

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**CONTRIBUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DA VULNERABILIDADE
DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – A SUA INTEGRAÇÃO COM AS
TEORIAS CLÁSSICAS**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

Luís Manuel Fernandes Afonso



Vila Real, Julho de 2010



UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**CONTRIBUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DA VULNERABILIDADE
DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – A SUA INTEGRAÇÃO COM AS
TEORIAS CLÁSSICAS**

Luís Manuel Fernandes Afonso

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 sob a orientação científica do Professor Jorge Tiago Queirós da Silva Pinto e da Professora Isabel Maria A. de Marta Oliveira Bentes, da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

À minha querida avó Maria José

AGRADECIMENTOS

À UTAD por permitir a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Tiago Pinto, o meu muito obrigado pela forma como me apoiou e orientou na realização deste trabalho, pelas suas recomendações e cordialidade com que sempre me recebeu.

À Professora Isabel Bentes, pela disponibilidade demonstrada e pela colaboração prestada no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor João Varajão, pela presença e vontade de desenvolver o programa de cálculo automático.

A todos os meus amigos, pela força e acompanhamento nesta fase tão importante da minha vida.

À minha querida família, por tanto acreditar em mim.

RESUMO

A teoria da vulnerabilidade de redes de abastecimento de água (TVRAA) é uma teoria emergente que tem vindo a ser desenvolvida no Departamento de Engenharias, da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) com colaboração de outras universidades nacionais e estrangeiras. O conceito de vulnerabilidade é traduzido pela desproporcionalidade existente entre um esforço e o dano resultante numa rede de abastecimento de água (RAA).

Esta teoria tem como principal objectivo identificar os elementos mais vulneráveis de uma RAA e, desta forma, dar um contributo quer na fase de projecto quer na fase de gestão e de exploração dos sistemas. A fase de projecto ajudará o projectista a decidir acerca do reforço ou redimensionamento das zonas da rede estruturalmente ou hidraulicamente mais vulneráveis. Na fase de gestão e exploração da RAA auxiliará na elaboração de planos de manutenção e de reabilitação, permitindo a sua monitorização e uma priorização criteriosa das intervenções mais adequadas.

Este trabalho de investigação dá uma contribuição fundamental para o desenvolvimento da TVRAA. O teste de utilização de todos os critérios de aglutinação, a integração com as teorias clássicas de dimensionamento hidráulico, o mapeamento e a mitigação da vulnerabilidade de RAA são os aspectos que merecem o maior destaque. Estes desenvolvimentos são uma mais valia para a TVRAA tornando-a mais realista e completa.

Palavras-chave: sistemas de abastecimento de água, vulnerabilidade, gestão de redes, reabilitação de redes, integração com teorias clássicas, mapeamento.

ABSTRACT

The theory of vulnerability of water pipe networks (TVWPN) is an emerging theory that has been developed at the Department of Engineering, Trás-os-Montes e Alto Douro University (UTAD) with collaboration other national and foreign universities. The vulnerability concept is translated by existing disparity between an effort and the resultant damage in a net of water pipe (WPN).

This theory has as main objective to identify the most vulnerable elements of water pipe network (WPN) and thus make a contribution either in draft or in stage management and operation of systems. At the design stage will help the designer to concerning the strengthening of network areas structurally or hydraulically most vulnerable. At the stage of management and operation of WPN assist in drawing up plans for maintenance and rehabilitation, allowing their monitoring and a careful prioritization of interventions most appropriate.

This research contributes to the development of TVWPN. The test of using all the criteria for agglutination, integration with the classic theories of hydraulic design, mapping and mitigating the vulnerability of WPN are those who deserve the spotlight. These developments are important to the TVWPN making it more realistic and complete.

Keywords: water pipe networks, vulnerability, network management, rehabilitation of networks, integration with classical theories, mapping.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
SIMBOLOGIA	XIX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução e objectivos	1
1.2 Organização da dissertação	2
2 BREVE DESCRIÇÃO TEÓRICA DA TEORIA DA VULNERABILIDADE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (TVRAA)	5
2.1 Objectivos	5
2.2 Introdução	5
2.3 Descrição geral dos principais conceitos teóricos da TVRAA	5
2.4 Descrição mais detalhada de alguns conceitos	7
2.4.1 Capacidade resistente ao dano	7
2.4.2 Conexão nodal	7
2.4.3 Distancia ao reservatório	8
2.4.4 Perda de RAA	8
2.4.5 Capacidade resistente ao dano relativa	9
2.4.6 Índice de vulnerabilidade	9
2.5 Aplicação da TVRAA	9
2.5.1 Processo de aglutinação da TVRAA	10

2.5.1.1	Menor perda de carga total	10
2.5.1.2	Máxima capacidade resistente ao dano	10
2.5.1.3	Máxima conexão nodal	10
2.5.1.4	Máxima distância ao reservatório	10
2.5.1.5	Escolha livre	11
2.5.2	Formação do modelo hierárquico	11
2.5.3	Processo de desaglutinação	13
2.5.4	Cenários de dano	14
2.5.4.1	Cenário de dano de colapso total	15
2.5.4.2	Cenário de dano de máxima vulnerabilidade	15
2.5.4.3	Cenário de dano de mínima vulnerabilidade	15
2.5.4.4	Cenário de menor esforço para haver dano	15
2.5.4.5	Cenário de dano de interesse	15
2.6	Considerações finais	15
3	ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TVRAA	17
3.1	Objectivos	17
3.2	Introdução	17
3.3	Exemplo 1	17
3.3.1	Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 1	18
3.3.1.1	Processo de aglutinação	18
3.3.1.2	Formação do modelo hierárquico da RAA do Exemplo 1	21
3.3.1.3	Processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 1	21
3.3.2	Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 1	34
3.4	Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 2	36
3.4.1	Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 2	37
3.4.1.1	Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 2	37
3.4.1.2	Formação do modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2	41
3.4.1.3	Processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 2	41
3.4.2	Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 2	58
3.5	Considerações finais	59
4	VALIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AGLUTINAÇÃO DA TVRAA	61
4.1	Objectivos	61
4.2	Introdução	61
4.3	Descrição da RAA do Exemplo 3	62
4.3.1	Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 3	63

4.3.1.1	Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3	63
4.3.1.2	Resumo do processo de aglutinação do Exemplo 3	69
4.3.2	Formação do modelo hierárquico da RAA do Exemplo 3	71
4.3.3	Processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 3	71
4.3.3.1	Desaglutinação da sub-RAA 9	71
4.3.3.2	Desaglutinação da sub-RAA 8	72
4.3.3.3	Desaglutinação da sub-RAA 7	73
4.3.3.4	Desaglutinação da sub-RAA 6	75
4.3.4	Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 3	76
4.4	Descrição da RAA do Exemplo 4	78
4.4.1	Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 4	79
4.4.1.1	Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 4	79
4.4.1.2	Formação do modelo hierárquico da RAA do Exemplo 4	80
4.4.1.3	Processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 4	81
4.5	Considerações finais	87
5	INTEGRAÇÃO DA TVRAA COM AS TEORIAS CLÁSSICAS DE DIMENSIONAMENTO DE RAA	89
5.1	Objectivos	89
5.2	Introdução	89
5.3	Modelação de um cenário de dano vulnerável	90
5.3.1	Modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total	90
5.3.1.1	Escala das acções	91
5.3.1.2	Escala dos eventos de dano	91
5.3.1.3	Escala de dano	92
5.3.2	Modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial	94
5.3.3	Modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso inicial	95
5.4	Novos critérios de selecção de eventos de dano	96
5.4.1	Verificação da velocidade de escoamento máxima regulamentar	96
5.4.2	Verificação da velocidade de escoamento mínima	97
5.4.3	Verificação da pressão máxima	97
5.4.4	Verificação da pressão mínima	97
5.4.5	Critérios	97
5.5	Exemplificação da integração da TVRAA com as teorias clássicas	98
5.5.1	Integração da TVRAA com as teorias clássicas na resolução da RAA do Exemplo 1	98
5.5.1.1	Análise dos cenários de dano vulneráveis – 1ª Situação: Após ocorrer dano circula na RAA o caudal de ponta	99
5.5.1.2	Análise dos cenários de dano vulneráveis – 2ª Situação: Após ocorrer dano circula na RAA o caudal médio.	108

5.5.1.3	Comparação entre a 1ª e 2ª situação de análise dos cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 1	116
5.5.2	Integração da TVRAA com as teorias clássicas na resolução da RAA do Exemplo 2	116
5.5.2.1	Análise dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 2	116
5.6	Considerações finais	140
6	MAPEAMENTO E MITIGAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE RAA	143
6.1	Objectivos	143
6.2	Introdução	143
6.3	Mapeamento da vulnerabilidade de RAA	143
6.3.1	Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1	145
6.3.2	Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2	146
6.3.3	Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3	147
6.3.4	Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4	148
6.4	Mitigação da vulnerabilidade de RAA	150
6.4.1	Aumento de conexão nodal	151
6.4.1.1	Aumento da capacidade resistente ao dano	153
6.4.1.2	Diminuição da perda de carga	154
6.5	Considerações finais	155
7	CONCLUSÕES	157
	BIBLIOGRAFIA	161
	ANEXOS	163

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Exemplo de uma sub-RAA para exemplificação do cálculo da conexão nodal</i>	8
<i>Figura 2 - RAA para exemplificação da distância ao reservatório.</i>	8
<i>Figura 3 - Modelo hierárquico biológico</i>	12
<i>Figura 4 - Modelo hierárquico de uma RAA</i>	12
<i>Figura 5 - Pormenores de anel de RAA</i>	13
<i>Figura 6 - Casos de cenários de dano ocorridos recentemente</i>	14
<i>Figura 7 – RAA do Exemplo 1</i>	17
<i>Figura 8 - Representação esquemática da aplicação do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1</i>	20
<i>Figura 9 - Modelo hierárquico da RAA do Exemplo 1</i>	21
<i>Figura 10 - Cenário de dano vulnerável: dano no troço 1</i>	22
<i>Figura 11 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 13 do Exemplo 1</i>	23
<i>Figura 12 - Sub-RAA 11 do Exemplo 1</i>	24
<i>Figura 13 - Modelo hierárquico da sub-RAA 11 do Exemplo 1</i>	25
<i>Figura 14 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 11 do Exemplo 1</i>	26
<i>Figura 15 - Sub-RAA 10 do Exemplo 1</i>	26
<i>Figura 16 - Modelo hierárquico da sub-RAA 10 do Exemplo 1</i>	27
<i>Figura 17 - Sub-RAA 10 após dano no troço 5 do Exemplo 1</i>	28
<i>Figura 18 - Modelo hierárquico da sub-RAA 10 após dano no troço 5 do Exemplo 1</i>	28
<i>Figura 19 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 10 do Exemplo 1</i>	29
<i>Figura 20 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 10 do Exemplo 1</i>	29
<i>Figura 21 - Sub-RAA 9 do Exemplo 1</i>	30
<i>Figura 22 - Modelo hierárquico da sub-RAA 9 do Exemplo 1</i>	30
<i>Figura 23 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 1</i>	31
<i>Figura 24 - Sub-RAA 8 do Exemplo 1</i>	32
<i>Figura 25 - Modelo hierárquico da sub-RAA 8 do Exemplo 1</i>	32
<i>Figura 26 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 8: Dano no troço 4 seguido de dano no troço 6</i>	33
<i>Figura 27 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 8 do Exemplo 1</i>	34
<i>Figura 28 - RAA do Exemplo 2 em planta</i>	36
<i>Figura 29 - Representação esquemática da aplicação do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 2</i>	40
<i>Figura 30 - Modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2</i>	41
<i>Figura 31 - Modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2 sem a sub-RAA 5</i>	42
<i>Figura 32 - Modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2, sem os troços 5 e 7.</i>	43
<i>Figura 33 - Modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2, sem os troços 5, 7 e 1.</i>	44
<i>Figura 34 – Primeiro cenário de dano vulnerável do Exemplo 2, T5 → T7 → T1 → T2</i>	45
<i>Figura 35 - Sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2</i>	46
<i>Figura 36 - Modelo hierárquico da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2</i>	47
<i>Figura 37 - Modelo hierárquico da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2, sem o troço 5</i>	48
<i>Figura 38 - Modelo hierárquico da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2, sem os troços 5 e 7</i>	49
<i>Figura 39 - Modelo hierárquico da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2, sem os troços 3, 5 e 7</i>	50
<i>Figura 40 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2</i>	50
<i>Figura 41 - Sub-RAA 13 do Exemplo 2</i>	51

<i>Figura 42 - Modelo hierárquico da sub-RAA 13 da RAA do Exemplo 2</i>	51
<i>Figura 43 - Modelo hierárquico da sub-RAA 13 do Exemplo 4, sem o troço 5</i>	52
<i>Figura 44 - Cenário de dano da sub-RAA 13 do Exemplo 2</i>	53
<i>Figura 45 - Sub-RAA 12 do Exemplo 2</i>	53
<i>Figura 46 - Modelo hierárquico da sub-RAA 12 do Exemplo 2</i>	54
<i>Figura 47 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 12 do Exemplo 2</i>	54
<i>Figura 48 - Sub-RAA 11 do Exemplo 2</i>	55
<i>Figura 49 - Modelo hierárquico da sub-RAA 11 do Exemplo 2</i>	55
<i>Figura 50 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 11 do Exemplo 2</i>	56
<i>Figura 51 - Sub-RAA 10 do Exemplo 2</i>	57
<i>Figura 52 - Modelo hierárquico da sub-RAA 10 do Exemplo 2</i>	57
<i>Figura 53 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 10 do Exemplo 2</i>	58
<i>Figura 54 - RAA do Exemplo 3 em planta</i>	62
<i>Figura 55 - Candidatos a sofrer aglutinação no primeiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3</i>	63
<i>Figura 56 - Ilustração do primeiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	65
<i>Figura 57 - Candidatos a sofrer aglutinação no segundo passo no processo de aglutinação do Exemplo 3</i>	66
<i>Figura 58 - Ilustração do segundo passo do processo de aglutinação do Exemplo 3</i>	67
<i>Figura 59 - Candidatos a sofrer aglutinação no terceiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3</i>	67
<i>Figura 60 - Ilustração do terceiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3</i>	68
<i>Figura 61 - Ilustração do quarto e último passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	69
<i>Figura 62 - Representação esquemática do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	70
<i>Figura 63 - Modelo hierárquico do Exemplo 3</i>	71
<i>Figura 64 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 9 do Exemplo 3</i>	72
<i>Figura 65 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 3</i>	72
<i>Figura 66 - Sub-RAA 7 da RAA do Exemplo 3</i>	73
<i>Figura 67 - Modelo hierárquico da sub-RAA 7 do Exemplo 3</i>	73
<i>Figura 68 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 7 do Exemplo 3</i>	74
<i>Figura 69 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 3</i>	74
<i>Figura 70 - Sub-RAA 6 do Exemplo 3</i>	75
<i>Figura 71 - Modelo hierárquico da sub-RAA 6 do Exemplo 3</i>	75
<i>Figura 72 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 6 do Exemplo 3</i>	76
<i>Figura 73 - RAA do Exemplo 4 (em planta)</i>	78
<i>Figura 74 - Modelo hierárquico do Exemplo 4</i>	81
<i>Figura 75 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 9 da RAA do Exemplo 4</i>	82
<i>Figura 76 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 4</i>	82
<i>Figura 77 - Sub-RAA 7 do Exemplo 4</i>	83
<i>Figura 78 - Modelo hierárquico da sub-RAA 7 do Exemplo 4</i>	83
<i>Figura 79 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 4</i>	84
<i>Figura 80 - Sub-RAA 6 do Exemplo 4</i>	84
<i>Figura 81 - Modelo hierárquico da sub-RAA 6 do Exemplo 4</i>	85
<i>Figura 82 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 6 do Exemplo 4</i>	85
<i>Figura 83 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 4</i>	86

Figura 84 - Esquema genérico do cenário de dano vulnerável de colapso total -----	90
Figura 85 - Esquema genérico do cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial -----	94
Figura 86 - Esquema genérico da propagação nula -----	95
Figura 87 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ec_3^1 \rightarrow Ec_4^1 \rightarrow Ec_5^1$) do Exemplo 1, com caudal de ponta -----	100
Figura 88 - Dano no trecho 5 da RAA do Exemplo 1 -----	101
Figura 89 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$) do Exemplo 1, com caudal de ponta -----	103
Figura 90 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após o cenário de dano vulnerável $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$, com caudal de ponta -----	103
Figura 91 - Dano no trecho 4 da RAA do Exemplo 1 -----	104
Figura 92 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) do Exemplo 1, com caudal de ponta -----	106
Figura 93 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após cenário de dano vulnerável progressivo de colapso parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) -----	106
Figura 94 - RAA do Exemplo 1 com caudais médios -----	108
Figura 95 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ec_3^1 \rightarrow Ec_4^1 \rightarrow Ec_5^1$) do Exemplo 1, com caudal médio -----	109
Figura 96 - RAA do Exemplo 1 resultante do dano no trecho 5, com caudal médio -----	110
Figura 97 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$) do Exemplo 1, com caudal médio -----	112
Figura 98 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após o cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$), com caudal médio -----	112
Figura 99 - RAA do Exemplo 1 resultante do dano no trecho 4, com caudal médio -----	113
Figura 100 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) do Exemplo 1, com caudal médio -----	115
Figura 101 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) -----	115
Figura 102 - RAA do Exemplo 2 com circulação do caudal médio -----	117
Figura 103 - RAA do Exemplo 2 após o primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$) -----	118
Figura 104 – Dano consequente devido à ocorrência do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$) -----	119
Figura 105 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T7$) -----	120
Figura 106 - Dano consequente devido à ocorrência primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T7$) --	121
Figura 107 – Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$) do Exemplo 2 -----	122
Figura 108 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após o cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) -----	122
Figura 109 - RAA do Exemplo 2 após o segundo evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$) -----	124
Figura 110 - Dano consequente devido primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$) -----	125
Figura 111 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2$) do Exemplo 2 -----	126

Figura 112 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 2, após cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2$).-----	126
Figura 113 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T1$) -----	127
Figura 114 - Dano consequente devido à ocorrência do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T1$) -----	129
Figura 115 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante da ocorrência do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T2$) -----	129
Figura 116 - Dano consequente devido primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T7$)-----	130
Figura 117 – Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$) do Exemplo 2 -----	131
Figura 118 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T6$) -----	132
Figura 119 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T7$) -----	133
Figura 120 - Cenário de dano vulnerável de colapso parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$) -----	134
Figura 121 – Estado da RAA do Exemplo 2 após a ocorrência do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$) -----	135
Figura 122 – Estado da RAA do Exemplo 2 após a ocorrência do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T4$) -----	136
Figura 123 - Dano consequente devido segundo evento de dano “trigger” $Ea_2^i = T4$ -----	138
Figura 124 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \rightarrow Ec_4^2$) do Exemplo 2-----	138
Figura 125 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 2, após cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \rightarrow Ec_4^2$). -----	139
Figura 126 - Escala da vulnerabilidade -----	144
Figura 127 – Ilustração da quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade -----	144
Figura 128 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1	145
Figura 129 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1 -----	146
Figura 130 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2	147
Figura 131 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2 -----	147
Figura 132 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3	148
Figura 133 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3 -----	148
Figura 134 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4	149
Figura 135 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4 -----	150
Figura 136 – Aumento de conexão nodal nas RAA dos Exemplos 1, 2 e 3 -----	151
Figura 137 – Alterção das condições hidráulicas na RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6 -----	151
Figura 138 – Aumento da capacidade resistente ao dano nas RAA dos Exemplos 1, 2 e 3 -----	153

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Esquema gráfico de alguns conceitos da TVRAA</i>	5
<i>Tabela 2 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 1</i>	18
<i>Tabela 3 - Passo 1 do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1</i>	19
<i>Tabela 4 - Passos 2, 3, 4, 5 e 6 do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1</i>	19
<i>Tabela 5 - Processo de aglutinação da sub-RAA 11 do Exemplo1</i>	24
<i>Tabela 6 - Processo de aglutinação da sub-RAA 10 do Exemplo1</i>	27
<i>Tabela 7 - Processo de aglutinação da sub-RAA 10 após dano no troço 5 do Exemplo1</i>	28
<i>Tabela 8 - Processo de aglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo1</i>	30
<i>Tabela 9 - Processo de aglutinação da sub-RAA 8 do Exemplo1</i>	32
<i>Tabela 10 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 1</i>	34
<i>Tabela 11 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 2</i>	37
<i>Tabela 12 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2</i>	37
<i>Tabela 13 - Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 2</i>	38
<i>Tabela 14 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 2</i>	58
<i>Tabela 15 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 3</i>	62
<i>Tabela 16 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 3</i>	63
<i>Tabela 17 - Selecção entre os primeiros candidatos sub-RAA 1 com 2 e Sub-RAA 2 com 3, do primeiro passo de aglutinação do Exemplo 3</i>	64
<i>Tabela 18 - Selecção entre os candidatos sub-RAA 2 com 3 e Sub-RAA 3 com 4, do primeiro passo de aglutinação do Exemplo 3</i>	65
<i>Tabela 19 - Primeiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	65
<i>Tabela 20 - Selecção entre os candidatos sub-RAA 1 com 6 e Sub-RAA 4 com 6 do segundo passo de aglutinação do Exemplo 3</i>	66
<i>Tabela 21 - Segundo passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	67
<i>Tabela 22 - Selecção do candidato sub-RAA 1 com 7 no terceiro passo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	68
<i>Tabela 23 - Terceiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	68
<i>Tabela 24 - Quarto passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3</i>	68
<i>Tabela 25 - Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3 (compilação)</i>	70
<i>Tabela 26 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 3</i>	76
<i>Tabela 27 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 4</i>	79
<i>Tabela 28 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 4</i>	79
<i>Tabela 29 - Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 4</i>	80
<i>Tabela 30 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 4</i>	86
<i>Tabela 31 - Dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1, com circulação de caudal de ponta (Q_{ponta})</i>	99
<i>Tabela 32 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1.</i>	99
<i>Tabela 33 - Velocidades e perdas de carga do Exemplo 1 após dano no troço 5, com circulação de caudal de ponta</i>	101
<i>Tabela 34 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas do Exemplo 1, após dano no troço 5, com caudal de ponta</i>	102

<i>Tabela 35 - Dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1 após dano no troço 4, com circulação do caudal de ponta</i>	104
<i>Tabela 36 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 4.</i>	105
<i>Tabela 37 - Resumo dos cenários de dano antes e depois da integração com as teorias clássicas da RAA do Exemplo 1, para a situação de caudal de ponta</i>	107
<i>Tabela 38 – Velocidades e perda de carga da RAA do Exemplo 1, com circulação de caudal médio</i>	108
<i>Tabela 39 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com caudais médios.</i>	109
<i>Tabela 40 - Velocidades e perdas de carga da RAA do Exemplo 1 com circulação de caudal médio, após dano no troço 5</i>	111
<i>Tabela 41 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 5, com caudais médios.</i>	111
<i>Tabela 42 - Dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1 após dano no troço 4, com circulação de caudal médio</i>	114
<i>Tabela 43 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com caudal médio, após dano no troço 4.</i>	114
<i>Tabela 44 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com circulação de caudal médio (Qmédio)</i>	117
<i>Tabela 45 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 para Qmédio</i>	117
<i>Tabela 46 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 1 com Qmédio, após dano no troço 5</i>	118
<i>Tabela 47 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 para Qmédio, após dano no troço 5</i>	119
<i>Tabela 48 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com Qmédio, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 7</i>	120
<i>Tabela 49 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com Qmédio, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 7</i>	121
<i>Tabela 50 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com Qmédio, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 3</i>	125
<i>Tabela 51 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com Qmédio, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 7</i>	125
<i>Tabela 52 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 1 com Qmédio, após dano no troço 5</i>	128
<i>Tabela 53 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com Qmédio, após a ocorrência do dano no troço 1</i>	128
<i>Tabela 54 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com Qmédio após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 1 e 2</i>	130
<i>Tabela 55 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2, após os eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 7, com caudais médios.</i>	130
<i>Tabela 56 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com Qmédio, após ocorrência do dano no troço 6</i>	132
<i>Tabela 57 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com Qmédio, após ocorrência de dano no troço 5</i>	133
<i>Tabela 58 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com Qmédio, após a ocorrência de dano no troço 3</i>	135

<i>Tabela 59 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência de dano no trecho 5</i>	136
<i>Tabela 60 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos trechos 3 e 4</i>	137
<i>Tabela 61 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos trechos 3 e 4</i>	137
<i>Tabela 62 - Resumo dos cenários de dano antes e depois da integração com as teorias clássicas da RAA do Exemplo 2</i>	140
<i>Tabela 63 - Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1</i>	145
<i>Tabela 64 - Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2</i>	146
<i>Tabela 65 – Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3</i>	147
<i>Tabela 66 – Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4</i>	149
<i>Tabela 67 – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o trecho adicional 6</i>	152
<i>Tabela 68 - Parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 1 após o aumento da conexão nodal ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ')</i>	152
<i>Tabela 69 – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com aumento da capacidade resistente ao dano no trecho 1</i>	153
<i>Tabela 70 - Valores dos parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 1 após o aumento da capacidade resistente ao dano ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ')</i>	154
<i>Tabela 71 – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o trecho 1 com aumento do valor da rugosidade</i>	155
<i>Tabela 72 - Valores dos parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 1 após o aumento da capacidade resistente ao dano ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ')</i>	155

SIMBOLOGIA

A_p^n – Arranjos simples de n troços p a p

C_D – Ligação directa à sub-rede de referência

C_L – Selecção da sub-RAA que foi aglutinada posteriormente

D_{com} – Diâmetro comercial

D_{int} – Diâmetro interno

Dis – Distância ao reservatório

Dis_{max} – Distância máxima ao reservatório

E – Capacidade resistente ao dano

Ea – Evento de dano “trigger”

Ec – Evento de dano consequente

E_R – Capacidade resistente ao dano relativa

E_{Total} – Capacidade resistente ao dano da totalidade da rede intacta

E_{max} – Máxima capacidade resistente ao dano

Fc – Escolha livre

L_C – Selecção de uma sub-rede primitiva em detrimento de uma sub-rede

N_R – Não é sub-rede de referência

n – Número de troços de uma RAA

P_{max} – Pressão máxima admissível

P_{min} – Pressão mínima admissível

Q_{medio} – Caudal médio

Q_{ponta} – Caudal de ponta

$S_{\Delta H}$ – Selecção da sub-RAA que apresenta o maior valor de perda de carga total

S_E – Selecção da sub-RAA que tem o menor valor de capacidade resistente ao dano

V – Velocidade de escoamento (m/s)

V_{max} – Velocidade de escoamento máxima regulamentar (m/s)

V_{min} – Velocidade de escoamento mínima admissível (m/s)

γ_r^- – Perda de rede

ΔH^- – Perda de carga total de uma rede ou sub-rede

$\Delta H_T^-(S')$ – Perda de carga total das sub-RAA que ficam inutilizadas

ΔH_{Total}^- – Perda de carga total da rede

η – Conexão nodal

η_{max} – Máxima conexão nodal

φ – Índice de vulnerabilidade

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e objectivos

A Teoria da Vulnerabilidade de Redes de Abastecimento de Água (TVRAA), em bibliografia anterior designada por Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA), tem vindo a ser desenvolvida na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro com colaboração de outras universidades nacionais e estrangeiras, tendo dado origem a duas dissertações de mestrado ([1] e [2]) e a diversos artigos científicos ([3], [4], [5], [6] e [7]). A TVRAA é baseada numa extrapolação dos conceitos teóricos da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (TVE) que tem sido desenvolvida na Universidade de Bristol, no Reino Unido, por diversos investigadores nomeadamente por Pinto em 2002 [8], aplicando-os às redes de abastecimento de água (RAA).

O conceito de vulnerabilidade está associado à desproporcionalidade passível de existir entre o esforço e o dano estrutural resultante. Uma estrutura é mais vulnerável quando um pequeno esforço provoca um grande dano estrutural. A acção que origina esse esforço pode ser de qualquer tipo, desde as acções permanentes, às decorrentes da sua utilização, às que resultam de situações excepcionais como erros humanos, acções criminosas, acções naturais como os sismos, entre outras.

A aplicação desta teoria pode revelar-se muito importante na fase de dimensionamento e de gestão das RAA contribuindo para a obtenção de RAA mais robustas atendendo a que a(s) parte(s) mais vulnerável(eis) das RAA poderão ser facilmente identificadas e desta forma reforçadas ou duplicadas, entre outras intervenções. Por outro lado, como esta teoria utiliza a construção de um modelo hierárquico não necessita de estudar todas as combinações possíveis de danos na rede.

Neste contexto os objectivos definidos para este trabalho são os seguintes:

- Testar a aplicabilidade da TVRAA e validar a sua utilização, utilizando exemplos simples de RAA;
- Mostrar a necessidade e relevância da existência dos cinco critérios de aglutinação que constam na TVRAA, pela sua aplicação a exemplos simples de RAA;

- Propor a integração da TVRAA com as teorias clássicas de dimensionamento de RAA;
- Sugerir uma metodologia de mapeamento de vulnerabilidade de RAA e apresentar propostas de mitigação da vulnerabilidade de RAA.

1.2 Organização da dissertação

Este trabalho apresenta-se estruturado em sete capítulos. No presente capítulo, é feita a introdução do trabalho, indicando os objectivos do trabalho e apresentada a organização da dissertação.

No capítulo 2 foi efectuado um estudo da bibliografia existente relativa à TVRAA para a consolidação dos conhecimentos adquiridos.

No capítulo 3 fez-se a aplicação da TVRAA a dois exemplos de RAA, designadas por Exemplo 1 e Exemplo 2, com o objectivo de testar a sua aplicabilidade, validar a sua utilização e mais uma vez consolidar conceitos teóricos. A aplicação da TVRAA às RAA dos Exemplo 1 e 2 é apresentada e descrita de forma detalhada incluindo todos os procedimentos e fases de resolução sendo todos os cálculos apresentados e justificados. Este detalhe e rigor nunca foi apresentado na bibliografia disponível e consultada.

No capítulo 4 fez-se a aplicação da TVRAA a dois exemplos, designados por Exemplo 3 e 4 com o objectivo de validar todos os critérios de selecção do processo de aglutinação, uma vez que nos exemplos de aplicação da TVRAA documentados o primeiro critério de aglutinação foi sempre suficiente para o desenvolvimento do processo. Assim sendo, e atendendo a que estes critérios foram transpostos, após uma adaptação, da teoria da vulnerabilidade estrutural para a TVRAA pensou-se que seria muito importante mostrar a necessidade e relevância da existência dos cinco critérios definidos no processo de aglutinação da TVRAA e da sua ordem de aplicação.

Da aplicação da TVRAA às RAA dos Exemplos 3 e 4 resultou uma explicação detalhada da aplicação do processo de aglutinação sendo que esta informação pode mostrar-se muito relevante em trabalhos de investigação futuros a realizar neste contexto.

O capítulo 5 dá, talvez, o contributo mais importante para o desenvolvimento da TVRAA. Este contributo prende-se com a proposta de integração da TVRAA com as teorias clássicas de dimensionamento hidráulico. Com efeito, no processo de desaglutinação efectuado em exemplos documentados anteriormente, nunca se teve em conta as alterações das condições hidráulicas numa RAA resultantes da ocorrência de eventos de dano.

Quando um evento de dano ocorre as condições hidráulicas da RAA alteram-se porque também ocorre uma redistribuição de caudais que implicitamente corresponde a uma alteração da velocidade de escoamento e das pressões, sendo bastante provável que estas alterações provoquem a ocorrência de outros eventos de dano adicionais na RAA.

No capítulo 6 dá-se mais um contributo para o desenvolvimento da TVRAA propondo o desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento da vulnerabilidade de RAA, por se pensar que é importante e útil apresentar esquematicamente os resultados da TVRAA. Através do mapeamento da vulnerabilidade é possível visualizar de forma directa as zonas mais vulneráveis de uma RAA e, por sua vez, auxiliar o processo de mitigação dessa vulnerabilidade.

O processo de mitigação da vulnerabilidade de uma RAA é o último contributo para o desenvolvimento da TVRAA, uma vez que é feita a análise dos parâmetros que influenciam o índice de vulnerabilidade. Através desses parâmetros é possível optar por soluções construtivas que tornem as RAA menos vulneráveis. Tais soluções podem passar por aumentar o número de troços numa parte da RAA, optar por tubos de outra classe de pressão, entre outros.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas as conclusões deste trabalho de investigação e apontados alguns trabalhos a desenvolver no futuro.

2 BREVE DESCRIÇÃO TEÓRICA DA TEORIA DA VULNERABILIDADE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (TVRAA)

2.1 Objectivos

Os objectivos principais deste capítulo são os seguintes:

- Apresentar uma breve descrição da TVRAA;
- Explicar os conceitos teóricos necessários para se proceder à aplicação da teoria.

2.2 Introdução

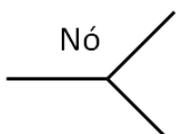
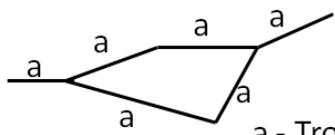
A TVRAA começou a ser desenvolvida na UTAD em 2008 e é uma adaptação da TVE às RAA. Os conceitos teóricos da TVE foram transpostos para a TVRAA num trabalho de investigação desenvolvido na UTAD [1] sendo revistos e melhorados na continuação de outro trabalho de investigação [2], e diversos artigos entretanto publicados [3], [4], [5], [6] e [7].

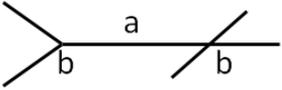
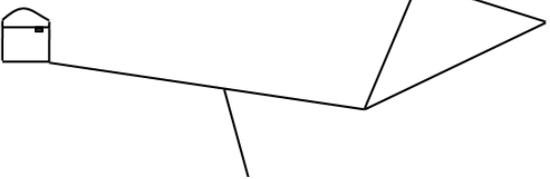
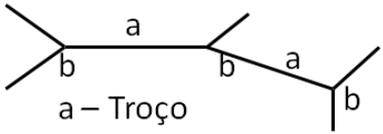
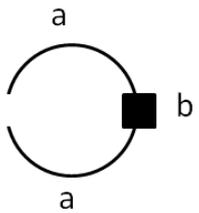
A maioria dos conceitos apresentados e descritos neste capítulo foram desenvolvidos nos trabalhos de investigação anteriores.

2.3 Descrição geral dos principais conceitos teóricos da TVRAA

Para a compreensão da aplicação da TVRAA é necessário entender os conceitos que constituem a sua base teórica. Assim na Tabela 1 apresentam-se esquemas gráficos de alguns conceitos [4].

Tabela 1 - Esquema gráfico de alguns conceitos da TVRAA

RAA	
Conceito	Esquema gráfico
Nó	 <p>Nó</p>
Troço	 <p>a - Troço</p>

<p>Sub-RAA primitiva</p>	 <p>a – Troço b – Nó</p>
<p>Sub-RAA de referência</p>	
<p>Sub-RAA de origem</p>	
<p>Sub-RAA</p>	 <p>a – Troço b – Nó</p>
<p>Anel de sub-RAA</p>	<p>a – Troço b – nó de ligação</p> 

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

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

Sub-RAA de referência é o(s) reservatório(s). Por questões de simplificação é admitido nesta fase que a sub-rede de referência não sofre qualquer tipo de dano.

Extensão da sub-RAA de referência é o abastecimento de água a uma sub-RAA, traduzindo-se no efeito de toda a RAA, troços e reservatórios, que se encontram a montante de uma sub-RAA.

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

Anel de RAA é a forma abstracta de representar uma RAA. O anel de RAA da Tabela 1 representa a RAA mais simples (dois troços e um nó de ligação).

Dano de rede ou evento de dano corresponde a uma deterioração da RAA que pode impossibilitar o abastecimento de água entre pontos dessa RAA. Um dano numa RAA é

causado por uma acção e esta pode ser de diversos tipos, tais como o excesso de pressão hidráulica, velocidade de escoamento excessiva, assentamento de terreno ou suas vibrações, erro humano na fase de projecto, na fase de construção, na fase de gestão e/ou na fase de manutenção, acto de sabotagem, entre outros. Nesta fase, o dano de rede é considerado como sendo a perda de um troço da RAA.

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

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

Capacidade resistente ao dano é a grandeza que é directamente proporcional ao esforço requerido para a ocorrência de um dano de uma RAA.

Cenário de dano é uma sequência ordenada de danos de rede ou de eventos de deterioração através dos quais o desempenho da RAA 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 cenário de dano total de uma RAA.

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

2.4 Descrição mais detalhada de alguns conceitos

2.4.1 Capacidade resistente ao dano

Uma RAA ou sub-RAA é menos susceptível de se deteriorar quanto maior for o valor da capacidade resistente ao dano (E).

Este conceito foi definido como sendo a área da secção transversal dos tubos que constituem um RAA ou sub-RAA [1], sendo alterado para a pressão de serviço de cada tubo [2]. Neste trabalho de investigação optou-se pela segunda definição, pressão de serviço admissível dos tubos.

2.4.2 Conexão nodal

A conexão nodal (η) traduz a interligação que uma sub-RAA tem com a restante RAA ou as alternativas possíveis de abastecimento de água na zona da RAA relativa a essa sub-RAA, representa também a capacidade que essa sub-RAA tem de formar anéis de RAA com outras sub-RAA.

Na Figura 1 está ilustrada uma sub-RAA onde se pretende exemplificar o cálculo da conexão nodal. A sub-RAA 1 constituída pelo troço 1 e pelos nós 1 e 2 apresenta um valor de conexão nodal correspondente ao somatório das sub-RAA que convergem para os nós 1 e 2 (troços 2, 3, 4 e 5), ou seja, igual a 4.

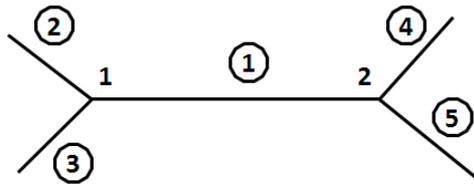


Figura 1 - Exemplo de uma sub-RAA para exemplificação do cálculo da conexão nodal

2.4.3 Distância ao reservatório

A distância ao reservatório (*Dis*) é a menor distância que a água tem que percorrer entre o reservatório e a sub-RAA 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 RAA que permitem o transporte da água entre o reservatório e a sub-RAA em análise [1].

De forma a exemplificar a quantificação da distância de uma sub-RAA ao reservatório é apresentada a RAA da Figura 2. Esta RAA é constituída por 6 troços (troço 1 a 6) e por 6 nós (nó de 1 a 6).

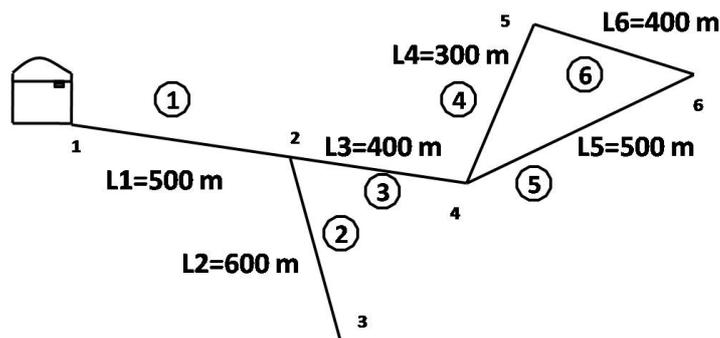


Figura 2 - RAA para exemplificação da distância ao reservatório.

Considere-se como exemplo a sub-RAA constituída pelos troços 4 e 6, esta sub-RAA pode ser abastecida pelos nós 4 e 6. A distância entre o nó 4 e o reservatório é o somatório do comprimento dos troços 1 e 3 e com um valor de 900 metros. Por sua vez a distância entre o nó 6 e o reservatório é o somatório do comprimento dos troços 1, 3 e 5 de valor igual a 1400 metros.

Deste modo a menor distância que a água tem que percorrer para abastecer a sub-RAA em análise surge quando esta sub-RAA é abastecida pelo nó 4, com valor de distância ao reservatório de 900 metros.

2.4.4 Perda de RAA

Tendo em consideração o referido anteriormente relativo à perda de RAA (γ_r^-) esta grandeza traduz numericamente a parte de uma RAA que fica inoperável após a ocorrência de um determinado cenário de dano.

De acordo com a Expressão 1 [4] o valor de γ_r^- corresponde ao quociente entre perda de carga total das sub-RAA que ficam inutilizadas ($\Delta H_T^-(S')$) e a perda de carga total da RAA (ΔH_{Total}^-).

$$\gamma_r^- = \frac{\Delta H_T^-(S')}{\Delta H_{Total}^-} \quad (1)$$

2.4.5 Capacidade resistente ao dano relativa

A capacidade resistente ao dano relativa (E_R) é o quociente entre a capacidade resistente ao dano das sub-RAA que sofrem dano (E) e da capacidade resistente ao dano da totalidade da RAA intacta (E_{Total}). Pode ser quantificada através da Expressão 2 [4].

$$E_R = \frac{E}{E_{Total}} \quad (2)$$

2.4.6 Índice de vulnerabilidade

O índice de vulnerabilidade (φ) permite avaliar a vulnerabilidade de uma RAA ou sub-RAA. Corresponde à desproporção existente entre a perda de RAA (γ_r^-) e a capacidade resistente ao dano relativa (E_R), e pode ser quantificado pela Expressão 3 [4].

$$\varphi = \frac{\gamma_r^-}{E_R} \quad (3)$$

2.5 Aplicação da TVRAA

A aplicação da TVRAA é constituída por três fases: o processo de aglutinação, a formação do modelo hierárquico e o processo de desaglutinação.

O processo de aglutinação é um processo iterativo e selectivo. Os candidatos de sub-RAA a serem aglutinados devem estar ligados de modo a que possam ser aglutinados e formar uma sub-RAA. O processo de aglutinação recorre a cinco critérios de selecção, que serão descritos mais à frente, e desenvolve-se sucessivamente até que toda a RAA, incluindo o reservatório, esteja aglutinada.

A formação do modelo hierárquico recorre à informação resultante do processo de aglutinação da RAA e é fundamental para a realização do processo de desaglutinação.

É no processo de desaglutinação do modelo hierárquico que os cenários de dano vulneráveis são identificados, ou seja, é onde o objectivo da TVRAA é atingido. O processo de desaglutinação recorre a cinco critérios de selecção, também, descritos mais à frente.

2.5.1 Processo de aglutinação da TVRAA

Tal como foi referido anteriormente, o processo de aglutinação da TVRAA é iterativo e selectivo. A selecção de candidatos de sub-RAA a serem aglutinados entre si recorre a cinco critérios de selecção [1] e que são os seguintes por ordem de importância:

- Menor perda de carga total (ΔH^-);
- Máxima capacidade resistente ao dano (E_{max});
- Máxima conexão nodal (η_{max});
- Máxima distância ao reservatório (Dis_{max});
- Escolha livre (Fc).

2.5.1.1 Menor perda de carga total

O critério de menor perda de carga total (ΔH^-) é o primeiro critério de selecção a ser aplicado no processo de aglutinação. A perda de carga total traduz a qualidade de forma da RAA. Para o efeito, do conjunto de candidatos de sub-RAA a serem aglutinados deve-se seleccionar o candidato que apresente menor valor de perda de carga total e porque se assume que quanto menor for a perda de carga total de uma RAA, maior será a sua qualidade de forma [1]. Quando este critério não for suficiente para seleccionar os candidatos a aglutinar então é necessário recorrer ao segundo critério de selecção.

2.5.1.2 Máxima capacidade resistente ao dano

A máxima capacidade resistente ao dano (E_{max}) é o segundo critério de selecção do processo de aglutinação da TVRAA. Quanto maior for a capacidade resistente ao dano de uma RAA ou sub-RAA maior será o esforço requerido para haver dano nessa RAA ou sub-RAA e, por isso, a RAA ou sub-RAA possui uma boa qualidade de forma [1]. O candidato a seleccionar para sofrer aglutinação é o que apresente maior valor de capacidade resistente ao dano. Se este critério for insuficiente para a selecção do candidato a sofrer aglutinação é necessário recorrer ao terceiro critério de aglutinação.

2.5.1.3 Máxima conexão nodal

O terceiro critério de selecção é a conexão nodal, e só deverá ser utilizado quando os dois anteriores não forem suficientes na decisão dos candidatos a seleccionar para aglutinação. Este critério consiste em seleccionar o candidato que maior valor de conexão nodal.

2.5.1.4 Máxima distância ao reservatório

A máxima distância ao reservatório (Dis_{max}) é o quarto critério de selecção no processo de aglutinação e consiste em escolher o candidato a aglutinar que apresente a maior distância ao reservatório. Considera-se que o facto de uma sub-RAA estar

afastada do reservatório corresponde a essa sub-RAA ser, de alguma forma, menos vulnerável [1].

2.5.1.5 Escolha livre

Quando os quatro critérios de selecção anteriores não forem suficientes para seleccionar um candidato de sub-RAA 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.

2.5.2 Formação do modelo hierárquico

Quando a RAA está toda aglutinada é possível formar o modelo hierárquico.

O modelo hierárquico para além de ser uma forma abstracta de representar uma RAA em função da sua qualidade de forma em que as partes da RAA que surgem na base do modelo hierárquico apresentam melhor qualidade em termos de forma e ao invés daquelas que surgem na zona sobrejacente, também é uma base de trabalho imprescindível para a aplicação da terceira e última fase da aplicação da TVRAA que é o processo de desaglutinação.

As sub-RAA primitivas (troços) estão representadas por círculos cinzentos. As sub-RAA que se formaram durante o processo de aglutinação estão representadas por círculos brancos, os anéis de RAA também estão referenciados assim como o critério de selecção aplicado.

A sub-RAA de referência (reservatório) surge no topo do modelo hierárquico porque fez parte da última sub-RAA a ser formada, esta sub-RAA de referência é representada por um rectângulo cinzento.

O modelo hierárquico da Teoria da Vulnerabilidade Estrutural e consequentemente da TVRAA foi baseado em modelos hierárquicos biológicos [5], Figura 3. Na Figura 4 está apresentado o modelo hierárquico de uma RAA, neste caso correspondendo ao modelo hierárquico da sub-RAA 9.

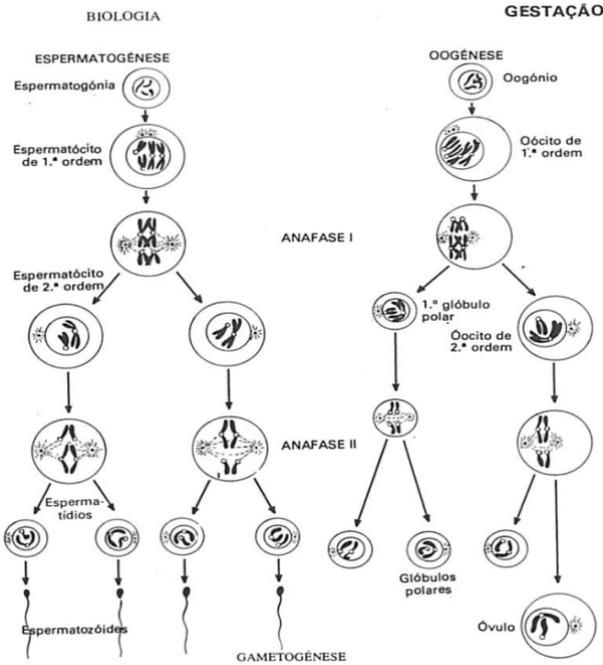


Figura 3 - Modelo hierárquico biológico

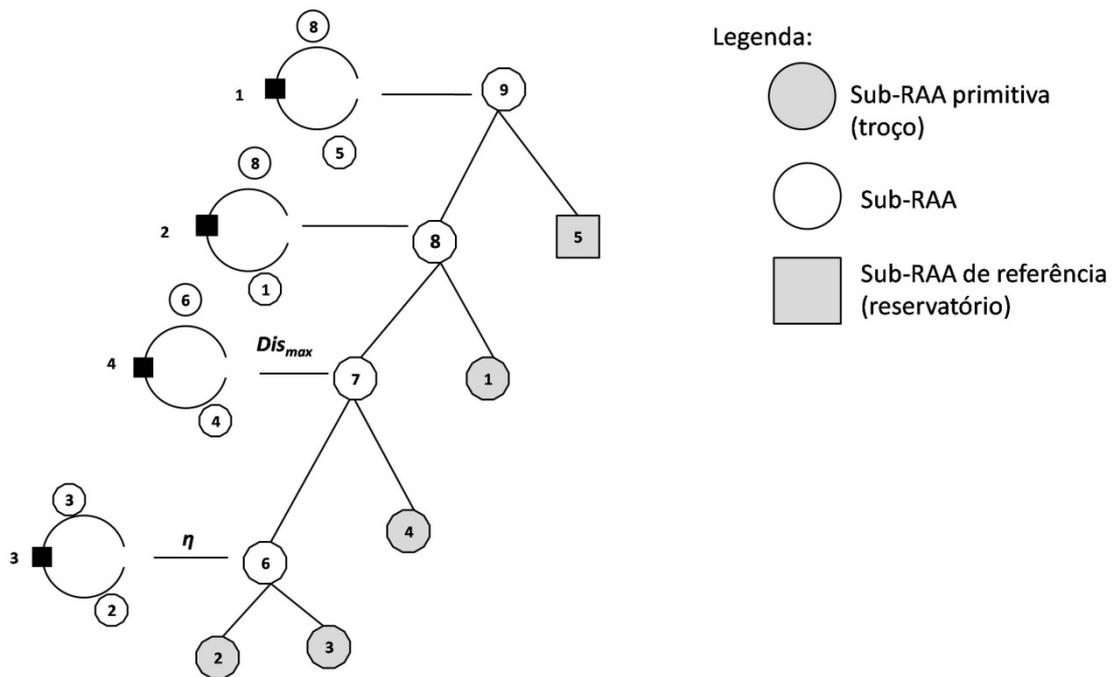


Figura 4 - Modelo hierárquico de uma RAA

No contexto das RAA, um anel de RAA é a representação gráfica de uma sub-RAA e contém duas sub-RAA e o respectivo nó de ligação.

Um anel de RAA pode ser aberto (Figura 5 a) ou fechado (Figura 5 b). Um anel de RAA aberto corresponde a uma RAA abastecida apenas por um nó, enquanto um anel de RAA fechado corresponde a uma RAA abastecida por mais do que um nó.

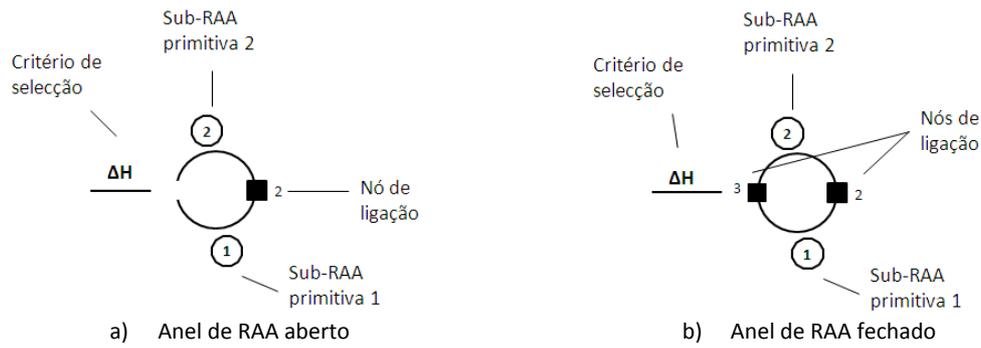


Figura 5 - Pormenores de anel de RAA

A formação do modelo hierárquico possibilita a redução substancial do número total de cenários de dano, seleccionando apenas cenários vulneráveis. Para uma RAA com n troços o número total de cenários de dano possíveis pode ser quantificado pela Expressão 4 [6].

$$\sum_{p=1}^n A_p^n = \sum_{p=1}^n \left[\frac{n!}{(n-p)!} \right] \quad (4)$$

Em que: n – número de troços;

A_p^n – Arranjos simples de n troços p a p .

O número máximo de cenários de dano vulneráveis corresponde ao número de sub-RAA menos 1, que se formam no processo de aglutinação.

2.5.3 Processo de desaglutinação

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

A desaglutinação ou desmembramento do modelo hierárquico de uma RAA é processado no sentido descendente e tem início na última sub-RAA definida no processo de aglutinação, procurando em cada anel de rede um possível evento de dano. À semelhança do processo de aglutinação também o processo de desaglutinação assenta num conjunto de critérios de selecção [1].

Estes critérios são os seguintes, por ordem decrescente de importância:

- Seleccionar a sub-RAA que não é uma sub-RAA de referência (N_R);
- Seleccionar a sub-RAA que está ligada directamente à sub-RAA de referência (C_D);
- Seleccionar uma sub-RAA primitiva (troço) em detrimento de uma sub-RAA (L_C);

- Seleccionar a sub-RAA que apresenta o maior valor de perda de carga total ($S_{\Delta H}$);
- Seleccionar a sub-RAA que tem o menor valor de capacidade resistente ao dano (S_E);
- Seleccionar a sub-RAA que foi aglutinada posteriormente (C_L);
- Escolha livre (Fc).

Quando um evento de dano de RAA é identificado através deste processo é necessário verificar se a sub-RAA em análise ou a RAA tem capacidade de abastecer água. Caso uma das condições anteriores seja cumprida então este processo decorre na busca de outros eventos de dano da sub-RAA, até que a sub-RAA em análise ou a RAA deixem de ter capacidade de abastecer água. Nesta fase, é identificado um cenário de dano vulnerável da RAA, relativo à sequência ordenada dos eventos de dano detectados. Contudo, o processo de desaglutinação prossegue até que todas as sub-RAA definidas no processo de aglutinação (círculos brancos da Figura 4) sejam desaglutinadas.

2.5.4 Cenários de dano

Um cenário de dano é composto por um ou mais eventos de dano. Tal como foi referido um evento de dano pode ser de diversos tipos. Para melhor compreensão deste conceito a Figura 6 apresenta cenários de dano reais recentemente ocorridos.



a) Rio Tinto, 2010



b) Islândia, 2010

Figura 6 - Casos de cenários de dano ocorridos recentemente

O 1º caso refere-se à rotura de uma conduta de abastecimento de água, em Rio Tinto, que levou à abertura de uma “cratera” com mais de 10 metros de diâmetro que “engoliu” duas viaturas, danificou outras vinte e levou à interrupção do abastecimento de água a parte da cidade do Porto (Figura 6 a)) [9].

O 2º caso refere-se à nuvem de cinza vulcânica provocada pela erupção de um vulcão islandês que levou ao cancelamento e alteração de rotas de milhares de voos, provocando prejuízos que ascenderam a vários milhões de euros (Figura 6 b)) [10].

Relativamente à TVRAA, os cenários de dano vulneráveis identificados através da aplicação da TVRAA a uma RAA são os seguintes:

2.5.4.1 Cenário de dano de colapso total

O *cenário de dano de colapso total* é um cenário de dano que corresponde à perda da totalidade da RAA ($\gamma_r^- = 1$), o que corresponde à situação em que a RAA fica completamente incapacitada de abastecer água com qualidade a qualquer ponto [7]. Se forem identificados mais do que um cenário de dano vulnerável que apresentem uma perda de RAA igual a 1 ($\gamma_r^- = 1$) então, neste caso, o cenário de dano de colapso total será aquele que, dentro dos que tenham $\gamma_r^- = 1$, apresente o maior valor do índice de vulnerabilidade φ .

2.5.4.2 Cenário de dano de máxima vulnerabilidade

O *cenário de dano de máxima vulnerabilidade* é aquele que apresenta a maior desproporcionalidade entre perda de RAA e esforço requerido para o efeito e, por isso, apresenta o maior valor de índice de vulnerabilidade. Está associado à parte mais vulnerável da RAA [7].

2.5.4.3 Cenário de dano de mínima vulnerabilidade

Este cenário está associado à parte da RAA que aparentemente apresenta a menor qualidade de forma e corresponde à última sub-RAA primitiva a ser aglutinada [7].

2.5.4.4 Cenário de menor esforço para haver dano

O *cenário de menor esforço para haver dano* é relativo ao(s) troço(s) da RAA que requerem o menor esforço para sofrer dano [7], correspondendo por isso ao(s) troço(s) que tem o menor valor de capacidade resistente ao dano (E).

2.5.4.5 Cenário de dano de interesse

O *cenário de interesse do utilizador* é qualquer cenário definido pelo utilizador de modo a obter os seus parâmetros de vulnerabilidade [7].

2.6 Considerações finais

A TVRAA foi apresentada de forma sucinta. Esta é uma teoria que pretende encontrar a(s) parte(s) mais vulnerável(eis) de uma RAA.

A aplicação da TVRAA a uma RAA é constituída por três etapas e que são o processo de aglutinação, a formação do modelo hierárquico e o processo de desaglutinação. Os procedimentos inerentes a cada uma destas etapas também foram descritos de forma resumida.

Os conceitos teóricos necessários para a aplicação da TVRAA foram apresentados e descritos

Os vários cenários vulneráveis de dano identificados pela TVRAA também foram descritos

3 ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TVRAA

3.1 Objectivos

Os objectivos principais deste capítulo são os seguintes:

- Consolidar os conhecimentos de aplicação da TVRAA;
- Aplicar a TVRAA a alguns exemplos de RAA de complexidade crescente.

3.2 Introdução

Neste capítulo pretende-se consolidar os conhecimentos adquiridos durante o estudo da TVRAA. Para o efeito duas RAA designada por Exemplo 1 e Exemplo 2 foram utilizadas.

A aplicação da TVRAA às RAA dos Exemplo 1 e 2 é aqui apresentada e descrita de forma detalhada incluindo todos os procedimentos e fases de resolução. Todos os cálculos são expostos e justificados. É de salientar que este detalhe e rigor nunca foi apresentado na bibliografia disponível e consultada.

3.3 Exemplo 1

Considere-se então como Exemplo 1 a RAA representada na Figura 7. Esta RAA é formada por 6 troços (troços de 1 ao 6) e por 6 nós (nós de 1 ao 6). O reservatório é designado por 7.

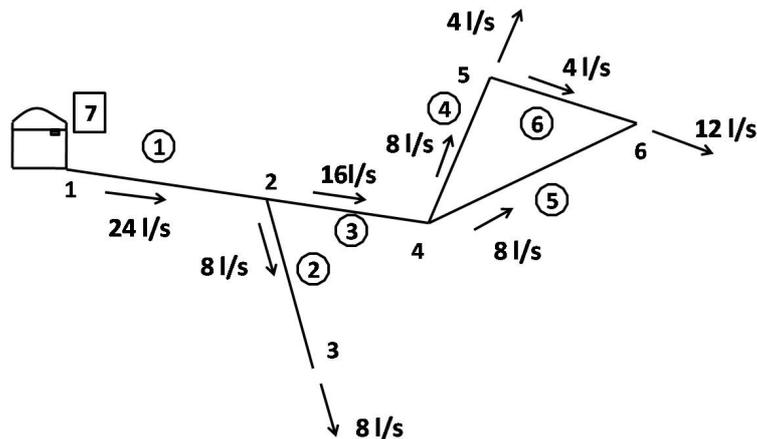


Figura 7 – RAA do Exemplo 1

Toda a RAA é formada por tubos de policloreto de vinilo (PVC) com um valor de rugosidade absoluta equivalente (adiante designada por rugosidade) de 0.01 mm. O valor da viscosidade cinemática da água foi considerado igual a $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

A pressão de serviço adoptada para o dimensionamento hidráulico da referida RAA foi de 6 Kgf/cm². Os diâmetros comerciais (D_{com}) e as respectivas espessuras de tubos de PVC estão apresentados no Anexo A [11].

Após o dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1 (Anexo B.I) e ilustrada na Figura 7 é possível saber as características geométricas e hidráulicas da RAA e que são necessárias para a aplicação da TVRAA. Essas características estão apresentadas na Tabela 2. Por simplificação este dimensionamento não está aqui apresentado.

Tabela 2 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 1

Sub-RAA primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Q_{ponta} (l/s)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
1	1; 2	500	24	200	188.2	1.68	6
2	2; 3	600	8	125	117.6	2.67	6
3	2; 4	400	16	160	150.6	1.89	6
4	4; 5	300	8	125	117.6	1.33	6
5	4; 6	500	8	125	117.6	2.22	6
6	5; 6	400	4	110	103.6	0.94	6

3.3.1 Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 1

A aplicação da TVRAA é constituída por três fases: o processo de aglutinação, a formação do modelo hierárquico e o processo de desaglutinação.

3.3.1.1 Processo de aglutinação

É agora apresentada a aplicação do processo de aglutinação da TVRAA.

O processo de aglutinação é um processo iterativo e selectivo. No caso da RAA do Exemplo 1 existem 8 candidatos de sub-RAA primitivas passíveis de serem aglutinados no 1º passo e de acordo com o indicado na segunda coluna da Tabela 3. Para todos os candidatos calculam-se os parâmetros de vulnerabilidade de perda de carga total (ΔH), de capacidade resistente ao dano (E), de conexão nodal (η) e de distância ao reservatório (Dis).

Aplicando-se os critérios de selecção do processo de aglutinação verifica-se que o primeiro candidato a formar uma nova sub-RAA consiste em aglutinar os troços 4 e 6 porque é referente ao candidato que apresenta a menor ΔH^- .

Tabela 3 - Passo 1 do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+2	4.35	12	1	0	—
	1+3	3.57	12	3	0	—
	2+3	4.56	12	3	500	—
	3+4	3.22	12	4	500	—
	3+5	4.11	12	4	500	—
	4+5	3.56	12	2	900	—
	4+6	2.28	12	2	900	8
	5+6	3.17	12	2	900	—

O processo de aglutinação prossegue de igual forma até que toda a RAA esteja aglutinada, incluindo o reservatório e seja representada por uma única sub-RAA. O processo de aglutinação nos restantes passos é semelhante ao que foi descrito no 1º passo. Todos os candidatos que sejam constituídos por alguma sub-RAA que faça parte da sub-RAA criada anteriormente por aglutinação passarão a estar representados por essa nova sub-RAA. Isto é, a partir do 1º passo os troços 4 e 6 passarão a estar representadas pela sub-RAA 8 nos passos seguintes deste processo. Na Tabela 4 estão apresentados os restantes passos da aplicação do processo de aglutinação, à RAA do Exemplo 1.

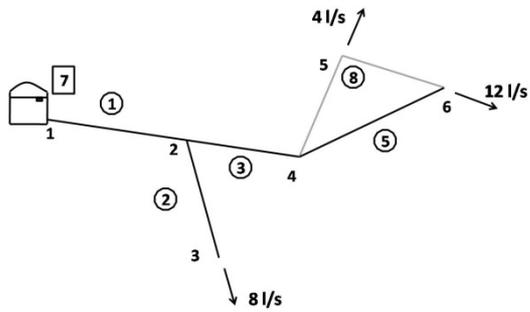
Tabela 4 - Passos 2, 3, 4, 5 e 6 do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
2	1+2	4.35	12	1	0	—
	1+3	3.57	12	3	0	9
	2+3	4.56	12	3	500	—
	3+5	4.11	12	4	500	—
	3+8	4.17	18	3	500	—
	5+8	4.50	18	1	900	—
3	2+9	6.24	18	2	0	—
	5+9	5.79	18	3	0	—
	5+8	4.50	18	3	900	10
	8+9	5.84	24	3	0	—
4	2+9	6.24	18	2	0	11
	9+10	8.07	24	1	0	—
5	10+11	10.74	36	0	0	12
6	7+12	—	—	—	—	13

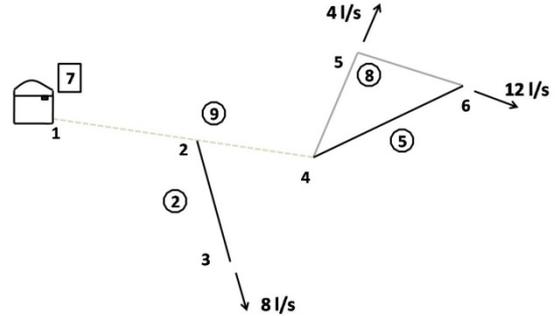
Através da informação exposta nas Tabelas 3 e 4 é possível observar que neste caso apenas o primeiro critério de selecção, menor perda de carga total, foi sempre

suficiente para decidir qual dos candidatos deveria ser aglutinado em todos os passos do processo de aglutinação.

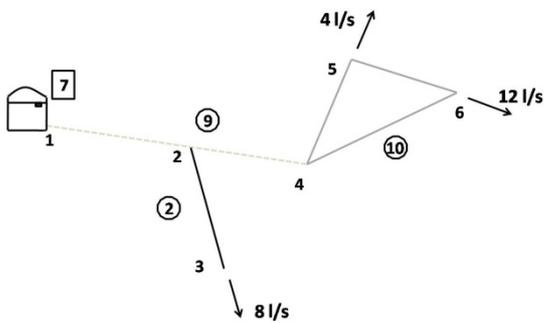
Para melhor percepção da aplicação processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1, a Figura 8 apresenta esquematicamente esse procedimento, passo a passo.



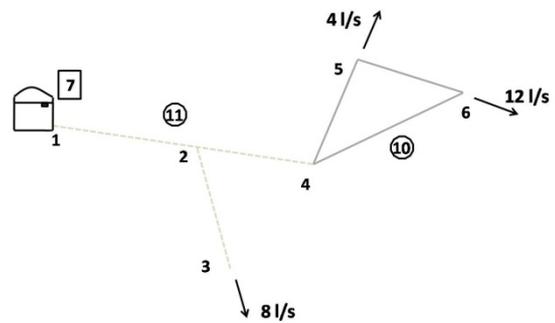
a) Passo 1: formação da sub-RAA 8 (4+6)



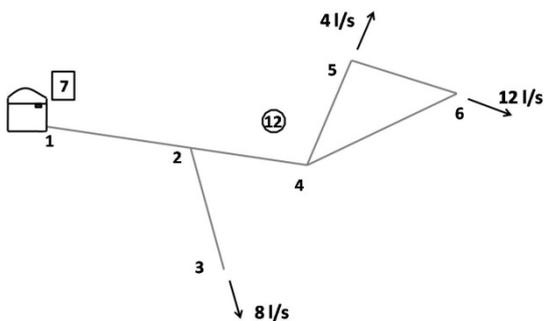
b) Passo 2: formação da sub-RAA 9 (1+3)



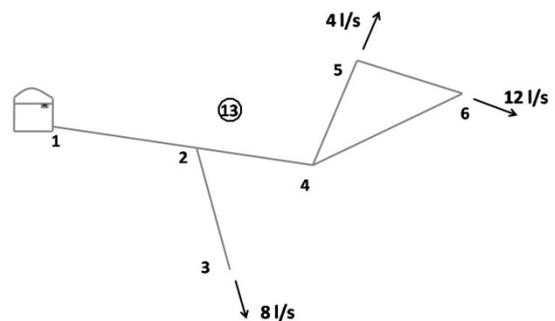
c) Passo 3: formação da sub-RAA 10 (5+8)



d) Passo 4: formação da sub-RAA 11 (2+9)



e) Passo 5: formação da sub-RAA 12 (10+11)



f) Passo 6: formação da sub-RAA 13 (7+12)

Figura 8 - Representação esquemática da aplicação do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 1

- A sub-RAA 12 é constituída pelas sub-RAA 10 e 11. Como a sub-RAA 11 está ligada directamente à sub-RAA de referência 7 então é a escolhida. O 2º critério, a sub-RAA está ligada directamente à sub-RAA de referência (C_D), foi o aplicado;
- A sub-RAA 11 é constituída pelas sub-RAA 9 e 2. A sub-RAA 9 está ligada directamente à sub-RAA de referência 7 logo é a seleccionada e o critério aplicado foi C_D ;
- A sub-RAA 9 é constituída pelas sub-RAA 1 e 3. Atendendo a que a sub-RAA primitiva 1 está ligada directamente à sub-RAA de referência então é a seleccionada para sofrer dano e o critério aplicado foi C_D .

Quando a sub-RAA primitiva 1 sofre dano então toda a RAA é incapaz de abastecer água a qualquer ponto. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 13 termina e é identificado o primeiro cenário de dano vulnerável (danificar o troço 1), Figura 10.

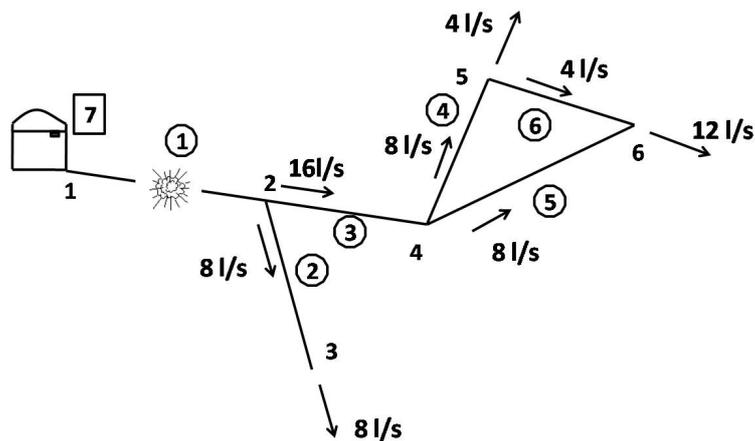


Figura 10 - Cenário de dano vulnerável: dano no troço 1

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas as grandezas de vulnerabilidade de perda de rede (γ_r^-), capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para estas grandezas.

$$\gamma_r^- = \frac{10.74}{10.74} = 1$$

$$E_R = \frac{6}{36} = 0.167$$

$$\varphi = \frac{1}{0.167} = 6.0$$

A Figura 11 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 13 e que resulta no primeiro cenário de dano vulnerável. A traço interrompido está representado o percurso deste processo de desaglutinação até culminar na sub-RAA primitiva que deve sofrer dano, neste caso o troço 1. Essa sub-RAA primitiva está representada por uma circunferência de espessura dominante. Também estão

indicados os critérios de selecção do processo de desaglutinação que foram aplicados em cada etapa.

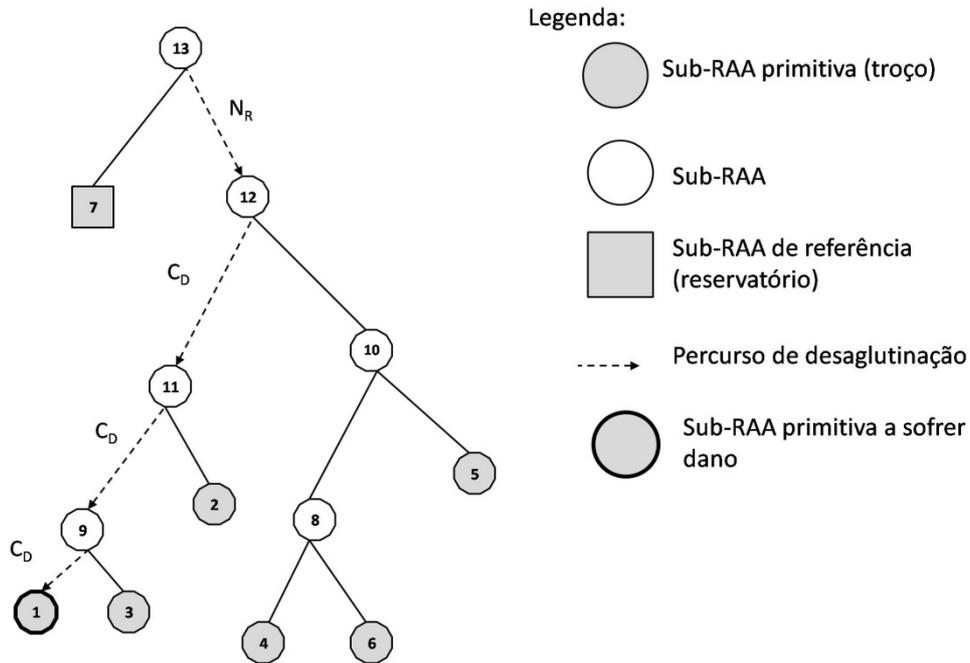


Figura 11 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 13 do Exemplo 1

3.3.1.3.2 Desaglutinação da sub-RAA 12

É agora necessário desaglutinar a sub-RAA seguinte e que é a sub-RAA 12 de acordo com a Figura 3.

Pelo modelo hierárquico da Figura 9 verifica-se que as sub-RAA 12 e 13 apenas diferem no facto da sub-RAA 13 incluir a sub-RAA de referência. Esta diferença não vai alterar o resultado obtido para a sub-RAA 13 se a sub-RAA 12 for analisada, sendo o cenário de dano vulnerável resultante da análise da sub-RAA 12 o dano do troço 1.

Então, de acordo com a Figura 9, a sub-RAA 11 é a seguinte a ser desaglutinada.

3.3.1.3.3 Desaglutinação da sub-RAA 11

A sub-RAA 11 está representada na Figura 12.

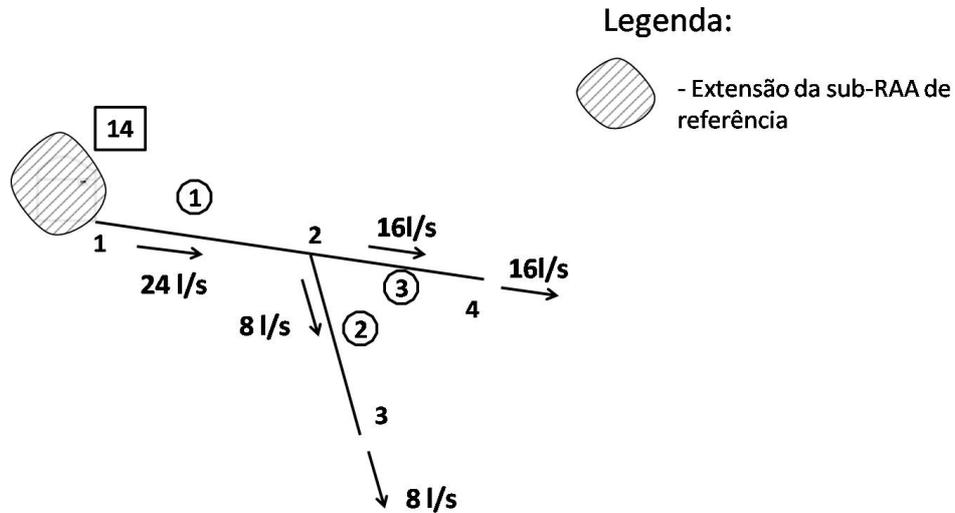


Figura 12 - Sub-RAA 11 do Exemplo 1

Tal como se pode observar na Figura 12 a sub-RAA 11 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante da sub-RAA 11 é apenas a existência do reservatório e é traduzido pela sub-RAA de extensão da sub-RAA de referência, designada por 14 na Figura 12.

Face ao exposto, é requerido um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 11 assim como o traçado do respectivo modelo hierárquico.

Na Tabela 5 apresenta-se todo o processo de aglutinação da sub-RAA 11.

Tabela 5 - Processo de aglutinação da sub-RAA 11 do Exemplo1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis_{max} (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+2	4.35	12	1	0	—
	1+3	3.57	12	3	0	9
	2+3	4.56	12	3	500	—
2	2+9	6.24	18	2	0	11
3	11+14	—	—	—	—	15

Pela informação obtida na Tabela 5 é possível construir o modelo hierárquico da sub-RAA 11, Figura 13.

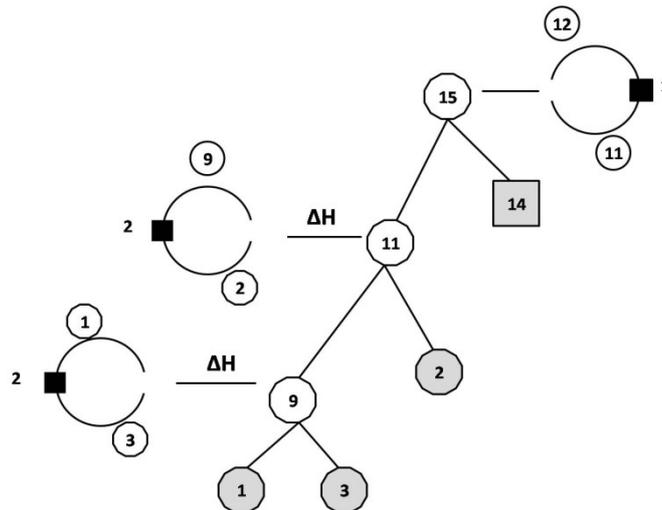


Figura 13 - Modelo hierárquico da sub-RAA 11 do Exemplo 1

É possível agora efectuar o processo de desaglutinação da sub-RAA 11.

Pelo modelo hierárquico da Figura 13 verifica-se que as sub-RAA 15 e 11 apenas diferem no facto da sub-RAA 15 incluir a extensão da sub-RAA de referência, sub-RAA 14. Esta diferença não vai alterar os resultados obtidos através das análises da sub-RAA 15 e da sub-RAA 11. Então pela desaglutinação da sub-RAA 15 e aplicando-se os critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 15 é constituída pelas sub-RAA 11 e 14. A sub-RAA 14 é extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 11 é a seleccionada (N_R);
- A sub-RAA 11 é constituída pelas sub-RAA 9 e 2. A sub-RAA 9 está ligada directamente à sub-RAA de referência 7 logo é a seleccionada (C_D);
- Atendendo a que a sub-RAA primitiva 1 está ligada directamente à sub-RAA de referência então é a seleccionada para sofrer dano e o critério aplicado foi C_D .

Quando a sub-RAA primitiva 1 sofre dano então a RAA é incapaz de abastecer água a qualquer ponto servido pela sub-RAA 11 e pela RAA. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 11 termina e é identificado um cenário de dano vulnerável. Neste caso, o cenário de dano vulnerável identificado é igual ao cenário de dano vulnerável da sub-RAA 13 e 12, dano no troço 1. Os parâmetros de vulnerabilidade inerentes a este cenário de dano vulnerável já foram calculados no processo de desaglutinação da sub-RAA 13.

A Figura 14 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 11.

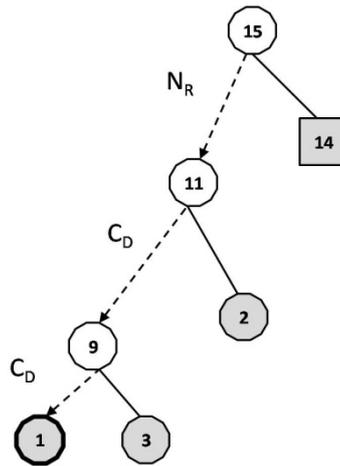


Figura 14 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 11 do Exemplo 1

O processo de desaglutinação continua com a sub-RAA adjacente à sub-RAA 11 e de acordo com o modelo hierárquico da Figura 9 é a sub-RAA 10.

3.3.1.3.4 Desaglutinação da sub-RAA 10

A sub-RAA 10 está representada na Figura 15.

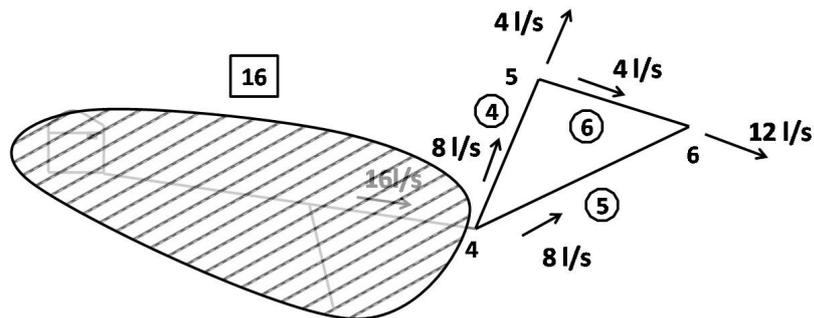


Figura 15 - Sub-RAA 10 do Exemplo 1

Tal como se pode observar na Figura 15 a sub-RAA 10 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante (reservatório e troços 1, 2 e 3) da sub-RAA 10 é traduzido pela sub-RAA de extensão da sub-RAA de referência, designada por 16 na Figura 15.

Face ao exposto, então é requerido um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 10 assim como o traçado do respectivo modelo hierárquico.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados dos cálculos inerentes ao processo de aglutinação da sub-RAA 10.

Tabela 6 - Processo de aglutinação da sub-RAA 10 do Exemplo1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
1	4+5	3.56	12	2	0	—
	4+6	2.28	12	2	0	8
	5+6	3.17	12	2	0	—
2	5+8	4.50	18	0	0	10
3	10+16	—	—	—	—	17

Pela informação existente na Tabela 6 é possível construir o modelo hierárquico da sub-RAA 10, Figura 16.

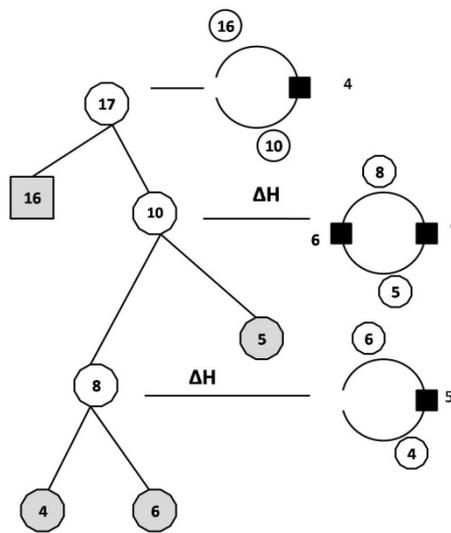


Figura 16 - Modelo hierárquico da sub-RAA 10 do Exemplo 1

A Figura 16 apresenta anéis de RAA abertos (os relativos às sub-RAA 17 e 8) e anéis de RAA fechados (o relativo à sub-RAA 10). O que traduz que na zona da RAA relativa à sub-RAA 10, predomina RAA de tipologia emalhada.

É possível agora efectuar o processo de desaglutinação da sub-RAA 10.

Pelo modelo hierárquico da Figura 16 verifica-se que as sub-RAA 17 e 10 apenas diferem no facto da sub-RAA 17 incluir a extensão da sub-RAA de referência, sub-RAA 16. Esta diferença não vai alterar os resultados obtidos através da análise da sub-RAA 17 e da sub-RAA 10. Então, pela desaglutinação da sub-RAA 17 e aplicando-se os critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 17 é constituída pelas sub-RAA 10 e 16. A sub-RAA 16 é a extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 10 é a seleccionada (N_R);
- A sub-RAA 10 é formada pelas sub-RAA 5 e 8. Como nenhuma das RAA é extensão da sub-RAA de referência e ambas estão ligadas a esta, então

selecciona-se a sub-RAA 5 e o 3º critério de selecção, seleccionar uma sub-RAA primitiva em detrimento de uma sub-RAA (L_C), foi o aplicado.

Com o dano na sub-RAA primitiva 5, a sub-RAA 10 ainda desempenha a função de abastecimento, o processo de desaglutinação tem que continuar. A sub-RAA 10 tem que ser novamente aglutinada, mas agora sem a sub-RAA 5 que acabou de sofrer dano, Figura 17.

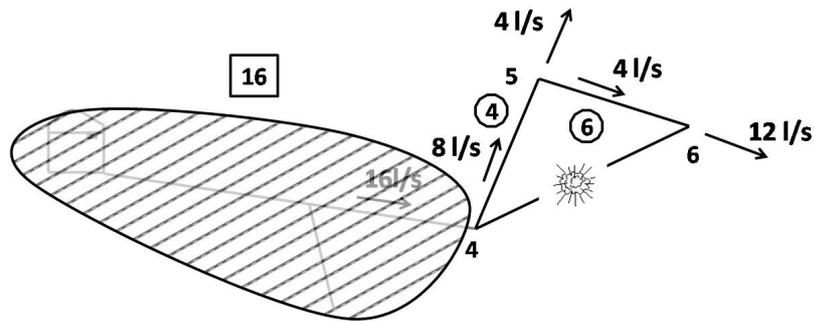


Figura 17 - Sub-RAA 10 após dano no troço 5 do Exemplo1

Na Tabela 7 está apresentado o processo de aglutinação da sub-RAA 10 após dano no troço 5.

Tabela 7 - Processo de aglutinação da sub-RAA 10 após dano no troço 5 do Exemplo1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis_{max} (m)	Sub-RAA que se forma
1	4+6	2.28	12	2	0	8
2	8+16	—	—	—	—	17

Pela informação da Tabela 7 é possível construir o modelo hierárquico da sub-RAA 10, Figura 18.

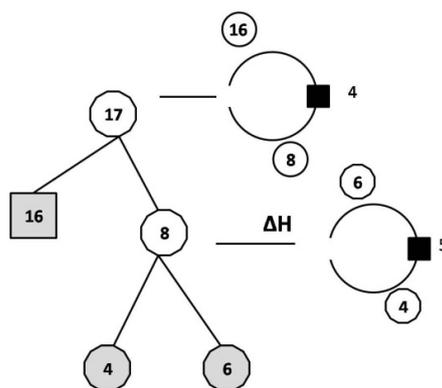


Figura 18 - Modelo hierárquico da sub-RAA 10 após dano no troço 5 do Exemplo 1

É analisada a sub-RAA que aparece no topo do modelo hierárquico ilustrado na Figura 18, a sub-RAA 17.

- A sub-RAA 17 é formada pelas sub-RAA 8 e 16. Como a sub-RAA 16 é a extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 8 é a seleccionada (N_R);
- A sub-RAA 8 é constituída pelas sub-RAA 4 e 6. Como a sub-RAA 4 está ligada directamente à extensão da sub-RAA de referência então é a seleccionada para sofrer dano e o critério aplicado é C_D .

Com o dano nas sub-RAA 5 e 4 a sub-RAA 10 fica incapacitada de abastecer água a qualquer ponto existente na zona a ela associada. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 10 termina e é identificado o seguinte cenário de dano vulnerável, danificar o troço 5 seguido de dano no troço 4. Este cenário de dano vulnerável está ilustrado na Figura 19.

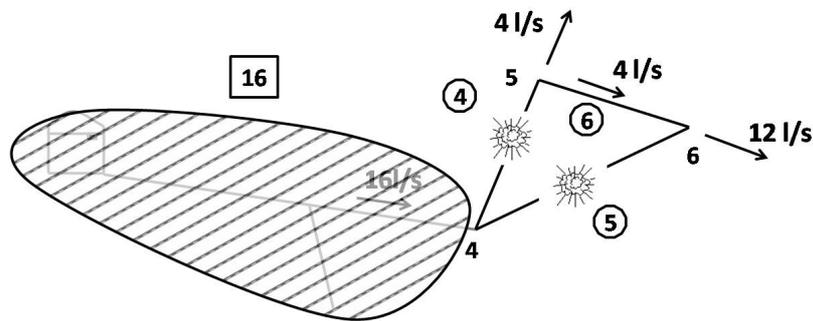


Figura 19 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 10 do Exemplo 1

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas.

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.333; \varphi = 1.257.$$

A

Figura 20 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 10 do Exemplo 1.

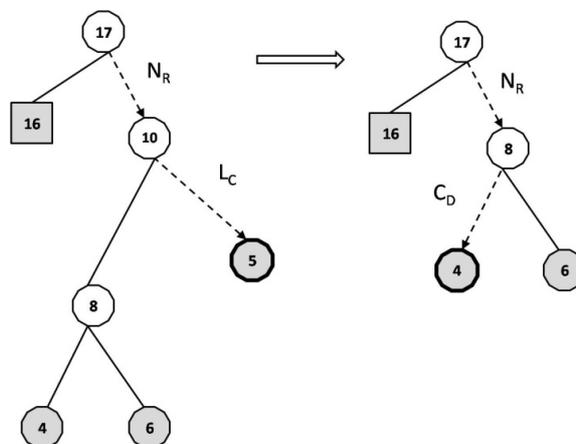


Figura 20 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 10 do Exemplo 1

O processo de desaglutinação continua com a sub-RAA seguinte à sub-RAA 10 e, que de acordo com o modelo hierárquico ilustrado na Figura 9, é a sub-RAA 9.

3.3.1.3.5 Desaglutinação da sub-RAA 9

A sub-RAA 9 está representada na Figura 21.

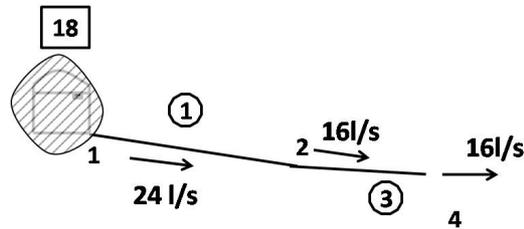


Figura 21 - Sub-RAA 9 do Exemplo 1

Tal como se pode observar na Figura 21, a sub-RAA 9 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante da sub-RAA 9 é apenas a existência do reservatório e é traduzido pela sub-RAA de extensão da sub-RAA de referência, designada por 18 na Figura 21.

Face ao exposto, então é requerido um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 9 assim como o traçado do respectivo modelo hierárquico.

Na Tabela 8 apresenta-se todo o processo de aglutinação da sub-RAA 9.

Tabela 8 - Processo de aglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+3	3.57	12	3	0	9
2	9+18	—	—	—	—	19

Pela informação da Tabela 8 é possível construir o modelo hierárquico da sub-RAA 9, Figura 22.

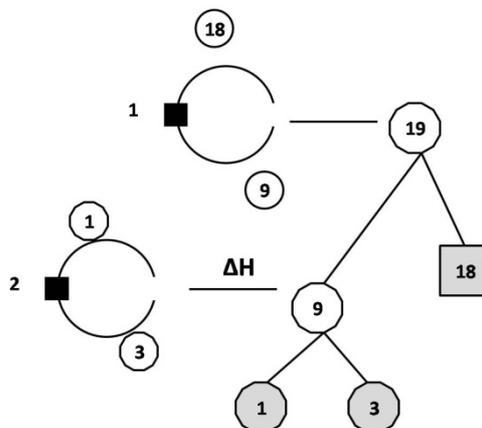


Figura 22 - Modelo hierárquico da sub-RAA 9 do Exemplo 1

É possível agora efectuar o processo de desaglutinação da sub-RAA 9.

Pelo modelo hierárquico da Figura 22 verifica-se que as sub-RAA 19 e 9 apenas diferem no facto da sub-RAA 19 incluir a extensão da sub-RAA de referência, sub-RAA 18. Esta diferença não vai alterar os resultados obtidos através das análises das sub-RAA 19 e sub-RAA 9. Então, pela desaglutinação da sub-RAA 19 e aplicando-se os critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 19 é constituída pelas sub-RAA 9 e 18. A sub-RAA 18 é a extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 9 é a seleccionada (N_R);
- A sub-RAA 9 é constituída pelas sub-RAA 1 e 3. Atendendo a que a sub-RAA primitiva 1 está ligada directamente à sub-RAA de referência então é a seleccionada e o critério aplicado é C_D .

Quando a sub-RAA primitiva 1 sofre dano então a RAA é incapaz de abastecer água a qualquer ponto. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 9 termina e é identificado um cenário de dano vulnerável. Neste caso, o cenário de dano vulnerável identificado é igual ao cenário de dano vulnerável aquando da análise das sub-RAA 13, 12 e 11, e que foi dano no troço 1. Os parâmetros de vulnerabilidade inerentes a este cenário de dano vulnerável já foram calculados no processo de desaglutinação da sub-RAA 13.

A Figura 23 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 1.

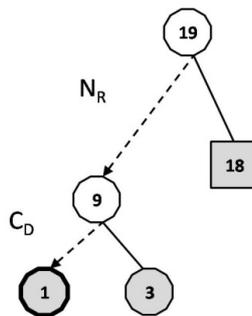


Figura 23 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 1

O processo de desaglutinação continua com a sub-RAA seguinte à sub-RAA 9 e de acordo com o modelo hierárquico da Figura 9 é a sub-RAA 8.

3.3.1.3.6 Desaglutinação da sub-RAA 8

A sub-RAA 8 está representada na Figura 24.

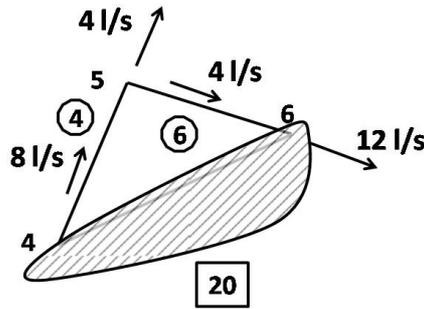


Figura 24 - Sub-RAA 8 do Exemplo 1

Tal como se pode observar na Figura 24 a sub-RAA 8 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante (reservatório e troços 1, 2, 3 e 5) é traduzido pela sub-RAA de extensão da sub-RAA de referência, designado por 20 na Figura 24.

Face ao exposto, é requerido um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 8 assim como o traçado do respectivo modelo hierárquico.

Na Tabela 9 está apresentado o processo de aglutinação da sub-RAA 8.

Tabela 9 - Processo de aglutinação da sub-RAA 8 do Exemplo1

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis_{max} (m)	Sub-RAA que se forma
1	4+6	2.28	12	2	0	8
2	2+20	—	—	—	—	21

Pela informação da na Tabela 9 é possível construir o modelo hierárquico da sub-RAA 8, Figura 25.

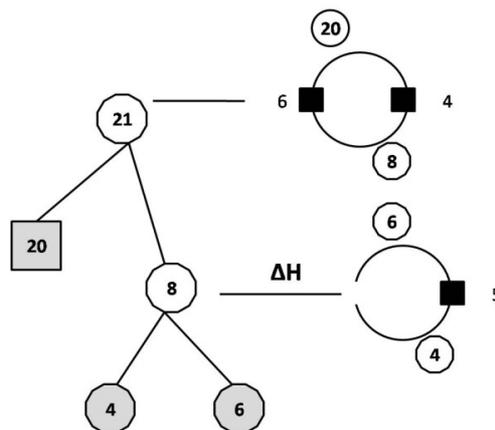


Figura 25 - Modelo hierárquico da sub-RAA 8 do Exemplo 1

É possível agora efectuar o processo de desaglutinação da sub-RAA 8.

Pelo modelo hierárquico da sub-RAA 8, Figura 25, verifica-se que as sub-RAA 21 e 8 apenas diferem no facto da sub-RAA 21 incluir a extensão da sub-RAA de referência, sub-RAA 20. Esta diferença não vai alterar os resultados obtidos pela análise da sub-

RAA 21 e sub-RAA 8. Então, pela desaglutinação da sub-RAA 21 e aplicando-se os critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 21 é constituída pelas sub-RAA 8 e 20. A sub-RAA 20 é a extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 8 é a seleccionada (N_R);
- A sub-RAA 8 é formada pelas sub-RAA primitivas 4 e 6. Como nenhuma destas RAA é a sub-RAA de referência e ambas estão ligadas a esta, então selecciona-se a sub-RAA 4 e o 4º critério de selecção, a sub-RAA que apresenta o maior valor de perda de carga total ($S_{\Delta H}$) foi o aplicado.

Com o dano da sub-RAA primitiva 4, a sub-RAA 8 ainda desempenha a função de abastecimento de água, o processo de desaglutinação tem que continuar. Como a sub-RAA 8 é apenas constituída pelas sub-RAA primitivas 4 e 6 resta provocar dano na sub-RAA primitiva 6 para que a sub-RAA 8 deixe de conseguir efectuar qualquer abastecimento de água. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 8 termina e é identificado o seguinte cenário de dano vulnerável, danificar o troço 4 seguido de dano no troço 6, ilustrada na Figura 26.

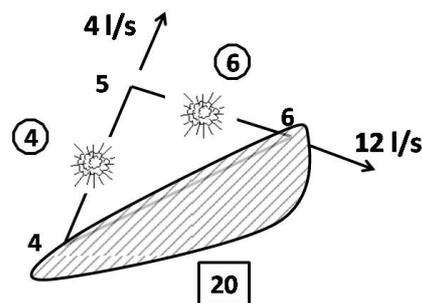


Figura 26 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 8: Dano no troço 4 seguido de dano no troço 6

Associado a este cenário de dano são quantificados os parâmetros de perda de rede (γ_r^-), de capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e de índice de vulnerabilidade (φ). Recorrendo às Expressões 1, 2 e 3 os valores para essas grandezas são os seguintes:

$$\gamma_r^- = 0.212; E_R = 0.333; \varphi = 0.636.$$

A Figura 27 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 1.

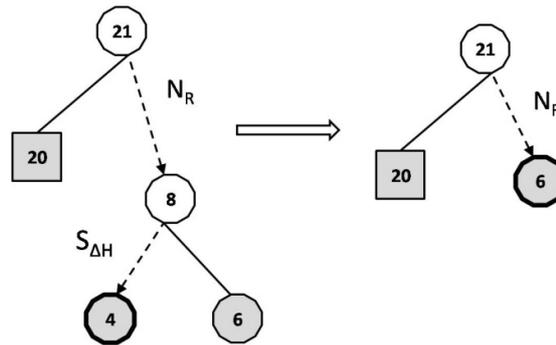


Figura 27 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 8 do Exemplo 1

O processo de desaglutinação da TVRAA identificou três cenários de dano vulnerável, mas no máximo essa RAA teria cinco cenários de dano vulnerável uma vez que o modelo hierárquico, Figura 9, tem seis sub-RAA (círculos a branco).

Sem utilizar a TVRAA, e aplicando a Expressão 4, ter-se-ia um número total de cenários de dano igual a 1956. Demonstra-se assim que o modelo hierárquico reduz substancialmente o número total de cenários de dano.

3.3.2 Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 1

Na Tabela 10 estão apresentados os cenários de dano vulneráveis resultantes da aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 1. Nesta tabela também estão indicados os parâmetros de vulnerabilidade de γ_r^- , E_R e φ associados a cada um desses cenários de dano.

Tabela 10 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 1

	Cenário de Dano	γ_r^-	E_R	φ
1	T1	1	0.167	6.0
2	T5 → T4	0.419	0.333	1.257
3	T4 → T6	0.212	0.333	0.636

De acordo com a Tabela 10, foram identificados três cenários de dano vulneráveis que são dano no troço 1 (T1), dano do troço 5 seguido de dano do troço 4 (T5 → T4) e dano do troço 4 seguido de dano do troço 6 (T4 → T6).

O *cenário de dano de colapso total* do Exemplo 1 corresponde ao primeiro cenário de dano vulnerável identificado, dano no troço 1 (T1) e porque é o que apresenta $\gamma_r^- = 1$.

O *cenário de dano de máxima vulnerabilidade* também é o primeiro cenário de dano vulnerável identificado, T1, uma vez que é aquele que apresenta o maior valor de φ ($\varphi = 6.0$). Neste exemplo, o cenário de dano vulnerável 1 (T1), Tabela 10, é simultaneamente o cenário de dano de colapso total e o cenário de dano de máxima vulnerabilidade. Este facto é uma coincidência e não é uma regra.

Na RAA do Exemplo 1 o *cenário de dano de mínima vulnerabilidade* corresponde ao troço 2 sofrer dano (T2), porque corresponde à última sub-RAA primitiva a ser aglutinada, tal como pode ser observado nas Figura 8 c ou Figura 9 ou, na Tabela 4 (passo 4).

No Exemplo 1 e de acordo com a Tabela 2, o *cenário de menor esforço para haver dano* corresponde a haver dano em qualquer um dos troços da RAA porque todos têm como capacidade resistente ao dano o mesmo valor, 6 kgf/cm^2 .

No *cenário de interesse do utilizador*, o utilizador poderá optar por analisar um cenário de dano específico e que não seja necessariamente um dos cenários de dano vulneráveis descritos nos pontos anteriores e que são identificados automaticamente pela TVRAA. No Exemplo 1 não foi analisado nenhum cenário de dano adicional.

3.4 Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 2

De forma a apresentar neste trabalho de investigação um expressivo número de exemplos de aplicação da TVRAA a RAA diversificadas apresenta-se agora o Exemplo 2. Considere-se para o Exemplo 2 a RAA representada na Figura 28.

A RAA da Figura 28 é formada por 7 troços (troços de 1 ao 7) e por 6 nós (nós de 1 ao 6). Esta RAA tem a particularidade de ser abastecida por dois reservatórios designados por 8 e 9.

Uma particularidade desta RAA é o facto de ser geométrica e hidraulicamente simétrica. Pretende-se verificar o efeito desta simetria nos resultados obtidos através da aplicação da TVRAA.

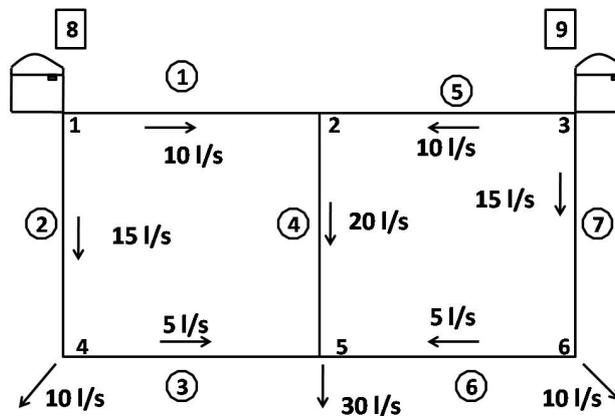


Figura 28 - RAA do Exemplo 2 em planta

Toda a RAA é formada por tubos de policloreto de vinílico (PVC) e com um valor de rugosidade de 0.01 mm. O valor da viscosidade cinemática da água foi considerado igual a $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

A pressão de serviço adoptada para o dimensionamento hidráulico da referida RAA foi de 6 Kgf/cm^2 .

Os diâmetros comerciais (D_{com}), os diâmetros interiores (D_{int}) e a espessura (esp) dos tubos podem ser consultados no Anexo A [11].

Para o dimensionamento da RAA foram arbitrados valores de duas variáveis: o valor da altura piezométrica a montante do troço 1, a altura de água no reservatório, igual a 3 m e pressão mínima a garantir no nó 2 da RAA com o valor de 25 m.c.a..

Após o dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 2 (Anexo B.II) é possível saber as características geométricas e hidráulicas da RAA que são necessárias para a aplicação da TVRAA. Essas características estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 2

Sub-RAA primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Caudal (l/s)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
1	1; 2	200	10	140	131.8	0.77	6
2	1; 4	100	15	160	150.6	0.42	6
3	4; 5	200	5	110	103.6	0.70	6
4	2; 5	100	20	200	188.2	0.24	6
5	2; 3	200	10	140	131.8	0.77	6
6	5; 6	200	5	110	103.6	0.70	6
7	3; 6	100	15	160	150.6	0.42	6

Por sua vez, na Tabela 12 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas, a montante (M) e a jusante (J), de cada troço da RAA do Exemplo 2.

Tabela 12 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.77	120.00	145.77	145.00	3.00	25.00
2	142.77	105.00	145.77	145.35	3.00	40.35
3	105.00	115.00	145.35	144.76	40.35	29.76
4	120.00	115.00	145.00	144.76	25.00	29.76
5	142.77	120.00	145.77	145.00	3.00	25.00
6	105.00	115.00	145.35	144.76	40.35	29.76
7	142.77	105.00	145.77	145.35	3.00	40.35

3.4.1 Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 2

Tal como já foi referido anteriormente a aplicação da TVRAA é constituída por três fases: processo de aglutinação, formação do modelo hierárquico e processo de desaglutinação. Todos estes processos já foram devidamente apresentados e descritos anteriormente.

3.4.1.1 Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 2

De acordo com os critérios de selecção do processo de aglutinação obtêm-se o desenvolvimento apresentado de forma sumária, Tabela 13, resultante do processo de aglutinação.

Tabela 13 - Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 2

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis_{max} (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+2	1.188	12	3	0	—
	1+4	1.009	12	4	0	—
	1+5	1.536	12	3	0	—
	2+3	1.123	12	3	0	—
	3+4	0.944	12	4	100.00	10
	3+6	1.405	12	3	100.00	—
	4+5	1.009	12	4	0	—
	4+6	0.944	12	4	100.00	—
	5+7	1.188	12	3	0	—
	6+7	1.123	12	3	0	—
2	1+2	1.188	12	3	0	—
	1+10	1.711	18	4	0	—
	1+5	1.536	12	3	0	—
	2+10	1.364	18	4	0	—
	6+10	1.646	18	4	100	—
	5+10	1.711	18	4	0	—
	5+7	1.188	12	3	0	—
	6+7	1.123	12	3	0	11
3	1+2	1.188	12	3	0	12
	1+10	1.711	18	4	0	—
	1+5	1.536	12	3	0	—
	2+10	1.364	18	4	0	—
	10+11	2.066	24	4	0	—
	5+10	1.711	18	4	0	—
	5+11	1.891	18	4	0	—
4	10+12	2.132	24	2	0	—
	5+12	1.956	18	3	0	—
	10+11	2.066	24	4	0	—
	5+10	1.711	18	4	0	13
	5+11	1.891	18	4	0	—
5	12+13	2.899	30	2	0	—
	11+13	2.834	30	2	0	14
6	12+14	4.022	—	—	—	15
7	8+15	—	—	—	—	16
8	9+16	—	—	—	—	17

Pela informação apresentada na Tabela 13 observa-se que neste exemplo foi necessário recorrer ao quinto e último critério de selecção do processo de aglutinação, escolha livre (F_c), no primeiro passo do processo de aglutinação para se efectuar selecção entre os candidatos a formar uma sub-RAA sub-RAA 3 e 4, e 4 e 6. Este facto ocorreu uma vez que todos os critérios anteriores ao da escolha livre não foram suficientes para efectuar uma escolha.

Nos restantes passos do processo de aglutinação foi sempre utilizado o primeiro critério de selecção, menor perda de carga total.

Esta informação ilustra que o processo de aglutinação tem em conta a simetria existente na RAA do Exemplo 2.

Para melhor percepção da aplicação do processo de aglutinação à RAA do Exemplo 2, a Figura 29 apresenta esquematicamente esse procedimento, passo a passo.

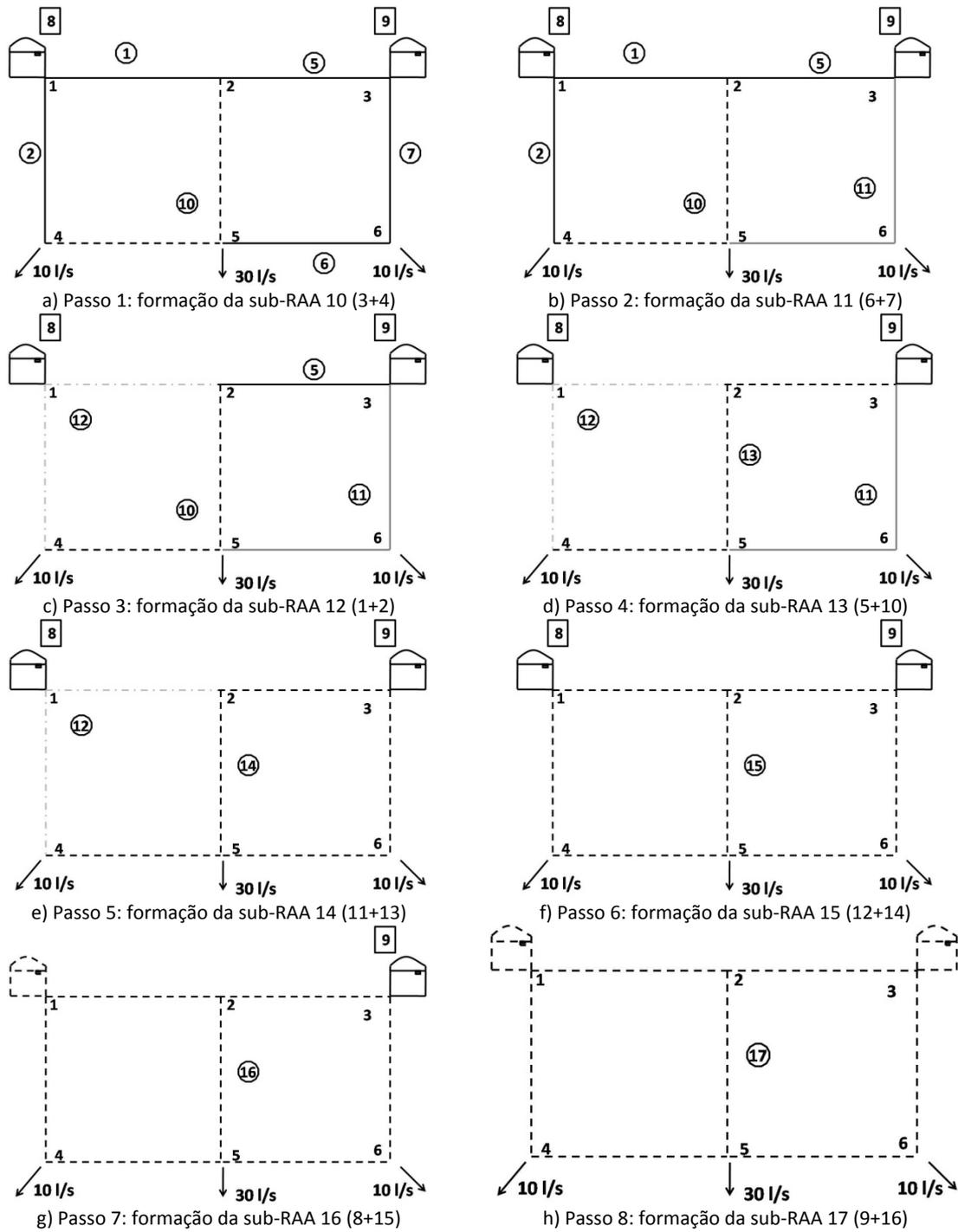


Figura 29 - Representação esquemática da aplicação do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 2

- A sub-RAA 15 é constituída pelas sub-RAA 12 e 14. É necessário recorrer ao quarto critério de selecção do processo de desaglutinação, seleccionar a sub-RAA que apresente maior valor de perda de carga total ($S_{\Delta H}$), e a sub-RAA seleccionada é a sub-RAA 14.
- A sub-RAA 14 é formada pelas sub-RAA 11 e 13. Recorrendo ao quarto critério a sub-RAA seleccionada é a sub-RAA 13, uma vez que apresenta um valor maior de perda de carga total.
- A sub-RAA 13 é formada pela sub-RAA 10 e pela sub-RAA primitiva 5. Uma vez que a sub-RAA 5 está ligada directamente à sub-RAA de referência é a seleccionada, e o critério utilizado foi C_D .

Quando a sub-RAA 5 sofre dano a sub-RAA 17 ainda tem desempenha a função de abastecimento de água. O processo de desaglutinação da sub-RAA 17 tem que continuar. É necessário um novo processo de aglutinação, que por simplificação não é aqui apresentado, agora sem a sub-RAA primitiva que acabou de sofrer dano (sub-RAA 5). Do processo de aglutinação da RAA sem a sub-RAA 5 resulta o modelo hierárquico ilustrado na Figura 31.

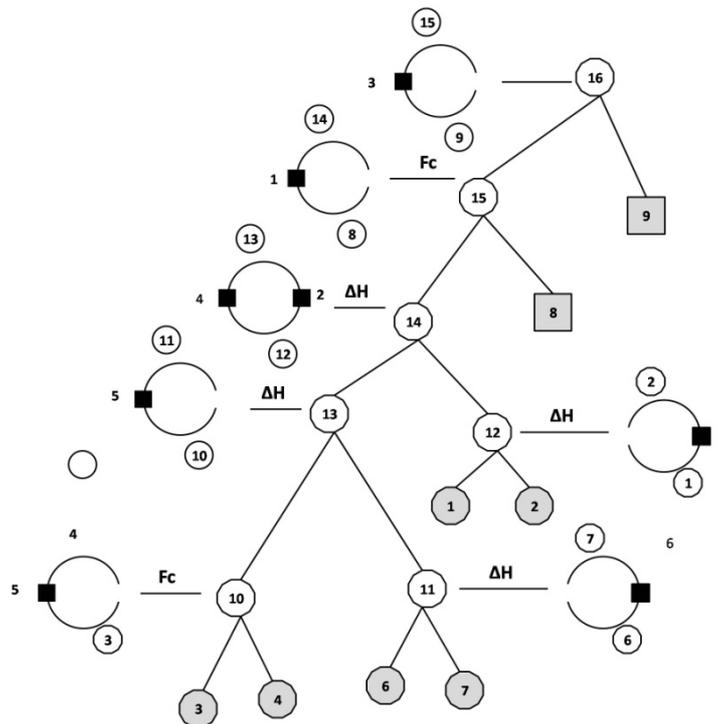


Figura 31 - Modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2 sem a sub-RAA 5

É analisada a sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico, representado na Figura 31, a sub-RAA 16. A aplicação do processo de desaglutinação tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 13 é constituída pelas sub-RAA 8 e 12. Uma vez que a sub-RAA 8 é uma sub-RAA de referência então a sub-RAA 12 é seleccionada, sendo o critério aplicado N_R ;
- A sub-RAA 12 é formada pelas sub-RAA 6 e 11. A sub-RAA 11 é a seleccionada, foi aplicado o critério C_D ;
- A sub-RAA 11 é formada pelas sub-RAA 2 e 10. A sub-RAA primitiva 2 é a seleccionada, e foi aplicado o critério C_D .

Com o dano na sub-RAA primitiva 2 a sub-RAA 17 da Figura 30, deixa de conseguir abastecer água a qualquer ponto a ela associada. Deste modo, termina o processo de desaglutinação da sub-RAA 17 e é identificado o cenário de dano vulnerável constituído pela seguinte sequência de eventos: T5 → T7 → T1 → T2, Figura 34.

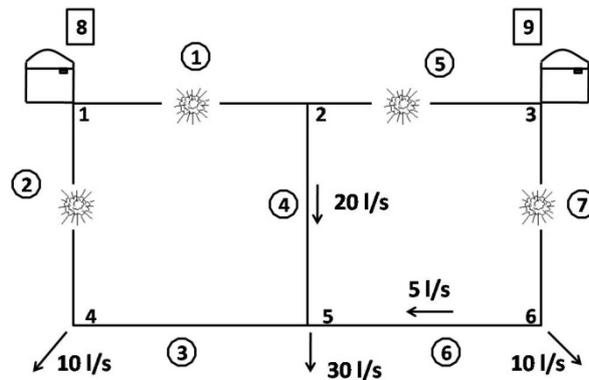


Figura 34 – Primeiro cenário de dano vulnerável do Exemplo 2, T5 → T7 → T1 → T2

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.571; \varphi = 1.750.$$

Também se observa na Figura 34 o facto do processo de desaglutinação ter também em conta a simetria de uma RAA.

3.4.1.3.2 Desaglutinação da sub-RAA 16

O processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 2 prossegue com a desaglutinação da sub-RAA seguinte. Descendo do topo superior do modelo hierárquico para a base, Figura 30, é a sub-RAA 16.

As sub-RAA 16 e 17 apenas diferem no facto da sub-RAA 17 incluir adicionalmente a sub-RAA de referência 9. Esta diferença não vai alterar o resultado obtido para a sub-RAA 17 se a sub-RAA 16 for analisada. Sendo o cenário de dano vulnerável resultante da sub-RAA 16 é a sequência de eventos de dano identificados na desaglutinação da sub-RAA 17.

3.4.1.3.3 Desaglutinação da sub-RAA 15

O processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 2 prossegue com a desaglutinação da sub-RAA seguinte, que pelo modelo hierárquico da Figura 30 é a sub-RAA 15.

As sub-RAA 15 e 16 apenas diferem no facto da sub-RAA 16 incluir adicionalmente a sub-RAA de referência 8. Esta diferença não vai alterar o resultado obtido para a sub-RAA 16 se a sub-RAA 15 for analisada. Sendo que o cenário de dano vulnerável resultante para a sub-RAA 15 a sequência de eventos de dano identificados na desaglutinação da sub-RAA 16.

3.4.1.3.4 Desaglutinação da sub-RAA 14

O processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 2 segue com a análise da sub-RAA 14. A sub-RAA 14 está ilustrada na Figura 35.

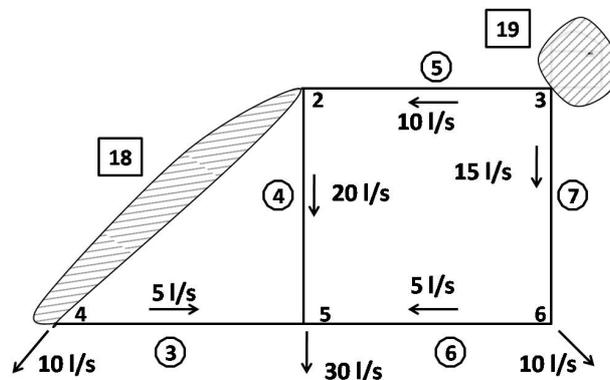


Figura 35 - Sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2

Tal como se pode observar na Figura 35, a sub-RAA 14 é agora vista como sendo uma sub-RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante da sub-RAA 14, reservatório 8, troço 1 e 2 é traduzido pela extensão da sub-RAA de referência designada por 18, enquanto que o efeito do reservatório 9 é traduzido pela extensão da sub-RAA de referência designada por 19.

Face ao exposto, é requerido um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 14, que por simplificação não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 14 resultante está apresentado na Figura 36.

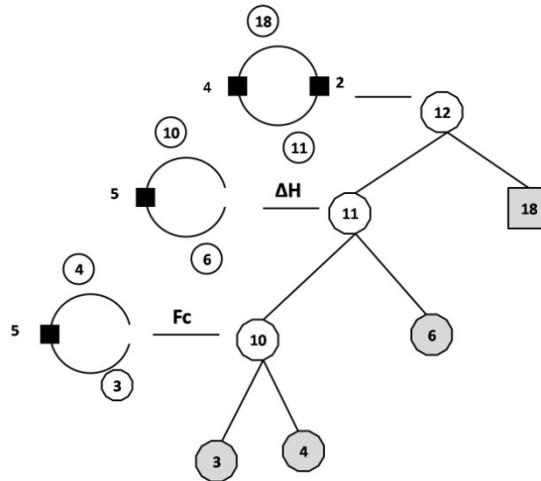


Figura 38 - Modelo hierárquico da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2, sem os troços 5 e 7
 Pela observação do modelo hierárquico da Figura 38 verifica-se que neste momento a RAA resultante é apenas abastecida por uma extensão de sub-RAA de referência, designada por 18. Este facto ocorre devido ao dano aplicado anteriormente na sub-RAA 7, uma vez que era o último troço que ligava a sub-RAA em causa com a extensão de sub-RAA de referência 19.

O processo de desaglutinação prossegue com a análise da sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico da Figura 38, sub-RAA 12, e tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 11 só difere da sub-RAA 12 pelo facto desta incluir a ligação à extensão da sub-RAA de referência 18. Então a sub-RAA 11 é a analisada, uma vez que, por simplificação, a extensão da sub-RAA de referência não é susceptível de sofrer dano.
- A sub-RAA 11 é constituída pela sub-RAA primitiva 6 e pelas sub-RAA 10. A sub-RAA 10 é seleccionada e o critério utilizado foi C_D ;
- A sub-RAA 10 é constituída pelas sub-RAA primitivas 3 e 4. A sub-RAA 3 é seleccionada e o critério utilizado foi $S_{\Delta H}$.

Com o dano no troço 3 a sub-RAA em análise ainda consegue desempenhar a função abastecedora, por este motivo o processo de desaglutinação tem que prosseguir. É necessário um novo processo de aglutinação que, por simplificação, não é aqui apresentado, agora sem a sub-RAA primitiva que acabou de sofrer dano (sub-RAA 3). Do processo de aglutinação da sub-RAA 14 sem a sub-RAA 3, 5 e 7 resulta o modelo hierárquico ilustrado na Figura 39.

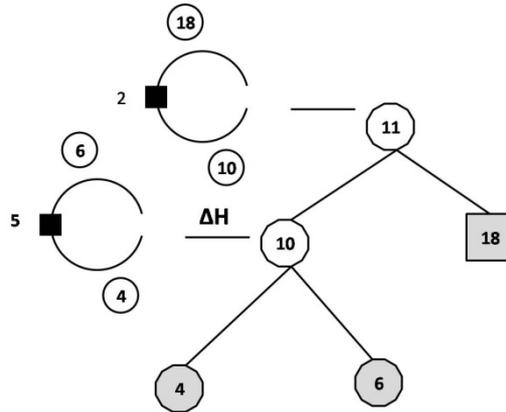


Figura 39 - Modelo hierárquico da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2, sem os troços 3, 5 e 7
O processo de desaglutinação continua com a análise da sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico da Figura 39, sub-RAA 11, e tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 11 inclui a ligação à extensão da sub-RAA de referência 18, então a sub-RAA 10 é seleccionada, N_R ;
- A sub-RAA 10 é constituída pelas sub-RAA primitivas 4 e 6. A sub-RAA 4 é seleccionada a sofrer dano, e o critério de selecção foi C_D .

Com o dano no troço 4 a sub-RAA em análise, sub-RAA 14 do Exemplo 2, deixa de abastecer água a qualquer ponto a ela associada. Assim termina o processo de desaglutinação da sub-RAA 14 e é identificado o cenário de dano vulnerável constituído pela seguinte sequência de eventos de dano: T5 → T7 → T3 → T4, Figura 34.

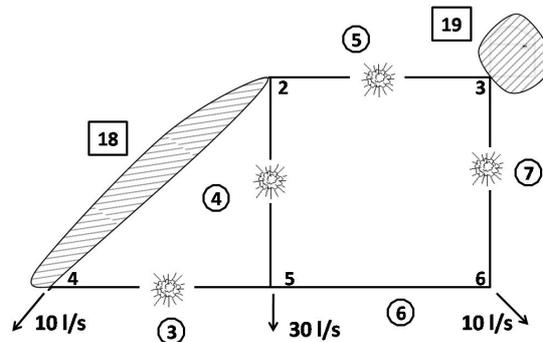


Figura 40 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 14 da RAA do Exemplo 2

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para estas grandezas:

$$\gamma_r^- = 0.705; E_R = 0.571; \varphi = 1.233.$$

3.4.1.3.5 Desaglutinação da sub-RAA 13

Descendo no sentido do topo do modelo hierárquico (Figura 30) para a base, a sub-RAA a ser desaglutinada de seguida é a sub-RAA 13. A sub-RAA 13 está apresentada na Figura 41.

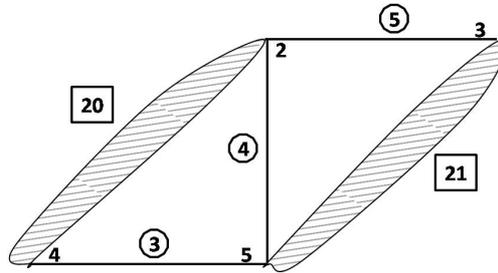


Figura 41 - Sub-RAA 13 do Exemplo 2

A sub-RAA 13 é vista como sendo uma sub-RAA autónoma. O efeito da restante RAA, reservatórios e troços 1, 2, 6 e 7, é traduzido pelas extensões de sub-RAA de referência, designadas por 20 e 21 na Figura 41.

É requerido um novo processo de aglutinação que, por simplificação não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 13 está apresentado na Figura 42.

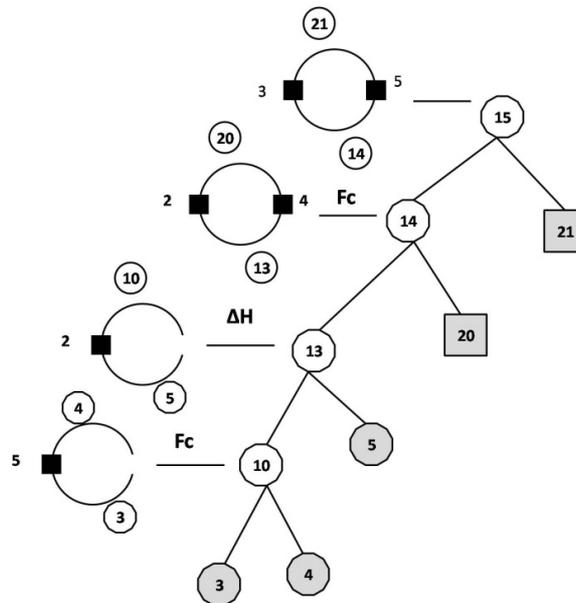


Figura 42 - Modelo hierárquico da sub-RAA 13 da RAA do Exemplo 2

O processo de desaglutinação prossegue com a análise da sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico, Figura 42, sub-RAA 15. O processo de desaglutinação tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 13 difere das sub-RAA 14 e 15 apenas pelo facto de estas incluírem adicionalmente a extensão das sub-RAA de referência, então a sub-RAA 13 passa a ser a sub-RAA a analisar.

- A sub-RAA 13 é constituída pela sub-RAA primitiva 5 e pela sub-RAA 10. A sub-RAA 5 é seleccionada e o critério de selecção utilizado foi L_C .

Com o dano do troço 5, a sub-RAA em análise, sub-RAA 13 do Exemplo 14, ainda desempenha a função de abastecimento de água à sub-RAA, o processo de desaglutinação tem de continuar. É necessário um novo processo de aglutinação que, por simplificação não é aqui apresentado, agora sem a sub-RAA que acabou de sofrer dano (sub-RAA 5). Do processo de aglutinação da sub-RAA 13 sem a sub-RAA 5 resulta o modelo hierárquico representado na Figura 43.

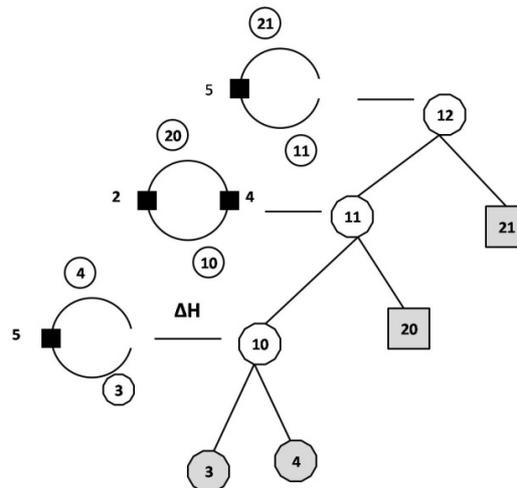


Figura 43 - Modelo hierárquico da sub-RAA 13 do Exemplo 4, sem o troço 5

O processo de desaglutinação prossegue com a análise da sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico, sub-RAA 12 e tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 12 é formada pelas sub-RAA 11 e 21. Como a sub-RAA 21 é extensão de sub-RAA de referência então a sub-RAA 11 é seleccionada, N_R ;
- A sub-RAA 11 é formada pelas sub-RAA 10 e 20. Como a sub-RAA 20 é extensão de sub-RAA de referência a sub-RAA 10 é seleccionada, N_R ;
- A sub-RAA 10 é formada pelas sub-RAA primitivas 3 e 4. Como a sub-RAA 3 apresenta um valor de perda de carga superior é a seleccionada e o critério $S_{\Delta H}$ foi utilizado.

Após o dano no troço 3 a sub-RAA em análise ainda consegue abastecer a sub-RAA, por isso o processo de desaglutinação tem de continuar. É necessário um novo processo de aglutinação, que por simplificação não é aqui apresentado, agora sem a sub-RAA que acabou de sofrer dano (sub-RAA 3).

Neste momento a sub-RAA 13 do Exemplo 14 sofreu dano nos troços 3 e 5, e como é constituída pelas sub-RAA 3, 4 e 5, resta provocar dano no troço 4 para que a sub-RAA deixe de desempenhar a função de abastecimento de água.

Termina assim o processo de desaglutinação da sub-RAA 13 do Exemplo 2 identificando o cenário de dano vulnerável constituído pela seguinte sequência de eventos de dano: T5 → T3 → T4, Figura 44.

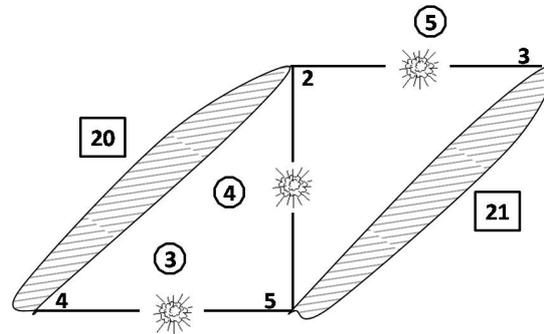


Figura 44 - Cenário de dano da sub-RAA 13 do Exemplo 2

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas:

$$\gamma_r^- = 0.425; E_R = 0.429; \varphi = 0.993.$$

3.4.1.3.6 Desaglutinação da sub-RAA 12

O processo de desaglutinação prossegue com a análise da sub-RAA seguinte. Através do modelo hierárquico da RAA do Exemplo 2, Figura 30, observa-se que a sub-RAA seguinte a ser desaglutinada é a sub-RAA 12. A sub-RAA 12 está ilustrada na Figura 45.

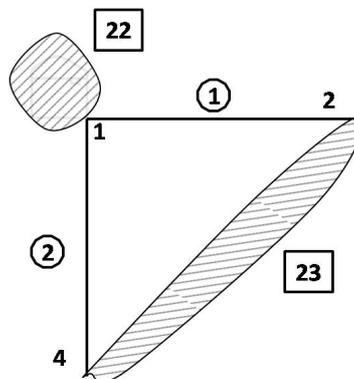


Figura 45 - Sub-RAA 12 do Exemplo 2

Tal como se pode verificar na Figura 45, a sub-RAA 12 é vista agora como sendo uma sub-RAA autónoma. O efeito da restante RAA do Exemplo 2, troços 3, 4, 5, 6, 7 e reservatórios 8 e 9, é traduzido pelas extensões de sub-RAA de referência 22 e 23.

É requerido um novo processo de aglutinação que, por simplificação, não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 14 está apresentado na Figura 46.

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1.1, 1.2 e 1.3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas.

$$\gamma_r^- = 0.295; E_R = 0.286; \varphi = 1.034.$$

3.4.1.3.7 Desaglutinação da sub-RAA 11

O processo de desaglutinação continua com a análise da sub-RAA seguinte. Como se pode observar no modelo hierárquico, Figura 30, a próxima sub-RAA a ser desaglutinada é a sub-RAA 11. A sub-RAA 11 está representada na Figura 48.

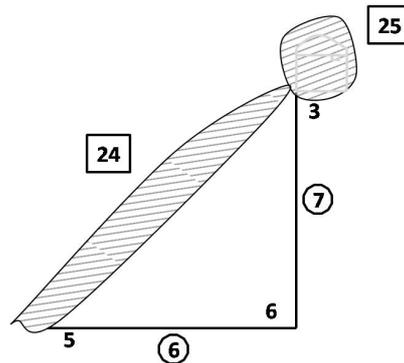


Figura 48 - Sub-RAA 11 do Exemplo 2

Tal como se pode verificar na Figura 48, a sub-RAA 11 é vista agora como sendo uma sub-RAA autónoma. O efeito da restante RAA do Exemplo 2, troços 1, 2, 3, 4, 5, e reservatórios 8 e 9, é traduzido pelas extensões de sub-RAA de referência 24 e 25.

É requerido um novo processo de aglutinação que, por simplificação não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 11 está apresentado na Figura 49.

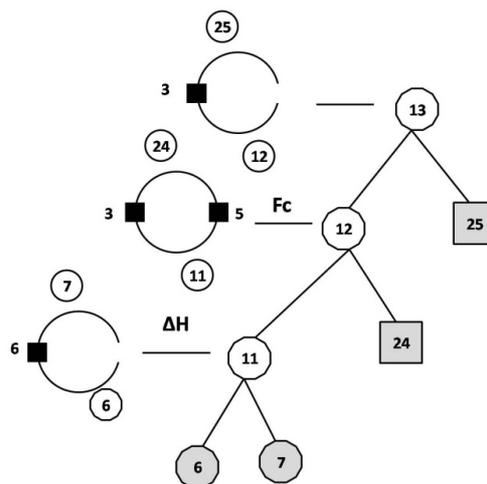


Figura 49 - Modelo hierárquico da sub-RAA 11 do Exemplo 2

O processo de desaglutinação prossegue com a análise da sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico, Figura 49. Neste caso será a sub-RAA 13. O processo de desaglutinação tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 11 apenas difere das sub-RAA 12 e 13, pelo facto desta incluir adicionalmente as extensões de sub-RAA de referência 24 e 25. Por este motivo, a sub-RAA 11 passa a ser a sub-RAA a analisar.
- A sub-RAA 11 é constituída pelas sub-RAA primitivas 6 e 7. A sub-RAA 6 é a seleccionada e o critério aplicado foi o maior valor de perda de carga, $S_{\Delta H}$.

Com o dano no troço 6 a sub-RAA em análise ainda desempenha a função de abastecimento de água. O processo de aglutinação tem de continuar. Como a sub-RAA 11 é constituída apenas pelas sub-RAA primitivas 6 e 7 e para que esta deixe de desempenhar a função de abastecimento, resta provocar dano na sub-RAA 7.

Assim, termina o processo de desaglutinação da sub-RAA 11 do Exemplo 2 e é identificado o cenário de dano vulnerável constituído pela seguinte sequência de eventos de dano T6→T7, Figura 50.

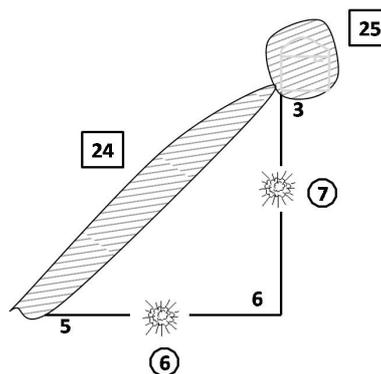


Figura 50 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 11 do Exemplo 2

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas:

$$\gamma_r^- = 0.279; E_R = 0.286; \varphi = 0.977$$

3.4.1.3.8 Desaglutinação da sub-RAA 10

O processo de desaglutinação do Exemplo 2 termina, finalmente, com a análise da sub-RAA 10. A sub-RAA está ilustrada na Figura 51.

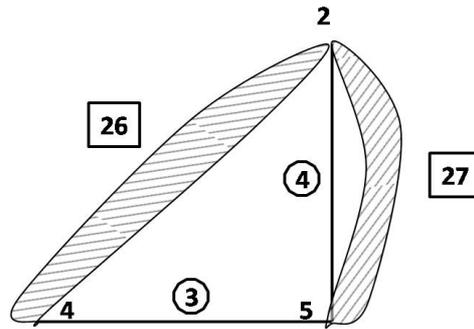


Figura 51 - Sub-RAA 10 do Exemplo 2

A sub-RAA 10 é vista como sendo uma sub-RAA autónoma. O efeito da restante RAA do Exemplo 2, reservatórios e troços 1, 2, 5, 6 e 7, é traduzido pelas extensões de sub-RAA de referência, designadas por 26 e 27 na Figura 51.

É requerido um novo processo de aglutinação, que por simplificação não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 10 está apresentado na Figura 52.

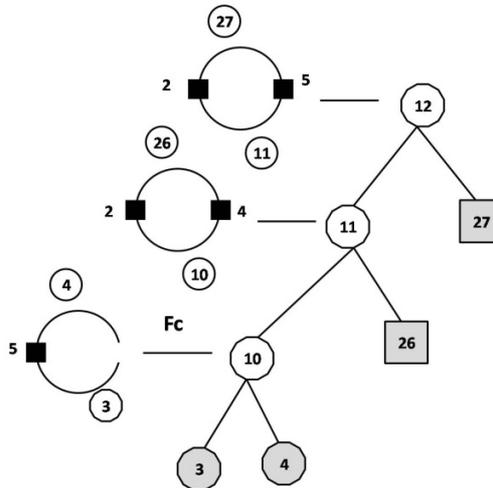


Figura 52 - Modelo hierárquico da sub-RAA 10 do Exemplo 2

O processo de desaglutinação prossegue com a análise da sub-RAA que surge no topo do modelo hierárquico, Figura 52. Neste caso é a sub-RAA 12. O processo de desaglutinação tem o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 10 apenas difere das sub-RAA 11 e 12, pelo facto de esta estar ligada às extensões de sub-RAA de referência 26 e 27. Por este motivo, a sub-RAA 10 passa a ser a sub-RAA a analisar;
- A sub-RAA 10 é constituída pelas sub-RAA primitivas 3 e 4. A sub-RAA 3 é a seleccionada e o critério aplicado foi o maior valor de perda de carga, $S_{\Delta H}$.

Com o dano no troço 3 a sub-RAA em análise ainda desempenha a função de abastecimento de água. O processo de aglutinação tem de continuar. Como a sub-RAA 10 é constituída apenas pelas sub-RAA primitivas 3 e 4, para que esta deixe de desempenhar a função de abastecimento, resta provocar dano na sub-RAA 4.

Assim, termina o processo de desaglutinação da sub-RAA 10 do Exemplo 2 e é identificado o cenário de dano vulnerável constituído pela seguinte sequência de eventos de dano: T3→T4, Figura 53.

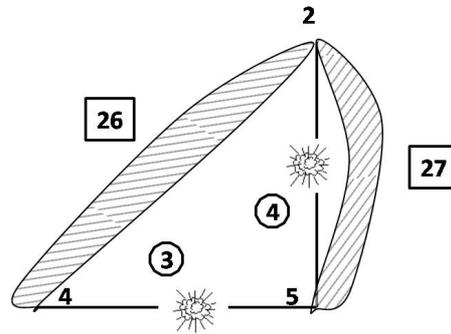


Figura 53 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 10 do Exemplo 2

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas a perda de rede (γ_r^-), a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas:

$$\gamma_r^- = 0.235; E_R = 0.286; \varphi = 0.821$$

O processo de desaglutinação da TVRAA identificou seis cenários de dano vulnerável, mas no máximo essa RAA teria sete cenários de dano vulnerável e uma vez que o modelo hierárquico, Figura 30, tem oito sub-RAA (círculos a branco).

Sem utilizar a TVRAA, e aplicando a Expressão 4, teríamos um número total de cenários de dano igual a 13699, obtendo deste modo uma redução significativa de cenários de dano vulneráveis e detectados pela TVRAA.

3.4.2 Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 2

Na Tabela 14 estão apresentados os cenários de dano vulneráveis resultantes da aplicação da TVRAA à da RAA do Exemplo 2. Nesta tabela, os parâmetros de vulnerabilidade de γ_r^- , E_R e φ associados a cada um desses cenários também estão indicados.

Tabela 14 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 2

	Cenário de Dano	γ_r^-	E_R	φ
1	T5→T7→T1→T2	1	0.571	1.750
2	T5→T7→T3→T4	0.705	0.571	1.233
3	T5→T3→T4	0.425	0.429	0.993
4	T1→T2	0.295	0.286	1.034
5	T6→T7	0.279	0.286	0.977
6	T3→T4	0.235	0.286	0.821

Do processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 2 resultaram seis cenários de dano vulneráveis, Tabela 14.

No Exemplo 2 o *cenário de dano de colapso total* corresponde ao primeiro cenário de dano vulnerável identificado, $T5 \rightarrow T7 \rightarrow T1 \rightarrow T2$, porque é o que apresenta $\gamma_r^- = 1$.

Como a RAA do Exemplo 2 é simétrica, a nível geométrico e hidráulico, os cenários de dano vulneráveis identificados podem ser constituídos por outra sequência de eventos de dano, uma vez que no processo de desaglutinação se utiliza o critério de escolha livre. O *cenário de dano de colapso total* pode também corresponder a $T1 \rightarrow T2 \rightarrow T5 \rightarrow T7$.

O *cenário de dano de máxima vulnerabilidade* também é o primeiro cenário de dano vulnerável identificado, $T5 \rightarrow T7 \rightarrow T1 \rightarrow T2$, uma vez que é aquele que apresenta o maior valor de φ ($\varphi = 1.75$). Neste exemplo o *cenário de dano de máxima vulnerabilidade* é simultaneamente o *cenário de dano de colapso total*.

Neste exemplo existe mais do que um *cenário de dano de mínima vulnerabilidade*. Este cenário pode ser dano no troço 1 ou dano no troço 2. Isto acontece porque ambas as sub-RAA são sub-RAA primitivas que foram aglutinadas (em conjunto) no último passo do processo de aglutinação da TVRAA, Figura 29 e).

No Exemplo 1 e de acordo com a Tabela 11, o *cenário de menor esforço para haver dano* corresponde a haver dano em qualquer um dos troços da RAA porque todos têm o mesmo valor de capacidade resistente ao dano, 6 kgf/cm^2 .

3.5 Considerações finais

O principal objectivo deste capítulo foi consolidar os conhecimentos sobre a TVRAA bem com efectuar a sua aplicação a exemplos de RAA. Este objectivo foi concretizado com a aplicação da TVRAA às RAA dos Exemplos 1 e 2.

Nestes dois exemplos de RAA, a aplicação da TVRAA foi complementada com uma descrição detalhada de todos os processos que a teoria contempla, assim como foram apresentadas pela primeira vez todos os cálculos relativos à aplicação da TVRAA.

A descrição do processo de aglutinação inclui tabelas com os parâmetros utilizados e necessários à selecção de candidatos e também incluiu ilustrações do processo progressivo de aglutinação de modo a facilitar a compreensão de todo este processo.

Foram também apresentados os esquemas ilustrativos dos modelos hierárquicos e o processo de desaglutinação foi também detalhadamente descrito.

A utilidade do modelo hierárquico de uma RAA foi evidenciada pois reduz significativamente o número de cenários de dano a estudar.

Foram identificados os cenários de dano vulneráveis resultantes da aplicação da TVRAA, bem como, os valores dos parâmetros de vulnerabilidade associados a cada um.

4 VALIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AGLUTINAÇÃO DA TVRAA

4.1 Objectivos

Os principais objectivos deste capítulo são os seguintes:

- Validar a relevância dos critérios de selecção no processo de aglutinação;
- Validar a ordem de aplicação dos respectivos critérios definidos e propostos para o processo de aglutinação da TVRAA.

4.2 Introdução

Nos exemplos de aplicação da TVRAA documentados o primeiro critério de aglutinação designado por menor perda de carga total foi sempre o utilizado no processo de aglutinação. Este facto suscitou algumas dúvidas quanto à relevância da existência dos cinco critérios definidos no processo de aglutinação da TVRAA e à sua ordem de aplicação atendendo a que estes factos foram transpostos, após adaptação, da teoria da vulnerabilidade estrutural para a TVRAA.

Para se conseguir atingir o objectivo deste capítulo foi estabelecida inicialmente como meta, a aplicação da TVRAA a um único exemplo de uma RAA em que a aplicação de todos os critérios de aglutinação previstos no processo de aglutinação se processasse.

A dificuldade em atingir tal meta ficou bem visível após a tentativa de resolução de vários exemplos de RAA sem que todos os critérios de aglutinação fossem aplicados em simultâneo. Por isso, a demonstração da aplicação de todos os critérios de aglutinação do processo de aglutinação será efectuada através da aplicação da TVRAA a dois exemplos de RAA e que a seguir se descrevem e são designados por Exemplo 3 e Exemplo 4.

Outro aspecto tido em conta nesta fase da investigação foi usar exemplos de RAA muito simples de forma a facilitar e a simplificar a análise de resultados.

Para que o critério de menor perda de carga total não seja utilizado é necessário que na RAA haja sub-RAA com perda de carga igual.

Outra dificuldade que se encontrou foi o emergir de algumas dúvidas quanto à aplicação do processo de aglutinação da TVRAA e uma vez, que os exemplos de aplicação desta teoria até à data apenas contemplavam a aplicação do primeiro critério de aglutinação.

Com o objectivo de dissipar e esclarecer possíveis futuras dúvidas relativamente à aplicação do processo de aglutinação, os Exemplos 3 e 4 incluem uma explicação

detalhada da aplicação deste processo e, deste modo, a apresentação desta informação é inédita e pode ser preciosa em trabalhos de investigação futuros a realizar neste contexto.

4.3 Descrição da RAA do Exemplo 3

Considere-se então como Exemplo 3 a RAA representada na Figura 54 em planta.

Esta RAA é formada por 4 troços (troços de 1 ao 4) e por 5 nós (nós de 1 ao 5). O reservatório é designado por 5.

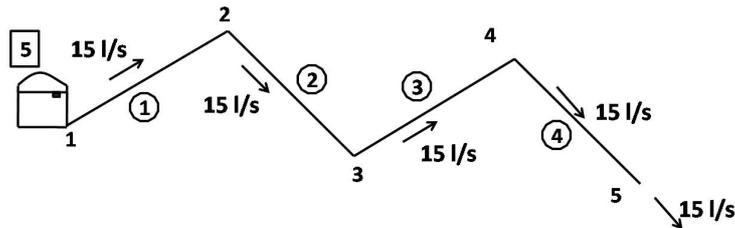


Figura 54 - RAA do Exemplo 3 em planta

Toda a RAA é formada por tubos de policloreto de vinílico (PVC) e com um valor de rugosidade absoluta equivalente (adiante designada por rugosidade) de 0.01 mm. O valor da viscosidade cinemática da água foi considerado igual a $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

A pressão de serviço adoptada para o dimensionamento hidráulico da referida RAA foi de 6 Kgf/cm^2 . Os diâmetros comerciais (D_{com}), os diâmetros interiores (D_{int}) e a espessura (esp) dos tubos podem ser consultados no Anexo A [11].

Após o dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 3 e cujos cálculos não são aqui apresentados por simplificação (Anexo B.III), é possível saber as características geométricas e hidráulicas da RAA que são necessárias para a aplicação da TVRAA. Essas características estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 3

Sub-RAA primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Caudal (l/s)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
1	1; 2	200	15	160	150.6	0.84	6
2	2; 3	200	15	160	150.6	0.84	6
3	3; 4	200	15	160	150.6	0.84	6
4	4; 5	200	15	160	150.6	0.84	6

Por sua vez, na Tabela 16 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas, a montante (M) e a jusante (J), de cada troço da RAA do Exemplo 3. Tal como se pode verificar através do valor da altura piezométrica a montante do troço 1, a altura de água no reservatório foi considerada igual a 3 m.

para a selecção do candidato a sub-RAA a ser aglutinada e, são calculados na sua totalidade, sempre que uma sub-RAA é escolhida.

Na Tabela 17 está apresentado todo o processo da primeira selecção do primeiro passo do processo de aglutinação, e que se trata da selecção entre os candidatos sub-RAA 1 com 2 e sub-RAA 2 com 3. Este processo de selecção é descrito seguidamente.

Tabela 17 - Selecção entre os primeiros candidatos sub-RAA 1 com 2 e Sub-RAA 2 com 3, do primeiro passo de aglutinação do Exemplo 3

Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)
1+2	1.68	12	1	-
2+3	1.68	12	2	-

Na Tabela 17 estão apresentados os valores dos parâmetros de vulnerabilidade necessários para a selecção entre os dois primeiros candidatos a serem aglutinados.

Inicialmente utiliza-se o primeiro critério de selecção, menor perda de carga total. Como a perda de carga total dos dois candidatos é igual, passa-se ao segundo critério do processo de aglutinação, máxima capacidade resistente ao dano. Como se pode verificar através da Tabela 17 (3ª coluna) o segundo critério de aglutinação também não é suficiente para se efectuar uma selecção porque ambos os candidatos apresentam igual valor de capacidade resistente ao dano ($E = 12 \text{ kgf/cm}^2$).

Passa-se então à aplicação do terceiro critério de selecção, máxima conexão nodal. Este terceiro critério tem que ser o utilizado pois permite seleccionar o candidato sub-RAA 2 com 3 e uma vez que este tem valor de conexão nodal ($\eta = 2$) superior ao outro candidato ($\eta = 1$).

É agora necessário calcular os restantes parâmetros de vulnerabilidade do candidato seleccionado. O cálculo dos parâmetros de vulnerabilidade dos candidatos a sub-RAA vai ser efectuado consoante for necessário para a selecção, tal como no caso da Tabela 17 em que não foi calculado o parâmetro de máxima distância ao reservatório. Este procedimento constitui uma perda de informação para quem visualiza e tenta verificar analiticamente exemplos de aplicação da TVRAA. Contudo, este procedimento poderá ter um contributo importante na rapidez do cálculo numérico de exemplos de RAA aplicando a TVRAA através de um programa de cálculo automático, uma vez que, uma RAA real poderá ter centenas de troços e nós.

O primeiro passo do processo de aglutinação prossegue comparando o candidato anteriormente seleccionado (sub-RAA 2 com 3) com o candidato seguinte (sub-RAA 3 com 4). Na Tabela 18 estão apresentados os valores dos parâmetros de

vulnerabilidade necessários para a selecção entre estes dois candidatos a serem aglutinados.

Tabela 18 - Selecção entre os candidatos sub-RAA 2 com 3 e Sub-RAA 3 com 4, do primeiro passo de aglutinação do Exemplo 3

Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)
2+3	1.68	12	2	200
3+4	1.68	12	1	-

Os critérios de aglutinação devem ser sempre utilizados segundo a ordem de importância, do primeiro até ao quinto.

Nesta altura pode-se verificar que o primeiro critério a poder ser utilizado é a máxima conexão nodal uma vez que nos dois candidatos os valores da perda de carga total e da capacidade resistente ao dano são iguais. O candidato sub-RAA 2 +3 continua a ser o seleccionado uma vez que tem um valor de conexão nodal ($\eta = 2$) superior ao outro candidato ($\eta = 1$).

Como, neste momento, não existem mais sub-RAA passíveis de ser aglutinadas então o primeiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3 termina, sendo deste modo seleccionado, pelo critério de máxima conexão nodal, o candidato constituído pelas sub-RAA 2 e 3 e formando assim a nova sub-RAA designada por 6. Na Tabela 19 está apresentado de forma resumida a totalidade do procedimento efectuado durante o primeiro passo de aglutinação assim como os valores de todos os parâmetros de vulnerabilidade.

Tabela 19 - Primeiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+2	1.68	12	1	0	—
	2+3	1.68	12	2	200	6
	3+4	1.68	12	1	400	—

De forma a complementar esta informação, a

Figura 56 ilustra de forma gráfica o primeiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3.

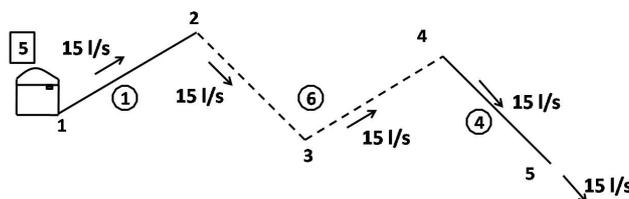


Figura 56 - Ilustração do primeiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Atendendo a que a RAA do Exemplo 3 ainda não está toda aglutinada o processo de aglutinação do Exemplo 3 prossegue com o segundo passo.

4.3.1.1.2 Segundo passo no processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

O segundo passo do processo de aglutinação inicia-se pela identificação dos candidatos que podem ser aglutinados sendo utilizado, para o efeito, a sub-RAA anteriormente aglutinada no primeiro passo do processo, a sub-RAA 6. Neste momento, os candidatos seleccionados para sofrer aglutinação são dois, o candidato formado pelas sub-RAA 1 e 6 e o candidato formado pelas sub-RAA 4 e 6, Figura 57.

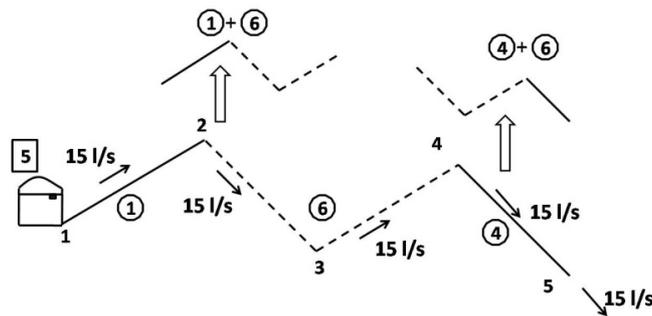


Figura 57 - Candidatos a sofrer aglutinação no segundo passo no processo de aglutinação do Exemplo 3

Na Tabela 20 estão apresentados os valores dos parâmetros de vulnerabilidade necessários para a selecção entre os dois candidatos.

Tabela 20 - Selecção entre os candidatos sub-RAA 1 com 6 e Sub-RAA 4 com 6 do segundo passo de aglutinação do Exemplo 3

Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)
1+6	2.52	18	1	0
4+6	2.52	18	1	200

No segundo passo do processo de aglutinação do Exemplo 3 verifica-se que é necessário recorrer ao quarto critério de selecção, máxima distância ao reservatório, uma vez que todos os outros parâmetros de vulnerabilidade têm valor igual. É seleccionado o candidato constituído pelas sub-RAA 4 e 6 porque tem um valor de distância ao reservatório ($Dis = 200\ m$) superior ao candidato constituído pelas sub-RAA 1 e 6 ($Dis = 0\ m$).

Como, neste momento, não existem mais sub-RAA passíveis de serem aglutinadas o segundo passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3 termina. O critério de máxima distância ao reservatório foi o aplicado para se decidir que o candidato constituído pelas sub-RAA 4 e 6 deverá ser aglutinado formando deste modo a nova

sub-RAA designada por 7. Na Tabela 21 está apresentado e descrito todo o procedimento relativo ao segundo passo de aglutinação.

Tabela 21 - Segundo passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis_{max} (m)	Sub-RAA que se forma
2	1+6	2.52	18	1	0	—
	4+6	2.52	18	1	200	7

Paralelamente, a Figura 58 ilustrada graficamente o segundo passo do processo de aglutinação do Exemplo 3.

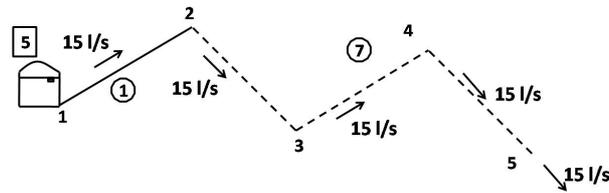


Figura 58 - Ilustração do segundo passo do processo de aglutinação do Exemplo 3

Nesta fase, a RAA do Exemplo 3 continua a não estar toda aglutinada e, por isso, o terceiro passo é requerido.

4.3.1.1.3 Terceiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

O terceiro passo do processo de aglutinação inicia-se pela identificação dos candidatos que podem ser aglutinados e utilizando a sub-RAA aglutinada no segundo passo do processo, a sub-RAA 7. Nesta fase apenas existe um candidato passível de sofrer aglutinação e que é o candidato formado pelas sub-RAA 1 e 7,

Figura 59.

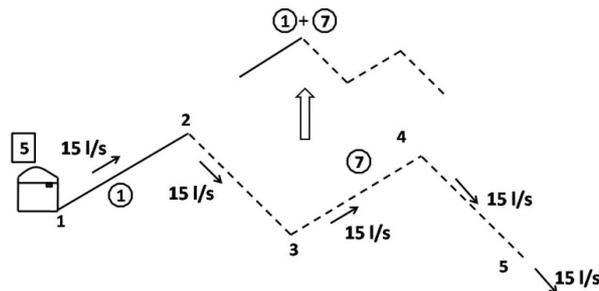


Figura 59 - Candidatos a sofrer aglutinação no terceiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3

Na Tabela 22 estão apresentados os valores dos parâmetros de vulnerabilidade relativos a este candidato.

Tabela 22 - Selecção do candidato sub-RAA 1 com 7 no terceiro passo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)
1+7	3.36	24	0	0

Como existe apenas um candidato passível de ser aglutinado então não é requerida nenhuma selecção, formando-se directamente a sub-RAA 8. Deste modo, o terceiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3 termina. Na Tabela 23 está apresentada a totalidade do procedimento relativo ao terceiro passo de aglutinação.

Tabela 23 - Terceiro passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
3	1+7	3.36	24	0	0	8

Na Figura 60 está ilustrado graficamente o terceiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3.

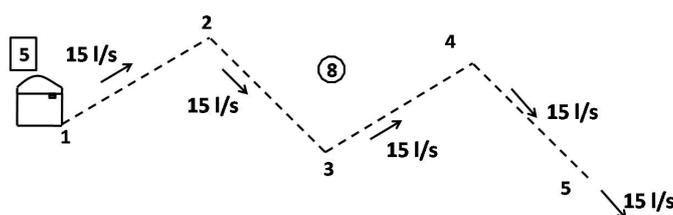


Figura 60 - Ilustração do terceiro passo do processo de aglutinação do Exemplo 3

Neste momento, à excepção do reservatório, toda a RAA já está aglutinada. O processo de aglutinação termina no quarto passo quando se aglutina o reservatório à restante sub-RAA. Lembra-se que inicialmente o reservatório ou sub-RAA de referência foi numerado como sendo a sub-RAA 5.

4.3.1.1.4 Quarto passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

O quarto passo do processo de aglutinação do Exemplo 3 finaliza o processo de aglutinação e uma vez que consiste na aglutinação da sub-RAA de referência 5 com a restante RAA já toda aglutinada, sub-RAA 8. Na Tabela 24 está apresentado e descrito todo o procedimento relativo ao quarto passo de aglutinação.

Tabela 24- Quarto passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
4	5+8	—	—	—	—	9

Paralelamente, a Figura 61 ilustrada graficamente o quarto passo do processo de aglutinação do Exemplo 3.

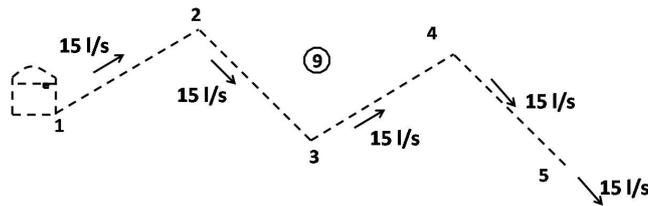


Figura 61 - Ilustração do quarto e último passo do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

No ponto seguinte é apresentado o processo de aglutinação do Exemplo 3 de forma sumária e porque é desta forma que a informação relativa a este processo será apresentada geralmente.

4.3.1.2 Resumo do processo de aglutinação do Exemplo 3

Na RAA do Exemplo 3 existem 3 candidatos de sub-RAA primitivas passíveis de serem aglutinados no 1º passo. Para todos os candidatos calculam-se os parâmetros de vulnerabilidade de perda de carga total (ΔH^-), de capacidade resistente ao dano (E), de conexão nodal (η) e de distância ao reservatório (Dis).

Aplicando-se os critérios de selecção do processo de aglutinação verifica-se que o primeiro candidato a formar uma nova sub-RAA consiste em aglutinar as sub-RAA primitivas 2 e 3 porque é referente ao candidato que apresenta o maior valor de η .

O segundo passo consiste em aglutinar as sub-RAA primitivas 4 e 6, sendo o critério de selecção aplicado o de máxima distância ao reservatório (Dis).

No terceiro passo, resta apenas um candidato que é independente da sub-RAA de referência para ser aglutinado (o candidato formado pelas sub-RAA 1 e 7) e que é o seleccionado.

O processo termina com a aglutinação da sub-RAA de referência 5 com a restante RAA já aglutinada, sub-RAA 8. Todo este processo de aglutinação do Exemplo 3 está compilado na Tabela 25.

Tabela 25 - Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3 (compilação)

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+2	1.68	12	1	0	—
	2+3	1.68	12	2	200	6
	3+4	1.68	12	1	400	—
2	1+6	2.52	18	1	0	—
	4+6	2.52	18	1	200	7
3	1+7	3.36	24	0	0	8
4	5+8	—	—	—	—	9

Através da informação exposta na Tabela 25 é possível observar que neste exemplo foi necessário recorrer ao terceiro e ao quarto critério de selecção (máxima conexão nodal e máxima distância ao reservatório, respectivamente) para se decidir qual dos candidatos deveria ser aglutinado.

Pela primeira vez, foi apresentado um exemplo de RAA em que estes critérios foram necessários aplicar para se poder efectuar uma decisão. Deste modo, pensa-se que está demonstrado a relevância da existência destes dois critérios de selecção do processo de aglutinação da TVRAA assim como a sua ordem.

A Figura 62 ilustra esquematicamente todo o processo de aglutinação ocorrido no Exemplo 3.

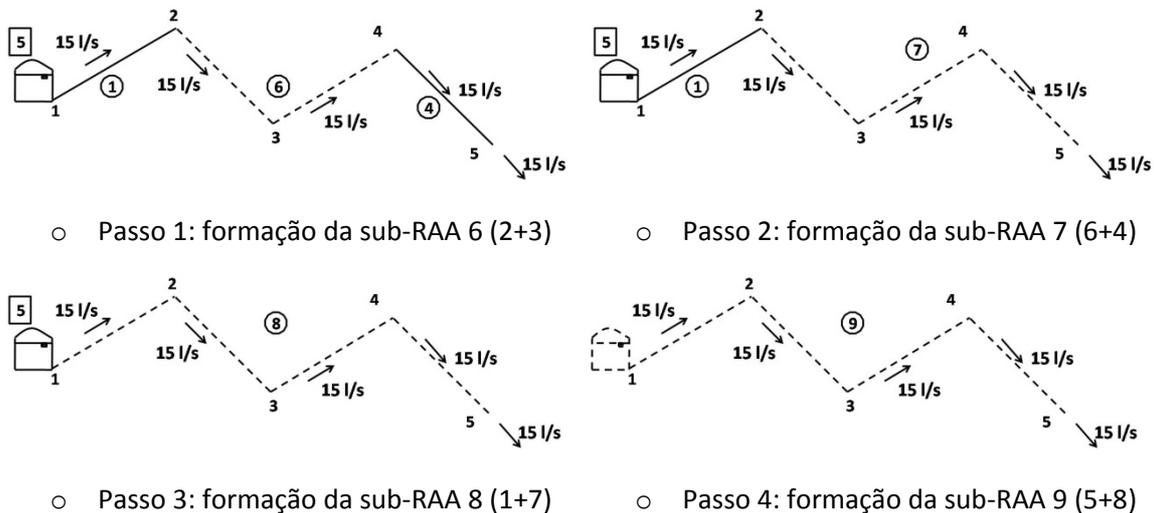


Figura 62 - Representação esquemática do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3

Quando a sub-RAA primitiva 1 sofre dano então a RAA é incapaz de abastecer água a qualquer ponto. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 9 termina e é identificado o primeiro cenário de dano vulnerável (danificar o troço 1), Figura 64.

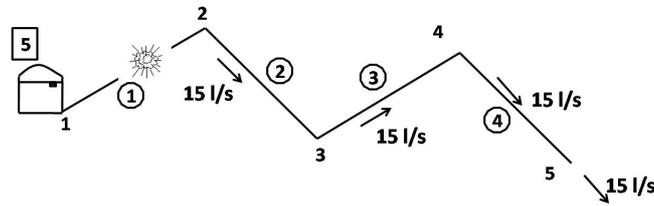


Figura 64 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 9 do Exemplo 3

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas as seguintes grandezas de vulnerabilidade: a perda de RAA (γ_r^-); a capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e o índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para essas grandezas:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.250; \varphi = 4.0.$$

A Figura 65 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 3.

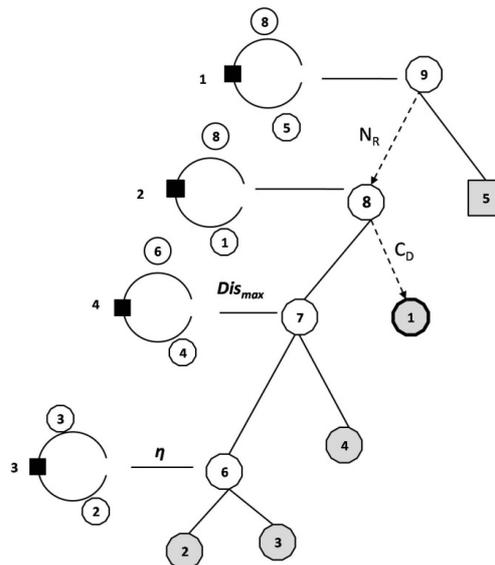


Figura 65 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 9 do Exemplo 3

4.3.3.2 Desaglutinação da sub-RAA 8

Descendo no sentido do topo do modelo hierárquico para a base a sub-RAA a ser desaglutinada de seguida é a sub-RAA 8, Figura 63.

Pelo modelo hierárquico da Figura 63, verifica-se que as sub-RAA 8 e 9 apenas diferem no facto da sub-RAA 9 incluir como sub-RAA suplementar a sub-RAA de referência. Esta diferença não vai alterar o resultado obtido para a sub-RAA 9 se a sub-RAA 8 for

analisada e, como tal, o cenário de dano vulnerável associado à sub-RAA 8 é o dano do troço 1.

Então, de acordo com a Figura 63, a sub-RAA 7 é a seguinte a ser desaglutinada.

4.3.3.3 Desaglutinação da sub-RAA 7

A sub-RAA 7 está representada graficamente na Figura 66.

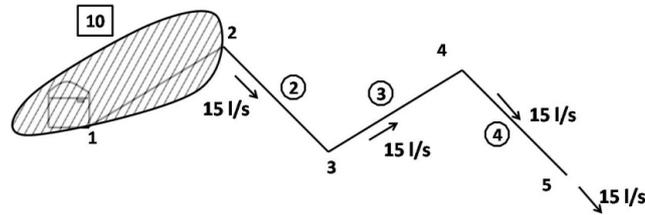


Figura 66 - Sub-RAA 7 da RAA do Exemplo 3

Tal como se pode observar na Figura 66, a sub-RAA 7 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante da sub-RAA 7 (existência do reservatório e do troço 1) é traduzido pela sub-RAA de extensão de referência, designada por 10 na Figura 66.

Face ao exposto, é requerido então um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 7, e que por simplificação não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 7 resultante está apresentado na Figura 67.

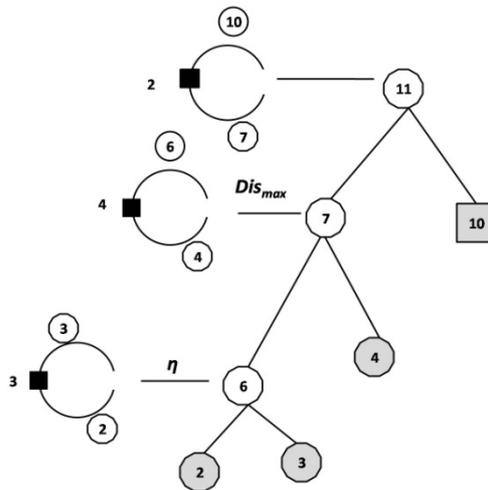


Figura 67 - Modelo hierárquico da sub-RAA 7 do Exemplo 3

É possível agora efectuar o processo de desaglutinação da sub-RAA 7.

Pelo modelo hierárquico da Figura 67 verifica-se que as sub-RAA 7 e 11 apenas diferem no facto da sub-RAA 11 incluir adicionalmente a extensão da sub-RAA de referência, sub-RAA 10. Esta diferença não vai alterar o resultado da sub-RAA 11 se a sub-RAA 7 for analisada. Então pela desaglutinação da sub-RAA 11 e 7 obtém-se o mesmo resultado. Aplicando os critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento:

A sub-RAA 11 é constituída pelas sub-RAA 7 e 10. A sub-RAA 10 é a extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 7 é a seleccionada (N_R);

A sub-RAA 7 é constituída pelas sub-RAA 4 e 6. A sub-RAA 6 está ligada directamente à extensão de referência 10 logo é a seleccionada (C_D);

A sub-RAA 6 é constituída pelas sub-RAA 2 e 3. A sub-RAA 2 está ligada directamente à extensão de referência 10 logo é a seleccionada (C_D);

Com o dano da sub-RAA 2, a sub-RAA 7 deixa de conseguir abastecer água a qualquer ponto existente na zona a ela associada. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 7 termina e é identificado o seguinte cenário de dano vulnerável: danificar o troço 2. Este cenário de dano vulnerável está ilustrado na Figura 68.

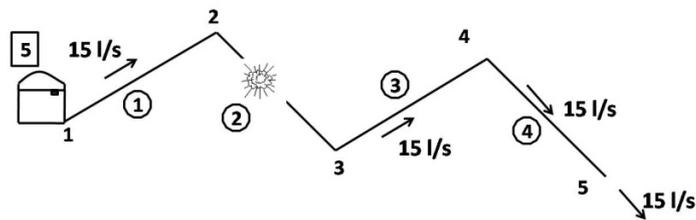


Figura 68 - Cenário de dano vulnerável da sub-RAA 7 do Exemplo 3

Associado a este cenário de dano vulnerável são quantificadas as grandezas de vulnerabilidade de perda de rede (γ_r^-), capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e índice de vulnerabilidade (φ). Usando as expressões 1, 2 e 3 obtêm-se os seguintes valores para estas grandezas.

$$\gamma_r^- = 0.750; E_R = 0.250; \varphi = 3.0.$$

A

Figura 69 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 3.

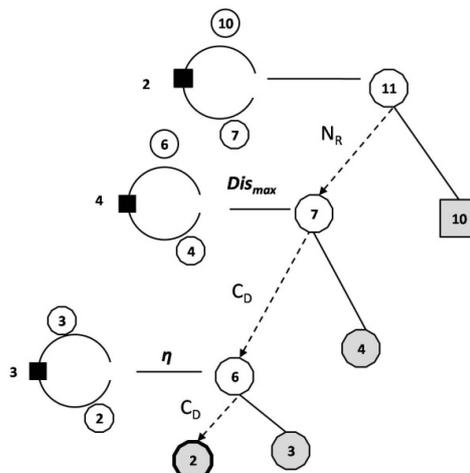


Figura 69 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 3

Com o dano na sub-RAA 2 a sub-RAA 6 deixa de conseguir abastecer água a qualquer ponto existente na zona a ela associada. Deste modo, o processo de desaglutinação da sub-RAA 6 termina e é identificado o cenário de dano vulnerável, que neste caso já foi identificado aquando do processo de desaglutinação da sub-RAA 7. Este cenário de dano vulnerável consiste em danificar o troço 2 (Figura 68). Os parâmetros de vulnerabilidade inerentes a este cenário de dano vulnerável já foram calculados no processo de desaglutinação da sub-RAA 7.

A Figura 72 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 3.

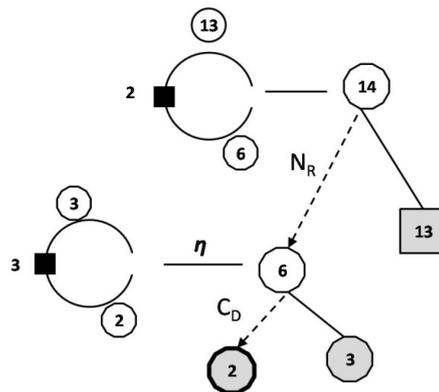


Figura 72 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 6 do Exemplo 3

Assim, termina o processo de desaglutinação do Exemplo 3, obtendo-se dois cenários de dano vulneráveis.

O processo de desaglutinação da TVRAA identificou dois cenários de dano vulnerável, mas no máximo essa RAA teria três cenários de dano vulnerável uma vez que o modelo hierárquico, Figura 63, tem quatro sub-RAA (círculos a branco).

Sem utilizar a TVRAA, e aplicando a Expressão 4, teríamos um número total de cenários de dano igual a 64, obtendo assim uma redução significativa de cenários de dano possíveis pela utilização do modelo hierárquico.

4.3.4 Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 3

Na Tabela 26 estão apresentados os cenários de dano vulneráveis resultantes do processo de desaglutinação da RAA do Exemplo 3 e obtidos através da aplicação da TVRAA. Nesta tabela os parâmetros de vulnerabilidade de γ_r^- , E_R e φ associados a cada um desses cenários também estão indicados.

Tabela 26 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 3

	Cenário de Dano	γ_r^-	E_R	φ
1	T1	1.0	0.250	4.0
2	T2	0.750	0.250	3.0

No processo de desaglutinação do Exemplo 3 foram identificados dois cenários de dano vulneráveis, o primeiro é a danificação do troço 1 (T1) e o segundo é a danificação do troço 2 (T2).

O *cenário de dano de colapso total* do Exemplo 3 corresponde ao primeiro cenário de dano vulnerável identificado, dano no troço 1 (T1) e porque é o que apresenta $\gamma_r^- = 1$. Se o troço 1 sofrer dano então a RAA do Exemplo 3 fica incapaz de abastecer água com qualidade a qualquer ponto. Este cenário é o esperado e atesta/valida a TVRAA.

O *cenário de dano de máxima vulnerabilidade* também é o primeiro cenário de dano vulnerável identificado, T1, uma vez que é aquele que apresenta o maior valor de φ ($\varphi = 4$). Este resultado também valida a TVRAA porque é evidente que requerido o mesmo esforço para provocar dano no troço 1 e no troço 2 ($E_1 = E_2 = 6 \text{ Kgf/cm}^2$, Tabela 15) e também é evidente que a consequência desses danos em termos de perda de RAA são diferentes ($\gamma_{r1}^- = 1$ e $\gamma_{r2}^- = 0.75$, Tabela 26)

O *cenário de dano de mínima vulnerabilidade* é aquele relativo a ocorrer dano no troço 1 (T1) e porque este troço foi o último a ser aglutinado, Figura 63. Este cenário aparente não é evidente. Contudo, tendo em conta a particularidade das características hidráulicas da RAA do Exemplo 3 percebe-se que a zona desta RAA relativa ao troço 1 apresenta de facto a menor qualidade de forma e porque os factores de interligação entre sub-RAA e distância ao reservatório são relevantes neste caso. O facto do troço 1 ligar directamente ao reservatório ($Dis = 0 \text{ m}$) representa que o impacto de funcionalidade da totalidade da RAA na ocorrência de um dano será muito mais relevante do que o respectivo impacto resultante da ocorrência de um dano no troço 4 que se encontra mais distante do reservatório ($Dis = 600 \text{ m}$)

No Exemplo 3, o *cenário de menor esforço para haver dano* pode ser a ocorrência de dano em qualquer troço da RAA porque todos os troços apresentam o mesmo valor de E (6 kgf/cm^2), Tabela 15. Deste modo, será T1 ou T2 ou T3 ou T4.

O *cenário de interesse do utilizador* é qualquer cenário definido pelo utilizador de modo a obter os seus parâmetros de vulnerabilidade. Por exemplo, considere-se que no Exemplo 3, o cenário de interesse do utilizador é a danificação do troço 3. Para esse cenário de dano são quantificadas as grandezas de vulnerabilidade de perda de rede (γ_r^-), capacidade resistente ao dano relativa (E_R) e índice de vulnerabilidade (φ).

$$\gamma_r^- = 0.50; E_R = 0.25; \varphi = 2.0.$$

Analisando estes resultados chega-se a conclusões que reforçam as observações tecidas anteriormente.

Nesta fase, os Exemplo 1 e 3 já ilustraram a aplicação dos critérios de aglutinação de menor perda de carga (ΔH^-), de máxima conexão nodal (η_{max}) e de máxima distancia ao reservatório (Dis_{max}).

Falta então apresentar um exemplo de RAA onde o critério de máximo esforço para provocar dano (E_{max}) seja utilizado.

4.4 Descrição da RAA do Exemplo 4

Considere-se então como Exemplo 4 a RAA representada em planta na Figura 73. Esta RAA é formada por 4 troços (troços de 1 ao 4) e por 5 nós (nós de 1 ao 5). O reservatório é designado por 5.

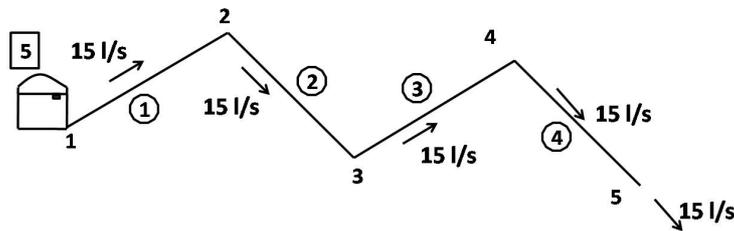


Figura 73 - RAA do Exemplo 4 (em planta)

O Exemplo 4 é semelhante ao Exemplo 3 em termos de configuração geométrica, havendo contudo uma variação do comprimento de troços e das cotas dos nós.

Este exemplo é meramente académico uma que vez que em troços com classe de pressão de serviço diferente, o que implicaria diâmetros interiores diferentes, foi forçada a obtenção de perdas de carga total iguais nos diferentes troços através da variação do seu comprimento. Na prática, estas características são pouco correntes de acontecer.

À semelhança da RAA do Exemplo 3, a RAA do Exemplo 4 também é toda ela formada por tubos de policloreto de vinílo (PVC) de rugosidade de 0.01 mm. O valor da viscosidade cinemática da água também foi considerado igual a $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

A pressão de serviço adoptada para o dimensionamento hidráulico da referida RAA foi de 6 Kgf/cm^2 nos troços 1 e 2, e de 10 Kgf/cm^2 nos troços 3 e 4.

Os diâmetros comerciais (D_{com}), os diâmetros interiores (D_{int}) e a espessura (esp) dos tubos podem ser consultados no Anexo A [11].

Após o dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 4 e que também não é aqui apresentado por simplificação (Anexo B.IV), é possível saber as características geométricas e hidráulicas da RAA e que são necessárias para a aplicação da TVRAA. Essas características estão apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Características geométricas e hidráulicas da RAA do Exemplo 4

Sub-RAA primitiva (troço)	Nós	Comprimento (m)	Caudal (l/s)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
1	1; 2	200.00	15	160	150.6	0.84	6
2	2; 3	200.00	15	160	150.6	0.84	6
3	3; 4	164.25	15	160	144.6	0.84	10
4	4; 5	164.25	15	160	144.6	0.84	10

Por sua vez, na Tabela 28 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas, a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 4. Tal como se pode verificar através do valor da altura piezométrica a montante do troço 1, a altura de água no reservatório foi considerado igual a 3 m.

Tabela 28 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 4

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	163.68	130.00	293.68	165.84	3.00	35.84
2	130.00	140.00	270.00	165.00	35.84	25.00
3	140.00	100.00	240.00	164.16	25.00	64.16
4	100.00	95.00	195.00	163.32	64.16	68.32

4.4.1 Aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 4

4.4.1.1 Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 4

O processo de aglutinação foi descrito detalhadamente na resolução do Exemplo 3 do ponto anterior. No Exemplo 4 este processo é apresentado de forma sumária.

Tal como foi referido anteriormente, a configuração geométrica do Exemplo 4 é semelhante à do Exemplo 3. Por isso, os candidatos a formar sub-RAA do primeiro passo no processo de aglutinação são os mesmos do Exemplo 3, Figura 55.

Na RAA do Exemplo 4 existem 3 candidatos de sub-RAA primitivas passíveis de serem aglutinados no 1º passo. Para todos os candidatos calculam-se os parâmetros de vulnerabilidade de perda de carga total (ΔH^-), de capacidade resistente ao dano (E), de conexão nodal (η) e de distância ao reservatório (Dis).

Aplicando-se os critérios de selecção do processo de aglutinação verifica-se, Tabela 29, que o primeiro candidato a formar uma nova sub-RAA consiste em aglutinar as sub-RAA primitivas 3 e 4 porque é referente ao candidato que apresenta o maior valor de capacidade resistente ao dano (E).

O segundo passo consiste em aglutinar as sub-RAA primitivas 1 e 2, sendo o critério de selecção aplicado o de menor valor de perda de carga total (ΔH^-), Tabela 29.

No terceiro passo, resta apenas um candidato para ser aglutinado (o candidato formado pelas sub-RAA 6 e 7) e que é o seleccionado.

O processo termina com a aglutinação da sub-RAA de referência 5 com a restante RAA já aglutinada, sub-RAA 8. Todo este processo de aglutinação do Exemplo 4 está compilado na Tabela 29.

Tabela 29 - Processo de aglutinação da RAA do Exemplo 4

Passo	Candidato a sub-RAA	ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)	η	Dis (m)	Sub-RAA que se forma
1	1+2	1.68	12	1	0	—
	2+3	1.68	16	2	200	—
	3+4	1.68	20	1	400	6
2	1+2	1.68	12	1	0	7
	2+6	2.52	26	1	200	—
3	6+7	3.36	32	0	0	8
4	5+8	—	—	—	—	9

Através da informação exposta na Tabela 29 é possível observar que neste exemplo foi necessário recorrer ao primeiro e segundo critério de selecção (menor perda de carga total e máxima capacidade resistente ao dano, respectivamente) para se decidir qual dos candidatos deveria ser aglutinado.

Deste modo, foi apresentado pela primeira vez um exemplo de RAA em que o critério de máxima capacidade resistente ao dano foi necessário aplicar para seleccionar o candidato a ser aglutinado.

Face ao exposto, pensa-se que foi demonstrado a relevância da existência deste critério de aglutinação. O objectivo de Exemplo 4 foi alcançado. Contudo, nos pontos seguintes, apresentar-se-á a parte restante de aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 4 de modo a reter futuramente uma informação mais rica.

4.4.1.2 Formação do modelo hierárquico da RAA do Exemplo 4

Baseado na informação obtida durante a aplicação do processo de aglutinação da RAA do Exemplo 4 e compilada na Tabela 29, é possível traçar o modelo hierárquico da RAA do Exemplo 4, Figura 74.

4.4.1.3.3 Desaglutinação da sub-RAA 7

A sub-RAA 7 está representada graficamente na Figura 77.

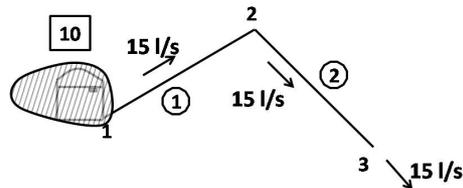


Figura 77 - Sub-RAA 7 do Exemplo 4

Tal como se pode observar na Figura 77, a sub-RAA 7 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante da sub-RAA 7 (a existência do reservatório) é traduzido pela sub-RAA de extensão de referência, designada por 10 na Figura 77.

Face ao exposto, é requerido então um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 7 e que por simplificação não é aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 7 resultante está apresentado na Figura 78.

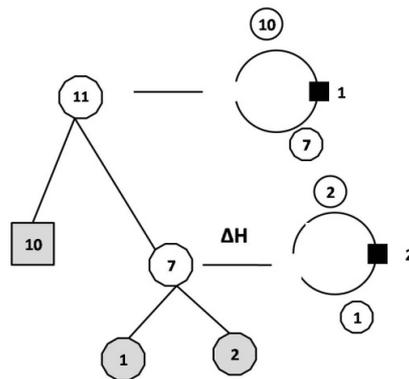


Figura 78 - Modelo hierárquico da sub-RAA 7 do Exemplo 4

É possível agora efectuar o processo de desaglutinação da sub-RAA 7.

Pelo modelo hierárquico da Figura 78 verifica-se que as sub-RAA 7 e 11 apenas diferem no facto da sub-RAA 11 incluir adicionalmente a extensão da sub-RAA de referência, sub-RAA 10. Esta diferença não vai alterar o resultado da sub-RAA 11 se a sub-RAA 7 for analisada, então pela desaglutinação da sub-RAA 11 e 7 obtém-se o mesmo resultado. Aplicando os critérios de selecção do processo de desaglutinação obtém-se o seguinte desenvolvimento:

- A sub-RAA 11 é constituída pelas sub-RAA 7 e 10. A sub-RAA 10 é a extensão da sub-RAA de referência então a sub-RAA 7 é a seleccionada (N_R);
- A sub-RAA 7 é constituída pelas sub-RAA primitivas 1 e 2. A sub-RAA 1 está ligada directamente à extensão de referência 10 logo é a seleccionada (C_D);

Com o dano da sub-RAA 1 a sub-RAA 6 deixa de conseguir abastecer água a qualquer ponto existente na zona a ela associada. Deste modo, o processo de desaglutinação da

sub-RAA 7 termina e é identificado o cenário de dano vulnerável, que neste caso já foi identificado aquando do processo de desaglutinação da sub-RAA 8 e 9, danificar o troço 1 (Figura 75). Os parâmetros de vulnerabilidade inerentes a este cenário de dano vulnerável já foram calculados no processo de desaglutinação da sub-RAA 9.

A Figura 79 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 4.

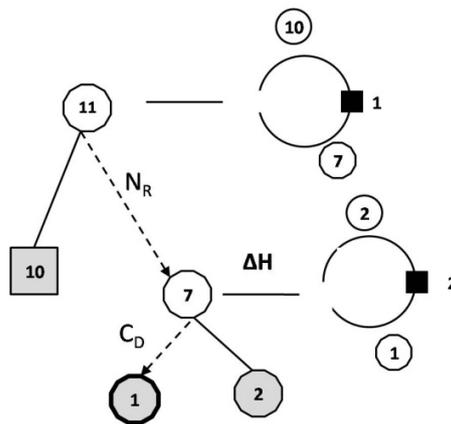


Figura 79 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 4

4.4.1.3.4 Desaglutinação da sub-RAA 6

A sub-RAA 6 é a seguinte a ser desaglutinada e esta está representada na Figura 80.

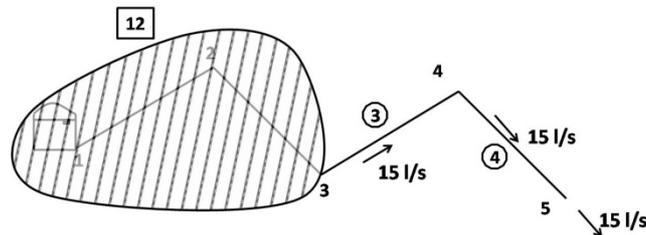


Figura 80 - Sub-RAA 6 do Exemplo 4

Tal como se pode observar na Figura 80 a sub-RAA 6 é agora vista como sendo uma RAA autónoma. O efeito da restante RAA a montante da sub-RAA 6 (a existência do reservatório e troços 1 e 2) é traduzido pela sub-RAA de extensão de referência, designada por 12 na Figura 80.

Face ao exposto, é requerido então um novo processo de aglutinação para a sub-RAA 6 e que por simplificação não está aqui apresentado. O modelo hierárquico da sub-RAA 6 é apresentado na Figura 81.

A Figura 83 mostra esquematicamente o processo de desaglutinação da sub-RAA 6 do Exemplo 4.

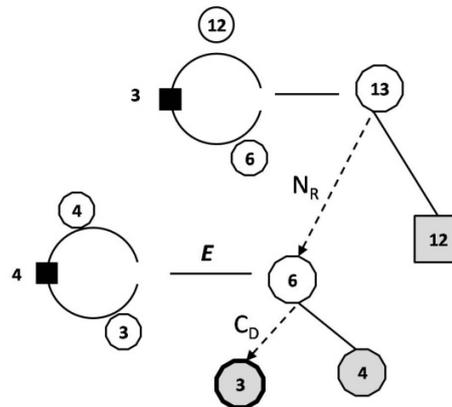


Figura 83 - Representação esquemática do processo de desaglutinação da sub-RAA 7 do Exemplo 4

Assim, termina o processo de desaglutinação do Exemplo 4, obtendo-se dois cenários de dano vulneráveis.

O número de cenários de dano vulneráveis do Exemplo 4 é igual ao do Exemplo 3, sendo o número de cenários de dano possíveis também igual uma vez que ambos os exemplos apresentam o mesmo número de troços.

3.3.2 Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 4

Na Tabela 30 estão apresentados os cenários de dano vulneráveis resultantes do processo de desaglutinação, da RAA do Exemplo 4 e obtidas através da aplicação da TVRAA. Nesta tabela também estão indicados os parâmetros de vulnerabilidade de γ_r^- , E_R e φ associados a cada um desses cenários.

Tabela 30 - Cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 4

	Cenário de Dano	γ_r^-	E_R	φ
1	T1	1	0.188	5.33
2	T3	0.50	0.313	1.60

No processo de desaglutinação do Exemplo 4 foram identificados dois cenários de dano vulneráveis, o primeiro é a danificação do troço 1 (T1) e o segundo é a danificação do troço 3 (T3).

O cenário de dano de colapso total do Exemplo 4 corresponde ao primeiro cenário de dano vulnerável identificado, dano no troço 1 (T1) e porque é o que apresenta $\gamma_r^- = 1$.

O *cenário de dano de máxima vulnerabilidade* também é o primeiro cenário de dano vulnerável identificado, T1, uma vez que é aquele que apresenta o maior valor de φ ($\varphi = 5.33$).

Neste exemplo existe mais do que um *cenário de dano de mínima vulnerabilidade*. Este cenário pode ser caracterizado pela ocorrência de dano no troço 1, bem como pelo dano no troço 2. Isto acontece porque ambas as sub-RAA são sub-RAA primitivas e foram aglutinadas em conjunto no último passo do processo de aglutinação da TVRAA, Tabela 29.

No Exemplo 4, o *cenário de menor esforço para haver dano* pode ser a ocorrência de dano nos troços 1 e 2 da RAA, porque apresentam o menor valor de E entre todos os troços da RAA, Tabela 27. Deste modo, será T1 ou T2.

O *cenário de interesse do utilizador* é qualquer cenário definido pelo utilizador de modo a obter os seus parâmetros de vulnerabilidade e conhecer a vulnerabilidade de outras partes da RAA.

4.5 Considerações finais

O processo de aglutinação da RAA do Exemplo 3 foi aqui detalhadamente apresentado e uma vez que este recorre a diferentes critérios de selecção. Para além do critério de menor perda de carga outros critérios também foram utilizadas e por isso constitui uma novidade tanto no grau de detalhe apresentado, bem como, nos critérios de selecção utilizados.

Nos Exemplos 3 e 4 foram utilizados os quatro primeiros critérios de selecção do processo de aglutinação. Faltou apenas utilizar o quinto e último critério de selecção, escolha livre (F_C). A validação deste critério não é considerada muito relevante uma vez que se trata de uma forma expedita de dar seguimento ao processo de aglutinação.

Como as RAA destes exemplos são muito simples, facilitam a interpretação e a análise dos resultados. Os resultados obtidos foram os previstos, apesar de se recorrer a diferentes critérios de selecção, assim pensa-se que se deu um contributo na validação da ordem de importância de aplicação dos critérios de selecção do processo de aglutinação.

5 INTEGRAÇÃO DA TVRAA COM AS TEORIAS CLÁSSICAS DE DIMENSIONAMENTO DE RAA

5.1 Objectivos

Os principais objectivos deste capítulo são os seguintes:

- Apresentar uma proposta de integração da TVRAA com as teorias clássicas utilizadas no dimensionamento hidráulico de RAA e de forma a tornar a identificação da vulnerabilidade deste tipo de sistema um processo mais completo e realista;
- Propor, descrever e justificar novos conceitos teóricos resultantes e considerados necessários aquando da integração das teorias. Estes conceitos teóricos são: escala de acções, evento de dano inicial, evento de dano “trigger”, evento de dano consequente, evento de dano inicial, dano parcial, colapso progressivo parcial, colapso progressivo total, cenário de dano vulnerável parcial e cenário de dano vulnerável inicial;
- Sugerir um esquema gráfico capaz de modelar o sistema complexo que é uma RAA a sofrer dano. Pretende-se que este esquema simule esse sistema e, que para o efeito, necessita de incorporar os conceitos teóricos referidos anteriormente;
- Identificar e descrever os novos critérios de selecção de eventos de dano necessários na aplicação deste processo de integração;
- Exemplificar o processo de integração da TVRAA com as teorias clássicas.

A definição destes novos conceitos foi processada tendo em conta os conceitos já utilizados e definidos no contexto das estruturas [8].

5.2 Introdução

Através da aplicação da TVRAA é possível identificar a(s) parte(s) mais vulnerável(eis) de uma RAA através da detecção de cenários de dano vulneráveis. Um cenário de dano vulnerável é uma sequência ordenada de eventos de dano.

Um evento de dano numa RAA é algo que afecta o normal abastecimento de água dessa RAA e pode ser a rotura de um tubo, a obstrução de um tubo, a perda de qualidade da água, a falta de água no reservatório, entre outros aspectos [1].

A acção ou a causa que provoca esse evento de dano pode ser de qualquer tipo tal como um erro de construção, um erro de projecto, um envelhecimento precoce da

RAA ou uma falta de conservação, uma deficiente gestão da RAA, um acto de sabotagem, um acto de vandalismo, entre outras.

Nesta fase deste trabalho de investigação e por simplificação, considera-se que um evento de dano corresponde à incapacidade de um troço da RAA efectuar abastecimento de água em boas condições de funcionamento. Na prática, corresponde a afirmar que esse troço deixa de existir na RAA.

No processo de desaglutinação da TVRAA e de acordo com os exemplos apresentados anteriormente não se tem tido em conta as alterações das condições hidráulicas numa RAA resultantes da ocorrência de eventos de dano.

Quando um evento de dano ocorre (i.e. perda de um troço da RAA) as condições hidráulicas da RAA alteram-se porque também ocorre uma redistribuição de caudais que implicitamente corresponde a uma alteração da velocidade de escoamento e das pressões. É bastante provável que estas alterações das condições hidráulicas também provoquem por sua vez a ocorrência de outros eventos de dano adicionais na RAA.

5.3 Modelação de um cenário de dano vulnerável

5.3.1 Modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total

Para melhor se ter uma perspectiva desta situação, representa-se esquematicamente na Figura 84 um sistema genérico que integra os diferentes aspectos a ter em conta quando se pretende efectuar a integração descrita anteriormente. Estes esquemas foram baseados em ilustrações da TVE [8]. Neste esquema existem três escalas que são as escalas das acções, dos eventos de dano e do dano.

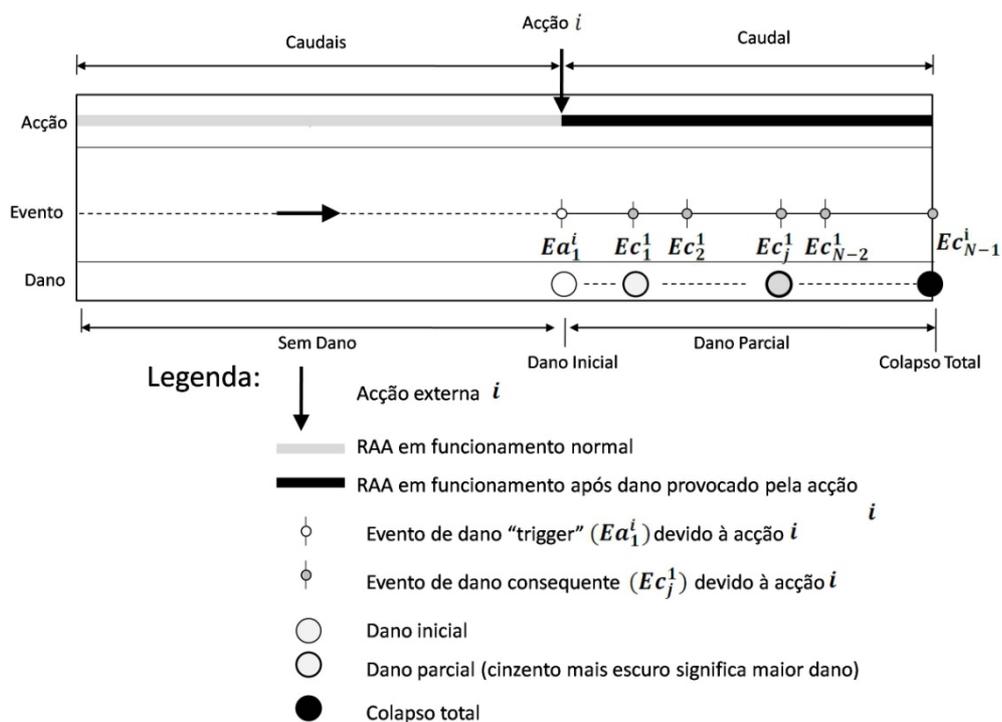


Figura 84 - Esquema genérico do cenário de dano vulnerável de colapso total

Num determinado instante ocorreu a Acção i , que é externa e que pode ser de qualquer tipo, tal como foi referido anteriormente. Neste contexto, considera-se que após a ocorrência da Acção i , que provoca um determinado dano na RAA, a RAA apenas se encontra sob o efeito do caudal médio. Esta consideração pretende ter em conta que a RAA não esteja a trabalhar no limite, caudal de ponta, o que seria uma situação muito gravosa.

O período de tempo associado a este cenário de funcionamento da RAA, após a ocorrência da Acção i , é reduzido e é relativo ao tempo necessário requerido para se proceder à reparação da RAA.

5.3.1.1 Escala das acções

A escala das acções pretende traduzir genericamente as acções a que um RAA poderá estar sujeita durante o seu período de vida.

Tendo em conta a extensa variabilidade de tipos de acções que uma RAA poderá estar sujeita e de acordo com o referido anteriormente, esta escala pretende ser genérica.

Na Figura 84, está considerado que durante o período inicial de vida de uma RAA até ao momento da ocorrência da acção externa, as acções que ocorrem são aquelas previstas no normal funcionamento da RAA e que foram consideradas no seu dimensionamento.

Depois da ocorrência da acção externa e durante um período de tempo mais reduzido, considera-se que na RAA circula o caudal médio.

5.3.1.2 Escala dos eventos de dano

5.3.1.2.1 Evento de dano “trigger” (Ea)

Tal como foi referido anteriormente, a ocorrência da Acção i provoca um evento de dano. Nesta fase da investigação e tal como já foi referido anteriormente, um evento de dano é a perda de um troço da RAA. O dano provocado pela Acção i é designado por evento de dano inicial (Ea_1^i) em que E é relativo a evento de dano, a é relativo a evento de dano “trigger” e i é relativo à Acção i , Figura 84.

Neste caso genérico, a Acção i apenas provocou um evento de dano “trigger” na RAA (Ea_1^i). Contudo, poderão ocorrer outros eventos de dano “trigger” aquando da ocorrência de uma acção externa.

5.3.1.2.2 Eventos de dano consequentes (Ec)

A ocorrência de um evento de dano “trigger” irá alterar as condições hidráulicas da RAA. Essas alterações conjugadas com o facto de que a RAA passa a estar sujeita ao caudal médio poderão por sua vez gerar as condições que desponhem a ocorrência de

outros eventos de dano que se consideram, nesta fase, que são distintos dos eventos de dano “trigger” porque são consequentes destes. Então, estes eventos de dano designam-se por evento de dano consequente (Ec).

Na Figura 84, a ocorrência da Acção i provoca apenas um evento de dano “trigger” (Ea_1^i), que altera as condições hidráulicas da RAA e, que por sua vez despolta a ocorrência de $N-1$ eventos de dano consequentes (Ea_{N-1}^i) (em que N é o número total de troços existentes na RAA).

A Figura 84 correspondente a um cenário de dano extremo porque ocorre um dano progressivo que culmina no colapso total da RAA em que todos os troços sofrem dano e a RAA fica incapaz de efectuar qualquer abastecimento de água em boas condições. Neste caso, ocorre uma propagação de dano porque existe uma sequência de eventos de dano.

A sequência de eventos de dano pode ser progressiva quando os eventos de dano consequentes ocorrem gradualmente (um após o outro), instantânea quando os eventos de dano consequentes ocorrem em simultâneo (todos ao mesmo tempo), ou mista quando os eventos de dano consequentes podem ocorrer de forma aleatória (uns instantaneamente e outros gradualmente).

Este último cenário de sequência de eventos de dano, tipo mista, poderá ser o mais provável e o mais realista. Contudo, também é a situação mais complexa de modelar.

Nas situações de sequências de eventos de dano consequentes dos tipos progressiva e mista, há outro aspecto a ter em conta é que podendo os eventos de dano consequentes ocorrer gradualmente irão estes também por sua vez alterar as condições hidráulicas da RAA gradualmente e, deste modo, serem vistos como sendo simultaneamente eventos de dano “trigger” porque poderão também despoltar a ocorrência de eventos de dano de RAA adicionais.

5.3.1.3 Escala de dano

Associado aos eventos de dano existe uma degradação da RAA e consequente do seu bom funcionamento.

Para se avaliar a intensidade dessa degradação o esquema da Figura 84 contempla a existência de uma escala de dano. Esta escala de dano é composta por quatro patamares que são por ordem crescente de degradação os seguintes: sem dano, dano inicial, dano parcial e colapso total.

O patamar de sem dano é o desejado porque representa que a RAA está toda operacional, em pleno funcionamento e em que nenhum evento de dano ocorreu.

O patamar de dano inicial é localizado e circunscrito. No caso da Figura 84 é relativo ao evento de dano inicial que poderá ser a perda de um troço qualquer da RAA. Num cenário mais genérico, poderá ser a perda de mais do que um troço e resultante da ocorrência da Acção i externa. Os eventos de dano são eventos “trigger”.

O patamar de dano parcial traduz uma perda parcial de RAA a uma escala superior à do patamar de dano inicial em que o conceito de circunscrito já não faz sentido. Neste contexto, o número de eventos de dano é mais expressivo. É expectável existirem eventos de dano consequente para além dos eventos de dano “trigger”.

O patamar de colapso total corresponde ao topo da escala de dano porque reflecte que todos os troços da RAA deixaram de funcionar e por isso a totalidade da RAA passou a estar inoperacional.

Num caso extremo, em que por exemplo ocorre uma degradação da água no reservatório (acção externa), ocorre um colapso total da RAA devido unicamente a eventos de dano “trigger”, pois a água de todos os troços da RAA passa a estar contaminada e esta fica incapacitada de efectuar qualquer abastecimento em segurança devido à falta da qualidade da água. Este cenário não está contemplado na Figura 84 pois seria necessário que a escala dos eventos de dano fosse unicamente composta por eventos de dano “trigger”.

Face ao descrito, tendo em conta a situação prevista no esquema da Figura 84 em que se está perante um cenário de dano vulnerável do tipo colapso total e atendendo a que por definição um cenário de dano é uma sequência ordenada de eventos de dano a Expressão 5 representa analiticamente este cenário de dano vulnerável de colapso total (f) em que existe apenas um evento de dano “trigger” (Ea_1^i) e $N-1$ eventos de dano consequente.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow \dots \rightarrow Ec_j^1 \rightarrow Ec_{(n-1)}^1 \quad (5)$$

Em que:

f é cenário de dano vulnerável;

Ea_1^i é o evento de dano “trigger” 1 provocado pela acção externa i ;

Ec_j^1 é o evento de dano consequente j provocado pela alteração das condições hidráulicas da RAA devido à ocorrência de Ea_1^i ;

n é o número total de troços existentes na RAA

5.3.2 Modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial

No ponto anterior foi processada a modelação analiticamente de um cenário de dano vulnerável de colapso total. Para o efeito, inúmeros conceitos teóricos foram apresentados e descritos pela primeira vez.

O próprio conceito de cenário de dano vulnerável parcial é a primeira vez que está a ser usado no contexto da TVRAA. Um cenário de dano vulnerável parcial é um cenário vulnerável porque resulta de alguma forma da aplicação da TVRAA e é parcial porque está associado a um dano de RAA parcial.

O cenário de máxima vulnerabilidade é um caso particular do cenário de dano vulnerável parcial caso não seja simultaneamente o cenário de colapso total.

De forma a ilustrar um cenário de dano vulnerável parcial e todo o sistema a ele relacionado é usada a Figura 85.

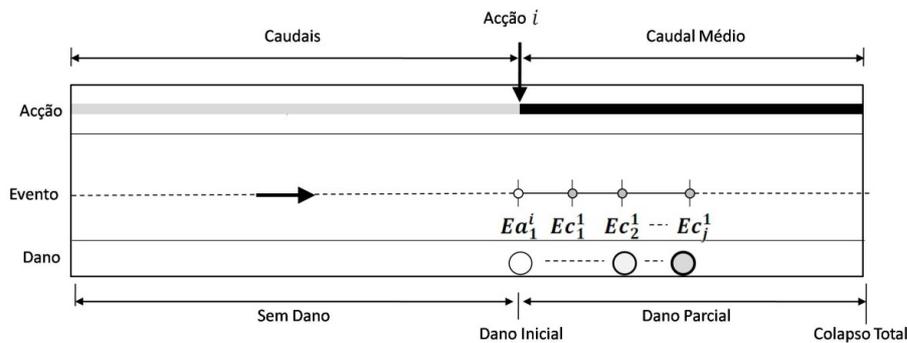


Figura 85 - Esquema genérico do cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial

O sistema representado esquematicamente na Figura 85 é muito semelhante ao recíproco da Figura 84. Contudo, neste caso a ocorrência da Acção i (externa) não resulta no total colapso da RAA. O evento de dano “trigger” (Ea_1^i) causado pela Acção i provoca uma alteração da RAA (associada à perda do respectivo troço) e uma alteração das condições hidráulicas da RAA que despoltam a ocorrência de j eventos de dano consequentes (de Ec_1^1 a Ec_j^1) que traduzem uma propagação de eventos de dano parcial que culmina num colapso progressivo parcial. A ocorrência destes $j + 1$ eventos de dano ($Ea_1^i + Ec_1^1 + \dots + Ec_j^1$) resulta por sua vez num dano parcial da RAA. Apenas uma parte da RAA associada aos troços que sofreram dano fica inoperacional. A outra parte da RAA continua apta a abastecer água com qualidade.

Neste caso, a modelação deste cenário de dano vulnerável parcial poderá ser modelado analiticamente pela Expressão 6.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow \dots \rightarrow Ec_j^1 \quad (6)$$

Em que:

f é cenário de dano vulnerável;

Ea_1^i é o evento de dano “trigger” 1 provocado pela acção externa i ;

Ec_j^1 é o evento de dano consequente j provocado pela alteração das condições hidráulicas da RAA devido à ocorrência de Ea_1^i .

5.3.3 Modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso inicial

De igual modo, o conceito de cenário de dano vulnerável de colapso inicial é apresentado e descrito pela primeira vez no contexto da TVRAA.

O cenário de dano vulnerável de colapso inicial é um cenário de dano composto unicamente por eventos de dano “trigger”. É vulnerável porque resulta da aplicação da TVRAA.

A ocorrência de acções externas a actuar na RAA podem gerar um ou mais eventos de dano “trigger”. As alterações sofridas pela RAA devido a esses eventos de dano “trigger” e as alterações das condições hidráulicas da RAA implícitas não provocam a ocorrência de nenhum dano consequente. A Figura 86 ilustra esquematicamente um sistema associado a um cenário de dano vulnerável de colapso inicial.

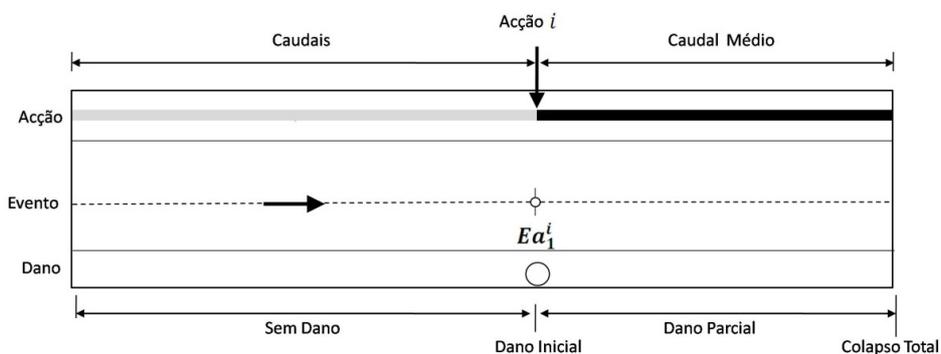


Figura 86 - Esquema genérico da propagação nula

Este cenário de dano vulnerável de colapso inicial, Figura 86, corresponde ao caso mais simples porque apenas contempla a actuação de uma acção externa (Acção i) e a ocorrência de apenas um evento de dano “trigger” resultante dessa acção externa.

A ocorrência de Ea_1^i traduz-se na perda de um troço da RAA. Essa alteração de RAA e a respectiva alteração das condições hidráulicas implícitas não provocam a ocorrência de nenhum evento de dano consequente adicional. O dano da RAA fica circunscrito à zona do troço que falha. Não existe, por isso, uma propagação de dano e apenas existe dano inicial.

A Expressão 7 permite simular analiticamente este cenário de dano vulnerável de colapso inicial.

$$f = Ea_1^i \quad (7)$$

Em que:

f é cenário de dano vulnerável;

Ea_1^i é o evento de dano “trigger” 1 provocado pela acção externa i .

5.4 Novos critérios de selecção de eventos de dano

Tal como foi referido anteriormente a ocorrência de eventos de dano “trigger” pode provocar a ocorrência de eventos de dano consequente. Esta situação advém do facto da RAA se alterar devido à perda de funcionamento de um ou mais troços associados aos eventos de dano “trigger” e à implícita alteração das condições hidráulicas da RAA tal como redistribuição de caudais, variações de pressões na RAA remanescente e variações de velocidades de escoamento.

De forma a detectar a ocorrência de eventuais eventos de dano consequente torna-se necessário identificar critérios de selecção específicos para além daqueles usados na TVRAA.

Estes critérios de selecção requeridos terão que estar relacionados com o bom funcionamento de uma RAA. Para o efeito, propõe-se que esses critérios sejam a verificação da velocidade de escoamento máxima regulamentar, da velocidade de escoamento mínima, da pressão máxima e da pressão mínima.

Estes critérios estão detalhadamente descritos nos pontos seguintes.

5.4.1 Verificação da velocidade de escoamento máxima regulamentar

Segundo [12], velocidades de escoamento excessivas numa RAA podem originar fenómenos de choque hidráulico em que o valor da sobrepressão pode resultar na rotura dos tubos. Também pode provocar corrosão por erosão e ruídos nos tubos.

Foi então definida uma velocidade máxima regulamentar e que é calculada segundo a Expressão 8 [13]

$$V_{max} = 0.127D^{0.4} \quad (8)$$

Em que:

V_{max} é a velocidade de escoamento máxima regulamentar (m/s);

D_{int} é o diâmetro interior do tubo (mm).

Quando a velocidade de escoamento num troço da RAA for superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar (V_{max}), Expressão 8, então considera-se que ocorre dano nesse troço.

5.4.2 Verificação da velocidade de escoamento mínima

Ao contrário do referido no ponto anterior, velocidade de escoamento muito reduzida pode provocar depósito de partículas e originar a obstrução dos tubos [12].

Para evitar que esta situação se suceda foi admitida uma velocidade de escoamento mínima V_{min} atribuindo-lhe o valor de 0.3 m/s.

Quando o valor da velocidade de escoamento num determinado troço de uma RAA for inferior ao valor mínimo admitido então considera-se que ocorre dano nesse troço. O critério de selecção da verificação da velocidade mínima corresponde a verificar quais são os troços da RAA que apresentam velocidades de escoamento inferiores à V_{min} e a considerar que esses troços sofrem dano.

5.4.3 Verificação da pressão máxima

A redistribuição de caudais numa RAA resultante da ocorrência de um dano também faz variar as perdas de carga. Uma vez que as pressões numa RAA são função da perda de carga também estas se alteram.

Quando as novas pressões instaladas na RAA forem superiores à pressão de serviço dos tubos (P_{max}) pode dar-se então a rotura dos mesmos, a RAA sofre dano. Deste modo, tem-se definido o novo critério de selecção que é o critério de pressão máxima (P_{max}).

O critério de selecção da verificação da pressão máxima consiste em considerar que os troços que apresentam pressões de valor superior ao valor da pressão de serviço sofrem dano.

5.4.4 Verificação da pressão mínima

Uma RAA deve ser dotada de pressão mínima de modo a permitir que os diversos equipamentos funcionem devidamente. Segundo [13] essa pressão é de 10 m.c.a..

Quando a pressão instalada numa RAA for inferior à pressão mínima admissível (P_{min}) considera-se que ocorre dano na RAA. O critério de selecção aplicado é o critério de pressão mínima (P_{min}).

O critério de selecção da verificação da pressão mínima consiste em admitir que os troços de uma RAA que apresentem uma pressão inferior a P_{min} ficam inoperacionais.

5.4.5 Critérios

Face ao exposto, os novos critérios de selecção na busca de eventos de dano consequente e quando a TVRAA é integrada com as teorias clássicas são o critério de verificação da velocidade de escoamento máxima regulamentar (V_{max}), o critério de verificação da velocidade de escoamento mínima (V_{min}), o critério de verificação da pressão máxima (P_{max}) e o critério de verificação da pressão mínima (P_{min}).

Neste contexto e tendo como base que se considera que um evento de dano se traduz na incapacidade de um troço abastecer água em boas condições, também se passa a considerar que uma velocidade de escoamento superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar, uma velocidade de escoamento inferior à velocidade de escoamento mínima admissível, uma pressão superior à pressão de serviço e uma pressão inferior à pressão mínima admissível são condições que permitem a ocorrência de eventos de dano na RAA.

5.5 Exemplificação da integração da TVRAA com as teorias clássicas

Para se exemplificar a integração da TVRAA com as teorias clássicas serão utilizadas as RAA do Exemplo 1 e Exemplo 2, do Capítulo II.

5.5.1 Integração da TVRAA com as teorias clássicas na resolução da RAA do Exemplo 1

Para o cálculo de pressões tem que se trabalhar com altimetria da rede ou seja, é necessário conhecer as cotas topográficas dos nós da RAA. Por simplificação e porque nesta fase apenas se pretende exemplificar a aplicação dos novos conceitos e dos novos critérios de selecção de eventos de dano considerou-se que todos os nós, à excepção do reservatório, da RAA do Exemplo 1 têm a mesma cota topográfica, 100 m.

Para o cálculo das pressões existentes na RAA foi considerado que a pressão mínima a garantir no ponto mais desfavorável da RAA, ponto 6, é de 25 m.c.a.. Considerou-se também que a altura de água no reservatório é de 3 m.

Em relação à redistribuição de caudais resultantes da ocorrência de um evento de dano “trigger”, foram consideradas duas situações com o intuito de se ganhar sensibilidade e haver um termo de comparação.

i) A primeira situação considera que quando ocorre dano num troço o caudal que circula na RAA é o caudal de ponta para o qual a RAA foi dimensionada, correspondendo esta à situação mais desfavorável a que a RAA pode estar sujeita.

ii) A segunda situação e uma vez que o caudal de ponta só é utilizado em alguns períodos do dia, corresponde a considerar que quando ocorre dano num troço da RAA o caudal que circula nela é o caudal médio. Esta situação corresponde aquela que é prevista nas Figuras 84, 85 e 86 e que se pensa ser a mais adequada.

O caudal médio é obtido pelo quociente entre o caudal de ponta e o factor de ponta. O factor de ponta considerado neste exemplo foi de 1.5.

Através da aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 1 foram identificados três cenários de dano vulneráveis, um cenário de dano vulnerável de colapso total (Ea_1^i) e dois

cenários de dano vulnerável de colapso parcial, neste caso com sequencia de eventos de dano do mesmo tipo, $(Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i)$.

Estes cenários vão agora ser analisados individualmente e de modo a ter em conta o facto de haver alteração das condições hidráulicas da RAA aquando da ocorrência dos eventos de dano “trigger” que caracterizam cada um destes cenários

5.5.1.1 Análise dos cenários de dano vulneráveis – 1ª Situação: Após ocorrer dano circula na RAA o caudal de ponta

Os dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1 estão apresentados de forma resumida na Tabela 31.

Tabela 31 - Dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1, com circulação de caudal de ponta (Q_{ponta})

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	Q_{ponta} (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	200	24	0.86	0.30	1.03	1.68
2	2	3	125	8	0.74	0.30	0.86	2.67
3	2	4	160	16	0.90	0.30	0.94	1.89
4	4	5	125	8	0.74	0.30	0.86	1.33
5	4	6	125	8	0.74	0.30	0.86	2.22
6	5	6	110	4	0.47	0.30	0.81	0.94

Por sua vez, na Tabela 32 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões) a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1.

Tabela 32 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1.

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	127.79	100.00	130.79	129.11	3.00	29.11
2	100.00	100.00	129.11	126.45	29.11	26.45
3	100.00	100.00	129.11	127.22	29.11	27.22
4	100.00	100.00	127.22	125.94	27.22	25.94
5	100.00	100.00	127.22	125.00	27.22	25.00
6	100.00	100.00	125.94	125.00	25.94	25.00

5.5.1.1.1 Cenário de dano vulnerável de colapso total: dano no troço 1 (Ea_1^i)

A ocorrência de dano no troço 1 resulta na restante RAA ficar privada de efectuar qualquer abastecimento de água e corresponde ao cenário de colapso total. No entanto, se considerarmos apenas a ocorrência de dano no troço 1 causado por uma acção externa i e integrarmos com as teorias clássicas verifica-se que a redistribuição de caudal pelos troços traduz-se pela ocorrência de um caudal nulo.

Ao aplicar-se os critérios de selecção apresentados anteriormente verificar-se-ia que a velocidade de escoamento mínima e a pressão mínima não seriam verificadas em nenhum dos troços da RAA remanescentes e este facto indicaria que ocorria uma sequência de eventos de dano consequentes culminando num cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total de RAA, Figura 87.

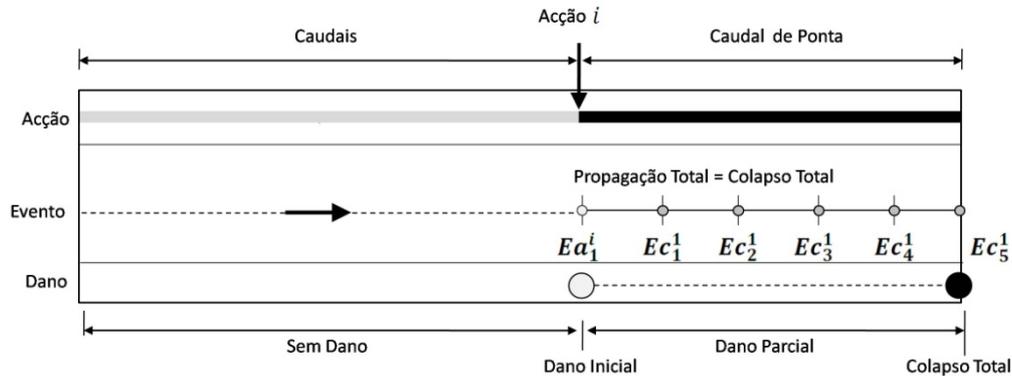


Figura 87 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ec_3^1 \rightarrow Ec_4^1 \rightarrow Ec_5^1$) do Exemplo 1, com caudal de ponta

Este cenário de dano vulnerável de colapso total poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 9.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow \dots \rightarrow Ec_5^1 \quad (9)$$

Em que: $Ea_1^i = T1$; $Ec_1^1 = T2$; $Ec_2^1 = T3$; $Ec_3^1 = T4$; $Ec_4^1 = T5$; $Ec_5^1 = T6$.

Os parâmetros de vulnerabilidade associados a este cenário de dano e que já foram quantificados anteriormente mantêm-se constantes e valem:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.167; \varphi = 6.0.$$

5.5.1.1.2 Cenário de dano vulnerável de colapso parcial: dano no troço 5 seguido de dano no troço 4, ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$).

Com a ocorrência de dano do troço 5 a RAA passaria a ter a configuração apresentada na Figura 88.

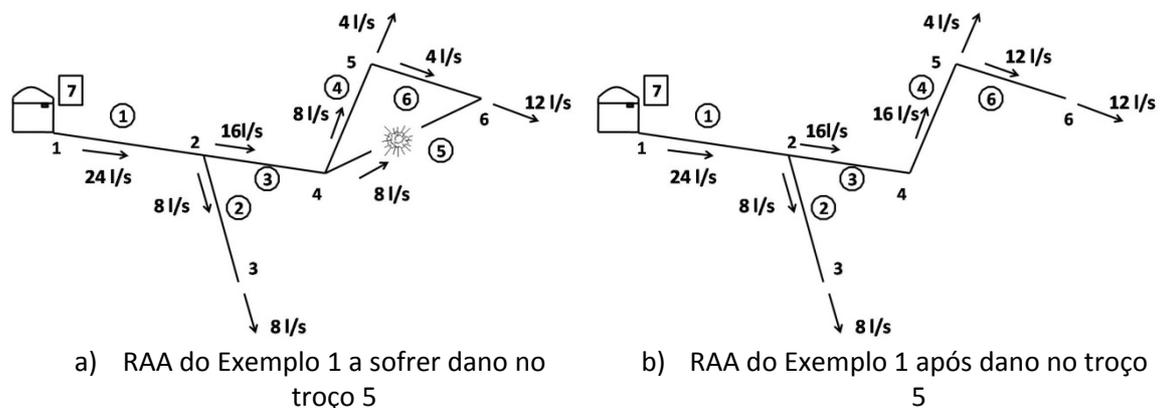


Figura 88 - Dano no troço 5 da RAA do Exemplo 1

A ocorrência de dano no troço 5 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água à zona associada a este troço.

Após o dano no troço 5 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 88. O caudal à saída do reservatório, troço 1, continua a ser de 24 l/s, o troço 2 não sofre alteração de caudal mantendo os 8 l/s. As alterações de caudal ocorrem apenas no troço 4 e 6. O troço 4 tem um aumento de caudal de 8 l/s, passando o seu caudal de 8 l/s para 16 l/s. O troço 6 tem também um aumento de caudal de 8 l/s passando o seu caudal de 4 l/s para 12 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA, a velocidade de escoamento e a perda de carga dos troços remanescentes da RAA alteram-se, Tabela 33.

Tabela 33 – Velocidades e perdas de carga do Exemplo 1 após dano no troço 5, com circulação de caudal de ponta

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	Q_{ponta} (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	200	24	0.86	0.30	1.03	1.68
2	2	3	125	8	0.74	0.30	0.86	2.67
3	2	4	160	16	0.90	0.30	0.94	1.89
4	4	5	125	16	1.47	0.30	0.86	4.71
6	5	6	110	12	1.42	0.30	0.81	6.88

Por sua vez, na Tabela 34 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 5 e para a situação de escoamento de caudal de ponta.

Tabela 34 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas do Exemplo 1, após dano no troço 5, com caudal de ponta

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	127.79	100	130.79	129.11	3.00	29.11
2	100	100	129.11	126.45	29.11	26.45
3	100	100	129.11	127.22	29.11	27.22
4	100	100	127.22	122.51	27.22	22.51
6	100	100	122.51	115.63	22.51	15.63

Pela observação da Tabela 33 verifica-se que a velocidade de escoamento nos troços 4 e 6 é superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar. Pelo critério de verificação da velocidade de escoamento máxima estes troços sofreram dano.

Este cenário de dano vulnerável identificado pela TVRAA será alterado após integração das teorias.

Na Tabela 34 verifica-se que os valores das alturas piezométricas de todos os troços mantêm-se entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento, não ocorrendo eventos de dano consequentes pela aplicação dos critérios de pressão máxima e pressão mínima.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica, o cenário de dano vulnerável caracterizado por dano inicial do troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido de dano no troço 4 ($Ea_2^i = T4$) passaria a ser caracterizado por dano no troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido por propagação de dano parcial relativo ao dano do troço 4 ($Ec_1^1 = T4$) e ao dano do troço 6 ($Ec_2^1 = T6$).

A propagação do dano do troço 5 aos troços 4 e 6 pode ser observada na Figura 89.

Passou-se então do cenário de dano vulnerável $Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$ para o cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$. Este último cenário está ilustrado esquematicamente na Figura 89.

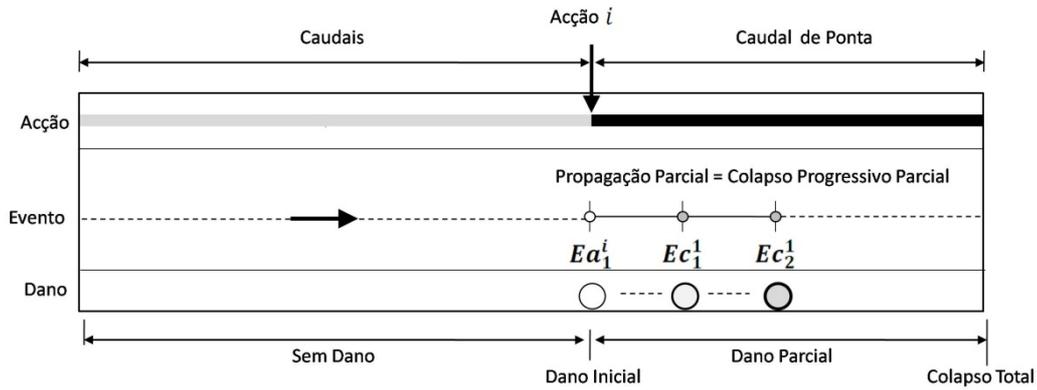


Figura 89 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$) do Exemplo 1, com caudal de ponta

Na Figura 90 está apresentada esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$) para a RAA. A traço contínuo estão representados os troços que continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

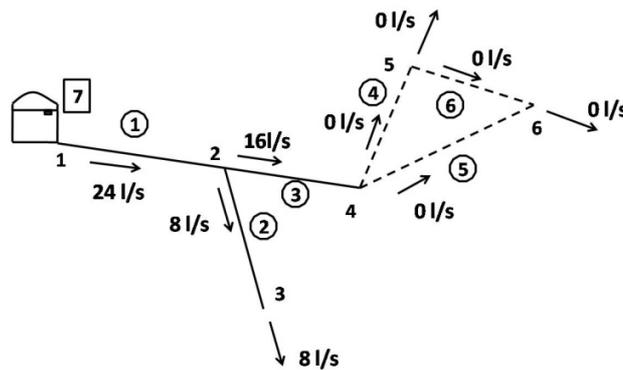


Figura 90 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após o cenário de dano vulnerável $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$, com caudal de ponta

Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 10.

$$f = Ea_1^i + Ec_1^1 + Ec_2^1 \quad (10)$$

Em que: $Ea_1^i = T5$; $Ec_1^1 = T4$; $Ec_2^1 = T6$;

Através da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA altera-se. Consequentemente, os parâmetros de vulnerabilidade associados a este novo cenário passam a ser:

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.167; \varphi = 2.514.$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.333; \varphi = 1.257.$$

Comparando os valores dos parâmetros de vulnerabilidade anteriores observa-se que a perda de RAA se mantém constante após a integração das teorias. Por sua vez, o valor da capacidade resistente ao dano diminui porque o esforço requerido para haver os cenários de dano é menor ao esforço necessário para haver dano de $Ea_1^i = T5$ e $Ea_2^i = T4$. Como a perda de RAA se mantém constante com a diminuição da capacidade resistente ao dano verifica-se um aumento do índice de vulnerabilidade.

5.5.1.1.3 Cenário de dano vulnerável de colapso parcial: dano no troço 4 seguido de dano no troço 6, ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$).

Com a danificação do troço 4 a RAA teria a configuração apresentada na Figura 91.

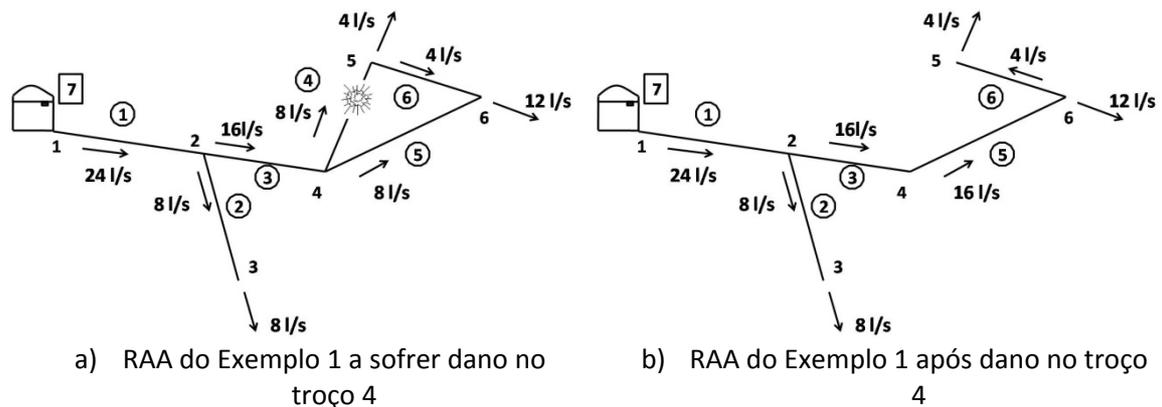


Figura 91 - Dano no troço 4 da RAA do Exemplo 1

A ocorrência de dano no troço 4 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água a zona associada a esse troço.

Após o dano no troço 4 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 91.

O caudal à saída do reservatório continua a ser de 24 l/s. Os troços 1, 2, 3 e 6 não sofrem alterações de caudal mantendo 24 l/s, 8 l/s, 16 l/s e 4 l/s, respectivamente. As alterações de caudal ocorrem apenas no troço 5 que tem um aumento de caudal de 8 l/s, passando de 8 l/s para 16 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA, a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se, Tabela 35.

Tabela 35 - Dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1 após dano no troço 4, com circulação do caudal de ponta

Troço	Nós	$D_{com.}$ (mm)	Q_{ponta} (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
				V	V_{min}	V_{max}	
1	1 2	200	24	0.86	0.30	1.03	1.68
2	2 3	125	8	0.74	0.30	0.86	2.67
3	2 4	160	16	0.90	0.30	0.94	1.89
5	4 6	125	16	1.47	0.30	0.86	7.86
6	5 6	110	4	0.47	0.30	0.81	0.94

Na Tabela 36 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1 após dano no troço 4.

Tabela 36 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 4.

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	M
1	127.79	100	130.79	129.11	3.00	29.11
2	100	100	129.11	126.45	29.11	26.45
3	100	100	129.11	127.22	29.11	27.22
5	100	100	127.22	119.37	27.22	19.37
6	100	100	120.31	119.37	20.31	19.37

Por observação da Tabela 35 verifica-se que a velocidade de escoamento no troço 5 é superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar. Pelo critério de verificação da velocidade de escoamento máxima este troço sofre dano.

Todos os troços da RAA respeitam o critério de velocidade mínima regulamentar.

O cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA seria assim alterado, após a integração das teorias.

Na Tabela 36 verifica-se que as alturas piezométricas dos pontos de todos os troços se mantêm entre os limites mínimos e máximos, não ocorrendo dano pelos critérios de verificação de pressão máxima e pressão mínima.

Neste caso, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica ter-se-ia um cenário de dano vulnerável progressivo de colapso parcial constituído pelo evento de dano “trigger” do troço 4 ($Ea_1^i = T4$) com evento de dano consequente no troço 5 ($Ec_1^1 = T5$), seguido do evento de dano “trigger” no troço 6 ($Ea_2^i = T6$), que será $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$, em vez do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$).

A propagação do dano na RAA provocado pela danificação do troço 4 está ilustrada na Figura 92.

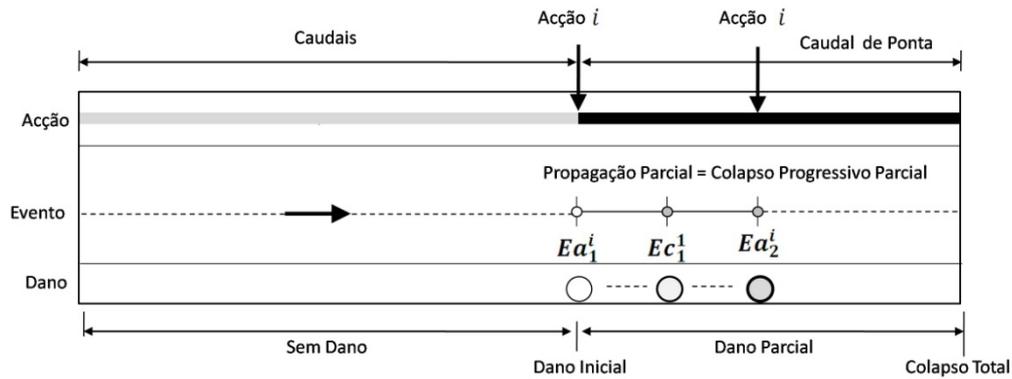


Figura 92 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) do Exemplo 1, com caudal de ponta

Na Figura 93 estão apresentadas esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável progressivo de colapso parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) para a RAA. A traço contínuo estão representados os troços que continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

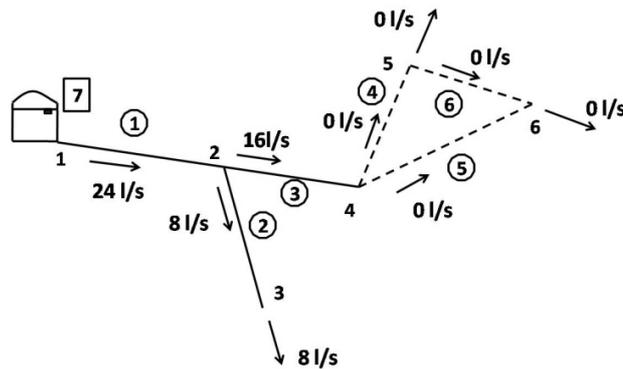


Figura 93 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após cenário de dano vulnerável progressivo de colapso parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$)

Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 11.

$$f = Ea_1^i + Ec_1^1 + Ea_2^i \quad (11)$$

Em que: $Ea_1^i = T4$; $Ec_1^1 = T5$; $Ea_2^i = T6$;

Através da integração da TVRAA com as teorias clássicas o cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA é alterado. Consequentemente, os parâmetros de vulnerabilidade associados a este novo cenário passam a ser:

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.333; \varphi = 1.257$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.212; E_R = 0.333; \varphi = 0.636.$$

Comparando os valores dos parâmetros de vulnerabilidade anteriores observa-se que a perda de RAA aumenta após a integração das teorias. Por sua vez, o valor da capacidade resistente ao dano mantém-se constante porque o esforço requerido para haver os cenários de dano continua a ser o mesmo e associado ao esforço necessário para haver dano de $Ea_1^i = T4$ e $Ea_2^i = T6$. Se o esforço para haver dano se mantém constante então o valor do esforço relativo para haver dano também se mantém constante e, implicitamente, o índice de vulnerabilidade aumenta após a integração das teorias.

Em forma de resumo, a Tabela 37 apresenta os cenários de dano e os seus parâmetros de vulnerabilidade antes e depois da integração da TVRAA com as teorias clássicas na situação de circulação de caudal de ponta na RAA.

Tabela 37 - Resumo dos cenários de dano antes e depois da integração com as teorias clássicas da RAA do Exemplo 1, para a situação de caudal de ponta

	Antes da integração	Após a integração
Cenário de dano	T1	T1→T2→T3→T4→T5→T6
γ_r^-	1.0	1.0
E_R	0.167	0.167
φ	6.0	6.0
Cenário de dano	T5→T4	T5→T4→T6
γ_r^-	0.419	0.419
E_R	0.333	0.167
φ	1.257	2.514
Cenário de dano	T4→T6	T4→T5→T6
γ_r^-	0.212	0.419
E_R	0.333	0.333
φ	0.636	1.257

5.5.1.2 Análise dos cenários de dano vulneráveis – 2ª Situação: Após ocorrer dano circula na RAA o caudal médio.

Com a situação de circulação do caudal médio a RAA do Exemplo 1 teria a distribuição de caudais representada na Figura 94 e que comparando com a Figura 7 percebe-se que estes caudais são inferiores e conseqüentemente as condições hidráulicas existentes na RAA são diferentes.

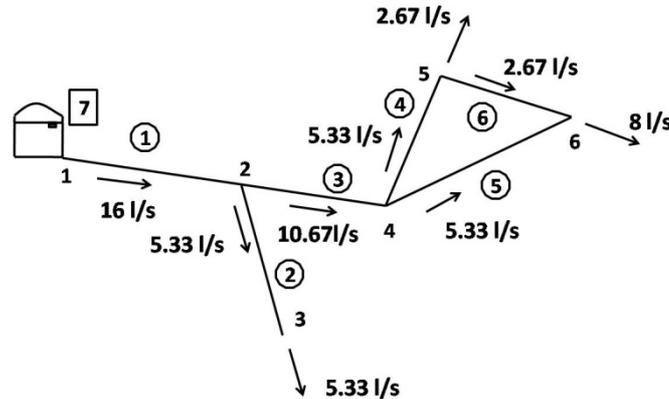


Figura 94 - RAA do Exemplo 1 com caudais médios

Tendo em conta o diâmetro dos troços da RAA do Exemplo 1 dimensionados para o caudal de ponta, a velocidade e a perda de carga que ocorre em cada troço da RAA para esta nova situação estão apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38 – Velocidades e perda de carga da RAA do Exemplo 1, com circulação de caudal médio

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	200	16	0.58	0.30	1.03	0.80
2	2	3	125	5.33	0.49	0.30	0.86	1.29
3	2	4	160	10.67	0.60	0.30	0.94	0.91
4	4	5	125	5.33	0.49	0.30	0.86	0.64
5	4	6	125	5.33	0.49	0.30	0.86	1.07
6	5	6	110	2.67	0.32	0.30	0.81	0.46

Por sua vez, na Tabela 39 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões) a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1, para a situação de caudal médio.

Tabela 39 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com caudais médios.

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	127.79	100.00	130.79	129.99	3.00	29.99
2	100.00	100.00	129.99	128.70	29.99	28.70
3	100.00	100.00	129.99	129.08	29.99	29.08
4	100.00	100.00	129.08	128.44	29.08	28.44
5	100.00	100.00	129.08	128.01	29.08	28.01
6	100.00	100.00	128.44	128.01	28.44	28.01

5.5.1.2.1 Cenário de dano vulnerável de colapso total: dano no troço 1 (Ea_1^i)

Tal como o verificado na primeira situação de análise dos cenários de dano vulneráveis, em que é considerado que quando ocorre dano na RAA o caudal que circula é o caudal de ponta, da danificação do troço 1 resulta em que toda a RAA fica privada de efectuar qualquer abastecimento de água e corresponde ao cenário de colapso total.

No entanto, considerando apenas a ocorrência de dano no troço 1 causado por uma acção externa i e integrando com as teorias clássicas verifica-se que a redistribuição de caudal pelos troços traduz-se pela ocorrência de um caudal nulo.

Ao aplicar-se os critérios de selecção apresentados anteriormente verificar-se-ia que a velocidade de escoamento mínima e a pressão mínima não seriam verificadas em nenhum dos troços da RAA remanescentes e este facto indicaria que ocorria uma propagação de dano total culminando num colapso progressivo de RAA, Figura 95.

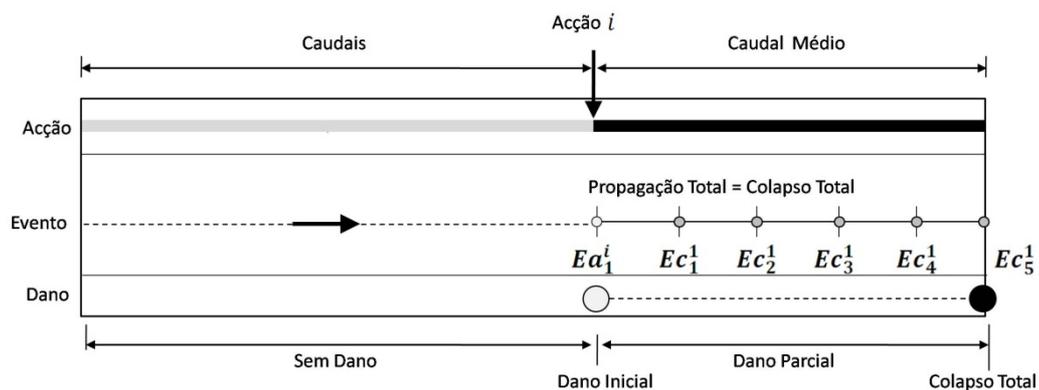


Figura 95 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ec_3^1 \rightarrow Ec_4^1 \rightarrow Ec_5^1$) do Exemplo 1, com caudal médio

Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 12.

$$f = Ea_1^i + Ec_1^1 + Ec_2^1 + \dots + Ec_5^1 \quad (12)$$

Em que:

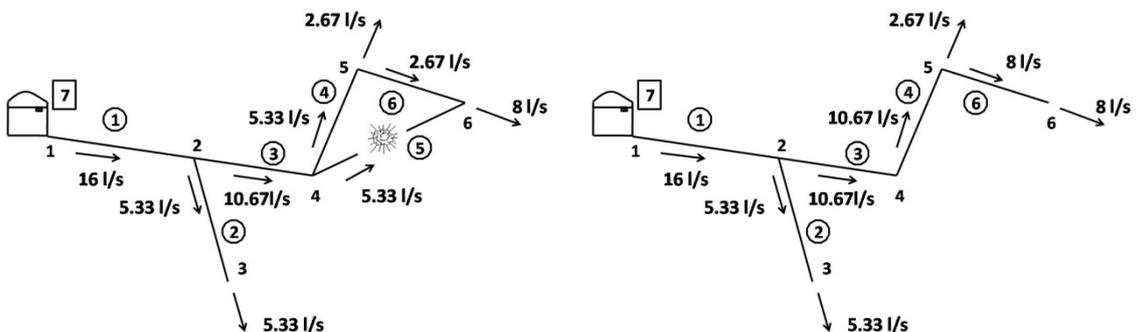
$$Ea_1^1 = T1; Ec_1^1 = T2; Ec_2^1 = T3; Ec_3^1 = T4; Ec_4^1 = T5; Ec_5^1 = T6$$

Os parâmetros de vulnerabilidade associados a este cenário de dano e que já foram quantificados anteriormente mantêm-se constantes e valem:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.167; \varphi = 6.0.$$

5.5.1.2.2 Cenário de dano vulnerável de colapso parcial: dano no troço 5 seguido de dano no troço 4, ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$)

Com a ocorrência de dano do troço 5 a RAA passaria a configuração apresentada na Figura 96. Esta figura é muito semelhante à Figura 88 diferindo apenas no valor dos caudais que circulam em cada troço.



a) RAA do Exemplo 1 a sofrer dano no troço 5, com caudal médio

b) RAA do Exemplo 1 após dano no troço 5, com caudal médio

Figura 96 - RAA do Exemplo 1 resultante do dano no troço 5, com caudal médio

A ocorrência de dano no troço 5 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água à zona associada a esse troço.

Após o dano no troço 5 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 96. O caudal à saída do reservatório, troço 1, continua a ser de 16 l/s, o troço 2 não sofre alteração de caudal mantendo os 5.33 l/s. As alterações de caudal ocorrem apenas no troço 4 e 6. O troço 4 tem um aumento de caudal de 5.33 l/s, para 10.67 l/s. O troço 6 tem também um aumento de caudal de 2.67 l/s para 8 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se e estes parâmetros estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Velocidades e perdas de carga da RAA do Exemplo 1 com circulação de caudal médio, após dano no troço 5

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	200	16.00	0.58	0.30	1.03	0.80
2	2	3	125	5.33	0.49	0.30	0.86	1.29
3	2	4	160	10.67	0.60	0.30	0.94	0.91
4	4	5	125	10.67	0.98	0.30	0.86	2.25
6	5	6	110	8.00	0.95	0.30	0.81	3.28

Por sua vez, na Tabela 41 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 5 e para a situação de escoamento de caudais médios.

Tabela 41 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 5, com caudais médios.

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	127.79	100.00	130.79	129.99	3.00	29.99
2	100.00	100.00	129.99	128.70	29.99	28.70
3	100.00	100.00	129.99	129.08	29.99	29.08
4	100.00	100.00	129.08	126.83	29.08	26.83
6	100.00	100.00	126.83	123.55	26.83	23.55

Por observação da Tabela 40 verifica-se que a velocidade de escoamento nos troços 4 e 6 é superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar. Pelo critério de verificação de velocidade de escoamento máxima estes troços sofreram dano.

O cenário de dano vulnerável identificado inicialmente pela TVRAA será alterado após a integração das teorias.

Na Tabela 41 verifica-se também que os valores das alturas piezométricas de todos os troços mantêm-se entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento, não ocorrendo eventos de dano consequentes pela aplicação dos critérios de verificação de pressão máxima e pressão mínima.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável caracterizado inicialmente por dano inicial do troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido de dano no troço 4 ($Ea_2^i = T4$) passa a ser caracterizado por dano no troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido por propagação de dano parcial relativo ao dano do troço 4 ($Ec_1^1 = T4$) e ao dano do troço 6 ($Ec_2^1 = T6$).

Passou-se então do cenário de dano vulnerável $Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$ para o cenário de dano vulnerável $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$. Este último cenário está ilustrado esquematicamente na Figura 97.

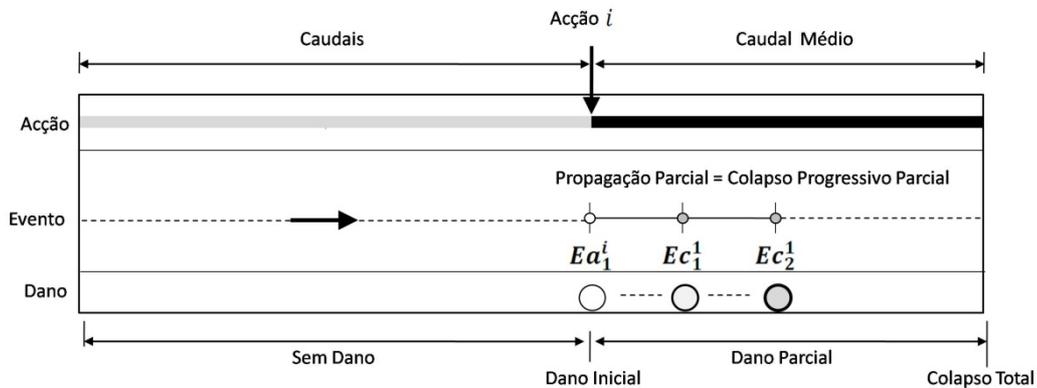


Figura 97 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$) do Exemplo 1, com caudal médio

Na Figura 98 estão apresentadas esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$) para a RAA. A traço contínua estão representados os troços que continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

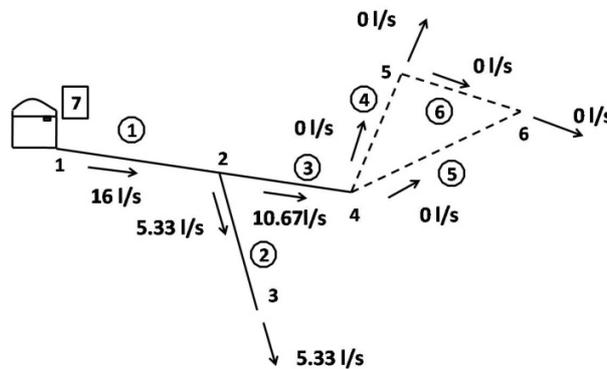


Figura 98 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após o cenário de dano vulnerável $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1$, com caudal médio

Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 13.

$$f = Ea_1^1 + Ec_1^1 + Ec_2^1 \quad (13)$$

Em que: $Ea_1^1 = T5$; $Ec_1^1 = T4$; $Ec_2^1 = T6$;

Através da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA altera-se. Consequentemente, os parâmetros de vulnerabilidade associados a este novo cenário passam a ser:

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.167; \varphi = 2.514.$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.333; \varphi = 1.257.$$

Comparando os valores dos parâmetros de vulnerabilidade anteriores observa-se que a perda de RAA se mantém constante após a integração das teorias. Por sua vez, o valor da capacidade resistente ao dano diminui porque o esforço requerido para haver os cenários de dano é menor ao esforço necessário para haver dano de $Ea_1^i = T5$ e $Ea_2^i = T4$. Como a perda de RAA se mantém constante com a diminuição da capacidade resistente ao dano verifica-se um aumento do índice de vulnerabilidade.

5.5.1.2.3 Cenário de dano vulnerável de colapso parcial: dano no troço 4 seguido de dano no troço 6, ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$)

O dano no troço 4 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água à zona associada a esse troço. A RAA do Exemplo 1 apresenta a distribuição de caudais representada na Figura 99.

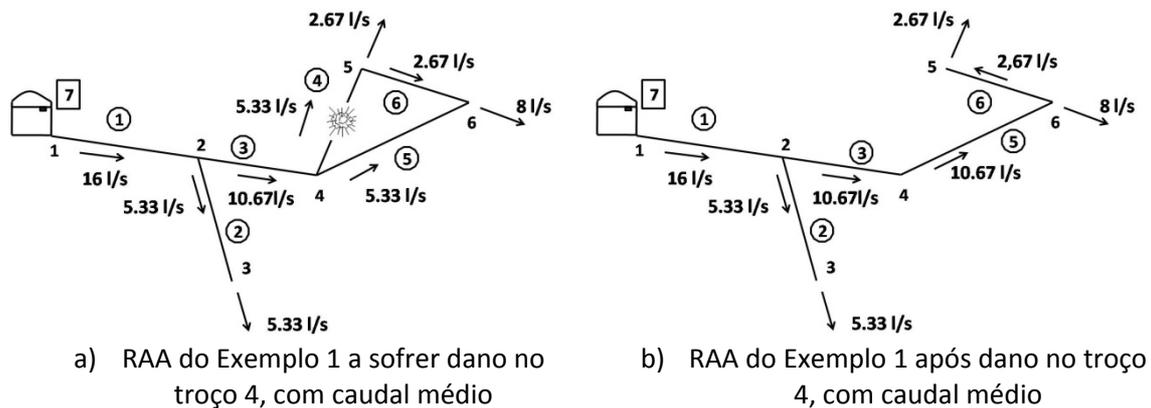


Figura 99 - RAA do Exemplo 1 resultante do dano no troço 4, com caudal médio

O caudal à saída do reservatório continua a ser de 16 l/s. Os troços 1, 2, 3 e 6 não sofrem alterações de caudal mantendo 16 l/s, 5.33 l/s, 10.67 l/s 2.67 l/s, respectivamente. As alterações de caudal ocorrem apenas no troço 5 que tem um aumento de caudal de 5.33 l/s, passando para 10.67 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se, Tabela 42.

Tabela 42 - Dados relativos ao dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 1 após dano no troço 4, com circulação de caudal médio

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	200	16.00	0.58	0.30	1.03	0.80
2	2	3	125	5.33	0.49	0.30	0.86	1.29
3	2	4	160	10.67	0.60	0.30	0.94	0.91
5	4	6	125	10.67	0.98	0.30	0.86	3.75
6	5	6	110	2.67	0.32	0.30	0.81	0.46

Na Tabela 43 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1 com caudal médio, após dano no troço 4.

Tabela 43 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com caudal médio, após dano no troço 4.

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	M
1	127.79	100	130.79	129.99	3.00	29.99
2	100	100	129.99	128.70	29.99	28.70
3	100	100	129.99	129.08	29.99	29.08
5	100	100	129.08	125.34	29.08	25.34
6	100	100	125.79	125.34	25.79	25.34

Por observação da Tabela 42 verifica-se que a velocidade de escoamento no troço 5 é superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar. Pelo critério de verificação de velocidade de escoamento máxima este troço sofre dano.

Todos os troços da RAA respeitam o critério de velocidade mínima regulamentar. O cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA seria assim alterado, após a integração das teorias.

Na Tabela 43 verifica-se que as alturas piezométricas dos pontos de todos os troços mantêm-se entre os limites mínimos e máximos, não ocorrendo dano pelos critérios de verificação de pressão máxima e pressão mínima.

Neste caso, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica teria-se então como cenário de dano vulnerável progressivo de colapso parcial constituído pelo evento de dano “trigger” do troço 4 ($Ea_1^i = T4$) com evento de dano consequente no troço 5 ($Ec_1^1 = T5$), seguido do evento de dano “trigger” no troço 6 ($Ea_2^i = T6$), que será $Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$, em vez do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$).

A propagação do dano na RAA provocado pela danificação do troço 4 está ilustrada na Figura 100.

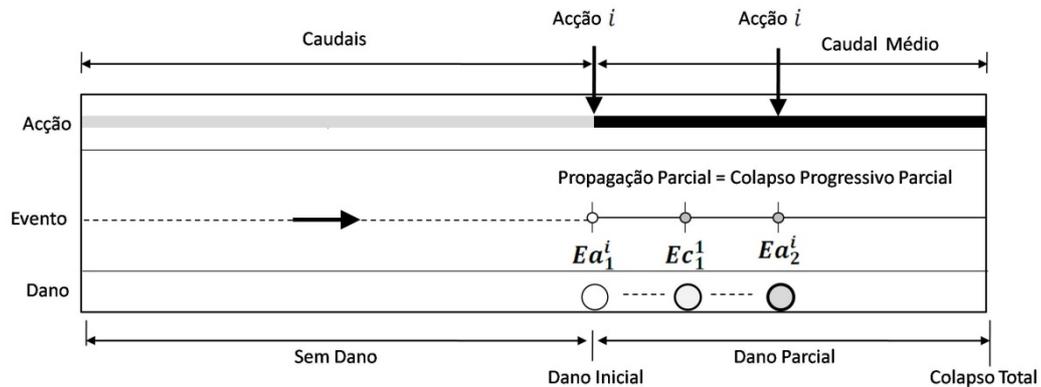


Figura 100 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) do Exemplo 1, com caudal médio

Na Figura 101 estão apresentadas esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável progressivo de colapso parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$) para a RAA. A linha contínua estão representados os troços que continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

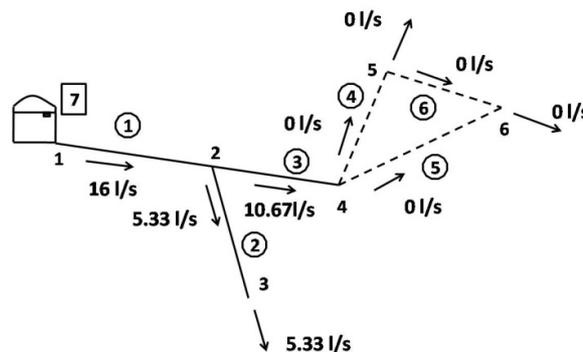


Figura 101 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$)

Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 14.

$$f = Ea_1^i + Ec_1^1 + Ea_2^i \quad (14)$$

Em que: $Ea_1^i = T4$; $Ec_1^1 = T5$; $Ea_2^i = T6$;

Através da integração da TVRAA com as teorias clássicas o cenário de dano vulnerável inicialmente identificado pela TVRAA é alterado. Consequentemente, os parâmetros de vulnerabilidade associados a este novo cenário passam a ser:

$$\gamma_r^- = 0.419; E_R = 0.333; \varphi = 1.257.$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.212; E_R = 0.333; \varphi = 0.636.$$

Comparando-se os respectivos valores verifica-se que o valor do índice de vulnerabilidade aumenta, uma vez que a capacidade resistente ao dano se mantém constante este facto deve-se ao aumento do valor de perda de RAA.

5.5.1.3 Comparação entre a 1ª e 2ª situação de análise dos cenários de dano vulneráveis da RAA do Exemplo 1

Face ao exposto, verifica-se, como era expectável, que a circulação do caudal de ponta é a situação mais desfavorável para haver propagação de dano na e porque a redistribuição do caudal de ponta é mais exigente com a RAA no que se refere aos novos critérios de dano, podendo provocar mais facilmente dano em qualquer troço.

Os cenários de dano identificados, neste caso, são iguais tanto na 1ª como na 2ª situação de análise, variando os valores de velocidades de escoamento e pressões na RAA. Com a redução de caudal da 1ª para a 2ª situação existe a consequente redução de velocidade de escoamento e aumento de pressão na RAA.

5.5.2 Integração da TVRAA com as teorias clássicas na resolução da RAA do Exemplo 2

Ao contrário do ocorrido aquando da integração na resolução da RAA do Exemplo 1, em que foram consideradas duas situações de circulação de caudal após o dano num determinado troço, na integração da RAA do Exemplo 2 apenas foi considerada a situação em que o caudal médio circula após a ocorrência de um dano.

O caudal médio foi obtido através do quociente entre o caudal de ponta e o factor de ponta. O factor de ponta considerado neste exemplo foi de 1.5.

Através da aplicação da TVRAA à RAA do Exemplo 2, foram identificados seis cenários de dano vulneráveis.

Estes cenários vão ser analisados individualmente e de modo a se ter em conta o facto de haver alteração das condições hidráulicas da RAA aquando da ocorrência dos eventos de dano “trigger” que caracterizam cada um destes cenários.

5.5.2.1 Análise dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 2

Com a circulação do caudal médio a RAA do Exemplo 2 tem a distribuição de caudais ilustrada na Figura 102.

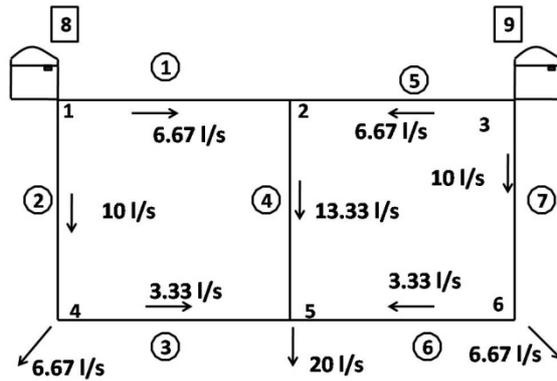


Figura 102 - RAA do Exemplo 2 com circulação do caudal médio

Tendo em conta que os diâmetros da RAA do Exemplo 2 foram dimensionados para o caudal de ponta, as condições hidráulicas são alteradas quando na RAA circula o caudal médio. Para esta nova condição a velocidade e a perda de carga que ocorre em cada troço da RAA estão apresentadas na Tabela 44.

Tabela 44 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com circulação de caudal médio ($Q_{médio}$)

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	140	6.67	0.49	0.30	0.89	0.37
2	1	4	160	10.00	0.56	0.30	0.94	0.20
3	4	5	110	3.33	0.40	0.30	0.81	0.34
4	2	5	200	13.33	0.48	0.30	1.03	0.12
5	3	2	140	6.67	0.49	0.30	0.89	0.37
6	6	5	110	3.33	0.40	0.30	0.81	0.34
7	3	6	160	10.00	0.56	0.30	0.94	0.20

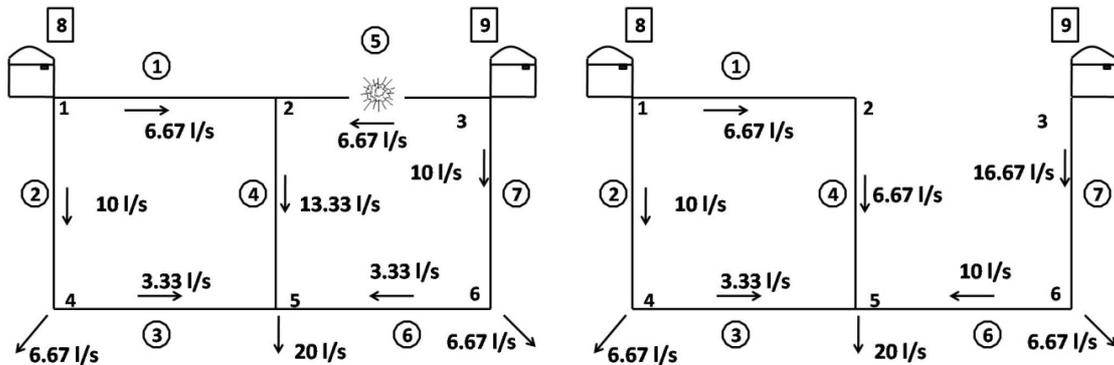
Por sua vez, na Tabela 45 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões) a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 2, para a circulação de caudal médio.

Tabela 45 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 para $Q_{médio}$

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	145.00	3.00	25.00
2	142.37	105.00	145.37	145.17	3.00	40.17
3	105.00	115.00	145.17	144.88	40.17	29.88
4	120.00	115.00	145.00	144.88	25.00	29.88
5	142.37	120.00	145.37	145.00	3.00	25.00
6	105.00	115.00	145.17	144.88	40.17	29.88
7	142.37	105.00	145.37	145.17	3.00	40.17

5.5.2.1.1 Cenário de dano de colapso total: dano nos troços 5, 7, 1 e 2 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i \rightarrow Ea_4^i$)

Com o dano do troço 5, a RAA do Exemplo 2 passaria a ter a configuração apresentada na Figura 103.



a) Primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$)

b) RAA do Exemplo 2 com redistribuição de caudais após $Ea_1^i = T5$

Figura 103 - RAA do Exemplo 2 após o primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$)

A ocorrência de dano no troço 5 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água à zona associada a esse troço.

Após o dano no troço 5 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 103 b). O dano no troço 5 provoca uma redistribuição de caudal nos troços 4, 6 e 7. O caudal do troço 4 é alterado de 13.33 l/s para 6.67 l/s, o troço 6 tem um aumento de caudal de 3.33 l/s para 10 l/s enquanto que o caudal do troço 7 passa de 10 l/s para 16.67 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se e estes parâmetros estão apresentados Tabela 46.

Tabela 46 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 1 com $Q_{médio}$, após dano no troço 5

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	140	6.67	0.49	0.30	0.89	0.37
2	1	4	160	10.00	0.56	0.30	0.94	0.20
3	4	5	110	3.33	0.40	0.30	0.81	0.34
4	2	5	200	6.67	0.24	0.30	1.03	0.03
6	6	5	110	10.00	1.19	0.30	0.81	2.47
7	3	6	160	16.67	0.94	0.30	0.94	0.51

Por sua vez, na Tabela 47 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 5 com a circulação de caudais médios.

Tabela 47 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 para $Q_{médio}$, após dano no troço 5

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	145.00	3.00	25.00
2	142.37	105.00	145.37	145.17	3.00	40.17
3	105.00	115.00	145.17	144.83	40.17	29.97
4	120.00	115.00	145.00	144.97	25.00	29.97
6	105.00	115.00	144.86	142.40	39.86	29.97
7	142.37	105.00	145.37	144.86	3.00	39.86

Por observação da Tabela 46 verifica-se que a velocidade de escoamento no troço 4 é inferior à velocidade de escoamento mínima. No troço 6 a velocidade de escoamento é superior à velocidade máxima regulamentar. Pelos critérios de verificação de velocidade de escoamento mínima e de velocidade de escoamento máxima estes troços sofrem dano.

O cenário de dano vulnerável identificado inicialmente pela TVRAA será alterado após a integração das teorias.

Na Tabela 47 verifica-se também que os valores das alturas piezométricas de todos os troços mantêm-se entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento da RAA, não ocorrendo eventos de dano consequentes pela aplicação dos critérios de verificação de pressão máxima e pressão mínima.

Neste momento, a RAA do Exemplo 2 teve um evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$) e os danos consequentes nos troços 4 ($Ec_1^i = T4$) e 6 ($Ec_2^i = T6$), tal como está ilustrado na

Figura 104.

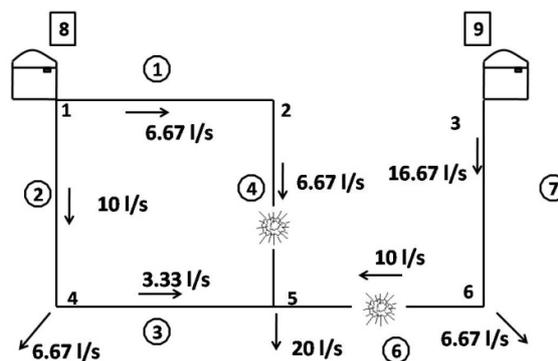


Figura 104 – Dano consequente devido à ocorrência do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$)

A análise deste cenário de dano prossegue com a ocorrência do evento de dano “trigger” seguinte, dano no troço 7, Figura 105 a). Neste momento a RAA é apenas constituída pelos troços 1, 2 e 3 que são os troços que ainda não sofreram dano, Figura 105 b).

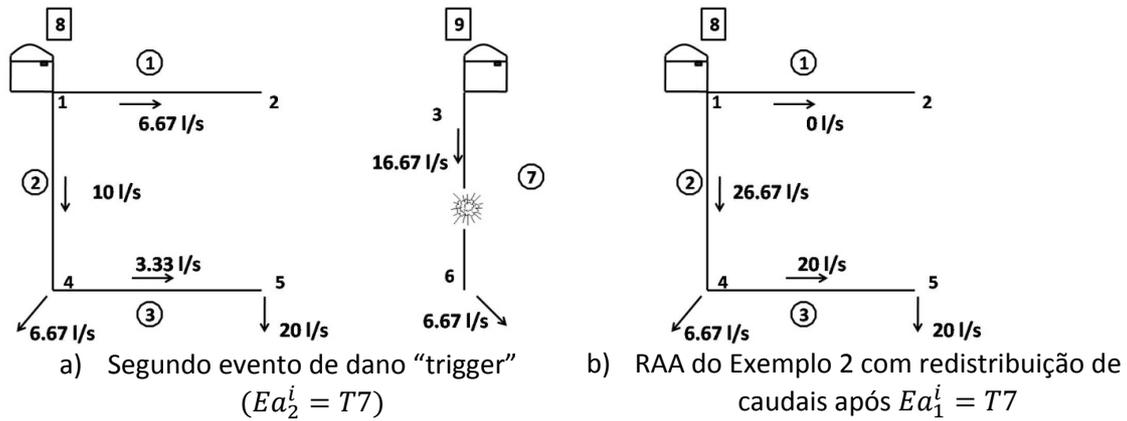


Figura 105 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do segundo evento de dano "trigger" ($Ea_1^i = T7$)

Após o dano no troço 7 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 105 b). Do dano nos troços que fazem ligação com o troço 1 (troços 4 e 5) resulta que pelo troço 1 a RAA não tem capacidade de fornecer água aos pontos de abastecimento, por este motivo considera-se que o troço 1 passa a ter um caudal nulo.

O troço 2 tem um aumento de caudal de 10 l/s para 26.67 l/s enquanto que o troço 3 vê o seu caudal alterado de 3.33 l/s para 20 l/s. Desta nova condição hidráulica resultam os valores de perda de carga e velocidade de escoamento apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano "trigger" nos troços 5 e 7

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	140	0.00	0.00	0.30	0.89	0.000
2	1	4	160	26.67	1.50	0.30	0.94	1.203
3	4	5	110	20.00	2.37	0.30	0.81	8.810

Na Tabela 49 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 2, após os eventos de dano "trigger" nos troços 5 e 7 com a circulação do caudal médio.

Tabela 49 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 7

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	120.00	3.00	0.00
2	142.37	105.00	145.37	144.17	3.00	39.17
3	105.00	115.00	144.17	144.17	39.17	29.17

Por observação da Tabela 48 verifica-se que a velocidade de escoamento nos troços 2 e 3 é superior à velocidade de escoamento máxima regulamentar. O troço 1 apresenta uma velocidade de escoamento inferior à velocidade mínima, devido à redistribuição de caudais nesse local da RAA se traduzir na ocorrência de um caudal nulo, pelo mesmo motivo na Tabela 49, o troço 1 apresenta uma altura piezométrica inferior à admissível.

Os troços 2 e 3 sofrem dano pelo critério de verificação da velocidade máxima regulamentar. O troço 1 sofre dano simultaneamente pelo critério de verificação da velocidade mínima e pelo critério de verificação da pressão mínima, Figura 106.

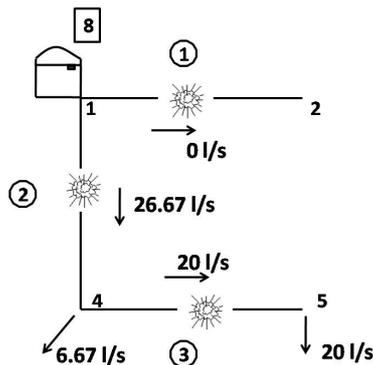


Figura 106 - Dano consequente devido à ocorrência primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T7$)

Deste modo, da análise deste cenário de dano vulnerável, porque todos os troços da RAA sofreram dano, obtendo-se um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica, o cenário de dano vulnerável caracterizado inicialmente por dano inicial do troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido de dano no troço 7 ($Ea_2^i = T7$), troço 1 ($Ea_3^i = T1$) e troço 2 ($Ea_4^i = T2$) passa a ser caracterizado pelos eventos de dano “trigger” nos troços 5 ($Ea_1^i = T5$) e 7 ($Ea_2^i = T7$) seguido por propagação de dano aos restantes troços da RAA.

Passou-se então do cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i \rightarrow Ea_4^i$) para o cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$). Este último cenário está ilustrado esquematicamente na Figura 107.

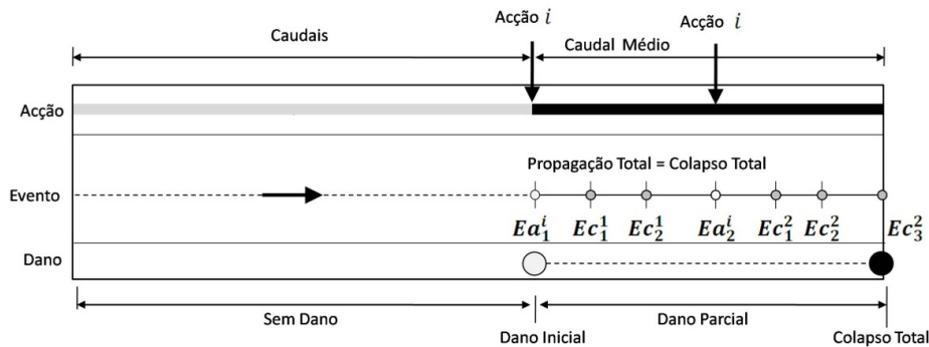


Figura 107 – Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$) do Exemplo 2

Este cenário de dano vulnerável de colapso total poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 15.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \quad (15)$$

Em que: $Ea_1^i = T5$; $Ec_1^1 = T4$; $Ec_2^1 = T6$; $Ea_2^i = T7$; $Ec_1^2 = T1$; $Ec_2^2 = T2$, $Ec_3^2 = T3$.

Na Figura 108 está apresentada esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$) para a RAA do Exemplo 2. A traço contínuo estão representados os troços que continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

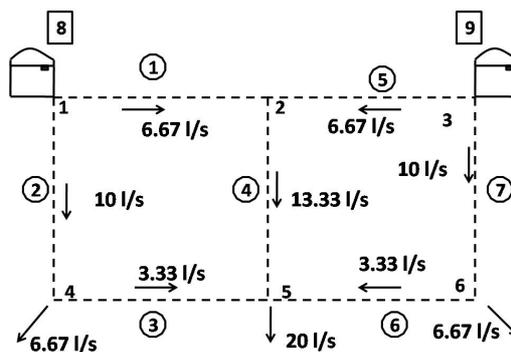


Figura 108 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 1, após o cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ea_2^i$)

Com a alteração do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado, consequentemente, são alterados os parâmetros de vulnerabilidade e que para o novo cenário de dano vulnerável passam a ser:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.286; \varphi = 3.50$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.571; \varphi = 1.750$$

Comparando estes valores dos parâmetros de vulnerabilidade anteriores observa-se que a perda de RAA se mantém constante após a integração das teorias. Por sua vez, o valor da capacidade resistente ao dano diminui porque o esforço requerido para haver este cenário de dano vulnerável é inferior ao esforço necessário para haver dano de $Ea_1^i = T5$, $Ea_2^i = T7$, $Ea_3^i = T1$ e $Ea_4^i = T2$. Como a perda de RAA se mantém constante e a capacidade resistente ao dano diminui, verifica-se um aumento do valor do índice de vulnerabilidade, aumentando de 1.75 para 3.50.

5.5.2.1.2 Cenário de dano de colapso total: dano nos troços 5, 7, 3 e 4 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i \rightarrow Ea_4^i$)

Na análise deste cenário de dano verifica-se que o cenário resultante após a integração das teorias é igual ao cenário analisado no ponto anterior. Os cenários de dano vulneráveis identificados apenas diferem no terceiro e quarto evento de dano “trigger”, e uma vez que o primeiro e segundo evento de dano “trigger” ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$) provocam colapso progressivo total na RAA termina assim a análise deste cenário de dano vulnerável.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável caracterizado inicialmente por dano inicial do troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido de dano no troço 7 ($Ea_2^i = T7$), troço 3 ($Ea_3^i = T3$) e troço 4 ($Ea_4^i = T4$) passa a ser caracterizado pelo eventos dano “trigger” no troços 5 ($Ea_1^i = T5$) e 7 ($Ea_2^i = T7$) seguido por propagação de dano aos restantes troços da RAA.

Passou-se então do cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i \rightarrow Ea_4^i$) para o cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$). Este último cenário é igual ao apresentado no ponto anterior e está ilustrado esquematicamente na Figura 107.

Com a alteração do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado, conseqüentemente, são alterados os parâmetros de vulnerabilidade e que para o novo cenário de dano vulnerável passam a ser:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.286; \varphi = 3.50.$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.705; E_R = 0.571; \varphi = 1.233.$$

Comparando estes valores dos parâmetros de vulnerabilidade observa-se que o valor do índice de vulnerabilidade sofre um aumento de 1.233 para 3.50. Este facto deve-se a um menor valor de esforço requerido para haver dano provocar uma maior perda de

RAA, uma vez que inicialmente quatro eventos de dano “trigger” provocavam uma perda de RAA com valor de 0.705 e após a integração das teorias apenas dois eventos de dano “trigger” provocam o colapso total da RAA, $\gamma_r^- = 1.0$.

5.5.2.1.3 Cenário de dano de colapso parcial: dano nos troços 5, 3 e 4 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i$)

A análise deste cenário de dano vulnerável começa com o primeiro evento de dano “trigger” dano no troço 5 ($Ea_1^i = T5$), a redistribuição de caudais e os danos consequentes provocados pelas condições hidráulicas ocorridas após o evento de dano “trigger” foram apresentadas na parte inicial do capítulo, no ponto 5.5.2.1.1, Cenário de dano de colapso total: dano nos troços 5, 7, 1 e 2 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i \rightarrow Ea_4^i$).

Este evento de dano “trigger” causa dano consequente nos troços 4 e 6 pelos critérios de verificação de velocidade mínima e máxima regulamentar, respectivamente. O dano consequente nestes troços pode ser verificado na Tabela 46.

Neste momento a RAA do Exemplo 2 teve um evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T5$) e os danos consequentes nos troços 4 ($Ec_1^1 = T4$) e 6 ($Ec_2^1 = T6$), tal como está ilustrado na Figura 104.

A análise deste cenário de dano vulnerável prossegue com o evento de dano “trigger” seguinte, dano no troço 3, Figura 109 a). Neste momento a RAA é apenas constituída pelos troços 1, 2 e 7 que são os troços que ainda não sofreram dano, Figura 109 b).

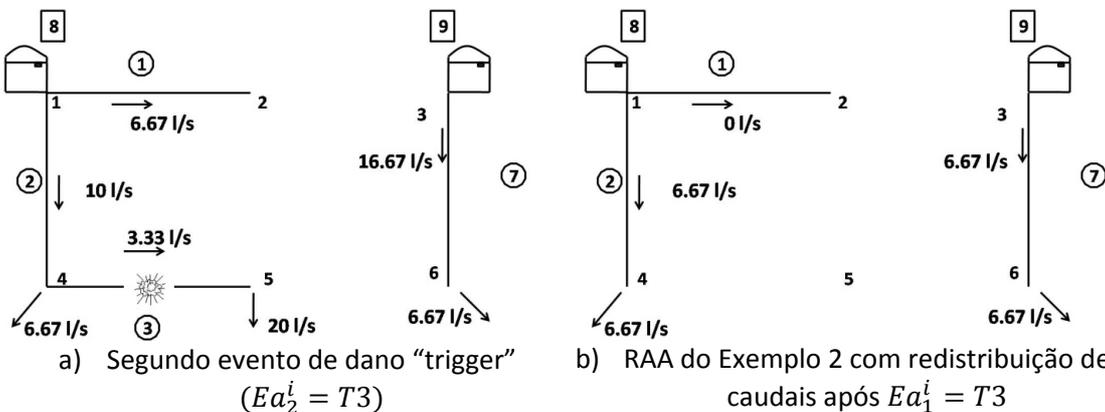


Figura 109 - RAA do Exemplo 2 após o segundo evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$)

Após o dano no troço 7 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 109 b). Do dano nos troços que fazem ligação com o troço 1 (troços 4 e 5) resulta que pelo troço 1 a RAA não tem capacidade de fornecer água aos pontos de abastecimento, por este motivo considera-se que o troço 1 passa a ter um caudal nulo.

O troço 2 tem uma redução de caudal de 10 l/s para 6.67 l/s, tal como o troço 3 vê o seu caudal reduzido de 16.67 l/s para 6.67 l/s. Desta nova condição hidráulica resultam os valores de perda de carga e velocidade de escoamento apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 3

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	140	0.00	0.00	0.30	0.89	0.00
2	1	4	160	6.67	0.37	0.30	0.94	0.10
7	3	6	160	6.67	0.37	0.30	0.94	0.10

Na Tabela 51 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 2, após os eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 3 com a circulação do caudal médio.

Tabela 51 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 1 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 5 e 7

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	120.00	3.00	0.00
2	142.37	105.00	145.37	145.27	3.00	40.27
3	142.37	105.00	145.37	145.27	3.00	40.27

Por observação da Tabela 50 verifica-se que o troço 1 apresenta uma velocidade de escoamento inferior à velocidade mínima, devido à redistribuição de caudais nesse local da RAA se traduzir pela ocorrência de um caudal nulo, pelo mesmo motivo na Tabela 51, o troço 1 apresenta uma altura piezométrica inferior à admissível.

Apenas o troço 1 sofre dano consequente provocado pela redistribuição de caudais provocada pelo evento de dano “trigger”, simultaneamente pelo critério de verificação da velocidade mínima e pelo critério de verificação da pressão mínima, Figura 110.

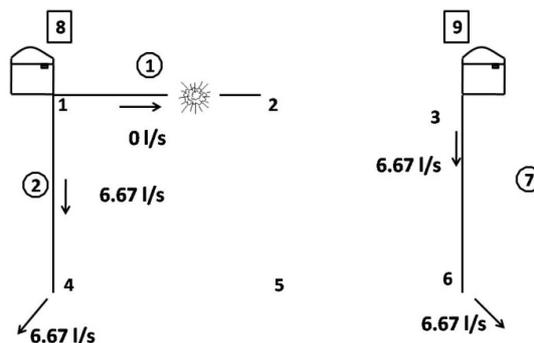


Figura 110 - Dano consequente devido primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$)

Termina assim a análise deste cenário de dano vulnerável, porque todos os eventos de dano do cenário inicial, dano nos troços 5, 3 e 4, já ocorreram.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável caracterizado inicialmente por dano inicial do

troço 5 ($Ea_1^i = T5$) seguido de dano no troço 3 ($Ea_2^i = T3$) e troço 4 ($Ea_4^i = T4$) passa a ser caracterizado pelos eventos de dano “trigger” nos troços 5 ($Ea_1^i = T5$) e 3 ($Ea_2^i = T3$) seguido por propagação de dano aos troços 1, 4 e 6.

Passou-se então do cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ea_3^i$) para o cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2$). Este último cenário está ilustrado esquematicamente na Figura 111.

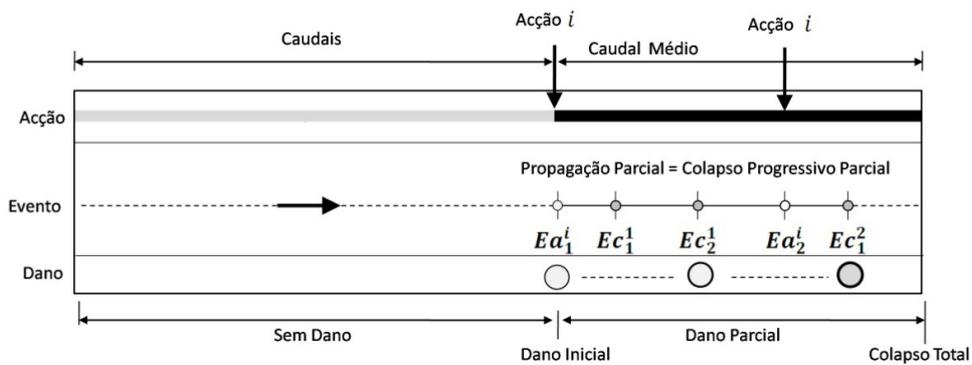


Figura 111 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2$) do Exemplo 2

Este cenário de dano vulnerável de colapso total poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 16.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \quad (16)$$

Em que: $Ea_1^i = T5$; $Ec_1^1 = T4$; $Ec_2^1 = T6$; $Ea_2^i = T3$; $Ec_1^2 = T1$;

Na Figura 108 está apresentada esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2$) para a RAA do Exemplo 2. A traço contínua estão representados os troços que continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

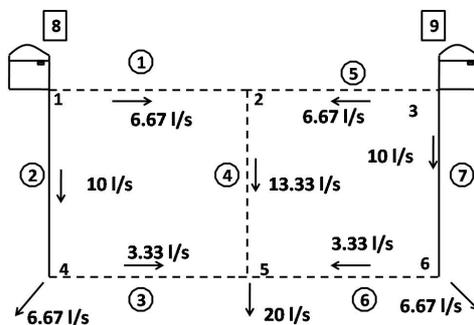


Figura 112 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 2, após cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2$).

Com a alteração do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado, consequentemente, são alterados os parâmetros de vulnerabilidade e que para o novo cenário de dano vulnerável passam a ser:

$$\gamma_r^- = 0.792; E_R = 0.286; \varphi = 2.772.$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.425; E_R = 0.429; \varphi = 0.993.$$

Comparando estes valores dos parâmetros de vulnerabilidade observa-se que o valor do índice de vulnerabilidade sofre um aumento de 0.993 para 2.772. Este facto deve-se a um menor valor de esforço requerido para haver dano provocar uma maior perda de RAA, uma vez que inicialmente três eventos de dano “trigger” provocavam uma perda de RAA com valor de 0.425 e após a integração das teorias apenas dois eventos de dano “trigger” provocam o colapso total da RAA, $\gamma_r^- = 0.792$.

5.5.2.1.4 Cenário de dano de colapso parcial: dano nos troços 1 e 2 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$)

Com a danificação do troço 1 a RAA do Exemplo 2 teria a configuração apresentada na Figura 113.

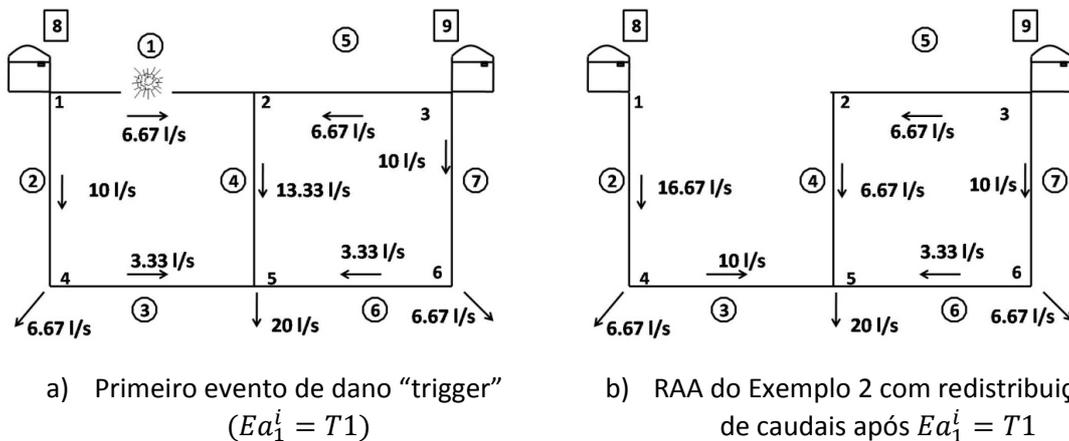


Figura 113 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T1$)

A ocorrência de dano no troço 1 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água à zona associada a esse troço.

Após o dano no troço 1 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 113 b). O dano no troço 1 provoca uma redistribuição de caudal nos troços 2, 3 e 4. O caudal do troço 2 é alterado de 10 l/s para 16.67 l/s, o troço 3 tem um aumento de caudal de 3.33 l/s para 10 l/s enquanto que o caudal do troço 4 é reduzido de 13.33 l/s para 6.67 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se e estes parâmetros estão apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 1 com $Q_{médio}$, após dano no troço 5

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
2	1	4	160	16.67	0.94	0.30	0.94	0.51
3	4	5	110	10.00	1.19	0.30	0.81	2.47
4	2	5	200	6.67	0.24	0.30	1.03	0.03
5	3	2	140	6.67	0.49	0.30	0.89	0.37
6	6	5	110	3.33	0.40	0.30	0.81	0.34
7	3	6	160	10.00	0.56	0.30	0.94	0.20

Por sua vez, na Tabela 53 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 2, após dano no troço 1 com a circulação de caudal médio.

Tabela 53 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência do dano no troço 1

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
2	142.37	105.00	145.37	144.86	3.00	39.86
3	105.00	115.00	144.86	144.97	39.86	29.97
4	120.00	115.00	145.00	144.97	25.00	29.97
5	142.37	120.00	145.37	145.00	3.00	25.00
6	105.00	115.00	145.17	144.97	40.17	29.97
7	142.37	105.00	145.37	145.17	3.00	40.17

Por observação da Tabela 52 verifica-se que no troço 3 a velocidade de escoamento é superior à velocidade máxima regulamentar e no troço 4 é inferior à velocidade de escoamento mínima. Pelos critérios de verificação de velocidade máxima regulamentar e velocidade de escoamento mínima, respectivamente, estes troços sofrem dano.

O cenário de dano vulnerável identificado inicialmente pela TVRAA será alterado após a integração das teorias.

Na Tabela 53 verifica-se também que os valores das alturas piezométricas de todos os troços mantêm-se entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento, não ocorrendo eventos de dano consequentes pela aplicação dos critérios de verificação de pressão máxima e pressão mínima.

Neste momento a RAA do Exemplo 2 teve um evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T1$) e os danos consequentes nos troços 3 ($Ec_1^1 = T3$) e 4 ($Ec_2^1 = T4$), tal como está ilustrado na Figura 114.

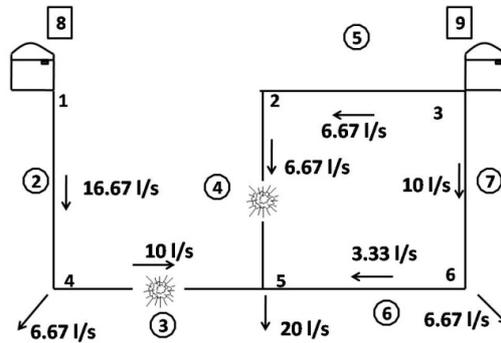
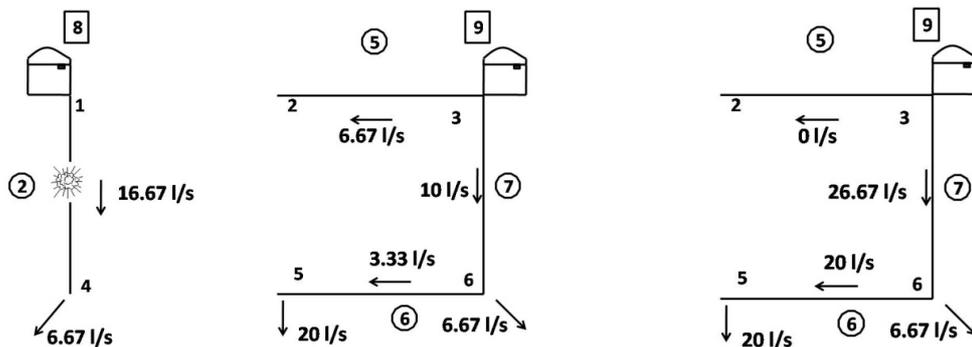


Figura 114 - Dano consequente devido à ocorrência do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T1$)

A análise do cenário de dano prossegue com o evento de dano “trigger” seguinte, dano no troço 2, Figura 115 a). Neste momento a RAA é apenas constituída pelos troços 5, 6 e 7 que são os troços que ainda não sofreram dano, Figura 115 b).



a) Segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T2$) b) RAA do Exemplo 2 com redistribuição de caudais após $Ea_2^i = T2$

Figura 115 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante da ocorrência do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T2$)

Após o dano no troço 2 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 115 b). Do dano nos troços que fazem ligação com o troço 5 (dano no troços 4) resulta que pelo troço 5 a RAA não tem capacidade de fornecer água aos pontos de abastecimento, por este motivo considera-se que o troço 5 passa a ter um caudal nulo.

O troço 6 tem um aumento de caudal de 3.33 l/s para 20 l/s enquanto que o troço 7 vê o seu caudal sofrer um aumento de 10 l/s para 26.67 l/s. Desta nova condição hidráulica resultam os valores de perda de carga e velocidade de escoamento apresentados na Tabela 54.

Deste modo, a análise do cenário de dano vulnerável termina porque todos os troços da RAA sofreram dano, obtendo-se assim um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável caracterizado inicialmente por dano inicial do troço 1 ($Ea_1^i = T1$) seguido de dano no troço 2 ($Ea_2^i = T2$) passa a ser caracterizado pelo eventos dano “trigger” no troços 1 ($Ea_1^i = T1$) e 2 ($Ea_2^i = T2$) seguido de propagação de dano aos restantes troços da RAA.

Passou-se então do cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$) para o cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$). Este último cenário está ilustrado esquematicamente na Figura 117.

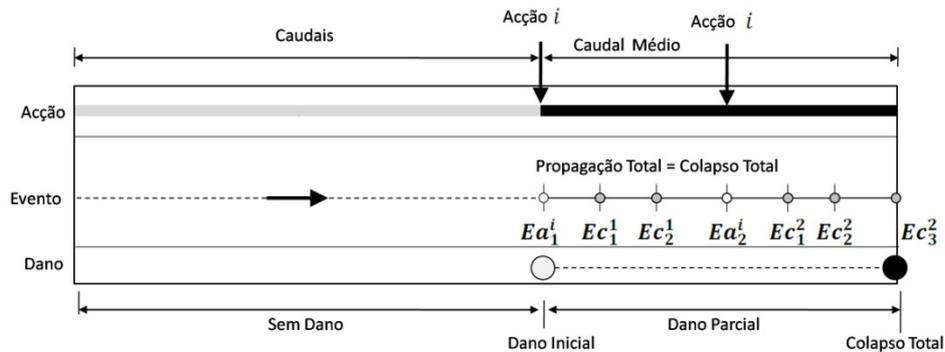


Figura 117 – Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total ($Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2$) do Exemplo 2

Este cenário de dano vulnerável de colapso total poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 17.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ec_1^1 \rightarrow Ec_2^1 \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \quad (17)$$

Em que:

$$Ea_1^1 = T1; Ec_1^1 = T3; Ec_2^1 = T4; Ea_2^i = T2; Ec_1^2 = T5; Ec_2^2 = T6; Ec_3^2 = T7.$$

O cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total já foi identificado na análise do primeiro cenário de dano e as consequências deste estão ilustradas na Figura 108

Com a alteração do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado, consequentemente, são alterados os parâmetros de vulnerabilidade e que para o novo cenário de dano vulnerável passam a ser:

$$\gamma_r^- = 1.0; E_R = 0.286; \varphi = 3.50.$$

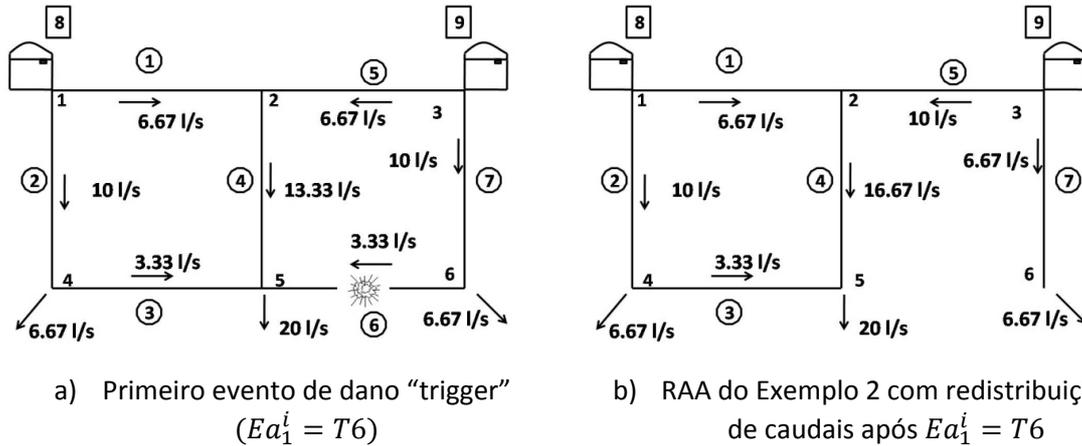
Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.295; E_R = 0.286; \varphi = 1.034.$$

Comparando estes valores dos parâmetros de vulnerabilidade observa-se que a capacidade resistente ao dano se mantém constante. Por sua vez, o valor de perda de RAA aumenta de 0.295 para 1.0, o que explica o aumento do valor do índice de vulnerabilidade de 1.034 para 3.50.

5.5.2.1.5 Cenário de dano de colapso parcial: dano nos troços 6 e 7 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$)

Com a danificação do troço 6 a RAA do Exemplo 2 passaria a ter a configuração apresentada na Figura 118.



a) Primeiro evento de dano “trigger”
($Ea_1^i = T6$)

b) RAA do Exemplo 2 com redistribuição
de caudais após $Ea_1^i = T6$

Figura 118 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do primeiro evento de dano “trigger”
($Ea_1^i = T6$)

A ocorrência de dano no troço 6 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água à zona associada a esse troço.

Após o dano no troço 6 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 118 b). O dano no troço 6 provoca uma redistribuição de caudal nos troços 4, 5 e 7. O caudal do troço 4 é alterado de 13.33 l/s para 16.67 l/s, o troço 5 tem um aumento de caudal de 6.67 l/s para 10 l/s enquanto que o caudal do troço 7 passa de 10 l/s para 6.67 l/s. Para esta nova condição hidráulica da RAA a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se e estes parâmetros estão apresentados na Tabela 56.

Tabela 56 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após ocorrência do dano no troço 6

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
	1	2			V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	140	6.67	0.49	0.30	0.89	0.37
2	1	4	160	10.00	0.56	0.30	0.94	0.20
3	4	5	110	3.33	0.40	0.30	0.81	0.34
4	2	5	200	16.67	0.60	0.30	1.03	0.17
5	3	2	140	10.00	0.73	0.30	0.89	0.77
7	3	6	160	6.67	0.37	0.30	0.94	0.10

Por sua vez, na Tabela 57 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 2, após dano no troço 6 com a circulação de caudais médios.

Tabela 57 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após ocorrência de dano no troço 5

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	145.37	3.00	25.37
2	142.37	105.00	145.37	145.00	3.00	40.00
3	105.00	115.00	145.00	145.03	40.00	30.03
4	120.00	115.00	145.37	145.03	25.37	30.03
5	142.37	120.00	145.37	145.37	3.00	25.37
7	142.37	105.00	145.37	144.60	3.00	39.60

Pela observação da Tabela 56 e Tabela 57 verifica-se que tanto os valores das velocidades como as alturas piezométricas de todos os troços se mantêm entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento, por este motivo não existem danos consequentes causados pelo evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T6$).

A análise deste cenário de dano prossegue com ocorrência do evento de dano “trigger” seguinte, dano no troço 7, Figura 119 a). Neste momento a RAA é constituída pelos troços 1, 2, 3, 4 e 5 que são os troços que ainda não sofreram dano, Figura 119 b).

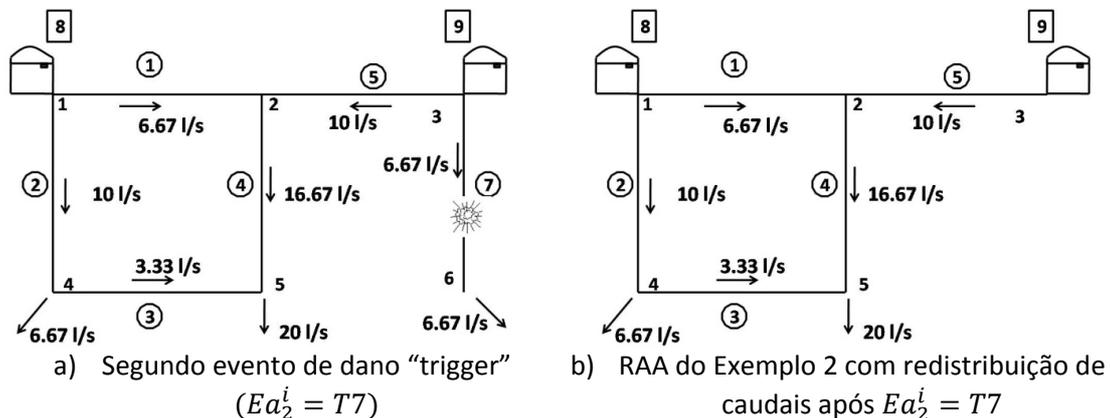


Figura 119 – Estado da RAA do Exemplo 2 resultante do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T7$)

Neste caso a os caudais de escoamento na restante RAA mantêm-se iguais aos caudais que foram redistribuídos quando houve dano no troço 6.

Por este motivo as condições hidráulicas, anteriormente analisadas, mantêm-se. Pode concluir-se que o evento de dano “trigger” não provoca danos consequentes uma vez

que os valores das velocidades e pressões, Tabela 56 e Tabela 57, se mantêm entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento.

Deste modo, a análise do cenário de dano vulnerável termina porque que já ocorreram todos os eventos de dano que caracterizavam o cenário de dano vulnerável inicialmente identificado, dano no troço 6 seguido de dano no troço 7. Face ao exposto, verifica-se que o cenário de dano vulnerável inicialmente identificado não sofre alterações após a integração das teorias, mantendo assim os parâmetros de vulnerabilidade calculados na aplicação da TVRAA.

Este cenário de dano vulnerável de colapso parcial está ilustrado esquematicamente na Figura 120.

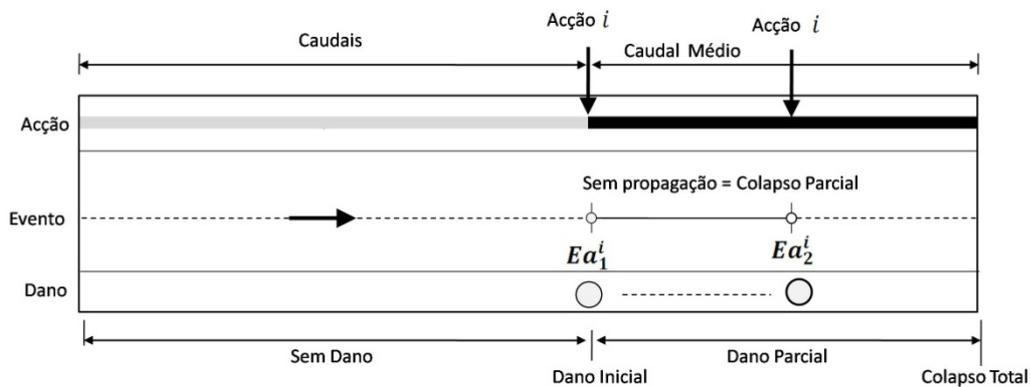


Figura 120 - Cenário de dano vulnerável de colapso parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$)

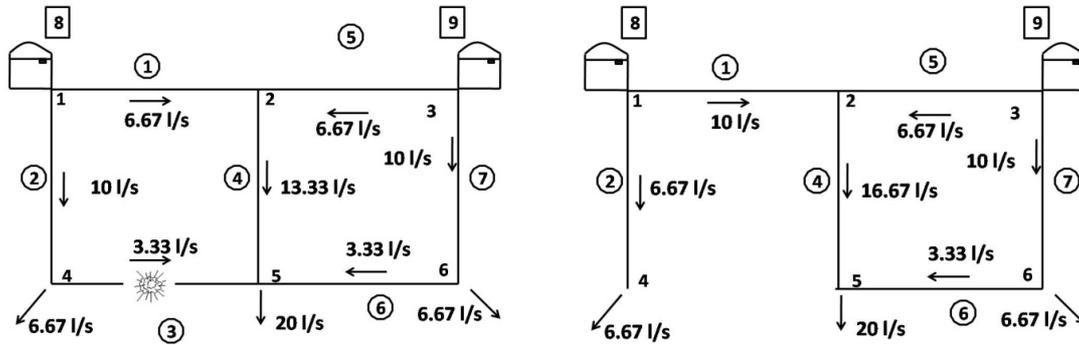
Este cenário de dano vulnerável de colapso total poderá então ser simulado analiticamente pela Expressão 18.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \quad (18)$$

Em que: $Ea_1^1 = T6$; $Ea_2^i = T7$;

5.5.2.1.6 Cenário de dano de colapso total: dano nos troços 3 e 4 ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$)

Com a danificação do troço 3 a RAA do Exemplo 2 passaria a ter a configuração apresentada na Figura 121.



a) Primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$)

b) RAA do Exemplo 2 com redistribuição de caudais após $Ea_1^i = T3$

Figura 121 – Estado da RAA do Exemplo 2 após a ocorrência do primeiro evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$)

A ocorrência de dano no troço 3 traduz-se na impossibilidade da RAA abastecer água a zona associada a esse troço.

Após o dano no troço 3 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 121 b). O dano no troço 3 provoca uma redistribuição de caudal nos troços 1, 2 e 4. O caudal do troço 1 é alterado de 6.67 l/s para 10 l/s, o troço 2 tem uma redução de caudal de 10 l/s para 6.67 l/s enquanto que o caudal do troço 4 passa de 13.33 l/s para 16.67 l/s.

Para esta nova condição hidráulica da RAA a velocidade de escoamento e a perda de carga alteram-se e estes parâmetros estão apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência de dano no troço 3

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	$Q_{médio}$ (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH^- (m.c.a.)
					V	V_{min}	V_{max}	
1	1	2	140	10.00	0.73	0.30	0.89	0.77
2	1	4	160	6.67	0.37	0.30	0.94	0.10
4	2	5	200	16.67	0.60	0.30	1.03	0.17
5	3	2	140	6.67	0.49	0.30	0.89	0.37
6	6	5	110	3.33	0.40	0.30	0.81	0.34
7	3	6	160	10.00	0.56	0.30	0.94	0.20

Por sua vez, na Tabela 59 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 1, após dano no troço 5 com a circulação de caudais médios.

Tabela 59 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência de dano no troço 5

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	144.60	3.00	24.60
2	142.37	105.00	145.37	145.27	3.00	40.27
4	120.00	115.00	145.00	144.83	25.00	29.83
5	142.37	120.00	145.37	145.00	3.00	25.00
6	105.00	115.00	145.17	144.83	40.17	29.83
7	142.37	105.00	145.37	145.17	3.00	40.17

Pela observação da Tabela 58 e Tabela 59 verifica-se que todos os valores das velocidades como os valores das alturas piezométricas se mantêm entre os limites mínimos e máximos admissíveis para o bom funcionamento da RAA, por este motivo não existem danos consequentes causados pelo evento de dano “trigger” ($Ea_1^i = T3$).

A análise deste cenário de dano prossegue com ocorrência do evento de dano “trigger” seguinte, dano no troço 4, Figura 122 a). Neste momento a RAA é constituída pelos troços 1, 2, 5, 6 e 7 que são os troços que ainda não sofreram dano. Após o dano no troço 4 existe uma redistribuição de caudais como se mostra na Figura 122 b).

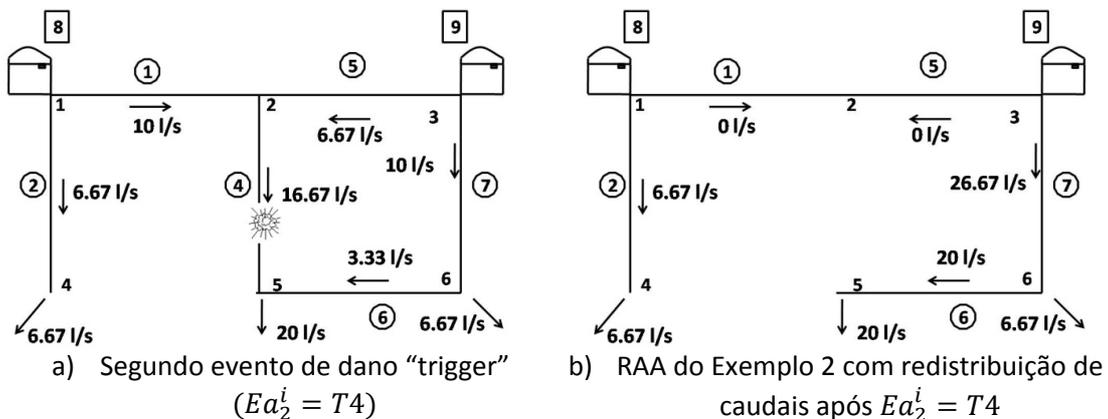


Figura 122 – Estado da RAA do Exemplo 2 após a ocorrência do segundo evento de dano “trigger” ($Ea_2^i = T4$)

Uma vez que os dois reservatórios têm a mesma altura piezométrica não existe a possibilidade do reservatório 8 abastecer o reservatório 9 e deste modo ser abastecida a restante RAA. Por este motivo, e como os troços 1 e 5 deixaram de ter ligação aos pontos de abastecimento com o dano no troço 4, considera-se que da redistribuição de caudal nestes troços resulta o caudal nulo.

Os troços 7 e 6 também são afectados por esta redistribuição de caudais. O troço 6 tem um aumento de caudal de 3.33 l/s para 20 l/s enquanto que o troço 7 vê o seu caudal alterado de 10 l/s para 26.67 l/s. Desta nova condição hidráulica resultam os valores de perda de carga e velocidade de escoamento apresentados na Tabela 60.

Tabela 60 - Velocidade e perda de carga da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 3 e 4

Troço	Nós		$D_{com.}$ (mm)	Q (l/s)	Velocidades (m/s)			ΔH_{τ} (m.c.a.)
					V	V_{min}	$V_{max.}$	
1	1	2	140	0.00	0.00	0.30	0.89	0.00
2	1	4	160	6.67	0.37	0.30	0.94	0.10
5	3	2	140	0.00	0.00	0.30	0.89	0.00
6	6	5	110	20.00	2.37	0.30	0.81	8.81
7	3	6	160	26.67	1.50	0.30	0.94	1.20

Na Tabela 61 estão apresentadas as cotas topográficas, as cotas piezométricas e as alturas piezométricas (pressões), a montante (M) e a jusante (J) de cada troço da RAA do Exemplo 2, após os eventos de dano “trigger” nos troços 3 e 4 com a circulação do caudal médio.

Tabela 61 - Cotas topográficas, cotas piezométricas e alturas piezométricas da RAA do Exemplo 2 com $Q_{médio}$, após a ocorrência dos eventos de dano “trigger” nos troços 3 e 4

Troço	Cota topográfica (m)		Cota Piezométrica (m.c.a)		Altura Piezométrica (m.c.a)	
	M	J	M	J	M	J
1	142.37	120.00	145.37	120.00	3.00	0.00
2	142.37	105.00	145.37	145.27	3.00	40.27
5	142.37	120.00	145.37	120.00	3.00	0.00
6	105.00	115.00	144.17	135.36	39.17	20.36
7	142.37	105.00	145.37	144.17	3.00	39.17

Por observação da Tabela 60 verifica-se que os troços 6 e 7 apresentam velocidades de escoamento superiores à velocidade máxima regulamentar. Os troços 1 e 5 apresentam uma velocidade de escoamento inferior à velocidade mínima, devido à redistribuição de caudais nesses locais da RAA se traduzir pela ocorrência de um caudal nulo, pelo mesmo motivo na Tabela 61, esses troços apresentam uma altura piezométrica inferior à admissível.

Os troços 1 e 5 sofrem dano simultaneamente pelo critério de verificação da velocidade mínima e pelo critério de verificação da pressão mínima, enquanto que os troços 6 e 7 sofrem dano pelo critério de verificação da velocidade máxima regulamentar, Figura 123.

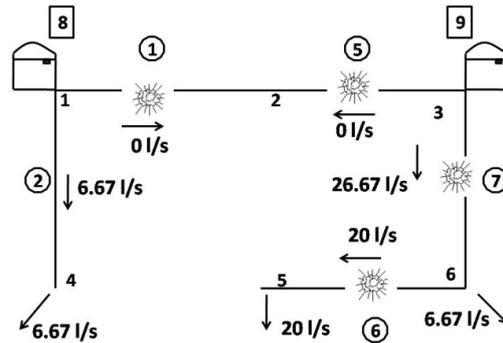


Figura 123 - Dano consequente devido segundo evento de dano “trigger” $Ea_2^i = T4$

Deste modo, a análise deste cenário de dano vulnerável termina porque todos os eventos de dano do cenário inicial, dano nos troços 3 e 4, já ocorreram.

Face ao exposto, aquando da integração da TVRAA com as teorias clássicas da hidráulica o cenário de dano vulnerável caracterizado inicialmente por dano inicial do troço 3 ($Ea_1^i = T3$) seguido de dano no troço 4 ($Ea_2^i = T4$) passa a ser caracterizado pelo eventos dano “trigger” no troços 3 ($Ea_1^i = T3$) e 4 ($Ea_2^i = T4$) seguido por propagação de dano aos troços 1, 5, 6 e 7.

Passou-se então do cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i$) para o cenário de dano vulnerável ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \rightarrow Ec_4^2$). Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial está ilustrado esquematicamente na Figura 124.

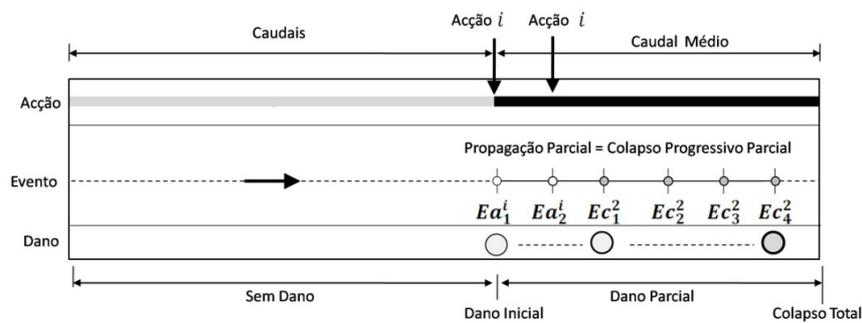


Figura 124 - Cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial ($Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \rightarrow Ec_4^2$) do Exemplo 2

Este cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial poderá ser simulado analiticamente pela Expressão 19.

$$f = Ea_1^i \rightarrow Ea_2^i \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \rightarrow Ec_4^2 \quad (19)$$

Em que: $Ea_1^i = T3$; $Ea_2^i = T4$; $Ec_1^2 = T1$; $Ec_2^2 = T5$; $Ec_3^2 = T6$; $Ec_4^2 = T7$;

Na Figura 125 estão apresentadas esquematicamente as consequências do cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial despontado pelos eventos de dano “trigger” nos troços 3 e 4. A traço contínua estão representados os troços que

continuam operacionais após o cenário de dano vulnerável, enquanto que a tracejado estão representados os troços que ficam inoperacionais.

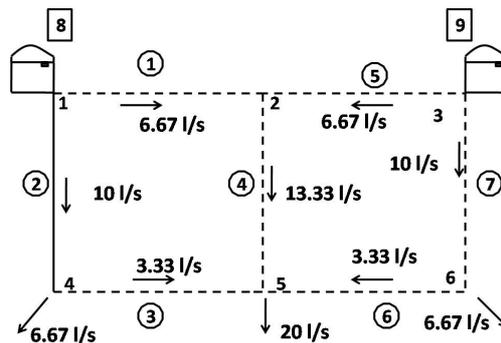


Figura 125 - Troços operacionais (linha contínua) e inoperacionais (linha a tracejado) da RAA do Exemplo 2, após cenário de dano vulnerável parcial ($Ea_1^1 \rightarrow Ea_2^1 \rightarrow Ec_1^2 \rightarrow Ec_2^2 \rightarrow Ec_3^2 \rightarrow Ec_4^2$).

Com a alteração do cenário de dano vulnerável inicialmente identificado, consequentemente, são alterados os parâmetros de vulnerabilidade e que para o novo cenário de dano vulnerável passam a ser:

$$\gamma_r^- = 0.896; E_R = 0.286; \varphi = 3.136.$$

Inicialmente os valores destes parâmetros eram:

$$\gamma_r^- = 0.235; E_R = 0.286; \varphi = 0.821.$$

Comparando os valores dos parâmetros de vulnerabilidade anteriores observa-se que a capacidade resistente ao dano se mantém constante. Por sua vez, o valor de perda de RAA aumenta de 0.235 para 0.896, o que explica o aumento do valor do índice de vulnerabilidade de 0.821 para 3.136.

Em forma de resumo, a Tabela 63 apresenta os cenários de dano e os seus parâmetros de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2 antes e depois da integração da TVRAA com as teorias clássicas na situação de circulação de caudal de ponta na RAA.

Tabela 62 - Resumo dos cenários de dano antes e depois da integração com as teorias clássicas da RAA do Exemplo 2

	Antes da integração	Depois da integração
Cenário de dano	T5→T7→T1→T2	T5→T4→T6→T7→T1→T2→T3
γ_r^-	1.0	1.0
E_R	0.571	0.286
φ	1.750	3.50
Cenário de dano	T5→T7→T1→T2	T5→T4→T6→T7→T1→T2→T3
γ_r^-	0.750	1.0
E_R	0.571	0.286
φ	1.233	3.50
Cenário de dano	T5→T3→T4	T5→T4→T6→T3→T1
γ_r^-	0.425	0.792
E_R	0.429	0.286
φ	0.993	2.772
Cenário de dano	T1→T2	T1→T3→T4→T2→T5→T6→T7
γ_r^-	0.295	1.0
E_R	0.286	0.286
φ	1.034	3.50
Cenário de dano	T6→T7	T6→T7
γ_r^-	0.279	0.279
E_R	0.286	0.286
φ	0.977	0.977
Cenário de dano	T3→T4	T3→T4→T1→T5→T6→T7
γ_r^-	0.235	0.896
E_R	0.286	0.286
φ	0.821	3.136

5.6 Considerações finais

Foi apresentada uma metodologia que visa a integração da TVRAA com as teorias clássicas de dimensionamento hidráulico, tornando assim a TVRAA mais completa e realista.

A integração das teorias envolve a proposta de uma série de novos conceitos teóricos que foram desenvolvidos e descritos. Estes conceitos teóricos são: escala de acções, evento de dano inicial, evento de dano “trigger”, evento de dano consequente, evento de dano inicial, dano parcial, colapso progressivo parcial, colapso progressivo total, cenário de dano vulnerável parcial e cenário de dano vulnerável inicial.

Para além desta série de novos conceitos teóricos necessários para se efectuar a integração da TVRAA com as teorias clássicas foi necessário a definição de novos critérios de dano. Os novos critérios de dano envolvem a verificação de velocidade de escoamento mínima admissível, de velocidades de escoamento máxima, de pressão máxima e de pressão mínima.

Um esquema gráfico capaz de modelar os diferentes tipos de cenários de dano foi apresentado. Este esquema traduz-se numa forma simples e explícita de apresentar a sequência dos diferentes tipos de eventos de dano constituintes de um cenário vulnerável de dano.

Foi efectuada uma modelação teórica e genérica de três tipos de cenários de dano vulneráveis. Modelou-se um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total, um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial e um cenário de dano vulnerável de colapso inicial.

A exemplificação e a validação da proposta de integração apresentada efectuou-se com o recurso às RAA dos Exemplos 1 e 2.

6 MAPEAMENTO E MITIGAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE RAA

6.1 Objectivos

Este capítulo tem como principais objectivos os pontos seguintes:

- Propor uma metodologia de mapeamento da vulnerabilidade de RAA;
- Apresentar uma escala qualitativa de vários níveis de vulnerabilidade;
- Sugerir uma quantificação da escala relativa de vulnerabilidade;
- Exemplificar o processo de mapeamento recorrendo a vários exemplos de RAA;
- Abordar formas de mitigação da vulnerabilidade de RAA.

6.2 Introdução

Neste capítulo serão introduzidos novos conceitos teóricos na TVRAA uma vez que na bibliografia disponível e consultada nunca se falou em mapeamento da vulnerabilidade de RAA.

A proposta de desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento da vulnerabilidade de RAA surge por se pensar que é importante e útil apresentar esquematicamente os resultados da TVRAA. Através do mapeamento da vulnerabilidade é possível visualizar de forma directa as zonas mais vulneráveis de uma RAA e, por sua vez, auxiliar no processo de mitigação dessa vulnerabilidade.

Nesse processo de mitigação da vulnerabilidade de uma RAA faz-se uma análise para conhecer quais os parâmetros que influenciam o índice de vulnerabilidade. Através desses parâmetros é possível então optar por soluções construtivas que tornem uma RAA menos vulnerável tais como aumentar o número de troços numa parte da RAA, optar por tubos de outra pressão de serviço, entre outros.

6.3 Mapeamento da vulnerabilidade de RAA

A metodologia de mapeamento da vulnerabilidade de uma RAA proposta neste trabalho de investigação recorre a uma escala relativa de vulnerabilidade. Esta escala consiste em colorir a RAA de modo a ser facilmente visíveis os diferentes níveis de vulnerabilidade. Esses níveis de vulnerabilidade são qualitativos e relativos a três graus de vulnerabilidade: “Muito vulnerável”, “Vulnerável” e “Pouco vulnerável”. Ao nível de “Muito vulnerável” é atribuído a cor vermelho. Ao nível “Vulnerável” e “Pouco vulnerável” são atribuídas as cores laranja e amarelo, respectivamente, Figura 126.

A escala de vulnerabilidade é relativa porque os valores do índice de vulnerabilidade são relativos apenas a uma determinada RAA e não é adequado proceder a uma comparação entre RAA diferentes.

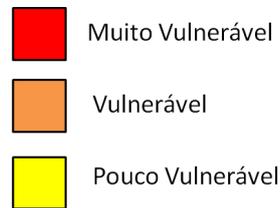


Figura 126 - Escala da vulnerabilidade

A escala da vulnerabilidade para cada RAA é obtida através do maior e do menor valores do índice de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis identificados através da aplicação da TVRAA.

O intervalo de vulnerabilidade (A) é calculado através da diferença entre o maior (φ_{max}) e o menor (φ_{min}) valor do índice de vulnerabilidade (A).

É necessário dividir o intervalo de vulnerabilidade de modo a atribuir valores aos três níveis, referidos anteriormente, da escala de vulnerabilidade. Para isso, ao menor valor de índice de vulnerabilidade é adicionado o valor de um terço do intervalo de vulnerabilidade ficando deste modo definido quantitativamente o nível de “Pouco vulnerável” em que $\varphi_{min} \leq \varphi < \varphi_{min} + \frac{A}{3}$.

O nível de “Vulnerável” é correspondente às partes da RAA cujos cenários de dano vulneráveis apresentem valores de índice de vulnerabilidade entre $\varphi_{min} + \frac{A}{3} \leq \varphi < \varphi_{min} + \frac{2A}{3}$.

Finalmente, as partes da RAA cujos cenários de dano vulneráveis apresentem valores de índice de vulnerabilidade compreendidos no intervalo $\varphi_{min} + \frac{2A}{3} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$ apresentam-se como sendo as “Muito vulneráveis”.

A

Figura 127 ilustra esquematicamente este raciocínio.

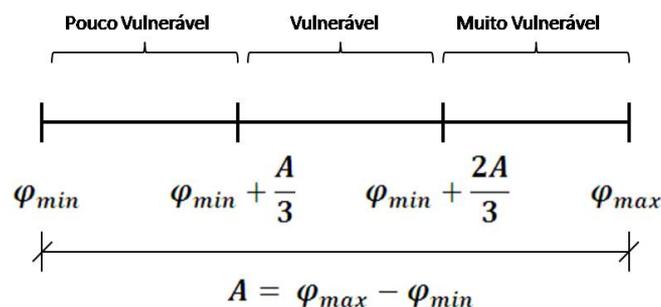


Figura 127 – Ilustração da quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade

De forma a exemplificar o anteriormente descrito irá proceder-se ao mapeamento da vulnerabilidade dos exemplos de RAA usadas em capítulos anteriores.

No mapeamento da vulnerabilidade de RAA é considerado, nesta fase por simplificação, que os cenários de dano são constituídos apenas por um evento de dano num qualquer troço da RAA.

Assim sendo, para efectuar o mapeamento da vulnerabilidade de uma RAA são calculados os índices de vulnerabilidade correspondentes aos cenários de dano constituídos pela danificação de cada troço.

6.3.1 Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1

A RAA do Exemplo é constituída por seis troços. Os cenários de dano considerados e o valor do índice de vulnerabilidade de cada um estão apresentados na Tabela 63.

Tabela 63 - Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1

Cenários de Dano	φ
T1	6.0
T2	1.49
T3	3.57
T4	0.75
T5	1.24
T6	0.53

Intervalos da escala relativa de vulnerabilidade

$$\varphi_{min} = 0.53$$

$$\varphi_{max} = 6.00$$

Intervalo de vulnerabilidade,

Figura 128: $A = \varphi_{max} - \varphi_{min} = 5.47$

$$\varphi_{min} + \frac{A}{3} = 0.53 + \frac{5.47}{3} = 2.35$$

$$\varphi_{min} + \frac{2A}{3} = 0.53 + \frac{2 \times 5.47}{3} = 4.18$$

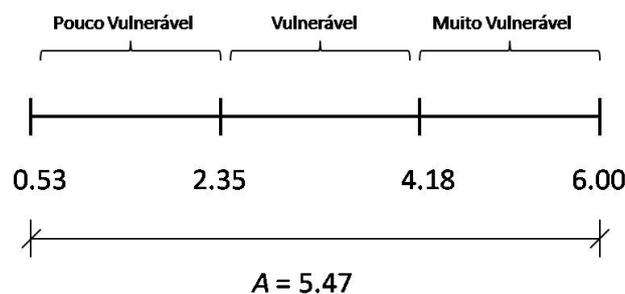


Figura 128 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1

Tendo em conta os valores do índice de vulnerabilidade e os intervalos da escala relativa de vulnerabilidade, Tabela 63 e Figura 128, é possível verificar que o troço 1 apresenta-se como sendo “Muito vulnerável”. O troço 3 “Vulnerável” e os troços 2, 4, 5 e 6 “Pouco vulnerável”. Na Figura 129 está apresentado o mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1.

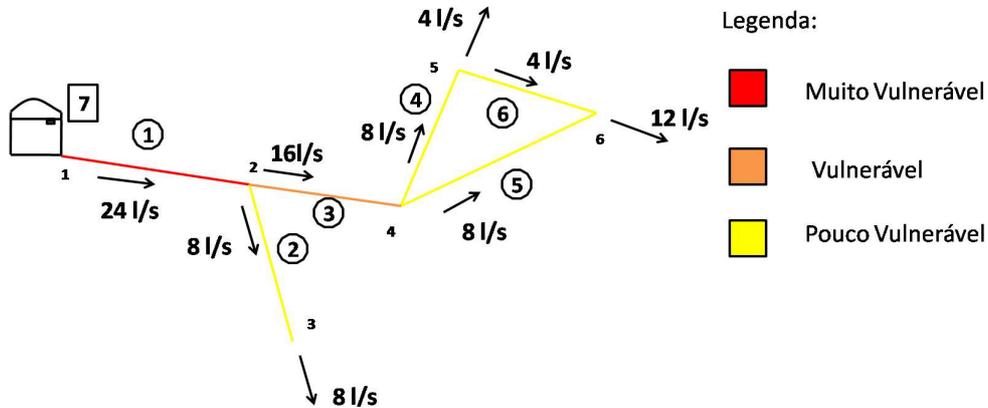


Figura 129 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 1

6.3.2 Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2

Para a execução do mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2 foram considerados os cenários de dano apresentados na Tabela 64. Esta tabela apresenta também o valor do índice de vulnerabilidade para cada um desses cenários de dano.

Tabela 64 - Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2

Cenários de Dano	φ
T1	1.34
T2	0.73
T3	1.22
T4	0.42
T5	1.34
T6	1.22
T7	0.73

Intervalos da escala relativa de vulnerabilidade

$$\varphi_{min} = 0.42$$

$$\varphi_{max} = 1.34$$

Intervalo de vulnerabilidade, Figura 130: $A = \varphi_{max} - \varphi_{min} = 0.92$

$$\varphi_{min} + \frac{A}{3} = 0.42 + \frac{0.92}{3} = 0.73$$

$$\varphi_{min} + \frac{2A}{3} = 0.42 + \frac{2 \times 0.92}{3} = 1.03$$

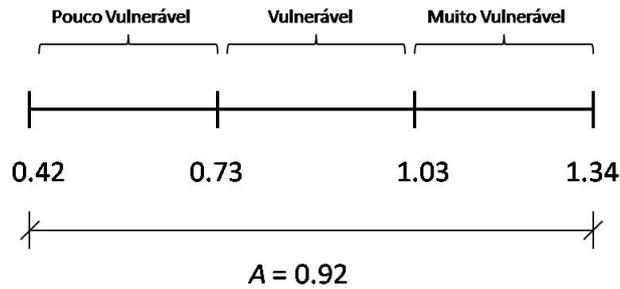


Figura 130 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2

Tendo em conta os valores do índice de vulnerabilidade e os intervalos da escala relativa de vulnerabilidade, Tabela 64 e Figura 130, é possível verificar que os troços 1, 3, 5 e 6 apresentam-se como sendo “Muito vulnerável”. Os troços 2 e 7 “Vulnerável” e o troço 4 “Pouco vulnerável”.

Na Figura 131 está apresentada o mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2.

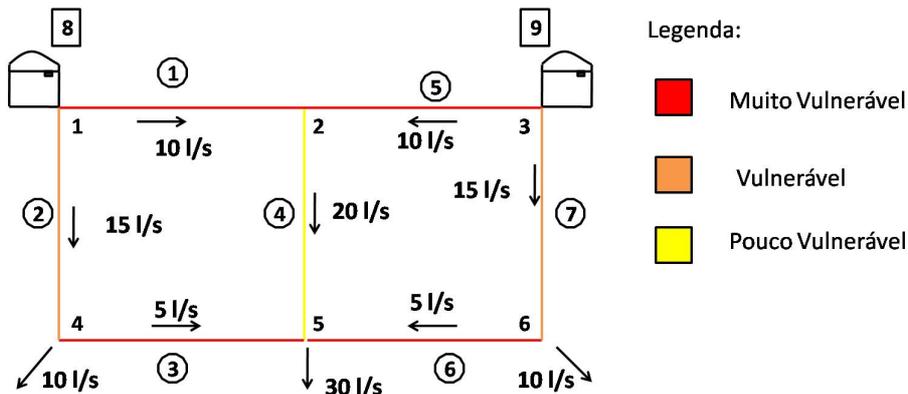


Figura 131 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 2

6.3.3 Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3

Pela aplicação da TVRAA ao Exemplo 3 foram identificados dois cenários de dano vulneráveis, dano no troço 1 e dano no troço 2.

Para tornar esta exemplificação mais abrangente foram também definidos os cenários de interesse do utilizador, o dano no troço 3 e 4.

Os valores do índice de vulnerabilidade para cada situação estão apresentados na Tabela 65.

Tabela 65 – Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3

Cenários de dano	φ
T1	4.0
T2	3.0
T3	2
T4	1

Intervalos da escala relativa de vulnerabilidade

$$\varphi_{min} = 1.0$$

$$\varphi_{max} = 4.0$$

Intervalo de vulnerabilidade, Figura 132: $A = \varphi_{max} - \varphi_{min} = 3.0$

$$\varphi_{min} + \frac{A}{3} = 1.0 + \frac{3.0}{3} = 2.0$$

$$\varphi_{min} + \frac{2A}{3} = 1.0 + \frac{2 \times 3.0}{3} = 3.0$$

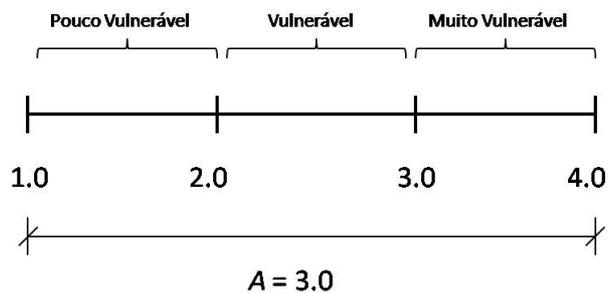


Figura 132 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3

Tendo em conta os valores do índice de vulnerabilidade e os intervalos da escala relativa de vulnerabilidade, Tabela 65 e Figura 132, é possível verificar que os troços 1 e 2 apresentam-se como sendo “Muito vulnerável”. O troço 3 “Vulnerável” e o troço 4 “Pouco vulnerável”. Na Figura 133 está apresentada o mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3.

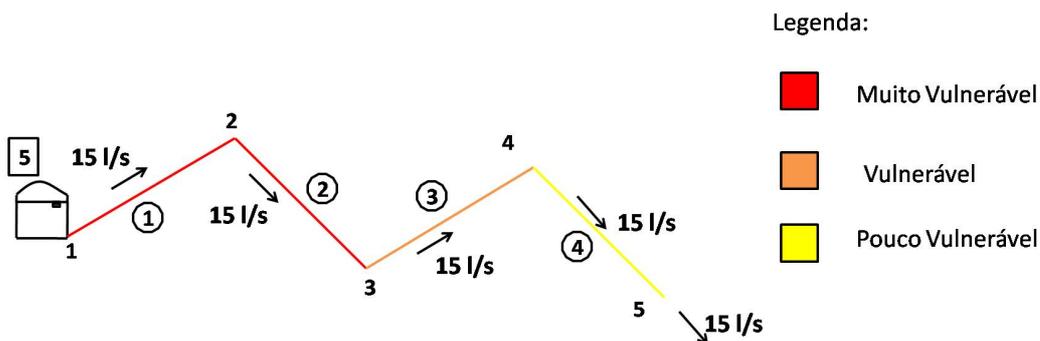


Figura 133 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3

6.3.4 Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4

Pela aplicação da TVRAA ao Exemplo 4 foram identificados dois cenários de dano vulneráveis, dano no troço 1 e dano no troço 3.

Para tornar esta exemplificação mais abrangente foram também definidos os cenários de interesse do utilizador, o dano no troço 2 e 4.

Os valores do índice de vulnerabilidade para cada situação estão apresentados na Tabela 65.

Tabela 66 – Cenários de dano e respectivo valor do índice de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4

Cenários de dano	φ
T1	5.33
T2	4.0
T3	1.60
T4	0.80

Intervalos da escala relativa de vulnerabilidade

$$\varphi_{min} = 0.80$$

$$\varphi_{max} = 5.33$$

Intervalo de vulnerabilidade, Figura 134: $A = \varphi_{max} - \varphi_{min} = 4.53$

$$\varphi_{min} + \frac{A}{3} = 0.80 + \frac{5.33}{3} = 2.31$$

$$\varphi_{min} + \frac{2A}{3} = 0.80 + \frac{2 \times 5.33}{3} = 3.82$$

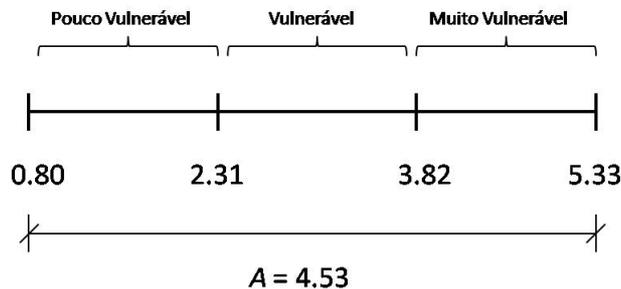


Figura 134 - Quantificação dos intervalos da escala relativa de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4

Tendo em conta os valores do índice de vulnerabilidade e os intervalos da escala relativa de vulnerabilidade, Tabela 66 e Figura 134, é possível verificar que os troços 1 e 2 apresentam-se como sendo “Muito vulnerável”. Os troço 3 e 4 correspondem ao nível “Pouco vulnerável”. Na Figura 135 está apresentada o mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4.

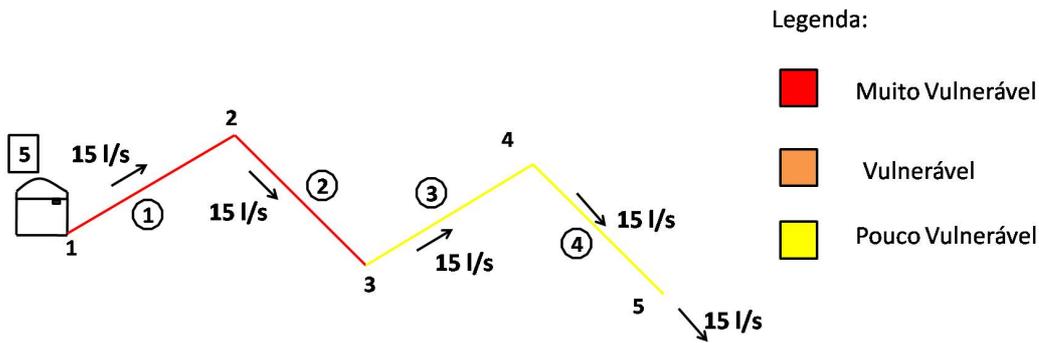


Figura 135 - Mapeamento da vulnerabilidade da RAA do Exemplo 4

6.4 Mitigação da vulnerabilidade de RAA

Já foi referido anteriormente que a vulnerabilidade de uma RAA está relacionada com a sua qualidade de forma. Uma RAA com boa qualidade de forma é menos susceptível de sofrer dano, o que equivale a dizer, que quanto melhor for a forma de uma RAA menor será a diferença entre os índices de vulnerabilidade das diferentes partes dessa RAA.

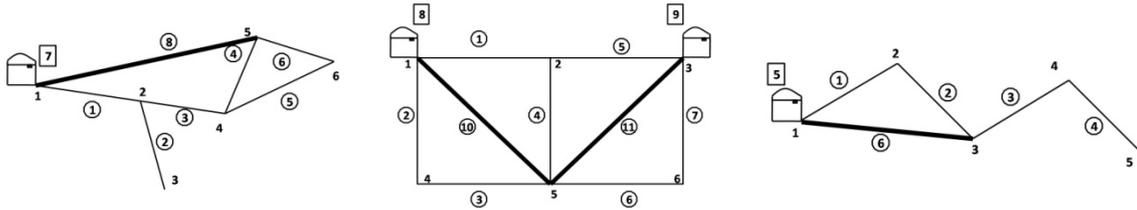
Face ao exposto, para se obter uma redução de vulnerabilidade de uma RAA é necessário melhorar a sua qualidade de forma. A qualidade de forma depende de vários factores e pode ser melhorada alterando-se os seguintes aspectos:

- Aumentar a conexão nodal
- Corresponde a aumentar o número de troços existentes numa determinada parte de uma RAA criando-se deste modo caminhos alternativos de abastecimento de água. Este aspecto é muito importante principalmente em situações em que as RAA sejam exclusivamente dependentes de um único troço para que ocorra o abastecimento, por exemplo, um único troço que liga o reservatório à restante RAA. Esta situação é bastante frequente.
- Aumentar a capacidade resistente ao dano
- O aumento da capacidade resistente de um troço corresponde a assegurar que será necessário um esforço superior para causar dano nesse troço. Nesta fase, o aumento da capacidade resistente de um troço pode ser assegurada através de se optar por tubos que tenham uma pressão de serviço superior.
- Diminuir a perda de carga
- Através de uma diminuição da perda de carga de alguns troços fica implícito que se ocorrer um evento de dano em algum desses troços, a perda de RAA será inferior em relação à perda de RAA obtida. Como o índice de vulnerabilidade é o quociente entre a perda de RAA e a capacidade resistente

ao dano relativa, Expressão 3, existe uma redução da vulnerabilidade de uma RAA quando se reduz a perda de RAA.

6.4.1 Aumento de conexão nodal

O aumento de conexão nodal como forma de mitigação da vulnerabilidade pode ser efectuado pelo acréscimo de troços na parte mais vulnerável da RAA. Para o efeito é proposta a adição de novos troços com as características análogas (classe de pressão) aos inicialmente existentes nos Exemplos 1, 2 e 3, Figura 136. Os troços adicionais estão ilustrados a troço carregado.

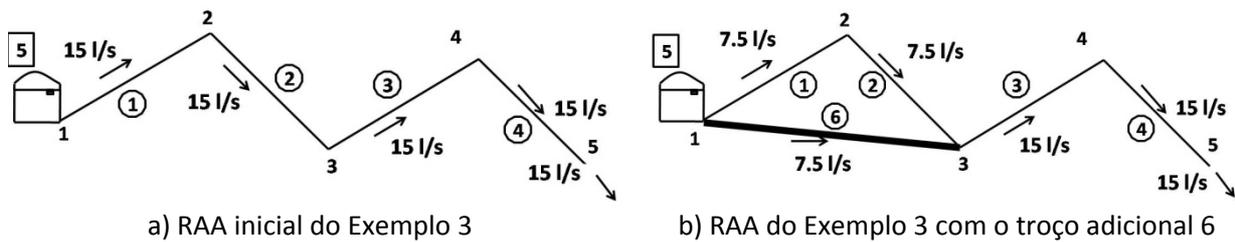


a) RAA do Exemplo 1 com o troço adicional 8 b) RAA do Exemplo 2 com os troços adicionais 10 e 11 c) RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6

Figura 136 – Aumento de conexão nodal nas RAA dos Exemplos 1, 2 e 3

De modo a quantificar o valor do novo índice de vulnerabilidade, após o aumento da conexão nodal, para o cenário de máxima vulnerabilidade será utilizado o 3º caso apresentado, RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6 (Figura 136 c).

Foi considerado que esta análise foi efectuada numa RAA já existente e que se pretendia reduzir a sua vulnerabilidade. Por este motivo, os troços existentes manterão a totalidade das suas características, sendo apenas dimensionado o troço adicional para a nova condição hidráulica. A RAA passa a ter a configuração ilustrada na Figura 137 b).



a) RAA inicial do Exemplo 3

b) RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6

Figura 137 – Alterção das condições hidráulicas na RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6

Do dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6 (Anexo C.I), a RAA apresenta as características da Tabela 67.

Tabela 67 – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6

Troço	Nós		Comprimento (m)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	Q (l/s)	Velocidades (m/s)		ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
							V	V_{max}		
1	1	2	200	160	150.6	7.5	0.42	0.94	0.24	6
2	2	3	200	160	150.6	7.5	0.42	0.94	0.24	6
3	2	4	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6
4	2	4	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6
6	1	3	280	125	117.6	7.5	0.69	0.86	1.11	6

Para esta nova configuração dos parâmetros de vulnerabilidade de cada cenário de dano vulnerável inicialmente identificados alteram-se. Os novos valores desses parâmetros ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ') estão apresentados na Tabela 68 ou Anexo C.I. Para facilitar a leitura os valores inicialmente obtidos também estão apresentados nesta tabela (γ_r^- , E_R e φ), sendo possível consultar esses valores na Tabela 26.

Tabela 68 - Parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 1 após o aumento da conexão nodal ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ')

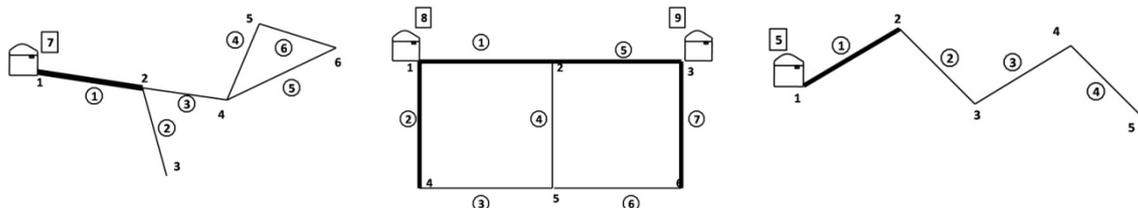
	Cenário de Dano	γ_r^-	$\gamma_r^{-'}$	E_R	E_R'	φ	φ'
1	T1	1	0.111	0.250	0.200	4	0.556
2	T2	0.750	0.111	0.250	0.200	3	0.556

Comparando os valores destes parâmetros de vulnerabilidade para estas duas situações (antes e depois do aumento da conexão nodal) verifica-se que ocorreu uma redução do índice de vulnerabilidade nos cenários de dano vulnerável.

A redução do valor do índice de vulnerabilidade nos dois cenários de dano vulnerável é justificada pela redução do valor de perda de RAA, uma vez, que o troço introduzido para o aumento da conexão nodal (troço 6 na Figura 137 b) permite um caminho alternativo de abastecimento da água a grande parte da RAA, não ficando assim exclusivamente dependente do troço 1.

6.4.1.1 Aumento da capacidade resistente ao dano

O aumento da capacidade resistente ao dano como forma de mitigação da vulnerabilidade pode ser efectuado pelo aumento da classe de pressão dos tubos constituintes dos troços da parte mais vulnerável da RAA. Na Figura 138 estão ilustradas as propostas de alterações nas RAA dos exemplos 1, 2 e 3, a traço a carregado estão ilustrados os troços a sofrer alteração.



- a) RAA do Exemplo 1 com aumento da capacidade resistente ao dano no troço 1
 b) RAA do Exemplo 2 com aumento da capacidade resistente ao dano nos troços 1, 2, 5 e 7
 c) RAA do Exemplo 3 com aumento da capacidade resistente ao dano no troço 1

Figura 138 – Aumento da capacidade resistente ao dano nas RAA dos Exemplos 1, 2 e 3

De modo a quantificar o valor do novo índice de vulnerabilidade, após o aumento da capacidade resistente ao dano, para o cenário de máxima vulnerabilidade será utilizado o 3º caso apresentado, RAA do Exemplo 3 com o aumento da capacidade resistente ao dano no troço 1 (Figura 138 c).

A RAA do Exemplo 3 é toda ela constituída por tubos com pressão de serviço de 6 kgf/cm², o que equivale a uma capacidade resistente ao dano em todos os troços igual e de valor 6 kgf/cm². Considera-se que o aumento da capacidade resistente ao dano se faz com a alteração da classe de serviço do troço 1, passando de 6 para 10 kgf/cm².

Do dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 3 com a alteração proposta resulta a RAA com as características da Tabela 69, informação mais detalhada pode também ser consultada no Anexo C.II.

Tabela 69 – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com aumento da capacidade resistente ao dano no troço 1

Troço	Nós		Comprimento (m)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	Q_{ponta} (l/s)	Velocidades (m/s)		ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
	1	2					V	V_{max}		
1	1	2	200	160	144.6	15	0.91	0.93	1.02	10
2	2	3	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6
3	2	4	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6
4	2	4	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6

Para esta nova configuração os parâmetros de vulnerabilidade de cada cenário de dano vulnerável inicialmente identificados alteram-se. Os novos valores desses

parâmetros ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ') estão apresentados na Tabela 70 ou Anexo C.II. Para facilitar a leitura os valores inicialmente obtidos também estão apresentados nesta tabela (γ_r^{-} , E_R e φ), sendo possível consultar esses valores na Tabela 26.

Tabela 70 - Valores dos parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 1 após o aumento da capacidade resistente ao dano ($\gamma_r^{-'}$, E_R' e φ')

	Cenário de Dano	γ_r^{-}	$\gamma_r^{-'}$	E_R	E_R'	φ	φ'
1	T1	1.0	1.0	0.250	0.357	4	2.80
2	T2	0.750	0.771	0.250	0.214	3	3.32

Pela comparação dos valores dos parâmetros de vulnerabilidade destas duas situações (antes e depois do aumento da capacidade resistente ao dano) verifica-se que existe uma redução do valor do índice de vulnerabilidade no cenário de dano vulnerável (T1).

O valor da perda de RAA no cenário de dano em análise mantém-se constante. A redução do valor do índice de vulnerabilidade verifica-se devido ao aumento da capacidade resistente ao dano relativa nesse troço. Apesar do dano nesse troço continuar a impedir o abastecimento de água a qualquer ponto da RAA é neste momento necessário um esforço maior para provocar esse mesmo dano.

6.4.1.2 Diminuição da perda de carga

Tal como foi dito anteriormente, o índice de vulnerabilidade de uma RAA está directamente relacionado com a perda de carga dos troços constituintes dessa RAA.

Uma forma de obter uma redução da perda de carga de um determinado troço é através da alteração do material constituinte do troço, uma vez que um material que apresente uma rugosidade inferior traduz-se num menor valor de perda de carga.

Como exemplo considere-se que o troço 1 da RAA do Exemplo 3 é constituído por um tubo de polietileno de alta densidade (rugosidade de valor igual 0.02 mm), podendo os diâmetros ser consultados no Anexo A.II [14], continuando os restantes troço a ser em PVC com rugosidade de valor igual a 0.01 mm.

Desta nova condição resulta a variação da perda de carga no troço 1. Do dimensionamento hidráulico da RAA do Exemplo 3 com a alteração proposta (Anexo C.III) resulta a RAA com as características da Tabela 71.

Tabela 71 – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o troço 1 com aumento do valor da rugosidade

Troço	Nós		Comprimento (m)	D_{com} (mm)	D_{int} (mm)	Q_{ponta} (l/s)	Velocidades (m/s)		ΔH^- (m)	E (Kgf/cm ²)
							V	V_{max}		
1	1	2	200	160	147.6	15	0.88	0.94	0.95	6
2	2	3	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6
3	2	4	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6
4	2	4	200	160	150.6	15	0.84	0.94	0.84	6

Para esta nova configuração os parâmetros de vulnerabilidade de cada cenário de dano vulnerável inicialmente identificados alteram-se. Os novos valores desses parâmetros (γ_r^- , E'_R e φ') estão apresentados na Tabela 72 ou Anexo C.III. Para facilitar a leitura os valores inicialmente obtidos também estão apresentados nesta tabela (γ_r^- , E_R e φ), sendo possível consultar esses valores na Tabela 26.

Tabela 72 - Valores dos parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano vulneráveis do Exemplo 1 após o aumento da capacidade resistente ao dano (γ_r^- , E'_R e φ')

	Cenário de Dano	γ_r^-	$\gamma_r^{-'}$	E_R	E'_R	φ	φ'
1	T1	1.0	1.0	0.250	0.250	4.0	4.0
2	T2	0.750	0.726	0.250	0.250	3.0	2.91

Neste caso, pela comparação dos valores dos parâmetros de vulnerabilidade verifica-se que o índice de vulnerabilidade do cenário de dano de máxima vulnerabilidade (dano no troço 1) se mantém constante. Isto acontece devido a esse cenário de dano provocar uma perda de RAA total, não sendo assim o índice de vulnerabilidade deste cenário de dano vulnerável influenciado pela diminuição da perda de carga no troço 1.

No segundo cenário de dano (dano no troço 2) verifica-se uma diminuição do valor do índice de vulnerável. Neste cenário de dano a perda de RAA sofre uma diminuição enquanto o valor da capacidade resistente dano relativa se mantém, traduzindo-se assim numa redução do índice de vulnerabilidade.

6.5 Considerações finais

Foi proposta uma forma expedita de mapeamento da vulnerabilidade de uma RAA. Esta ferramenta poderá ser extremamente útil na gestão de um sistema deste tipo.

Uma escala qualitativa dos vários níveis de vulnerabilidade foi apresentada. Os níveis da vulnerabilidade de uma RAA foram definidos como sendo “Muito Vulnerável”, “Vulnerável” e “Pouco Vulnerável”, correspondendo a cada um destes níveis uma cor diferente.

Foi sugerida uma quantificação da escala relativa de vulnerabilidade de modo a obter critérios para a atribuição de um nível de vulnerabilidade aos diferentes troços constituintes de uma RAA.

As RAA dos Exemplos 1, 2 e 3 foram utilizadas para facilitar a exposição dos novos conceitos e do processo de mapeamento da vulnerabilidade proposto.

Foi feita uma análise de vários factores que permitem contribuir para uma mitigação da vulnerabilidade de RAA. Os factores analisados foram: aumentar a conexão nodal, aumentar a capacidade resistente ao dano e diminuir a perda de carga.

Estes factores foram aplicados à RAA do Exemplo 3 de modo a exemplificar as formas de mitigação.

A identificação da vulnerabilidade das RAA pode contribuir para as tornar mais robustas, tanto a nível de projecto como a nível de manutenção, contribuindo assim para a segurança das populações, a salvaguarda de bens e para a redução de prejuízos económicos.

7 Conclusões

A TVRAA é uma teoria emergente e foi apresentada de forma sucinta.. A sua aplicação poderá contribuir para a obtenção de RAA mais robustas atendendo a que a(s) parte(s) mais vulnerável(eis) de RAA complexas poderão ser facilmente identificadas.

Após o estudo da documentação existente acerca da TVRAA, os conhecimentos obtidos foram consolidados através da aplicação da TVRAA a novos exemplos de RAA. A aplicação da teoria foi complementada pela descrição detalhada de todos os processos e acompanhada pela apresentação de cálculos.

O processo de aglutinação para além de ter sido descrito foi acompanhado por tabelas com os valores dos parâmetros de vulnerabilidade necessários à selecção de candidatos a sub-RAA e de ilustrações que mostram a evolução do processo facilitando a sua visibilidade e compreensão. Este nível de detalhe corresponde a uma evolução relativamente à documentação consultada.

Mostrou-se a construção do modelo hierárquico, e a sua importância. Desenvolveu-se a Expressão 4 que permite detectar o número total de cenários de dano de qualquer RAA, permitindo assim, comprovar a utilidade do modelo hierárquico uma vez que o número de cenários de dano vulneráveis identificados pela aplicação da TVRAA é significativamente inferior.

Para cada exemplo, foram identificados os cenários de dano vulneráveis resultantes da aplicação da TVRAA, bem como, os valores dos parâmetros de vulnerabilidade associados a cada um.

Pela primeira vez, no processo de aglutinação da TVRAA foram utilizados todos os critérios de selecção, Exemplo 3 e 4, com a excepção do quinto e último critério de selecção escolha livre. A utilização deste critério não é considerada muito relevante uma vez que se trata de uma forma expedita de dar seguimento ao processo de aglutinação. Nestes exemplos o processo de aglutinação foi explicado passo a passo, esclarecendo assim a existência de eventuais dúvidas futuras. Conseguiu-se, assim, efectuar a validação da relevância dos critérios de selecção do processo de aglutinação e da sua ordem de aplicação.

Uma metodologia de integração da TVRAA com as teorias clássicas de dimensionamento hidráulico foi elaborada. Foi dado um forte contributo para que a TVRAA se torne numa teoria mais completa e realista.

A metodologia de integração das teorias envolve o desenvolvimento e descrição uma série de conceitos teóricos. Esses conceitos são: escala de acções, evento de dano inicial, evento de dano “trigger”, evento de dano consequente, evento de dano inicial, dano parcial, colapso progressivo parcial, colapso progressivo total, cenário de dano vulnerável parcial e cenário de dano vulnerável inicial.

Para além dessa série de conceitos teóricos necessários para se efectuar a integração da TVRAA com as teorias clássicas foi necessária a definição de novos critérios de dano. Os novos critérios de dano envolvem a verificação de velocidade de escoamento mínima admissível, de velocidades de escoamento máxima, de pressão máxima e de pressão mínima.

Desenvolveram-se esquemas gráficos que facilitam a compreensão dos resultados da integração das teorias. Com estes esquemas ilustrativos foi efectuada a modelação de um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo total, um cenário de dano vulnerável de colapso progressivo parcial e um cenário de dano vulnerável de colapso inicial.

A exemplificação e a validação da proposta de integração apresentada efectuou-se com o recurso às RAA dos Exemplos 1 e 2.

Outro desenvolvimento presente neste trabalho é a proposta de uma forma expedita para mapeamento da vulnerabilidade de RAA. Esta ferramenta poderá ser extremamente útil na gestão de um sistema deste tipo.

A proposta de mapeamento da vulnerabilidade baseia-se na definição de níveis de vulnerabilidade, qualitativamente e quantitativamente. Os níveis da vulnerabilidade de uma RAA foram definidos como sendo “Muito Vulnerável”, “Vulnerável” e “Pouco Vulnerável”, correspondendo a cada um destes níveis uma cor diferente. Foi sugerida uma quantificação da escala relativa de vulnerabilidade de modo a obter critérios para a atribuição de um nível de vulnerabilidade aos diferentes troços constituintes de uma RAA.

Na parte final deste trabalho, foi efectuada uma análise de formas de mitigação da vulnerabilidade de RAA. Os factores analisados foram: aumentar a conexão nodal, aumentar a capacidade resistente ao dano e diminuir a perda de carga. A importância destes factores para a redução da vulnerabilidade de RAA, foi demonstrada com recurso a um exemplo de RAA.

A identificação da vulnerabilidade das RAA pode contribuir para tornar as RAA mais robustas, tanto a nível de projecto como a nível de manutenção, contribuindo assim para a segurança das populações, a salvaguarda de bens e para a redução de prejuízos económicos.

O caminho a seguir pela TVRAA será o desenvolvimento de uma ferramenta informática que consiga integrar as propostas elaboradas nesta dissertação. A integração com software de dimensionamento hidráulico de RAA já existentes pode ser uma mais-valia para a obtenção de um software viável e capaz de corresponder às necessidades dos utilizadores.

A utilização de um software para a aplicação da TVRAA permitirá a análise da vulnerabilidade de RAA reais, uma vez que são constituídas inúmeros troços e a sua análise manual torna-se quase impraticável. A TVRAA tem sido aplicada, até agora, em RAA simples e os resultados obtidos na maioria das vezes são resultados esperados e óbvios, o que é importante para a validação das teorias propostas. Com a aplicação da TVRAA a RAA reais, poderá ser dado um passo importante para o reconhecimento desta teoria, uma vez que podem surgir cenários de dano vulneráveis que inicialmente não seriam expectáveis.

Bibliografia

- [1] — Bastos C. - Aplicação da teoria da vulnerabilidade estrutural às redes hidráulicas de abastecimento de água - Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2008.
- [2] — Leandro, P. – Programa de Cálculo Automático VRHAA - Tese de Mestrado engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.
- [3] — Leandro, P.; Varajão, J.; Pinto, J.; Bentes, I.. – Introdução à Teoria da Vulnerabilidade das Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA). In ENEG2009 - Sustentabilidade na Gestão do Ciclo Urbano da água, Encontro Nacional de Entidades Gestoras de Água e Saneamento. Lisboa, 2009. Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas.
- [4] — Pinto, J.; Varum, H.; Bentes, I.. (2009) - Contributo para o Estudo da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água. Temática: Construção e Estruturas. Editado em CD. 5ª Conferência de Engenharias “Engenharias2009” – Inovação e Desenvolvimento”. Universidade da Beira Interior. 25-27 de Novembro de 2009.
- [5] — Pinto, J., Afonso, L., Varum, H., Duarte, A., Bentes, I., *Avaliação da Vulnerabilidade de Redes de Abastecimento de Água*, 10º Congresso da Água, pp. 158 e 159 do Livro de Resumos, Editado em CDRom, APRH, ISBN 978-972-99991-9-2, 21 a 24 de Março de 2010, Alvor, Algarve, Portugal,.
- [6] — Pinto J., Afonso L., Varajão J., Bentes I. (2010) - Increasing the quality of water pipe network systems by tracing the vulnerability. *Advances in Waste Management*. Editors: Ali Kallel, Abdelhamid Hassairi, Cornelia Bulucea, Nikos Mastorakis. Published by WSEAS Press. ISBN: 978-960-474-190-8. ISSN: 1790-5095. pp. 172-176.
- [7] — Bastos, C., Duarte, A., Bentes, I., Pinto J.. (2009) - Teoria da Vulnerabilidade de Redes Hidráulicas de Abastecimento de Água (TVRHAA). Editado em CD. 9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa). Benguela, República de Angola. 28-30 de Outubro de 2009.
- [8] — Pinto, J. T. - *The Risk of a Vulnerable Scenario*, Bristol (UK), Universidade de Bristol, 2002.
- [9] — <http://sic.sapo.pt/online/noticias/pais>
- [10] — <http://elogeografico.blogspot.com/2010/04/vulcao-na-islandia-entre-em-erupcao.html>
- [11] — Politejo – Catálogo de tubos de Policloreto de vinilo (PVC)
- [12] — Marques, A., *Hidráulica Urbana: Sistemas de Abastecimento de Água*, Imprensa da Universidade de Coimbra, 2006

[13] — Rodrigues, J., *Regulamento Geral de Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais*, Rei dos Livros, Lisboa, 2007.

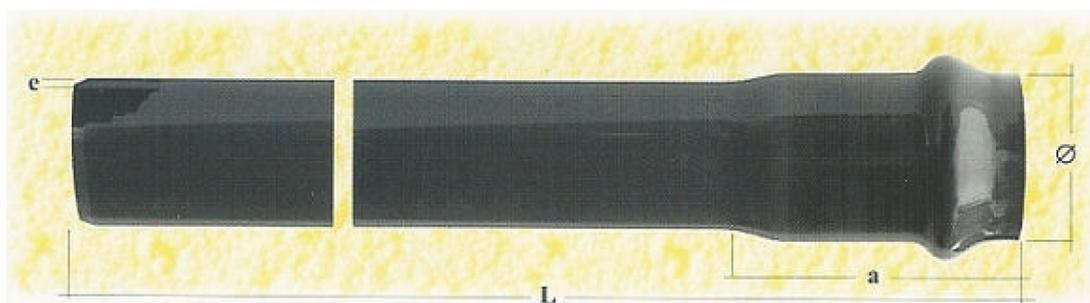
[14] — Politejo – Catálogo de tubos de Polietileno de alta densidade (PEAD)

ANEXOS

ANEXO A

Catálogos dos tubos de PVC e PEAD

ANEXO A.I – Catálogo dos tubos de PVC da Politejo



Referência Referencia	Pressão de serviço Presión de servicio (Kg/cm ²)	Dimensões Dimensiones			
		e (mm)	a (mm)	Ø (mm)	L (m)
63 TL - OR - AL	6	1,9	112	63	6
	10	3,0			
	16	4,7			
75 TL - OR - AL	6	2,2	119	75	6
	10	3,6			
	16	5,6			
90 TL - OR - AL	6	2,7	127	90	6
	10	4,3			
	16	6,7			
100 TL - OR - AL	6	3,2	139	110	6
	10	5,3			
	16	8,2			
125 TL - OR - AL	6	3,7	146	125	6
	10	6,0			
	16	9,3			
140 TL - OR - AL	6	4,1	154	140	6
	10	6,7			
	16	10,4			
160 TL - OR - AL	6	4,7	167	160	6
	10	7,7			
	16	11,9			
200 TL - OR - AL	6	5,9	182	200	6
	10	9,6			
	16	14,9			
250 TL - OR - AL	6	7,3	208,5	250	6
	10	11,9			
	16	18,6			
315 TL - OR - AL	6	9,2	218	315	6
	10	15,0			
	16	23,4			
400 TL - OR - AL	6	11,7	260	400	6
	10	19,1			
	16	29,7			
500 TL - OR - AL	6	14,6	300	500	6
	10	23,8			
630 TL - OR - AL	6	18,4	-	630	6
	10	30,0			
710 TL - OR - AL	6	20,7	-	710	6
	10	33,8			
800 TL - OR - AL	6	23,3	-	800	6
	10	38,1			

Ref. **TL** - TUBO LISO Ref. **OR** - C/ JUNTA INTEGRAL Ref. **AL** - C/ ABOCAMENTO POR COLAGEM
 Ref. **TL** - TUBO LISO Ref. **OR** - C/ JUNTA INTEGRAL Ref. **AL** - C/ UNIÓN POR ENCOLADO

ANEXO A.II - Catálogo dos tubos de PEAD da Politejo

Ø mm	SDR 41		SDR 26		SDR 21		SDR 17		SDR 13,6		SDR 11		SDR 9		SDR 7,5	
	PN 4		PN 6,3		PN 8		PN 10		PN 12,5		PN 16		PN 20		PN 25	
	e. min	peso	e. min	peso	e. min	peso	e. min	peso	e. min	peso						
25									2,0	0,149	2,3	0,170	3,0	0,211	3,5	0,242
32							2,0	0,194	2,4	0,231	3,0	0,279	3,6	0,328	4,4	0,388
40					2,0	0,246	2,4	0,294	3,0	0,356	3,7	0,431	4,5	0,511	5,5	0,605
50			2,0	0,311	2,4	0,373	3,0	0,453	3,7	0,550	4,6	0,669	5,6	0,793	6,9	0,944
63			2,5	0,492	3,0	0,579	3,8	0,772	4,7	0,877	5,8	1,06	7,1	1,27	8,6	1,48
75			2,9	0,674	3,6	0,828	4,5	1,02	5,5	1,22	6,8	1,48	8,4	1,78	10,3	2,11
90	2,2	0,636	3,5	0,979	4,3	1,19	5,4	1,47	6,6	1,76	8,2	2,14	10,1	2,57	12,3	3,03
110	2,7	0,939	4,2	1,44	5,3	1,78	6,6	2,18	8,1	2,64	10,0	3,17	12,3	3,81	15,1	4,54
125	3,1	1,23	4,8	1,85	6,0	2,28	7,4	2,78	9,2	3,40	11,4	4,12	14,0	4,92	17,1	5,84
140	3,5	1,55	5,4	2,33	6,7	2,85	8,3	3,49	10,3	4,26	12,7	5,13	15,7	6,18	19,2	7,34
160	3,9	1,96	6,2	3,06	7,6	3,70	9,5	4,56	11,8	5,56	14,6	6,74	17,9	8,05	21,9	9,55
180	4,4	2,49	6,9	3,81	8,6	4,70	10,7	5,77	13,3	7,05	15,4	8,52	20,1	10,2	24,6	12,1
200	4,9	3,06	7,7	4,73	9,6	5,83	11,9	7,11	14,7	8,65	18,2	10,5	22,4	12,6	27,4	14,9
225	5,5	3,88	8,6	5,94	10,8	7,36	13,4	9,02	16,6	11,0	20,5	13,3	25,1	15,9	30,8	18,9
250	6,1	4,79	9,6	7,36	11,9	9,01	14,5	11,1	18,4	13,5	22,7	16,3	27,9	19,6	34,2	23,3
280	6,9	6,02	10,7	9,18	13,4	11,4	16,6	13,9	20,6	17,0	25,4	20,5	31,2	24,6		
315	7,7	7,56	12,1	11,7	15,0	14,3	18,7	17,6	23,3	21,6	28,6	25,9	35,0	31,0		
355	8,7	9,62	13,6	14,8	16,9	18,2	21,1	22,4	26,1	27,2	32,3	33,0	39,5	39,4		
400	9,8	12,2	15,3	18,7	19,1	23,1	23,7	28,3	29,4	34,5	36,4	41,9	44,5	50,0		
450	11,0	15,4	17,2	23,7	21,5	29,3	26,7	35,9	33,1	43,8	40,9	52,9	50,0	63,2		
500	12,2	19,0	19,1	29,2	23,9	36,1	29,6	44,2	36,8	54,0	45,5	65,4	55,6	78,1		
560	13,7	23,8	21,4	36,6	26,7	45,2	33,2	55,5	41,2	67,7	50,9	82,0				
630	15,4	30,2	24,1	46,4	30,0	57,1	37,3	70,1	46,4	85,8	57,3	104				
710	17,4	38,4	27,2	59,0	33,9	72,7	42,1	89,2	52,3	109						
800	19,6	48,7	30,6	74,8	38,1	92,1	47,4	113	58,9	138						
900	22,0	61,4	34,7	95,4	42,9	117	53,3	143								
1000	24,4	75,7	38,5	118	47,7	144	59,3	177								
1200	29,3	109	46,2	169	57,2	207										

MRS/PE 100
δ = 8,0 MPa
Dens. 0,961

Fabricados segundo:
 Fabricados según:
 Manufactured according to:

prEN 12201
 (*) ISO 4427

PN = bar
 Esp., Wallthickness - mm
 Peso, Weight - Kg/m

ANEXO B

Tabelas de dimensionamento hidráulico das RAA dos Exemplo 1, 2, 3 e 4

ANEXO B.I – Dimensionamento da RAA do Exemplo 1

Sub-rede	Troços		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	500	0.01	24	174.59	200	188.20	0.86	1.032	160761	5.3E-05	0.01666	0.00336	1.68	6
2	2	3	600	0.01	8	100.80	125	117.60	0.74	0.855	85757	8.5E-05	0.01892	0.00445	2.67	6
3	2	4	400	0.01	16	142.55	160	150.60	0.90	0.944	133932	6.6E-05	0.01731	0.00473	1.89	6
4	4	5	300	0.01	8	100.80	125	117.60	0.74	0.855	85757	8.5E-05	0.01892	0.00445	1.33	6
5	4	6	500	0.01	8	100.80	125	117.60	0.74	0.855	85757	8.5E-05	0.01892	0.00445	2.22	6
6	5	6	400	0.01	4	71.27	110	103.60	0.47	0.813	48673	9.7E-05	0.02125	0.00235	0.94	6

Sub-rede	Troços		Cota topográfica (m)		Altura Piezométrica (m.c.a)		Cota Piezométrica (m.c.a.)	
			M	J	M	J	M	J
1	1	2	127.79	100	3.00	29.11	130.79	129.11
2	2	3	100	100	29.11	26.45	129.11	126.45
3	2	4	100	100	29.11	27.22	129.11	127.22
4	4	5	100	100	27.22	25.94	127.22	125.94
5	4	6	100	100	27.22	25.00	127.22	125.00
6	5	6	100	100	25.94	25.00	125.94	125.00

ANEXO B.II – Dimensionamento da RAA do Exemplo 2

Sub-rede	Troço		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	200	0.01	10	174.59	200	188.20	0.86	0.895	95647	7.6E-05	0.01848	0.00384	0.77	6
2	1	4	100	0.01	15	100.80	125	117.60	0.74	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.42	6
3	4	5	200	0.01	5	142.55	160	150.60	0.90	0.813	60841	9.7E-05	0.02030	0.00351	0.70	6
4	2	5	100	0.01	20	100.80	125	117.60	0.74	1.032	133967	5.3E-05	0.01722	0.00241	0.24	6
5	3	2	200	0.01	10	100.80	125	117.60	0.74	0.895	95647	7.6E-05	0.01848	0.00384	0.77	6
6	6	5	200	0.01	5	71.27	110	103.60	0.47	0.813	60841	9.7E-05	0.02030	0.00351	0.70	6
7	3	6	100	0.01	15	138.02	160	150.60	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.42	6

Sub-rede	Troços		Cota topográfica (m)		Altura Piezométrica (m.c.a)		Cota Piezométrica (m.c.a.)	
			M	J	M	J	M	J
1	1	2	142.77	120.00	3.00	25.00	145.77	145.00
2	2	3	142.77	105.00	3.00	40.35	145.77	145.35
3	2	4	105.00	115.00	40.35	29.76	145.35	144.76
4	4	5	120.00	115.00	25.00	29.76	145.00	144.76
5	4	6	142.77	120.00	3.00	25.00	145.77	145.00
6	5	6	105.00	115.00	40.35	29.76	145.35	144.76
7	1	2	142.77	105.00	3.00	40.35	145.77	145.35

ANEXO B.III – Dimensionamento da RAA do Exemplo 3

Sub-rede	Troço		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	200	0.01	15	138.02	160	150.60	0.84	0.944	125561	0.01751	0.00420	0.84	6.6E-05	6
2	2	3	200	0.01	15	138.02	160	150.60	0.84	0.944	125561	0.01751	0.00420	0.84	6.6E-05	6
3	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.60	0.84	0.944	125561	0.01751	0.00420	0.84	6.6E-05	6
4	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.60	0.84	0.944	125561	0.01751	0.00420	0.84	6.6E-05	6

Sub-rede	Troços		Cota topográfica (m)		Altura Piezométrica (m.c.a)		Cota Piezométrica (m.c.a.)	
			M	J	M	J	M	J
1	1	2	163.68	130	3.00	35.84	293.68	165.84
2	2	3	130	140	35.84	25.00	270.00	165.00
3	2	4	140	130	25.00	34.16	270.00	164.16
4	2	4	130	135	34.16	28.32	265.00	163.32

ANEXO B.IV – Dimensionamento da RAA do Exemplo 4

Sub-rede	Troço		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	200.00	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	6
2	2	3	200.00	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	6
3	2	4	164.25	0.01	15	138.02	160	144.6	0.91	0.929	130771	6.9E-05	0.01740	0.00512	0.84	10
4	2	4	164.25	0.01	15	138.02	160	144.6	0.91	0.929	130771	6.9E-05	0.01740	0.00512	0.84	10

Sub-rede	Troços		Cota topográfica (m)		Altura Piezométrica (m.c.a)		Cota Piezométrica (m.c.a.)	
			M	J	M	J	M	J
1	1	2	163.68	130.00	3.00	35.84	293.68	165.84
2	2	3	130.00	140.00	35.84	25.00	270.00	165.00
3	2	4	140.00	100.00	25.00	64.16	240.00	164.16
4	2	4	100.00	95.00	64.16	68.32	195.00	163.32

ANEXO C

Tabelas de dimensionamento e cálculo dos parâmetros de vulnerabilidade da RAA do Exemplo 3 após alterações introduzidas na mitigação da vulnerabilidade

ANEXO C.I – Mitigação - Aumento da conexão nodal no Exemplo 3

Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o troço adicional 6.

Sub-rede	Troço		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	200	0.01	7.5	97.60	160	150.6	0.42	0.944	62781	6.6E-05	0.02003	0.00120	0.24	6
2	2	3	200	0.01	7.5	97.60	160	150.6	0.42	0.944	62781	6.6E-05	0.02003	0.00120	0.24	6
3	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	6
4	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	
6	1	3	280	0.01	7.5	97.60	125	117.6	0.69	0.855	80398	8.5E-05	0.01915	0.00396	1.11	6

Parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano para esta nova condição.

1º cenário de dano

Dano na sub-rede 1	
E	6
Et	30
Er=E/Et	0.200
$\Delta Ht(S')$	0.24
$\Delta Htotal$	2.16
γ_r	0.111
Ψ	0.556

2º cenário de dano

Dano na sub-rede 2	
E	6
Et	30
Er=E/Et	0.200
$\Delta Ht(S')$	0.24
$\Delta Htotal$	2.16
γ_r	0.111
Ψ	0.556

ANEXO C.II – Mitigação - Aumento da capacidade resistente ao dano no Exemplo 3

Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o aumento de capacidade ao dano no troço 1

Sub-rede	Troço		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	200	0.01	15	138.02	160	144.6	0.91	0.929	130771	6.9E-05	0.01740	0.00512	1.02	10
2	2	3	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	6
3	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	6
4	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	0.944	125561	6.6E-05	0.01751	0.00420	0.84	6

Parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano para esta nova condição.

1º cenário de dano

Dano na sub-rede 1	
E	10
Et	28
Er=E/Et	0.357
$\Delta Ht(S')$	3.54
$\Delta Htotal$	3.54
γ_r	1.000
Ψ	2.800

2º cenário de dano

Dano na sub-rede 2	
E	6
Et	28
Er=E/Et	0.214
$\Delta Ht(S')$	2.52
$\Delta Htotal$	3.54
γ_r	0.711
Ψ	3.319

ANEXO C.III – Mitigação – Alteração da perda de carga na RAA do Exemplo 3

Dimensionamento da RAA do Exemplo 3 com o aumento da perda de carga (através da rugosidade do tubo) no troço 1

Sub-rede	Troço		L (m)	K (mm)	Caudais (l/s)	Diâmetros (mm)			Velocidades (m/s)		Re	K/D	f	J (m/m)	Ji.Li (m)	Capacidade resistente ao dano (Kgf/cm ²)
						Dcalc	Dcom	Dint	V	Vmax reg						
1	1	2	200	0.02	15	138.02	160	147.6	0.88	138.02	0.936	128113	0.00014	0.01789	0.00475	10
2	2	3	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	138.02	0.944	125561	0.00007	0.01751	0.00420	6
3	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	138.02	0.944	125561	0.00007	0.01751	0.00420	6
4	2	4	200	0.01	15	138.02	160	150.6	0.84	138.02	0.944	125561	0.00007	0.01751	0.00420	6

Parâmetros de vulnerabilidade dos cenários de dano para esta nova condição.

1º cenário de dano

Dano na sub-rede 1	
E	6
Et	24
Er=E/Et	0.250
$\Delta Ht(S')$	3.47
$\Delta Htotal$	3.47
γ_r	1.000
Ψ	4.000

2º cenário de dano

Dano na sub-rede 2	
E	6
Et	24
Er=E/Et	0.250
$\Delta Ht(S')$	2.52
$\Delta Htotal$	3.47
γ_r	0.726
Ψ	2.91