



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

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

Luís Eduardo Pimentel Real
Investigador Auxiliar, LNEC

LISBOA • 2017

COMUNICAÇÕES
COM 155

REAL, Luís Pimentel
Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia Química
Departamento de Edifícios

Comunicação apresentada no Congresso Nacional "CNME2016 – 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental", realizado em Lisboa, outubro, 2016

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I.P.
Divisão de Divulgação Científica e Técnica
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA
e-e: livraria@lnec.pt
www.lnec.pt

Editor: LNEC

Coleção: Comunicações

Série: COM 155

1.ª edição: 2017

Tiragem: 100 exemplares

Descritores:: Tubo de plástico / Conduta enterrada / Deformação a longo prazo / Análise estatística / Simulação
Descriptors: Plastic pipe / Buried piping / Long-term deformation / Statistical analysis / Simulation

CDU 691.175-462:539.37/.38:519.2
ISBN 978-972-49-2291-1

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

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

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

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.

Keywords: Buried Piping / Rigidity / Compaction degree / Long-term deformation / Calculus and simulation / Design of experiments / Principal component analysis / Factor analysis / Statistical methods

Índice

1	Introdução	1
2	Fatores de instalação	1
3	Cálculo estrutural da instalação	1
4	Simulação.....	4
5	Análise dos resultados	5
6	Conclusões.....	9
	Referências Bibliográficas	10
	ANEXO (Slides da Comunicação).....	13

Índice de figuras

Figura 5.1 – Gráficos de avaliação dos efeitos significativos obtidos no planeamento 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	6
Figura 5.2 – Gráficos de comportamento dos valores residuais obtidos na análise de variâncias (Minitab Inc.)	7
Figura 5.3 – Gráfico de efeitos de cada fator na variável de resposta ΔD_v	7
Figura 5.4 – Gráfico de efeitos de interações de fatores na variável de resposta ΔD_v (a vermelho: níveis altos; a azul: níveis baixos)	8

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Valores do fator de distribuição de carga, b_1 , para vários valores do ângulo de apoio do tubo no leito de assentamento, 2α [CEN/TR 1295-2, 2005].....	2
Quadro 3.2 – Módulo de rigidez ER (em kN/m^2) do material de enchimento em função do tipo de solo e da densidade Proctor (classificação simplificada [CEN/TR 1295-2, 2005]).....	2
Quadro 3.3 – Cargas de tráfego (DIN 1072 1985).....	3
Quadro 4.1 – Fatores utilizados no planeamento de experiências a dois níveis (alto e baixo).....	5
Quadro 5.1 – Valores dos fatores utilizados no planeamento de experiências a dois níveis, do tipo 2IV8-4, sem replicados (fracionamento 1/16).....	6
Quadro 5.2 – Maiores valores de F obtidos na análise de variância e respetivos fatores	7
Quadro 5.3 – Resultados obtidos pelo método dos componentes principais	8
Quadro 5.4 – Resultados obtidos pelo método da análise de fatores	9

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

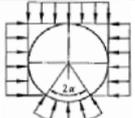
Para o cálculo da resistência mecânica de tubagens enterradas sob diferentes condições de carga recorreu-se, no presente estudo, à metodologia baseada fundamentalmente em dois métodos reconhecidos e amplamente testados, sugeridos nas normas alemã ATV-DVWK-A 127E-2000 e austríaca ONORM B 5012-2-1995, calculando a deformação vertical sofrida pelo tubo, ΔD_v , sob condições de instalação específicas (William e Whidden, 2009).

A deformação vertical ΔD_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 ΔD_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 kN/m^2), P_t a carga de trânsito por roda (em kN/m^2), b_1 o fator de distribuição de carga (Quadro 3.1), RCE a rigidez circunferencial específica calculada sobre o diâmetro (em kN/m^2), e E_R é o módulo de rigidez do terreno (em kN/m^2), o qual depende do tipo de solo e respetivo grau de compactação (Quadro 3.2).

Quadro 3.1 – Valores do fator de distribuição de carga, b_1 , para vários valores do ângulo de apoio do tubo no leito de assentamento, 2α [CEN/TR 1295-2, 2005]

	Angulo de apoio, 2α (°)	60	90	120	180
	b_1		0,1053	0,0966	0,0893

Quadro 3.2 – Módulo de rigidez E_R (em 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 kN/m^2), ou, em alternativa, pode ser calculado pela seguinte expressão:

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

em que E é o módulo de elasticidade do material do tubo (em kN/m^2), I é o momento de inércia (em cm^4/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 $H > 0,5 \text{ m}$:

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

em que P_T é a carga de trânsito (em kN/m^2), T é a carga esperada por roda (retirada do Quadro 3.3), 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).

Quadro 3.3 – 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^2), S_c é o coeficiente de correção da carga do solo e ρ é a massa volúmica do solo em (kN/m^3) (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 ($K \approx 0,5$), θ é o ângulo de atrito entre o enchimento e as paredes da vala (em $^\circ$) 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 (θ) depende do ângulo de atrito do material de enchimento (δ , em $^\circ$) (ATV 2000). O ângulo de atrito entre o enchimento e a parede da vala (θ) 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 θ 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 ensaio¹.

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 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 no Quadro 4.1. O fator c da Eq. 1 foi definido para as condições mais desfavoráveis, que corresponde a compactações moderadas com baixa altura de recobrimento ($c=2$).

¹: 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.

Quadro 4.1 – Fatores utilizados no planejamento de experiências a dois níveis (alto e baixo)

Fator	Valor
<i>RCE</i> (rigidez circunferencial do tubo)	2 kN/m ² e 16 kN/m ²
<i>B</i> (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)
<i>H</i> (profundidade da vala), que depende do diâmetro do tubo, das cargas fixas e móveis e do declive	2 m e 6 m
θ (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° , conforme o tipo de terreno, considerando enchimento compactado por camadas contra o solo natural, com verificação do grau de compactação (D)
<i>TT</i> (Tipo de terreno do material de enchimento)	— 6 (escombros, solo não coesivo do grupo 1) — 12 (argila e calcário orgânicos, solo coesivo com misturas do grupo 3)
<i>E_R</i> (módulo de rigidez do solo), que depende do grau de compactação GC	— para 85% e 100% de densidade Proctor
<i>T</i> (carga do tráfego por roda)	— 0 kN (sem tráfego) — 100 kN (tráfego pesado)
<i>b1</i> (fator de distribuição de carga, que depende do ângulo de apoio)	0,1053 (para 60°) e 0,0966 (para 180°)

5 | Análise dos resultados

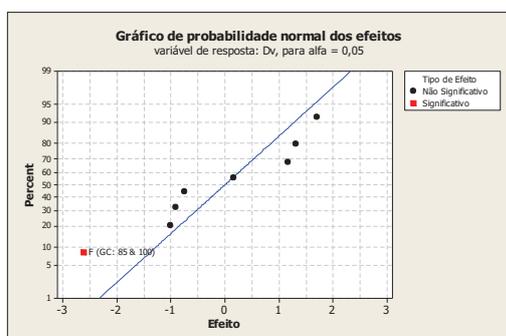
No Quadro 5.1 apresentam-se os valores dos fatores usados no planejamento fracionado de resolução IV², no qual os efeitos principais não estão confundidos com outros efeitos principais ou com interações de dois fatores, pois apenas as interações de dois fatores estão confundidas entre si. Os geradores usados foram E=BCD, F=ACD, G= ABC e H=ABD. Na figura 5.1 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.

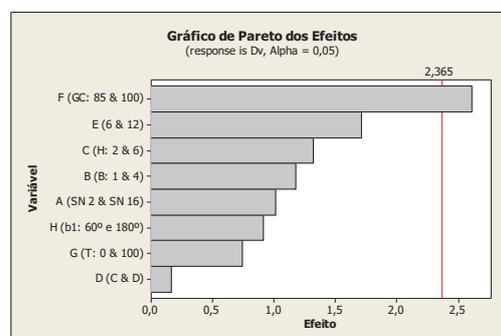
²: Um desenho diz-se de resolução R se não existir nenhum efeito de p fatores confundido com outro efeito contendo menos que R-p fatores.

Quadro 5.1 – Valores dos fatores utilizados no planeamento de experiências a dois níveis, do tipo 2IV8-4, sem replicados (fracionamento 1/16)

RCE	B	H	θ	TT	GC	T	b1	ΔDv
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 5.1 – Gráficos de avaliação dos efeitos significativos obtidos no planeamento de experiências a dois níveis, do tipo 2IV8-4, 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, no Quadro 5.2 apresentam-se os maiores valores do fator F^3 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 ΔDv , 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.

³: 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, Dv).

Quadro 5.2 – Maiores valores de F obtidos na análise de variância e respectivos 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 5.2, 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.

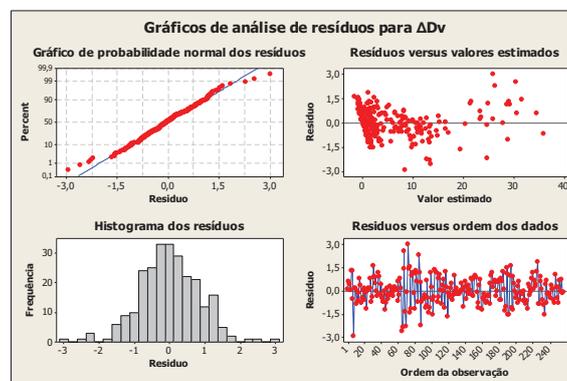


Figura 5.2 – Gráficos de comportamento dos valores residuais obtidos na análise de variâncias (Minitab Inc.)

Por fim, nas figuras 5.3 e 5.4 apresentam-se os gráficos de efeitos dos fatores e das interações de fatores, respetivamente, na variável de resposta ΔDv .

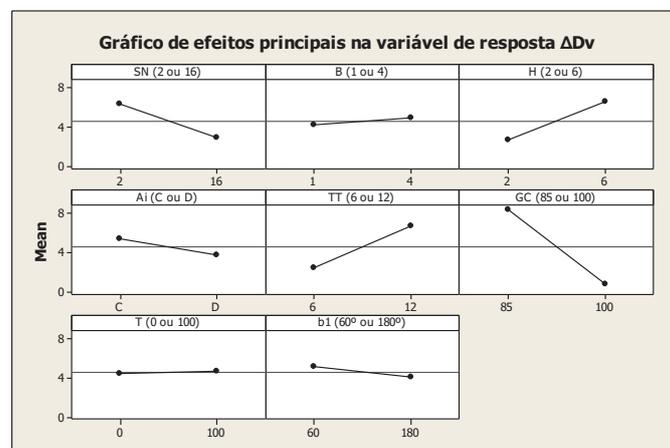


Figura 5.3 – Gráfico de efeitos de cada fator na variável de resposta ΔDv

Como os efeitos dos fatores são tanto maiores quanto maior for o declive das respectivas retas, a figura 5.3 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!

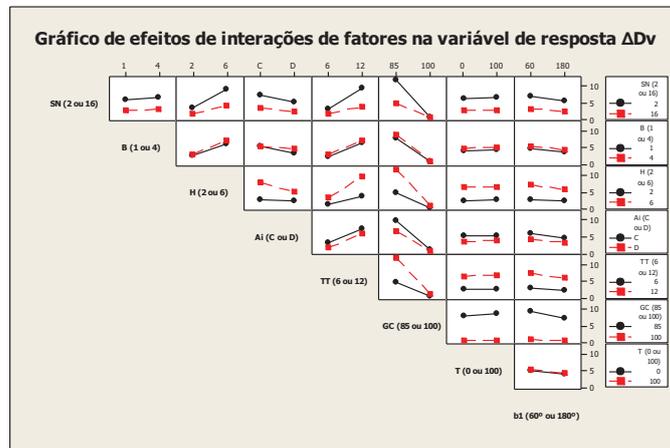


Figura 5.4 – Gráfico de efeitos de interações de fatores na variável de resposta ΔDv (a vermelho: níveis altos; a azul: níveis baixos)

Também se confirma, a partir da figura 5.4, 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 (Quadro 5.3), 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 ΔDv), 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.

Quadro 5.3 – 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
ΔDv	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

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.

A aplicação do método de análise de fatores aos 256 resultados da simulação (Quadro 5.4), permite confirmar as conclusões obtidas através da aplicação dos dois métodos estatísticos anteriormente referidos, pois a variável de resposta ΔDv só apresenta variabilidade no fator 1 e GC é a variável que mais contribui para essa variabilidade.

Quadro 5.4 – 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
ΔDv	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 aterro⁴. 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.

⁴: A classificação do tipo de solos consta do documento normativo CEN/TR 1046:2013

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 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 compactados⁵, com um valor mínimo de 95% Proctor.

Referências Bibliográficas

- 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/>, acedido em abril de 2016.
- CEN/TR 1046: 2013 – **Thermoplastics piping and ducting systems - Systems outside building structures for the conveyance of water or sewage - Practices for underground installation**.
- CEN/TR 1295 – **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: 2008 – **Plastics piping systems - Validated design parameters of buried thermoplastics piping systems**.
- DIN 1072: 1985 – **Road and foot bridges; design loads**.

⁵: 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%).

EN 1295-1: 1997 – **Structural design of buried pipelines under various conditions of loading - Part 1: General requirements.**

EN 1610: 1997 – **Construction and testing of drains and sewers.**

EN 12889: 2000 – **Trenchless construction and testing of drains and sewers.**

JONES, G. M. A., 1988 – **Flexible Pipe Design and Installation**, Paper submitted to 7th 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: 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.

ANEXO
(Slides da Comunicação)

cnme 2016

10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental

Lisboa • LNEC • 12 a 14 de outubro de 2016

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

Luís E. Pimentel Real

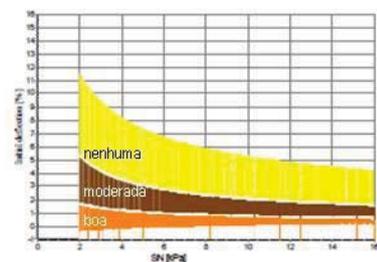
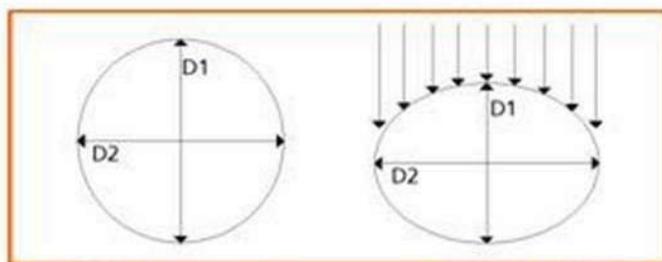
ZNEC
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

APAET

OBJETIVO



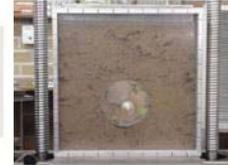
Para assegurar a instalação de tubagem enterrada com boa qualidade, o valor da deformação vertical, não deverá ultrapassar 5% do diâmetro exterior do mesmo (para um período de 50 anos).



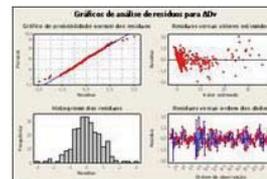
ABORDAGEM AO PROBLEMA

Como conhecer os efeitos que mais influência exercem na deformação da tubagem a longo prazo?

1) Medição da deformação das tubagens, em instalações tipo, fazendo variar os parâmetros de instalação (criando diversos casos de estudo).



2) Simulação e avaliação dos cálculos com recurso a métodos estatísticos.



CNME2016 | 3

ABORDAGEM

- 1) Nº de fatores a controlar elevado
- 2) Nº de ensaios a realizar aos solos elevado



Custo elevado



- ✓ Planeamento prévio de experiências para reduzir o nº de fatores (DOE fracionado)
- ✓ Simulação e avaliação dos cálculos com recurso a métodos estatísticos: DOE, método dos componentes principais ou análise de fatores.



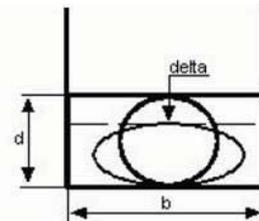
CNME2016 | 4

FATORES DE INSTALAÇÃO

cnme 2016

Fatores que que influenciam a deformação final dos tubos:

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



CÁLCULO ESTRUTURAL DA INSTALAÇÃO

cnme 2016

CT 164 & CT 165

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 (AU, BE, DK, FR, GER, NE, NO, SW, UK);

Part 3 (2007): Common method (AU, GER);

Part 4 (2015): Parameters for reliability of the design.

Portugal: métodos reconhecidos e amplamente testados, sugeridos nas normas alemã ATV-DVWK-A 127E-2000 e austríaca ONORM B 5012-2-1995

CÁLCULO ESTRUTURAL

cnme 2016

Metodologia de cálculo da deformação vertical sofrida pelo tubo, ΔD_v , sob condições de instalação específicas (fórmula de Spangler ou de Iowa modificada)

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

- ✓ c : 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 : carga vertical do solo (em kN/m^2)
- ✓ P_t : carga de trânsito por roda (em kN/m^2)
- ✓ b_1 : fator de distribuição de carga (Tabela 1)
- ✓ RCE : rigidez circunferencial específica calculada sobre o diâmetro (em kN/m^2)
- ✓ E_R : módulo de rigidez do terreno (em kN/m^2), o qual depende do tipo de solo e respetivo grau de compactação (Tabela 2).



CÁLCULO ESTRUTURAL

cnme 2016

Tabela 1 – Valores de b_1 para vários valores do ângulo de apoio do tubo no leito de assentamento, 2α [CEN/TR 1295-2, 2005]

Angulo de apoio, 2α (°)	60	90	120	180
b_1	0,1053	0,0966	0,0893	0,0833

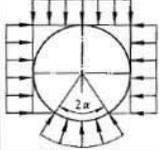


Tabela 2 – E_R do material de enchimento em função do tipo de solo e da densidade Proctor (classificação simplificada [CEN/TR 1295-2, 2005])

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



CÁLCULO ESTRUTURAL

cnme 2016

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

ou classificações mínimas normalizadas (SNI, em que $i=1,25; 2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 16$ ou 32 kN/m^2)

- ✓ E : módulo de elasticidade do material do tubo (em kN/m^2)
- ✓ I : momento de inércia (em cm^4/cm)
- ✓ D : diâmetro exterior médio do tubo (em cm) = $2R$
- ✓ e : a espessura equivalente do tubo (em cm)

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

- ✓ P_T : carga de trânsito que atua no plano tangente à geratriz superior da tubagem (em kN/m^2)
- ✓ T : carga esperada por roda (retirada da tabela 3)

- ✓ H : profundidade da vala, medida desde a superfície do terreno até à geratriz superior do tubo (em m)
- ✓ X : 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).



CNME2016 | 9

CÁLCULO ESTRUTURAL

cnme 2016

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

$$P_s = S_c \times \rho \times H$$

P_s : carga vertical do solo em (kN/m^2), numa vala de paredes verticais

S_c : coeficiente de correção da carga do solo

P : massa volúmica do solo em (kN/m^3)



CNME2016 | 10

CÁLCULO ESTRUTURAL

cnme 2016

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

- ✓ θ : ângulo de atrito entre o enchimento e as paredes da vala (em °)
- ✓ B : largura da vala (em m).

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

K : relação entre os esforços horizontais e verticais existentes no material de enchimento da vala (pressões lateral e vertical do solo, $K \approx 0,5$)

- ✓ O ângulo de fricção efetivo entre as terras de enchimento e a parede da vala (θ) depende do ângulo de atrito do material de enchimento (δ , em °) (ATV 2000).
- ✓ O ângulo de atrito entre o enchimento e a parede da vala (θ) 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 θ um valor nulo, tem-se $S_c = 1$.



CNME2016 | 11

SIMULAÇÃO

cnme 2016

planeamento DOE:

- ✓ tipo fatorial fracionado
- ✓ tipo fatorial completo

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).

O planeamento DOE: do tipo fatorial fracionado a 2 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), 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.



CNME2016 | 12

SIMULAÇÃO

cnme 2016

☐ fatorial fracionado

Os fatores significativos estão confundidos com interações de várias ordens de outros fatores

✓ Interpretação mais trabalhosa

✓ Requer, numa segunda fase, que os desenhos fatoriais fracionados sejam projetados em fatoriais mais fortes para o subconjunto de fatores significativos.

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 a potencialidade do método fracionado.



CNME2016 | 13

SIMULAÇÃO

cnme 2016

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

Fator	Valor
RCE (rigidez circunferencial do tubo)	2 kN/m ² e 16 kN/m ²
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
θ (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° , 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 (escombros, 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°) e 0,0966 (para 180°)

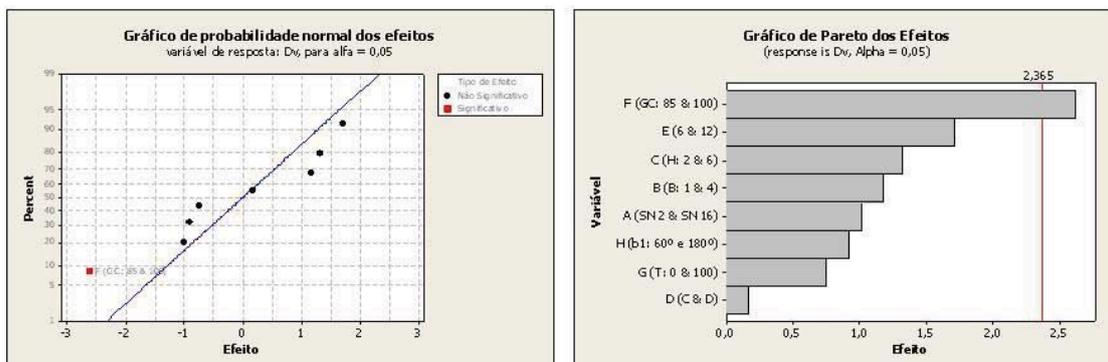


CNME2016 | 14

RESULTADOS (DOE)

cnme 2016

Gráficos de avaliação dos efeitos significativos, para um nível de confiança de 95%



Planeamento fatorial fracionado:

- ✓ nº de respostas muito reduzido (16)
- ✓ possibilidade de interações de dois fatores estarem confundidas (mascaradas) entre si
- ✓ fiabilidade dos resultados é bastante inferior à que se obtém mediante um planeamento fatorial completo, sem replicados.

Geradores: E=BCD, F=ACD, G= ABC e H=ABD



CNME2016 | 15

RESULTADOS (DOE)

cnme 2016

Planeamento fatorial completo:

- ✓ nº de respostas elevado (256)
- ✓ conduz a um número proibitivo ensaios, mas não tem limitações em cálculo e simulação
- ✓ sem efeitos confundidos
- ✓ fiabilidade dos resultados muito superior à que se obtém mediante um planeamento fatorial fracionado.

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

1. Confirma o resultado do planeamento fatorial fracionado
2. Revela outros efeitos que embora sejam menos significativos também contribuem para a variabilidade do fator de resposta ΔDv :
 - ✓ tipo de terreno usado no enchimento
 - ✓ classe de rigidez do tubo
 - ✓ interações entre o grau de compactação e o tipo de terreno e a classe de rigidez



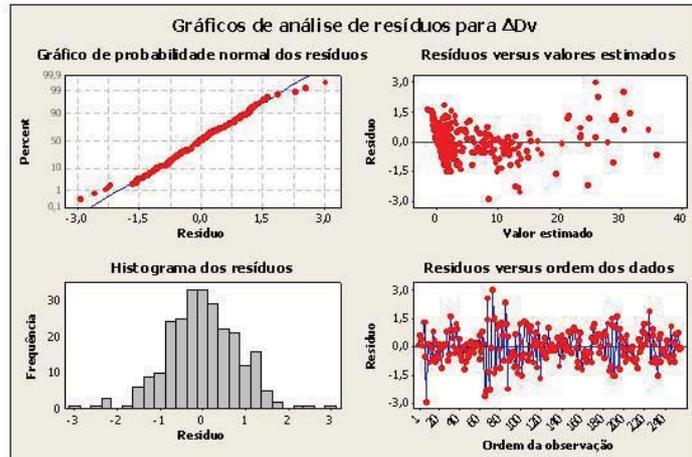
CNME2016 | 16

RESULTADOS (DOE)

cnme 2016

Análise dos resíduos: permite confirmar a fiabilidade da análise de variância

- ✓ os valores residuais encontram-se dispersos ao longo de uma linha reta e o histograma segue uma curva de Gauss (distribuição normal dos resíduos)
- ✓ os valores residuais encontram-se dispersos e a distribuição dos resíduos dá-se segundo um padrão aleatório (independência dos valores residuais)

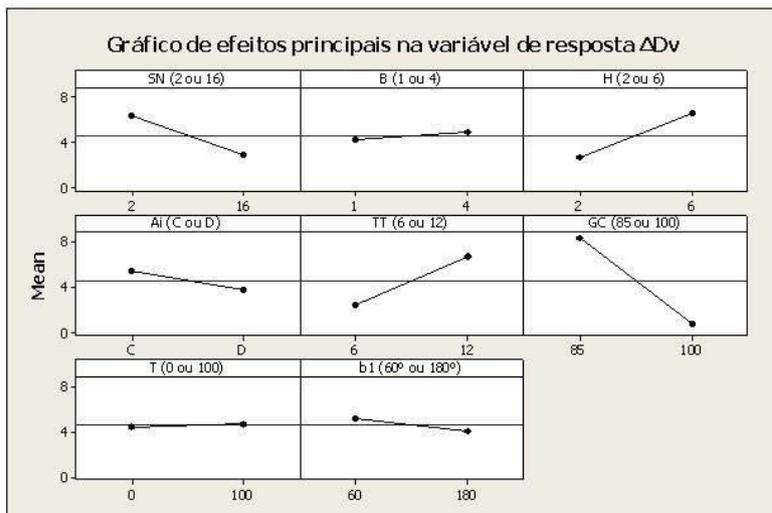


CNME2016 | 17

RESULTADOS (DOE)

cnme 2016

Gráfico de efeitos dos fatores na variável de resposta ΔD_v



- ✓ 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!

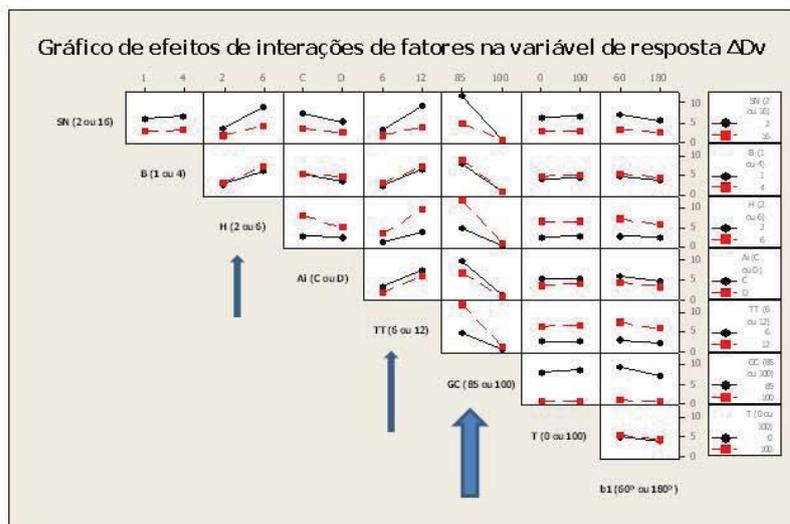


CNME2016 | 18

RESULTADOS (DOE)

cnme 2016

Gráfico das interações de fatores na variável de resposta ΔD_v



- ✓ 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.

RESULTADOS (MCP)

cnme 2016

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
ΔD_v	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

RESULTADOS (MAF)

cnme 2016

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
ΔDv	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



CNME2016 | 21

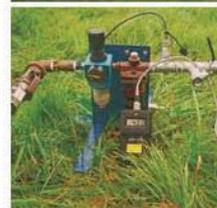
CONCLUSÕES

cnme 2016

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

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:

1. as cargas resultantes do tráfego não são determinantes para a deflexão de um tubo flexível enterrado
2. a deformação da tubagem depende fundamentalmente da qualidade da instalação (dependente da rigidez do material de enchimento e do seu grau de compactação)



CNME2016 | 22

CONCLUSÕES

cnme
2016

A metodologia adotada no presente estudo permite chegar a conclusões equivalentes às obtidas mediante ensaios em laboratório e medições no terreno.



1. Demonstra que o método de cálculo estrutural adotado é adequado e fiável para avaliar a deformação de tubagem enterrada
2. Evidencia a importância da utilização de métodos estatísticos de simulação, os quais conduzem a resultados similares aos obtidos através de medições e ensaios no terreno e em laboratório, mas em muito menos tempo e praticamente sem custos.



CNME2016 | 23

CONCLUSÕES

cnme
2016

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, com um valor mínimo de 95% Proctor.



CNME2016 | 24

FIM

cnme
2016

Obrigado pela vossa atenção!



LNK
LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

APAET

CNME2016 | 25

