

**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO**

**Programa de Cálculo Automático VRHAA**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

Leandro Eugénio Baptista de Barros Pereira



**Vila Real, Outubro de 2009**





**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO**

## **Programa de Cálculo Automático VRHAA**

Leandro Eugénio Baptista de Barros Pereira

Dissertação apresentada na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para cumprimento dos requisitos à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sobre a orientação científica do Professor Jorge Tiago Queirós da Silva Pinto, da Professora Isabel Maria A. de Marta Oliveira Bentes e do Professor João Eduardo Quintela Alves Sousa Varajão, da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda a minha família e amigos, em especial ao meu pai.



## RESUMO

A Teoria da Vulnerabilidade Estrutural aplicada a Redes de Abastecimento de Água, tem vindo a ser desenvolvida na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Esta teoria baseia-se nos conceitos expostos na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural desenvolvida na Universidade de Bristol, Reino Unido.

O principal objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um programa de cálculo automático (VRHAA) que torne a teoria da vulnerabilidade de redes hidráulicas de abastecimento de água numa ferramenta de trabalho mais expedita.

Para esse efeito foi realizado um estudo dos conceitos teóricos transpostos da teoria da vulnerabilidade estrutural, para a teoria da vulnerabilidade estrutural aplicada a redes de abastecimento de águas, de forma a determinar um processo de cálculo que facilite a aplicação desta teoria em situações correntes, recorrendo a um software de cálculo automático. Verificou-se a necessidade de ajustar alguns parâmetros para se adequarem mais à realidade.

Este software de cálculo foi desenvolvido em linguagem C, e os resultados obtidos foram validados com o recurso a pequenos exemplos de redes de abastecimento de água.

**Palavras-chave:** Redes de abastecimento de água, Vulnerabilidade, Gestão de infra-estruturas.



## **ABSTRACT**

The Theory of Structural Vulnerability applied to Networks of Water Supply, has been developed in Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. This theory is based on the concepts explained in the Theory of Structural Vulnerability developed at the University of Bristol, UK.

The main objective of this work is the development of a program for automatic calculation (VRHAA), which makes the Theory of Hydraulic Vulnerability of Networks of Water Supply, a tool to work more expeditiously.

For this purpose a study was made of theoretical concepts from the Theory of Structural Vulnerability, to the Theory of Structural Vulnerability Applied to Water Supply Systems, in order to determine a process of calculation that facilitates the application of this theory in current situations, using a software for automatic calculation. It was determined that some parameters need small adjustments to suit the reality.

The software for calculation was developed in C language, and the results were validated using small examples of networks of water supply.

**Keywords:** Water supply networks, Vulnerability, Infrastructure management.



# ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
1 INTRODUÇÃO .....	3
1.1 Enquadramento e objectivos .....	3
1.2 Estrutura da dissertação.....	6
2 BREVE DESCRIÇÃO DA TEORIA DA VULNERABILIDADE DE REDES HIDRÁULICAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (TVRHAA).....	9
2.1 Objectivos.....	9
2.2 Introdução.....	9
2.3 Descrição geral dos principais conceitos teóricos da TVRHAA .....	10
2.4 Descrição mais detalhada de alguns conceitos.....	12
2.4.1 Qualidade de forma .....	12
2.4.2 Capacidade resistente ao dano.....	13
2.4.3 Conexão nodal .....	14
2.4.4 Distância ao reservatório .....	15
2.4.5 Capacidade resistente ao dano relativa.....	15
2.4.6 Perda de RHAA .....	16

---

2.4.7	Índice de vulnerabilidade.....	16
2.5	Aplicação da TVRHAA .....	17
2.6	Processo de aglutinação da TVRHAA .....	17
2.6.1	Menor perda de carga total .....	18
2.6.2	Máxima capacidade resistente ao dano .....	18
2.6.3	Máxima conexão nodal.....	18
2.6.4	Máxima distância ao reservatório.....	19
2.6.5	Escolha Livre.....	19
2.7	Formação do modelo hierárquico.....	19
2.8	Processo de desaglutinação .....	20
2.9	Cenários de dano da TVRHAA.....	21
2.10	Conclusões .....	22
3	REVISÃO DA TVRHAA .....	27
3.1	Objectivos.....	27
3.2	Introdução.....	27
3.3	Exemplo da aplicação da TVRHAA a uma RHAA .....	27
3.3.1	Processo de Aglutinação.....	28
3.3.2	Formação do modelo hierárquico .....	31
3.3.3	Exemplificação da aplicação do processo de desaglutinação na TVRHAA ..	32

---

3.4	Alteração da TVRHAA .....	36
3.4.1	Alteração do conceito de capacidade resistente ao dano .....	36
3.5	Exemplo da aplicação do processo de aglutinação com as alterações propostas 37	
3.6	Conclusões .....	40
4	DESENVOLVIMENTO DE CÁLCULO AUTOMÁTICO .....	43
4.1	Objectivos.....	43
4.2	Introdução.....	43
4.3	Algoritmo .....	44
4.3.1	Descrição geral .....	44
4.3.2	Introdução de dados (INPUT) .....	45
4.3.3	Cálculo preliminar de parâmetros de vulnerabilidade.....	46
4.3.4	Processo de aglutinação.....	46
4.3.5	Processo de desaglutinação .....	46
4.3.6	Cenário de dano (OUTPUT) .....	47
4.4	Estrutura do programa.....	47
4.4.1	Linguagem de programação .....	47
4.4.2	Ambiente de trabalho.....	48
4.4.3	Estrutura interna .....	48
4.5	Utilização do VRHAA .....	50

---

---

4.5.1	Introdução de dados do VRHAA .....	50
4.5.2	Processo de cálculo do VRHAA .....	51
4.5.3	Apresentação dos resultados (OUTPUT) .....	53
4.6	Limitações do VRHAA .....	55
4.7	Conclusões .....	56
5	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	59
5.1	Objectivos.....	59
5.2	Introdução.....	59
5.3	Exemplo 1 .....	59
5.3.1	Processo de Aglutinação.....	60
5.3.2	Modelo hierárquico.....	64
5.3.3	Processo de desaglutinação da RHAA do Exemplo 1 .....	65
5.4	Exemplo 2 .....	76
5.4.1	Modelo hierárquico.....	76
5.4.2	Processo de desaglutinação .....	77
5.5	Exemplo 3 .....	80
5.6	Conclusões .....	82
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	85
7	BIBLIOGRAFIA.....	87

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Exemplo 1 de uma sub-RHAA primitiva para exemplificação do cálculo da conexão nodal.....	14
<b>Figura 2:</b> Exemplo 2 de uma sub-RHAA primitiva para exemplificação do cálculo da conexão nodal.....	15
<b>Figura 3:</b> Modelo hierárquico de uma RHAA .....	20
<b>Figura 4:</b> Pormenor de anel de RHAA.....	20
<b>Figura 5:</b> RHAA para exemplificar a aplicação do processo de aglutinação.....	28
<b>Figura 6:</b> 1º passo do processo de aglutinação .....	29
<b>Figura 7:</b> 2º passo do processo de aglutinação .....	30
<b>Figura 8:</b> 3º passo do processo de aglutinação .....	31
<b>Figura 9:</b> Aglutinação da sub-RHAA de referência.....	31
<b>Figura 10:</b> Modelo hierárquico da RHAA usada como exemplo.....	31
<b>Figura 11:</b> Análise da sub-RHAA 9 .....	32
<b>Figura 12:</b> Sub-RHAA 7 .....	33
<b>Figura 13:</b> Modelo hierárquico da sub-RHAA 7 .....	34
<b>Figura 14:</b> Sub-RHAA 7 sem a sub-RHAA primitiva 3 .....	34
<b>Figura 15:</b> RHAA para exemplo do processo de aglutinação com as alterações propostas	

---

<b>Figura 16:</b>	1º passo do processo de aglutinação .....	39
<b>Figura 17:</b>	Fluxograma do VRHAA.....	45
<b>Figura 18:</b>	Ambiente de trabalho do VRHAA .....	48
<b>Figura 19:</b>	Função mínimo da perda de carga.....	49
<b>Figura 20:</b>	Introdução de dados.....	50
<b>Figura 21:</b>	VRHAA - finalização da introdução de dados .....	51
<b>Figura 22:</b>	VRHAA – Indicação dos nós da RHAA que ligam aos reservatórios .....	51
<b>Figura 23:</b>	VRHAA - Início do cálculo.....	52
<b>Figura 24:</b>	Finalização da utilização do VRHAA .....	53
<b>Figura 25:</b>	Ficheiro aglut_dados.txt .....	54
<b>Figura 26:</b>	Ficheiro aglut_res.txt.....	54
<b>Figura 27:</b>	Ficheiro de resultado.txt .....	55
<b>Figura 28:</b>	RHAA do exemplo 1 .....	60
<b>Figura 29:</b>	1º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28 .....	61
<b>Figura 30:</b>	2º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28 .....	62
<b>Figura 31:</b>	3º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28 .....	63
<b>Figura 32:</b>	4º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28 .....	64
<b>Figura 33:</b>	Agglutinação da sub-RHAA de referência.....	64

---

<b>Figura 34:</b>	Modelo hierárquico da RHAA da Figura 28 .....	65
<b>Figura 35:</b>	Análise da sub-RHAA 10 .....	66
<b>Figura 36:</b>	RHHA da Figura 28 sem o troço 5 .....	66
<b>Figura 37:</b>	Modelo hierárquico da RHAA da Figura 28 sem o troço 5.....	67
<b>Figura 38:</b>	Análise da sub-RHAA 9 .....	68
<b>Figura 39:</b>	RHHA da Figura 25 sem os troços 1 e 5 .....	68
<b>Figura 40:</b>	Modelo hierárquico da RHAA da Figura 25 sem os troços 1 e 5.....	69
<b>Figura 41:</b>	Análise da sub-RHAA 8 .....	69
<b>Figura 42:</b>	RHHA da Figura 25 sem os troços 1, 4 e 5 .....	70
<b>Figura 43:</b>	Modelo hierárquico da RHAA da Figura 28 sem os troços 1 e 5.....	70
<b>Figura 44:</b>	Análise da sub-RHAA 7 .....	71
<b>Figura 45:</b>	Sub-RHAA 8 .....	72
<b>Figura 46:</b>	Modelo hierárquico da Sub-RHAA.....	72
<b>Figura 47:</b>	Sub-RHAA 7 .....	73
<b>Figura 48:</b>	Sub-RHAA 7 .....	73
<b>Figura 49:</b>	Resultados obtidos com o VRHAA para a rede do Exemplo 1.....	75
<b>Figura 50:</b>	RHAA do Exemplo 2 .....	76
<b>Figura 51:</b>	Modelo hierárquico da RHAA da Figura 49 .....	77

<b>Figura 52:</b>	Análise das sub-RHAAs 10, 9 e 8 .....	78
<b>Figura 53:</b>	Resultados obtidos com o VRHAA para a rede do Exemplo 2.....	79
<b>Figura 54:</b>	RHAA do exemplo 3 .....	80
<b>Figura 55:</b>	Modelo hierárquico da RHAA da Figura 54 .....	81

---

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b>	Conceitos iniciais.....	10
<b>Tabela 2:</b>	Variáveis intervenientes no dimensionamento de RHAA.....	12
<b>Tabela 3:</b>	Características geométricas e hidráulicas para aplicação da TVRHAA.....	28
<b>Tabela 4:</b>	1º passo do processo da aglutinação.....	29
<b>Tabela 5:</b>	2º passo do processo da aglutinação.....	30
<b>Tabela 6:</b>	3º passo do processo da aglutinação.....	30
<b>Tabela 7:</b>	Cenários de dano da RHAA da figura 5.....	35
<b>Tabela 8:</b>	Características geométricas e hidráulicas para aplicação da TVRHAA.....	38
<b>Tabela 9:</b>	1º passo do processo da aglutinação.....	38
<b>Tabela 10:</b>	Cenários de dano da RHAA da figura 5.....	39
<b>Tabela 11:</b>	Características geométricas e hidráulicas da RHAA do exemplo 1.....	60
<b>Tabela 12:</b>	1º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 25.....	60
<b>Tabela 13:</b>	2º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28.....	62
<b>Tabela 14:</b>	3º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28.....	62
<b>Tabela 15:</b>	4º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28.....	63
<b>Tabela 16:</b>	Cenários de dano da RHAA da figura 25.....	74
<b>Tabela 17:</b>	Cenários de dano da RHAA da Figura 50.....	78

**Tabela 18:** Características geométricas e hidráulicas para aplicação da TVRHAA..... 80

**Tabela 19:** Cenários de dano da RHAA da figura 52 ..... 81

# **Capítulo I**

## Introdução



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e objectivos

A teoria da vulnerabilidade estrutural tem a sua génese na universidade de Bristol, no Reino Unido e onde foram definidos os seus fundamentos teóricos (Wu, Blockley, & Woodman, 1993).

Mais tarde um outro trabalho de investigação (Hashimoto, 1994) foi desenvolvido com o propósito de quantificar a probabilidade da ocorrência de um cenário de dano, usando para o efeito os conceitos da teoria da vulnerabilidade estrutural. Em 1997 foram reanalisadas as bases teóricas desta teoria e introduzidos novos conceitos (Yu, 1997).

Nesse mesmo ano, iniciou-se a elaboração de um programa de cálculo automático para tornar a teoria da vulnerabilidade estrutural uma ferramenta de trabalho mais expedita. Decorridos seis anos após o aparecimento da teoria da vulnerabilidade estrutural, houve a sua integração com as teorias clássicas de análise estrutural e iniciou-se um trabalho de investigação com o objectivo de permitir que esta teoria efectua-se uma análise em 3D (Lu, Yu, Woodman, & Blockley, 1999).

Posteriormente em 2001 foi realizado um trabalho de investigação com o objectivo de generalizar a aplicação desta teoria a outros campos de aplicação para além do das estruturas de engenharia civil (Argwal, Blockley, & Woodman, 2001). Através desse trabalho concluiu-se que os fundamentos teóricos da teoria da vulnerabilidade estrutural poderiam ser exportados para qualquer tipo de sistema tal como uma rede hidráulica, uma rede rodoviária, uma rede eléctrica, uma empresa, entre outros. No ano de 2002 foi quantificado o risco de um cenário de dano vulnerável aplicando para o efeito esta teoria (Pinto J. T., 2002).

Os princípios basilares da teoria da vulnerabilidade estrutural são a forma e a conectividade da estrutura e pretendem identificar as suas partes mais vulneráveis, em que vulnerabilidade é entendida como sendo a existência de desproporcionalidade entre o

esforço e a escala de dano estrutural resultante desse esforço. Deste modo, a teoria da vulnerabilidade estrutural pretende encontrar cenários de dano com estas características e, indirectamente, identificar as partes de uma estrutura que são mais vulneráveis. Esta teoria pode ser aplicada em todas as fases da vida de uma estrutura, desde a fase de projecto, construção, gestão, manutenção, reforço e demolição.

Em 2008 foram transcritos os conceitos da teoria pela primeira vez para a língua portuguesa e foram extrapolados para o contexto das redes hidráulicas de abastecimento de água (Bastos, 2008).

A aplicação da Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA) a uma rede hidráulica de abastecimento de água (RHAA) pretende identificar as partes mais vulneráveis dessa rede, à semelhança do referido em relação à teoria da vulnerabilidade estrutural. Deste modo, a TVRHAA detecta cenários de dano das RHAA cuja desproporcionalidade existente entre esforço e escala de dano da RHAA é mais elevada que a generalidade dos cenários de dano previstos através das teoria clássicas de dimensionamento de RHAAs. Associado a esses cenários de dano vulneráveis das RHAAs é possível detectar as partes da RHAA que são mais vulneráveis. Esta informação poderá ser muito útil porque se for: na fase de projecto de uma RHAA o projectista, poderá repensar a geometria da RHAA (número de troços, orientação entre troços, profundidade de assentamento dos troços, entre outros aspectos) ou reforçar a RHAA na zona mais vulnerável; na fase de gestão, manutenção e reforço o técnico saberá qual a zona da RHAA mais crítica; na fase de reforço da RHAA o projectista poderá mais facilmente decidir qual é a zona da RHAA prioritária a ser reforçada.

A aplicação da TVRHAA às RHAAs não pretende de forma alguma substituir a aplicação das teorias clássicas de dimensionamento das RHAAs mas sim ser um complemento, em conformidade com um trabalho de investigação que está a ser levado a cabo no Instituto Superior Técnico, que recorre ao Modelo Fuzzy para a quantificação do índice de vulnerabilidade em sistemas de abastecimento (Zidko & Ramos, 2009).

Antes de se proceder ao desenvolvimento efectivo do programa de cálculo automático VRHAA foi necessário efectuar uma revisão dos conceitos teóricos da TVRHAA definidos em (Bastos, 2008) e testar a aplicabilidade da TVRHAA através do recurso de diversos

exemplos de RHAA de complexidade crescente. Esta tarefa apresentou-se muito profícua porque permitiu apresentar sugestões alternativas à definição de alguns conceitos teóricos da TVRHAA apresentados em (Bastos, 2008) e adquirir um conhecimento sólido sobre a TVRHAA necessário à realização do programa de cálculo automático.

Das sugestões apresentadas para alteração dos conceitos da TVRHAA destacam-se a alteração do conceito de capacidade resistente ao dano e do anel de RHAA.

Foram usados exemplos de RHAA que permitiram demonstrar a aplicação de todos os critérios do processo de aglutinação e do processo de desaglutinação previstos na TVRHAA e, verificar que a ordem de importância com que esses critérios foram apresentados é válida. Os exemplos de RHAA usados em (Bastos, 2008) não permitiram esta verificação.

O programa de cálculo automático VRHAA foi desenvolvido usando a linguagem de programação C. A utilização do VRHAA é muito simples e prática pois o utilizador apenas terá que fornecer um conjunto de dados relativos à RHAA tal como: identificação do troço, nós do troço, comprimento do troço, perda de carga do troço, pressão de serviço do troço.

A utilização do VRHAA varia em função da quantidade de troços da RHAA em análise, mas com a capacidade actual de processamento dos computadores, o processo de cálculo demora apenas poucos segundos.

Em termos de resultados o VRHAA fornece resultados numéricos em forma de tabelas.

Todas as fases de construção do algoritmo do VRHAA foram validadas através da comparação de resultados obtidos através do VRHAA e da resolução manual ou em folha de cálculo de exemplos de RHAA.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No presente capítulo é feito o enquadramento do tema desenvolvido, a descrição dos objectivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, será feita uma breve descrição/revisão da TVRHAA.

No Capítulo 3, será feita uma análise crítica à TVRHAA, e serão propostas algumas sugestões de alteração de alguns dos conceitos teóricos da TVRHAA.

No Capítulo 4, será feita a descrição detalhada do programa de cálculo automático VRHAA elaborado no âmbito deste trabalho de investigação. Será justificada a opção da linguagem utilizada na elaboração do referido programa e, descrito o processo de funcionamento do programa recorrendo para o efeito a um pequeno exemplo de como se deve utilizar o programa. Neste capítulo também serão apresentadas as limitações do VRHAA.

No Capítulo 5, irá proceder-se à validação do VRHAA através da comparação entre os valores fornecidos pelo VRHAA e os obtidos manualmente ou através de folha de cálculo para dois exemplo de RHAA, e um outro exemplo com recurso apenas ao VRHAA.

No Capítulo 6, apresentar-se-ão as conclusões alcançadas através deste trabalho de investigação, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

## **Capítulo II**

Breve descrição da teoria da vulnerabilidade de redes hidráulicas de abastecimento de água (TVRHAA)



## **2 BREVE DESCRIÇÃO DA TEORIA DA VULNERABILIDADE DE REDES HIDRÁULICAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (TVRHAA)**

### **2.1 Objectivos**

Os objectivos deste capítulo são:

- Descrever a teoria da vulnerabilidade das redes hidráulicas de abastecimento de água (TVRHAA);
- Explicar os conceitos mais importantes da TVRHAA.

### **2.2 Introdução**

A TVRHAA teve o início do seu desenvolvimento na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Vila Real, Portugal, e pretende identificar os cenários de dano vulneráveis de uma rede hidráulica de abastecimento de água (RHAA). Estes cenários são aqueles em que um pequeno esforço provoca danos desproporcionais na rede.

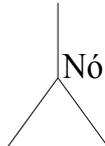
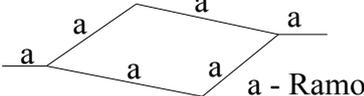
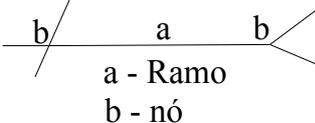
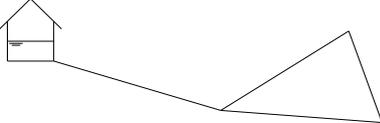
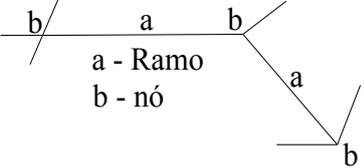
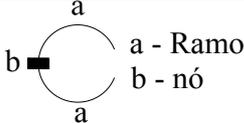
Num trabalho de investigação desenvolvido na UTAD (Bastos, 2008), os conceitos teóricos da teoria da vulnerabilidade estrutural (Wu, Blocley, & Woodman, 1993), foram transpostos para o contexto das RHAAs, e resultou no desenvolvimento da TVRHAA.

Na TVRHAA uma acção pode ser de vários tipos desde excesso de pressão, corrosão ou degradação do material da rede, elevado valor da velocidade do escoamento, um erro humano na fase de projecto ou na fase de construção, vibrações impostas por passagem de veículos, sismos, assentamentos de terreno, actos de sabotagem, entre outros.

## 2.3 Descrição geral dos principais conceitos teóricos da TVRHAA

Para se conseguir compreender a TVRHAA é necessário entender e conhecer os conceitos que constituem a sua base teórica. Assim, apresentam-se na Tabela 1, alguns desses conceitos.

**Tabela 1:** Conceitos iniciais

<b>RHAA</b>	
<b>Conceito</b>	<b>Esquema gráfico representativo</b>
Nó	
Ramo	
Sub-RHAA primitiva	
Sub-RHAA de referência	
Sub-RHAA de origem	
Sub-RHAA	
Anel de RHAA	

*Sub-RHAA primitiva* é constituída por um troço e os seus respectivos nós.

*Sub-RHAA* é entendida como sendo um agrupamento de pelo menos dois troços (ramos) adjacentes e dos respectivos nós.

*Sub-RHAA de referência* é o(s) reservatório(s). Por questões de simplificação, é admitido nesta fase 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. O anel de RHAA ilustrado na Tabela 1 representa a RHAA mais simples (dois troços e um nó de ligação).

*Dano de rede ou evento de deterioração* corresponde à deterioração da RHAA que pode impossibilitar o abastecimento de água entre pontos de uma RHAA. Nesta fase, o dano de rede é considerado como sendo a perda de um tubo da RHAA e apenas por simplificação. Contudo, este conceito poderá incluir aspectos do tipo desgaste dos tubos, obstrução, falta de qualidade de água, entre outros.

*Qualidade de forma* é um indicador da forma de uma RHAA ou de uma sub-RHAA.

A *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 dano de RHAA.

Um *cenário de dano* é uma sequência ordenada de danos de rede ou eventos de deterioração através dos quais o desempenho de uma RHAA se degrada.

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

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

## 2.4 Descrição mais detalhada de alguns conceitos

### 2.4.1 Qualidade de forma

A qualidade de forma traduz a qualidade da forma geométrica de uma sub-RHAA. Esta grandeza é influenciada pelos seguintes aspectos: orientação dos troços, tipos de uniões entre troços, quantidade de uniões e rigidez dos troços.

Na tabela 2 estão apresentadas as variáveis que intervêm no dimensionamento hidráulico de uma RHAA.

**Tabela 2:** Variáveis intervenientes no dimensionamento de RHAA

Variável independente	L
	Q
	$\nu$
	$K_e$
	g
Variável dependente para o pré-dimensionamento	$D = f(Q)$
Variável dependente	$D_{int} = f(D_{com}, e)$
	$U = f(D_{int}, Q)$
	$Re = f(\nu, Q, D_{int})$
	$f = f(Q, D_{int}, \nu, K_e)$
	$J = f(Q, D_{int}, \nu, K_e, g)$
	$\Delta H = f(Q, D_{int}, \nu, K_e, g, L)$

Em que:

- $L$  é o comprimento do troço;
- $Q$  é o caudal;
- $\nu$  é a viscosidade cinemática do líquido;
- $K_e$  é a rugosidade absoluta equivalente;
- $g$  é a aceleração da gravidade;
- $D$  é o diâmetro;
- $D_{int}$  é o diâmetro interno;
- $D_{com}$  é o diâmetro comercial;

- $e$  é a espessura;
- $U$  é a velocidade média do escoamento.

Após uma análise exaustiva de todas as variáveis intervenientes no dimensionamento de uma RHAA (Bastos, 2008), propôs-se a perda de carga ( $\Delta H$ ) como sendo aquela 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 2.1.

$$\Delta H_T^- = \sum_{j=1}^p \Delta H_j^- + \sum_{i=1}^u \Delta H_{L_i}^- \quad (2.1)$$

Em que:

- $\Delta H_T^-$  é a perda de carga total de uma RHAA ou sub-RHAA;
- $\Delta H_j^-$  é a perda de carga ao longo de uma sub-RHAA primitiva;
- $\Delta H_L^-$  é a perda de carga localizada;
- $p$  é o número de troços existentes na RHAA ou sub-RHAA;
- $u$  é o número de perdas localizadas existentes na rede ou na sub-RHAA;

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.

#### 2.4.2 Capacidade resistente ao dano

De acordo com o referido anteriormente um elevado valor da capacidade resistente ao dano ( $E$ ) indica que a RHAA ou a sub-RHAA é menos susceptível de se deteriorar.

Considerou-se (Bastos, 2008) que a área da secção transversal dos tubos que constituem uma RHAA ou sub-RHAA é directamente proporcional a essa susceptibilidade e como tal propõe-se a Expressão 2.2 para quantificar a capacidade resistente ao dano de uma RHAA ou de uma sub-RHAA.

$$E = \sum_{j=1}^p (D_{com_j}^2 - D_{int_j}^2) \quad (2.2)$$

Em que:

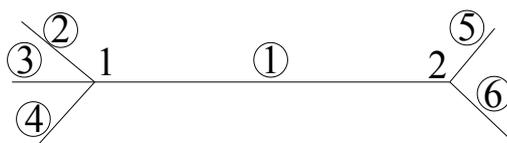
- $E$  é a capacidade resistente ao dano;
- $D_{com}$  é o diâmetro comercial;
- $D_{int}$  é o diâmetro interno;
- $A_{Dcom}$  é a área da secção transversal do tubo usando o  $D_{com}$ ;
- $A_{Dint}$  é a área da secção transversal do tubo usando o  $D_{int}$ .

Deste modo, numa RHAA ou sub-RHAA, a sub-RHAA primitiva que possuir maior área de secção transversal será aquela que terá uma maior capacidade resistente ao dano.

### 2.4.3 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 rede com outras sub-RHAA.

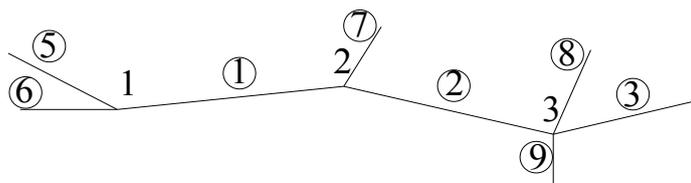
No caso mais simples (Figura 1), a sub-RHAA constituída pelo troço 1 e os nós 1 e 2 apresenta a conexão nodal correspondente ao somatório das sub-RHAAs primitivas que convergem para os nó 1 e 2 (troços 2, 3, 4, 5 e 6) e, por isso, é igual a 5.



**Figura 1:** Exemplo 1 de uma sub-RHAA primitiva para exemplificação do cálculo da conexão nodal

Na Figura 2 está representada uma sub-RHAA constituída por três sub-RHAAs primitivas (1, 2, 3). Para o cálculo da conexão nodal da sub-RHAA neste caso é necessário contabilizar todas as sub-RHAAs primitivas que convergem para os nós (1, 2, 3) que constituem a sub-RHAA formada pelas sub-RHAAs primitivas (1, 2, 3), neste caso a conexão nodal da sub-RHAA constituída pelas sub-RHAAs primitivas (1, 2, 3) é 5.

Comparando as sub-RHAAs primitivas (1, 2, 3) para verificar qual o valor que cada uma apresenta de conexão nodal, observa-se que o valor da sub-RHAA primitiva 1, é igual a 4, chegou-se a este valor da seguinte forma, os troços 5 e 6 convergem para o nó 1 e os troços 2 e 7, convergem para o nó 2. A sub-RHAA primitiva 2 apresenta um valor de 5, e a sub-RHAA 3 apresenta um valor de 3.



**Figura 2:** Exemplo 2 de uma sub-RHAA primitiva para exemplificação do cálculo da conexão nodal

#### 2.4.4 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.

#### 2.4.5 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 2.3.

$$E_r = \frac{E}{E_{total}} \quad (2.3)$$

Em que:

- $E_r$  é a capacidade resistente ao dano relativa;
- $E$  é a capacidade resistente ao dano;
- $E_{total}$  é a capacidade resistente ao dano para a ocorrência de dano total da RHAA ou sub-RHAA.

### 2.4.6 Perda de RHAA

Tendo em consideração o referido anteriormente relativo à perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) esta grandeza traduz numericamente a parte de uma RHAA que fica inoperável devido à ocorrência de um determinado cenário de dano, propõe-se para o efeito a Expressão 2.4 para a sua quantificação.

$$\gamma_r^- = \frac{\Delta H_T^-(S')}{\Delta H_{total}^-} \quad (2.4)$$

Em que:

- $\gamma_r^-$  é a perda de RHAA;
- $\Delta H_T^-(S')$  é a perda de carga das sub-RHAAs que ficam inutilizadas;
- $\Delta H_{total}^-$  é a perda de carga total de toda a rede.

Quando  $\gamma_r^-$  é igual a zero então toda a RHAA está operacional, quando  $\gamma_r^-$  é igual a um então a RHAA está completamente inoperável e não é possível abastecer de água nenhum ponto.

### 2.4.7 Índice de vulnerabilidade

O índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) permite avaliar a vulnerabilidade de uma RHAA ou de uma sub-RHAA. Corresponde à desproporção existente entre a perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) e a capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ), e pode ser traduzida pela Expressão 2.5. É um indicador da vulnerabilidade das RHAAs. Um valor elevado deste índice corresponde uma vulnerabilidade elevada da RHAA ou sub-RHAA.

$$\varphi = \frac{\gamma_r^-}{E_r} \quad (2.5)$$

Em que:

- $\varphi$  é o índice de vulnerabilidade;
- $\gamma_r^-$  é a perda de RHAA;
- $E_r$  é a capacidade resistente ao dano relativo.

## **2.5 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. 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 iterativo e composto pelos seguintes passos: o primeiro passo consiste na identificação dos primeiros candidatos de sub-RHAAs 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-RHAAs 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 descritos seguidamente.

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 por sua vez através destes que a parte ou as partes mais vulneráveis de uma RHAA são localizadas.

## **2.6 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 de importância:

- Menor perda de carga total ( $\Delta H_{min}$ );
- Máxima capacidade resistente ao dano ( $E_{máx}$ );
- Máxima conexão nodal ( $\eta_{máx}$ );
- Máxima distância ao reservatório ( $Dis_{máx}$ );
- Escolha livre ( $Fc$ ).

### **2.6.1 Menor perda de carga total**

O critério de menor perda de carga total ( $\Delta H_{min}^-$ ) é o primeiro critério de selecção a ser aplicado no processo de aglutinação. A perda de carga total traduz a qualidade de forma da rede. Para o efeito, do conjunto de candidatos de sub-RHAA a serem aglutinados deve-se seleccionar o candidato que apresente o menor valor de perda de carga total e 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.

### **2.6.2 Máxima capacidade resistente ao dano**

A máxima capacidade resistente ao dano ( $E_{máx}$ ) 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 possui uma boa qualidade de forma. Neste contexto, o candidato a seleccionar para sofrer aglutinação que apresenta maior capacidade resistente ao dano será o escolhido. Caso este critério seja insuficiente, terá que se recorrer ao terceiro critério de selecção que é a máxima conexão nodal.

### **2.6.3 Máxima conexão nodal**

A máxima conexão nodal ( $\eta_{máx}$ ) é o terceiro critério de selecção e apenas deverá ser usado quando os dois anteriores não foram suficientes na decisão dos candidatos a seleccionar para uma aglutinação. Este critério consiste em seleccionar os candidatos que quando aglutinados conduzem ao maior valor de conexão nodal.

#### **2.6.4 Máxima distância ao reservatório**

A máxima distância ao reservatório ( $Dis_{máx}$ ) é o quarto critério e consiste em escolher o candidato que quando aglutinado apresenta 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.

#### **2.6.5 Escolha Livre**

Quando os quatro critérios de selecção anteriores não forem suficientes para seleccionar um candidato de sub-RHAA a aglutinar então é necessário recorrer ao último critério de selecção que é a escolha livre ( $Fc$ ). Neste caso, todos os candidatos apresentam as mesmas características e, como tal, a selecção daquele a ser aglutinado será tomada através de uma escolha aleatória.

### **2.7 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 rede.

Neste modelo, as sub-RHAAs primitivas (troços) são representadas por círculos cinzentos. A sub-RHAA de referência (reservatório(s)) é representada por um rectângulo cinzento. As restantes sub-RHAAs resultantes do processo de aglutinação são representadas por círculos brancos. Cada uma destas sub-RHAAs, têm associado o respectivo anel de RHAA com a indicação do critério de selecção que foi aplicado aquando do processo de aglutinação, Figura 3.

A leitura de um modelo hierárquico de uma RHAA deve ser feita de baixo para cima.



uma RHAA são identificados e 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 tendo início na última sub-RHAA definida no processo de aglutinação e procurando em cada anel de RHAA um possível evento de dano. À semelhança do processo de aglutinação, também o processo de desaglutinação assenta num conjunto de critérios de selecção. E estes critérios são os seguintes por ordem 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 vez de uma sub-RHAA ( $L_C$ );
- A 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 posteriormente aglutinada ( $C_L$ );
- Escolha livre ( $F_c$ ).

Quando um evento de dano de rede é identificado através deste processo é necessário verificar se a sub-RHAA em análise ou a RHAA tem capacidade de abastecer água. Caso a condição anterior 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 e é 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 3) sejam analisadas.

## **2.9 Cenários de dano da TVRHAA**

Os cenários de dano vulneráveis identificados através da aplicação da TVRHAA a uma RHAA são os seguintes:

*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 em que ocorre a perda total da RHAA, que apresente o maior valor do índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ).

*Cenário de dano de máxima vulnerabilidade:* é aquele que apresenta a maior desproporcionalidade entre perda de RHAA e esforço requerido para o efeito e, por isso, apresenta o maior valor de índice de vulnerabilidade. 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 rede.

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

## **2.10 Conclusões**

Neste capítulo foi feita uma breve descrição TVRHAA.

Os conceitos teóricos que servem de base à TVRHAA foram apresentados.

A aplicação da TVRHAA a uma RHAA consiste em três etapas que são o processo de aglutinação, a formação do modelo hierárquico e o processo de desaglutinação.

O processo de aglutinação baseia-se em cinco critérios de selecção. Estes foram apresentados e devidamente explicados.

O modelo hierárquico de uma RHAA foi explicado com recurso a um exemplo. Este modelo pretende representar a RHAA de forma gráfica e segundo uma ordem que se baseia na informação resultante do processo de aglutinação.

O processo de desaglutinação também foi resumidamente descrito e os sete critérios de selecção em que ele se baseia foram identificados e descritos.

Os vários cenários de dano identificados pela TVRHAA também foram descritos.



## **Capítulo III**

Revisão da TVRHAA



## **3 REVISÃO DA TVRHAA**

### **3.1 Objectivos**

Os objectivos deste capítulo são:

- Analisar detalhadamente os conceitos da TVRHAA;
- Analisar a aplicação dos conceitos da TVRHAA;
- Propor as alterações necessárias à TVRHAA;

### **3.2 Introdução**

Após uma análise dos conceitos da TVRHAA descritos no capítulo anterior, pode-se concluir que o processo de transição dos conceitos da teoria da vulnerabilidade estrutural, foram satisfatoriamente transpostos para o campo das RHAA.

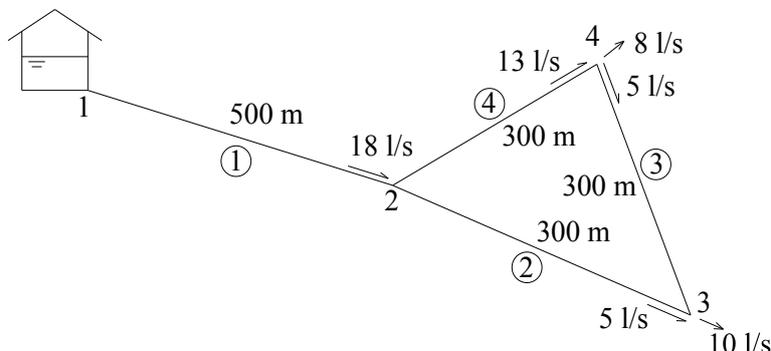
Neste capítulo vai-se proceder a um estudo detalhado das bases teóricas da TVRHAA, na medida em que se encontram algumas limitações na aplicação da TVRHAA a alguns cenários.

Para efectuar esta análise irá, numa primeira abordagem recorrer-se à aplicação da TVRHAA proposta a uma pequena RHAA exemplificativa.

### **3.3 Exemplo da aplicação da TVRHAA a uma RHAA**

De forma a exemplificar a aplicação da TVRHAA usou-se o exemplo de RHAA, muito simples, representado na Figura 5. Esta rede é formada por 4 troços, 4 nós e pelo reservatório. O material adoptado foi o policloreto de vinilo (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> e a

viscosidade considerada para a água foi de  $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . O dimensionamento da RHAA encontra-se no Anexo I. Algumas características geométricas e hidráulicas da rede estão apresentadas na Tabela 3.



**Figura 5:** RHAA para exemplificar a aplicação do processo de aglutinação

Na tabela 3 estão apresentadas todas as características geométricas e hidráulicas necessárias à aplicação da TVRHAA, em particular ao processo de aglutinação.

**Tabela 3:** Características geométricas e hidráulicas para aplicação da TVRHAA

Sub-RHAA Primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Caudal (l/s)	Diâmetro comercial (mm)	Espessura (mm)	Perda de carga (m)
1	1; 2	500	18,0	200	5,9	0,995
2	2; 3	300	5,0	110	3,2	1,054
3	3; 4	300	5,0	110	3,2	1,054
4	2; 4	300	13,0	160	4,7	0,972

### 3.3.1 Processo de Aglutinação

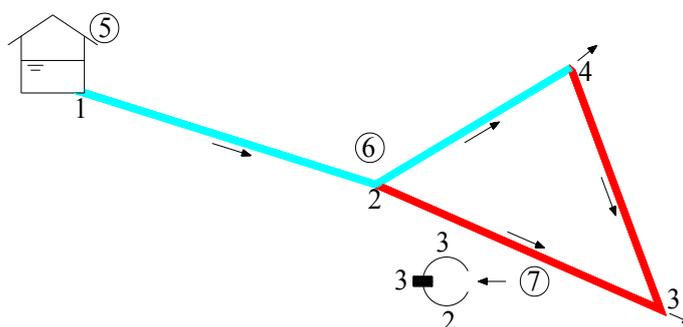
O processo de aglutinação da TVRHAA, à RHAA é apresentado seguidamente passo a passo.

No 1º passo existem cinco candidatos de sub-RHAA, a serem aglutinados entre si, que estão identificados na 1ª coluna da Tabela 4. Para cada um destes candidatos a formar uma nova sub-RHAA foram determinadas as grandezas de perda de carga total, capacidade



**Tabela 5:** 2º passo do processo da aglutinação

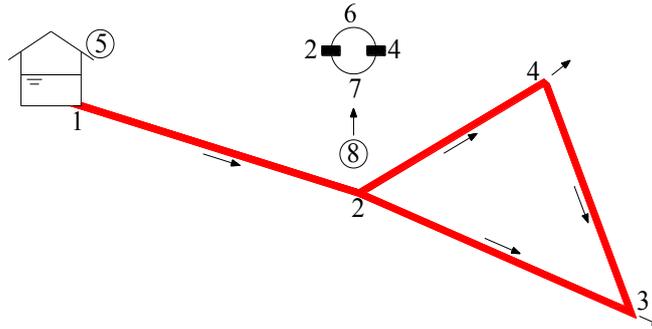
Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T^-$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 2+3	2,1080	2147,29	2	500	7
Sub-RHAA 2+6	3,0210	6964,31	3	0	
Sub-RHAA 3+6	3,0210	6964,31	3	0	

**Figura 7:** 2º passo do processo de aglutinação

Como a totalidade da RHAA deste exemplo ainda não está totalmente aglutinada então este processo continua e, de forma análoga à descrita anteriormente, sendo a sub-RHAA 6+7 o próximo candidato de sub-RHAAs a ser aglutinado de modo a formar a nova sub-RHAA 8, Tabela 6.

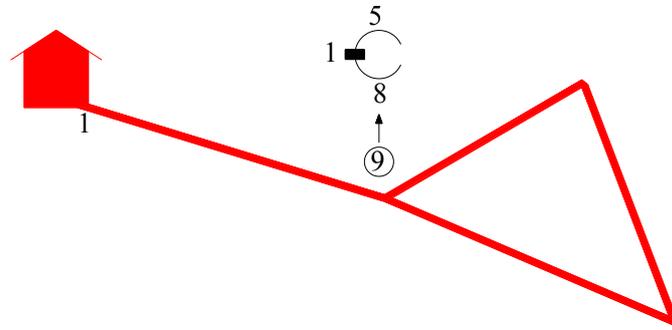
**Tabela 6:** 3º passo do processo da aglutinação

Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T^-$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 6+7	4,0750	8037,96	1	0	8



**Figura 8:** 3º passo do processo de aglutinação

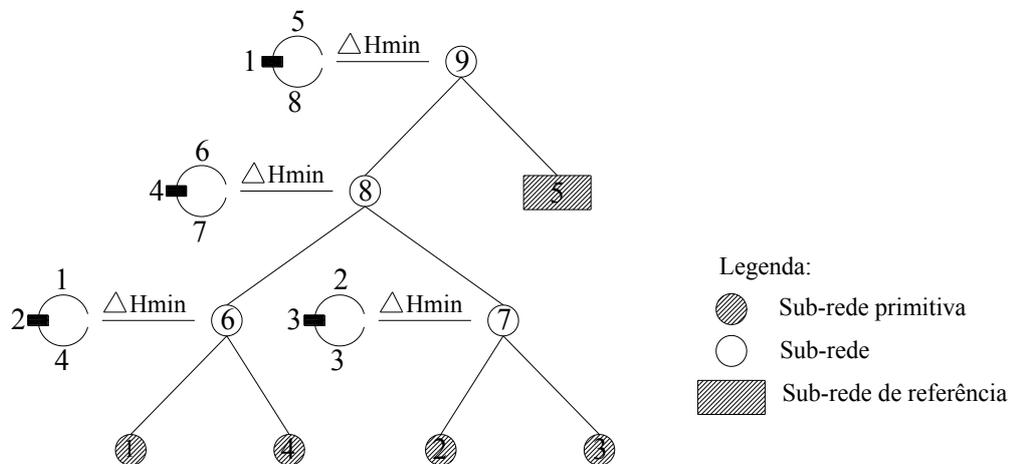
Neste caso, o último passo consiste em aglutinar a sub-RHAA 8 + sub-RHAA de referência dando origem à sub-RHAA 9 e o processo de aglutinação termina.



**Figura 9:** Aglutinação da sub-RHAA de referência

### 3.3.2 Formação do modelo hierárquico

Com base na informação obtida através do processo anterior obtém-se o modelo hierárquico da Figura 10 para a RHAA da Figura 5.



**Figura 10:** Modelo hierárquico da RHAA usada como exemplo

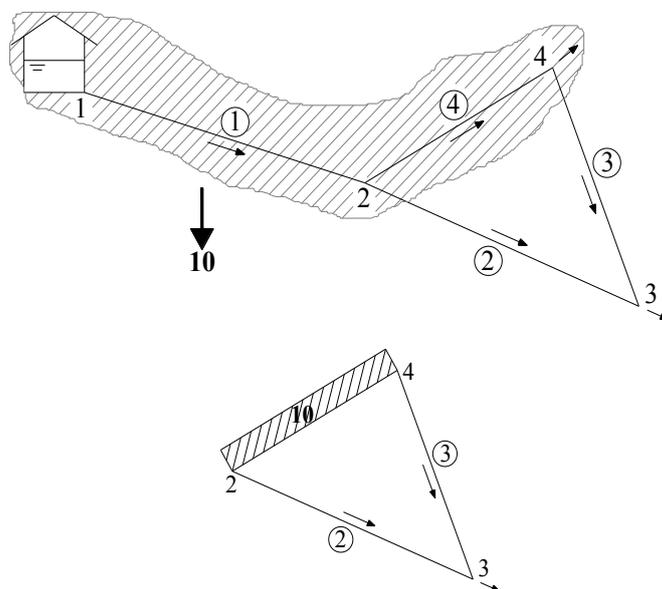


Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ), capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) e índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ). Os valores destes parâmetros são os seguintes:

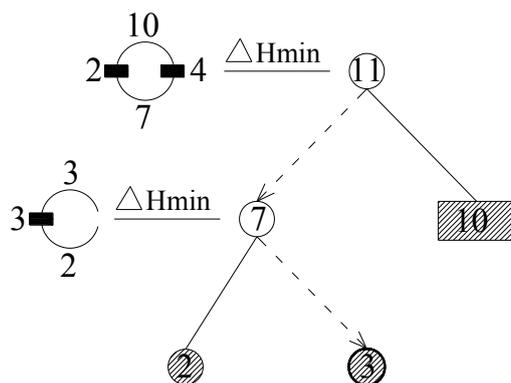
- Perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) = 1
- Capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) = 0,448
- Índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) = 2,232

As sub-RHAAs do modelo hierárquico a serem desaglutinadas seguidamente pelo processo de desaglutinação serão a 8, a 7 e a 6, Figura 10. Apenas a desaglutinação da sub-RHAA 7 poderá conduzir a um cenário de dano vulnerável diferente do identificado anteriormente, assim será a única a ser analisada

A sub-RHAA 7 é vista como sendo uma RHAA autónoma (Figura 12), logo será necessário recorrer ao processo de aglutinação desta nova RHAA. A exemplificação deste processo não será apresentada, sendo apenas apresentado o seu modelo hierárquico, Figura 13.



**Figura 12:** Sub-RHAA 7



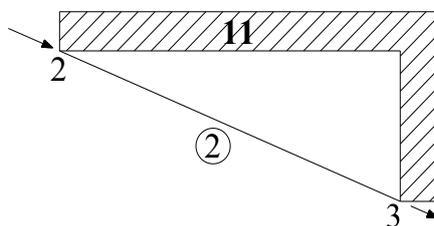
**Figura 13:** Modelo hierárquico da sub-RHAA 7

A aplicação do processo de desaglutinação à sub-RHAA 7 (Figura 12) tem início na sub-RHAA que surge no topo superior do modelo hierárquico, sub-RHAA 7 (Figura 13), 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 a selecção para haver dano é efectuada através do último critério de selecção, que é a escolha livre ( $F_c$ ) resultando em a 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 constituída pela sub-RHAA 2 e tal como ilustra a Figura 14.



**Figura 14:** Sub-RHAA 7 sem a sub-RHAA primitiva 3

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

Associado a este cenário de dano vulnerável a perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ), a capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) e o índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) foram quantificados e corresponderam aos seguintes valores:

- Perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) = 0,517
- Capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) = 0,267
- Índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) = 1,936

Após esta análise o processo de desaglutinação da RHAA usada como exemplo termina. A Tabela 7 resume a informação obtida através deste processo.

**Tabela 7:** Cenários de dano da RHAA da figura 5

	Cenário de dano	$(\gamma_r^-)$	$E_r$	$\varphi$
1	T1	1	0,448	2,232
2	T2+T3	0,517	0,267	1,936

**Nota:**  $T_i$  representa o evento de dano no troço ou na sub-RHAA primitiva  $i$ .

Os resultados apresentados na Tabela 7 revelam que o cenário de dano que apresenta maior vulnerabilidade é o primeiro porque apresenta o maior valor de  $\varphi$ . Este cenário de dano consiste em haver dano no troço 1 (T1). Caso este dano ocorra então ocorre simultaneamente a perda total da RHAA ( $\gamma_r^- = 1$ ) pois nenhum troço da RHAA será capaz de efectuar qualquer abastecimento de água. É um cenário de dano de colapso total.

O segundo cenário identificado através da TVRHAA é aquele relativo à seguinte sequência de eventos de danos, primeiro o troço 3 (T3) seguido de dano no troço 2 (T2). A ocorrência deste cenário de dano resulta na perda de cerca de 50% da RHAA porque  $\gamma_r^- = 0,517$  e este apresenta uma vulnerabilidade ligeiramente inferior à do primeiro cenário de dano.

Este resultado seria o esperado. No entanto, em RHAA's reais e muito mais complexas a aplicação da TVRHAA poderá dar informação acerca da vulnerabilidade dessas redes que

poderá ser muito útil. Por sua vez, sendo este resultado o esperado também valida em parte esta teoria.

### 3.4 Alteração da TVRHAA

#### 3.4.1 Alteração do conceito de capacidade resistente ao dano

A TVRHAA apresenta como uma das limitações considerar que os tubos de uma RHAA são do mesmo material. Este facto, não ocorre necessariamente nas RHAA reais e, por isso, pareceu adequado nesta fase contornar esta situação.

Em (Bastos, 2008), Expressão 2.2, considera-se que a capacidade resistente ao dano é directamente proporcional à área da secção transversal de um tubo e é indiferente à capacidade resistente do material desse tubo.

Analisando-se as propriedades mecânicas associadas aos tubos e apresentadas nas fichas técnicas desse material, verificou-se que a pressão nominal do tubo poderá ser uma grandeza que traduza de forma mais abrangente a capacidade resistente ao dano ( $E$ ). Deste modo propõe-se a Expressão 3.1 para o cálculo de  $E$  como alternativa à Expressão 2.2.

$$E = \sum_{j=1}^p P_j \quad (3.1)$$

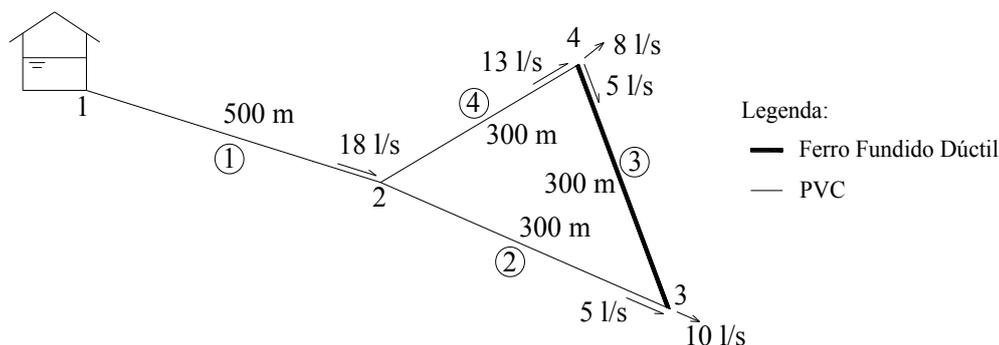
Em que:

- $E$  é a capacidade resistente ao dano;
- $P$  é a pressão nominal do tubo.

A determinação da pressão nominal é feita com bases em normas que devem constar na ficha técnica do produto fornecida pelo fabricante, e é obtida experimentalmente em laboratório e, posteriormente, homologada por um laboratório credenciado.

### 3.5 Exemplo da aplicação do processo de aglutinação com as alterações propostas

De forma a mostrar as mais valias associadas ao facto da capacidade resistente ao dano ser quantificada através da Expressão 3.1 vai-se apresentar um exemplo de aplicação da TVRHAA a uma RHAA, Figura 15, muito parecido com a RHAA da Figura 5 diferindo apenas no facto de os troços desta nova RHAA serem de materiais diferentes.



**Figura 15:** RHAA para exemplo do processo de aglutinação com as alterações propostas

Os troços 1, 2 e 4 continuam a ser em PVC e o troço 3 passam a ser de ferro fundido

Os tubos da rede de policloreto de vinilo (PVC) e ferro fundido dúctil têm um valor de rugosidade de 0,01 mm e 0,5 mm, respectivamente. O valor da viscosidade cinemática da água considerada foi  $1,01 \times 10^{-6} m^2/s$ .

O processo de dimensionamento hidráulico da RHAA encontra-se no Anexo I.

Na tabela 8 estão apresentadas todas as características geométricas e hidráulicas necessárias à aplicação da TVRHAA, em particular ao processo de aglutinação.

**Tabela 8:** Características geométricas e hidráulicas para aplicação da TVRHAA

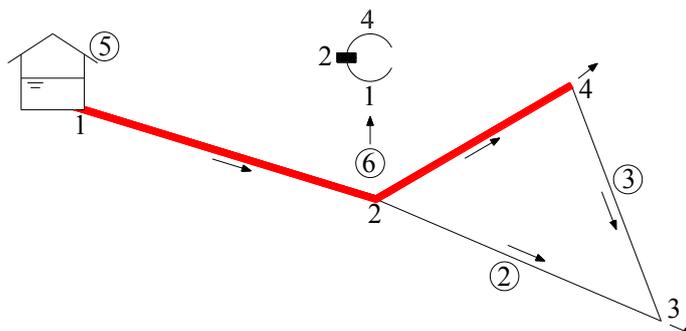
Sub-RHAA Primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Caudal (l/s)	Pressão de Nominal (kg/cm <sup>2</sup> )	Perda de carga (m)
1	1; 2	500	18,0	6	0,995
2	2; 3	300	5,0	6	1,019
3	3; 4	300	5,0	61,4	1,054
4	2; 4	300	13,0	6	0,972

O processo de aglutinação da TVRHAA, à RHAA da Figura 5 com as alterações apresentadas na Figura 15, é apresentado seguidamente.

Tal como no exemplo anterior o candidato a escolher é composto pelas sub-RHAAs primitivas 1 e 4 que originam a sub-RHAA 6.

**Tabela 9:** 1º passo do processo da aglutinação

Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T^-$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 1+2	2,014				
Sub-RHAA 1+4	1,967				6
Sub-RHAA 2+3	2,073				
Sub-RHAA 2+4	1,991				
Sub-RHAA 3+4	2,049				



**Figura 16:** 1º passo do processo de aglutinação

Após verificação dos cálculos constatou-se que todo o processo de aglutinação e desaglutinação são idênticos em ambos os exemplos apontando para os mesmos cenários de dano, devido à simplicidade da RHAA em estudo, como tal não se apresentará o restante cálculo relativo a essa etapa.

Assim sendo apresentam-se de seguida os valores relativos aos cenários de dano identificados para esta RHAA.

**Tabela 10:** Cenários de dano da RHAA da figura 5

	Cenário de dano	$(\gamma_r^-)$	$E_r$	$\varphi$
1	T1	1	<0,100	13,23
2	T2+T3	0,535	0,849	0,630

**Nota:**  $T_i$  representa o evento de dano no troço ou na sub-RHAA primitiva  $i$ .

Os resultados apresentados na Tabela 12 revelam que o cenário de dano que apresenta maior vulnerabilidade é o primeiro porque apresenta o maior valor de  $\varphi$ . Este cenário de dano consiste em haver dano no troço 1 (T1). Caso este dano ocorra então ocorre simultaneamente a perda total da RHAA ( $\gamma_r^- = 1$ ) pois nenhum troço da RHAA será capaz de efectuar qualquer abastecimento de água. É um cenário de dano de colapso total.

O segundo cenário identificado através da TVRHAA é aquele relativo à seguinte sequência de eventos de danos, primeiro o troço 3 (T3) seguido de dano no troço 2 (T2). A ocorrência deste cenário de dano resulta na perda de cerca de 50% da RHAA porque  $\gamma_r^- = 0,535$  e este apresenta uma vulnerabilidade ligeiramente muito inferior à do primeiro cenário de dano.

Relativamente à comparação dos resultados com os obtidos no exemplo anterior verificou-se uma alteração significativa tanto do valor da capacidade resistente ao dano relativa e índice de vulnerabilidade.

### **3.6 Conclusões**

Neste capítulo foram revistos todos os pressupostos da TVRHAA.

Concluiu-se que na generalidade os conceitos foram bem transpostos da teoria da vulnerabilidade estrutural do contexto das estruturas para as RHAA's.

A grande alteração proposta neste trabalho relativamente ao de Bastos (2008) prende-se com a *capacidade resistente ao dano* que passa agora a poder englobar diferentes materiais.

Apresentaram-se também, relativo ao trabalho apresentado por Bastos (2008) alterações ao grafismo do modelo hierárquico, nomeadamente em relação ao anel de RHAA para que este possa descrever de forma mais completa a aglutinação de duas sub-RHAA's.

Na etapa relativa ao processo de desaglutinação também foram apresentadas ligeiras alterações ao grafismo apresentado.

## **Capítulo IV**

Desenvolvimento do programa de cálculo automático



## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

### 4.1 Objectivos

Os objectivos deste capítulo são:

- Explicar a escolha da linguagem de programação a utilizar;
- Descrever a estrutura de funcionamento do programa de cálculo automático;
- Efectuar uma descrição do processo de desenvolvimento do programa de cálculo automático;
- Exemplificar o modo de utilização do programa;
- Identificar as limitações do programa de cálculo e apresentar uma proposta de melhoramento.

### 4.2 Introdução

Tal como foi observado no capítulo anterior, a aplicação da TVRHAA requer um procedimento iterativo, quer na fase relativa ao processo de aglutinação, quer na fase do processo de desaglutinação. A TVRHAA quando aplicada a RHAA complexas pode por isso requerer um tempo de cálculo analítico significativo.

Por este motivo o desenvolvimento de um programa de cálculo automático mostrou-se importante para tornar a TVRHAA uma ferramenta de trabalho mais expedita.

O programa de cálculo automático desenvolvido designa-se por Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (VRHAA).

No presente capítulo será descrito o processo de construção do VRHAA, nomeadamente o algoritmo, o tipo de linguagem de programação utilizada, a estrutura interna do VRHAA e o modo de utilização do VRHAA.

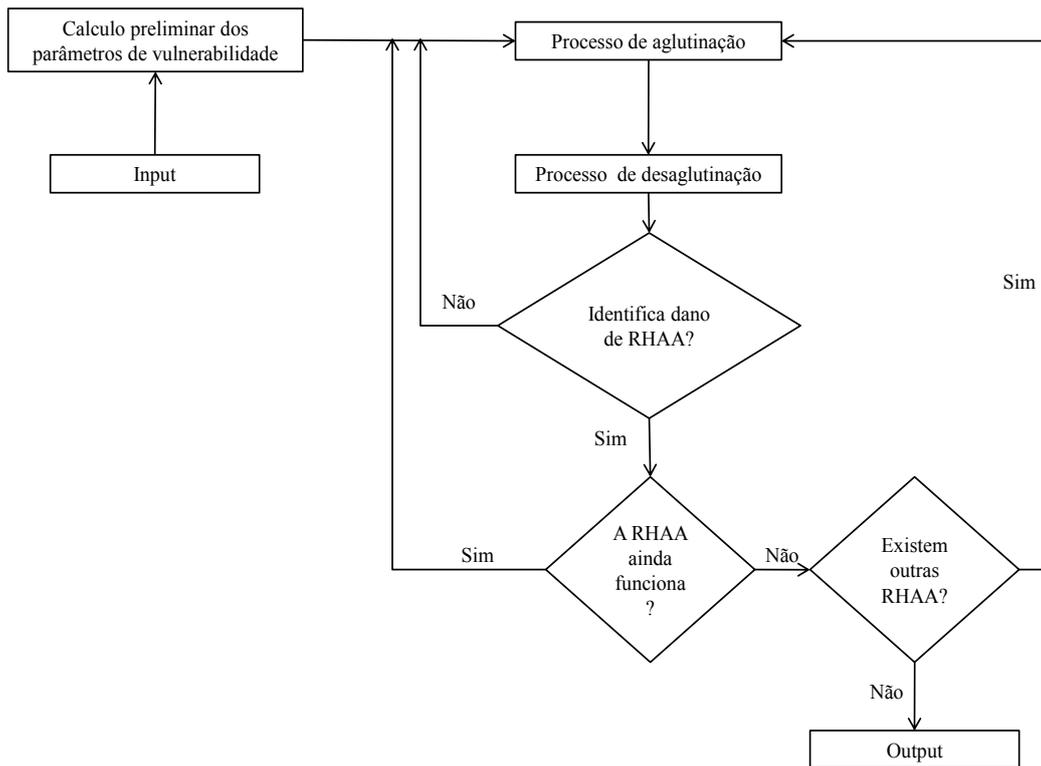
## **4.3 Algoritmo**

### **4.3.1 Descrição geral**

Na elaboração do programa de cálculo automático VRHAA houve um cuidado particular em fazê-lo da forma mais simples possível e de modo a que a sua utilização facilite em simultâneo a aprendizagem da própria TVRHAA por parte do utilizador, e porque todo o processo de cálculo automático é semelhante à metodologia analítica relativa à TVRHAA (descrita no Capítulo 2).

Nesta fase, a elaboração do VRHAA prendeu-se principalmente com o aspecto de validar a própria TVRHAA e não foi focada uma vertente comercial ou integrada na perspectiva de se relacionar com outros programas de cálculo automático relativos ao dimensionamento ou à gestão de RHAA.

Baseado na metodologia de aplicação da TVRHAA descrita no Capítulo 2, foi possível elaborar o algoritmo de base do VRHAA cujo fluxograma está apresentado na Figura 17.



**Figura 17:** Fluxograma do VRHAA

Tal como pode ser observado através da Figura 17, o algoritmo de base do programa de cálculo automático VRHAA é formado por cinco blocos. Estes blocos são introdução de dados, cálculo preliminar de parâmetros de vulnerabilidade, processo de aglutinação, processo de desaglutinação, cenários de dano.

Seguidamente, cada um destes blocos é descrito em detalhe.

#### 4.3.2 Introdução de dados (INPUT)

Os dados (INPUT) são introduzidos logo após o arranque do programa de cálculo automático VRHAA e em mais nenhuma fase do processo o utilizador necessitará de introduzir dados novos. Este apenas poderá ter de ser chamado a intervir no processo de aglutinação ou no processo de desaglutinação caso seja necessário aplicar o critério de escolha livre.

### **4.3.3 Cálculo preliminar de parâmetros de vulnerabilidade**

O bloco relativo ao cálculo preliminar de parâmetros de vulnerabilidade corresponde ao procedimento analítico que decorre após o ficheiro de dados, designado “dados\_rede.txt” ter sido criado e consiste no cálculo automático dos parâmetros de vulnerabilidade associados a cada troço e que são necessários para o processo de aglutinação. Estes parâmetros são: perda de carga total, capacidade resistente ao dano, conexão nodal e distância ao reservatório

### **4.3.4 Processo de aglutinação**

O bloco relativo ao processo de aglutinação é construído assente na metodologia descrita no Capítulo 2.

Neste processo, com o recurso aos pressupostos da TVRHAA, o programa aplica os conceitos nela expostos e realiza a processo de aglutinação. Os resultados deste processo serão guardados numa tabela criada no ficheiro designado “aglut\_res.txt”, que poderá ser acedida exteriormente para uma confirmação de resultados, é também criado um ficheiro temporário designado “aglut\_res\_0.txt” com a finalidade do VRHAA utilizar esses dados para realizar o processo de desaglutinação, (que é o bloco seguinte).

### **4.3.5 Processo de desaglutinação**

O bloco relativo ao processo de desaglutinação foi elaborado segundo os processos descritos no Capítulo 2.

Caso seja identificado algum cenário de dano, o VRHAA exporta esse dado para um outro ficheiro designado “resultados.txt”, onde ficam todos os cenários de dano armazenados numa tabela. Após a conclusão da análise de todo o modelo hierárquico da RHAA, o VRHAA vai proceder à identificação dos vários cenários de dano.

Após a análise de uma sub-RHAA do modelo hierárquico, o VRHAA passa para a seguinte sub-RHAA subjacente no modelo hierárquico e, quando necessário, a análise dessa nova sub-RHAA terá de ser processada como sendo uma RHAA independente, o que levará a que todo o processo de aglutinação tenha de ser repetido, para esta nova RHAA.

### **4.3.6 Cenário de dano (OUTPUT)**

O bloco relativo ao cenário de dano é o último bloco do algoritmo do VRHAA.

Entre os cenários de dano armazenados no ficheiro designado “resultados.txt” são identificados os cenários de dano vulneráveis, que são: cenário de dano de colapso total, cenário de dano de máxima vulnerabilidade, cenário de dano de mínima vulnerabilidade, cenário de menor esforço para haver dano e cenário de dano de interesse.

Estes vários cenários serão exportados para o ficheiro designado “cenario\_dano.txt”.

## **4.4 Estrutura do programa**

### **4.4.1 Linguagem de programação**

A linguagem de programação adoptada foi a linguagem C, por possuir diversas bibliotecas que simplificam a criação das funções indispensáveis ao funcionamento do algoritmo, e facilitar a integração do VRHAA com outros programas de cálculo automático.

A linguagem C teve o seu desenvolvimento nos laboratórios AT&T Bell Labs entre 1969 e 1973 (Wikipédia).

Presentemente a linguagem segue o descrito na norma ISO 9899:1999, que foi adoptada como padrão pela ANSI em Março de 2000 (Wikipédia).

O VRHAA foi compilado recorrendo ao gcc 4.3.

O GNU Compiler Collection (gcc) é um conjunto de compiladores de linguagens de programação. Este é um projecto de software livre distribuído pela Free Software Foundation.



```
253  /*****
254  * Minimo da perda de carga
255  *****/
256  int minimoPerdaCarga (cand_sub_rede *c, int size){
257
258      float min;
259      int pos;
260      int i;
261
262      min = c[0].perda_carga_total;
263
264      for(i=1 ; i<size; i++){
265          if(c[i].perda_carga_total < min){
266              min = c[i].perda_carga_total;
267              pos = i;
268          }
269      }
270
271      if (min == c[0].perda_carga_total){
272          pos = 0;
273      }
274
275      for( i = 0; i < size; i++){
276          if ( min == c[i].perda_carga_total && pos != i){
277              pos = -1;
278          }
279      }
280
281      return (pos);
282  }
```

**Figura 19:** Função mínimo da perda de carga

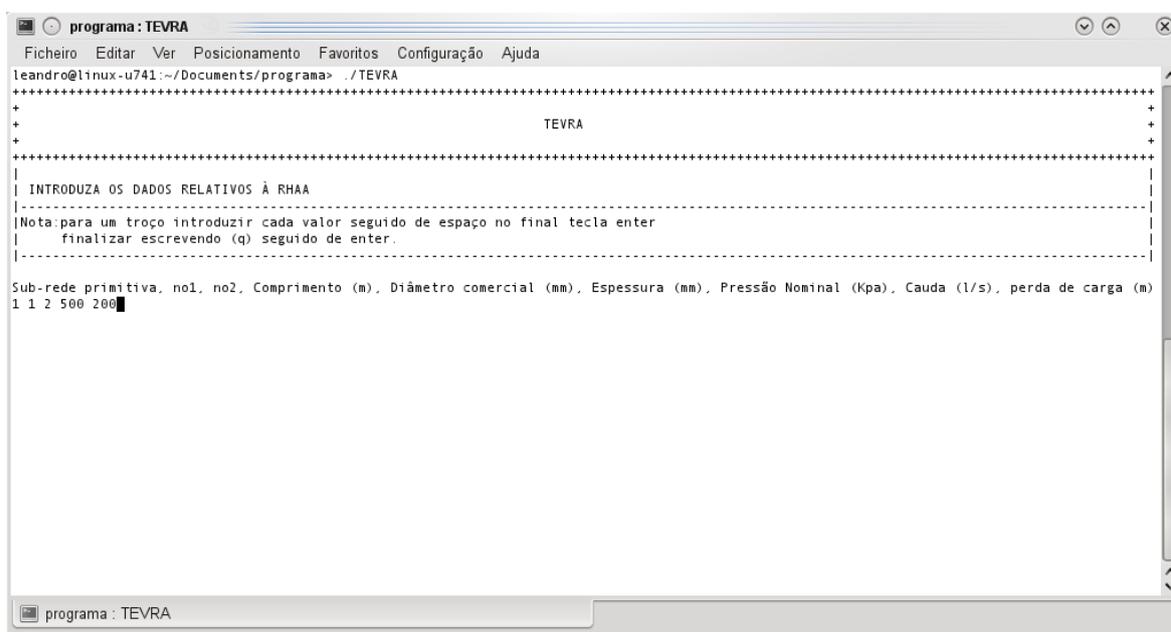
Criou-se um ficheiro “aglut.c” com a função do processo de aglutinação, um ficheiro “desag.c” onde está a função do processo de desaglutinação. Entre outros ficheiros menores, de salientar que após a compilação, nenhum destes ficheiros estará disponível ao utilizador, tendo este apenas acesso ao ficheiro executável. Como exemplo, pode-se referir a modificação efectuada no conceito de capacidade resistente ao dano, em que após a verificação deste se chegou à conclusão que seria conveniente alterar a Expressão 2.2, pela Expressão 3.1. A forma como o VRHAA foi estruturado permitiu efectuar essa alteração de uma forma simples porque bastou aceder ao ficheiro “aglut.c”, onde estava definida esta função, para proceder à modificação da respectiva linha de código.

## 4.5 Utilização do VRHAA

### 4.5.1 Introdução de dados do VRHAA

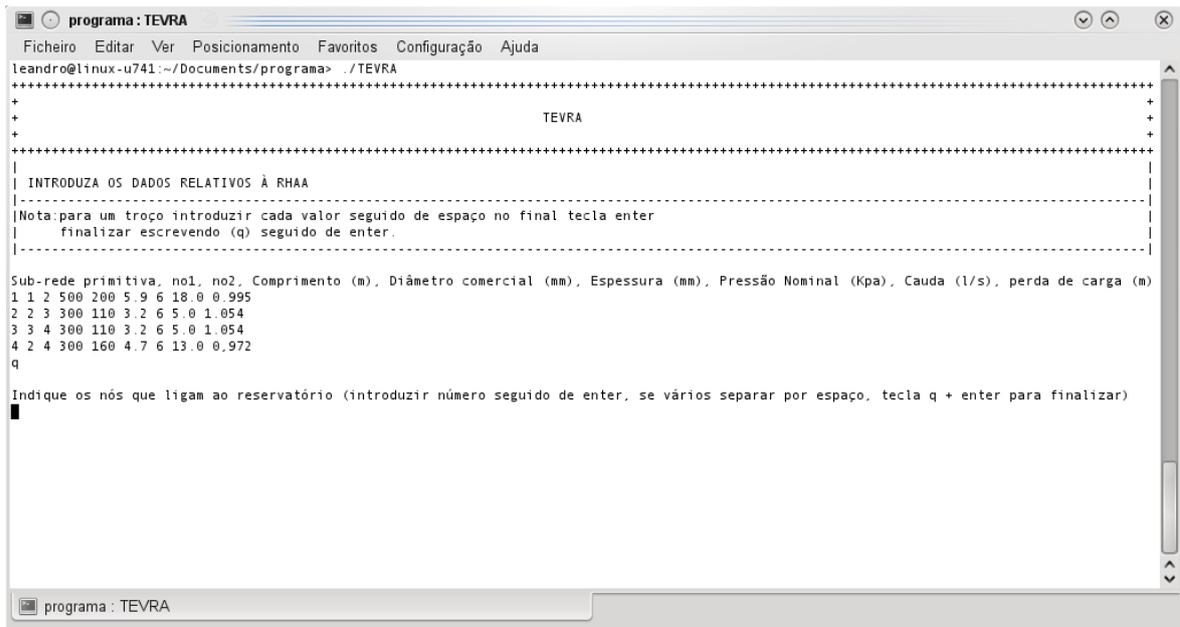
Após o início do programa de cálculo VRHAA, o utilizador pode introduzir os dados que pretende, conforme é possível observar na Figura 19.

A informação de como deverão ser introduzidos os dados está descrita na nota presente na janela do ambiente de trabalho do VRHAA.



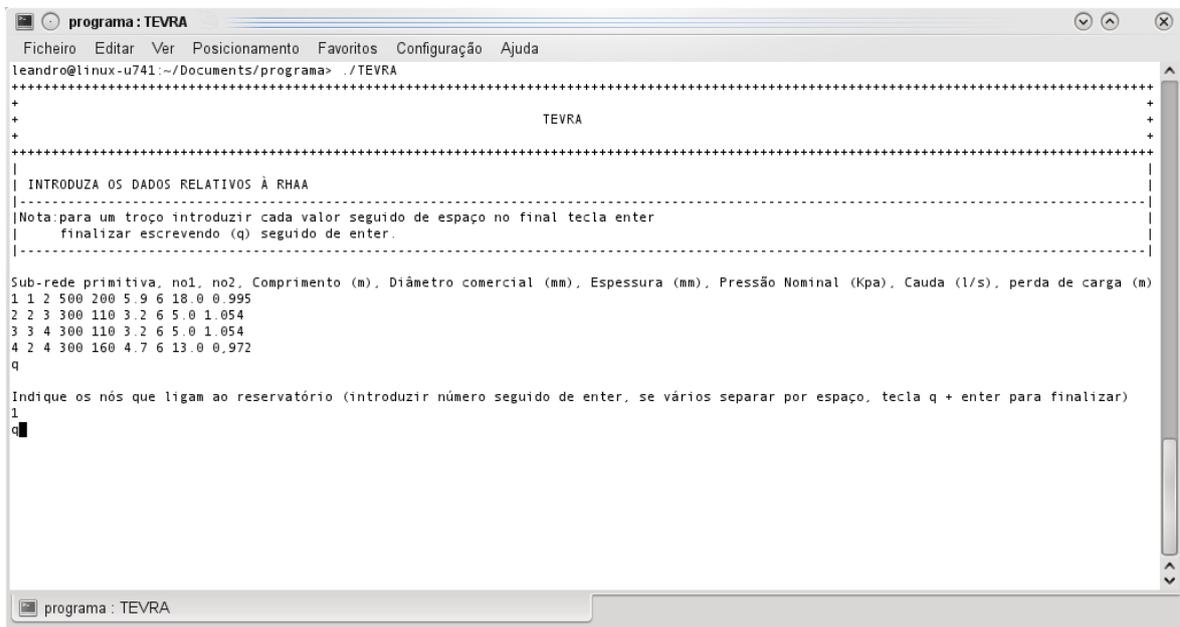
**Figura 20:** Introdução de dados

A finalização da introdução de dados acontece quando o utilizador escrever a letra “q”, Figura 20.



**Figura 21:** VRHAA - finalização da introdução de dados

Após esta etapa, o utilizador tem que indicar os nós da RHAA que ligam aos reservatórios, Figura 21.



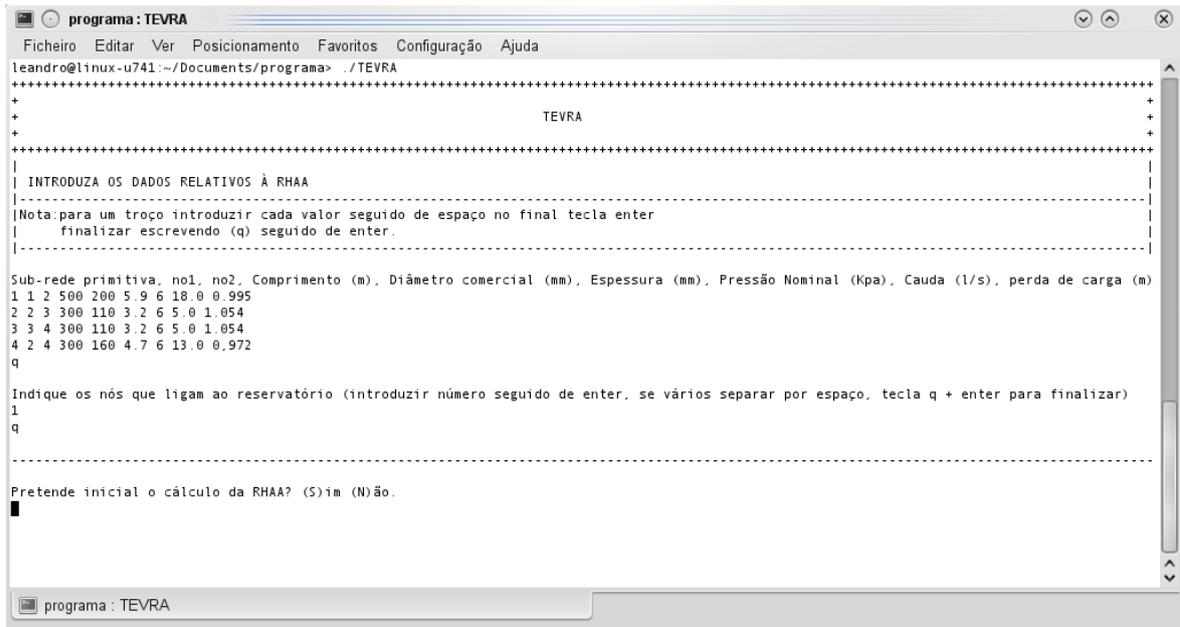
**Figura 22:** VRHAA – Indicação dos nós da RHAA que ligam aos reservatórios

#### 4.5.2 Processo de cálculo do VRHAA

Nesta fase o utilizador não terá nenhuma influência no processo de cálculo pois este é processado automaticamente pelo VRHAA. Apenas será necessária a indicação pelo

utilizador da sub-RHAA a aglutinar, quando o critério de selecção de escolha livre do processo de aglutinação for aplicado, ou a indicação da sub-RHAA a ser desaglutinada, se a RHAA primitiva a sofrer dano durante o processo de desaglutinação e quando o critério de escolha livre for aplicado.

A indicação do início do processo de cálculo está ilustrada na Figura 23.



```
programa : TEVRA
Ficheiro  Editar  Ver  Posicionamento  Favoritos  Configuração  Ajuda
leandro@linux-u741:~/Documents/programa> ./TEVRA
+-----+
+                                     TEVRA
+-----+
| INTRODUZA OS DADOS RELATIVOS À RHAA
|-----|
| Nota: para um troço introduzir cada valor seguido de espaço no final tecla enter
|       finalizar escrevendo (q) seguido de enter.
|-----|
|
| Sub-rede primitiva, no1, no2, Comprimento (m), Diâmetro comercial (mm), Espessura (mm), Pressão Nominal (Kpa), Cauda (l/s), perda de carga (m)
| 1 1 2 500 200 5.9 6 18.0 0.995
| 2 2 3 300 110 3.2 6 5.0 1.054
| 3 3 4 300 110 3.2 6 5.0 1.054
| 4 2 4 300 160 4.7 6 13.0 0.972
| q
|
| Indique os nós que ligam ao reservatório (introduzir número seguido de enter, se vários separar por espaço, tecla q + enter para finalizar)
| 1
| q
|-----|
| Pretende inicial o cálculo da RHAA? (S)im (N)ão.
|
|
```

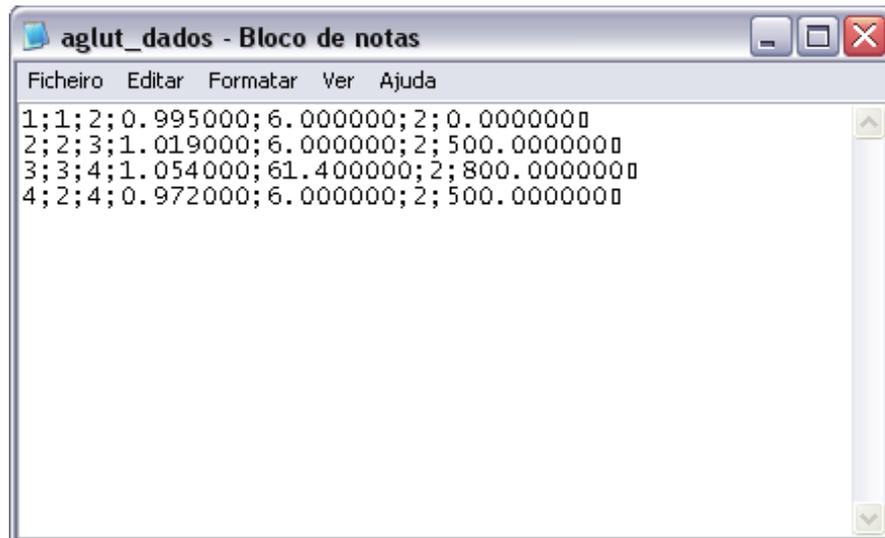
**Figura 23:** VRHAA - Início do cálculo

Caso seja necessário efectuar alguma alteração de dados terá que se repetir todo o processo de utilização do VRHAA, que na prática consiste em introduzir todos os dados novamente introduzindo os corrigidos.

O tempo médio para a aplicação de TVRHAA a uma RHAA simples, de aproximadamente 10 troços, requerida pelo programa de cálculo automático VRHAA é de 5 minutos, na sua maioria dispendidos na introdução dos dados.

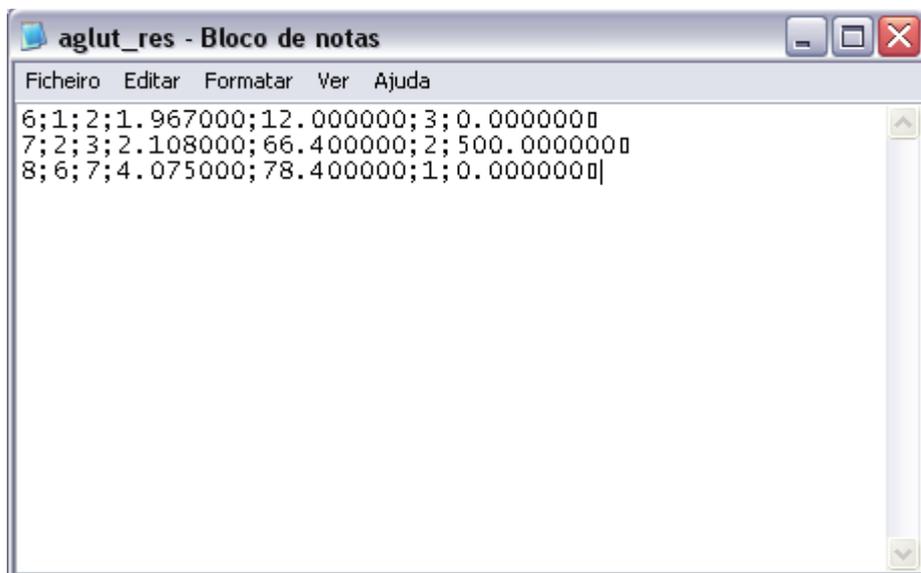
É claro que este tempo de aplicação é função da dimensão da RHAA em análise (número de troços; número de ligações; se a RHAA é ramificada, emalhada ou mista) e da capacidade do computador.





**Figura 25:** Ficheiro aglut\_dados.txt

O ficheiro “aglut\_res.txt”, apresentado, Figura 26, terá os resultados obtidos aquando da aplicação do processo de aglutinação à RHAA. Estes resultados são fundamentais para a criação do modelo hierárquico e para a aplicação do processo de desaglutinação. Estes resultados são a nova sub-RHAA que se forma, sub-RHAA que o constituem, nós de ligação, perda de carga total, capacidade resistente ao dano, conexão nodal, distância ao reservatório, critério utilizado.



**Figura 26:** Ficheiro aglut\_res.txt

O ficheiro “resultado.txt” refere-se aos cenários de dano identificados durante a aplicação do processo de desaglutinação à RHAA. Também estarão identificados os parâmetros de vulnerabilidade associados a cada um desses cenários de dano, que são  $E_r$ ,  $\gamma_r^-$ ,  $\varphi$ . Os cenários de dano vulneráveis, cenário de dano de colapso total, cenário de dano de máxima vulnerabilidade, cenário de dano de mínima vulnerabilidade e cenário de menor esforço para haver dano da RHAA, também estão identificados neste ficheiro.



**Figura 27:** Ficheiro de resultado.txt

Estes três ficheiros não devem ser utilizados pelo utilizador final, os resultados tratados estarão disponíveis no ficheiro com o nome “resultados\_finais.xls”.

Estes ficheiros estão apresentados na mesma directoria onde o VRHAA foi instalado pelo utilizador. Deverá ser necessário o utilizador copiar os respectivos ficheiros para outra directoria à sua escolha após o fim de todo o processo.

## 4.6 Limitações do VRHAA

As principais limitações do programa de cálculo automático são: não permitir a correcção de algum dos dados relativos à RHAA de uma forma simples após o início do processo de cálculo o utilizador não tem forma de o parar a não ser esperando que este termine a não

apresentação do modelo hierárquico de uma forma gráfica, e a utilização obrigar a recorrer à linha de comandos.

#### **4.7 Conclusões**

O programa de cálculo automático designado por Vulnerabilidade de redes hidráulicas de abastecimento de água (VRHAA) foi apresentado neste capítulo. A utilização deste programa agiliza a aplicação da TVRHAA, pois requer um reduzido período de tempo de procedimento de cálculo.

Optou-se pela linguagem de programação C para a elaboração do programa de cálculo automático VRHAA, por ser simultaneamente simples e versátil, quer em termos de futuros melhoramentos do VRHAA, quer em termos da necessidade de o utilizador interagir com outros programas de cálculo automático.

A estrutura do VRHAA foi descrita em detalhe, indicando-se as funções que foram criadas.

A descrição da utilização do VRHAA também foi detalhadamente apresentada em pormenor e complementada com figuras do ambiente de trabalho associadas a cada uma das etapas dessa utilização.

## **Capítulo V**

Validação do programa de cálculo automático VRHAA



## **5 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO VRHAA**

### **5.1 Objectivos**

Os objectivos deste capítulo são:

- Validar a TVRHAA através da análise de resultados obtidos através da TVRHAA a casos simples de RHAA;
- Validar o programa de cálculo automático VRHAA através da comparação de resultados numéricos e analíticos;

### **5.2 Introdução**

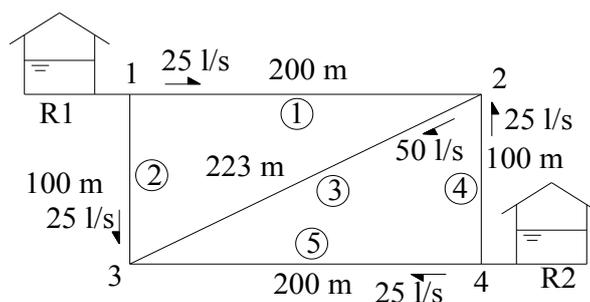
Após o desenvolvimento do programa de cálculo automático VRHAA foi necessário proceder à sua validação. Deste modo, neste capítulo será apresentado um exemplo de uma RHAA que terá sempre a mesma geometria, variando apenas o sentido do escoamento nos troços, e o número de reservatórios. Os detalhes do dimensionamento hidráulico desta RHAA encontram-se em anexo (Anexo II).

### **5.3 Exemplo 1**

A RHAA deste exemplo encontra-se representada na Figura 28.

Esta RHAA é formada por 5 troços e é abastecida por 2 reservatórios (R1 e R2).

Trata-se de uma RHAA emalhada.



**Figura 28:** RHAA do exemplo 1

A referida RHAA é toda ela constituída por tubos de PVC, com uma pressão de serviço de  $6 \text{ kg/cm}^2$ . O dimensionamento desta RHAA encontra-se descrito em pormenor no anexo II.

Na tabela 11 indicam-se alguns dados relevantes à RHAA tal como a indicação dos nós por troço, o comprimento de cada troço, assim como a perda de carga. Esta última grandeza resulta do dimensionamento hidráulico da referida RHAA.

**Tabela 11:** Características geométricas e hidráulicas da RHAA do exemplo 1

Sub-RHAA Primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Perda de carga (m)
1	1; 2	200	0,81
2	1; 3	100	0,41
3	2; 3	223	0,35
4	2; 4	100	0,41
5	3; 4	200	0,81

O processo de dimensionamento hidráulico da RHAA, é sempre realizado recorrendo a um cálculo manual ou através de folha de cálculo, ou com recurso a um programa de cálculo automático que realize o dimensionamento da rede. No contexto deste trabalho o dimensionamento hidráulico foi sempre realizado com o recurso a uma folha de cálculo.

### 5.3.1 Processo de Aglutinação

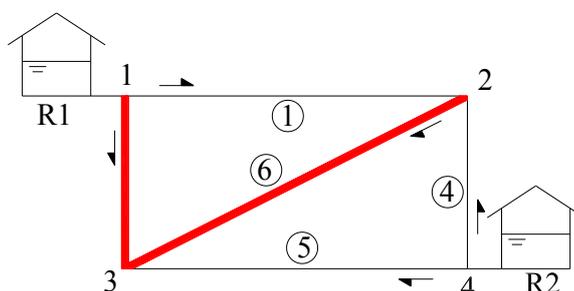
Processo de aglutinação da RHAA da Figura 28.

**Tabela 12:** 1º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 25

Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 1+2	1,22	12	3	0	
Sub-RHAA 1+3	1,16	12	3	0	
Sub-RHAA 1+4	1,22	12	3	0	
Sub-RHAA 2+3	0,76	12	3	0	6
Sub-RHAA 2+5	1,22	12	3	0	
Sub-RHAA 3+4	0,76	12	3	0	
Sub-RHAA 3+5	1,16	12	3	0	
Sub-RHAA 4+5	1,22	12	3	0	

Os resultados da Tabela 12 indicam que a primeira sub-RHAA a formar-se é a relativa à aglutinação dos troços 2 e 3 segundo o critério da escolha livre já que o cenário composto pela aglutinação dos troços 3 e 4 também poderia ser escolhido, porque ambos apresentam as mesmas características, ao longo de todos os critérios de selecção.

A Figura 29 mostra precisamente esta nova sub-RHAA 6. O critério de aglutinação usado foi o da escolha livre.



**Figura 29:** 1º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

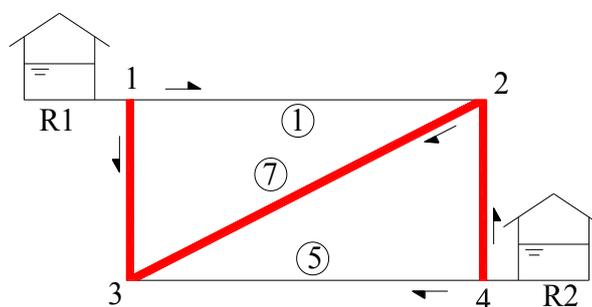
Depois de se ter formado a sub-RHAA 6 dá-se início ao 2º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28, Tabela 13.

**Tabela 13:** 2º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T^-$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 1+4	1,22	12	3	0	
Sub-RHAA 1+6	1,57	18	2	0	
Sub-RHAA 4+5	1,22	12	3	0	
Sub-RHAA 4+6	1,17	18	4	0	7
Sub-RHAA 5+6	1,57	18	2	0	

Os resultados da Tabela 13 indicam que a segunda sub-RHAA a formar-se é a relativa à aglutinação do troço 4 e da sub-RHAA 6.

A Figura 30 mostra precisamente esta nova sub-RHAA 7. O critério de aglutinação usado foi o da menor perda de carga.

**Figura 30:** 2º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

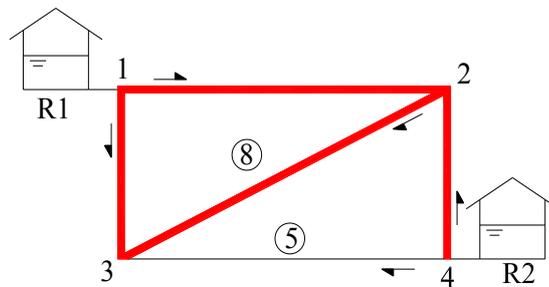
Depois de se ter formado a sub-RHAA 7 dá-se início ao 3º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28, Tabela 14.

**Tabela 14:** 3º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T^-$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 1+7	1,98	24	2	0	8
Sub-RHAA 5+7	1,98	24	2	0	

Os resultados da Tabela 14 indicam que a terceira sub-RHAA a formar-se é a relativa à aglutinação do troço 1 e da sub-RHAA 7.

A Figura 30 mostra precisamente esta nova sub-RHAA 7. O critério de aglutinação usado foi o da escolha livre.



**Figura 31:** 3º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

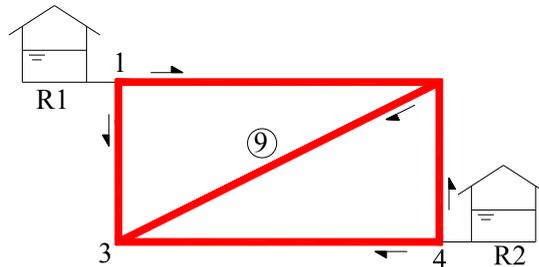
Depois de se ter formado a sub-RHAA 8 dá-se início ao 4º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28, Tabela 15.

**Tabela 15:** 4º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

Candidatos de sub-RHAAs	Perda de carga total ( $\Delta H_T^-$ )	Capacidade resistente ao dano ( $E$ )	Conexão nodal ( $\eta$ )	Distância ao reservatório ( $Dis$ )	Sub-RHAA que se forma
Sub-RHAA 5+8	2,79	30	0	0	9

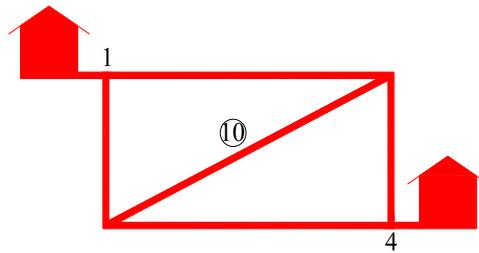
Os resultados da Tabela 15 indicam que a quarta sub-RHAA a formar-se é a relativa à aglutinação do troço 5 e da sub-RHAA 8.

A Figura 30 mostra precisamente esta nova sub-RHAA 8. O critério de aglutinação usado foi o da menor perda de carga.



**Figura 32:** 4º passo do processo de aglutinação da RHAA da Figura 28

No passo seguinte será aglutinada a sub-RHAA de referência, por uma questão de simplificação, e já que se assume que esta nunca sofre dano, as duas sub-RHAAs de referência R1 e R2 são consideradas apenas uma só, a que se dá o nome “R”. Em todos os exemplos em que ocorra esta situação o procedimento será idêntico.

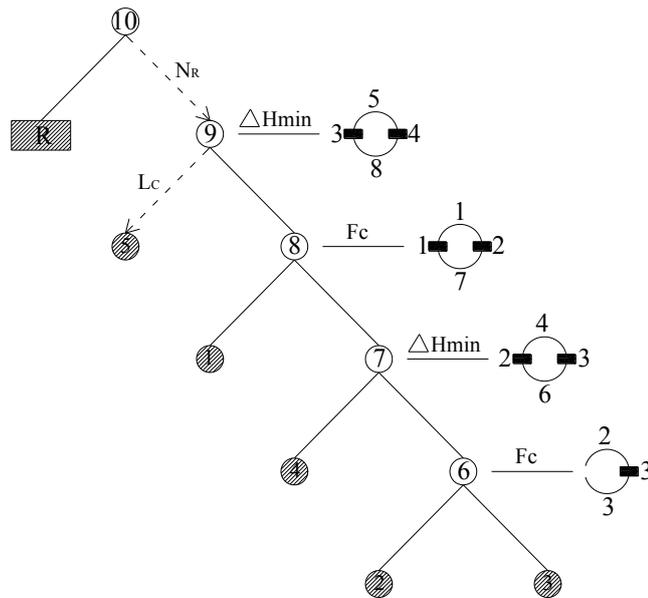


**Figura 33:** Aglutinação da sub-RHAA de referência

### 5.3.2 Modelo hierárquico

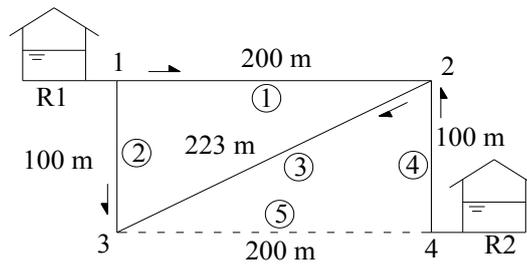
Após o processo de aglutinação estão reunidas todas as informações necessárias para a formação do modelo hierárquico (Figura 34) da respectiva RHAA da Figura 28.





**Figura 35:** Análise da sub-RHAA 10

- Assim tem de se analisar a RHHA da Figura 28 sem o troço 5, Figura 36.

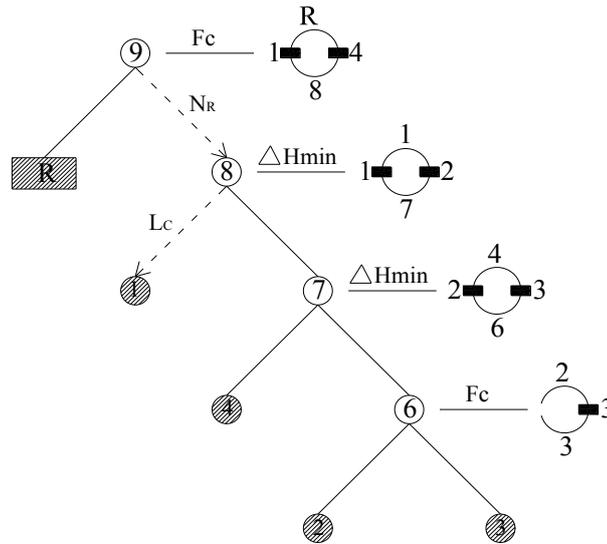


**Figura 36:** RHHA da Figura 28 sem o troço 5

Após a realização de um novo processo de aglutinação relativo à nova RHAA (Figura 36) é possível definir o modelo hierárquico desta nova RHHA (Figura 37).

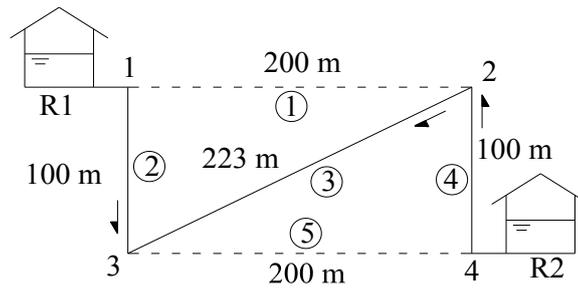
Por simplificação, não é apresentado o desenvolvimento do processo de aglutinação da nova RHAA (Figura 36).





**Figura 38:** Análise da sub-RHAA 9

- Assim tem de se analisar a RHHA da Figura 28 sem os troços 1 e 5.

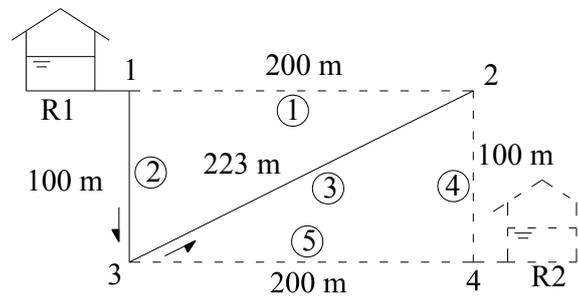


**Figura 39:** RHHA da Figura 25 sem os troços 1 e 5

Após novo processo de aglutinação o modelo hierárquico desta sub-RHHA (Figura 40) é o seguinte.

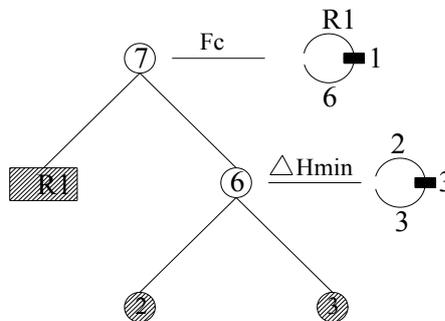


- Como o a RHHA ainda cumpre a sua função o processo de desaglutinação da sub-RHAA 10 inicial tem de prosseguir.



**Figura 42:** RHHA da Figura 25 sem os troços 1, 4 e 5

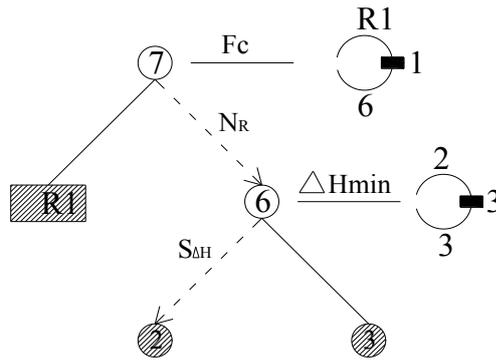
Obtêm-se o seguinte modelo hierárquico.



**Figura 43:** Modelo hierárquico da RHAA da Figura 28 sem os troços 1 e 5

O processo de desaglutinação da RHAA da Figura 42, RHAA da Figura 28 sem o troço 1, 4 e 5, tem o desenvolvimento seguinte:

- Começa-se por se seleccionar a sub-RHAA 7 já que esta que se encontra no topo do modelo;
- Como a sub-RHAA R é o reservatório selecciona-se a sub-RHAA 6 para ser desaglutinada e por isso o critério usado foi  $N_R$ ;
- A sub-RHAA 6 é constituída pelas sub-RHAAs 2 e 3. Como a sub-RHAA 2 apresenta maior perda de carga é seleccionada ( $S_{\Delta H}$ );



**Figura 44:** Análise da sub-RHAA 7

- Como a RHHA não cumpre a sua função de abastecimento de água o processo de desaglutinação da sub-RHAA 10 termina aqui.

Assim o primeiro cenário de dano vulnerável é identificado e que consiste em danificar os seguintes troços por ordem  $T2 \rightarrow T4 \rightarrow T1 \rightarrow T5$ .

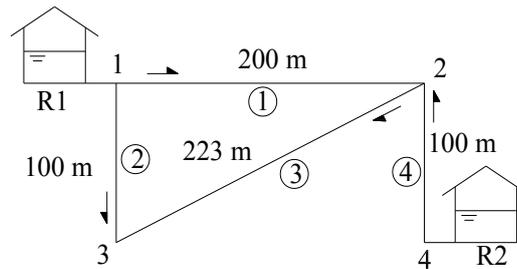
Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de vulnerabilidade de perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ), de capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) e o índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ). Os valores destes parâmetros são os seguintes:

- Perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) = 1
- Capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) = 0,8
- Índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) = 1,2

Prossegue-se então com o processo de desaglutinação do modelo hierárquico da RHAA inicial.

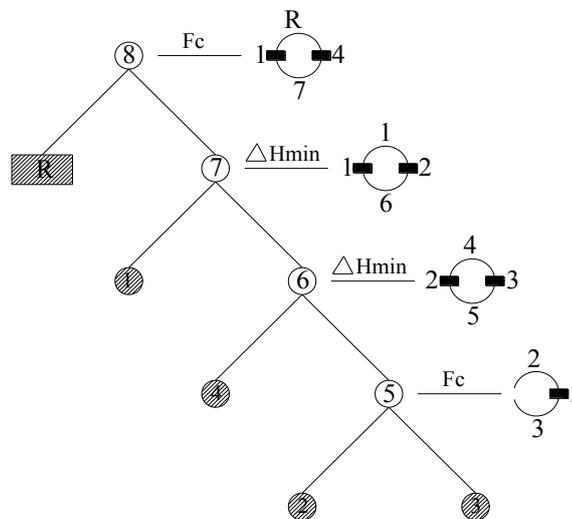
Focando agora a análise na sub-RHHA 9 verifica-se que os resultados obtidos não irão diferir em nada dos resultados obtidos através da desaglutinação da sub-RHHA 10, logo passa-se à análise da sub-RHAA 8.

A sub-RHAA 8 é relativa à RHAA ilustrada na Figura 45.



**Figura 45:** Sub-RHAA 8

Obtêm-se o seguinte modelo hierárquico.



**Figura 46:** Modelo hierárquico da Sub-RHAA

O processo de desaglutinação da RHAA da Figura 45, sub-RHAA 8, tem o desenvolvimento seguinte:

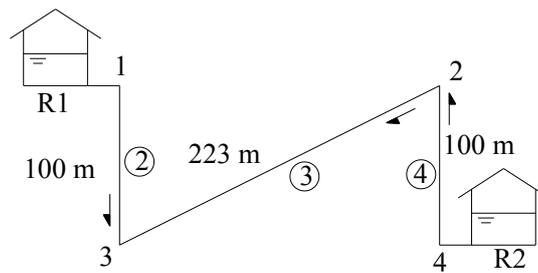
- Começa-se por se seleccionar a sub-RHAA 8 já que esta que se encontra no topo do modelo;
- Como a sub-RHAA R é o reservatório selecciona-se a sub-RHAA 7 para ser desaglutinada e por isso o critério usado foi  $N_R$ ;
- A sub-RHAA 7 é constituída pelas sub-RHAAs 1 e 6. Como a sub-RHAA 6 é uma sub-RHAA primitiva (troço) é a seleccionada ( $L_C$ );
- Como a RHHA ainda cumpre a sua função de abastecimento o processo de desaglutinação da sub-RHAA 8 continua.

A partir deste ponto a análise desta sub-RHAA conduzirá aos mesmos resultados da análise efectuada à sub-RHAA 10, logo está identificado o segundo cenário de dano vulnerável que é  $T2 \rightarrow T4 \rightarrow T1$ .

Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de vulnerabilidade de perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ), de capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) e o índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ). Os valores destes parâmetros são os seguintes:

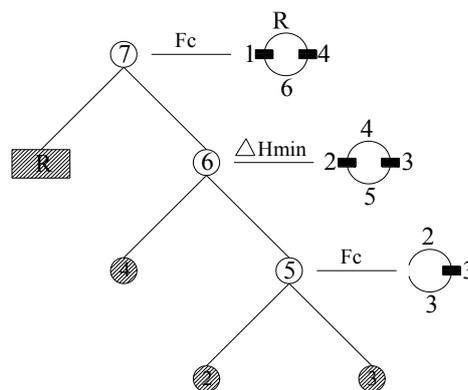
- Perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) = 0,71
- Capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) = 0,6
- Índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) = 1,8

A análise continua então passando à sub-RHAA 7



**Figura 47:** Sub-RHAA 7

Obtêm-se o seguinte modelo hierárquico



**Figura 48:** Sub-RHAA 7

O cenário identificado para esta sub-RHAA é  $T2 \rightarrow T4$ .

Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de vulnerabilidade de perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ), de capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) e o índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ). Os valores destes parâmetros são os seguintes:

- Perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) = 0,42
- Capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) = 0,4
- Índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) = 1,05

O processo de desaglutinação continua com a análise da sub-RHAA 6

Após análise o cenário de dano identificado é haver dano do troço 2, T2.

Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de vulnerabilidade de perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ), de capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) e o índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ). Os valores destes parâmetros são os seguintes:

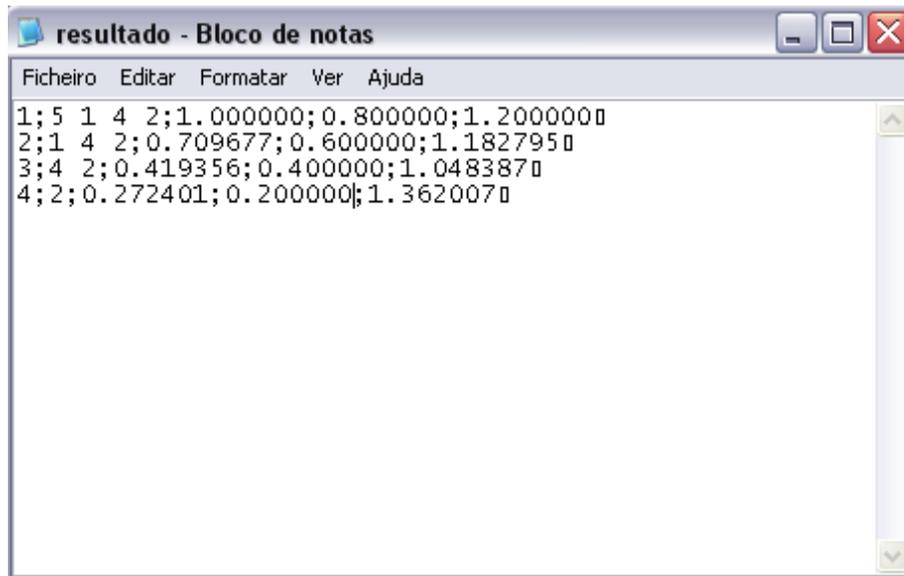
- Perda de RHAA ( $\gamma_r^-$ ) = 0,27
- Capacidade resistente ao dano relativa ( $E_r$ ) = 0,2
- Índice de vulnerabilidade ( $\varphi$ ) = 1,36

Sendo assim foram identificados os cenários de dano vulneráveis relativos a esta RHAA e que serão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16:** Cenários de dano da RHAA da figura 25

	Cenário de dano	( $\gamma_r^-$ )	$E_r$	$\varphi$
1	T2	0,27	0,20	1,36
2	T2 → T4	0,42	0,40	1,05
3	T1 → T2 → T4	0,71	0,60	1,18
4	T1 → T2 → T4 → T5	1	0,80	1,20

Estes resultados foram confirmados recorrendo ao programa de cálculo automático VRHAA.



**Figura 49:** Resultados obtidos com o VRHAA para a rede do Exemplo 1

O cenário de colapso total ( $\gamma_r^- = 1$ ) corresponde ao cenário de dano vulnerável nº 4,  $T1 \rightarrow T2 \rightarrow T4 \rightarrow T5$ .

Não foi detectado mais nenhum cenário de dano vulnerável que resultasse na total perda da RHAA.

A RHAA do Exemplo 1, Figura 28, sem os troços 1, 2, 4 e 5 é incapaz de abastecer qualquer ponto.

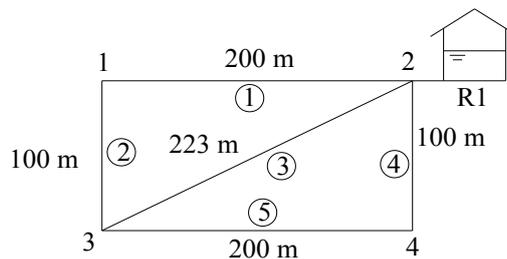
O cenário de máxima vulnerabilidade é o cenário de dano vulnerável nº1 e que corresponde a provocar dano no troço 2 (T2). Este facto é justificado por ser o cenário de dano que apresenta o maior valor de  $\varphi$ . Face à simetria geométrica e hidráulica desta RHAA, o cenário de dano vulnerável T4 (provocar dano no troço 4) também será o cenário de máxima vulnerabilidade. Este resultado é muito interessante porque é em certa parte inesperado, ao contrario do resultado obtido para o cenário de colapso total.

De acordo com a TVRHAA a zona da RHAA associada ao troço 2 ou ao troço 4 é a mais vulnerável e, como tal este resultado, pode ser útil para se repensar essas zonas, que no contexto de projecto, quer no contexto de manutenção/gestão da RHAA.

## 5.4 Exemplo 2

A RHAA do Exemplo 2, não difere em termos de geometria da RHAA usada no Exemplo 1. As únicas diferenças são nesta RHAA apenas existir um reservatório (R1) e que o sentido do escoamento em alguns troços altera. O dimensionamento hidráulico desta nova RHAA resultou nos mesmos diâmetros, pelo que não é apresentado de forma a simplificar.

Esta RHAA está apresentada na Figura 50

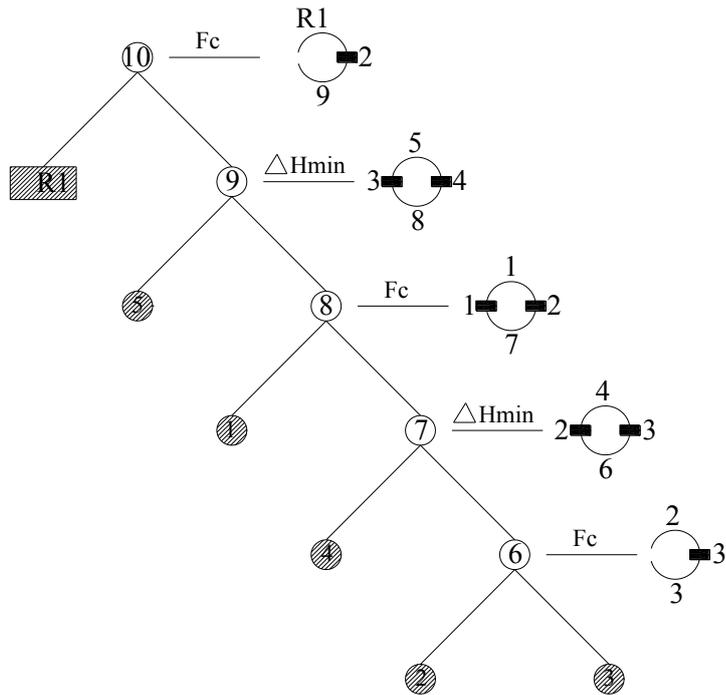


**Figura 50:** RHAA do Exemplo 2

Dado que esta RHAA apresenta as mesmas características geométricas e hidráulicas às da RHAA da Figura 28 verificou-se que o processo de aglutinação conduzia ao mesmo resultado.

### 5.4.1 Modelo hierárquico

Também o modelo hierárquico após a realização do processo de aglutinação à RHAA da Figura 50 se verificou ser muito idêntico ao modelo hierárquico obtido para a RHAA do Exemplo 1, Figura 51.

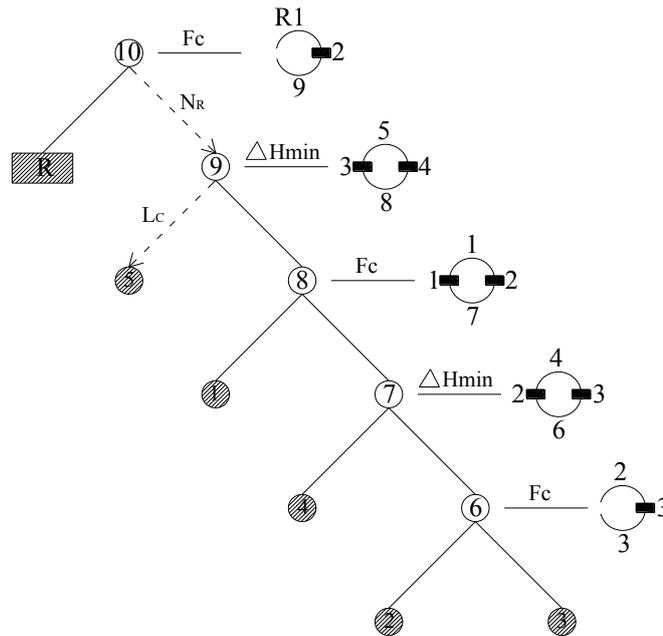


**Figura 51:** Modelo hierárquico da RHAA da Figura 49

#### 5.4.2 Processo de desaglutinação

O processo de desaglutinação da RHAA do Exemplo 2, Figura 50, tem o desenvolvimento seguinte:

- Começa-se por se seleccionar a sub-RHAA 10 já que esta que se encontra no topo do modelo;
- Como a sub-RHAA R é o reservatório selecciona-se a sub-RHAA 9 para ser desaglutinada e por isso o critério usado foi  $N_R$ ;
- A sub-RHAA 9 é constituída pelas sub-RHAAs 5 e 8. Como a sub-RHAA 5 é uma sub-RHAA primitiva (troço) é a seleccionada ( $L_C$ );



**Figura 52:** Análise das sub-RHAAs 10, 9 e 8

- Como o a RHHA ainda cumpre a sua função o processo de desaglutinação da sub-RHAA 10 tem de prosseguir.

Como este processo se iria tornar muito repetitivo não serão aqui apresentados os restantes passos relativos ao processo de desaglutinação, e apenas será apresentada a tabela com os resultados finais relativos aos vários cenários de dano vulneráveis identificados, e também confirmados com o programa VRHAA.

**Tabela 17:** Cenários de dano da RHAA da Figura 50

	Cenário de dano	$(\gamma_r^-)$	$E_r$	$\varphi$
1	T3	0,56	0,20	2,81
2	T3 → T4	0,71	0,40	1,77
3	T3 → T4 → T1	1,00	0,60	1,67



**Figura 53:** Resultados obtidos com o VRHAA para a rede do Exemplo 2

O cenário de colapso total ( $\gamma_r^- = 1$ ) corresponde ao cenário de dano vulnerável nº 3, T3 → T4 → T1.

Não foi detectado mais nenhum cenário de dano vulnerável que resultasse na total perda da RHAA.

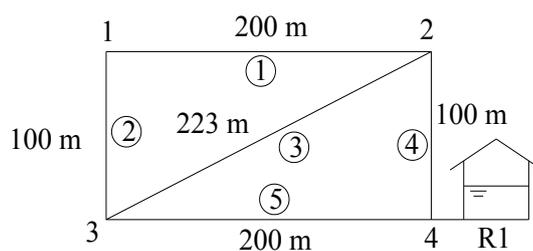
A RHAA do Exemplo 2, Figura 50, sem os troços 1, 3 e 4 é incapaz de abastecer qualquer ponto.

O cenário de máxima vulnerabilidade é o cenário de dano vulnerável nº1 e que corresponde a provocar dano no troço 3 (T3). Este facto é justificado por ser o cenário de dano que apresenta o maior valor de  $\phi$ .

De acordo com a TVRHAA a zona da RHAA associada ao troço 3 é a mais vulnerável e, como tal este resultado, pode ser útil para se repensar essas zonas, que no contexto de projecto, quer no contexto de manutenção/gestão da RHAA.

### 5.5 Exemplo 3

A RHAA do Exemplo 3 está apresentada na Figura 54 e observa-se que é muito semelhante às RHAAs usadas nos Exemplos 1 e 2, diferindo apenas na quantidade de reservatório (quando comparada com a RHAA do Exemplo 1) ou com a localização do reservatório (quando compara com a RHAA do Exemplo 2). Esta RHAA vai ser analisada com o recurso ao programa de cálculo automático VRHAA.



**Figura 54:** RHAA do exemplo 3

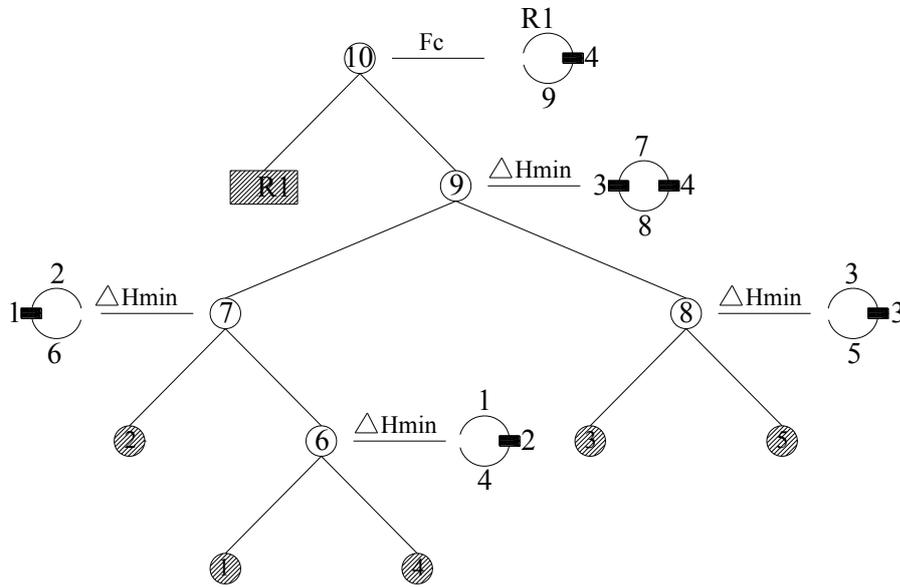
A RHAA da Figura 54 é toda ela constituída por tubos de policloreto de vinilo (PVC), com uma pressão de serviço de  $6 \text{ kg/cm}^2$ . O dimensionamento desta RHAA encontra-se descrito em pormenor no Anexo II.

Na tabela 18 indicam-se alguns dados relevantes à RHAA tal como a indicação dos nós por troço, o comprimento de cada troço, assim como a perda de carga. Esta última grandeza resulta do dimensionamento hidráulico da referida RHAA.

**Tabela 18:** Características geométricas e hidráulicas para aplicação da TVRHAA

Sub-RHAA Primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Perda de carga (m)
1	1; 2	200	0,32
2	1; 3	100	0,41
3	2; 3	223	0,91
4	2; 4	100	0,33
5	3; 4	200	0,81

Aplicando os dados da Tabela 18 e introduzindo-os no programa de cálculo automático VRHAA obteve-se o seguinte modelo hierárquico.



**Figura 55:** Modelo hierárquico da RHAA da Figura 54

Foram identificados os cenários de dano relativos a esta RHAA e que serão apresentados na tabela seguinte.

**Tabela 19:** Cenários de dano da RHAA da figura 52

	Cenário de dano	$(\gamma_r^-)$	$E_r$	$\varphi$
1	T4	0,38	0,20	1,90
2	T5	0,61	0,20	3,09
3	T4 → T5	1,00	0,40	2,5

O cenário de colapso total ( $\gamma_r^- = 1$ ) corresponde ao cenário de dano vulnerável nº , T4 → T5.

Não foi detectado mais nenhum cenário de dano vulnerável que resultasse na total perda da RHAA.

A RHAA do Exemplo 3, Figura 52, sem os troços 4 e 5 é incapaz de abastecer qualquer ponto.

O cenário de máxima vulnerabilidade é o cenário de dano vulnerável nº2 e que corresponde a provocar dano no troço 5 (T5). Este facto é justificado por ser o cenário de dano que apresenta o maior valor de  $\varphi$ .

De acordo com a TVRHAA a zona da RHAA associada ao troço 5 é a mais vulnerável e, como tal este resultado, pode ser útil para se repensar essas zonas, que no contexto de projecto, quer no contexto de manutenção/gestão da RHAA.

## **5.6 Conclusões**

As RHAA dos Exemplos 1, 2 e 3 permitiram ilustrar o recurso a diferentes critérios do processo de aglutinação e do processo de desaglutinação da TVRHAA. Este facto é importante porque grande parte dos exemplos de RHAA usados em Bastos (2008) condicionaram geralmente ao recurso do mesmo critério em ambos os processos.

Os resultados da aplicação da TVRHAA às RHAA dos Exemplos 1, 2 e 3 são consistentes e validam a TVRHAA.

Os resultados numéricos da aplicação da TVRHAA às RHAAs usadas como exemplos através do programa de cálculo automático VRHAA desenvolvido neste trabalho de investigação estão concordantes com os respectivos resultados analíticos. Deste modo o referido programa de cálculo automático está validado.

## **Capítulo VI**

Conclusões e trabalhos futuros



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A TVRHAA foi apresentada e descrita de uma forma simples. Esta teoria tem vindo a ser desenvolvida na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro e permite identificar as partes mais vulneráveis de uma RHAA.

Neste trabalho os fundamentos teóricos da TVRHAA foram revistos, e apresentadas as respectivas alterações que se consideraram pertinentes de modo a refinar os resultados obtidos pela TVRHAA. Esses fundamentos teóricos são o conceito de capacidade resistente ao dano, e a alteração do grafismo do anel de RHAA

Devido à complexidade do cálculo analítico inerente à aplicação da TVRHAA, elaborou-se um programa de cálculo automático designado por VRHAA para facilitar a aplicação da TVRHAA a RHAAs.

A utilização do VRHAA no estudo de uma RHAA revelou-se ser muito profícua na medida em que o tempo de cálculo dispendioso foi reduzido drasticamente (de algumas horas com o cálculo para alguns minutos).

Os resultados da TVRHAA foram validados, bem como os do programa de cálculo automático VRHAA.

O programa VRHAA ainda se encontra numa fase inicial, devido ao reduzido número de opções ao dispor do utilizador, apesar de ao nível da capacidade de cálculo se encontrar praticamente terminado. Como tal é proposta a continuidade do desenvolvimento do programa VRHAA de forma a melhorar a sua utilização, nomeadamente a criação de um ambiente gráfico para a sua apresentação, e na capacidade de introduzir os dados da RHAA com recurso a um ambiente gráfico, onde a RHAA possa ser desenhada e as propriedades geométricas e hidráulicas possam ser também introduzidas. Ao nível da optimização do algoritmo de cálculo do VRHAA também poderá haver uma melhoria, nomeadamente no que diz respeito à gestão de memória e, se possível na rapidez de resolução.

Em termos de OUTPUT do programa de cálculo automático VRHAA também poderão haver melhorias substanciais e relacionadas com a parte gráfica. O VRHAA poderá ter desenvolvimentos futuros de forma a permitir fornecer automaticamente todos os elementos gráficos resultantes da aplicação da TVRHAA. Esses elementos gráficos são os resultados do processo de aglutinação, o desenho do modelo hierárquico e os resultados das etapas do processo de desaglutinação.

Este suporte gráfico permite um auxílio incontestável na interpretação dos resultados de vulnerabilidade de uma RHAA e tal como foi ilustrado através dos exemplos apresentados ao longo deste trabalho de investigação.

Outra mais valia está relacionada com a capacidade do VRHAA estar ligado com um outro programa de cálculo automático de dimensionamento hidráulico de RHAA. A linguagem de programação adoptada no desenvolvimento do VRHAA prevê facilmente esta integração. Esta possibilidade tem, por sua vez, uma outra enorme valia que é facilitar a integração da TVRHAA com as teorias clássicas de dimensionamento hidráulico. Como foi possível observar através dos exemplos apresentados ao longo deste trabalho de investigação, sempre que um troço sofre dano, a RHAA também sofre uma alteração e consequentemente, as condições hidráulicas também se alteram. Nesta fase, esta última condição não está a ser tida em conta na aplicação da TVRHAA.

Outro trabalho futuro, será o disponibilizar o uso do VRHAA online de modo a diferentes utilizadores poderem o testar. A resposta desses utilizadores poderá ser muito valiosa para ajudar futuras melhorias no VRHAA e também na TVRHAA.

## 7 BIBLIOGRAFIA

Argwal, J., Blockley, D. I., & Woodman, N. J. (2001). Vulnerability of Systems. In C. Bastos, *Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural às Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água*.

Bastos, C. A. (2008). *Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural a Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Bentes, I. M. (30 de 09 de 2008). *Slides das aulas teóricas, da disciplina de Hidráulica Urbana do 1º ano de Mestrado em Engenharia Civil da UTAD*. Obtido em 2008, de SIDE: <http://side.utad.pt>

Bentes, I. M., Fernandes, L. F., & Almeida, S. M. (2002). *Hidráulica Aplicada - Exercícios*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Damas, L. (1999). *Linguagem C* (10 ed.). Lisboa: FCA - Editora de informática.

Hashimoto, M. (1994). Vulnerability and Reliability of Structural Systems. In C. Bastos, *Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural às Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Lu, Z., Yu, Y., Woodman, N. J., & Blockley, D. I. (1999). A Theory of Structural Vulnerability, The Structural Engineer. In C. Bastos, *Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural às Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água*.

Marques, J. A., & Sousa, J. J. (2006). *Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

Pinto, J. (2008). *Apointamentos teóricos da disciplina de Estruturas Especiais, 2º ano de Mestrado em Engenharia Civil UTAD*. Obtido em 2009, de SIDE: <http://side.utad.pt>

Pinto, J. T. (2002). *The Risk of a Vulnerable Scenario*. Universidade de Bristol, UK.

Pinto, P. J. (2008). *Documentos de apoio às aulas práticas da disciplina de Programação do 1º ano da Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*. Obtido em 2008, de SIDE: <http://side.utad.pt>

Pinto, P. J. (2009). *Documentos de apoio às aulas teóricas da disciplina de Algoritmia do 1º ano da Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*. Obtido em 2009, de SIDE: <http://side.utad.pt>

Quintela, A. C. (1981). *Hidráulica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

*Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. (2006). Lisboa: Publisher Team.

Reis, A. C., Farinha, M. B., & Farinha, B. J. (2005). *Tabelas Técnicas*. Lisboa: Edições Técnicas E. T. L. Lda.

Wu, x., Blocley, D. I., & Woodman, N. J. (1993). Vulnerability Analysis of Structural Systems, Part I: Rings and Clusters, Part II: Failure Scenarios, of Civil Engineering Systems. In C. Bastos, *Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural às Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água*.

Yu, Y. (1997). Analysis of structural Vulnerability. In C. Bastos, *Aplicação da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural às Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água*.

Zidko, V., & Ramos, H. M. (Maio de 2009). Modelo Fuzzy na avaliação do índice de vulnerabilidade em sistemas de abastecimento. *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, pp. 5-24.

# **Anexos**



# Anexo I



**Tabela I.1:** Dimensionamento hidráulico da Rede da Figura 5 do Capítulo 3

Troço	L(m)	Qp(l/s)	Qj(l/s)	Qm(l/s)	D(mm)	Decm	Dint	V(m/s)	Vmax	Qeq(l/s)	Ve(m/s)	Re	f	J (m/m)	ΔH (m)
t 1-2	500	0	18,00	18,00	154,47	200	188,2	0,65	1,03	13,00	0,65	120570,6	0,0176	0,0019	0,995
t 2-3	300	0	-5,00	-5,00	90,60	110	103,6	0,59	0,81	5,00	0,59	60841,4	0,0203	0,0035	1,054
t 3-4	300	0	5,00	5,00	90,60	110	103,6	0,59	0,81	5,00	0,59	60841,4	0,0203	0,0035	1,054
t 2-4	300	0	13,00	13,00	134,92	160	150,6	0,73	0,94	13,00	0,73	108819,6	0,0180	0,0032	0,972

**Tabela I.1.1:** Dimensionamento hidráulico da Rede da Figura 5 do Capítulo 3 com tubagem de materiais diferentes

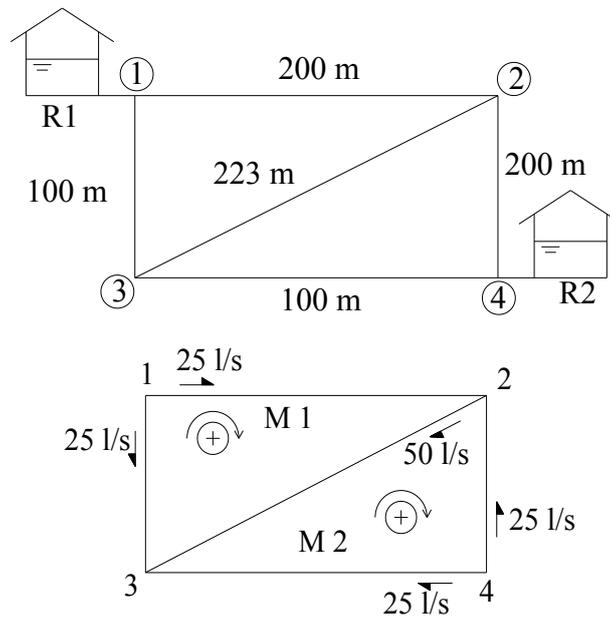
Troço	L(m)	Qp(l/s)	Qj(l/s)	Qm(l/s)	D(mm)	Decm	Dint	V(m/s)	Vmax	Qeq(l/s)	Ve(m/s)	Re	f	J (m/m)	ΔH (m)
t 1-2	500	0	18,00	18,00	154,47	200	188,2	0,65	1,03	13,00	0,65	120570,6	0,0176	0,0019	0,995
t 2-3	300	0	-5,00	-5,00	90,60	110	103,6	0,59	0,81	5,00	0,59	60841,4	0,0203	0,0035	1,019
t 3-4	300	0	5,00	5,00	90,60	110	103,6	0,59	0,81	5,00	0,59	60841,4	0,0203	0,0035	1,054
t 2-4	300	0	13,00	13,00	134,92	160	150,6	0,73	0,94	13,00	0,73	108819,6	0,0180	0,0032	0,972



# Anexo II



Dimensionamento hidráulico da RHAA dos exemplos 1 e 2 do Capítulo 5



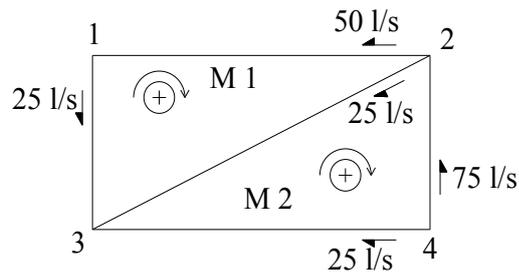
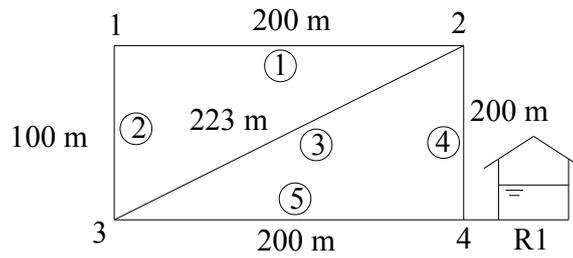
Malha 1

Troço	L(m)	Qp(l/s)	Qj(l/s)	Qm(l/s)	D(mm)	Decm	Dint	V(m/s)	Vmáx	Qeq(l/s)	Ve(m/s)	Re	f	J (m/m)	ΔH (m)
t 1-2	200	0	25,00	25,00		200	188,2	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	0,81
t 1-3	100	0	-25,00	-25,00		200	188,2	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	-0,41
t 2-3	223	0	50,00	315		315	296,60	0,72	1,24	50,00	0,72	212520,3	0,0160	0,0014	0,35
															0,76

Malha 2

Troço	L(m)	Qp(l/s)	Qj(l/s)	Qm(l/s)	D(mm)	Decm	Dint	V(m/s)	Vmáx	Qeq(l/s)	Ve(m/s)	Re	f	J (m/m)	ΔH (m)
t 3-4	200	0	25,00	25,00		200	188,2	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	0,81
t 2-4	100	0	-25,00	-25,00		200	188,2	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	-0,41
t 2-3	223	0	-50,00	-50,00		315	296,60	0,72	1,24	50,00	0,72	212520,3	0,0160	0,0014	-0,35
															0,76

Dimensionamento hidráulico da RHAA do exemplos 3 do Capítulo 5



Malha 1

Treço	L(m)	Qp(l/s)	Qi(l/s)	Qm(l/s)	D(mm)	Deom	Dint	V(m/s)	Vmáx	Qeq(l/s)	Ve(m/s)	Re	f	J (m/m)	ΔH (m)
t 1-2	200	0	50,00	50,00	291,14	315	296,60	0,72	1,24	50,00	0,72	212520,3	0,0160	0,0014	-0,32
t 1-3	100	0	25,00	25,00	210,19	200	188,20	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	-0,41
t 2-3	223	0	25,00	25,00	210,19	200	188,20	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	0,91
															0,18

Malha 2

Treço	L(m)	Qp(l/s)	Qi(l/s)	Qm(l/s)	D(mm)	Deom	Dint	V(m/s)	Vmáx	Qeq(l/s)	Ve(m/s)	Re	f	J (m/m)	ΔH (m)
t 3-4	200	0	25,00	25,00	210,19	200	188,2	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	0,81
t 2-4	100	0	-75,00	-75,00	352,26	315	296,6	1,09	1,24	75,00	1,09	318780,2	0,0150	0,0030	-0,33
t 2-3	223	0	-25,00	-25,00	210,19	200	188,20	0,90	1,03	25,00	0,90	167464,2	0,0169	0,0037	-0,91
															0,43