

# AVALIAÇÃO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NA DEFORMAÇÃO DE TUBAGEM ENTERRADA, MEDIANTE SIMULAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

## EVALUATION OF THE FACTORS INFLUENCING THE DEFORMATION OF BURIED PIPES, BASED ON SIMULATION AND STATISTICAL ANALYSIS

*L.E. Pimentel Real*

*Departamento de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*



### RESUMO

Nesta comunicação apresentam-se os resultados da avaliação dos efeitos que mais contribuem para a deformação sofrida por tubagem plástica enterrada, recorrendo a simulação com planeamento de experiências (DOE).

Os resultados obtidos estão de acordo com os que se obtêm pela aplicação de outros métodos estatísticos de análise, tais como o método dos componentes principais e de análise de fatores, e são consistentes com os resultados de ensaios no terreno, confirmando-se também assim a eficácia e adequação destes métodos para avaliações prévias, com grande economia de recursos.

Palavras-chave: Tubagem enterrada / Rigidez / Grau de compactação / Deformação a longo prazo / Cálculo e Simulação / Planeamento de experiências / Componentes principais / Análise de fatores / Métodos estatísticos

### ABSTRACT

The present communication presents the evaluation of the effects that contribute most to the deformation of buried plastic pipes, through simulation by design of experiments (DOE).

The results are in agreement with those obtained by the application of statistical analysis such as the method of principal components and factor analysis, and are also consistent with the results of field tests, confirming thus the effectiveness and suitability of these methods for prior assessments, with great economy of resources.

## 1. INTRODUÇÃO

Para assegurar uma instalação de uma tubagem enterrada com boa qualidade, devem-se seguir as recomendações constantes nas normas de projeto e de instalação (CEN 1997-2015), não devendo o valor da deformação, para um período de 50 anos, ultrapassar 5% do diâmetro exterior do mesmo.

Para conhecer os efeitos que mais influência exercem na deformação da tubagem a longo prazo, podem-se efetuar medições da deformação vertical das tubagens, em instalações tipo, fazendo variar os parâmetros de instalação, criando diversos casos de estudo.

Porém, a avaliação de casos de estudo é onerosa, dado o enorme conjunto de fatores a controlar e de ensaios aos solos a realizar, quer no terreno, quer no laboratório, pelo que constitui alternativa válida a simulação e avaliação dos cálculos com recurso a métodos estatísticos, tais como o de planeamento de experiências, método dos componentes principais ou análise de fatores, abordagem adotada no presente estudo.

## 2. FATORES DE INSTALAÇÃO

Os fatores que devem ser considerados na instalação e que influenciam a deformação final dos tubos são os seguintes:

- Características do tubo (material constituinte, diâmetro e classe de rigidez).
- Características do aterro ou da vala (forma, profundidade e largura), material de enchimento e solo nativo (tipo de solos e respetivo módulo de elasticidade).
- Condições de assentamento e de recobrimento (leito, ângulo de apoio, cargas e classe de compactação).

## 3. CÁLCULO ESTRUTURAL DA INSTALAÇÃO

Para o cálculo da resistência mecânica de tubagens enterradas sob diferentes condições de carga recorreu-se, no presente estudo, à metodologia baseada fundamentalmente em dois métodos reconhecidos e amplamente testados, sugeridos nas normas alemã ATV-DVWK-A

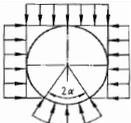
127E-2000 e austríaca ONORM B 5012-2-1995, calculando a deformação vertical sofrida pelo tubo,  $\Delta D_v$ , sob condições de instalação específicas (William e Whidden 2009).

A deformação vertical  $\Delta D_v$  sofrida pelo tubo pode calcular-se pela fórmula de Spangler modificada (ou fórmula de Iowa modificada) (Spangler 1941; Jones 1988):

$$\Delta D_v = \frac{(c \times P_s + P_t) \times b_1}{8 \times RCE + 0,061 \times E_R} \quad (1)$$

em que  $\Delta D_v$  é a deflexão do tubo (em %),  $c$  é o fator de autocompactação que assume o valor adimensional de 1,5 para uma compactação moderada ou 2 em instalações com uma altura de recobrimento baixa,  $P_s$  é a carga vertical do solo (em  $\text{kN/m}^2$ ),  $P_t$  a carga de trânsito por roda (em  $\text{kN/m}^2$ ),  $b_1$  o fator de distribuição de carga (Tabela 1),  $RCE$  a rigidez circunferencial específica calculada sobre o diâmetro (em  $\text{kN/m}^2$ ), e  $E_R$  é o módulo de rigidez do terreno (em  $\text{kN/m}^2$ ), o qual depende do tipo de solo e respetivo grau de compactação (Tabela 2).

**Tabela 1 – Valores do fator de distribuição de carga,  $b_1$ , para vários valores do ângulo de apoio do tubo no leito de assentamento<sup>1</sup>,  $2\alpha$  [CEN/TR 1295-2, 2005]**

	Ângulo de apoio, $2\alpha$ (º)	60	90	120	180
	$b_1$		0,1053	0,0966	0,0893

**Tabela 2 – Módulo de rigidez  $E_R$  (em  $\text{kN/m}^2$ ) do material de enchimento em função do tipo de solo e da densidade Proctor (classificação simplificada [CEN/TR 1295-2, 2005])**

Tipo de solo	Densidade Proctor (%)					
	85	90	92	95	97	100
Grupo 1 (granular não coesivo)	2500	6000	9000	16000	23000	40000
Grupo 2 (granular ligeiramente coesivo)	1200	3000	4000	8000	11000	20000
Grupo 3 (coesivo com mistura)	800	2000	3000	5000	8000	14000
Grupo 4 (coesivo e orgânico)	600	1500	2000	4000	6000	10000

A rigidez circunferencial do tubo,  $RCE$ , é o valor nominal correspondente às classificações mínimas normalizadas ( $SN_i$ , em que  $i=1,25; 2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 16$  ou  $32 \text{ kN/m}^2$ ), ou, em alternativa, pode ser calculado pela seguinte expressão:

<sup>1</sup>: Considerando uma reação dirigida verticalmente e distribuída retangularmente em toda a largura  $D$  do tubo.

$$RCE = \frac{E \times I}{D^3} = \frac{2 \times E \times e^3}{3R^3} \quad (2)$$

em que  $E$  é o módulo de elasticidade do material do tubo (em kN/m<sup>2</sup>),  $I$  é o momento de inércia (em cm<sup>4</sup>/cm),  $D$  é o diâmetro exterior médio do tubo (em cm),  $e$  representa a espessura equivalente do tubo (em cm) e  $R$  é o raio exterior do tubo (em cm).

A carga de trânsito que atua no plano tangente à geratriz superior da tubagem pode ser calculada a partir da seguinte expressão (DIN 1072 1985), válida para  $H > 0,5$  m:

$$P_T = \frac{3.T}{2.\pi.H^2.\left(1 + \frac{x^2}{H^2}\right)^{\frac{5}{2}}} \quad (3)$$

em que  $P_T$  é a carga de trânsito (em kN/m<sup>2</sup>),  $T$  é a carga esperada por roda (retirada da tabela 3),  $H$  é a profundidade da vala, medida desde a superfície do terreno até à geratriz superior do tubo (em m) e  $x$  é a distância entre o ponto de incidência da carga e o eixo do tubo (em m), a qual normalmente se considera ter um valor nulo (situação mais desfavorável).

**Tabela 3 – Cargas de tráfego (DIN 1072 1985)**

Tipo de Tráfego	Carga Total (kN)	Carga por Roda (kN)
Tráfego Pesado	600	100
Tráfego Médio	300	50
Tráfego Ligeiro	120	40

As cargas do solo, numa vala de paredes verticais, são calculadas a partir da seguinte expressão:

$$P_s = S_c \times \rho \times H \quad (4)$$

em que  $P_s$  é a carga vertical do solo em (kN/m<sup>2</sup>),  $S_c$  é o coeficiente de correção da carga do solo e  $\rho$  é a massa volúmica do solo em (kN/m<sup>3</sup>) (ATV 2000).

O valor de  $S_c$  é obtido através da equação seguinte (CEN/TR 1295-2 2005):

$$S_c = \frac{1 - e^{-2 \times K \times \text{tg}(\theta) \times \frac{H}{b}}}{2 \times K \times \text{tg}(\theta) \times \frac{H}{b}} \quad (5)$$

em que  $K$  é a relação entre os esforços horizontais e verticais existentes no material de enchimento da vala ( $K \approx 0,5$ ),  $\theta$  é o ângulo de atrito entre o enchimento e as paredes da vala (em °) e  $b$  é a largura da vala (em m).

A relação  $K (\approx 0,5)$ , entre as pressões lateral e vertical do solo pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$K = \frac{1 - \sin(\theta)}{1 + \sin(\theta)} \quad (6)$$

O ângulo de fricção efetivo entre as terras de enchimento e a parede da vala ( $\theta$ ) depende do ângulo de atrito do material de enchimento ( $\delta$ , em °) (ATV 2000). O ângulo de atrito entre o enchimento e a parede da vala ( $\theta$ ) e a relação entre as pressões lateral e vertical do solo, são função das condições de recobrimento, as quais por sua vez dependem do tipo de terreno (ATV 2000). Caso se adote para  $\theta$  um valor nulo, tem-se  $S_c = 1$ .

#### 4. SIMULAÇÃO

Para avaliar os fatores que exercem mais influência na deformação da tubagem a longo prazo, recorreu-se ao método de planeamento de experiências (DOE) e dos componentes/fatores principais (Montgomery e Runger 2002), utilizando os cálculos efetuados com as expressões matemáticas indicadas anteriormente.

O planeamento frequentemente mais utilizado é do tipo fatorial fracionado a 2 níveis, de forma a reduzir ao máximo o nº de ensaios necessários, procurando-se otimizar a avaliação e obter o máximo de informação de cada ensaio<sup>2</sup>.

Assumindo que é provável que o processo em estudo seja conduzido principalmente por alguns dos efeitos principais e algumas interações de ordem baixa (não superior a dois), numa fase inicial do estudo pode adotar-se um planeamento fatorial fracionado a dois níveis (alto e baixo, correspondentes às situações menos e mais desfavoráveis de deformação vertical a longo prazo) de  $k=8$  fatores e de resolução IV ( $2^{8-4}=16$  respostas), para obter informação dos efeitos principais e interações de ordem mais baixa. Os resultados podem depois ser comparados com os do planeamento fatorial completo, com as respostas para todas as combinações possíveis de fatores e níveis ( $2^8 = 256$  respostas), de forma a avaliar

---

<sup>2</sup>: Porém, em planeamentos fatoriais fracionados os fatores significativos estão confundidos com interações de vária ordem de outros fatores, dependendo o nível de confusão do grau de resolução do planeamento. Por isso a interpretação é mais trabalhosa, podendo requerer, numa segunda fase, que os desenhos fatoriais fracionados sejam projetados em fatoriais mais fortes para o subconjunto de fatores significativos.

a potencialidade do método fracionado. De facto, como no presente estudo se adotou uma metodologia de simulação e cálculo, tem-se a vantagem de poder utilizar métodos DOE de fatorial completo, sem correr risco de ter os fatores significativos confundidos com interações de vária ordem de outros fatores ou deste conduzir a um número proibitivo de ensaios, sendo possível a sua aplicação.

Os fatores utilizados no planeamento de experiências fracionado e respetivos níveis, são os indicados na tabela 4. O fator  $c$  da Eq. 1 foi definido para as condições mais desfavoráveis, que corresponde a compactações moderadas com baixa altura de recobrimento ( $c=2$ ).

**Tabela 4 – Fatores utilizados no planeamento de experiências a dois níveis (alto e baixo)**

Fator	Valor
$RCE$ (rigidez circunferencial do tubo)	2 kN/m <sup>2</sup> e 16 kN/m <sup>2</sup>
$B$ (largura da vala), que depende do diâmetro do tubo	1 m (tubos de menor diâmetro) e 4 m (tubos de maior diâmetro, até 3 m)
$H$ (profundidade da vala), que depende do diâmetro do tubo, das cargas fixas e móveis e do declive	2 m e 6 m
$\theta$ (ângulo de atrito entre o enchimento e a parede da vala) que depende das condições de recobrimento	— 0, considerando enchimento compactado por camadas contra o solo natural, sem prova de qualidade de compactação (C) — $\delta=10^\circ$ ou $35^\circ$ , conforme o tipo de terreno, considerando enchimento compactado por camadas contra o solo natural, com verificação do grau de compactação (D)
$TT$ (Tipo de terreno do material de enchimento)	— 6 (escombro, solo não coesivo do grupo 1) — 12 (argila e calcário orgânicos, solo coesivo com misturas do grupo 3)
$E_R$ (módulo de rigidez do solo), que depende do grau de compactação GC	— para 85% e 100% de densidade Proctor
$T$ (carga do tráfego por roda)	— 0 kN (sem tráfego) — 100 kN (tráfego pesado)
$b1$ (fator de distribuição de carga, que depende do ângulo de apoio)	0,1053 (para $60^\circ$ ) e 0,0966 (para $180^\circ$ )

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na tabela 5 apresentam-se os valores dos fatores usados no planeamento fracionado de resolução IV<sup>3</sup>, no qual os efeitos principais não estão confundidos com outros efeitos principais ou com interações de dois fatores, pois apenas as interações de dois fatores estão confundidas entre si. Os geradores usados foram E=BCD, F=ACD, G= ABC e H=ABD.

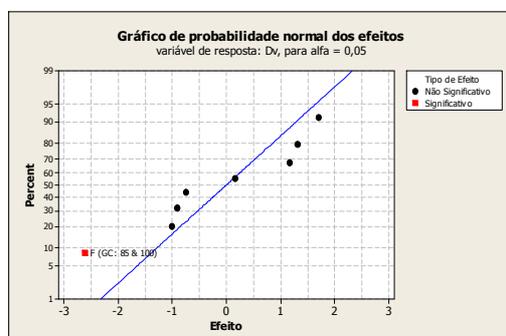
<sup>3</sup>: Um desenho diz-se de resolução R se não existir nenhum efeito de p fatores confundido com outro efeito contendo menos que R-p fatores.

Nas figuras 1 e 2 apresentam-se os gráficos de avaliação dos efeitos significativos, para um nível de confiança de 95%.

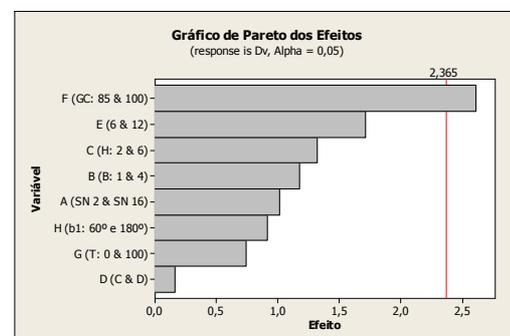
Na análise à distribuição dos efeitos normalizados, sem considerar interações, verifica-se que apenas um dos efeitos se afasta da reta distribuição normal e é considerado verdadeiramente significativo. Assim, mesmo sem analisar possíveis fatores confundidos ou mascarados, é legítimo concluir que é o grau de compactação dos solos usados no aterro que é considerado como efeito mais significativo para a deformação vertical do tubo. O Gráfico de Pareto também permite extrair esta ilação, identificando ainda o tipo de terreno como segundo efeito mais significativo.

**Tabela 5 – Valores dos fatores utilizados no planejamento de experiências a dois níveis, do tipo  $2_{IV}^{8-4}$ , sem replicados (fracionamento 1/16)**

RCE	B	H	$\theta$	TT	GC	T	b1	$\Delta Dv$
2	4	6	C	6	100	0	180	0,68
2	4	2	C	12	85	100	180	10,10
16	4	6	C	6	85	100	60	7,55
2	4	6	D	12	85	0	60	28,76
16	1	6	D	6	100	0	60	0,20
2	1	6	C	12	100	100	60	2,44
16	4	2	C	12	100	0	60	0,84
2	1	2	C	6	85	0	60	4,91
16	4	2	D	6	85	0	180	2,02
2	4	2	D	6	100	100	60	0,29
16	1	6	C	12	85	0	180	9,48
2	1	6	D	6	85	100	180	2,38
16	1	2	D	12	85	100	60	4,06
16	4	6	D	12	100	100	180	1,50
2	1	2	D	12	100	0	180	0,65
16	1	2	C	6	100	100	180	0,25



a)



b)

**Figura 1 - Gráficos de avaliação dos efeitos significativos obtidos no planejamento de experiências a dois níveis, do tipo  $2_{IV}^{8-4}$ , sem replicados (Minitab): a) gráfico de probabilidade normal dos efeitos; b) gráfico de Pareto**

Tratando-se no entanto de um planeamento fatorial com um nº de respostas muito reduzido, a fiabilidade dos resultados é bastante inferior à que se obtém mediante um planeamento fatorial completo, sem replicados. Assim, na tabela 6 apresentam-se os maiores valores do fator  $F^4$  de cada fator e interação de fatores, para os efeitos que se consideram significativos na análise de variância do planeamento fatorial completo, o que não só confirma o resultado do planeamento fatorial fracionado, como ainda revela outros efeitos que embora sejam menos significativos também contribuem para a variabilidade do fator de resposta  $\Delta D_v$ , designadamente o tipo de terreno usado no enchimento e classe de rigidez do tubo, bem como interações entre o grau de compactação e o tipo de terreno e a classe de rigidez, o que seria no mínimo previsível, visto todos estes efeitos se relacionarem diretamente com a deformação do tubo.

**Tabela 6 – Maiores valores de F obtidos na análise de variância e respetivos fatores**

Fator	Ordem	Valor de F	Fator	Ordem	Valor de F
GC	1	5188,60	SN	4	1072,92
TT	2	1611,75	SN*GC	5	1021,01
H	3	1380,12	TT*GC	6	1018,55

A figura 2, correspondente à análise dos resíduos, permite confirmar a fiabilidade da análise de variância, uma vez que se verifica uma distribuição normal dos resíduos: os valores residuais encontram-se dispersos ao longo de uma linha reta e o histograma segue uma curva de Gauss; os valores residuais encontram-se dispersos e a distribuição dos resíduos dá-se segundo um padrão aleatório, verificando-se desta forma também a independência dos valores residuais.

Por fim, nas figuras 3 e 4 apresentam-se os gráficos de efeitos dos fatores e das interações de fatores, respetivamente, na variável de resposta  $\Delta D_v$ .

Como os efeitos dos fatores são tanto maiores quanto maior for o declive das respetivas retas, a figura 3 permite confirmar que o maior efeito na deformação do tubo está associado ao grau de compactação do material de enchimento da vala, seguido do tipo de terreno, da profundidade da vala e da rigidez do tubo. As cargas de tráfego é o fator que menor efeito exerce na deformação do tubo!

---

<sup>4</sup>: Quanto maior é o valor do parâmetro estatístico F de um determinado fator, mais provável é que esse fator contribua significativamente para a variabilidade da resposta da variável de medição (neste caso,  $D_v$ ).

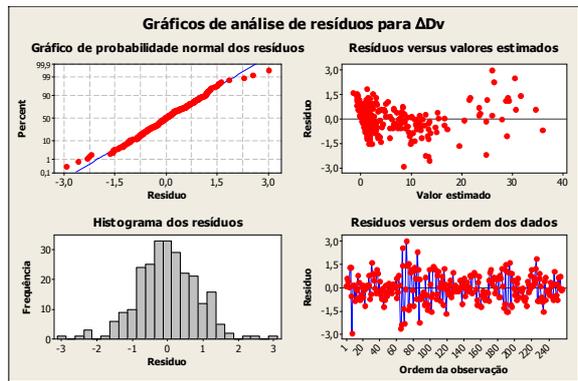


Figura 2 – Gráficos de comportamento dos valores residuais obtidos na análise de variâncias (Minitab Inc.)

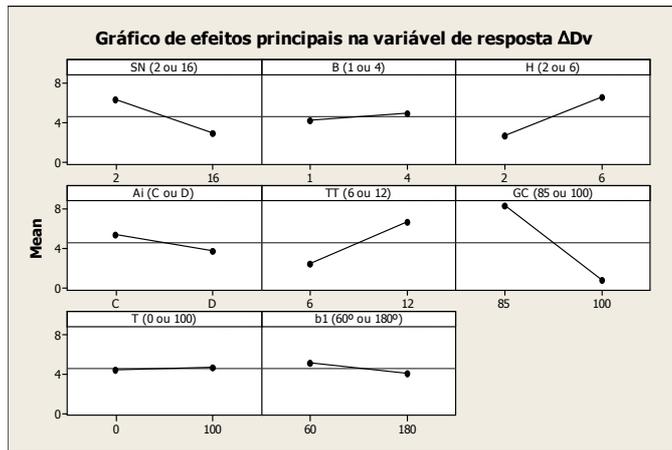


Figura 3 – Gráfico de efeitos de cada fator na variável de resposta  $\Delta Dv$

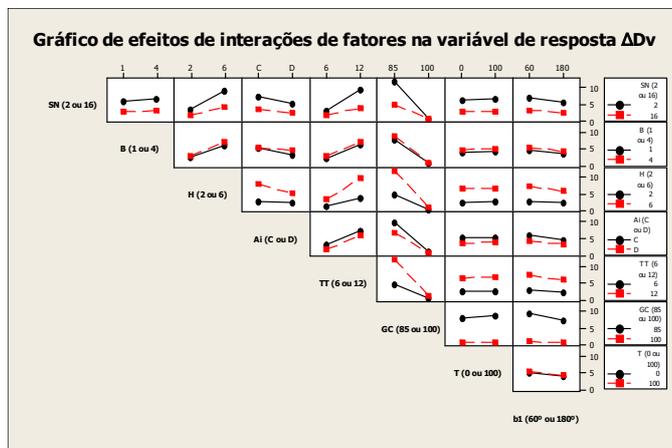


Figura 4 – Gráfico de efeitos de interações de fatores na variável de resposta  $\Delta Dv$  (a vermelho: níveis altos; a azul: níveis baixos)

Também se confirma, a partir da figura 4, que os maiores efeitos de interação ocorrem com o fator grau de compactação (GC), na generalidade dos casos para baixos graus de compactação (85% Proctor), para o qual a deformação do tubo é bastante mais relevante. Segue-se o efeito do tipo de terreno e da profundidade da vala.

A aplicação do método dos componentes principais aos 256 resultados da simulação (tabela 7), permitem confirmar as conclusões do planeamento de experiências, uma vez que a componente mais relevante para a análise (PC1, que é a que mais contribui para a variabilidade da variável de resposta  $\Delta Dv$ ), atribui ao fator grau de compactação o maior efeito, seguido do tipo de terreno e depois a profundidade da vala e a rigidez do tubo.

O sinal dos valores dos efeitos é lógico. O valor do efeito GC é de sentido contrário ao do da deformação do tubo, pois quanto maior é o grau de compactação do solo menor será a deformação do tubo, uma vez que aquele passa a absorver a maior parte das cargas. Segue-se o valor correspondente ao tipo de terreno, de sinal positivo, pois um solo coesivo (argila e calcário orgânicos) é menos adequado ao enchimento de uma vala do que um solo não coesivo (escombros). Depois surge o valor da profundidade da vala, de sinal positivo, pois quanto maior for a altura da vala, maior carga de solo existe sobre o tubo e, portanto, maior será a sua deformação. Por fim, o valor da classe de rigidez, com sinal negativo, porque obviamente a uma maior rigidez do tubo corresponderá também uma menor deformação.

**Tabela 7 – Resultados obtidos pelo método dos componentes principais**

Variável	Componente (peso)							
	PC1 (19,9%)	PC2 (11,1%)	PC3 (11,1%)	PC4 (11,1%)	PC5 (11,1%)	PC6 (11,1%)	PC7 (11,1%)	PC8 (11,1%)
SN	-0,24	0,21	0,35	0,22	0,74	-0,13	-0,01	-0,33
B	0,05	0,98	-0,10	-0,04	-0,14	0,03	0,06	0,08
H	0,27	0,01	-0,32	-0,25	0,56	0,14	-0,50	0,33
Ai	-0,11	0,01	0,18	0,10	-0,08	-0,76	-0,21	0,56
TT	0,29	-0,02	-0,30	-0,27	0,13	-0,60	0,36	-0,40
GC	-0,52	-0,01	-0,44	-0,51	0,04	-0,03	0,03	0,01
T	0,02	-0,05	-0,02	0,05	0,30	0,16	0,76	0,55
b1	-0,07	-0,02	-0,67	0,73	0,03	-0,06	-0,03	-0,04
$\Delta Dv$	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A aplicação do método de análise de fatores aos 256 resultados da simulação (tabela 8), permite confirmar as conclusões obtidas através da aplicação dos dois métodos estatísticos anteriormente referidos, pois a variável de resposta  $\Delta Dv$  só apresenta variabilidade no fator 1 e GC é a variável que mais contribui para essa variabilidade.

**Tabela 8 – Resultados obtidos pelo método da análise de fatores**

Variável	Fator							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SN	-0,32	0,21	0,35	0,22	0,74	-0,13	-0,01	-0,33
B	0,06	0,98	-0,10	-0,04	-0,14	0,03	0,06	0,08
H	0,36	0,01	-0,32	-0,25	0,56	0,14	-0,50	0,33
Ai	-0,15	0,01	0,18	0,10	-0,08	-0,76	-0,21	0,56
TT	0,39	-0,02	-0,30	-0,27	0,13	-0,60	0,36	-0,40
GC	-0,69	-0,01	-0,44	-0,51	0,04	-0,03	0,03	0,01
T	0,02	-0,05	-0,02	0,05	0,30	0,16	0,76	0,55
b1	-0,10	-0,02	-0,67	0,73	0,03	-0,06	-0,03	-0,04
$\Delta Dv$	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados dos cálculos permitem confirmar que o efeito que maior influência exerce na deformação a longo prazo de tubagem enterrada, é o grau de compactação dos solos usados no aterro, normalmente medido pela densidade Proctor, o qual também depende do tipo de material de enchimento da vala ou do tipo de solo usado no aterro<sup>5</sup>. Isto significa que a resistência de um tubo flexível enterrado e a sua capacidade de suportar cargas verticais não é devida ao próprio tubo, mas fundamentalmente ao solo em seu torno e das forças horizontais induzidas por ação do solo nas zonas laterais do tubo, que contrariam a sua deflexão horizontal.

Estas conclusões corroboram as obtidas em estudos recentes realizados pela TEPPFA (The European Plastic Pipes and Fittings Association), envolvendo 16 casos de estudo correspondentes a várias instalações tipo e utilizando tubagem com diversos valores de rigidez circunferencial (Björklund *et al.* 2011), as quais indicam que as cargas resultantes do tráfego não são determinantes para a deflexão de um tubo flexível enterrado, e que a deformação da tubagem depende fundamentalmente da qualidade da instalação, dependente da rigidez do material de enchimento e do seu grau de compactação.

O facto da metodologia adotada no presente estudo permitir chegar a conclusões equivalentes às obtidas mediante medições no terreno demonstra não só que o método de cálculo estrutural adotado é adequado e fiável para avaliar a deformação de tubagem enterrada, como também evidencia a importância da utilização de métodos estatísticos de

<sup>5</sup>: A classificação do tipo de solos consta do documento normativo CEN/TR 1046:2013

simulação, os quais conduzem a resultados similares aos obtidos através de medições e ensaios no terreno, mas em muito menos tempo e praticamente sem custos.

Da análise dos cálculos realizados, pode-se ainda concluir que a deformação sofrida por tubagem de baixa rigidez (SN2), correntemente utilizada em instalações de saneamento sem pressão em Portugal, é satisfatória desde que se efetue uma instalação com qualidade, designadamente usando materiais de enchimento granulares devidamente compactados<sup>6</sup>, com um valor mínimo de 95% Proctor.

## 7. REFERÊNCIAS

- ATV-DVWK-A 127E. 2000. Static Calculation of Drains and Sewers – 3rd Edition. German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA)
- Björklund, I. *et al.*, 2011. Buried pipes design. The European Plastic Pipes and Fittings Association (TEPPFA), <http://www.teppfa.eu/buriedpipes/>, acessado em abril de 2016
- CEN/TR 1046. EUROPEAN TECHNICAL REPORT. 2013. Thermoplastics piping and ducting systems - Systems outside building structures for the conveyance of water or sewage - Practices for underground installation.
- CEN/TR 1295. EUROPEAN TECHNICAL REPORT. Structural design of buried pipelines under various conditions of loading: Part 2 (2005): Summary of nationally established methods of design; Part 3 (2007): Common method; Part 4 (2015): Parameters for reliability of the design.
- CEN/TS 15223: EUROPEAN TECHNICAL SPECIFICATION. 2008. Plastics piping systems - Validated design parameters of buried thermoplastics piping systems.
- DIN 1072: GERMAN STANDARD. 1985. Road and foot bridges; design loads.
- EN 1295-1: EUROPEAN STANDARD. 1997. Structural design of buried pipelines under various conditions of loading - Part 1: General requirements.
- EN 1610: EUROPEAN STANDARD. 1997. Construction and testing of drains and sewers.
- EN 12889: EUROPEAN STANDARD. 2000. Trenchless construction and testing of drains and sewers.
- Jones, G. M. A. 1988. "Flexible Pipe Design and Installation", Paper submitted to 7<sup>th</sup> Plastics Pipes Conference Association, Bath
- Montgomery e Runger 2002. Applied Statistics and Probability for Engineers. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-20454-4, 706 p.
- Önorm B 5012-2: AUSTRIA STANDARD. 1995. Structural design of buried water and sewerage pipelines for housing and industry – Load assumptions, method of calculation.
- Spangler, M.G. 1941. "The Structural Design of Flexible Pipe Culverts," Bulletin 153. Iowa State College, Ames, Iowa
- William R.; Whidden, P.E. (Editors). 2009. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 119. Buried Flexible Steel Pipe, Design and Structural Analysis. American Society of Civil Engineers.

---

<sup>6</sup>: Embora se tenham usado, no presente estudo, níveis correspondentes a situações limite, de forma a evidenciar o efeito dos respetivos fatores, convém referir que não é possível obter uma classe de compactação moderada ou boa usando terrenos granulares pouco densos ou orgânicos moles como material de enchimento no aterro de valas, pelo que estes nunca devem ser usados. No caso de terrenos granulares densos e muito densos ou orgânicos duros e muito duros, pode-se conseguir uma boa compactação (com densidades Proctor entre 91 e 100%). Em terrenos granulares medianamente densos, densos e muito densos e orgânicos firmes, duros e muito duros, pode-se conseguir também uma classe de compactação moderada (com densidades Proctor entre 81 e 97%).