RHAA 7.

A sub-RHAA 10, Figura 9 representa o efeito da restante RHAA na sub-RHAA 7 e que aqui se designa por extensão da sub-RHAA de referência.

A aplicação do processo de desaglutinação à sub-RHAA 7 (Figura 9 tem início na sub-RHAA que surge no topo superior do modelo hierárquico, sub-RHAA 7 (Figura 9, e obtém-se o seguinte desenvolvimento: A sub-RHAA 7 é constituída pelas sub-RHAAs primitivas 2 e 3. Como ambas apresentam as mesmas características de vulnerabilidade, a selecção para haver dano é efectuada através do último critério de selecção, que é a escolha livre (Fc) resultando no cenário da sub-RHAA primitiva 3 sofrer dano.

Estando o troço 3 inoperacional então a sub-RHAA 7 ainda desempenha a função de RHAA logo, o processo de desaglutinação da sub-RHAA 7 prossegue.

A sub-RHAA 7 é agora apenas formada pela sub-RHAA 2, tal como se ilustra na Figura 10.

Como nesta fase a sub-RHAA 7 é apenas formada pela sub-RHAA primitiva 2 então, esta é seleccionada para

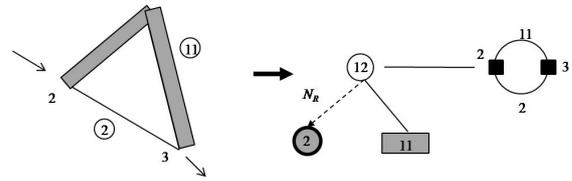


Figura 10 - Sub-RHAA 7 sem a sub-RHAA primitiva 3.

sofrer dano. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RHAA termina. O cenário de dano vulnerável identificado consiste na sequência ordenada de dois eventos de dano que são: danificar o troço 3 seguido do dano no troço 2, T3+T2. Os parâmetros de vulnerabilidade associados a este cenário de dano apresentam-se no Quadro 4.

Após esta análise o processo de desaglutinação da RHAA usada neste exemplo de cálculo termina.

Quadro 4 - Cenários de dano vulneráveis identificados na RHAA usada como exemplo.

Cenário de Dano	$\gamma$	$E_r$	$\phi$
T1	1	0.448	2.232
T3+T2	0.517	0.267	1.936

Face aos resultados apresentados no Quadro 4 e à informação obtida durante a aplicação da TVRHAA à RHAA usada como caso de estudo, verifica-se que o cenário de dano de colapso total corresponde ao troço 1 sofrer dano (T1), porque implica a incapacidade da RHAA efectuar qualquer abastecimento de água ( $\gamma=1$ ). O cenário de dano de colapso total também é o cenário de máxima vulnerabilidade, neste caso porque T1 é o cenário de dano vulnerável que apresenta o maior valor de  $\phi$ , Quadro 4. Trata-se de uma coincidência em vez de uma condição. O cenário de dano de mínima vulnerabilidade corresponde a haver dano na sub-RHAA primitiva 2 ou 3 e, porque ambas foram as últimas sub-RHAA primitivas a serem aglutinadas, Quadro 3 e Figura 7.

O cenário de menor esforço para haver dano corresponde a haver dano nas sub-RHAA primitivas 2 ou 3 porque são aquelas que apresentam o menor valor de E.

A ocorrência do cenário de dano T3+T2, Quadro 4, resulta na perda de cerca de 50% da RHAA porque  $\gamma=0.517$  e apresenta uma vulnerabilidade ligeiramente inferior à correspondente ao cenário de dano de colapso total.

Os resultados de vulnerabilidade obtidos neste exemplo são em parte os esperados, o que permite demonstrar a validade desta teoria. No entanto, em RHAA reais, mais complexas, a aplicação da TVRHAA poderá dar informação acerca da vulnerabilidade dessas RHAA, onde não é tão intuitiva a sua dedução, sendo útil no dimensionamento e gestão das redes.

## 6. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A TVRHAA é uma teoria emergente que tem vindo a ser desenvolvida na UTAD. A sua aplicação poderá contribuir para a obtenção de RHAA mais robustas atendendo a que a(s) parte(s) mais vulnerável(eis) de RHAA complexas poderão ser facilmente identificadas.

Os fundamentos teóricos da TVRHAA foram apresentados neste trabalho e resultam da extrapolação dos fundamentos teóricos da teoria da vulnerabilidade estrutural usada no contexto das estruturas e já estabelecida e testada em diversas aplicações.

A aplicabilidade da TVRHAA foi demonstrada com o recurso a uma RHAA simples e as suas potencialidades evidenciadas.

O programa de cálculo automático VRHAA foi desenvolvido para agilizar a aplicação da TVRHAA a sistemas complexos de RHAA.

## BIBLIOGRAFIA

- BASTOS C.A. (2008). Aplicação da teoria da vulnerabilidade estrutural às redes hidráulicas de abastecimento de água - Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- KLEINER Y., RAJANI B. - Considering time-dependent factors in the statistical prediction of water main breaks - American water works association: Infrastructure Conference, pp. 1-12, Baltimore, Maryland, 12 a 15 de Março de 2000.
- PINTO J.T., BLOCKLEY D.I., WOODMAN N. (2002). The risk of a vulnerable failure - Journal of Structural Safety, Vol. 24, pp. 107-122.
- WU X., BLOCKLEY D.I., WOODMAN N.J. (1993) Vulnerability analysis of structural systems, Part I: Rings and clusters, Part II: Failure scenario - Journal of Civil Engineering Systems, Vol. 10, pp. 301-333.
- ZIDKO V., RAMOS H. - Fuzzy model in the vulnerability assessment of water supply systems - Revista Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Vol. 30-1, pp. 5-25, Maio de 2009.