

QUESTÕES DE SEGURANÇA

Safety issues

António Silva Cardoso*

RESUMO – O presente artigo tem por objetivo ampliar o estudo das incertezas que afetam os comportamentos estruturais, em particular, os das estruturas geotécnicas, através da incorporação de outras fontes de incerteza para além das que são consideradas pela fiabilidade estrutural tradicional. Essas fontes são as que estão associadas aos comportamentos humanos e são as que, na maior parte das situações, constituem a causa mais frequente dos incidentes e acidentes estruturais. Em consequência ressaltam-se as limitações do âmbito das metodologias de fiabilidade estrutural tradicionais e a necessidade de alargar esse âmbito de forma a entrar em linha de conta com outro tipo de incertezas que não são aí tidas em consideração. Nessa linha de atuação exploram-se as diversas perspetivas de abordagem do erro humano e abrem-se pistas metodológicas para a sua modelação. Finalmente, abordam-se os aspetos do comportamento humano que condicionam a qualidade das previsões de custos e de procura, introduzindo-se as linhas gerais de uma metodologia de elaboração de previsões que procura tornar esses condicionalismos.

ABSTRACT – This article aims to expand the study of uncertainties that affect the structural behaviour, in particular, that of geotechnical structures, through the incorporation of other sources of uncertainty besides those that are considered by traditional structural reliability. These sources are those which are associated with human behaviour and are the ones that, in most situations, are the most frequent cause of incidents and accidents. Consequently, the limitations of the scope of traditional structural reliability methodologies are pointed out and the need is stressed to extend this framework to take into account other uncertainties which traditionally are not considered. In this line of action the different approaches to human error in industrial systems are explained and avenues for their modelling are opened up. Finally, the aspects of human behaviour that affect the quality of the forecasts of cost and demand are discussed and the fundamentals of a methodology for forecasting that seek to circumvent those constraints are introduced.

PALAVRAS CHAVE – Fiabilidade, fatores humanos, imprecisão nas previsões de custos e benefícios.

1 – INTRODUÇÃO

O autor do presente artigo, conjuntamente com outros colegas, tem vindo a refletir sobre a problemática da segurança das estruturas geotécnicas (Matos Fernandes *et al.*, 1997; Cardoso *et al.*, 1999; Cardoso e Matos Fernandes, 2001; Cardoso, 2002 e 2004). Essa reflexão tem passado por várias áreas do domínio científico que, globalmente, se pode designar por fiabilidade estrutural. Ultimamente o âmbito da reflexão alargou-se também à análise de risco em obras geotécnicas (Cardoso e Topa Gomes, 2010).

O presente artigo tem por objetivo ampliar o estudo das incertezas que afetam os comportamentos estruturais, em particular, os das estruturas geotécnicas, através da incorporação de outras fontes de incerteza para além das que são consideradas pela fiabilidade estrutural tradicional. Essas fontes são as que estão associadas aos comportamentos humanos e são as que, na maior parte das situações, constituem a causa mais frequente dos incidentes e acidentes estruturais.

* Professor, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. E-mail: scardoso@fe.up.pt

Ainda assim, entendeu-se ser adequado começar o artigo por um apontamento sobre o que se considera ser o maior condicionamento da adesão à realidade das previsões que resultam da aplicação das metodologias da fiabilidade estrutural à geotecnia. Está-se obviamente a falar da dificuldade de caracterização experimental das propriedades dos terrenos com a precisão necessária à obtenção de valores mais ou menos precisos da probabilidade de ocorrência de comportamentos deficientes.

Em seguida chama-se a atenção para o papel decisivo dos comportamentos humanos nos níveis de incerteza que afetam as estruturas, o que, aliás, acontece de forma generalizada noutras atividades. Podem, então, compreender-se as limitações de âmbito da fiabilidade estrutural e a necessidade de alargar esse âmbito de forma a entrar em linha de conta com outro tipo de incertezas que não são aí tidas em consideração.

A secção seguinte está dedicada à explanação de diversas perspetivas de abordagem do erro humano. Abrem-se também pistas metodológicas para a sua modelação.

A última secção versa igualmente sobre um assunto que tem a ver com os fatores humanos, isto é, está centrado nos aspetos do comportamento humano que condicionam a qualidade das previsões de custos e benefícios, introduzindo-se as linhas gerais de uma metodologia de elaboração de previsões que procura tornear esses condicionalismos. Num primeiro olhar, este assunto pode parecer ter pouco a ver com a segurança; todavia, numa análise mais profunda, revela possuir grande capacidade para introduzir importantes fatores condicionantes da segurança, vista numa perspetiva global. Com efeito, as imprecisões nas previsões de custos e de procura que suportaram a decisão para se avançar com certa construção, se atingirem certo nível podem contribuir muito significativamente para a criação de um ambiente pouco propício à segurança, quer no decurso da construção, quer durante o período operacional.

2 – NOTAS SOBRE FIABILIDADE ESTRUTURAL

2.1 – Preâmbulo

Na presente secção procura-se mostrar que nas obras geotécnicas os valores que se estimam para a probabilidade de rotura são decisivamente condicionados pela forma da distribuição probabilística da capacidade resistente. Face a essa demonstração discute-se a possibilidade de, em situações usuais da prática comum, se conseguir caracterizar aquela distribuição com a suficiente precisão, ajustada aos níveis que são exigidos para a referida probabilidade.

2.2 – Dificuldades na definição dos modelos probabilísticos

Num texto apresentado no 8º Congresso Nacional de Geotecnia (Cardoso, 2002) discutiu-se a influência do tipo de distribuição na probabilidade de rotura. Para tal usaram-se os conceitos de fiabilidade ou confiança e de probabilidade de rotura, complementar do anterior. Dado um sistema com capacidade resistente caracterizada pela variável aleatória R, sujeito ao efeito das ações aleatório E, designa-se por fiabilidade ou confiança, P_c , à probabilidade de E ser menor do que ou igual a R. Se E e R forem variáveis independentes, a probabilidade de rotura é definida por (Benjamim e Cornell, 1970):

$$P_f = 1 - P_c = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) dr - \int_{-\infty}^{\infty} F_E(r) f_R(r) dr = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F_E(r)] f_R(r) dr \quad (1)$$

f_R é a função de densidade de probabilidade da variável R e F_E a função de distribuição acumulada da variável E. Na Fig. 1 apresenta-se graficamente o valor da probabilidade de rotura de acordo com a expressão anterior, ou seja, a área limitada pela função $[1 - F_E(r)] f_R(r)$.

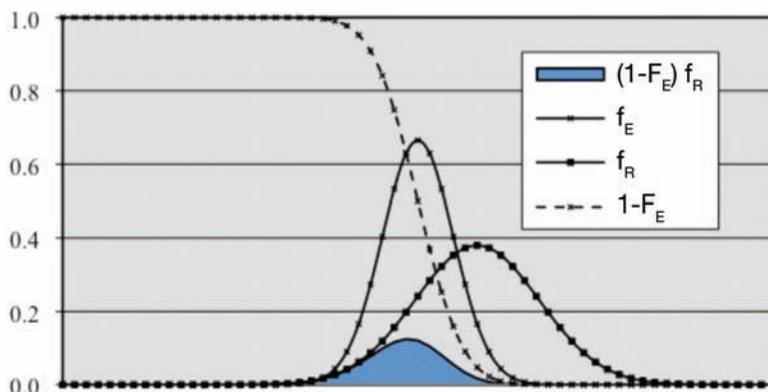


Fig. 1 – Representação gráfica do valor da probabilidade de rotura dadas as funções probabilísticas das variáveis E e R.

Note-se que quando o termo $[1 - F_E(r)]$ tem um valor elevado, o termo $f_R(r)$ é próximo de zero (lado esquerdo); quando este último possui uma grandeza significativa, o primeiro é próximo de zero (lado direito). Significa isto que as parcelas que mais contribuem para o valor do integral da expressão (1), isto é, para a probabilidade de rotura, são as que se situam na zona intermédia, onde nenhum dos dois termos é demasiado pequeno, como se vê na Fig. 1.

Tendo em vista apreciar a influência do tipo de distribuição no valor da probabilidade de rotura, admitiu-se que ambas as variáveis exibissem distribuições normais ou lognormais equivalentes e procedeu-se à resolução numérica do integral da expressão (1) para as seguintes 4 hipóteses: 1ª) E e R com distribuição normal; 2ª) E e R com distribuições lognormal e normal, respetivamente; 3ª) E e R com distribuição lognormal; 4ª) E e R com distribuições normal e lognormal, respetivamente. A resolução foi feita por tentativas de modo a obter-se probabilidades fixas de 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} e 10^{-4} para o caso de as duas variáveis se distribuírem normalmente. Usaram-se 3 pares de valores diversos para os coeficientes de variação das duas variáveis.

No Quadro 1 apresentam-se os resultados obtidos, isto é, o valor da razão entre a probabilidade de rotura em cada uma das hipóteses (quanto ao tipo de distribuição) e a probabilidade calculada quando se admitem ambas as variáveis normais. Consta-se que:

- se a probabilidade de rotura for muito elevada (10^{-1}) o tipo de distribuição é irrelevante;
- o tipo de distribuição do efeito das ações só afeta com algum significado a probabilidade de rotura (aumenta se a distribuição for lognormal) quando o respetivo coeficiente de variação é semelhante (ou superior) ao da capacidade resistente e tanto mais quanto menor for a probabilidade de rotura alvo; note-se que, na grande maioria das obras geotécnicas, o coeficiente de variação do efeito das ações é menor, por vezes, muito menor, do que o coeficiente de variação da capacidade resistente; tal pode não acontecer quase exclusivamente no caso de fundações de edificações predominantemente sujeitas a ações variáveis;
- a probabilidade de rotura é decisivamente afetada pelo tipo de distribuição da capacidade resistente para as probabilidades de rotura usualmente exigíveis (10^{-3} e 10^{-4}) e tanto mais quanto maior for o respetivo coeficiente de variação; com efeito, se a distribuição da capacidade resistente for lognormal, a probabilidade de rotura pode, em alguns casos, diminuir de uma ou mesmo de duas ordens de grandeza.

Em suma, em obras geotécnicas, nas quais, usualmente, predominam as incertezas associadas às capacidades resistentes dos terrenos, e em situações de dimensionamento correntes, a que corres-

pondem probabilidades de rotura da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} , estas são afetadas pelo tipo de distribuição dessas capacidades. A probabilidade de rotura diminui se as distribuições forem lognormais visto que a cauda “esquerda” da distribuição lognormal é menos alongada do que a da distribuição normal.

Quadro 1 – Variação da probabilidade de rotura em relação ao caso em que ambas as variáveis são normalmente distribuídas.

Variáveis com distribuição normal					Razão $P_{F-D/D} / P_{F-N/N}$ (sendo $D/D = LN/N, LN/LN$ ou N/LN)		
V_E	V_R	$FS_m = R_m/E_m$	$FS_k = R_k/E_k$	$P_{F-N/N}$	E-Lognorm. R-Norm.	E-Lognorm. R-Lognorm.	E-Norm. R-Lognorm.
0,1	0,1	1,20	0,86	10^{-1}	101%	98%	97%
0,067	0,1	1,17	0,88		100%	96%	95%
0,1	0,15	1,28	0,83		100%	92%	92%
0,1	0,1	1,40	1,01	10^{-2}	112%	85%	71%
0,067	0,1	1,35	1,02		104%	66%	61%
0,1	0,15	1,61	1,04		104%	45%	41%
0,1	0,1	1,58	1,13	10^{-3}	127%	62%	39%
0,067	0,1	1,51	1,14		107%	32%	27%
0,1	0,15	1,96	1,27		105%	10%	7%
0,1	0,1	1,75	1,26	10^{-4}	142%	37%	15%
0,067	0,1	1,67	1,26		110%	11%	8%
0,1	0,15	2,38	1,55		106%	< 1%	< 1%

Ora é precisamente o maior alongamento da cauda “esquerda” da distribuição normal que justifica as maiores probabilidades de rotura que lhe estão associadas. De facto, ao ser mais alongada para o lado referido, os valores do termo $[1 - F_E(r)]$ que lhe correspondem são mais elevados do que no caso da distribuição lognormal. Conclui-se, assim, que sendo desejável que a probabilidade de rotura possua um valor baixo (em geral, inferior a 10^{-3}), um aspeto determinante desse valor é a forma da cauda “esquerda” da distribuição da capacidade resistente.

2.3 – Probabilidade de rotura e valor característico da capacidade resistente

O quantil de ordem 5% é frequentemente usado para definir o valor característico, R_k , da capacidade resistente, no caso presente. Considere-se também os quantis de ordem 1% e 0,1%, definidos de modo equivalente. A Fig. 2 ilustra a relação entre P_f e os quantis de ordem 5% (R_k), 1% e 0,1%, supondo que ambas as variáveis, capacidade resistente e efeito das ações, se distribuem normalmente com coeficientes de variação, respetivamente, iguais a 0,10 e 0,15. No caso representado na Fig. 2, constata-se que:

- para probabilidades de rotura elevadas, da ordem de 10^{-1} , os valores da capacidade resistente que afetam P_f distribuem-se em torno do valor característico (R_k , quantil de ordem 5%);
- para probabilidades da ordem dos 10^{-2} os valores da capacidade resistente que afetam P_f distribuem-se em torno do quantil de ordem 1%;
- para probabilidades da ordem de grandeza das geralmente usadas no dimensionamento geotécnico (iguais ou menores do que 10^{-3}) os valores da capacidade resistente que interferem são muito inferiores a R_k , distribuem-se em torno do quantil de ordem 0,1% ou menor.

Foram testados outros valores para os coeficientes de variação tendo-se chegado a resultados semelhantes. Portanto, para se obter previsões credíveis dos níveis da probabilidade de rotura considerados usuais no dimensionamento geotécnico há que dispor da caracterização da capacidade resistente em torno dos valores do quantil de ordem 0,1%.

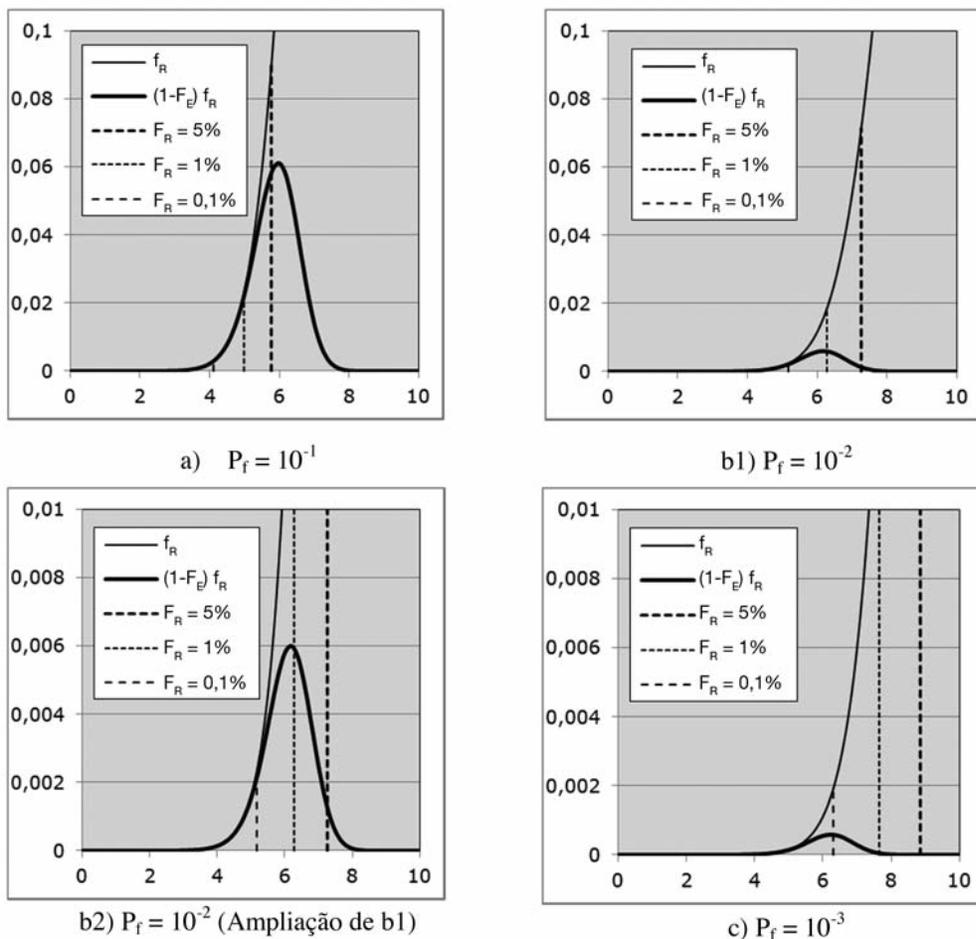


Fig. 2 – Relação entre a probabilidade de rotura e os quantis de ordem 5% (valor característico), 1% e 0,1% da capacidade resistente.

2.4 – Caracterização das variáveis primárias através de resultados experimentais

Branco (2011) levou a cabo um largo conjunto de ensaios de corte direto, entre outros, tendo como objetivo caracterizar a variabilidade natural de um solo residual do granito do Porto. Foram selecionados 10 locais relativamente próximos uns dos outros e, para cada local, foram realizados 4 ensaios com as seguintes tensões normais: 25, 50, 75 e 100 kPa. No Quadro 2 mostram-se os resultados obtidos.

Dispõe-se, portanto, de um conjunto de dimensão inusual – 40 ensaios – de resultados de caracterização mecânica de um solo. Na Fig. 3 faz-se a representação gráfica desses resultados. Como é de esperar, a relação resistência máxima / tensão normal diminui com o aumento do confinamento; os coeficientes de variação são da ordem dos 0,11 a 0,15, valores que se podem considerar usuais.

Por sua vez, a relação resistência a volume constante / tensão normal é praticamente independente do confinamento, sendo o correspondente coeficiente de variação da ordem dos 0,07.

Quadro 2 – Resultados, em termos de tensão resistente de corte / tensão normal, dos ensaios de corte direto de um solo residual de granito do Porto (Branco, 2011).

Tensão normal (kPa)	Resistências máximas				Resistências a volume constante			
	25	50	75	100	25	50	75	100
Conjunto 1	1,349	1,058	1,018	0,985	0,820	0,819	0,759	0,735
Conjunto 2	1,150	1,104	1,247	0,852	0,899	0,791	0,919	0,761
Conjunto 3	1,211	1,234	1,106	0,844	0,738	0,784	0,763	0,655
Conjunto 4	1,092	1,296	1,031	0,947	0,694	0,814	0,795	0,790
Conjunto 5	0,894	1,220	0,802	0,839	0,875	0,850	0,802	0,712
Conjunto 6	1,079	1,082	0,862	1,042	0,873	0,799	0,793	0,771
Conjunto 7	1,198	1,131	1,075	0,831	0,723	0,775	0,785	0,661
Conjunto 8	1,084	0,996	1,008	1,037	0,834	0,765	0,777	0,801
Conjunto 9	0,853	0,870	1,137	0,802	0,853	0,726	0,840	0,745
Conjunto 10	1,357	0,899	0,831	1,025	0,801	0,787	0,766	0,741
Média	1,127	1,089	1,012	0,920	0,811	0,791	0,800	0,737
Desvio padrão	0,166	0,140	0,143	0,096	0,071	0,034	0,048	0,049
Coeficiente variação	0,148	0,129	0,141	0,105	0,087	0,042	0,060	0,067
					Média global			0,785
					Desvio padrão global			0,058
					Coef. variação global			0,073

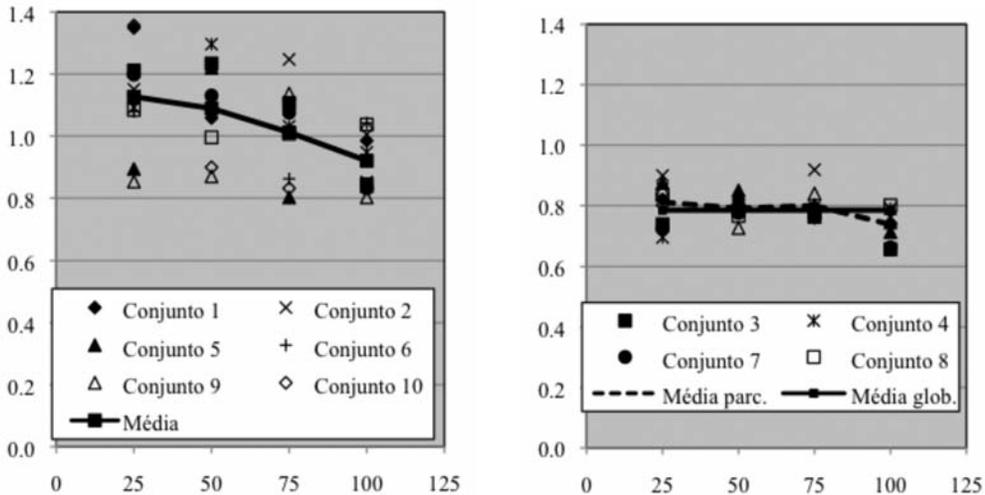


Fig. 3 – Resultados dos ensaios de corte direto (diagramas tensão normal versus resistência ao corte sobre tensão normal, σ_n ; τ/σ_n): a) resistências máximas; b) resistências a volume constante.

A amostra de 40 valores da relação τ/σ_n (sendo τ a resistência a volume constante) do solo está tratada estatisticamente na Fig. 4. Na figura estão também representadas as distribuições estatísticas

normal e lognormal, com o valor médio e o desvio padrão indicados no Quadro 2 (valores globais) e os quantis de ordem 0,1%, 1%, 5% (valor característico) e 95% da distribuição normal. Com se pode ver no Quadro 3 os valores dos referidos quantis da distribuição lognormal são razoavelmente semelhantes aos da distribuição normal.

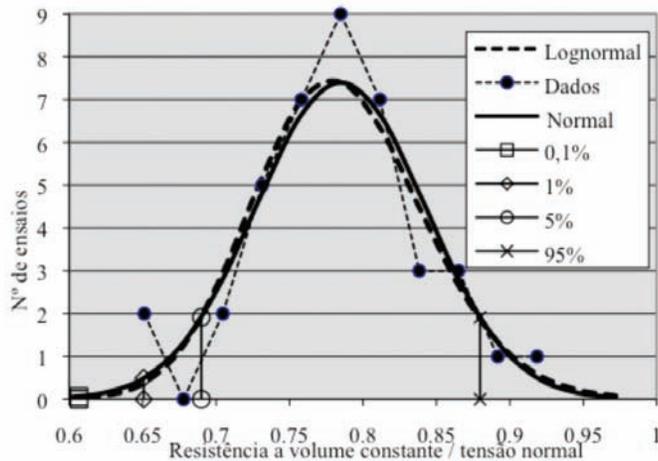


Fig. 4 – Distribuição dos resultados dos 40 ensaios de corte direto (τ/σ_n , τ resistência a volume constante) e distribuições normal e lognormal definidas pelos parâmetros estatísticos da amostra.

Quadro 3 – Comparação dos valores dos quantis de ordem 0,1%, 1%, 5% e 95% das distribuições normal e lognormal equivalente.

Quantil de ordem	Normal	Lognormal
0,1%	0,607	0,624
1%	0,651	0,660
5%	0,690	0,694
95%	0,880	0,883

É, então, possível concluir o seguinte:

- os dados experimentais são bem caracterizados tanto pela distribuição normal como pela lognormal;
- há resultados experimentais que se situam entre os quantis de ordem 1% e 5%, por um lado, e 95% e 99%, por um outro; em qualquer dos casos há dois valores que se situam nesses intervalos, o que está de acordo com o que seria de esperar visto que $2 / 40 = 5\%$;
- todavia não há nenhum valor experimental no intervalo entre os quantis 0,1% e 1%, o que também não é de estranhar dado que, para que razoavelmente tal pudesse acontecer, a amostra deveria ter uma dimensão da ordem de 100;
- obviamente que a ocorrência de valores experimentais inferiores ao quantil de ordem 0,1% exige amostras com tamanho superior a 100; relembre-se que, como se mostrou em 2.3, a possibilidade de elaboração de previsões credíveis para níveis da probabilidade de rotura considerados usuais no dimensionamento geotécnico depende de que se disponha da caracterização da capacidade resistente em torno dos valores do quantil de ordem 0,1%.

Em suma, apesar da dimensão inusual da amostra subsiste a dificuldade de caracterização da cauda “esquerda” da distribuição da resistência.

2.5 – Distribuição probabilística das variáveis secundárias

Como se salientou rigorosamente em 2.2, a forma da cauda “esquerda” da distribuição da capacidade resistente afeta de forma determinante o valor da probabilidade de rotura.

Nas metodologias analíticas de avaliação da segurança, as variáveis primárias (ações, resistências, dimensões, etc.) são caracterizadas experimental (como se ilustrou em 2.4) ou regulamentarmente, derivando-se a partir destas as variáveis secundárias (efeitos das ações e capacidades resistentes), em cuja comparação – através de diversos processos – se baseia a verificação da segurança. Conhecidas as distribuições probabilísticas das variáveis primárias, as distribuições das variáveis secundárias (tendo em vista a avaliação da probabilidade de rotura) podem ser obtidas ou inferidas de diversos modos, mais ou menos complexos (através da caracterização dos valores médios e dos desvios padrão, através de métodos de simulação tipo Monte Carlo, etc.). A descrição desses métodos sai fora do âmbito do presente artigo.

Para ilustrar de um modo simples, através de um exemplo, a relação entre as distribuições das variáveis primárias e as das variáveis secundárias, considere-se a capacidade de carga de uma fundação direta contínua (bidimensional) em condições drenadas. Seleciona-se este problema porque é dos que, no âmbito da geotecnia, apresenta uma não linearidade mais acentuada.

$$q_u = q_0 N_q + 0,5 B \gamma N_\gamma \quad \text{com} \quad N_q = e^{\pi \tan \varnothing} \tan^2 (45 + \varnothing/2) \quad \text{e} \quad N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varnothing \quad (2)$$

Admitindo que a fundação assenta na superfície do terreno ($q_0 = 0$) tem-se:

$$q_u / 0,5 B \gamma = N_\gamma \quad (3)$$

O estudo da função de densidade de probabilidade da variável secundária, N_γ , segue os passos subsequentes:

- admite-se para a variável primária, ϕ , uma distribuição normal;
- como a função $N_\gamma(\phi)$ é continuamente crescente adota-se o método proposto por Benjamim e Cornell (1970) para obter a distribuição da variável secundária; esse método, que está descrito na Fig. 5, baseia-se no facto de, nas condições referidas, a função de densidade de probabilidade de N_γ , $f_{N_\gamma} = f_Y$, obedecer à seguinte condição: $f_{N_\gamma} = f_Y = f_X \frac{dx}{dy}$ ($f_X = f_\phi$);
- de posse da função f_{N_γ} é trivial calcular os respetivos valor médio, $N_{\gamma m}$, e desvio padrão, σ_{N_γ} ;
- dispondo-se do valor médio e do desvio padrão testa-se a forma da distribuição, comparando-a com a distribuição lognormal.

Os cálculos foram efetuados admitindo para o ângulo de atrito um valor médio de 30° e para o coeficiente de variação 3 hipóteses: 0,10, 0,15 e 0,20. A Fig. 6 mostra os resultados obtidos; em todos os 3 casos apresenta-se um pormenor das figuras de modo a tornar mais claro o andamento das distribuições até aos valores correspondentes ao quantil de 5%.

Constata-se que a distribuição de N_γ é quase exatamente lognormal para valores do coeficiente de variação V_ϕ menores ou iguais a 0,15; quando V_ϕ assume valores maiores ou iguais a 0,20, a distribuição da variável secundária afasta-se um tanto da lognormal, tanto mais quanto maior for aquele valor.

A grande maioria das vezes não se dispõe da distribuição das variáveis primárias, mas apenas dos seus parâmetros estatísticos fundamentais, os valores médios e os coeficientes de variação (ou

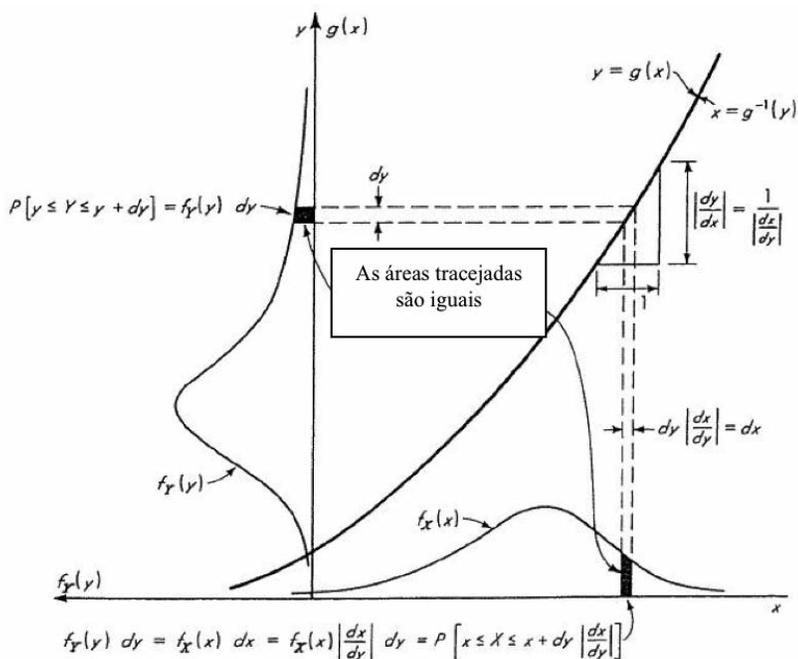


Fig. 5 – Obtenção da função de densidade de probabilidade da variável secundária, y , a partir da distribuição da variável primária, x , e da função $y = g(x)$.

os desvios padrão). Considere-se, então, uma variável dependente de diversas variáveis primárias, $y = g(x_i)$. Aproximando esta função por um polinómio definido por uma série de Taylor centrada nos valores médios das variáveis X_{mi} , cada termo da série afeta os valores da média, Y_m , e do desvio padrão, σ_Y , mas, se a não linearidade da função e a aleatoriedade das variáveis primárias não forem muito acentuadas, os dois primeiros termos da série são suficientes para se obter estimativas razoáveis daqueles dois valores através das seguintes expressões (ver, por exemplo, Cardoso, 2002):

$$Y_{m-ap} \cong g(X_{mi}) \quad e \quad \sigma_{Y-ap} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i} \right)_{X_{mi}} \sigma_{X_i} \right]^2} \quad (4)$$

No caso presente, em que, por simplicidade, se considerou haver uma única variável primária, as estimativas do valor médio, $N_{\gamma m-ap}$, e do desvio padrão, $\sigma_{N_{\gamma-ap}}$, são feitas pelas equações:

$$N_{\gamma m-ap} \cong N_{\gamma}(\phi_m) \quad e \quad \sigma_{N_{\gamma-ap}} = \left(\frac{dN_{\gamma}}{d\phi} \right)_{\phi_m} \sigma_{\phi} \quad (5)$$

Usando estes valores aproximados calculou-se a distribuição lognormal para cada um dos três casos em análise. Na Fig. 6 estão também representadas essas distribuições aproximadas. Verifica-se que, de uma forma geral, o ajuste é muito razoável, particularmente na zona que mais interessa para a mais precisa avaliação da probabilidade de rotura, a saber, a cauda “esquerda” das distribuições. Como é de esperar, o ajuste vai piorando à medida que aumenta o coeficiente de variação V_{ϕ} .

Se, à partida, se admitir uma distribuição lognormal para a variável primária chega-se a conclusões similares.

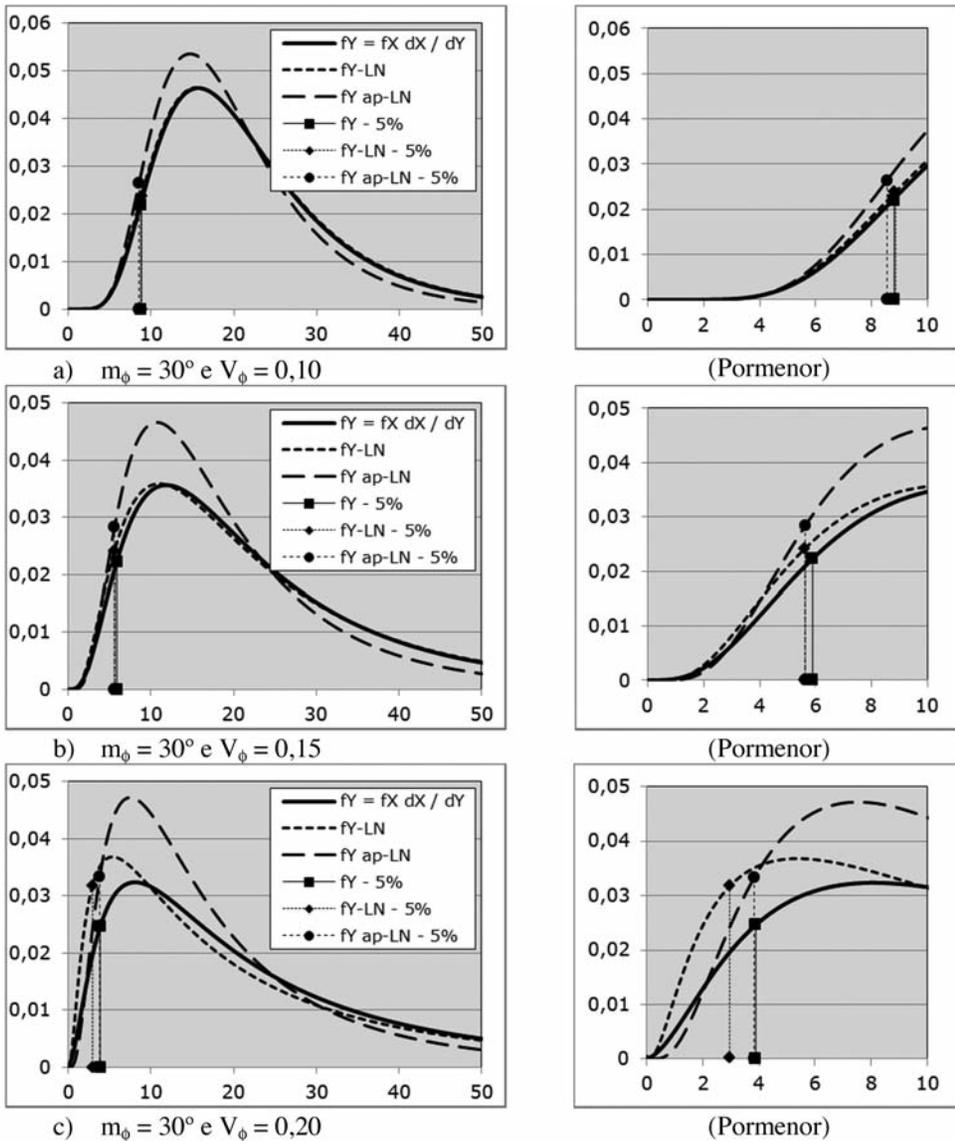


Fig. 6 – Função de densidade de probabilidade de N_r , sendo $m_\phi = 30^\circ$ e V_ϕ variável.

2.6 – Resumo

Na presente secção mostrou-se que:

- sendo desejável que a probabilidade de rotura possua um valor baixo (em geral, menor do que 10^{-3}), um aspeto determinante desse valor é a forma da cauda “esquerda” da distribuição da capacidade resistente;
- para se obterem previsões credíveis dos níveis da probabilidade de rotura considerados usuais no dimensionamento geotécnico há que dispor da caracterização da capacidade resistente em torno dos valores do quantil de ordem 0,1%;

- na caracterização experimental de parâmetros geotécnicos e, em particular, mecânicos, para se obterem valores inferiores ao quantil de ordem 0,1% é, em regra, necessário realizar um número de ensaios superior a 100; tal quantidade é completamente inusual, donde deriva a dificuldade, mesmo impossibilidade de caracterização experimental da cauda “esquerda” da distribuição da resistência (ver também Yao e Kawamura, 2001, e Madsen *et al.*, 2006);
- os parâmetros probabilísticos das variáveis secundárias, designadamente das capacidades resistentes, podem ser estimados com suficiente precisão através de expressões relativamente simples com base nos parâmetros correspondentes das variáveis primárias; tal é tanto mais certo quanto menos acentuadas forem a não linearidade da função de ligação da variável secundária com as primárias e a aleatoriedade destas últimas.

É, então, pertinente colocar-se a seguinte questão: sendo geralmente praticamente impossível definir experimentalmente a forma da cauda “esquerda” da distribuição da capacidade resistente e sendo, por outro lado, pouco diferentes os “miolos” (onde, em regra, se situam os valores experimentais disponíveis) das distribuições normal e lognormal, qual deve ser o tipo de distribuição que se pressupõe?

De um ponto de vista lógico, baseado na impossibilidade física de ocorrerem capacidades resistentes negativas, é-se conduzido à escolha da lognormal. Sem embargo, deve ter-se presente que a probabilidade de ocorrência desse tipo de valores inerente à forma da distribuição normal é, regra geral, pequeníssima.

Numa perspetiva racional, entende-se que, sendo possível, se deve estudar a forma da dependência das variáveis secundárias em relação às primárias e decidir em conformidade. Foi o que se procurou ilustrar no parágrafo 2.5, para o caso da capacidade de carga de sapatas corridas.

Como decorre do que se mostrou em 2.2, a opção por uma atitude prudente implica que deve ser selecionada a distribuição normal. Da consulta da bibliografia parece ao autor que esta é, efetivamente, a opção mais usual. No entanto, há autores que optam pela distribuição lognormal, como é o caso de Duncan (2000). Um documento do U. S. Army Corps of Engineers (1999) também se inclina pela distribuição lognormal, sem deixar de referir outras, como as distribuições normal, uniforme e beta, que podem ser aplicadas no domínio da geotecnia. Nesse documento salienta-se que, em regra, a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória é pressuposta, sendo a escolha condicionada pelo facto de certas distribuições tomarem os cálculos mais fáceis. De facto, em geral não se dispõe de dados suficientes para que se consiga provar inequivocamente que uma dada variável aleatória se ajusta a uma certa distribuição; como é sabido o mais que se consegue é testar a qualidade do ajuste entre o conjunto de dados disponíveis e uma ou mais distribuições candidatas, usando testes estatísticos, tais como os testes χ^2 e Kolmogorov-Smirnov.

A discussão anterior põe em relevo as dificuldades das análises de fiabilidade, não se devendo nunca tomar os valores que se obtêm pelo seu significado absoluto. Esta circunstância, torna, por outra parte, aconselhável que se mantenham os cálculos mais tradicionais baseados nos fatores de segurança. Seja como for, na linha do que defende Duncan (2000), considera-se que, sempre que possível, nas verificações da segurança, para além de se usar os fatores de segurança, se deve também procurar avaliar a probabilidade de rotura. De facto, com um pequeno esforço de cálculo adicional, o necessário à realização das análises de fiabilidade, obtém-se uma visão bastante mais profunda e completa da questão da segurança da estrutura em estudo.

3 – FIABILIDADE E FIABILIDADE ESTRUTURAL

3.1 – Preâmbulo. Prevalência dos erros humanos

Apesar de todos os potentes desenvolvimentos teóricos que tem experimentado (sendo que, na prática, a validade das suas previsões é condicionada pelas dificuldades de caracterização, como se

viu), na atualidade é perfeitamente reconhecido que a teoria da fiabilidade estrutural é insuficiente para interpretar o comportamento observado das estruturas reais. Com efeito, quando ocorrem colapsos estruturais em geral não é porque as solicitações tenham ultrapassado o que era suposto que as estruturas deveriam ser capazes de suportar, o que aponta para que as causas ou resultam de erros humanos ou derivam de ações excepcionais não previsíveis (Madsen *et al.*, 2006). Com efeito, o erro humano é provavelmente o fator que mais contribui para a ocorrência de danos materiais e pessoais e para a perda de vidas. O erro humano tem também um impacto significativo na qualidade, produtividade e, finalmente, nos resultados das empresas e atividades.

Matousek e Schneider (1976) concluíram que os colapsos estruturais quase sempre são causados por erros humanos grosseiros. O mesmo afirma Allen (1983) depois de ter feito um levantamento da bibliografia da especialidade. A maioria das estimativas indica que, na indústria da construção, 70 a 90% dos acidentes e incidentes são devidos a erros humanos (Vrouwenvelder *et al.*, 2009) cometidos:

- no decurso da elaboração dos projetos (erros conceptuais, má interpretação das regras, erros de cálculo, erros de *software*, erros dos desenhos);
- durante a construção (incumprimento ou tergiversação das especificações, má qualidade do trabalho humano, materiais de qualidade inferior);
- durante o período de uso (erros de operação, de inspeção, de manutenção e de remodelação / renovação).

Pelo seu lado Sowers (1993) realça também a importância dos fatores humanos na engenharia geotécnica. O estudo que efetuou de mais de 500 incidentes e acidentes em fundações, bem documentados, mostrou que a maioria (88%) foi devida a deficiências humanas; apenas 12% dos fracassos foram causados por falta de tecnologia. Sowers faz diversas sugestões para melhorar os fatores humanos, incluindo uma melhor educação, o reforço da aplicação das leis de controlo da prática da engenharia, o aumento da consciencialização dos engenheiros das suas limitações, a melhoria das comunicações e o desenvolvimento de adequados níveis de diligência, de cuidados e de responsabilidade. Na mesma linha, Veiga Pinto (2008) realça que, no domínio das barragens, 90% dos acidentes se devem ao fator humano.

O panorama traçado para a engenharia geotécnica e, em geral, para as atividades de construção também se verifica noutras indústrias ou setores de atividade. Estima-se que entre 90% e 95% dos acidentes e incidentes de aviação são provocados por fatores humanos. Estudos realizados no âmbito da indústria química conduzem a conclusões idênticas, como se constata observando o Quadro 4 (AICE, 1994). Por exemplo, o estudo realizado por Uehara e Hasegawa (1986) sobre incêndios ocorridos em instalações da indústria química japonesa entre 1968 e 1980 indica que, de um total de 120 acidentes, aproximadamente 45% foram atribuídos a erro humano. Se os projetos inadequados e os materiais impróprios forem também considerados erro humano, aquele número sobe para 58%. Esta percentagem não experimentou alteração significativa ao longo dos doze anos examinados.

Acrescendo a estes estudos formais de erro humano na indústria química, quase todas as investigações de acidentes graves nos últimos anos têm mostrado que o erro humano foi um fator causal significativo ao nível da conceção, da gestão dos processos ou das operações de manutenção (AICE, 1994).

3.2 – Inquérito sobre maus comportamentos estruturais na Grã-Bretanha

As instituições inglesas ICE (*Institution of Civil Engineers*) e IStructE (*Institution of Structural Engineers*) criaram em 1976 o SCOSS (*Standing Committee on Structural Safety*) dedicado à identificação e estudo dos fatores que afetam a segurança das estruturas. No âmbito do SCOSS em 2005

Quadro 4 – Estudos sobre o erro humano na indústria química (AICE, 1994).

Estudo	Resultados do estudo
Joschek (1981)	80-90% de todos os acidentes na indústria química devidos a erro humano
Rasmussen (1989)	Estudo de 190 acidentes em instalações da indústria química; as 4 causas principais foram: <ul style="list-style-type: none">• insuficiência de conhecimentos – 34%• erros de projeto – 32%• erros nos processos – 24%• erros do pessoal – 16%
Butikofer (1986)	Causas de acidentes em unidades petroquímicas e de refinação: <ul style="list-style-type: none">• falhas do projeto e dos equipamentos – 41%• falhas do pessoal e de manutenção – 41%• procedimentos inadequados – 11%• inspeção inadequada – 5%• outras – 2%
Uehara e Hasegawa (1986)	O erro humano foi responsável por 58% dos incêndios em refinarias; as causas foram as seguintes: <ul style="list-style-type: none">• outros erros – 27%• inspeções inadequadas – 19%• gestão inadequada – 12%• projetos inadequados – 12%• falhas na operação – 11%• materiais impróprios – 10%• reparações incorretas – 9%

foi lançada a iniciativa denominada CROSS (*Confidential Reporting on Structural Safety*), a qual visa contribuir para o melhoramento da segurança estrutural e para a redução das roturas através da recolha e tratamento de dados relativos a casos exemplares de comportamento estrutural deficiente. Os dados são recolhidos em relatórios confidenciais produzidos por membros das duas instituições acima indicadas nos quais se descrevem os comportamentos deficientes e se indicam as suas causas.

Num memorando recente (Soane, 2007), em que se resumem os resultados dos relatórios confidenciais recebidos até à data, os dados são agrupados em 3 categorias: preocupações relativas ao projeto, preocupações relativas à construção e preocupações relativas à operação. No Quadro 5 e na Fig. 7 dá-se conta dos resultados atuais da iniciativa CROSS. As razões mais apontadas nos inquéritos para justificar os maus comportamentos estruturais são:

- no âmbito dos projetos – principalmente deficiências de projeto, resultado de se ter ignorado certos princípios básicos, e, depois, dificuldades na assunção de responsabilidades e incumprimentos regulamentares; estas 3 razões envolvem mais de 70% das respostas;
- no que concerne às construções – as três principais razões, que em conjunto colhem mais de 60% das respostas, são o uso de materiais impróprios e a experiência e supervisão inadequadas;
- no tocante às fases operacionais – a distribuição das respostas pelos diversos fatores é muito repartida, sendo atribuída uma algo maior responsabilidade ao mau desempenho de componentes e às operações de remodelação e alteração.

Quadro 5 – Resumo dos resultado dos inquéritos CROSS sobre maus comportamentos estruturais (Soane, 2007).

Preocupações relativas ao projeto			
Deficiências de análise ou de projeto	37,4%	Responsabilidades não assumidas	18,9%
Incumprimento dos regulamentos	15,6%	Deficiências na verificação do projeto	9,4%
Escolha de materiais inadequados	9,3%	Problemas de <i>software</i>	3,2%
Riscos desproporcionados	3,1%	Investigações insuficientes	3,1%
Preocupações relativas à construção			
Materiais inadequados	21,4%	Experiência inadequada	21,1%
Supervisão inadequada	19,0%	Trabalhos temporários inseguros	12,8%
Responsabilidades pouco claras	10,6%	Qualidade da mão de obra	8,6%
Desenhos inadequados	2,2%	Outros	4,3%
Preocupações relativas à fase operacional			
Mau desempenho de componentes	17,3%	Remodelações e alterações	17,3%
Frequência das inspeções	13,6%	Falta de orientação do projeto original	10,7%
Mau tempo	10,3%	Falta de manutenção	10,1%
Corrosão	6,9%	Técnicas perigosas	6,9%
Efeitos dinâmicos	6,9%		

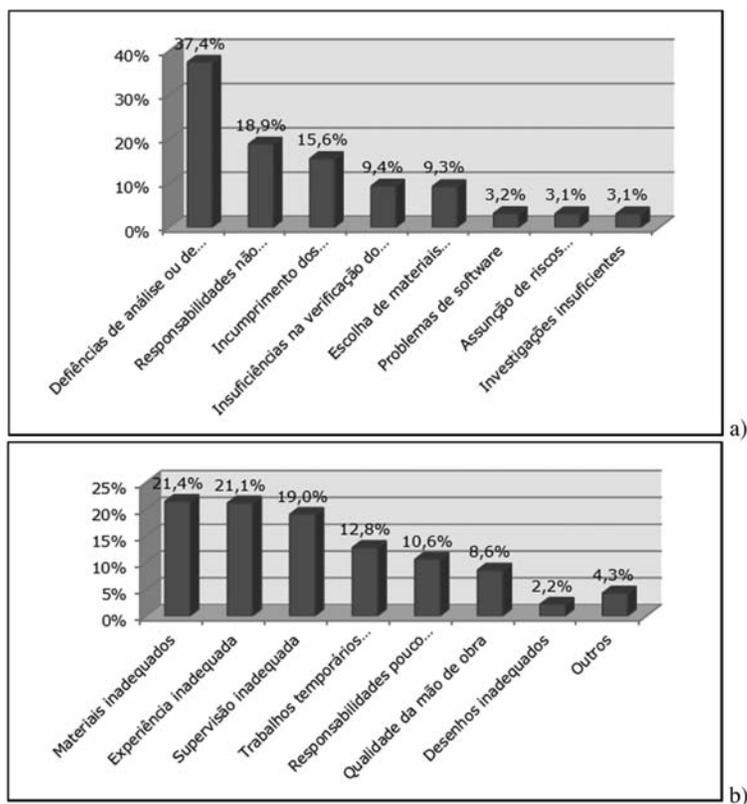


Fig. 7 – Razões dos maus comportamentos estruturais apontadas nos inquéritos CROSS: a) projeto; b) construção; c) fase operacional (adaptado de Soane, 2007).

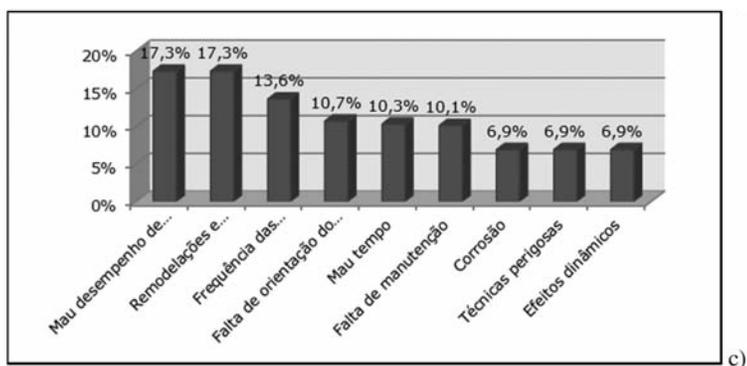


Fig. 7 (Cont.) – Razões dos maus comportamentos estruturais apontadas nos inquéritos CROSS: a) projeto; b) construção; c) fase operacional (adaptado de Soane, 2007).

3.3 – Ocorrência de erros

As inter-relações entre os humanos, as organizações, os sistemas, os procedimentos e os ambientes (interno e externo) estão esquematizadas na Fig. 8. Há possibilidade de ocorrência de erros em cada um dos setores primários (Bea, 1995):

- o dos indivíduos humanos (aos níveis do projeto, da construção e da operação / manutenção);
- o das organizações que afetam e condicionam os indivíduos;
- o dos sistemas / equipamentos (designado por “hardware”, em inglês);
- o dos procedimentos e respetiva tradução em manuais de uso dos sistemas (designado por “software”, em inglês);
- e, finalmente, o das condições ambientais internas e externas.

Ademais, há possibilidade de ocorrência de erros nas interfaces entre os indivíduos humanos e os restantes setores.

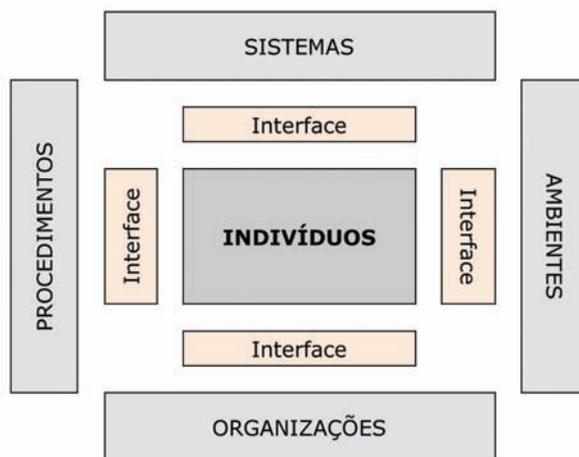


Fig. 8 – Componentes e interfaces que podem levar à ocorrência de erros humanos.

No livro “Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety” (AICE, 1994) são considerados os vários níveis de uma organização produtiva (empresa) e são enumerados os fatores que criam condições para a ocorrência de erros:

1) Nos níveis superiores da organização:

- a atitude, a nível da globalidade da instituição, em relação às questões de segurança e as prioridades da organização determinam a extensão dos recursos aplicados em questões de segurança, as quais, por vezes, estão em oposição aos objetivos da produção;
- a atitude em relação à culpa vai determinar ou não que a organização desenvolva uma cultura de culpa, que considera como causas dos erros fatores como a falta de motivação ou o comportamento inseguro deliberado;
- fatores tais como o grau de participação na organização e a qualidade da comunicação entre os diferentes níveis de gestão e os trabalhadores têm um grande impacto na cultura de segurança;
- a existência de políticas claras que garantam procedimentos e formação de boa qualidade tem também um grande impacto sobre a probabilidade de erro.

2) O nível seguinte representa as políticas organizacionais e de projeto nos locais de produção (fábricas ou estaleiros), que também são influenciadas pela administração de topo. As políticas corporativas de gestão são implementadas pela gestão local, a qual tem um grande impacto sobre as condições que propiciam ou não a ocorrência dos erros. Mesmo quando a administração adota políticas apropriadas, essas políticas podem ser ineficazes se não ganharem o apoio da gestão local.

3) Os fatores (condições de trabalho e dos trabalhadores) que afetam diretamente as causas de erro situam-se no nível seguinte:

- características do trabalho realizado pelo trabalhador (complexidade, exigências físicas e mentais, etc.);
- fatores individuais, tais como a personalidade;
- fatores de desempenho da equipa.

4) O nível seguinte na estrutura do sistema de produção representa as atividades realizadas na produção, as quais incluem uma vasta gama de interações físicas dos humanos com o ambiente, por um lado, e, por outro, com os equipamentos, aparelhos e utensílios.

5) Os elementos finais de um sistema de produção são as defesas contra os perigos previsíveis. Estas defesas assumem formas muito diversas: i) sistemas que atuam ao nível dos equipamentos e utensílios usados na produção; ii) sistemas que afetam diretamente os humanos, tais como procedimentos de emergência e controlos administrativos ou como ações de formação concebidas para dar aos trabalhadores a capacidade de agir como uma outra linha de defesa contra os riscos; iii) etc..

Políticas inadequadas ao nível corporativo ou a aplicação inadequada de políticas corretas pela gestão local facilitam a criação de condições a nível operacional que, eventualmente, podem redundar em erros. Por outro lado, se as defesas do sistema de produção forem igualmente inadequadas, então podem ocorrer consequências negativas ou até mesmo catastróficas.

3.4 – Para quê as análises de fiabilidade estrutural?

Madsen *et al.* (2006) salientam que a teoria da fiabilidade estrutural prevê taxas de mau comportamento estrutural muito pequenas, provavelmente 10 ou mais vezes inferiores às reais. Por isso

a maioria dos comportamentos deficientes é atribuída a erros humanos, fator que não é tido em consideração na teoria.

A fiabilidade estrutural é definida como a probabilidade de a capacidade resistente da estrutura não ser ultrapassada pelo efeito das ações permanentes e variáveis. Esta definição tem vindo a ser posta em causa porque tem um âmbito limitado (Bea, 1995). Com efeito, a análise da fiabilidade estrutural convencional não abarca certas fontes de incerteza que condicionam a qualidade das estruturas ao longo do seu período de vida (conceção, construção, operação). Os comportamentos inadequados são devidos a três tipos de incerteza (Bea, 1995):

- variabilidade inerente ou natural (aleatoriedade);
- incertezas analíticas ou profissionais (epistémicas);
- erros dos indivíduos e dos grupos de indivíduos ou organizações (erros humanos).

Enquanto as avaliações efetuadas no âmbito da fiabilidade estrutural convencional levam em linha de conta os dois primeiros tipos de incertezas, em geral não têm em consideração a terceira categoria. No melhor dos casos, esta categoria é incluída de forma implícita: é incorporada nos dados e informações de base que são usados para descrever as incertezas e variabilidades.

A teoria da fiabilidade estrutural parece, portanto, possuir pouca capacidade para descrever os acontecimentos reais. Sem embargo, por mais certo que isto possa parecer, o propósito da teoria não é a descrição do comportamento estrutural mas o controlo do processo de produção eficiente de estruturas fiáveis (Madsen *et al.*, 2006).

Ainda no que respeita à invocação de razões que justifiquem a realização dos estudos de fiabilidade tradicionais, atente-se ao que Whitman (2000) observou: "Verifica-se tipicamente que as taxas de fracasso reais excedem as previstas, talvez em tanto quanto duas ordens de magnitude. O exame aprofundado dos fracassos revela que a maioria resulta de erro humano (...). Se as falhas resultam de descuidos, lapsos ou equívocos não considerados nas análises de fiabilidade, qual o interesse de realizar tais análises para avaliar a adequação dos projetos? A resposta é que os engenheiros desejam certificar-se de que a probabilidade de rotura ocasionada por causas sob o seu controle é bem menor do que a probabilidade associada a causas que não podem controlar."

Seja como for, uma teoria que incorpore todos os aspetos que afetam o comportamento estrutural fica incompleta se não atender ao erro humano. A teoria da fiabilidade estrutural tradicional pode ser encarada como uma parte de uma teoria mais extensa de controlo da qualidade estrutural, que leva também em conta os efeitos dos erros humanos.

O estudo dos erros humanos no âmbito das tarefas de produção de estruturas é notavelmente diferente das bem estabelecidas metodologias da mecânica e fiabilidade estruturais, principalmente porque exige conhecimentos de métodos das ciências sociais.

Também no caso particular da engenharia geotécnica, a constatação de que os maus comportamentos são dominados por fatores humanos (88%) leva a que também se conclua que as metodologias de fiabilidade tradicionais apenas contemplam uma parte muito limitada dos desafios colocados pelas incertezas na engenharia geotécnica. A fiabilidade baseada em fatores de segurança (ou as probabilidades de rotura associadas) é usada para ajudar os engenheiros a resolver as incertezas associadas às variabilidades naturais e às incertezas dos modelos. Outros métodos (muitas vezes referidos como "de gestão") devem ser usados para ajudar os engenheiros a abordar outros desafios que coloca a fiabilidade dos sistemas com que lidam (Bea, 2006).

4 – O FATOR HUMANO

4.1 – Preâmbulo

Denomina-se por “fatores humanos” o esforço abrangente para compilar dados sobre as capacidades e limitações humanas e para aplicar esses dados à conceção, elaboração e/ou construção de equipamentos, de sistemas, de instalações, de procedimentos, de empregos, de ambientes, de metodologias de treino de pessoal e de gestão de pessoal de modo a tornar o desempenho humano seguro, confortável, ergonómico e eficaz (AICE, 1994).

4.2 – Razões que justificam o atraso na consideração adequada do erro humano e benefícios de o fazer

Apesar de não haver dúvidas de que os problemas de desempenho humanos constituem uma ameaça significativa à segurança, o estudo do erro humano tem sido uma área negligenciada. Existem várias razões que contribuem para explicar esta situação.

Parte do problema é devida à crença, partilhada pelos engenheiros e os gestores, de que o erro humano é inevitável e imprevisível. Sem embargo, em muitos casos, o erro humano só é inevitável se as pessoas forem colocadas em situações que enfatizam as fraquezas humanas, que estão para além das potencialidades humanas.

Outra barreira para a consideração sistemática do erro humano é a crença de que a crescente informatização e automação dos processos de fabrico tornaram desnecessária a intervenção humana. De facto, se, num dado sistema, os elementos humanos puderem ser substituídos por dispositivos tecnológicos, o sistema será invariavelmente mais seguro, embora possa ser menos eficiente visto que os humanos são capazes de julgamentos complexos que não seguem necessariamente um processo lógico (assunção de riscos); mas sistemas atuados tecnologicamente, ainda que por dispositivos simples, são inquestionavelmente mais seguros dos que os controlados apenas por humanos (Williams, 2009). Tal não é, obviamente, impeditivo que tenham ocorrido inúmeros acidentes em instalações controladas por computador. Seja como for, na gestão de um sistema não é possível ou mesmo desejável eliminar completamente o elemento humano, além de que continua a ser necessário um envolvimento humano considerável em áreas críticas de manutenção e de remodelação / renovação de espaços e de equipamentos, mesmo no caso dos processos mais automatizados.

O erro humano tem sido frequentemente usado como desculpa para as deficiências na gestão global das produções ou das instituições. Pode ser conveniente a uma organização atribuir a culpa por uma grande catástrofe a um único erro ocorrido no decurso de um processo de trabalho falível. Sem embargo, o indivíduo que comete o erro final que causa um acidente pode simplesmente ser a gota de água que quebra um sistema que já se tornara vulnerável devido a uma gestão de pouca qualidade.

Uma das principais razões que justificam que se negligencie o erro humano é simplesmente a falta de conhecimentos sobre a sua importância para a segurança, confiabilidade e qualidade e sobre as metodologias de o ter em devida consideração. Com efeito, as principais vantagens que derivam da consideração dos fatores próprios dos humanos nas operações de produção são a melhoria da segurança e a redução do tempo de inatividade. Além disso, a eliminação ou mitigação do erro acarreta benefícios substanciais para a qualidade e produtividade.

Verifica-se atualmente uma crescente preocupação em empregar no processo produtivo metodologias apropriadas de lidar com o erro humano, procurando-se, designadamente, enfatizar a importância de uma filosofia que procura determinar as causas dos erros que conduzem a falhas de qualidade, em vez de tentar controlar o erro através da atribuição de culpas ou de punições.

Há igualmente um crescente interesse em estabelecer os laços entre qualidade e segurança. As falhas em ambos os domínios são geralmente devidas aos mesmos tipos de erros humanos, subja-

zendo-lhes as mesmas causas. Se um erro particular provoca consequências em termos de segurança ou de qualidade depende em grande parte de quando ou onde ocorre, no decurso de um processo produtivo. Isto significa que os investimentos aplicados na redução de erros são suscetíveis de ser altamente rentáveis, dado que originam reduções simultâneas quer da incidência de acidentes quer da probabilidade de ocorrência de falhas de qualidade.

Uma razão adicional para o investimento em medidas de redução do erro é a melhoria da capacidade da indústria em se conformar com as normas regulamentares. Note-se que à medida que a relação entre erro humano e segurança se torna mais amplamente reconhecida, as autoridades reguladoras passarão a dar mais ênfase ao controlo das condições de trabalho que possam ser indutoras da ocorrência de erros.

4.3 – Tipos de erros humanos. Classificações dos erros

É difícil entender o erro humano de uma forma única e abrangente. Para o engenheiro, o trabalhador que faz parte de um dado processo produtivo pode ser percecionado como estando lá para realizar um conjunto de tarefas tendo em vista atingir os objetivos específicos operacionais; tal entendimento implica haver relativamente pouco interesse no estudo dos mecanismos subjacentes à ocorrência de falhas. Em contrapartida, para o especialista em fiabilidade humana, que procura prever e otimizar o desempenho humano, as causas organizacionais e psicológicas subjacentes aos erros são de considerável importância.

A análise de acidentes e de desastres ocorridos em sistemas reais mostra que não é suficiente considerar o erro e seus efeitos a partir de uma perspectiva que contempla apenas os fracassos humanos. Os acidentes graves são quase sempre o resultado de vários erros ou de combinações de erros individuais com condições preexistentes vulneráveis (Wagenaar *et al.*, 1990).

Meister (1977) classifica os erros em quatro grupos principais, aos quais Swain (1987) sugeriu juntar uma categoria adicional (incluída em último lugar):

- incapacidade para executar uma ação necessária (erro por omissão);
- desempenho incorreto de uma ação necessária (erro por comissão²);
- realização de uma ação não requerida (erro por comissão);
- realização de uma ação necessária fora da sequência (combinação do erro por comissão com o por omissão);
- incapacidade para executar uma ação necessária dentro de um tempo fixado (erro por omissão³).

Esta classificação procura resolver a inadequação da abordagem comum em engenharia de fiabilidade de simplesmente classificar os erros nas categorias de omissão e de comissão. Note-se, por outro lado, que a 5ª categoria é particularmente relevante quando se torna necessária uma intervenção humana em resposta a uma situação potencialmente perigosa.

Esta definição / classificação não contém quaisquer referências ao porquê do erro; com efeito, procura descrever o que aconteceu em vez do porquê de tal ter acontecido. Portanto, ela relaciona-se muito mais facilmente com as consequências observáveis do erro do que com as suas causas.

¹ As designações dos erros em língua inglesa por “omission errors” e “commission errors” são, em línguas latinas, facilmente perceptíveis, no primeiro caso (erro por omissão), e menos, no segundo. Ainda assim optou-se pela simples tradução para português, tendo por base o seguinte entendimento: há omissão quando não se executa uma ação; há comissão quando se realiza (comete) de forma errada uma ação ou quando se pratica uma ação não requerida.

² Meister (1977) não classifica este erro como um “commission error”.

³ Swain (1987) não atribui nenhuma classificação a este erro.

As análises de acidentes e de perdas importantes indicam que estes raramente são consequência de um único erro humano ou falha de um componente. Muitas vezes há uma combinação de algum evento desencadeante com condições pré-existentes, tais como erros de projeto, deficiências dos equipamentos ou falhas de manutenção. Por isso, é útil distinguir entre erros ou falhas ativos e latentes.

Um erro humano ativo tem um efeito imediato na medida em que ou provoca diretamente uma situação perigosa ou é o iniciador direto de uma cadeia de eventos que rapidamente leva a um estado indesejável.

As políticas de gestão são a fonte de muitas das condições que dão origem a falhas nos sistemas; por exemplo, se não existe nenhuma política explícita ou se não são disponibilizados recursos para as áreas críticas de segurança ou para assegurar que existem sistemas de comunicação eficazes, então o erro humano tem uma fortíssima probabilidade de ocorrer. Essas políticas deficientes podem ser encaradas como uma forma de erro humano latente. Em resumo: o termo “*falhas latentes*” é utilizado para designar as situações que, por si só, não causam dano imediato, mas que, em combinação com outras condições, podem dar origem a falhas ativas.

Como os erros são frequentemente sanáveis, é igualmente adequado definir uma outra categoria de erros, as falhas de recuperação, as quais contemplam a incapacidade de recuperar toda a cadeia de eventos que conduz a uma consequência negativa (supondo que tal recuperação era possível) antes que esta ocorra. Isto inclui a recuperação de falhas ativas e latentes.

É também útil considerar os erros que são designados por violações, que ocorrem quando o trabalhador realiza ações que ou são proibidas ou são diferentes das prescritas pela organização e apresentam alguns riscos associados. Uma vez que as violações são atos deliberados, elas não são, estritamente falando, erros. No entanto, a categoria das violações é útil para classificar as falhas causadas pelos humanos.

Em suma:

- Um erro humano ativo é uma ação involuntária ou uma ação intencional baseada num diagnóstico equivocado, numa má interpretação ou em qualquer outra falha, que não é sanada e que tem importantes consequências negativas para o sistema.
- Um erro humano latente (a nível operacional) é semelhante a um erro ativo, mas as consequências do erro só se tornam evidentes após um período de tempo ou quando combinado com outros erros ou condições operacionais particulares.
- Um erro humano (latente) ao nível da gestão é o resultado de uma política de gestão inadequada ou inexistente, que cria as condições prévias para a ocorrência de falhas humanas ou dos equipamentos, ativas ou latentes.
- Uma falha na recuperação (erro de recuperação) ocorre se um erro ativo ou latente potencialmente recuperável não é detetado ou se as medidas corretivas não forem tomadas antes de as consequências negativas do erro ocorrerem.
- Ocorre uma violação quando é realizada uma ação intencional que deliberadamente ignora regras operacionais, restrições ou procedimentos conhecidos. No entanto, esta definição exclui as ações que são deliberadamente executadas visando prejudicar o sistema, as quais configuram situações de sabotagem.

4.4 – Uma visão geral das quatro perspectivas de abordagem do erro humano

O livro “Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety” (AICE, 1994) oferece uma visão geral abrangente das principais abordagens que têm sido aplicadas para analisar, prever e

reduzir o erro humano. No que se segue resumem-se as teorias interpretativas do erro humano, necessárias para desenvolver e aplicar metodologias para a sua redução.

Podem considerar-se quatro perspectivas diferentes de abordagem do erro humano em sistemas industriais, assim designadas: i) metodologia de segurança tradicional; ii) apreciação dos fatores humanos / ergonomia; iii) análise dos processos cognitivos (engenharia cognitiva); iv) abordagem sociotécnica. Estas quatro abordagens são resumidamente contrastadas no Quadro 6 em termos das estratégias de controlo do erro que normalmente são empregues, das principais áreas de aplicação e da frequência com que são aplicadas.

Quadro 6 – Comparação das várias perspectivas de abordagem do erro humano.

Estratégias de controlo do erro	Metodologias típicas	Principais áreas de aplicação	Uso
i) Metodologia de segurança tradicional na engenharia			
Através de alterações motivacionais, comportamentais ou de atitude	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção • Mudança de comportamento através de campanhas motivacionais • Recompensa / punição 	<ul style="list-style-type: none"> • Segurança no trabalho • Operações manuais 	Muito comum
ii) Apreciação dos fatores humanos / abordagem ergonómica			
Através do estudo e da auditoria da experiência operacional	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de tarefas • Conceção do trabalho • Projeto do local de trabalho • Estudo das interfaces • Avaliação do ambiente físico • Análise das cargas de trabalho 	<ul style="list-style-type: none"> • Segurança no trabalho e da produção • Operações manuais e de controlo • Operações de rotina 	Pouco frequente
iii) Análise dos processos cognitivos			
Através do estudo e da auditoria da experiência operacional, dando particular atenção à destreza mental para o diagnóstico de problemas e sua resolução	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de tarefas cognitivas • Apoio à decisão em situações de emergência • Análise de incidentes visando a determinação das raízes causadoras do erro humano 	<ul style="list-style-type: none"> • Segurança da produção • Tomada de decisão e resolução de problemas • Situações anormais 	Rara
iv) Abordagem sociotécnica			
Através de mudanças nas políticas de gestão e na cultura organizacional	<ul style="list-style-type: none"> • Entrevistas • Inspeções • Redesenho organizacional • Gestão total da qualidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Segurança no trabalho e da produção • Efeitos dos fatores organizacionais na segurança • Aspectos da política de gestão • Cultura da organização 	Cada vez mais frequente

4.4.1 – A abordagem de segurança tradicional aos acidentes e ao erro humano

Esta abordagem enfatiza os fatores individuais que dão origem a acidentes e, portanto, coloca em lugar de relevo a questão da seleção dos trabalhadores associada à utilização de estratégias motivacionais e disciplinares para a redução dos acidentes e dos erros. A ênfase principal é posta na modificação de comportamentos, através da persuasão (campanhas motivacionais) ou da punição. A principal área de aplicação desta abordagem tem sido a segurança no trabalho, que incide sobre os riscos que afetam o trabalhador individual, em vez da segurança do processo produtivo, que se concentra prioritariamente nas grandes falhas dos sistemas, eventualmente causadoras de perdas significativas e de impactos no ambiente, bem como de danos individuais.

Portanto, a abordagem tradicional à causa dos acidentes centra-se no indivíduo e não nas causas sistémicas do erro. Os erros são vistos primeiramente como sendo devidos a causas como a falta de motivação para a adoção de comportamentos seguros, a falta de disciplina ou a falta de conhecimento do que constitui um comportamento seguro. Assume-se que estas faltas dão origem a atuações inseguras, as quais, em combinação com situações de risco, são consideradas as principais causas de acidentes.

Uma das origens deste ponto de vista da causalidade do erro e do acidente é a teoria da propensão para acidentes, que tenta mostrar que um pequeno número de indivíduos é responsável pela maioria dos acidentes. Apesar dos numerosos estudos que mostraram haver pouca evidência estatística de suporte a essa ideia, permanece a crença, particularmente nas indústrias tradicionais, de que um número relativamente pequeno de indivíduos é responsável pela maioria dos acidentes.

Outro aspeto que, em muitas investigações de acidentes graves, contribui para que seja dada ênfase à responsabilidade individual tem sido a dimensão legal. Com efeito, em muitos casos há uma preocupação principal na atribuição de culpa aos indivíduos, tendo em vista a definição de compensações, em vez de na identificação de possíveis causas sistémicas do erro.

4.4.2 – Apreciação dos fatores humanos / abordagem ergonómica

A segunda perspetiva a considerar é a abordagem baseada na apreciação dos fatores humanos (ou ergonomia⁴), segundo a qual o desencontro entre as capacidades humanas e as exigências que o sistema de produção lhes coloca é a principal fonte do erro humano. Nesta perspetiva, a solução primária para reduzir os erros passa por conceber os sistemas atendendo às características físicas e mentais dos humanos, o que implica que se tenha em consideração fatores tais como:

- conceção das tarefas e do posto de trabalho de forma a acomodar as necessidades de trabalhadores com diferentes características físicas e mentais;
- conceção das interfaces homem-máquina garantindo que as informações sejam facilmente acessíveis e interpretadas e que as pertinentes ações de controlo possam ser realizadas;
- conceção do ambiente físico (por exemplo, calor, ruído, iluminação) para minimizar os efeitos negativos, físicos e psicológicos, de condições inadequadas;
- otimização da carga de trabalho físico e mental do trabalhador.

Esta ênfase nos fatores que podem ser manipulados durante a fase de conceção de um processo produtivo leva a que a presente abordagem seja descrita como um processo de procurar ajustar o trabalho à pessoa. Isto contrasta com a perspetiva de procurar encaixar a pessoa no posto de trabalho pré-existente, a qual enfatiza o papel da seleção, da formação e da modificação dos comportamentos, perspetiva, obviamente, mais próxima da abordagem tradicional de segurança.

De facto, a engenharia dos fatores humanos (ou ergonomia) é um assunto multidisciplinar que se preocupa em otimizar o papel do indivíduo em sistemas homem-máquina. Estas metodologias desenvolveram-se logo após a Segunda Guerra Mundial, quando se constatou que, em situação de guerra, se perderam mais aviões por causa de erros dos pilotos do que em consequência de ações do inimigo. Tornou-se claro que a eficácia de um sistema complexo, como a pilotagem de uma aeronave, obriga a que, ao nível da conceção, sejam tidas em consideração as necessidades do ser humano, bem como o equipamento, a fim de se evitar falhas.

⁴ A Associação Internacional de Ergonomia define ergonomia (ou fatores humanos) do seguinte modo: é, por um lado, a disciplina científica dedicada à compreensão das interações entre os humanos e com outros elementos de um sistema e, por outro lado, a profissão que aplica conhecimentos teóricos, princípios, dados e métodos na conceção daquelas inter-relações tendo em vista otimizar o bem-estar humano e o desempenho de todo o sistema.

As características específicas dos sistemas militares e aeroespaciais, com forte componente rigidamente processual, faziam com que o principal foco de interesse fosse a conceção das interfaces homem-máquina (por exemplo, *cockpits* de aeronaves), especialmente dos painéis de informação e de acesso e manobra dos comandos de controlo. Por isso, o modelo predominante do comportamento humano que prevaleceu naquela época (designado *behaviorismo*) preocupava-se exclusivamente com os *inputs* a enviar para e com os *outputs* a receber dos indivíduos humanos e não tinha minimamente em consideração os processos de pensamento ou de vontade próprios ou quaisquer outras características distintivamente humanas.

A concetualização do ser humano como um processador de informação de canal único foi útil para pôr em relevo a necessidade de se projetar sistemas que levem em conta as capacidades e as limitações humanas. No entanto, esse modelo não incorpora outros aspetos tais como a vontade ou intenções humanas ou, ainda, o significado que as pessoas atribuem ao seu trabalho, nem considera as capacidades humanas de diagnóstico, de resolução de problemas e de tomada de decisões. Apesar destas limitações, a abordagem em apreço tem sido fonte de muitas metodologias e técnicas práticas e úteis (AICE, 1994).

A análise dos fatores humanos pode ser aplicada no âmbito da segurança no trabalho e do processo produtivo e para as operações manuais e de controlo.

4.4.3 – Análise dos processos cognitivos (engenharia cognitiva)

A abordagem ergonómica do erro humano baseia-se essencialmente num modelo da conduta humana tipo caixa preta focalizado principalmente nas informações (que constituem os *inputs*) e nas ações de controlo (*outputs*). Considera-se agora uma perspetiva mais moderna do erro humano, baseada em conceitos da psicologia cognitiva.

A perspetiva cognitiva está igualmente preocupada com o processamento de informações, na medida em que trata de como as pessoas adquirem informações, como as representam internamente e como as usam para guiar o seu comportamento. A principal diferença em relação à abordagem ergonómica é que a abordagem cognitiva enfatiza o papel das intenções, dos objetivos e do significado como centrais ao comportamento humano. Ou seja, em vez de o ser humano ser concebido como um elemento passivo de um sistema, a ser tratado da mesma maneira que uma qualquer peça ou equipamento, a abordagem cognitiva realça o facto de as pessoas darem significado à informação que recebem e de as suas ações serem quase sempre dirigidas para a realização de algum objetivo, explícito ou implícito. No contexto de um processo produtivo, os objetivos podem ser metas de longo prazo, tais como a produção de uma dada quantidade de produto ao longo de vários dias, ou de mais curto prazo, tais como a manutenção de um perfil de controlo de uma dada variável (velocidade, temperatura, caudal, etc.). Em suma, a abordagem cognitiva abre a caixa preta que havia representado os processos de nível mais elevado de raciocínio no modelo de trabalhador próprio da abordagem ergonómica.

Esta abordagem desenvolveu-se a partir de uma mudança geral de ênfase da psicologia aplicada, ocorrida no decurso dos anos 70 e 80 do século passado, que passou de uma conceção do ser humano como uma caixa preta passiva, semelhante a um componente de engenharia, para uma visão dos indivíduos dotados de propósitos, na medida em que as suas ações são influenciadas por metas e objetivos futuros.

A engenharia cognitiva é particularmente útil, por um lado, no estudo das funções humanas de nível superior envolvidas nas operações de produção, como sejam, por exemplo, as capacidades de diagnóstico, de resolução de problemas e de tomada de decisões, e, por outro, nas atividades de planeamento e no manejo de situações anormais. Além disso, esta abordagem é a mais abrangente no que respeita à capacidade de avaliação das causas dos erros; isto significa que possui particular

relevância para analisar as causas dos erros recorrentes e para prever erros específicos que podem ter consequências graves, como parte de análises de segurança. Por isso, a abordagem cognitiva tem tido uma grande influência, nos últimos anos, nos estudos sobre o modo como o erro humano é encarado em sistemas produtivos complexos.

4.4.4 – A abordagem sociotécnica

As abordagens descritas encaram o problema do erro de três maneiras distintas: 1º) tentando incentivar os comportamentos seguros - abordagem de segurança tradicional; 2º) concebendo os sistemas de forma a garantir que existe correspondência entre as capacidades humanas e as exigências desses sistemas - abordagem ergonômica (apreciação dos fatores humanos); 3º) procurando compreender as causas subjacentes aos erros, para que as condições indutoras de erro possam ser eliminadas na fonte - abordagem da modelação cognitiva. Estas estratégias fornecem uma base técnica para o controlo do erro humano ao nível do trabalhador individual ou da equipa operacional.

O controlo do erro humano ao nível mais fundamental também precisa que se tenha em consideração o impacto das políticas de gestão e da cultura organizacional. Com efeito, há necessidade de ir para além das causas diretas dos erros, como sejam, por exemplo, a sobrecarga de trabalho, os procedimentos inadequados ou imprecisos, etc., e considerar as políticas organizacionais subjacentes que dão origem a essas condições. As deficiências ao nível das políticas de gestão são indutoras do aparecimento, a nível operacional, de fatores de desempenho com influência negativa.

Outra maneira de as políticas de gestão afetarem a probabilidade de erro é através da sua influência na cultura organizacional. Por exemplo, pode surgir ao nível operacional uma cultura pela qual se atribui à realização dos objetivos de produção uma muito maior ênfase do que à adoção de práticas seguras. Realce-se que, ainda que seja claro que nenhuma empresa responsável sanciona tal situação, caso seja do seu conhecimento, sem uma comunicação eficaz ou na ausência de sistemas de reporte dos incidentes, a gestão pode nunca se aperceber de que a segurança está sendo posta em causa por uma cultura inadequada e pelas práticas de trabalho que produz.

Baseado em levantamentos de campo envolvendo profissionais da indústria de construção inglesa, no estudo estatístico de 23 locais de construção e numa série de entrevistas, Atkinson (1999) conclui que: 1) a influência dos gestores está na origem de muitos erros que conduzem a defeitos construtivos; 2) a patologia da ocorrência de erros exhibe características sistemáticas, sendo que os erros cometidos ao nível mais alto da cadeia de gestão têm uma influência muito significativa nos erros dos operacionais; 3) é necessária uma maior preparação técnica dos gestores.

Estudos de acidentes graves têm mostrado que, quase sempre, eles surgem pela conjugação de culturas organizacionais inapropriadas, de falhas latentes e de erros ativos (Reason, 1990; Rasmussen, 1990; Kletz, 1994), mostrando claramente a necessidade de olhar para além das causas precursoras imediatas dos acidentes, isto é, para as causas sistêmicas subjacentes.

Assim, a perspetiva sociotécnica do erro humano surgiu da percepção de que o desempenho humano ao nível operacional não pode ser considerado separadamente da cultura, dos fatores sociais e das políticas de gestão que existem globalmente na organização. Por exemplo, considere-se a questão dos procedimentos operacionais:

- a disponibilidade de bons procedimentos operacionais (boas práticas) é bem sabido ser um fator importante que condiciona a probabilidade de ocorrência de erros;
- mas a existência de boas práticas requer uma política de conceção de procedimentos a ser implementada pela gestão do local de produção;
- a conceção e desenvolvimento de procedimentos requer a participação dos seus eventuais utilizadores, a análise das tarefas operacionais, a consideração dos fatores humanos condi-

cionantes e um sistema de auditoria que permita a introdução de modificações e melhoramentos à luz da experiência operacional;

- tudo isso requer recursos a serem alocados pelos gestores aos níveis adequados da organização;
- mas a existência de procedimentos de boa qualidade não garante que eles sejam usados; caso exista uma cultura organizacional que incentive os trabalhadores a tomar atalhos não especificados nos procedimentos, a fim de atingir níveis de produção necessários, então os acidentes e as perdas ainda podem ocorrer.

Estas são questões típicas que são consideradas pela abordagem sociotécnica.

Williams (2009) numa conferência recente aborda a questão das falhas sistémicas, demorando-se na análise do papel que, nesse âmbito, desempenha a liderança institucional (ou, melhor, a falta dela). No que respeita à liderança realça quer o efeito da autoridade no comportamento humano quer o impacto do estilo de liderança, enfatizando que, “sendo líder, uma pessoa é responsável não apenas pelas suas ações diretas mas também pela influência que exerce sobre os outros”.

A perspetiva sociotécnica é, essencialmente, de cima para baixo (“top-down”), na medida em que aborda a questão de como as políticas de gestão em todos os níveis da organização afetam a probabilidade de ocorrência de erros com consequências significativas. A abordagem sociotécnica preocupa-se, portanto, com as implicações das políticas de gestão na segurança, na qualidade e na produtividade da organização.

4.4.5 – Conclusões

A intenção desta subsecção foi a de, com base essencialmente num documento pormenorizado e fortemente especializado (AICE, 1994), fornecer uma visão breve mas geral da ampla gama de estratégias disponíveis para a gestão de erro.

As abordagens descritas devem ser consideradas complementares, mais do que concorrentes; todas têm um papel a desempenhar no âmbito de uma gestão integrada do erro humano, tendo em vista a redução dos acidentes.

A abordagem de segurança tradicional concentra-se na modificação do comportamento individual e tem sido bem sucedida em muitas áreas da segurança no trabalho. Ela é, em geral, bem conhecida e está bem documentada na indústria, enquanto as outras abordagens têm recebido menos atenção. Sem embargo, apesar do seu sucesso na área da segurança ocupacional, pode ser menos aplicável em áreas tais como a prevenção de acidentes importantes. Isto porque muitos dos fatores que se tem demonstrado constituírem os antecedentes de processos acidentais relevantes (por exemplo, procedimentos pobres, formação inadequada) não estão usualmente sob o controlo do trabalhador individual.

A abordagem ergonómica visa a otimização do desempenho humano, através de um conjunto de aproximações e de técnicas específicas. A perspetiva de modelação cognitiva fornece uma aproximação para a modelação dos erros humanos que pode ser aplicada na fase de conceção e na determinação das causas dos erros. Enfim, a perspetiva organizacional enfatiza a necessidade de as técnicas de redução do erro deverem ter em atenção o papel que desempenham as políticas de gestão e a cultura organizacional, pois elas afetam as causas imediatas dos erros. Estas três últimas abordagens podem também ser aplicadas para melhorar a qualidade e a produtividade, bem como a segurança da produção e podem ser facilmente integradas com técnicas de engenharia de segurança tradicionais.

4.5 – Metodologias para a consideração explícita do erro humano

Caldeira (2002) salienta que, uma vez que em muitas das roturas registadas estão envolvidos erros humanos, eles devem ser considerados nas avaliações, mas, infelizmente, a compreensão dos erros

humanos é limitada e muito do seu conhecimento é qualitativo. Refere ainda que “(...) *na prevenção deste tipo de erros assume especial importância a experiência e a organização das equipas de projeto e de construção, os conhecimentos técnicos e científicos das entidades envolvidas, as revisões do projeto, o controlo da construção, as inspeções e as atividades resultantes da observação* (...)”.

Têm sido propostas várias metodologias tendo em vista a consideração explícita do erro humano nas operações de construção (Stewart, 1992; Zhou e Kou, 2010; Atkinson, 1999; Bea, 2006; Vrouwenvelder *et al.*, 2009; SCOSS, 2006; etc.). Essas metodologias seguem duas vias alternativas e complementares: uma via de caráter mais qualitativo que consiste em definir procedimentos de controlo de qualidade; outra que visa a modelação dos erros humanos, através da estimativa das probabilidades associadas a ocorrência dos erros e de as levar em devida consideração em modelos de fiabilidade global.

No que segue tecem-se considerações sobre algumas dessas metodologias.

Sowers (1993) faz diversas sugestões para melhorar os fatores humanos, incluindo uma melhor educação, o reforço da aplicação das leis de controlo da prática da engenharia, o aumento da consciencialização dos engenheiros nas suas limitações, a melhoria das comunicações e o desenvolvimento de adequados níveis de diligência, de cuidados e de responsabilidade.

Uma linha de atuação similar é preconizada por Caldeira (2005), quando sugere a implementação das seguintes medidas com vista à diminuição dos erros humanos: i) aumentar a educação profissional dos intervenientes; ii) propiciar um bom ambiente de trabalho; iii) reduzir a complexidade das tarefas; iv) selecionar pessoal especializado; v) aplicar medidas de autoverificação; vi) implementar medidas de verificação e de inspeção externas; vii) aplicar sanções (legais e outras).

Atkinson (1999) procura aplicar uma visão sociotécnica do erro humano aos projetos de construção, em geral, e ao estudo dos erros que ocorrem nesses projetos, em particular. Propõe um modelo de três níveis para simular o processo de geração do erro nos projetos de construção.

No artigo intitulado “Reliability and Human Factors in Geotechnical Engineering”, Bea (2006) avança propostas de como os engenheiros geotécnicos, os gestores (que frequentemente são engenheiros) e os analistas de segurança (risco) podem incorporar explicitamente os fatores humanos e organizacionais no seu trabalho, integrando essas considerações nos procedimentos e processos que usam tradicionalmente. Na sua opinião os engenheiros geotécnicos têm um papel e responsabilidades importantes na incorporação dos fatores humanos, contribuindo desse modo para ajudar a controlar o incontável.

O modelo proposto por Bea (2006) baseia-se em estudos, que decorreram ao longo de um período dilatado (1988-2005), de mais de 600 bem documentadas falhas e acidentes graves de sistemas de engenharia civil (Bea, 2000a, 2000b). O modelo estende as análises tradicionais de fiabilidade, baseadas nas probabilidades, e de risco de forma a incluírem categorias adicionais de incerteza, as devidas a fatores humanos e organizacionais. São propostas abordagens pró-ativas, reativas e interativas que utilizam estratégias diversas visando reduzir a probabilidade de ocorrência de avarias, aumentar a sua deteção e correção e reduzir os efeitos quando as avarias se desenvolvem.

As propostas metodológicas de Bea (2006) ajudam a identificar as situações em que são necessárias ações corretivas e permitem apreciar quanto elas podem ser eficazes na melhoria da fiabilidade e qualidade do sistema de engenharia geotécnica em causa.

Estas abordagens e estratégias foram empregues numa série de projetos de engenharia importantes, alguns dos quais envolviam sistemas muito inovadores (Bea, 2002a, 2002b). Os resultados provaram a sua utilidade como um meio de reunir os profissionais, as atividades e os objetivos da engenharia, por um lado, e da gestão, por outro, num discurso construtivo tendo em vista atingir as desejáveis qualidade e confiabilidade nos sistemas de engenharia.

Recentemente, emergiram novos fundamentos teóricos que suportam a introdução de melhoramentos importantes nas metodologias de concretização das operações de engenharia (Neufville *et al.*, 2004). O conceito de robustez é um deles. Quando aplicado à concretização de construções

o conceito de robustez envolve quer questões que têm a ver com a conceção estrutural – por exemplo, a ductilidade, a definição de trajetos alternativos de transferência de cargas, a apropriada proteção contra o fogo – quer todos os aspetos regulamentares e contratuais que condicionam o processo construtivo e a exploração das edificações.

Para atingir um nível de robustez adequado é preciso garantir que todas as etapas e atividades que a influenciam são devidamente consideradas e realizadas com competência. De acordo com o preconizado pelo SCOSS (2006), as questões que é necessário considerar para garantir robustez suficiente são listadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Questões a considerar para garantir robustez estrutural (adaptado de SCOSS, 2006).

Fase da operação	Questões a serem consideradas nesta fase
1 Análise, conceção e projeto	<ul style="list-style-type: none"> • assegurar que as pessoas envolvidas são competentes neste domínio; • identificar os perigos e os riscos que podem afetar a robustez nas fases 2 a 5; • quantificar os riscos residuais significativos; • ponderar os detalhes do projeto apropriados; • transmitir aos construtores e proprietários os pressupostos que enformaram os detalhes do projeto (através dos desenhos e de documentação escrita); • reconhecer a necessidade de uma revisão independente do projeto (complementar às verificações numéricas) – REVISÃO; • adotar uma postura de responsabilidade global.
2 Procedimentos de contratação e gestão da contratação	<ul style="list-style-type: none"> • informação adequada para o planeamento e orçamentação da fase de construção; • especificações adequadas; • competência das organizações que se apresentam aos procedimentos; • critérios de seleção da melhor proposta; • relatórios claros; • linhas claras de responsabilidade e autoridade.
3 Construção	<ul style="list-style-type: none"> • assegurar que as pessoas envolvidas são competentes neste domínio; • compreensão dos objetivos e da finalidade da edificação; • identificação dos perigos e dos riscos, tendo em conta as condições temporárias; • implementação da estratégia delineada no plano de segurança e saúde; • assegurar a coordenação da atividade do empreiteiro – DIREÇÃO DE OBRA; • inclusão de procedimentos de controlo adequados – FISCALIZAÇÃO; • assegurar a adequada monitorização, comunicação, tomada de decisão e atuação quando e onde exigido.
4 Operação	<ul style="list-style-type: none"> • assegurar que as pessoas envolvidas são competentes neste domínio; • aplicação da estratégia e dos requisitos fixados no projeto de segurança e saúde; • verificar e gerir os efeitos das mudanças e renovações; • assegurar a manutenção adequada dos aspetos críticos.
5 Período de garantia	<ul style="list-style-type: none"> • assegurar que as pessoas envolvidas são competentes nesta área; • identificar os perigos e os riscos associados, em particular os delineados no projeto de segurança e saúde, atendendo às condições temporárias.

Na falta de dados estatísticos suficientemente amplos e fiáveis, Vrouwenvelder *et al.* (2009) consideram que os modelos de erros humanos se podem basear em estimativas e probabilidades de ocorrência globais. Os seguintes fatores são reconhecidos como relevantes para a probabilidade de cometer erros: i) competências profissionais; ii) complexidade das tarefas e completude da informação; iii) condições físicas e mentais, incluindo *stress* e pressão devido a falta de tempo; iv) novas tecnologias não testadas; v) adaptação das tecnologias aos seres humanos; vi) fatores sociais e organizacionais. Aqueles autores propõem que a consideração dos erros no âmbito das atividades de construção se faça em dois planos.

Por um lado, com o objetivo de reduzir a quantidade e importância dos erros devem usar-se procedimentos de controlo de qualidade. Nesses procedimentos deve atender-se aos seguintes aspetos, entre outros:

- Os erros podem ser detetados através de procedimentos de verificação adequados; em princípio, a probabilidade de se detetar um erro aumenta com a dimensão do erro e com o tempo disponível.
- Regra geral as verificações feitas por pessoas externas são mais efetivas do que as verificações efetuadas pelos próprios ou por colegas do departamento. Com efeito, no caso dos projetos acima de certa dimensão devia ser exigível a revisão do projeto por entidade distinta da que o elaborou. (A este propósito é de referir que a Portaria nº 701-H/2008, Instruções para a elaboração de projetos de obras, refere a revisão do projeto, definindo-a como “(...) a análise crítica do projeto e emissão dos respetivos pareceres, por outrem que não o projetista (...)”, fixa que “(...) o faseamento da revisão do projeto segue o da respetiva elaboração, salvo acordo diverso entre o dono da obra e o revisor do projeto (...)”, mas nada estipula sobre a obrigatoriedade de se proceder à revisão do projeto e sobre o seu âmbito e profundidade).
- Um fator importante que contribui para a deteção de erros é a cultura institucional; em compensação, constitui um fator desfavorável o facto de as empresas de construção usualmente não trocarem experiências e lições derivadas de fracassos e, por isso, é frequente a repetição dos mesmos erros. Acresce que, em certos setores, é difícil que os erros cometidos pelas pessoas do topo da hierarquia sejam reconhecidos. São questões como estas que conformam o que se pode designar por cultura de segurança, a qual desempenha um papel extremamente importante.

Por outro lado, no aspeto quantitativo, Vrouwenvelder *et al.* (2009) reconhecem ser difícil estabelecer a probabilidade de algum erro decisivo através de modelos baseados nas probabilidades de erro de execução de tarefas básicas. Entendem que, para efeitos de projeto, faz mais sentido proceder a estimativas globais do tipo de erro e das probabilidades, mesmo se estiver envolvido um elevado grau de subjetividade. Propõem as seguintes alternativas de abordagem:

- Definição de um multiplicador (por exemplo 5) da probabilidade de rotura padrão para atender ao erro humano. O inconveniente deste modelo é que a probabilidade de fracasso devido a um erro reduz proporcionalmente à redução da probabilidade de rotura padrão, o que não é muito verosímil.
- Definição da probabilidade de rotura devida a erros para cada elemento, por exemplo 10^{-8} por ano e por elemento.
- Definição de um fator multiplicativo da resistência de um elemento tendo em atenção os erros humanos, admitindo que estes têm, por exemplo, uma distribuição de probabilidade do tipo da esquematizada na Fig. 9: um pico próximo do valor 1,0 (indicando haver uma probabilidade de, suponha-se, 80% de não ocorrer qualquer erro ou de ocorrerem erros muito pouco relevantes) e uma dada distribuição (com área total de 20%) representando o facto de os erros mais importantes ocorrerem menos frequentemente. (Na figura o fator de erro é definido pela razão entre a resistência diminuída por causa dos erros humanos e a resistência mecânica real, não afetada pelos erros.) Os erros podem ser definidos ao nível de uma tarefa individual ou ao nível da globalidade do cálculo.

Vrouwenvelder *et al.* (2009) recomendam que os erros humanos sejam tidos em consideração aquando das tomadas de decisão sobre a robustez estrutural e reconhecem a necessidade de as

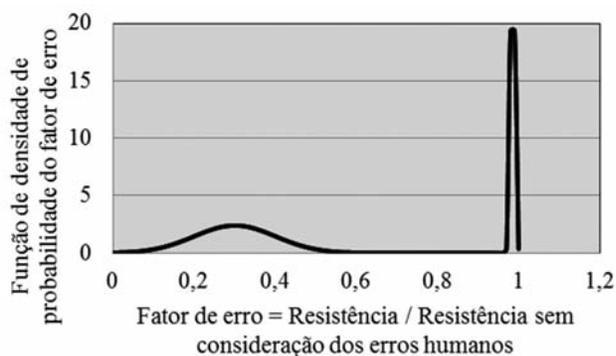


Fig. 9 – Modelo possível para o efeito do erro humano sobre a resistência (Vrouwenvelder *et al.*, 2009).

metodologias de modelação dos erros humanos serem auditadas por especialistas para que se possa constituir um corpo de conhecimentos que permita melhorar e aprofundar esses modelos.

5 – IMPRECISÃO NAS PREVISÕES

5.1 – Preâmbulo. Algumas características das previsões de custos e de benefícios

Numa famosa Rankine Lecture, intitulada “Predictions in soil engineering”, Lambe (1973) salienta que “(...) *as previsões constituem um passo chave no processo de criação e manutenção de infraestruturas, isto é, na prática da engenharia civil (...)*”. Lambe refere os domínios em que as previsões são essenciais: hidrologia, tráfego, custos, impactes ambientais, geotecnia, etc..

Nas previsões referidas por Lambe incluem-se aquelas sobre as quais assentam as decisões de se avançar com investimentos mais ou menos importantes, a saber, as previsões de custos e de impactes de diversa natureza, como sejam os ambientais, o nível de utilização (tráfego, etc.), os benefícios económicos directos e indirectos, etc..

Ora a falência das previsões, seja qual for a sua natureza, se for no sentido desfavorável, em regra acaba por se constituir num problema de segurança; no caso oposto, isto é, se for no sentido favorável, a imprecisão das previsões faz com que as operações atinjam custos que poderiam ter sido evitados. No que respeita aos custos, a estimativa por defeito do seu valor pode acarretar consequências para a segurança, pois pode conduzir à criação de pressões desmedidas para o controlo de custos, o que pode fazer com que não sejam tomadas certas medidas de segurança necessárias.

As imprecisões nas previsões de custos, de procura e de outros impactos de projetos de que recorrentemente a comunicação social dá conta, pelo menos em Portugal, são muito mais comuns e generalizadas do que, à partida, se possa pensar. No Quadro 8 apontam-se exemplos portugueses, referidos num livro recente (Vieira, 2011), de incapacidade de previsão dos custos de dois projetos muito distintos e que ocorreram também em datas muito diferentes. Lambe (1973) fornece igualmente alguns exemplos paradigmáticos de incerteza das previsões dos custos: a) o Quadro 9 diz respeito a infraestruturas de diferentes tipos executadas em países distintos; b) no Quadro 10 comparam-se os custos estimados com os reais de 9 barragens americanas.

As razões destas, em alguns casos, profundas desconformidades foram certamente diversas, desde causas económicas, políticas e sociais (inflação, problemas laborais, etc.) até razões de ordem técnica (insuficiência dos programas preliminares, deficiência dos projetos, situações imprevistas, sobretudo de carácter geotécnico, etc.).

Quadro 8 – Custos estimados e finais de duas obras em Lisboa.

Tipo de empreendimento	Custo previsto	Custo final
Basílica da Estrela (finais do séc. XVIII)	1249 contos de réis	6400 contos de réis
Centro Cultural de Belém	$6,3 \times 10^6$ contos	$38,0 \times 10^6$ contos

Quadro 9 – Custos previstos e reais de obras de diversos tipos executadas em vários países.

Tipo de obra	País	Custo previsto (\$)	Custo real – adicional em relação ao previsto (\$)
Hospital	Huddinge, Suécia	140×10^6	$+ 250 \times 10^6$
Centro comercial	Albany, New York, USA	380×10^6	$+ 1000 \times 10^6$
Ponte	Humber, Reino Unido	35×10^6	$+ 27 \times 10^6$
Linha do Metro	Londres, Reino Unido	84×10^6	$+ 43 \times 10^6$
Central elétrica	Kent, Reino Unido	288×10^6	$+ 192 \times 10^6$

Quadro 10 – Custos estimados e custos reais de 9 barragens dos Estados Unidos da América.

Designação	Local	Custo estimado quando o projeto foi autorizado (\$)	Montante gasto (\$)
Whitney	Texas	$8,35 \times 10^6$	$41,00 \times 10^6$
John H. Kerr	Virgínia	$30,90 \times 10^6$	$87,73 \times 10^6$
Blakely Mountain	Arkansas	$11,08 \times 10^6$	$31,50 \times 10^6$
Oahe Reservoir	Dakota	$72,80 \times 10^6$	$334,00 \times 10^6$
Jim Woodruff	Florida	$24,14 \times 10^6$	$46,40 \times 10^6$
Chief Joseph	Washington	$104,05 \times 10^6$	$144,73 \times 10^6$
Fort Peck	Montana	$86,00 \times 10^6$	$156,86 \times 10^6$
Clark Hill	Georgia	$28,00 \times 10^6$	$79,70 \times 10^6$
Bull Shoal	Arkansas	$40,00 \times 10^6$	$88,82 \times 10^6$

Mais recentemente, num âmbito muito diferente, o das teorias das tomadas de decisão em situações de incerteza, Flyvbjerg (2006) volta ao assunto da imprecisão das previsões, fornecendo dados relativos a previsões de tráfego e de custos relativos a projetos na área dos transportes.

Usando dados relativos a 70 anos concernentes a projetos de infraestruturas de transportes, Flyvbjerg (2006) concluiu que a imprecisão das previsões de custos a preços constantes foi, em média, de 44,7% nas ferroviárias, de 33,8% nas pontes e túneis, e de 20,4% nas rodoviárias (ver Quadro 11). Concluiu também que as previsões relativas a projetos mais recentes não são de melhor qualidade do que as que respeitam a infraestruturas mais antigas.

Quanto à previsão da utilização das infraestruturas, Flyvbjerg (2006) dispôs de dados relativos a um período de 30 anos, tendo concluído que não se verifica um melhoramento da qualidade das previsões com o passar do tempo. Concluiu também que (ver Quadro 12): a) o valor médio da imprecisão das previsões de passageiros dos transportes ferroviários é de -54,1%, sendo que em 40% dos casos analisados os erros das previsões são superiores a 60%; b) no que respeita ao tráfego rodoviário, o valor médio da imprecisão das previsões é bastante inferior ao do caso anterior, da ordem dos 9,5%.

Quando as previsões de custos e de procura se combinam, por exemplo, nas análises custo-benefício que são normalmente utilizadas para justificar investimentos em grandes infraestruturas

Quadro 11 – Imprecisão das previsões de custos a preços constantes de projetos de infraestruturas de transportes (Flyvbjerg, 2006).

Tipo de projeto	Valor médio da imprecisão (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação
Ferroviário	44,7	38,4	0,86
Pontes e túneis	33,8	62,4	1,85
Rodoviário	20,4	29,9	1,47

Quadro 12 – Previsão da utilização das infraestruturas de transportes (Flyvbjerg, 2006).

Parâmetro	Infraestruturas ferroviárias	Infraestruturas rodoviárias
Valor médio da imprecisão (%)	- 51,4	9,5
Desvio padrão (%)	28,1	44,3
Coefficiente de variação	0,55	4,66
Percentagem de projetos com imprecisão superior a:	–	–
± 20%	84	50
± 40%	72	25
± 60%	40	13

de transporte, a consequência é a imprecisão ser do segundo grau. Os rácios custo-benefício estão muitas vezes errados, não apenas numa pequena percentagem, mas em grau elevado, o que leva a que as estimativas de viabilidade sejam em muitos casos enganosas. Isto é, as informações sobre que assentam as decisões de investimentos em novos projetos podem ser altamente imprecisas e tendenciosas, o que conduz a projetos de alto risco.

5.2 – Razões da imprecisão das previsões

Flyvbjerg e outros (2002, 2004a, 2004b, 2005) testaram explicações técnicas, psicológicas e político-económicas para a imprecisão nas previsões.

As explicações técnicas são comuns na literatura e admitem que as imprecisões são devidas a dados não confiáveis ou desatualizados e ao uso de modelos de previsão inadequados (Vanston e Vanston, 2004). No entanto, quando tais explicações são postas à prova, elas não integram de forma adequada os dados disponíveis:

- Em primeiro lugar, porque se as explicações técnicas fossem válidas, seria de esperar que a distribuição das imprecisões fosse normal ou quase normal, com uma média perto de zero. As distribuições reais das imprecisões são consistentes e significativamente não-normais, com médias expressivamente diferentes de zero. Logo, existe um preconceito e não imprecisão como tal.
- Em segundo lugar, se os dados e modelos imperfeitos fossem as principais razões das imprecisões, seria de esperar uma melhoria da qualidade das previsões ao longo do tempo, porque nos ambientes profissionais os erros e as suas fontes seriam reconhecidos e enfrentados, por exemplo, através de processos de revisão conduzidos por especialistas. Sem dúvida que

têm sido gastos recursos substanciais nas últimas décadas para melhorar os dados e os modelos de previsão. No entanto, segundo Flyvbjerg (2006), esse investimento não teve nenhum efeito sobre a precisão das previsões, o que indica que algo diferente da qualidade dos dados e dos modelos está por trás da imprecisão das previsões (Flyvbjerg e Cowi, 2004; Wachs, 1990).

Flyvbjerg (2006) considera que as explicações psicológicas e políticas são mais adequadas para justificar as previsões imprecisas:

- As explicações psicológicas da imprecisão das previsões têm a ver com o viés otimista com que estas são feitas, ou seja, com a predisposição cognitiva encontrada na maioria das pessoas que as leva a julgar acontecimentos futuros a luz mais positiva do que o que garante a experiência real.
- As razões políticas, por outro lado, explicam as imprecisões em termos de falsas declarações estratégicas. De acordo com estas explicações, quando procedem à estimação dos resultados dos projetos, os analistas e os gestores, deliberada e estrategicamente, sobrestimam os benefícios e subestimam os custos, a fim de aumentar a probabilidade de os seus projetos, e não os da concorrência, serem aprovados e financiados. A deturpação estratégica pode ser atribuída a pressões políticas e organizacionais, por exemplo, à competição por fundos escassos ou à disputa de posições.

Propensão otimista e deturpação estratégica, ambas envolvem engano, mas enquanto esta tem por trás uma intenção a primeira não; a propensão otimista repousa no autoengano. Embora os dois tipos de explicação sejam diferentes, o resultado é o mesmo: previsões imprecisas e inflação dos rácios custo-benefício.

As explicações psicológicas (viés otimista) da imprecisão das previsões têm o seu mérito em situações em que as pressões políticas e organizacionais estão ausentes ou são baixas, enquanto que tais explicações têm menor validade em situações em que as pressões políticas são elevadas. Por outro lado, as explicações em termos de falsas declarações estratégicas vigoram nas situações onde as pressões políticas e organizacionais são elevadas, sendo que se tornam irrelevantes quando tais pressões não estão presentes. Assim, os dois tipos de explicação complementam-se, um é forte quando o outro é fraco, e ambos os tipos são necessários para se compreender o fenómeno em apreço.

5.3 – Metodologia para lidar com a imprecisão

Daniel Kahneman, que em 2002 recebeu o “Prémio de ciências económicas em memória de Alfred Nobel” (muitas vezes referido como Prémio Nobel da Economia) pelas suas aplicações da economia experimental e da psicologia à análise das tomadas de decisão em situações de incerteza, e coautores (1979a, 1979b, 1994, 2003) mostraram que existe um viés cognitivo associado a tais situações, visto que os erros de julgamento que se cometem:

- são muitas vezes sistemáticos e previsíveis e não aleatórios, resultado de preconceitos e não de qualquer confusão; naturalmente, qualquer prescrição corretiva deve ter presente esta constatação;
- são muitas vezes compartilhados por especialistas e leigos;
- continuam a subsistir mesmo quando se está plenamente consciente da sua natureza.

Segundo Kahneman e coautores, a tomada de consciência da existência de uma ilusão perceptiva ou cognitiva não conduz, por si só, a um conhecimento mais preciso da realidade. Contudo, o estar-se consciente permite identificar situações em que a fé normal nas impressões pessoais deve

ser suspensa e em que o julgamento deve ser controlado por uma avaliação mais crítica das evidências. O julgamento humano, incluindo as previsões, é tendencioso.

Ademais, Kahneman e coautores concluíram que o julgamento humano é geralmente otimista devido ao excesso de confiança e à falta de cuidado na análise da informação pré-existente. Por isso, as pessoas têm tendência para subestimar os custos, os prazos de conclusão e os riscos das ações planejadas e para sobrestimar os benefícios dessas mesmas ações. Este comportamento comum é designado por "falácia do planeamento" e é originado pelo facto de os planeadores assumirem uma "visão interna", concentrada nas componentes do projeto específico que estão a analisar, em vez de atenderem aos resultados de projetos semelhantes já concluídos. Kahneman e coautores argumentam que a tendência prevalecente de menosprezar ou ignorar as informações pré-existent é talvez a maior fonte de erro das previsões. Por isso, os analistas devem fazer todos os esforços para enquadrar adequadamente o problema da previsão, de modo a facilitar a utilização de todas as informações pré-existentes que estejam disponíveis. O uso de informações pré-existentes de outros empreendimentos semelhantes ao que está em estudo conforma uma "visão externa" e constitui a cura para a "falácia de planeamento".

Tendo presente os fatores que condicionam as tomadas de decisão humanas, postos em evidência por Kahneman e coautores, Flyvbjerg (2006) propõe uma metodologia para lidar com as imprecisões das previsões através do que designa uma "visão externa", a qual se baseia no estudo da informação recolhida do estudo de casos semelhantes àquele para o qual se pretende encontrar uma estimativa o mais precisa possível. O método proposto por Flyvbjerg visa, portanto, evitar as atuações tendenciosas através da adoção sistemática de uma "visão externa" baseada nas seguintes três etapas:

1. Identificação de uma classe de referência de projetos relevantes do passado que sejam similares ao em apreciação. A classe deve ser suficientemente ampla para ser estatisticamente significativa, mas suficientemente contida para ser verdadeiramente comparável com o projeto específico.
2. Estabelecimento de uma distribuição de probabilidade para a classe de referência selecionada. Isto requer o acesso a dados empíricos credíveis de um número suficiente de projetos pertencentes à classe de referência para que as conclusões a que se possa chegar sejam estatisticamente significativas.
3. Comparação do projeto específico com a distribuição respeitante à classe de referência correspondente, a fim de estabelecer o resultado mais provável para o projeto específico.

Ou seja, a metodologia proposta não tenta prever os eventos incertos que irão afetar o projeto particular, mas, em vez disso, coloca o projeto numa distribuição estatística construída com os resultados dos projetos semelhantes pertencentes à respetiva classe de referência.

Não obstante, como Flyvbjerg (2006) salienta, a maioria dos indivíduos e organizações, regra geral, estão mais inclinados a adotar a "visão interna" no planeamento de novos projetos. Esta é a abordagem convencional e intuitiva. A maneira tradicional de pensar um projeto complexo é colocar o foco no projeto em si e nos seus detalhes, dar relevo ao que se sabe sobre ele, prestando especial atenção às suas características únicas ou incomuns, tentando prever os eventos que irão influenciar o seu futuro desenvolvimento. A ideia de sair do âmbito do projeto em consideração e de proceder à coleta de estatísticas simples sobre projetos relacionados raramente é assumida pelos planeadores e gestores.

Embora compreensível, a preferência pela "visão interna" em detrimento da "visão externa" é lamentável. Quando ambos os métodos de previsão são aplicados com a mesma habilidade, a "visão externa" é muito mais capaz de conduzir a uma estimativa realista, visto que se concentra diretamente nos resultados, o que torna possível ultrapassar os vieses cognitivos e políticos, tais como a propensão para o otimismo e a deturpação estratégica. Na "visão externa", os gestores e

analistas não são obrigados a fazer cenários, a imaginar eventos ou a calibrar os seus próprios, ou de outros, níveis de competência e de controlo, de modo que podem evitar os erros que advêm dessas atividades. Logo, o viés humano é ultrapassado. Certamente que a “visão externa”, baseada em precedentes históricos, pode falhar na previsão de resultados extremos, isto é, daqueles que ficam de fora de todos os precedentes históricos. Mas, para a maioria dos projetos, a “visão externa” conduz a resultados mais precisos, sendo que, em contraste, a focalização nos detalhes internos é o caminho para a imprecisão (Flyvbjerg, 2006).

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na Secção 2 mostrou-se que: i) um aspeto determinante da probabilidade de rotura (quando esta for inferior a 10^{-3}) é a forma da cauda “esquerda” da distribuição da capacidade resistente; ii) para a definir há que dispor da caracterização da capacidade resistente em torno dos valores do quantil de ordem 0,1%; iii) na caracterização experimental de parâmetros geotécnicos para se obter valores inferiores ao quantil de ordem 0,1% é, em regra, necessário realizar um número de ensaios superior a 100; iv) tal quantidade de ensaios é completamente inusual, donde se deriva a dificuldade, mesmo impossibilidade de caracterização experimental da cauda “esquerda” da distribuição da resistência. Ainda assim, considera-se que, sempre que possível, nas verificações da segurança, para além de se usar os fatores de segurança, se deve também procurar avaliar a probabilidade de rotura, o que proporciona uma visão bastante mais profunda e completa da questão da segurança da estrutura em estudo. Para realizar essa avaliação, entende-se que, sendo possível, se deve estudar a forma da dependência das variáveis secundárias em relação às primárias e decidir em conformidade a forma da distribuição a adotar.

Na Secção 3 mostra-se que o erro humano é a causa da maioria dos incidentes e acidentes que ocorrem na construção civil, na linha, aliás, do que ocorre noutras atividades. Por isso, a fiabilidade estrutural tradicional, que não considera os erros humanos como fatores de incerteza, tem de ser complementada com outras metodologias se se pretende ter uma avaliação adequada da fiabilidade das construções.

Na Secção 4 apontam-se as razões que justificam o atraso na consideração adequada do erro humano e os benefícios de o fazer, procede-se à tipificação e classificação dos erros humanos e descrevem-se sumariamente as quatro perspetivas de abordagem do erro humano em sistemas industriais: i) metodologia de segurança tradicional; ii) apreciação dos fatores humanos / ergonomia; iii) análise dos processos cognitivos (engenharia cognitiva); iv) abordagem sociotécnica. A primeira procura incentivar os comportamentos seguros; a segunda busca conceber os sistemas de forma a garantir que existe uma correspondência entre as capacidades humanas e as exigências desses sistemas; a terceira tenta compreender as causas subjacentes aos erros para que as condições indutoras de erro possam ser eliminadas na fonte; a quarta entra em consideração com o impacto das políticas de gestão e da cultura organizacional. Estas abordagens são complementares, mais do que concorrentes; todas têm um papel a desempenhar no âmbito de uma gestão integrada do erro humano, tendo em vista a redução dos acidentes. Neste capítulo trata-se também das metodologias para a consideração explícita do erro humano, descrevendo-se e discutindo-se algumas das que têm sido propostas.

Finalmente, na última Secção descrevem-se algumas características das previsões de custos e de benefícios e discutem-se as razões que justificam a imprecisão das previsões, a saber, razões técnicas, psicológicas e político-económicas. As explicações técnicas não parecem convincentes porque as distribuições das imprecisões estão longe de ser normais ou quase normais, com uma média perto de zero, (de fato, são não-normais, com médias expressivamente diferentes de zero) e porque a precisão das previsões não tem melhorado ao longo do tempo. Por isso, Flyvbjerg (2006) considera que as explicações psicológicas (propensão otimista) e políticas (deturpação estratégica) são mais adequadas para justificar as previsões imprecisas. Por fim introduz-se uma metodologia para lidar com as imprecisões.

7 – AGRADECIMENTO

O autor agradece a revisão do texto feita pelo colega António Topa Gomes, bem como as suas sempre oportunas e perspicazes contribuições.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, D. E. (1983). *Structural failures due to human error: what research to do?* NCR Publications Archive, National Research Council Canada.
- AICE (American Institute of Chemical Engineers) (1994). *Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York.
- Atkinson, A. R. (1999). *The role of human error in construction defects*. Structural Survey, Vol. 17, Number 2, pp. 231-236.
- Bea, R. G. (1995). *Quality, Reliability, Human and Organization Factors in Design of Marine Structures*. Proceedings of 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Paper OMAE 1232, Copenhagen, Denmark.
- Bea, R. G. (2000a). *Achieving Step Change in Risk Assessment & Management (RAM)*. Centre for Oil and Gas Engineering, University of Western Australia Press, Nedlands, Western Australia.
- Bea, R. G. (2000b). *Human & Organizational Factors in Design & Reliability of Offshore Structures*. Doctor of Philosophy Thesis, Centre for Oil and Gas Engineering, University of Western Australia Press, Nedlands, Western Australia.
- Bea, R. G. (2002a). *Human and Organizational Factors in Reliability Assessment and Management of Offshore Structures*. Risk Analysis, 22 (1), Soc. for Risk Analysis, New York, pp. 29-45.
- Bea, R. G. (2002b). *Human & Organizational Factors in Design and Operation of Deepwater Structures*. Proceedings of the Offshore Technology Conference, OTC 14293, Society of Petroleum Engrs., Richardson, TX, pp. 1-19.
- Bea, R. G. (2006). *Reliability and Human Factors in Geotechnical Engineering*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 132 (5), pp. 631-633.
- Benjamim, J. R.; Cornell, C. A. (1970). *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Branco, L. D. (2011). *Aplicação de Conceitos de Fiabilidade a Solos Residuais*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Butikofer, R. E. (1986). *Safety Digest of Lessons Learned*. American Petroleum Institute, API Publication 758, Washington, DC.
- Caldeira, L. (2002). *As análises de risco e as incertezas*. Atas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 4, pp. 2295-2311, Lisboa.
- Caldeira, L. (2005). *Análises de Risco em Geotecnia: Aplicação a Barragens de Aterro*, I&D Programa de Investigação em Geotecnia, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Cardoso, A. S. (2002). *Segurança e fiabilidade*. Atas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 4, pp. 2263-2294, Lisboa.

- Cardoso, A. S. (2004). *Modelação e segurança*. Atas do 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 4, pp. 133-176, Aveiro.
- Cardoso, A. S.; Matos Fernandes, M. (2001). *Characteristic values of ground parameters and probability of failure in design according to Eurocode 7*. Géotechnique 51, No. 6, pp. 519-531.
- Cardoso, A. S.; Matos Fernandes, M.; Brito, J. M. (1999). *Application of structural Eurocodes to gravity retaining wall seismic design conditioned by base sliding*. Proceedings of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp. 413-420, Lisboa.
- Cardoso, A. S.; Topa Gomes, A. (2010). *Gestão de riscos de construção. Instrumentação e observação. Planos e medidas de emergência. O Caso do Metro do Porto*. Tema 10, do 2º Curso da Comissão Portuguesa de Túneis e Obras Subterrâneas, Túneis e Obras Subterrâneas em Meio Urbano, 69 p., Lisboa.
- Duncan, J. M. (2000). *Factors of safety and reliability in geotechnical engineering*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 4, pp. 307-316.
- Flyvbjerg, B. (2006). *From Nobel prize to project management: getting risks right*. Project Management Journal, Vol. 37, No. 3, pp. 5-15.
- Flyvbjerg, B.; COWI. (2004a). *Procedures for dealing with optimism bias in transport planning: Guidance document*. UK Department for Transport, London.
- Flyvbjerg, B.; Holm, M. K. S.; Buhl, S. L. (2002). *Underestimating costs in public works projects: Error or lie?* Journal of the American Planning Association, 68(3), pp. 279-295.
- Flyvbjerg, B.; Holm, M. K. S.; Buhl, S. L. (2004b). *What causes cost overrun in transport infrastructure projects?* Transport Reviews, 24(1), pp. 3-18.
- Flyvbjerg, B.; Holm, M. K. S.; Buhl, S. L. (2005). *How (in)accurate are demand forecasts in public works projects? The case of transportation*. Journal of the American Planning Association, 71(2), pp. 131-146.
- Joschek, H. I. (1981). *Risk Assessment in the Chemical Industry*. Proceedings of the International ANS/ENS Topical Meeting on Probabilistic Risk Assessment, American Nuclear Society, New York.
- Kahneman, D. (1994). *New challenges to the rationality assumption*. Journal of Institutional and Theoretical Economics, 150, pp. 18-36.
- Kahneman, D.; Tversky, A. (1979a). *Prospect theory: An analysis of decisions under risk*. Econometrica, 47, pp. 313-327.
- Kahneman, D.; Tversky, A. (1979b). *Intuitive prediction: Biases and corrective procedures*. Studies in the management sciences: Forecasting. S. Makridakis & S. C. Wheelwright (Eds.), North Holland, Amsterdam.
- Kletz, T. A. (1994). *Learning from Accidents*. 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA.
- Lambe, T. W. (1973). *Predictions in soil engineering*. Géotechnique 23, No. 2, pp. 149-202.
- Lovaglio, D.; Kahneman, D. (2003). *Delusions of success: How optimism undermines executives' decisions*. Harvard Business Review, pp. 56-63.
- Madsen, H. O.; Krenk, S.; Lind, N. C. (2006). *Methods of Structural Safety*. 2nd ed., Dover Publications, Inc., New York.

- Matos Fernandes, M.; Brito, J. M.; Cardoso, A. S.; Vieira, C. S. (1997). *Estruturas de suporte: apresentação do Eurocódigo 7 e alguns estudos de aplicação*. Atas do Seminário Eurocódigo 7 (Projecto Geotécnico), pp. IV-35-59, Lisboa.
- Matousek, M.; Schneider, J. (1976). *Untersuchungen Zur Struktur des Sicherheit-problems bei Bauwerken*. Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 59, ETH. (referido por Allen, 1983).
- Meister, D. (1977). *Methods of Predicting Human Reliability in Man-Machine Systems. Human Aspects of Man-Machine Systems*. S. Brown & J. Martin (Eds.). Open University Press, Milton Keynes, UK.
- Neufville, R.; Weck, O.; Frey, D.; Hastings, D.; Larson, R.; Simchi-Levi, D.; Oye, K.; Weigel, A.; Welsch, R. (2004). *Uncertainty management for engineering systems planning and design*. Engineering Systems Symposium, MIT.
- Rasmussen, J. (1989). *Chemical Process Hazard Identification*. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 24, pp. 11-20. Elsevier Science Publishers Ltd., New York.
- Rasmussen, J. (1990). *Human Error and the Problem of Causality in Analysis of Accidents*. Human Factors in Hazardous Situations. D. E. Broadbent, J. Reason, & A. Baddeley (Eds.). Clarendon Press, Oxford, UK.
- Reason, J. T. (1990). *Human Error*. Cambridge University Press, Cambridge.
- SCOSS (2006). *A risk managed framework for ensuring robustness*. Standing Committee on Structural Safety, London.
- Soane, A. (2007). *CROSS spotlight on failures*. The Structural Engineer, August 2007.
- Sowers, G. F. (1993). *Human Factors in Civil and Geotechnical Engineering Failures*. J. Geotech. Eng., 119 (2), pp. 238-256.
- Stewart, M. G. (1992). *Simulation of Human Error in Reinforced Concrete Design*. Research in Engineering Design. Theory, Applications and Concurrent Engineering, 4, pp. 51-60.
- Swain, A. D. (1987). *Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure*. NUREG/CR-4772, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Uehara, Y.; Hasegawa, H. (1986). *Analysis of Causes of Accident at Factories Dealing with Hazardous Materials*. 5th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Vol. 1, Ch. 23, Société de Chimie Industrielle, Paris.
- U. S. Army Corps of Engineers (1999). *Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies*. CECW-EG, Technical Letter No. 1110-2-556, Department of the Army Washington, DC 20314-1000, USA.
- Vanston, J. H.; Vanston, L. K. (2004). *Testing the tea leaves: Evaluating the validity of forecasts*. Research-Technology Management, 47(5), pp. 33–39.
- Veiga Pinto, A. (2008). *Gestão de Riscos e Segurança de Barragens*. 3^o Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados, Lisboa (notas da apresentação oral).
- Vieira, J. (2011). *Só um Milagre nos Salva*. Editora Objectiva, Lisboa.
- Vrouwenvelder, T.; Holicky, M.; Sykora, M. (2009). *Modelling of human error*. Joint Workshop of COST Actions TU0601 and E55 (Robustness of Structures).

- Wachs, M. (1990). *Ethics and advocacy in forecasting for public policy*. Business and Professional Ethics Journal, 9(1–2), pp. 141–157.
- Wagenaar, W. A.; Hudson, P. T.; Reason, J. T. (1990). *Cognitive Failures and Accidents*. Applied Cognitive Psychology 4, pp. 273-294.
- Whitman, R. V. (2000). *Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering*. J. Geotech. Eng, ASCE, 126 (7), pp. 583-592.
- Williams, R. (2009). *This one will bring the house down*. ICE IStructE HSE SCOSS Prestige Lecture, Institution of Civil Engineers, London.
- Yao, J. T. P.; Kawamura, H. (2001). *On Structural Reliability*. Journal of Temporary Design in Architecture and the Environment, Vol. 1, No. 1, pp. 1-5.
- Zhou, C.; Kou, X. J. (2010). *Method of Estimating Human Error Probabilities in Construction for Structural Reliability Analysis Based on Analytic Hierarchy Process and Failure Likelihood Index Method*. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 15(3), pp. 291-296.