

# Chaminés industriais de alvenaria de tijolo

*Características geométricas, mecânicas e materiais*

**João M. Guedes** | NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edifício e Património | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | [jguedes@fe.up.pt](mailto:jguedes@fe.up.pt)

**Valter Lopes** | NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edifício e Património | [valter.lopes@ncrep.pt](mailto:valter.lopes@ncrep.pt)

**Bruno Quelhas** | NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edifício e Património | [bruno.quelhas@ncrep.pt](mailto:bruno.quelhas@ncrep.pt)

**Alexandre Costa** | NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edifício e Património | [alexandre.costa@ncrep.pt](mailto:alexandre.costa@ncrep.pt)

**Tiago Ilharco** | NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edifício e Património | [tiago.ilharco@ncrep.pt](mailto:tiago.ilharco@ncrep.pt)

**Filipe Coelho** | NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edifício e Património | [filipe.coelho@ncrep.pt](mailto:filipe.coelho@ncrep.pt)

## Introdução

Um grande número de chaminés fabris de alvenaria, símbolos do período industrial situa-se em antigas zonas industriais, outrora localizadas fora dos centros urbanos. Com o crescimento das cidades é frequente estas zonas encontrarem-se agora próximas de edifícios de habitação ou serviços, podendo colocar em causa a segurança de pessoas e bens. Tal situação exige a realização de inspeções e diagnósticos prévios que permitam a recolha de informação essencial à verificação das condições de segurança estrutural destas chaminés [1]. Neste artigo apresentam-se as características geométricas e mecânicas (estáticas e dinâmicas) de um conjunto de chaminés industriais inspeccionadas pelo NCREP, Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda., e analisam-se correlações entre esses parâmetros.

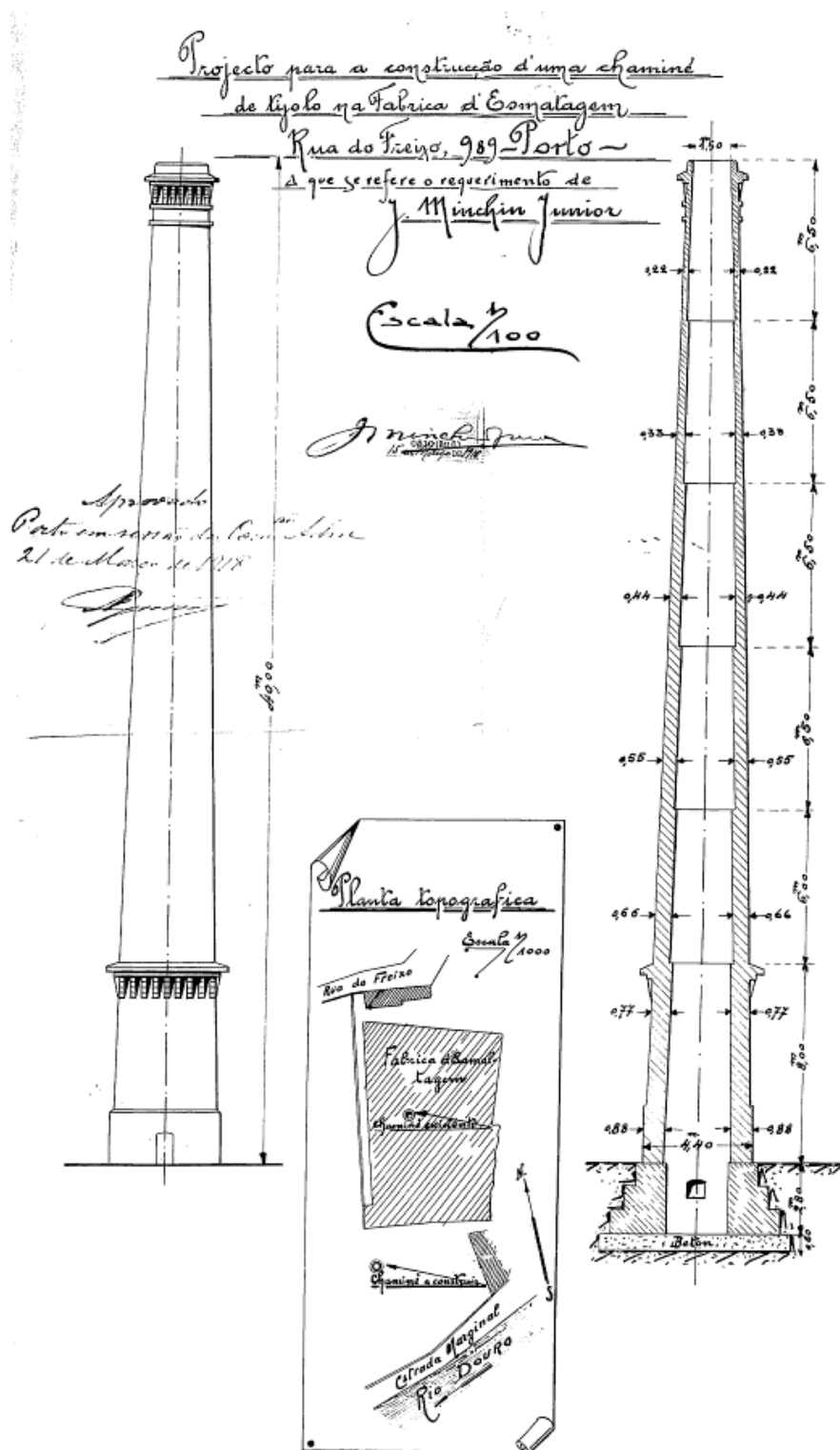
### Características geométricas e construtivas

A grande maioria das chaminés industriais é construída em alvenaria de tijolo cerâmico; apresenta uma grande esbelteza e a sua estrutura divide-se em três partes: base, fuste e capitel.

A base, que nalgumas chaminés não existe, é o elemento inferior que se interpõe entre o fuste (corpo principal da chaminé) e a fundação. Este elemento prismático apresenta diferentes formas em planta: quadrangular, octogonal ou circular. A maioria das chaminés apresenta fustes tronco-cónicos, já que a forma circular oferece menor resistência à passagem do vento, uma das acções principais para as quais estas estruturas foram originalmente dimensionadas [2].

O capitel, que corresponde ao elemento de topo do fuste, apresenta uma função decorativa, podendo ser constituída por tijolos dispostos de forma distinta das da base e do fuste. A altura total das chaminés oscila habitualmente entre os 20 m e os 30 m. Chaminés com mais de 30m estão normalmente associadas a indústrias de maior importância (fig. 1).

Figura 1 | (a) Fotografia de uma chaminé com cerca de 45 m de altura; (b) Projeto de uma chaminé com 40 m de altura [3].



O corte transversal das chaminés apresenta secções vazadas de espessura constante que se estendem por troços de igual altura. Os troços inferiores são os mais largos e espessos, possuindo o maior número de alinhamentos de tijolos na espessura (tijolos dispostos na direcção radial “cosem” os diferentes alinhamentos). A transição entre dois troços sucessivos corresponde à diminuição da espessura da parede da chaminé de um tijolo (tijolo a meia vez), apresentando o troço mais alto, que inclui o capitel, a espessura de um ou dois tijolos (tijolo a meia ou uma vez) [3].

## Chaminés analisadas

### Características geométricas

Foram analisadas dez chaminés de alvenaria de tijolo cerâmico de fuste tronco-cónico e base (quando existe) quadrangular ou circular. Foram referenciadas pela designação **Ch** seguida de uma letra e um índice que indica a proveniência (**N** – Norte de Santarém; **S** – Sul de Santarém) e um número de ordem crescente de acordo com a sua altura total **H**. Para além deste parâmetro, o **quadro 1** apresenta, para cada chaminé, a largura **L** da base, o diâmetro **D** do fuste junto à base, a espessura **tb** das paredes da base, a espessura **tf** das paredes do fuste junto à base, a inclinação **i** do fuste e a esbelteza  $\lambda$  calculada pelo cociente  $H / [\max(L \text{ e } D)]$ .

### Relação entre características geométricas

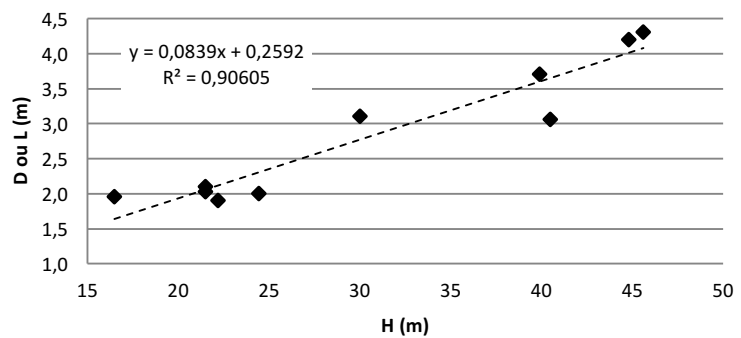
Os dados do **quadro 1** mostram que a inclinação **i** do fuste é pouco variável, apresentando nestes casos valores entre 1,8% e 2,5%. Por outro lado, mostram que existe uma relação clara entre a altura **H** e a dimensão da chaminé junto a fundação, **L** ou **D**, e que se reflecte numa esbelteza que varia entre aproximadamente 9 e 13 (**gráfico 1**).

O **gráfico 2** mostra que existe também uma relação bastante linear entre o diâmetro **D** e a espessura das paredes do fuste **tf**. Esta relação expressa a consideração de critérios relativamente uniformes no dimensionamento destas estruturas: a estabilidade de uma chaminé era garantida impondo que a força resultante reactiva da estrutura actuada pela acção do vento caía dentro do terço central de todas as secções transversais, assegurando a compressão integral da alvenaria.

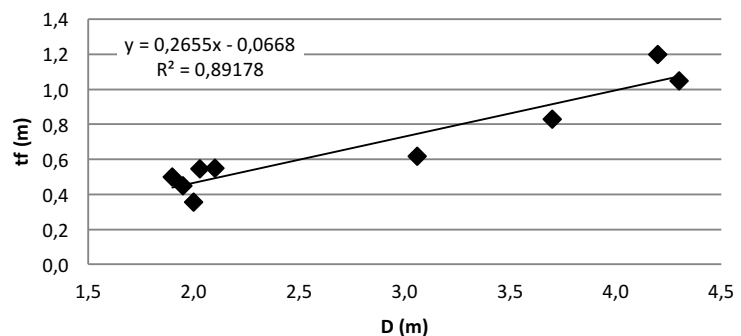
**Quadro 1.** Características geométricas das chaminés industriais analisadas

Chaminés	H (m)	L (m)	D (m)	tb (m)	tf (m)	i (%)	$\lambda$
Ch_N1	16,50	-	1,95	0,45	0,45	3,20	8,46
Ch_N2	21,50	-	2,10	-	0,55	2,44	10,20
Ch_N3	21,50	2,40	2,03	0,83	0,55	2,05	8,96
Ch_N4	22,20	2,00	1,90	0,65	0,50	2,14	11,00
Ch_S1	24,45	2,05	2,00	0,48	0,36	1,84	11,90
Ch_N5	30,00	-	3,10	-	-	2,33	9,70
Ch_N6	39,90	-	3,70	-	0,83	2,55	11,00
Ch_S2	40,50	-	3,06	-	0,62	2,09	13,20
Ch_N7	44,81	-	4,20	-	1,20	2,09	11,20
Ch_N8	45,60	-	4,30	-	1,05	2,14	10,50

**Gráfico 1** | Relação entre a altura **H** e a dimensão da chaminé junto a fundação, **D** (ou **L**)



**Gráfico 2** | Relação entre o diâmetro **D** e a espessura **tf** na base do fuste.





## Características dinâmicas e materiais

Os módulos de elasticidade da alvenaria de tijolo cerâmico das diferentes chaminés, com excepção da CH\_N7, foram estimados através da calibração de modelos numéricos com base em identificação dinâmica *in situ*. Nalguns casos foi apenas identificada a frequência do primeiro modo de vibração em duas direcções, tal como se apresenta no **quadro 2**. O mesmo quadro apresenta os valores médios estimados para o módulo de elasticidade das chaminés identificadas, entre cerca de 1,5GPa e 5,0GPa, e que se encontram dentro da gama de valores expectáveis para uma alvenaria de tijolo cerâmico [4].

A análise destes valores indicia poder existir uma correlação entre as características geométricas da base do fuste e a primeira frequência própria de vibração medida. De facto, foi possível relacionar essa frequência com a raiz quadrada do cociente entre a rigidez,  $EI/H^3$ , e a massa,  $\rho AH$ , da estrutura, sendo  $I$  e  $A$  a inércia e a área da secção transversal da estrutura, e  $E$  e  $\rho$  o módulo de elasticidade e a massa volúmica do material, respectivamente. Assim, utilizando a secção da base do fuste tronco-cónico como referência, determinou-se a correlação entre a 1ª frequência das chaminés e o parâmetro  $\alpha$  de características meramente geométricas:

$$\alpha = K \cdot [(R^2 + R_o^2)^{(1/2)}] / (2 \cdot H^2) \quad (1)$$

Sendo  $R$  e  $R_o$  os raios externos e internos da secção da base do fuste, respectivamente, e  $K$  um valor que representa a raiz quadrada da relação  $(E/\rho)$ . O **gráfico 3** apresenta a correlação entre  $\alpha$  (assumindo  $K = 10^3$  m/s) e a frequência média  $f$  do 1º modo de vibração horizontal medido nas duas direcções ortogonais X e Y. O caso Ch\_N4 (assinalado no gráfico com o losango vazio) não foi considerado no cálculo da correlação por ser o único dos 9 casos que não seguia esta tendência.

Faz-se notar que os valores dos módulos de elasticidade  $E$  identificados permitem ainda estimar a qualidade, ou o estado de degradação das alvenarias de tijolo cerâmico, em particular a sua resistência através da relação regulamentar [5]:

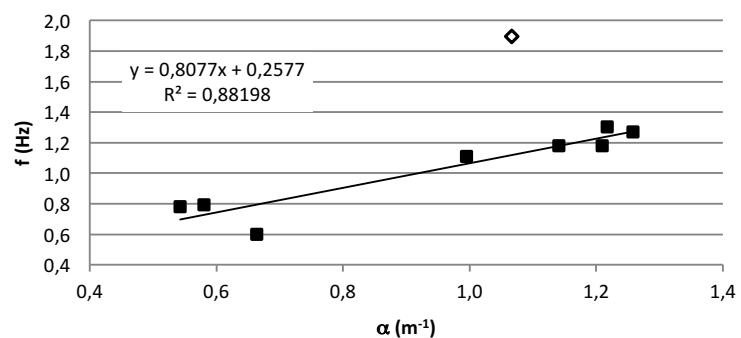
$$\sigma_{td} = E/R/\gamma \quad (2)$$

sendo  $R$  um parâmetro variável entre 700 e 1000 e  $\gamma = 2,5$  o factor de segurança.

**Quadro 2.** Frequências naturais de vibração medidas *in-situ* e módulos de elasticidade estimados por calibração de modelos numéricos.

Chaminés	f1-x (Hz)	f1-y (Hz)	f2-x (Hz)	f2-y (Hz)	f3-x (Hz)	f3-y (Hz)	E (GPa)
Ch_N1	1,360	1,640	5,680	6,000	-	-	1,75
Ch_N2	1,220	1,320	-	-	-	-	2,30
Ch_N3	1,130	1,230	3,280	3,280	7,680	7,780	1,54
Ch_N4	1,840	1,950	6,460	6,870	-	-	4,87
Ch_S1	1,040	1,180	-	-	-	-	3,00
Ch_N5	1,300	1,300	4,600	4,900	-	-	-
Ch_N6	0,592	0,608	1,878	1,956	4,318	4,532	1,53
Ch_S2	0,780	0,780	-	-	-	-	5,05
Ch_N8	0,790	0,790	-	-	-	-	4,70

**Gráfico 3** | Relação entre o parâmetro geométrico  $\alpha$  e frequência média do 1º modo de vibração  $f$ .



## Considerações finais

Da análise destes elementos concluiu-se existirem correlações entre a altura, diâmetro e espessura das paredes das chaminés, e que essas características geométricas se correlacionavam com a primeira frequência de vibração própria das chaminés. Foi ainda estimada a deformabilidade das alvenarias através de procedimentos de identificação dinâmica e a sua capacidade resistente utilizando relações lineares simples regulamentares ■

### NOTAS

1. ICOMOS (2004). *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico do ICOMOS*, ICOMOS.

2. Lopes, V. (2009). *Identificação Mecânica e Avaliação do Comportamento Sísmico de Chaminés em Alvenaria*. Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto.

3. Costa, A., Ornelas, C., Guedes, J., Paupério, E. (2014). *Chaminés de Alvenaria de Tijolo - Sistema Construtivo de Chaminés para Fábricas no Porto entre os Séculos XIX e XX*, Anuário do Património 2014, Canto Redondo, Lisboa.

4. Kaushik, H. B., Rai, D. C., and Jain, S. K. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 728-739.

5. EN 1996-1-1. 2005. Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. CEN Central Secretariat, Brussels, Belgium.