MEMÓRIAS
DA
ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE
LISBOA

CLASSE DE CIÊNCIAS

Engenharia e sociedade — uma visão baseada na prevenção de falhas

Paulo M. S. Tavares de Castro

ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE LISBOA

LISBOA • 2025

Título: Engenharia e sociedade — uma visão baseada na prevenção de falhas
Edição: Academia das Ciências de Lisboa
Data de edição: 2025
DOI: https://doi.org/10.58164/x10h-ex46

Engenharia e sociedade — uma visão baseada na prevenção de falhas

Paulo M. S. Tavares de Castro

RESUMO

A Mecânica da Fractura é uma área da Resistência de Materiais que principiou a ter desenvolvimento em Portugal a partir de finais dos anos setenta do século passado. Em Portugal, os passos iniciais incluíram a criação da Secção Técnica Fractura da Sociedade Portuguesa de Materiais e iniciativas como a 5.ª Conferência Europeia de Fractura (Lisboa, 1984), no quadro do *European Group on Fracture* (mais tarde designado *European Structural Integrity Society* – ESIS), ou o simpósio "Risk and Economic Evaluation on Failure and Malfunction of Systems" da *International Society for Technology, Law and Insurance* – ISTLI, (Lisboa, 1995). Alguns aspectos da actividade da comunidade técnico-científica portuguesa dedicada à fractura serão revistos, particularmente estudos de análise e prevenção de roturas que serão enquadrados no problema geral do risco em Engenharia. O risco envolve considerações sobre património e mesmo vida humana, proporcionando a ligação com a segunda parte da palestra, que aborda a evolução em Portugal dos estudos de "ciência, tecnologia e sociedade", sendo recordadas iniciativas como a *CTS: Revista de Ciência, Tecnologia e Sociedade* iniciada em 1987, e a *Colóquio/Ciências: Revista de Cultura Científica*, iniciada em 1988. Com recurso a alguns indicadores, refere-se concisamente o enquadramento geral destas actividades. Para concluir, é feita breve referência a aspectos de enquadramento contextual, nomeadamente a conceitos de economia comportamental, PIB e literacia.

Engineering and society – a view based on failure prevention

ABSTRACT

Fracture Mechanics is an area of Strength of Materials that gained expression in Portugal at the end of the seventies of the last century. In Portugal, the initial steps included the creation of the Fracture Technical Division of the

Portuguese Materials Society and landmark initiatives such as the 5th European Conference on Fracture (Lisbon, 1984) within the framework of the European Group on Fracture (later called the European Structural Integrity Society – ESIS), or the symposium 'Risk and Economic Evaluation on Failure and Malfunction of Systems' of the International Society for Technology, Law and Insurance – ISTLI, (Lisbon, 1995). Some aspects of the activity of the Portuguese fracture technical-scientific community will be reviewed, particularly studies on analysis and prevention of ruptures that will be framed within the general problem of risk in Engineering. The risk involves considerations about property and even human life, and provides the connection with the second part of the talk, which addresses the evolution in Portugal of studies on "science, technology and society", recalling initiatives such as *CTS: Revista de Ciência, Tecnologia e Sociedade* started in 1987, and *Colóquio/Ciências: Revista de Cultura Científica*, started in 1988. Using some indicators, the general framework of these activities is concisely referred to. To conclude, brief mention is made of contextual aspects, namely concepts of behavioural economics, GDP and literacy.

1. RISCO; FIABILIDADE.

Em temas da Engenharia, terminologias bem consensualizadas são uma base necessária para eficaz comunicação. Regressaremos a este preceito, mas para já note-se que *dano* é um resultado ou impacto adverso, *perigo* é qualquer fonte potencial de dano, *risco* é a probabilidade de um dano ocorrer sob circunstâncias definidas e *segurança* é a condição de não estar exposto — ou de estar protegido — de danos[1].

A definição de risco envolve a consideração de consequências de falhas e de frequência da sua ocorrência. Um exemplo é o risco de morte por acidente com automóveis, para um dado país, expresso em mortes por ano. O risco de morte por este tipo de acidente será calculado considerando as mortes por acidente e o número de acidentes por ano. Dimensionalmente,

$$\frac{\text{consequências}}{\text{intervalo de tempo}} = \frac{\text{consequências}}{\text{acidente}} \times \frac{\text{acidentes}}{\text{intervalo de tempo}} \qquad (1)$$

A representação gráfica de risco usada[2] por F. R. Farmer (da UKAEA – UK Atomic Energy Authority) viria a ser geralmente adoptada. Exemplos clássicos

de diagramas de Farmer são os apresentados pelos estudos pioneiros da utilização da energia atómica para fins civis de produção de energia eléctrica nos EUA. As Figuras 1 e 2, reproduzidas dos documentos originais — relatório Rasmussen[3, 4] — mostram a elevada confiança depositada na utilização da energia atómica para geração de electricidade, como é sugerido comparando essas curvas e as correspondentes a outras situações como incêndios, explosões, etc. O relatório Rasmussen é sintetizado, por exemplo, em Lees[5].

Os gráficos apresentando os resultados dos riscos societais usam, em geral, eixos logarítmicos, com as "consequências" no eixo horizontal (fatalidades, no caso do relatório Rasmussen) e a frequência cumulativa de ocorrência no eixo vertical.

Diagramas de Farmer são usados especialmente para o registo histórico de acidentes associados a uma actividade, para mostrar os resultados de uma análise quantitativa de risco, e para especificar critérios para avaliar a tolerabilidade do risco.

Os critérios de risco societal, expresso em curvas designadas F-N, podem ser representados como

$$P\left(N_d \geq n\right) < F\left(n\right) \tag{2}$$

com *F(n)* frequentemente expresso na forma

$$F\left(n\right) = A \times n^{-k} \tag{3}$$

onde *P* é a frequência cumulativa, N_d é o número de ocorrências, *k* é um factor frequentemente designado factor de aversão tipicamente compreendido entre 1 e 2, e *A* é uma constante.

A Figura 3 representa a equação anterior usando coordenadas logarítmicas. A inclinação da recta é *-k* e representa o grau de aversão a eventos envolvendo muitas fatalidades. Quando a inclinação é igual a -1, o critério de risco é denominado "neutro ao risco": o critério de risco ditaria que a frequência de um evento que resulta em 100 ou mais mortes deve ser 10 vezes menor que a frequência de um evento que resulta em 10 ou mais mortes.

Acidentes envolvendo elevado número de fatalidades são normalmente mais sensíveis do ponto de vista societal. Um elevado número de mortos

resultante de apenas um acidente atrai mais atenção dos meios de comunicação social do que o mesmo número de mortes dispersas por um grande número de pequenos acidentes.

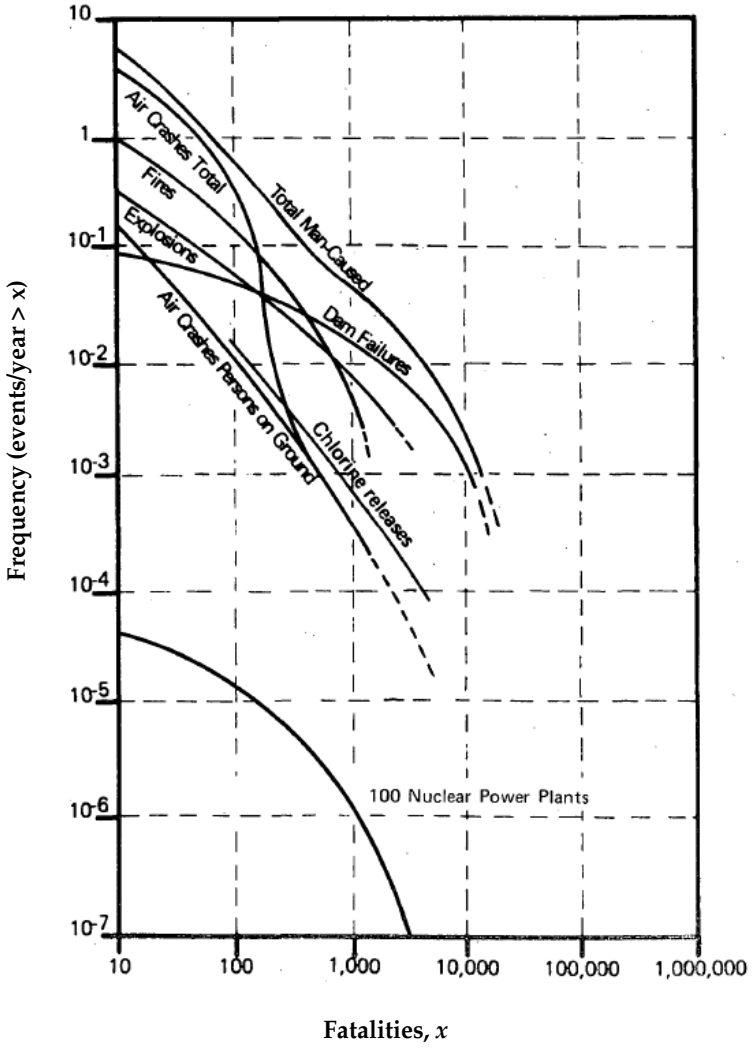

Figura 1. Frequência de eventos causados pelo homem envolvendo fatalidades (inclui a consideração de 100 centrais nucleares). Reproduzido de Rasmussen[3], 1975, p.119.

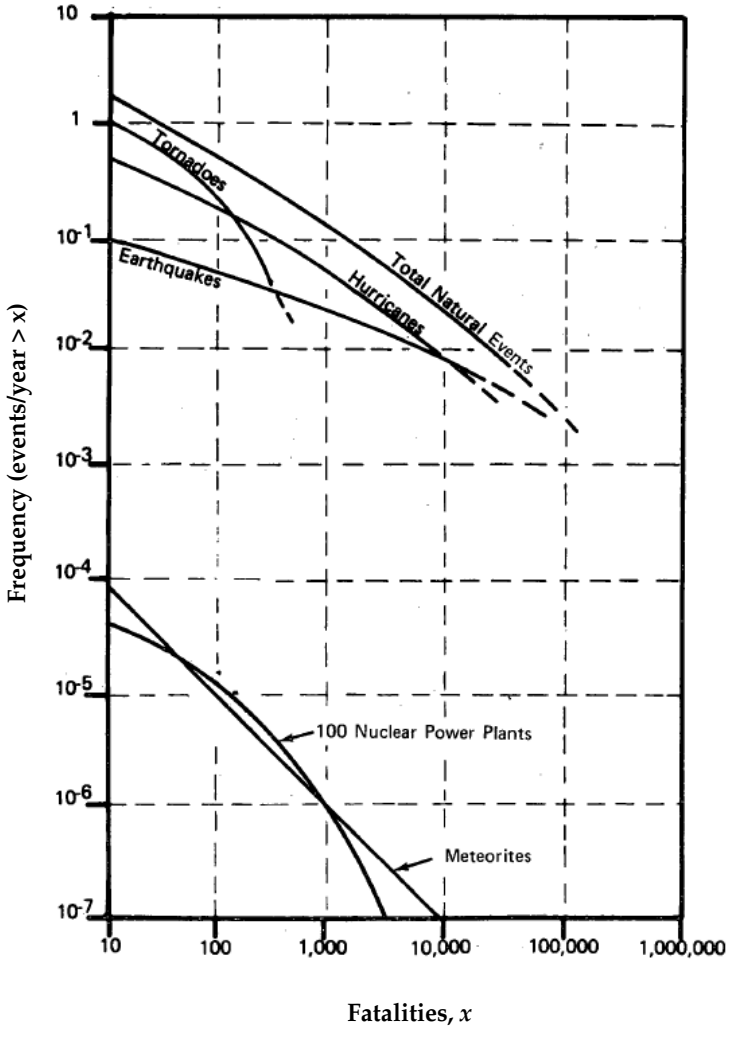

Figura 2. Frequência de eventos naturais envolvendo fatalidades. Comparação com 100 centrais nucleares. Reproduzido de Rasmussen[3], 1975, p.120.

Um critério de risco para o qual $k>1$ é considerado mais avesso ao risco, isto é, reflecte uma maior preocupação com eventos que provoquem um maior número de vítimas mortais. Se a inclinação da curva F-N for igual a -2, o critério de risco ditaria que a frequência de um evento que resulta em 100 ou mais mortes deveria ser 100 vezes menor do que a frequência de um evento que resulta em 10 ou mais mortes. A Figura 3 ilustra estas considerações.

Tipicamente são apresentadas duas curvas para caracterizar um critério para avaliar a tolerabilidade do risco: uma superior, que não pode ser excedida, e uma inferior, que representa algum consenso sobre efeitos negligenciáveis. Situações caracterizadas por pontos acima da primeira curva são inaceitáveis; para situações representadas por pontos abaixo da primeira curva vigora o preceito ALARP (*as low as reasonably practicable*). Diferentes organizações, normas e legislações nacionais escolhem diferentes valores para esses limites. Sínteses destes tópicos são por exemplo apresentadas pelo Center for Chemical Process Safety do American Institute of Chemical Engineers[6], ou por Marhavilas e Koulouriotis[7].

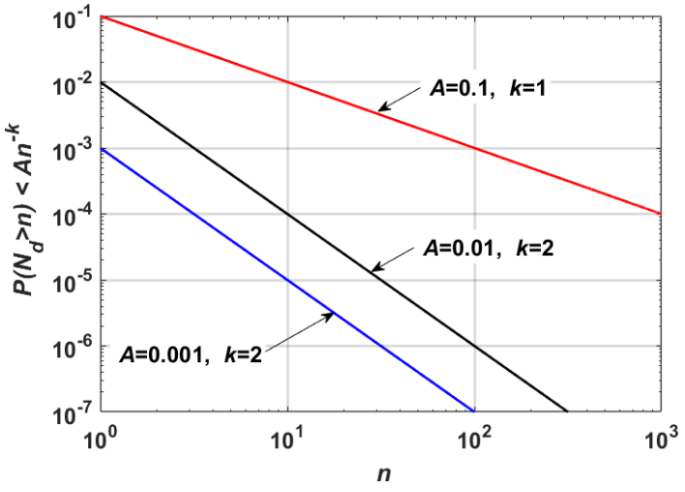

Figura 3. Curvas de critérios para avaliar a tolerabilidade do risco. N_d é o número de fatalidades num acidente.

Esquematicamente, a relação entre custo de controlo do risco e risco, é apresentada na Figura 4, adaptada de Ayyub[8]. A Figura 5, adaptada de Wolfram[9], ilustra esquematicamente o conceito de factor de segurança (Figura 5a) e o equilíbrio entre a pressão/incentivo para aumentar a segurança e o imperativo económico de controlar os custos (Figura 5b, e 5c), levando à escolha da solução que garante o factor de segurança aplicável com o custo mínimo (Figura 5c).

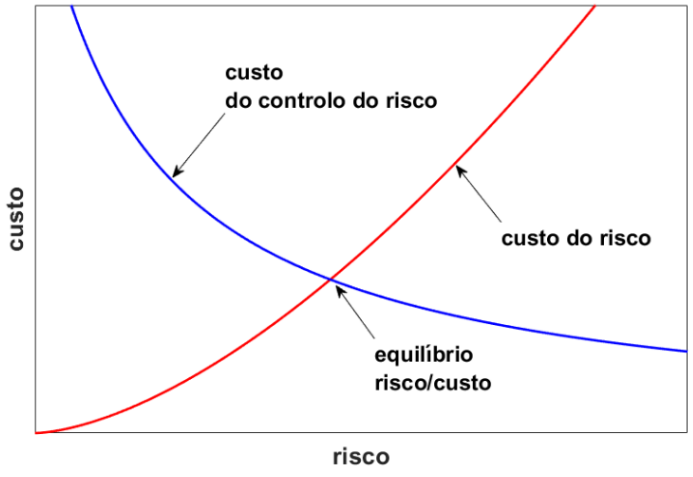

Figura 4. Representação esquemática da relação entre custo de controlo do risco e risco, adaptada de Ayyub[8], 2005.

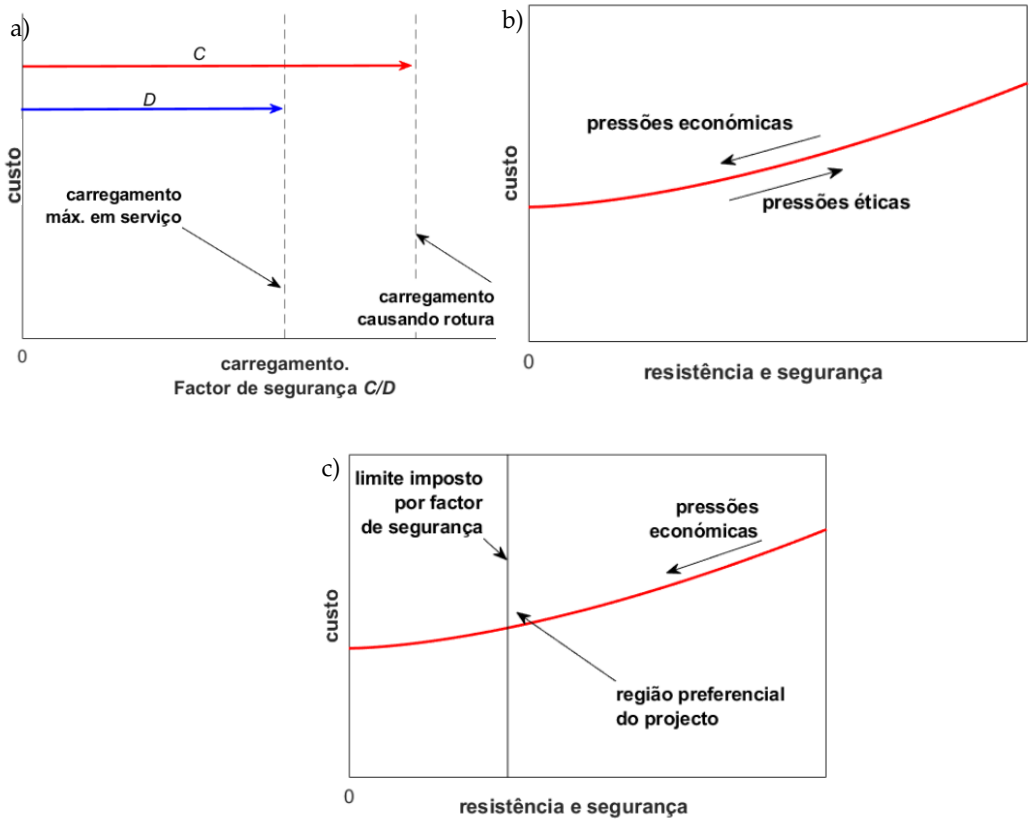

Figura 5. Representação esquemática da relação custo/segurança, adaptada de Wolfram[9], 2009.

A Figura 5a sugere valores determinísticos de carga e de resistência. Trata-se de uma visão simplificada de uma realidade mais complexa, em que quer a carga quer a resistência são variáveis probabilísticas.

Sejam S, R as variáveis aleatórias carregamento e a resistência, aqui supostas independentes e normalmente distribuídas. A Figura 6 mostra as funções densidade de probabilidade (fdp) e ilustra a possível ocorrência de falhas (na área de sobreposição das duas representações).

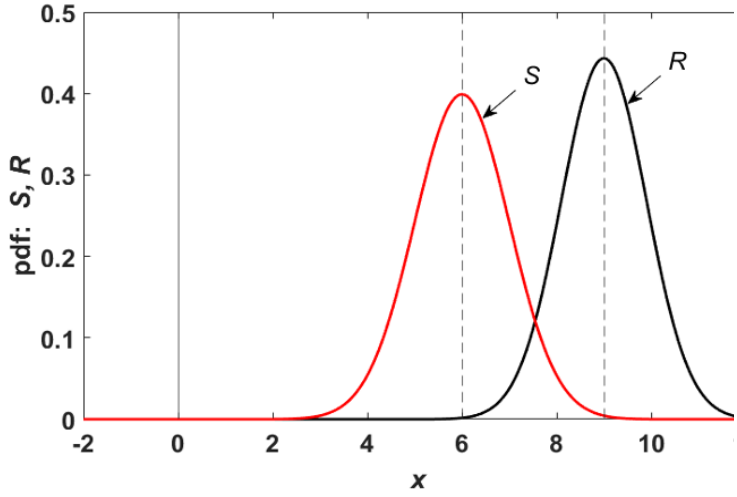

Figura 6. Representação esquemática da carga (S) e resistência (R). (neste ex. esquemático foram usados R= 9, S =6, S_R=0.9 e S_s = 1.0, em unidades adequadas; gráfico Matlab).

A probabilidade de sobrevivência, R_0, é

$$R_0 = P[R > S] \tag{4}$$

e a probabilidade de falha P_f é

$$P_f = P[R < S] = P[(R - S) < 0] \tag{5}$$

sendo

$$R_0 = 1 - P_f \tag{6}$$

A margem de segurança Z é

$$Z = R - S \tag{7}$$

Sendo $\overline{Z}$ a média de Z, $\overline{Z} = \overline{R} - \overline{S}$, e representando o desvio padrão de Z, R e S por S_Z, S_R e S_S, teremos:

$$S_Z = \sqrt{S_R^2 + S_S^2} \tag{8}$$

Em fiabilidade define-se índice de segurança (*reliability index*) β como

$$\beta = \frac{\overline{Z}}{S_Z} = \frac{\overline{R} - \overline{S}}{\sqrt{S_R^2 + S_S^2}} \tag{9}$$

O índice β é o número de desvios padrão entre carga média e resistência média; aumentar β implica diminuir a probabilidade de falha P_f. Recorrendo de novo ao exemplo esquemático da Figura 6, a Figura 7 mostra as funções densidade de probabilidade (pdf) e cumulativa (cdf) de Z.

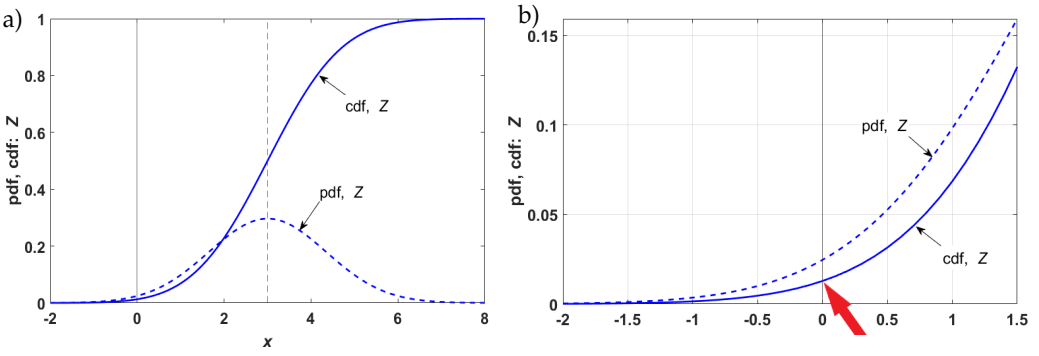

Figura 7. Funções densidade de probabilidade (pdf) e cumulativa (cdf) de Z. (dados numéricos da Figura 6); b) representa uma ampliação do detalhe de interesse em a). A seta vermelha indica, na curva cdf, a probabilidade de falha para esta situação.

Em fiabilidade é de interesse a relação entre o índice de segurança β e a probabilidade de falha P_f., mostrada na Figura 8. Como foi visto, $\beta = \overline{Z}/S_Z$, e sendo ϕ a função distribuição cumulativa, será:

$$P_f = P(Z < 0) = \Phi\left(\frac{0 - \overline{Z}}{S_Z}\right) = \Phi(-\beta) \tag{10}$$

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \tag{11}$$

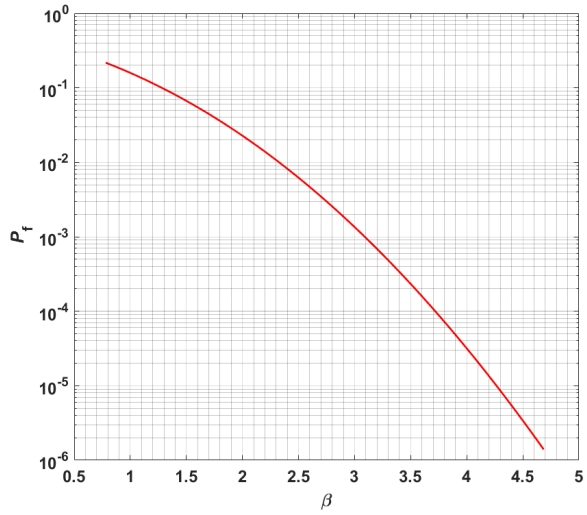

Figura 8. Relação entre probabilidade de falha P_f e índice de segurança β (Matlab).

Diferentes áreas da engenharia e diferentes situações envolvem diferentes valores de β. Pedro Albrecht (University of Maryland, USA e Fulbright Scholar na FEUP, em 1987), por exemplo, discute metodologias de fiabilidade[10] tendo em vista a fadiga em pontes metálicas, que viriam a ser utilizados numa contribuição de um grupo de investigadores do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da FEUP para o estudo do Instituto de Construção da mesma instituição relativo à utilização da ponte Luiz I pelo metro do Porto[11].

2. FADIGA; MECÂNICA DA FRACTURA

Como outros tópicos da Mecânica dos Sólidos, a Mecânica da Fractura progrediu graças à interacção entre investigadores ocupados com a formulação de modelos de interpretação da realidade experimental e experimentalistas trabalhando nos laboratórios de ensaios de materiais e de estruturas. Entre os primeiros, conta-se George Irwin que identificou a importância do parâmetro factor de intensidade de tensão, K, como caracterizador do campo de tensões linear elástico na extremidade de uma fenda[12,13,14]. K viria a tornar-se um parâmetro fundamental para a descrição do fenómeno da propagação estável ou instável de fendas.

Uma síntese de conceitos básicos da Mecânica da Fractura foi apresentada em comunicações à Academia das Ciências de Lisboa[15,16]. Recorda-se aqui o papel do factor de intensidade de tensão, K, na caracterização do campo de tensões na vizinhança da extremidade de uma fenda de comprimento a num sólido sujeito à tensão remota σ, equação 12

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \tag{12}$$

onde Y é um parâmetro dependente da geometria do caso em estudo. Em situações de aplicabilidade da Mecânica da Fractura Linear Elástica, K apresenta um valor crítico, correspondente à propagação instável da fenda pré-existente, K_c. A substituição de K por K_c na equação 12 permite então avaliações quantitativas de carga (ou tensão) provocando a rotura, σ_c, ou do comprimento crítico da fenda, a_c, equações 13 e 14

$$\sigma_c = K_c / Y\sqrt{\pi a} \tag{13}$$

$$a_c = K_c^2 / \left(Y^2\sigma^2\pi\right) \tag{14}$$

Um marco no desenvolvimento da Mecânica da Fractura é a publicação, em 1964, pela American Society for Testing and Materials (ASTM) das apresentações e discussões no simpósio "Fracture Toughness Testing and its Applications", incluindo contribuições de Paul Paris, George C. Sih e George Irwin, entre outros[17]. Contemporâneo com estes desenvolvimentos, outro marco foi a identificação por Paul Paris da relação entre a gama do factor de intensidade de tensão, ΔK, e a propagação estável de fendas por fadiga, isto é, em resultado de carregamentos não constantes em especial os que variam ciclicamente[18,19]. Note-se que quer o conceito de factor de intensidade de tensão K, quer a relação da sua gama ΔK com a velocidade de propagação de fendas por fadiga não têm uma base na ciência dos materiais, ou a nível atómico mas, pelo contrário, são correlações cuja legitimidade depende da sua eficácia na descrição de processos de propagação de fendas e cuja importância decorre da capacidade que proporcionam de prevenção das consequências em geral muito negativas desses fenómenos (roturas por fractura instável ou fractura por fadiga). Esta origem é muito bem

enfatizado por Hutchinson no seu discurso de aceitação da Timoshenko Medal da ASME[20].

As equações 12 a 14 foram escritas supondo que o carregamento do sólido fendido cria abertura da fenda em modo I, o mais comummente encontrado. Modos de fractura (I, II e III) classificam o campo de tensões na extremidade da fenda: no modo I a abertura é causada por tensão ortogonal ao plano local da superfície da fenda; no modo II por tensão paralela à superfície da fenda, mas ortogonal à sua frente e no modo III por tensão paralela à superfície da fenda e à sua frente. I, II e III são índices usados para caracterizar a situação de interesse. Existem diversas compilações de soluções de factor de intensidade de tensão, nomeadamente, a devida a Tada, Paris e Irwin[21]. Uma solução para o factor de intensidade de tensão em modo I (K_I) para placa finita remotamente traccionada pela tensão normal σ, contendo uma fenda central de comprimento 2a, é:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}\sqrt{\frac{2b}{\pi a}\tan\frac{\pi a}{2b}} \tag{15}$$

Neste caso, a correcção de largura finita (2b=W) é:

$$Y = \sqrt{\frac{2b}{\pi a}\tan\frac{\pi a}{2b}} \tag{16}$$

K_I para placa contendo uma fenda central de comprimento 2a, cujas faces são abertas por um par de forças concentradas actuando no meio das faces (carregamento frequentemente designado em Inglês *wedge force*), é:

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{\pi a}}\left(1.297 - 0.297\cos\frac{\pi a}{2b}\right)\sqrt{\frac{\pi a}{b}\Big/\sin\left(\frac{\pi a}{b}\right)} \tag{17}$$

onde P é força por unidade de espessura. Neste caso o factor de correcção para largura finita (2b) é:

$$Y = \left(1.297 - 0.297\cos\frac{\pi a}{2b}\right)\sqrt{\frac{\pi a}{b}\Big/\sin\left(\frac{\pi a}{b}\right)} \tag{18}$$

A referência aos dois casos acima (equações 15 a 18) resulta da sua importância histórica no desenvolvimento da Mecânica da Fractura, já que os dois casos foram usados por Paris nas suas clássicas experiências de caracterização de velocidade de propagação de fendas em condições de fadiga (isto é,

carregamento cíclico). O resultado é a conhecida relação empírica designada lei de Paris,

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K_I\right)^m \tag{19}$$

onde da/dN é a velocidade de propagação, ΔK_I é a gama do factor de intensidade de tensão, C e m são constantes dependentes do material, obtidas experimentalmente. Paris chegou a esta conclusão ensaiando dois tipos de provetes — placas com fenda central, carregadas remotamente pela tensão cíclica ($\Delta\sigma$) e placas com fenda central com carregamento consistindo em carga cíclica (ΔP) concentrada e aplicada no meio das faces da fenda (*wedge force*). Foi visto acima que a solução do factor de intensidade de tensão para os dois casos é, evidentemente, distinta. Porém, medindo as velocidades de propagação associadas a idênticos valores de ΔK_I, nos dois tipos de ensaios, Paris *et al*. concluíram que da/dN era o mesmo para idêntico valor de ΔK_I, assim legitimando a equação 19[18,19]. A equação 19 viria a ser reconfirmada em subsequentes trabalhos em muitos outros tipos de provetes, confirmando a dependência de da/dn com ΔK_I.

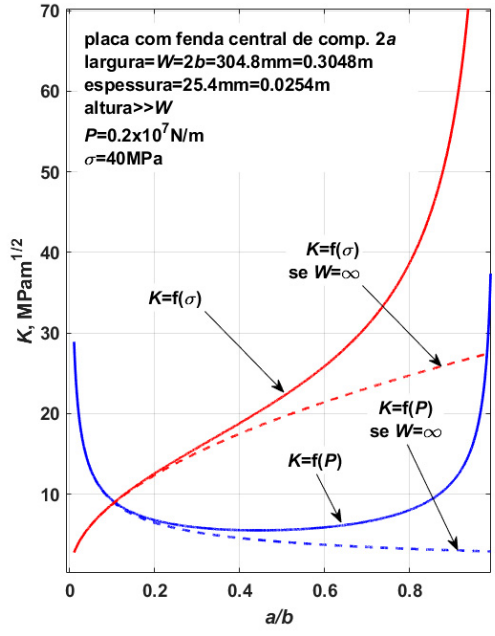

Figura 9. Dependência do factor de intensidade de tensão (K) com o comprimento da fenda ($2a$) em duas situações distintas. (Modo I).

A título de ilustração, a Figura 9 mostra a dependência do factor de intensidade de tensão (K) com o comprimento da fenda ($2a$) em duas situações distintas, sempre em modo I. Como é de esperar, a velocidade de propagação da/dN medida no caso da placa remotamente traccionada é crescente — para idêntico carregamento remoto, conforme a fenda aumenta a velocidade da/dN aumenta também. Já o contrário sucede na situação da carga concentrada actuando no meio da fenda (curva azul) — enquanto K diminui com o aumento da fenda, a, verifica-se a diminuição de da/dN. A Figura 9 ilustra ainda a necessidade de consideração do parâmetro corrector Y, ilustrando a tracejado o que seriam as soluções de K caso a largura do provete fosse infinita. De notar, finalmente, que as soluções de K apresentadas na Figura 9 devem, na prática, ser limitadas por duas considerações, dependentes do material: por um lado, em caso algum K poderá exceder Kc, já que nessa altura ocorre a propagação instável da fenda pré-existente e, por outro, lado, estas considerações são feitas no contexto da Mecânica da Fractura Linear Elástica, impondo-se a avaliação da deformação plástica associada, desde logo, considerar apenas valores de comprimento de fenda (ou de a/b) limitados a situações em que a tensão no ligamento não-fendido esteja, com uma margem adequada, abaixo da tensão de cedência.

A Figura 10 apresenta, para a liga de Al 2024-T3, comummente usada em estruturas aeronáuticas, curvas de da/dN *versus* ΔK. Chama-se a atenção para a Figura 10 mostrar curvas baseadas em ΔK e em ΔK efectivo (ΔK_{eff}). Qual a diferença? Sucede que subsequentemente aos estudos de Paris acima referidos, se verificou que, em fadiga, a fenda permanece fechada durante parte de um ciclo de carga, importando então caracterizar qual a parte do ciclo em que a abertura se verifica. Isso conduz à definição de um valor de ΔK_{eff}, que tipicamente será menor (quando muito igual) ao valor de ΔK. Embora se apresentem apenas dois resultados para a dependência de da/dN com ΔK e outros dois para a dependência com ΔK_{eff}, a Figura 10 visa chamar a atenção para a dispersão encontrada, que pode ser resultado de diferentes *batches* de material, eventual efeito de orientação da fenda relativamente à direcção de laminagem, critérios de definição de ΔK_{eff}, eventuais imprecisões laboratoriais, entre outras fontes.

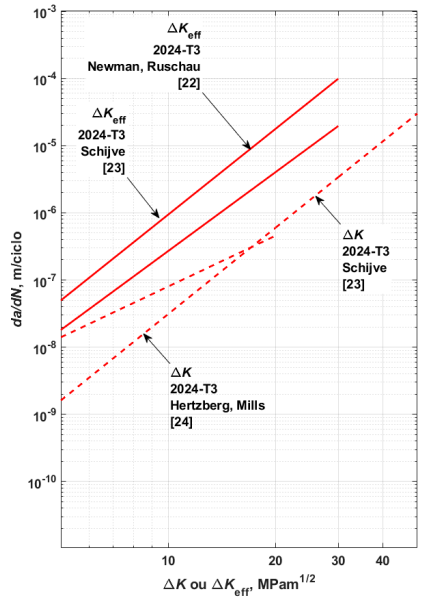

Figura 10. Velocidade de propagação de fendas por fadiga, liga de Al 2024-T3. Fontes dos dados: Newman e Ruschau[22], Schijve[23], Herzberg e Mills[24].

Os diagramas, em coordenadas logarítmicas *da/dn* versus ΔK, por vezes exibem mais do que uma região aproximadamente linear (ver, por exemplo, Figuras 4 e 5 de Newman Jr.[25]). Com apenas uma região aproximadamente rectilínea, ou com mais do que uma, essa região, ou cada uma dessas regiões, pode ser caracterizada por uma equação como a equação 19. Muito frequentemente os valores de C e m não são dados explicitamente na literatura, mas são facilmente obtidos através da consideração de dois pontos (1 e 2), originando um sistema simples de duas equações[26]:

$$\begin{cases} \log\left(\left(da/dN\right)_1\right) = m\log\left(\Delta K_1\right) + \log C \\ \log\left(\left(da/dN\right)_2\right) = m\log\left(\Delta K_2\right) + \log C \end{cases} \tag{20}$$

o que também pode facilitar a determinação de C e m quando não sejam usadas unidades do SI, mas sim, do US Customary System, ou Imperial. Foi assim que se obtiveram os dados da Figura 10. Resta referir que a procura de valores de propriedades mecânicas de materiais estruturais, para além dos elementares tensão de cedência e de ruptura, pode apresentar alguma dificuldade. Esforços pioneiros de sistematização de dados são as compilações de Liebowitz[27], os artigos

de Hudson e Seward[28,29,30] e de Smith[31]. Entre a literatura corrente, destaca-se o MMPDS[32], agora preparado pelo Battelle Memorial Institute, e de que a última edição é de 2024, e o software NASGRO, que disponibiliza uma extensa lista de propriedades de materiais estruturais.

A prevenção de falhas tem enorme valor económico para a sociedade, como discutido com exemplos concretos numa outra secção deste texto. A enorme relevância económica das falhas mecânicas suscitou o interesse de companhias de seguros; a Allianz, por exemplo, logo em 1978, publicou um livro sobre o tema da prevenção de falhas, de grande valia técnica[33]. Os primeiros estudos sistemáticos sobre as consequências económicas de falhas devem-se a investigadores do National Bureau of Standards – NBS (actualmente National Institute of Standards and Technology – NIST), nos EUA; o primeiro concentrou-se nas consequências da corrosão[34]; subsequentemente, foi publicado o estudo sobre as consequências económicas da fractura[35] revelando que essas falhas representavam cerca de 4% do PIB dos Estados Unidos. Por iniciativa do Grupo Português de Fractura (mais tarde designado Secção Fractura da Sociedade Portuguesa de Materiais – SPM), foi proposta e aceite pela Comunidade Europeia a realização de um estudo sobre as consequências na Europa, animado por Luciano de Faria (IST), que apontou para resultados semelhantes ao obtidos pelo NBS, nos EUA[36].

Na linha do interesse por estes aspectos, outra iniciativa da Secção Fractura da SPM, foi a realização, em Lisboa, em 1995, do simpósio "Risk and Economic Evaluation on Failure and Malfunction of Systems" no quadro da International Society for Technology, Law and Insurance – ISTLI, que juntou peritos quer dos aspectos tecnológicos quer dos aspectos económicos[37].

3. METODOLOGIA; ROUND-ROBIN PROGRAMMES

Programas em que diversas equipas de investigadores procuram, independentemente, soluções para um determinado problema, e depois, comparam os resultados a que chegaram — designados *round-robin programmes* —, são um dos mecanismos de avanço da Mecânica da Fractura. Mais genericamente, para materiais avançados, os *round-robin programmes* são a base do projecto VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) acordado na reunião do G7, em Versalhes em 1982. As actividades VAMAS abrangem países de diversos continentes, bem como a União Europeia. Estritamente europeu, o

BCR – Community Bureau of Reference, também promoveu *round robin programmes*, nomeadamente, com intervenção da Universidade do Porto[38], tendo sido entretanto integrado no Joint Research Centre – JRC, nomeadamente quanto à disponibilização de materiais de referência.

Os *round robin programmes* visam a formulação de procedimentos normalizados para ensaio, como é ilustrado no campo de medições de tenacidade de aços [38,39,40,41], e no campo da fractura interlaminar de compósitos[42], ambos com participação de equipas do DEMec da FEUP da responsabilidade de P. T. de Castro no primeiro caso (aços) e de A. Torres Marques no segundo (compósitos). Outros programas com envolvimento da FEUP foram os relativos a modelação de ensaios de tenacidade em condições elasto-plástica de provetes CT[43] e à modelação do comportamento de um reservatório de pressão usado na indústria de geração de energia eléctrica por via nuclear[44], ambos coordenados por I. Milne, do CEGB do Reino Unido. No primeiro (comportamento elasto-plástico de provetes CT), a questão em estudo era a capacidade de modelar adequadamente o comportamento não linear desses provetes, em que a não linearidade resulta da acção simultânea de dois fenómenos: *i*) a plastificação do ligamento não fendido e *ii)* a propagação lenta e estável da fenda pré-existente nos provetes (fenómeno designado em inglês *ductile tearing*). No segundo caso, tratou-se de um reservatório de pressão contendo uma fenda de dimensões devidamente caracterizadas, que foi devidamente instrumentado e levado até à rotura, sendo o objecto do *round robin programme* a modelação desse ensaio. Em ambos os casos, a existência de dados experimentais completos, inicialmente apenas conhecidos pelo coordenador do *round robin programme*, permitiu testar a eficácia de diversos modelos alternativos, uns complexos e outros mais simplificados, já que os diversos resultados foram comparados entre eles e, sobretudo, com o padrão representado pelo comportamento experimentalmente observado. Assim se pôde convergir para modelos óptimos, ou mesmo, para modelos aproximados em que se tem uma noção quantitativa do erro envolvido na aproximação ou aproximações realizadas.

4. ANÁLISE E PREVENÇÃO DE ROTURAS

Uma das revistas de circulação internacional nas comunidades académica e técnico-científica dedicadas ao estudo de roturas ocorridas em serviço de componentes e de estruturas é a *Engineering Failure Analysis*, de que Virginia Infante (IST) é, nesta data, *Subject Editor for Transport Engineering*. A área de conhecimento visa não só a análise de roturas, mas também a sua prevenção; está, portanto, no centro de actividades de Engenharia, em que a prevenção de danos, sejam eles económicos e/ou físicos para pessoas, é um desiderato maior. Henry Petroski (1942–2023), professor de Engenharia Civil na Duke University e um dos mais distintos divulgadores do papel da falha no progresso da Engenharia, respondia à pergunta "o que é a Engenharia?" dizendo "*engineering is achieving function while avoiding failure*"[45]. Neste quadro, a importância da clareza de comunicação e da obediência a princípios éticos não pode ser exagerada, como bem exemplificado no acidente do *space shuttle* Challenger, ver Petroski[46], Casamayou[47], o relatório oficial – Rogers Commission report[48] – e trabalhos do U.S. Senate[49] e da U.S. House of Representatives[50].

Uma actividade característica dos Engenheiros com interesses na área da fadiga e da mecânica da fractura é a análise de roturas com vista a identificar as suas causas e a prevenir futuras ocorrências. Existe abundante literatura sobre o tema que, para além das áreas de conhecimento acima indicadas — fadiga e fractura —, envolve o domínio de muitas outras, dada a variedade de causas possíveis: corrosão, fluência, tribologia, etc. Uma primeira antologia de *case-studies* de aplicações da Mecânica da Fractura, devida a Rich e Cartwright, foi publicada em 1977[51]. Artigos de síntese, de natureza metodológica e focados nos aspectos fractura e fadiga, são por exemplo, de Castro *et al*.[52] e de Castro e Fernandes[53].

Ao contrário de tantas áreas da C&T, como robótica ou inteligência artificial, que levantam problemas éticos a ser discutidos no âmbito das abordagens de ciência e sociedade, a Mecânica da Fractura aplicada à análise de roturas não suscita problemas éticos ou sociais específicos. Mas, evidentemente, problemas éticos são muito frequentemente suscitados pelas circunstâncias em que as falhas ocorrem, o que invoca o papel dos *whistleblowers,* ilustrado pelo depoimento de S. Salehpour, em Abril de 2024, relativo a problemas na empresa aeronáutica Boeing, perante o Permanent Subcommittee on Investigations do U.S. Senate[54].

5. SERENDIPIDADE

O papel do acaso ou acidente na evolução da ciência e de cientistas é um facto bem conhecido, a que se associa a palavra serendipidade vinda do inglês *serendipity*. A palavra foi criada por Horace Walpole, em 1754, como descrito pelo sociólogo Robert Merton[55].

Os factos de natureza pessoal que a seguir descrevo não mereceriam qualquer referência, não fora a circunstância de proporcionarem uma ilustração de serendipidade, que tenho por sugestiva. Logo após obter o doutoramento no Reino Unido, em 1980, trabalhando em fractura de aços usados em construção soldada, dediquei boa parte do tempo na Universidade do Porto a aplicações das técnicas em que me especializei — fractura e fadiga de materiais e de estruturas — tendo, juntamente com colegas reunido, ao fim de poucos anos, um considerável volume de diversificadas intervenções sobretudo relativas a problemas de roturas em equipamentos mecânicos.

Os passos iniciais incluíram o envolvimento na criação do GPF – Grupo Português de Fractura, subsequentemente integrado na Sociedade Portuguesa de Materiais onde constituiu a Secção Técnica Fractura. A esta se devem iniciativas como a 5.ª Conferência Europeia de Fractura (Lisboa, 1984), no quadro do European Group on Fracture (mais tarde designado European Structural Integrity Society – ESIS), na qual conheci, entre muitos outros peritos, o Professor Karl-Heinz Schwalbe. Passados uns anos, recebi um primeiro convite para me associar a uma candidatura a um projecto de I&D da UE relativo a integridade de estruturas aeronáuticas – o projecto SMAAC – Structural Maintenance of Ageing Aircraft. Não tendo estado, até então, associado a projectos de aeronáutica, encarei com muito interesse o desafio; a proposta viria a ser aprovada e, o projecto, envolvendo as principais empresas da indústria aeronáutica europeia e alguns dos laboratórios europeus da área, decorreu com sucesso, sendo o primeiro de diversos grandes projectos nessa área que ocuparam substancialmente os meus esforços de I&D (SMAAC, ADMIRE, DATON, …). Quando um dia perguntei ao coordenador do projecto SMAAC por que razão me convidara, já que não me conhecia pessoalmente quando procurou o meu envolvimento, a resposta foi "*procurei ter um parceiro Português e perguntei ao Professor Schwalbe quem me recomendaria*". Assim apareceu o meu nome, ilustrando o acaso que levou ao meu envolvimento na aeronáutica — ter conhecido um colega numa conferência, que mais tarde sugeriu o meu nome!

6. AERONÁUTICA E ESPAÇO

Comunicações à Academia apresentaram sínteses de conceitos envolvidos na avaliação da integridade estrutural de aviões[56,57]. Tal como nos aviões civis ou militares, também no espaço a Mecânica da Fractura desempenha um papel fundamental na garantia de segurança. A Mecânica da Fractura é aplicada em abundante literatura técnica como normas, procedimentos, etc. Reflectindo o progresso científico e tecnológico essa literatura é continuamente actualizada por organizações relevantes, incluindo procedimentos adoptados para lidar com o problema da fractura por organizações como por exemplo: a NASA[58], a ESA[59], laboratórios[60], forças armadas[61] ou organizações internacionais tal como o AGARD (AGARD-AG-176[27] foi uma referência repetidamente utilizada nos inícios do ensino e investigação em Fractura na FEUP, nos anos oitenta).

Esses documentos resultam de investigação levada a cabo por muitas organizações como universidades e laboratórios associados ou não a universidades. Como ilustração, refiro um projecto da ESA liderado pela MT Aerospace de Augsburg, visando caracterizar o comportamento de uma liga de Al-Li para uso em tanques criogénicos fabricados por friction stir welding (FSW). Aspectos deste estudo, realizado no quadro do desenvolvimento do lançador Ariane 5[62], são discutidos por exemplo no evento da ESA relativo a estruturas[63,64], e mais tarde no evento AeroMat de 2011[65].

7. SUSTENTABILIDADE NA AERONÁUTICA

A sustentabilidade está no centro das preocupações actuais. No passado contam-se reflexões como as de Lewis Mumford[66] sobre *superfluous power* e geração de gastos desnecessários, invocando o trabalho pioneiro de Stuart Chase "*The Tragedy of Waste*"[67], publicado em 1925, e prenunciando o paradigma da "economia circular".

A publicação, em 1972, do estudo "*The Limits to Growth*"[68] do Clube de Roma ajudou a divulgar a ideia de sustentabilidade. Em 1987, o relatório Brundtland visou conciliar o desenvolvimento económico e a proteção dos equilíbrios sociais e ambientais, definindo desenvolvimento sustentável como a satisfação das necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades[69]. Recentemente, a Organização das Nações Unidas (ONU) consagrou 17 objectivos de desenvolvimento

sustentável[70], que abarcam exaustivamente contribuições para um futuro viável para a humanidade.

A diversidade de problemas que devem ser enfrentados — como por exemplo a sustentabilidade do espaço[71]—, estimula a ocasional proposta de novos "objectivos" a somar aos 17 definidos pela ONU. Exemplos incluem igualdade racial (Presidente Lula na 78.ª sessão da Assembleia Geral da ONU em 19 de Setembro de 2023), a acessibilidade, etc. De alguma forma, os novos "objectivos" propostos estão incluídos em algum dos 17 objectivos originais, mas, aos olhos dos proponentes, a sua explicitação separada visa enfatizar a respectiva importância.

De relevo neste artigo é a sustentabilidade no tocante ao clima, implicando a descarbonização, particularmente nos transportes, nomeadamente o aeronáutico. A sustentabilidade é tema recorrente da comunidade aeronáutica e é o *leitmotiv* de importantes iniciativa da EU, como o programa "Clean Sky" e a sua continuação, "Clean Aviation"[72], com orçamentos da ordem dos milhares de milhões de Euros (*billion* – 10^9 — na terminologia anglo-saxónica) e que têm a forma de *joint undertaking* (JU), implicando cofinanciamento de empresas e da UE.

Tendo sido membro do Scientific Committee do programa Clean Sky 2, no período 2018–2021, apreciei os esforços levados a cabo no sentido da descarbonização do sector aeronáutico europeu, reflectidos no estudo[73]; o programa Clean Sky 2 visava reduzir o consumo de combustível e as emissões de CO_2 , No_x e ruído em 20-30%, relativamente às melhores práticas de 2014. O corrente "Clean Aviation" expande a ambição: "reduções líquidas de CO_2 de 86-90% serão alcançadas graças a novas aeronaves e combustíveis com baixo ou zero carbono"[74].

Uma contribuição para a sustentabilidade virá da generalização de *digital twins*, gémeos digitais de estruturas e outros sistemas, visando optimizar o seu ciclo de vida, informado pela contínua interacção da realidade física com o modelo digital através de sensorização, tratamento de grandes quantidades de dados e inteligência artificial para completar o modelo digital. A Figura 11, adaptada de uma recente apresentação de Karen Willcox[75], sugere esquematicamente esta interacção realidade física/modelo digital. Várias referências[76,77,78] apresentam sínteses da aplicação do conceito em aeronáutica, um assunto de que um dos artigos pioneiros é de 2012[79].

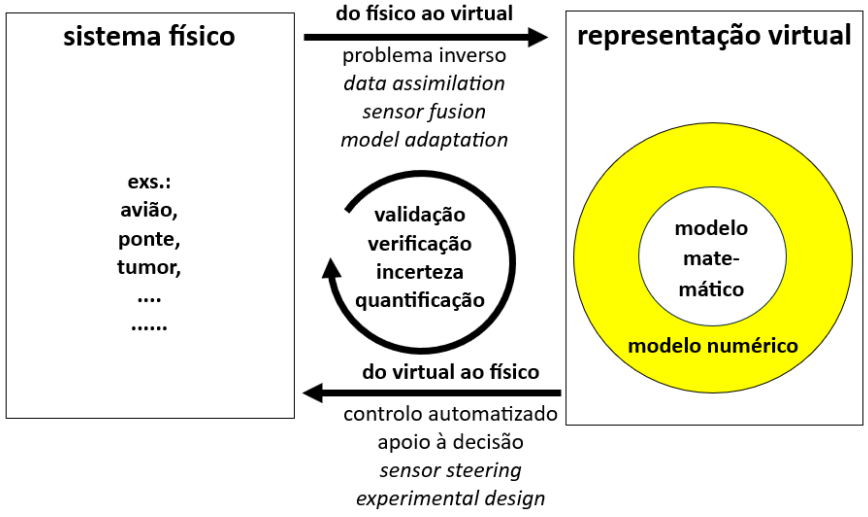

Figura 11. Representação esquemática das relações entre sistema físico e representação virtual, num *digital twin*, adaptado de Willcox[75].

8 – CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE – CTS, REVISTAS

De novo, uma questão prévia é terminológica. Isso é nítido no trabalho de Lewis Mumford, um pioneiro da CTS, cujo livro *Technics and Civilization*, de 1934[66], apenas foi publicado em Portugal em 2019[80]. Mumford questiona o significado de *technics* e a sua relação com *technology*. A questão fica estabilizada com Kline[81] (republicado em Kline[82]) que dá quatro acepções de tecnologia: i) os artefactos, ii) o seu fabrico, iii) o conhecimento que permite o fabrico e iv) o contexto social determinado pela relação artefactos/sociedade.

Avaliar tecnologias inclui avaliar as suas consequências éticas e sociais, o que pode envolver uma reflexão sobre a "boa sociedade". Coeckelbergh[83] refere duas abordagens ao problema. A primeira é centrada no indivíduo, assumindo que as consequências sociais da tecnologia consistem na agregação dos seus efeitos individuais. Em contraste, e invocando Nussbaum[84] e as "capacidades centrais" que devem ser garantidas por uma *decent political order*, a tecnologia poderá ser avaliada de acordo com a sua contribuição para as capacidades, entendidas como intrinsecamente ligadas ao social e à comunidade.

O PIB, o PIB *per capita*, e seu crescimento, em diversas medidas nomeadamente paridade de poder de compra, são vistos como indicadores do desempenho económico de países. Não obstante a sua relevância, são objecto de

críticas quanto à sua capacidade para reflectir o nível de bem-estar atingido. Nessa linha aparece o conceito de índice de desenvolvimento humano e o Relatório de Desenvolvimento Humano, elaborado anualmente pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), usando uma abordagem na linha das reflexões de Martha Nussbaum, Amartya Sen e outros. O índice incorpora três dimensões do desenvolvimento humano: uma vida longa e saudável, conhecimento, e padrões de vida dignos. Como exemplo de dados tomados em consideração, a expectativa de vida à nascença nos EUA é de 78,2 anos[85] (e de 82,2 anos em Portugal).

Períodos sabáticos nas Universidade de Lehigh (1991) e na Universidade da Califórnia, Berkely (1992 e 2000) deram-me, para além dos aspectos técnicos, oportunidades para contactar com o movimento STS (Science, Technology and Society) e de desenvolvimento sustentável através de perspectivas e dimensões tão variadas como as:

- do ambientalista e defensor dos consumidores Ralph Nader, autor do celebrado livro "*Unsafe at Any Speed*"[86] (em evento na University of San Francisco, em 1992),
- de Lester Brown, fundador do Worldwatch Institute, editor da série de livros *State of the World*, (na 7th Annual Technology Literacy Conference da National Association for Science Technology and Society, em 1992[87]),
- do filósofo, antropólogo e sociólogo Bruno Latour (na UC Berkeley, em 2000[88]), e
- da justiça social, com Robert Reich, em 2000 (na School of Social Welfare da UC Berkeley).

O movimento STS preocupa-se, nomeadamente, com:

- os efeitos da ciência e tecnologia sobre a sociedade, no que se refere a questões éticas e de valores,
- a comunicação entre as comunidades científicas e técnicas, e o público em geral, designadamente através da educação, dos *media*, etc.,
- a avaliação da ciência e tecnologia, e o papel dos cidadãos nesse processo,
- os efeitos dos valores sociais e do conhecimento na condução da ciência e tecnologia, particularmente no que se refere à definição de políticas, à regulamentação da investigação, às prioridades de financiamento e às oportunidades de emprego e educação.

A formação contínua ao longo da vida foi promovida nos EUA em inícios do século XX pelo movimento Chautuqua[89]. Na segunda metade do século XX, esse nome foi retomado, em iniciativas apoiadas pela NSF – National Science Foundation, visando o alargamento do interesse pela ciência e tecnologia, através do apoio à realização de s*hort courses* para formação de formadores (por exemplo, o Chautauqua short course programme course 16: Science technology and society: integrative general education, Temple University, Philadelphia, March 5–7, 1992).

A actividade editorial associada a este movimento inclui publicações como o *Bulletin of Science Technology and Society* (actualmente publicado pela Sage) ou a *Science, Technology and Society Curriculum Development Newsletter*, editada por Stephen Cutcliffe e publicada pela Lehigh University. O acrónimo STEM (Science, technology, engineering, and mathematics) e actividades relacionadas, a partir dos anos noventa, são resultados do movimento STS. O Conference Board na cidade de Nova Yorque, por exemplo, realiza uma "Business and Education Conference" onde é discutida a colaboração entre empresas e escolas públicas (como exemplo, 1998 Business and Education Conference, New York, 7–8 de Maio).

Coincidente com os interesses que ao tempo se manifestavam internacionalmente, também em Portugal os estudos de Ciência, Tecnologia e Sociedade principiaram a ter expressão nas últimas décadas do século XX, nomeadamente, com o lançamento, pela Fundação Calouste Gulbenkian, da revista *Colóquio Ciências* (1988), de que foi director João Caraça, e com a criação, pela ACDT, em 1987, da *CTS: Revista de Ciência, Tecnologia e Sociedade*, de que foi director Jorge Dias de Deus. Ambas deixaram há muito de se publicar e os números publicados não estão disponíveis *online*, dificultando, assim, o acesso dos eventuais interessados. A revista *Colóquio Ciências*, bem como a revista *Colóquio Educação e Sociedade* (director G. Oliveira Martins e vice-director E. Marçal Grilo), foram publicadas pela Fundação Calouste Gulbenkian. Ambas foram criadas subsequentemente à *Colóquio Letras*, única das três que ainda é publicada e única disponibilizada *online* pela Fundação Calouste Gulbenkian. A *CTS: Revista de Ciência, Tecnologia e Sociedade* era publicada pela ACTD – Associação de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento, extinta em 1995 (sucedida pela ADCT – Associação para a Divulgação da Ciência e Tecnologia, dissolvida em 2001), motivo pelo qual a sua eventual disponibilização *online* não poderia ser feita pela entidade publicadora, mas sim por alguma biblioteca ou outra organização interessada no tema.

Nem sempre a referência a CTS foi explícita nos títulos das publicações. Na Universidade do Porto, por iniciativa de Eduardo Oliveira Fernandes, o *Boletim da Universidade do Porto*[a] foi publicado de 1990 a 2007. Não obstante o discreto e recatado título, foi uma revista de reflexão e debate sobre grandes temas, frequentemente associada à organização de debates e incluindo contributos de dentro e de fora da UP, e que se pode considerar integrada no movimento que criou as revistas acima indicadas; com elas compartilha a muito infeliz circunstância de a instituição a que pertence (neste caso, a UP) não a disponibilizar *online*.

De natureza muito diferente, mas de relevância para a comunidade científica nacional, foi a *newsletter ID–Investigação e Desenvolvimento: Boletim da Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica* cujo primeiro número foi publicado em 1986[b] terminada em 1997. Esta *newsletter* informava sobre eventos, concursos e outros factos de interesse para a comunidade científica, e incluía, de forma despretensiosa, extractos muito concisos de revistas. A NATO também manteve um programa de apoio à ciência, divulgado na *newsletter NATO Science & Society*, de que o primeiro número foi publicado em 1984, e de que resultou a vasta série de *proceedings* Advanced Study Institutes (ASI) e Advanced Research Workshops (ARW). O primeiro mestrado da FEUP — Mestrado em Engenharia Estrutural, iniciado em 1981 e organizado pelo Departamento de Engenharia Mecânica — beneficiou de apoio deste programa através da iniciativa "Science for Stability".

9. ALGUNS DADOS SOBRE I&D

Os interessados dispõem de séries temporais relativas à percentagem do PIB dedicada à I&D, e sua desagregação por origem de financiamento, por domínio ou tipo de investigação, entre outros critérios, exemplos: OECD.Stat "Main

[a] https://sigarra.up.pt/up/pt/web_base.gera_pagina?p_pagina=recursos%20e%20servi%c3%a7os%20da%20u.porto%20-%20publica%c3%a7%c3%b5es%20peri%c3%b3dicas

[b] número "zero" em 28 de Julho de 1986, número 1 em 22 de Setembro de 1986; terminou com uma 3.ª série em 1997. Antes, com início em Agosto de 1972, existiu uma *newsletter* com título *Investigação e Desenvolvimento: Boletim da Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica*, de publicação irregular. Em 1997, a Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica – JNICT, daria lugar à Fundação para a Ciência e a Tecnologia – FCT.

Science and Technology Indicators"[c] ou, o mais recente, OECD Data Explorer[d]. Registarei aqui apenas alguns números que merecem reflexão. Para esse efeito, usarei a comparação de Portugal com a Alemanha; a razão da escolha de países tão diferentes será clara no fim desta secção.

Primeiramente, nota-se a progressiva diminuição da percentagem do financiamento pelo estado e a crescente contribuição do sector empresarial para a despesa de I&D em Portugal. Os dados a procurar são relativos ao GERD – *gross expenditure on R&D* e ao BERD – *business enterprise expenditure on R&D*. A OECD mostra que a relação BERD/GERD, em Portugal, foi 47%, em 2015, e 62%, em 2022[e]. Esta tendência não é uma especificidade nacional; por exemplo, também a percentagem do total de despesa em I&D nos EUA paga por fundos federais tem vindo a diminuir, Hackett *et al.*[90], p.659. A UE refere como apropriada uma repartição de GERD em 1/3 financiada pelo estado e 2/3 por empresas[f], também apontada como meta pelo governo Português, MCTES[91]. Em 2021, a relação BERD/GERD é de 62.78% na Alemanha, e de 53.66% em Portugal[g], sugerindo que o aumento do BERD em Portugal estará alinhado com aproximação ao valor apropriado referido. Mas como se desagrega por sectores a I&D realizada por empresas (BERD)?

O maior grau de desenvolvimento da Alemanha, cujo PIB per capita é cerca de 2.1 vezes maior do que o Português[h], é acompanhado de maior percentagem do PIB dedicada à investigação: na Alemanha a percentagem do PIB dedicada à I&D foi, em 2021, de 3.14% enquanto que em Portugal foi 1.68%[i].

Mas interessa aqui a componente BERD já que, como vimos, é aí que se espera encontrar maior crescimento. Como é ele materializado? Segundo o CORDIS, em

---

[c] https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=MSTI_PUB

[d] https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CInnovation%20and%20technology%23INT%23%7CResearch%20and%20development%20%28R%26D%29%23INT_RD%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=2&vw=tb&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_ANBERD%40DF_ANBERDi4&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0&pd=2015%2C&dq=DEU.A...XDC.V.&ly[rw]=ACTIVITY&ly[cl]=TIME_PERIOD&to[TIME_PERIOD]=false

[e] https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=MSTI_PUB.

[f] https://data.europa.eu/data/datasets/kei7c1g01bqbfqcxuqpzw?locale=en.

[g] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tsc00031/default/bar?lang=en.

[h] https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=DE-PT.

[i] https://data.worldbank.org/indicator/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?end=2021&locations=-DE-PT&start=1996&view=chart.

2020, na Alemanha, 88.6% do total do BERD foram dedicados à I&D do sector de fabrico (*manufacturing*), enquanto que, em Portugal, esse valor foi de apenas 38.1%. Já a I&D no sector financeiro (*financial and insurance*) representou 0.6% do BERD na Alemanha, mas representa 9% em Portugal — cerca de 15 vezes mais! Estando acautelado o respeito pelas definições estatísticas das actividades de I&D e, portanto, a comparabilidade dos números, constata-se a contribuição invulgarmente significativa do sector financeiro para o BERD Português. Resta notar que tanta I&D nacional no sector financeiro não conseguiu evitar aparatosos falhanços da banca nacional.

Os dados acima recordam uma falha no panorama nacional da I&D (valor insuficiente da percentagem do PIB dedicada à I&D) e identificam um problema na componente BERD que importa aumentar, sobretudo em áreas do conhecimento que efectivamente contribuam para o melhor desempenho nacional — necessidade de investir em I&D realizada pelas empresas no sector do fabrico (*manufacturing*), com melhorias de produtividade, como condição para o desenvolvimento económico.

10. ECONOMIA COMPORTAMENTAL. PIB. LITERACIA

Para concluir, faço breve referência a três tópicos do contexto social:

- tomada de decisão em contexto de risco e incerteza[j], no quadro da frutuosa multidisciplinaridade psicologia-economia que originou a economia comportamental,
- produto interno bruto (PIB) — o resultado agregado de decisões de indivíduos e organizações pode ser aferido em macroeconomia pelo PIB; o segundo tópico aborda o crescimento do PIB ao longo de um pouco mais de meio século em Portugal. Concluirei com referência a:
- literacia e sua evolução em Portugal, invocando dados históricos que importa conhecer melhor.

Diversas áreas abordam o problema do risco de forma específica. Por exemplo, em economia, trabalhos de Tversky e Kahneman, iniciados nos anos setenta do século passado, estudaram a tomada de decisão em situações que envolvem

[j] Frank H. Knight apresenta em *Risk, Uncertainty and Profit*, Houghton Mifflin Co, 1921, uma interessante discussão sobre a distinção dos conceitos de risco e de incerteza.

risco e incerteza. A *prospect theory*[k] de Tversky e Kahneman, aborda o modo como são feitas as escolhas entre alternativas que envolvem riscos e incerteza, concluindo que i) os indivíduos não determinam o valor de uma escolha de acordo com os possíveis estados finais de riqueza, mas por comparação com um ponto de referência e ii) sofrem mais por perder do que sentem prazer ao ganhar, fenómeno designado em economia comportamental como aversão à perda (*loss aversion*). O valor V de um prospecto simples que paga x com probabilidade p (e zero de outra forma) é dado por:

$$V\left(x,p\right)=v(x)w\left(p\right) \tag{21}$$

onde v é o valor subjectivo da variável em análise e w mede o impacto da probabilidade objectiva p na actratividade da consequência (x). O valor $v(x)$ aproxima dados empiricamente obtidos, e pode ser representado por diversas funções matemáticas mais ou menos adequadas a cada conjunto de dados. Tversky e Kahneman[92] mostram que os seus dados empíricos são adequadamente descritos por:

$$v\left(x\right)=\begin{cases}x^{\alpha} & \text{se } x\geq 0\\ -\lambda\left(-x\right)^{\beta} & \text{se } x<0\end{cases} \tag{22}$$

onde α, $\beta>0$ caracterizam a curvatura da função valor para ganhos e perdas, respectivamente, e λ é o coeficiente de aversão às perdas (*loss aversion coefficient*). Uma compilação de valores destes parâmetros, obtidos em diversos estudos, é dada por Fox e Poldrack[93]. Para ponto de referência b distinto de zero, haverá apenas que substituir na equação acima x por x-b, ver por exemplo, Ferreira *et al*.[94]. A assimetria ganho-perda é ilustrada na Figura 12, que representa uma função valor notando-se a concavidade para os ganhos, a convexidade para as perdas e uma perda mais acentuada do que o ganho. A Figura 12 também ilustra o efeito da variação de parâmetros.

A concavidade da curva de ganhos indica aversão ao risco, enquanto a convexidade da curva de perdas indica procura de risco. A aversão às perdas é indicada por maior valor atribuído a uma perda do que a um ganho equivalente, ou, quantitativamente,

$$v(x)<-v(-x)\qquad \forall\left(x>0\right) \tag{23}$$

[k] designação frequentemente traduzida em português por teoria das perspectivas, ou teoria dos prospectos.

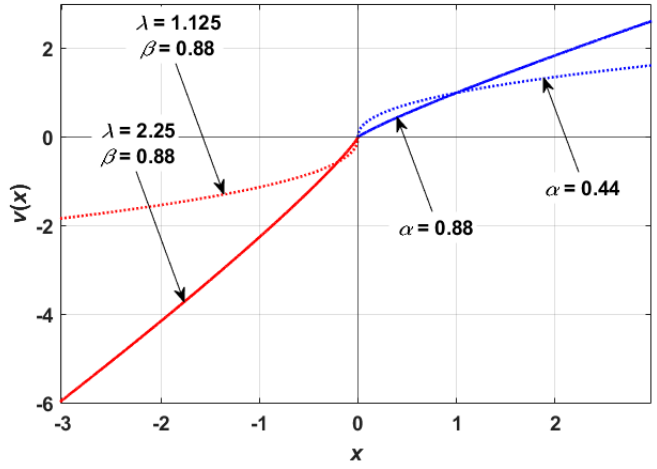

Figura 12. Função *v(x)*. Valores numéricos de Tversky e Kahneman (curvas a cheio, α = 0.88, β = 0.88 e λ =2.2592, e ilustração do efeito da variação de parâmetros.

A Figura 13 mostra funções de ponderação da *prospect theory*, *w*(*p*), referidas acima, com a sua característica forma de S invertido. Na Figura 13 é representada a função

$$w(p) = \frac{p^{\gamma}}{\left[p^{\gamma} + (1-p)^{\gamma}\right]^{1/\gamma}} \tag{24}$$

que é apenas uma das várias propostas para descrever dados empíricos[93,95,96,97].

Notar, na Figura 13, a tendência para sobreponderar probabilidades baixas e subponderar probabilidades moderadas a grandes, e a tendência para os pesos das probabilidades complementares somarem menos de 1.

Uma síntese concisa e informativa é apresentada por Fox e Poldrack num capítulo do livro *Neuroeconomics: Decision Making and the Brain*[93], que inclui também uma compilação de valores dos parâmetros α, β e λ, da equação 22, obtidos em diversos estudos.

O quadro conceptual criado é uma base do importante campo de tomada de decisão em contexto de risco e incerteza, explorado em diversos campos, como agentes económicos, ou mesmo animais[98], sem prejuízo da necessária atenção à replicabilidade dos resultados em que estes desenvolvimentos se baseiam.

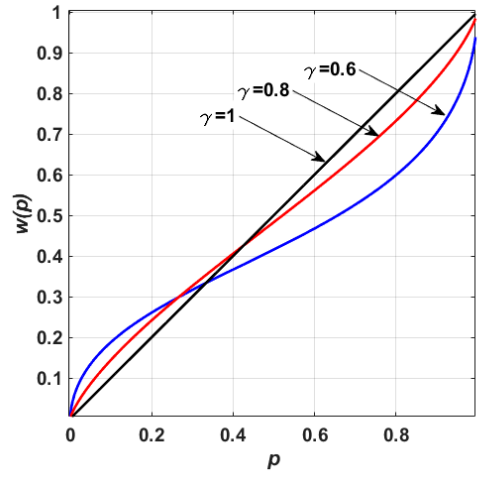

Figura 13. Função *w(p)* ilustrando influência do parâmetro γ, conforme Tversky e Kahneman[92].

Esta referência a replicabilidade supõe que, mais prosaicamente, seja qual for o campo do estudo, as contas dos modelos utilizados estejam bem feitas (e o eventual Excel correctamente usado), o que não terá sido o caso em alguns resultados utilizados para justificar políticas da "troika" na recente crise da dívida pública europeia[99,100]. Assim se transita para o tópico seguinte, o da referência ao PIB Português e sua evolução.

A agregação de decisões individuais e de organizações — empresas, estado, …— é reflectida no valor do PIB, cujo crescimento é um possível indicador da evolução da prosperidade de um país. A falta de crescimento ou o crescimento definhado, quando outros países apresentam resultado mais positivo, sugere que a diferença dos recursos disponíveis aos cidadãos de um e dos outros países se vai acentuando. Para um país sem crescimento, a consequência é o comparativo agravamento das condições de vida, medida pelos bens ou serviços a que cada um tem acesso, etc.

Recentemente banalizou-se a consciência de que Portugal está a ser ultrapassado pelos países do leste da Europa, facto que é demonstrado quantitativamente por dados estatísticos fáceis de encontrar.

É conveniente distinguir a evolução do indicador "crescimento do PIB" num curto intervalo de tempo (por exemplo, um ano ou menos), ou intervalos mais dilatados, da ordem de várias décadas. Bom desempenho num ano ou semestre

é certamente uma boa notícia; mas é a persistência de bons resultados ao longo de um número dilatado de anos que faz a diferença.

Que se passa em Portugal?

A Figura 14 mostra dados correspondentes a cerca de seis décadas. Aproximando por uma recta, vê-se a persistência de uma tendência de decrescimento. O ponto de partida lastimavelmente baixo do PIB (acompanhado de ausência de liberdades e baixo nível de desenvolvimento humano), factos históricos, crises e subsequentes intervenções do FMI, particularmente a crise do Lehman Brothers e subsequentemente crise do Euro, etc., explicam ou são facilmente relacionados com detalhes da evolução em certos períodos. Mas a tendência decrescente evidenciada na regressão linear dos dados da Figura 14 indica que, no que toca ao crescimento do PIB, nunca foi possível compensar períodos negativos por continuados sucessos nos restantes períodos.

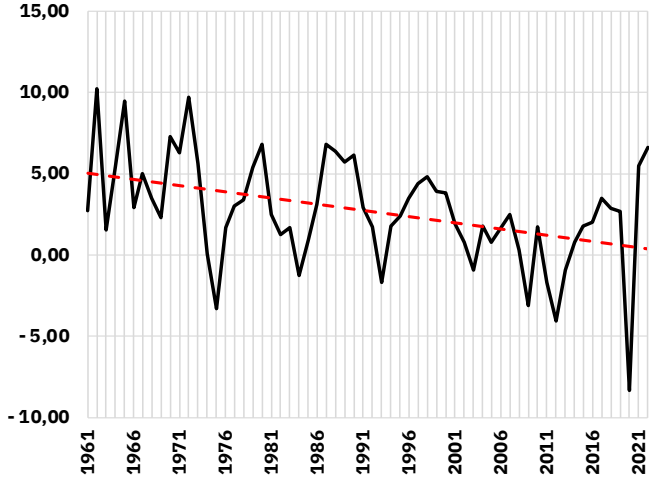

Figura 14. Taxa de crescimento real do PIB, %, 1961-2021. Pordata.

A análise de falhas em engenharia envolve uma preocupação central com a identificação das suas causas. A engenharia ocupa-se nomeadamente com o comportamento de pontes, aviões, e outro *hardware* e *software*, enquanto aqui trata-se de uma sociedade — porque crescem alguns países e não cresce Portugal? O estudo dessa falha cabe aos peritos de ciências sociais e de economia, e está fora do âmbito deste texto. Será facilitado pela obra de Luís Miguel Bernardo *Sobre as Causas do Atraso Científico em Portugal. Uma Digressão Histórica*, publicada em 2021, pela Universidade do Minho[101].

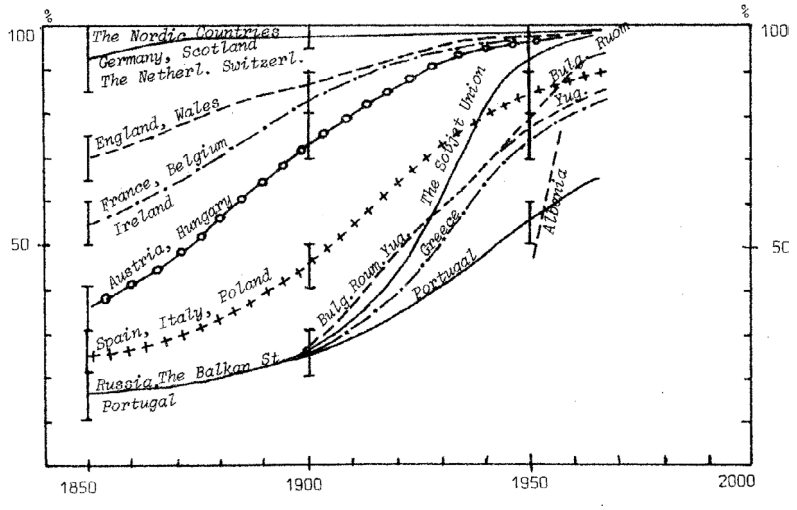

Figura 15. Literacia na Europa 1850–1970. Fonte: E. Johansson[102]. (Eixo vertical: percentagem alfabetizada da população com mais de cerca de 10 a 15 anos de idade).

O capital humano, particularmente o nível educacional da população é certamente um condicionador do sucesso económico; uma sociedade analfabeta terá um desempenho económico muito diverso do de uma sociedade alfabetizada. Ou, no dito atribuído a Benjamin Franklin, "*An investment in knowledge pays the best interest*". Neste quadro, a Figura 15 mostra a evolução da alfabetização de diversas nações europeias no período 1850–1970[102]. A situação de Portugal é especialmente notada — é a pior de todos os países europeus considerados. Portugal tendo sido o último país europeu a resolver o problema do analfabetismo, também muito demorou a generalizar o acesso ao ensino secundário e ao ensino pós-secundário. Presentemente, nas faixas etárias mais jovens a percentagem da população com formação pós-secundária está finalmente alinhada com a da generalidade dos parceiros europeus, mas considerando as faixas etárias mais velhas, as diferenças de nível educacional são ainda gritantes. Só daqui a uns anos, com o progressivo desaparecimento dessas gerações mais velhas, a questão educacional terá deixado de ser um *handicap* que travou a evolução da economia portuguesa. Isso é particularmente notório quando se fazem comparações com a europa da leste.

Uma consequência é a comparativa degradação dos salários e emigração dos jovens, incluindo alguns dos mais qualificados[103].

CODA OU *CODETTA*

Em *Risk Society: Towards a new Modernity*[104], Ulrich Beck chama a atenção para a distribuição desigual de riscos na sociedade, função das circunstâncias de cada um; alimentação saudável, por exemplo, não é acessível a todos, com directas consequências em desigualdades nas morbilidades e na esperança média de vida.

Como notado por Paul Virilio, em *The Original Accident*[105], ou concisamente afirmado por Hannah Arendt —"*progress and disaster are two sides of the same coin*"— a invenção do barco implicou o aparecimento do naufrágio, a invenção do comboio implicou o aparecimento do descarrilamento, a invenção do avião implicou o aparecimento da sua queda, etc. O acidente da era industrial — descarrilamento, afundamento, …, é de carácter localizado; Virilio nota que o acidente pós-industrial é acompanhado por um substancial aumento de escala — de localizado a geral, como sinalizado por um eventual colapso das ligações www de consequências eventualmente globais[106].

Já no século XVI, Rabelais reconhecia que "*science sans conscience n'est que ruine de l'âme*"[107,l,108,m]. Mesmo considerando a evolução do significado das palavras *science* e *conscience* de então até à actualidade, o fulgurante progresso da ciência apenas reforça a importância profética do belo aforismo de Rabelais.

Recentes casos com origem informática, como o da errada condenação de numerosos funcionários do Post Office (correios Ingleses) por desvio de fundos, no que mais tarde se revelou ser um erro do sistema informático Fujitsu[109], ou, em Portugal, a inexistência de explicação para o deficiente funcionamento de um sistema informático do fisco ("*falha informática sem intervenção humana*")[110], sugerem os perigos que estão para vir, especialmente os resultantes da fulgurante emergência da inteligência artificial (IA).

Considere-se, por exemplo, o uso da IA na justiça[111]. A IA é associada a opacidade[112] sintetizada como "*opacidade corporativa, deliberadamente gerada como forma de resguardar os segredos de negócios das empresas que desenvolvem os algoritmos; opacidade cognitiva, resultante da incapacidade que as pessoas em geral* […] *têm de entender o funcionamento do algoritmo e de perceber a linguagem que o mesmo utiliza; e opacidade*

---

[l] Obra citada, página 109 (capítulo VIII "Comment Pantagruel estant à Paris receupt lettres de son pere Gargantua, et la copie d'icelles" do Livro 2 – Pantagruel).

[m] Pág. 58 do livro (e pág. 63 da file pdf disponibilizada pela Bibliothèque Nationale de France – BNF: https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k792829)

técnica, inerente ao recurso ao deep learning*, inviabilizador da explicitação do percurso decisório do software, mesmo por parte dos seus programadores"*[112].

A sociedade confronta-se com as alucinações específicas dos sistemas, que recorrem a algoritmos e dados de treino apenas conhecidos de uns poucos eventualmente irresponsabilizáveis ou não identificáveis, mas também com a integridade ética dos seus criadores. Países (EUA, …), organizações plurinacionais (EU, …) entre outros, estão a desenvolver regulamentos para a IA, ao mesmo tempo que se multiplicam apelos à consideração ética no desenvolvimento da IA, como a "Call for an AI Ethics"[113] entre outros.

Um texto sobre risco pede referência à revista *Bulletin of the Atomic Scientists*, criada em 1945 por Einstein, Oppenheimer e cientistas associados ao desenvolvimento da bomba atómica no Projecto Manhattan. O *Bulletin* criou o *Doomsday Clock* ("Relógio do Juízo Final") utilizando a "contagem decrescente até zero" e a meia-noite como metáfora para representar a proximidade de uma catástrofe global para a humanidade. Um painel de cientistas avalia anualmente, para o *Bulletin*, a distância a que o mundo se encontra da meia-noite — correntemente apenas 90 segundos! O *Doomsday Clock* tornou-se um indicador da vulnerabilidade mundial a eventual catástrofe global provocada pelo homem. Este tom pessimista é compensado por vozes como a de Saul Perlmutter[114], reclamando que o *Bulletin* passe a incluir também um relógio dos "minutos para o meio-dia", que mediria a distância a que estamos de criar um mundo em que todos possam viver bem.

COMUNICAÇÃO APRESENTADA À CLASSE DE CIÊNCIAS
NA SESSÃO DE 30 DE NOVEMBRO DE 2023

COMUNICAÇÃO RECEBIDA A 3 DE SETEMBRO DE 2024

[*] A presente comunicação não segue a grafia do Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa.

ACRÓNIMOS

ACTD	Associação de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento
ADCT	Associação para a Divulgação da Ciência e Tecnologia
ADMIRE	Advanced design concepts and maintenance by integrated risk evaluation for aerostructures (FP5 project)
AEA AEA	AEA Technology plc (antes: UKAEA)
AGARD	Advisory Group for Aerospace Research and Development (NATO)
AHS	American Helicopter Society (agora: Vertical Flight Society)
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
ALARP	as low as reasonably practicable
ARW	Advanced Research Workshops (NATO)
ASC	American Society of Composites
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASEB	Aeronautics and Space Engineering Board (National Academies Sciences Engineering Medicine)
ASI	Advanced Study Institutes (NATO)
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
BCR	Community Bureau of Reference / Bureau communautaire de référence (EU)
BERD	business enterprise expenditure on R&D
BNF	Bibliothèque Nationale de France
C&T	ciência e tecnologia
CCPS	Center for Chemical Process Safety
cdf	cumulative distribution function / função distribuição cumulativa
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEGB	Central Electricity Generating Board (UK)
CIB	Conseil International du Bâtiment, actualmente International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CISE	Centro Informazioni Studi Esperienze, Milano
CSJU	Clean Sky Joint Undertaking
CT	compact tension specimen (provete para ensaios de Mecânica da Fractura)
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
DATON	Innovative fatigue and damage tolerance methods for the application of new structural concepts (FP6 project)

DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica (FEUP)
EGF	European Group on Fracture (mais tarde designado European Structural Integrity Society – ESIS)
ESA	European Space Agency
ESIS	European Structural Integrity Society (anteriormente designado European Group on Fracture – EGF)
EU	European Union
EUA	Estados Unidos da América
FCT	Fundação para a Ciência e a Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FhG	Fraunhofer Society
FMI	Fundo Monetário Internacional
FP	Framework Programme for R&D (EU)
FSW	friction stir welding
GERD	gross expenditure on R&D
GKSS	Forschungszentrum Geesthacht GmbH (agora: Helmholtz-Zentrum Geesthacht)
GPF	Grupo Português de Fractura
I&D	investigação e desenvolvimento
IA	inteligência artificial
IDMEC	Instituto de Engenharia Mecânica
IEHK	Institut für Eisenhüttenkunde, Aachen
IoT	internet of things.
IRSID	Institut de recherche de la sidérurgie (agora ArcelorMittal Maizières Research SA)
IST	Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa
ISTLI	International Society for Technology, Law and Insurance
JNICT	Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica
JRC	Joint Research Centre (EU)
JU	joint undertaking
MCTES	Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMPDS	Metallic Materials Properties Development and Standardization
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASTS	National Association for Science Technology and Society
NATO	North Atlantic Treatise Organization
NBS	National Bureau of Standards (sucedido pelo NIST)

NIJ	National Institute of Justice (USA)
NIST	National Institute of Standards and Technology
NSF	National Science Foundation (USA)
NUREG	USNRC technical report designation
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
ONU	Organização das Nações Unidas
pdf	probability density function / função densidade de probabilidade
PEEK	polyetheretherketone
PIB	produto interno bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
R&D	research and development
SCK-CEN	Belgian Nuclear Research Centre
SI	Système International d'unités
SMAAC	Structural maintenance of ageing aircraft (FP4 project)
SPM	Sociedade Portuguesa de Materiais
STEM	Science, Technology, Engineering, and Mathematics
STS	Science, Technology and Society (tb. Science and Technology Studies)
TWI	The Welding Institute
UC	University of California
UE	União Europeia
UK	United Kingdom
UKAEA	UK Atomic Energy Authority
UNDP	United Nations Development Programme
UP	Universidade do Porto
USA	United States of America
USNRC	US Nuclear Regulatory Commission
VAMAS	Versailles Project on Advanced Materials and Standards
VTT	Technical Research Centre of Finland Ltd
www	world wide web

Referências

1. Vrouwenvelder, A., Holicky, B., Tanner, C., Lovegrove, D. & Canisius, E., *Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering. CIB Report: Publication 259*. CIB, 2001.
2. Farmer, F., Siting criteria – a new approach, in *Containment and Siting of Nuclear Power Plants: Proceedings of a Symposium, Vienna, 3-7 April 1967*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1967, pp. 303-329.
3. Rasmussen, N., *WASH-1400 (NUREG 75/014) Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975.
4. Bartel, R., *NUREG/KM-0010. WASH-1400: The Reactor Safety Study – The Introduction of Risk Assessment to the Regulation of Nuclear Reactors*. USNRC – US Nuclear Regulatory Commission, 2016.
5. Lees, F., Appendix 23 'Rasmussen report', in *Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 3, 2nd ed. Oxford Butterworth-Heinemann, 1996, pp. 23-1 - 23-20.
6. Center for Chemical Process Safety – CCPS of American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. New York, NY, USA, 2009.
7. Marhavilas,P. & Koulouriotis,D., Risk-acceptance criteria in occupational health and safety risk-assessment – The state-of-the-art through a systematic literature review. *Safety*, vol. 7, 77, 2021. https://doi.org/10.3390/safety7040077.
8. Ayyub,B., Risk Analysis and Management. in *The Engineering Handbook*, R. C. Dorf Ed., 2nd ed. CRC Press, 2005, ch. #207.
9. Wolfram,J., Safety and risk: models and reality, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 207, no. 1, pp. 3-11, 1993. https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/PIME_PROC_1993_207_202_02.
10. Albrecht, P., S-N fatigue reliability analysis of highway bridges. in *ASTM STP 798. Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Applications for Structural Design and Maintenance*, J. M. Bloom and J. C. Ekvall Eds.: American Society for Testing ana Materials, 1983, pp. 184-204.
11. Oliveira, F., Colejo,J., Gonçalves, J., Figueiredo, M., de Castro, P. & Fernandes, A., *Avaliação da Resistência à Fadiga da Ponte Luiz I*. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial DEMEGI/FEUP, 1996.
12. Irwin, G., Fracture. in *Encyclopedia of Physics. Vol. VI – Elasticity and Plasticity*, vol. VI, S. Flugge Ed. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag, 1958, pp. 551-590.
13. Irwin, G., Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, no. 3, pp. 361-364, September 1957. https://doi.org/10.1115/1.4011547.
14. Irwin, G. & Wells, A., Continuum-mechanics view of crack propagation. *Metallurgical Reviews*, vol. 10, no. 38, pp. 223-270, 1965. https://doi.org/10.1179/mtlr.1965.10.1.223.
15. de Castro, P. and Tavares, S., Problemas de fractura em modo misto. *Memórias da Academia das Ciências de Lisboa, Classe de Ciências*, pp. 1-19, tomo XLIX, 2023.
16. de Castro, P., Fadiga e fractura de um aço usado em estruturas soldadas. *Memórias da Acade-*

mia das Ciências. Classe de Ciências, pp. 341-348, Tomo XLV, 2018.

17. American Society for Testing and Materials, *Fracture Toughness Testing and its Applications, ASTM STP381* (ASTM Special Technical Publication). Philadelphia, Pa: ASTM in cooperation with NASA, 1965.
18. Paris, P., Gomez, M. & Anderson, W., A rational analytic theory of fatigue. *The Trend in Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 9–14, 1961.
19. Paris, P., The fracture mechanics approach to fatigue – an interdisciplinary approach. in *Proceedings of the 10th Sagamore Army Materials Research Conference*, J. J. Burke, N. L. Reed, and V. Weiss Eds. New York: Syracuse University Press, 1964, pp. 107-127.
20. Hutchinson, J., Life as a mechanician 1956 – Timoshenko Medal acceptance speech, 2002. *ASME Applied Mechanics Division*, vol. summer news, pp. 1; 3-4, 2003. https://imechanica.org/node/195.
21. Tada, H., Paris, P. & Irwin, G., *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 3rd ed. New York, ASME Press, 2000.
22. Newman Jr., J. & Ruschau, J., The stress-level effect on fatigue-crack growth under constant--amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, vol. 29, pp. 1608–1615, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.11.003.
23. Schijve, J., *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd ed. Springer, 2009.
24. Hertzberg, R. & Mills, W., Character of fatigue fracture surface micromorphology in the ultra--low growth rate regime. in *ASTM STP 600*: American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 220-234.
25. Newman Jr., J., Phillips, P. & Swain, M., Fatigue-life prediction methodology using small-crack theory. *International Journal of Fatigue*, vol. 21, pp. 109-119, 1999. https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00058-9.
26. Broek, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.
27. Liebowitz, H., (Ed.) *Fracture Mechanics of Aircraft Structures. AGARD-AG-176*. AGARD, 1976. https://www.sto.nato.int/publications/AGARD/AGARD-AG-176/AGARD-AG-176.pdf.
28. Hudson, C. & Seward, S., A compendium of sources of fracture toughness and fatigue-crack growth. Data for metallic alloys. *International Journal of Fracture*, vol. 14, pp. R151-R184, 1978. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/BF00015997.
29. Hudson, C. and Seward, S., "A compendium of sources of fracture toughness and fatigue crack growth. Data for metallic alloys - Part II," *International Journal of Fracture*, vol. 20, pp. R59-R117, 1982. https://doi.org/10.1007/BF01140339.
30. Hudson, C. and Seward, S., A compendium of sources of fracture toughness and fatigue crack growth data for metallic alloys – part III. *International Journal of Fracture*, vol. 39, pp. R43-R63, 1989. https://doi.org/10.1007/BF00017705.
31. Smith, R., An introduction to fracture mechanics for engineers. Part II: Using the stress intensity factor to characterise fracture and fatigue crack growth. *International Journal of Materials*

in Engineering Applications, vol. 1, pp. 227-235, June 1979. https://doi.org/10.1016/0141-5530(79)90027-X.

32. *Metallic Materials Properties Development and Standardization – MMPDS*. Washington, D.C., Office of Aviation Research, 2003.
33. Allianz Versicherungs-AG, *Handbook of Loss Prevention*. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
34. *Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States. Part I: NBS Special Publication 511-1. Part II: NBS Special Publication 511-2*. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1978.
35. *The Economic Effects of Fracture in the United States. Part 1: NBS Special Publication 647-1. Part 2: NBS Special Publication 647-2*. U.S. Department of Commerce. National Bureau of Standards, 1983.
36. Faria, L., *The Economic Effects of Fracture in Europe* (Study contract no. 320105 between the European Atomic Energy Community and the Stichting voor Toepassing van Materialen). Commission of the European Communities, 1991.
37. *Symposium 'Risk and Economic Evaluation on Failure and Malfunction of Systems' and workshop 'Cost and Insurance Assessment of Failures'. Lisbon, 30 Oct.–1 Nov. 1995*. Sociedade Portuguesa de Materiais – SPM and International Society for Technology, Law and Insurance – ISTLI, 1995.
38. Schwalbe, K.-H., Hayes,B., Baustian,K., Cornec, A., Gordon, A., Homayun, M., Voss, B., Validation of the fracture mechanics test method EGF P1–87D (ESIS P1–90/ESIS P1–92): Analysis of an experimental round-robin." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures* vol. 16, pp. 1231-1284, 1993. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1993.tb00736.x.
39. Heerens, J. & Hellmann, D., Final report: Fracture Toughness of Steel in the Ductile to Brittle Transition Regime. in *EC M&T project MAT CT940080. Project leader: GKSS; partners: AEA, BAM, CISE, CEA, Imperial College, FhG, IRSID, Nuclear Electric, Siemens, TWI, IEHK-Aachen, SCK-CEN, VTT, Universidade do Porto-IDMEC. Concerted action approved in Nov. 1994*, February 1999.
40. Heerens, J. & Hellmann, D., Development of the Euro fracture toughness dataset. *Engineering Fracture Mechanics* vol. 69, pp. 421-449, 2002. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794401000674.
41. Silva, C., Fonseca, E., Leal, J. & de Castro, P., Statistical and geometrical analysis of fracture toughness data. Relatório FEUP-DEMec para EC M&T project no. MAT CT940080 – '*Fracture Toughness of Steel in the Ductile to Brittle Transition Regime*', 23rd July 1996.
42. Davies, P., Kausch, H., Williams, J., Kinloch, A., Charalambides, M., Pavan, A., Moore, D., Prediger, R., Robinson, I., Burgoyne,N., Friedrich, K., Wittich, H., Rebelo, C., Torres Marques, A., Ramsteiner, F., Melve, B., Fischer, M., Roux, N., Martin, D., Czarnocki, P., Neville, D., Verpoest, I., Goffaux, B., Lee, R., Walls, K., Trigwell, N., Partridge, I., Jaussaud, J., Andersen, S., Giraud, Y., Hale, G., McGrath, G., Round-robin interlaminar fracture testing of carbon-fibre-reinforced epoxy and PEEK composites. *Composites Science and Technology* vol. 43, pp. 129-136, 1992. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/026635389290003L.
43. Milne, I., An EGF exercise in predicting ductile instability: phase 1, compact tension

specimens. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,* vol. 9, no. 2, pp. 79-94, 1986. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1986.tb00437.x.

44. Milne, I., An EGF exercise in predicting ductile instability: phase 2, cracked pressure vessel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,* vol. 9, no. 4, pp. 231-257, 1986 https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1986.tb00451.x.
45. Sandomir, R., Henry Petroski, whose books decoded Engineering, dies at 81. *The New York Times,* pp. 21, Section A, June 22 2023. https://www.nytimes.com/2023/06/22/science/henry-petroski-dead.html.
46. Petroski, H., *To Forgive Design. Understanding Failure*. Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press, 2012.
47. Casamayou, M. H., *Bureaucracy in Crisis. Three Mile Island, the Shuttle Challenger, and Risk Assessment*. Westview Press, 1993.
48. Rogers, W., *Report to the President by the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident*. 1986.
49. *Space Shuttle Accident: Hearings before the Subcommittee on Science, Technology, and Space, of the Committee on Commerce, Science, and Transportation. United States Senate. Ninety-Ninth Congress*. Washington U.S. Government Printing Office, 1986.
50. *Investigation of the Challenger Accident. Report of the Committee on Science and Technology. House of Representatives. Ninety-Ninth Congress*. Washington: U.S. Government Printing Office, 1986.
51. Rich,T. & Cartwright, D., *Case Studies in Fracture Mechanics. AMMRC MS 77-5*. Watertown, MA: Army Materials and Mechanics Research Center, 1977.
52. de Castro, P., Oliveira, F. & Fernandes, A., Failure analysis: a methodology. *Technology, Law and Insurance,* vol. 1, p. 143-150, 1996.
53. de Castro, P. & Fernandes, A., "Methodologies for failure analysis: a critical survey," *Materials and Design* vol. 25, pp. 117-123, 2004. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.09.020.
54. Salehpour, S., Written Testimony of Sam Salehpour. Senate Committee on Homeland Security and Governmental Affairs. Permanent Subcommittee on Investigations. April 17, 2024. https://www.hsgac.senate.gov/subcommittees/investigations/hearings/examining--boeings-broken-safety-culture-firsthand-accounts/
55. Merton, R. & Barber, E., *The Travels and Adventures of Serendipity. A Study in Sociological Semantics and the Sociology of Science*. Princeton and Oxford: Princeton University Press 2004.
56. de Castro, P., Problemas de fractura e fadiga em estruturas de aviões fabricadas em Alumínio. *Memórias da Academia das Ciências. Classe de Ciências,* pp. 417-444, Tomo XLIII 2006-2007.
57. de Castro, P. & Tavares, S., Fadiga de materiais e de estruturas – com enfoque na aeronáutica. *Memórias da Academia das Ciências. Classe de Ciências,* vol. 2, pp. 313-324, Tomo XLVII, 2020.
58. NASA, *NASA-HDBK-5010. Fracture Control Implementation Handbook for Spaceflight Hardware* (NASA Technical Handbook). vol.1–2023; vol.2–2024.

59. *Space Engineering. Fracture control*, ECSS – European Cooperation for Space Standardization, The Netherlands, 2021.
60. Streit, R., *Design Guidance for fracture-critical components at Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-53254*. 1982.
61. Lozano, C. & Riveros, G., *Classical and innovative methods of fatigue and fracture repairs in navigation steel structures. ERDC/ITL TR-21-3*. U.S. Army Engineer Research and Development Center – ERDC, 2021.
62. Moreira, P., Jesus, A., Figueiredo, M., Windisch, M., Sinnema, G. & de Castro, P., Fatigue and fracture behaviour of friction stir welded aluminium–lithium 2195. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 60, no. 1, pp. 1-9, August 2012. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844212000547.
63. Windisch, M., Glaser, U., Trautmann, K.-H., de Castro, P. & Sattler, E., Damage tolerance characterization of 2195 base material and friction stir welds. presented at the *11th European Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing Conference (SSMMT)*, Toulouse, 15-17th Sept. 2009.
64. Eigen, N., Glaser, U., Sinnema, G., Moreira, P., Shneider, J. & Sattler, E., Microstructure and properties of AA 2195 base material and friction stir welds. presented at the *11th European Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing Conference (SSMMT)*, Toulouse, 15-17th Sept. 2009.
65. Sinnema, G., Windisch, M., Schneider, J., de Castro, P. & Moreira, P., Damage Tolerance Characterization of AA2195 and its FSW Joints. presented at the *Advanced Aerospace Materials and Processes Conference and Exposition – AeroMat 2011*, Long Beach, CA, USA, May 23, 2011.
66. Mumford, L., *Technics and Civilization*, 7th impression ed. Routledge & Kegan Paul Ltd 1934–(1955).
67. Chase, S., *The Tragedy of Waste*. The MacMillan Company, 1925.
68. Meadows, D., Meadows, D., Randers, J. & Behrens-III, W., *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind* (Potomac Associates Books). New York, Universe Books, 1972.
69. United Nations, *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. New York, 1987.
70. United Nations. "Sustainable Development. The 17 Goals." Department of Economic and Social Affairs https://sdgs.un.org/goals (acedido a 30-12-2023).
71. Reynaud de Sousa, B., Sustainable development and outer space: the challenge of orbital debris. presented at the *2023 Fulbright Portugal Forum* April 12, 2023. https://www.youtube.com/watch?v=G08lk0wlPOg&t=278s.
72. European Union. "Clean Aviation." https://www.clean-aviation.eu/ (acedido a 1-09-2024).
73. P. Hecker *et al.*, *Next Decade European Aeronautics Research Programme (2020–2030). A paper prepared by the Clean Sky Scientific Committee (SciCom) for submission to the Clean Sky Joint Undertaking (CSJU)*. 2019.
74. Clean Aviation, *Highlights 2021*. 2022.

75. Willcox, K., Future Directions for Digital Twins. presented at the *172nd meeting of the Aeronautics and Space Engineering Board*, National Academies, Irvine, CA, October 18, 2023. https://www.nationalacademies.org/event/10-18-2023/aeronautics-and-space-engineering-board-2023-fall.
76. Ferrari, A. & Willcox, K., Digital twins in mechanical and aerospace engineering. *Nature Computational Science,* vol. 4, pp. 178-183, 2024. https://doi.org/10.1038/s43588-024-00613-8.
77. Kabashkin, I. & Perekrestov, V., Ecosystem of aviation maintenance: transition from aircraft health monitoring to health management based on IoT and AI synergy. *Applied Sciences,* vol. 14, no. 4394, 2024. https://doi.org/10.3390/app14114394.
78. Tavares, S., Ribeiro, J., Ribeiro, B. & de Castro, P., Aircraft structural design and life-cycle assessment through digital twins. *Designs,* vol. 8, 2024. https://doi.org/10.3390/designs8020029.
79. Glaessgen, E. & Stargel, D., The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. presented at the *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference; Special Session on the Digital Twin*, 2012. https://doi.org/10.2514/6.2012-1818.
80. Mumford, L., *Técnica e Civilização*. Antígona, 2019.
81. Kline, S., What is Technology?. *Bulletin of Science Technology & Society,* vol. 5, pp. 215-218, 1985. https://doi.org/10.1177/027046768500500301.
82. Kline, S., What is Technology? in *Philosophy of Technology: The Technological Condition: An Anthology*, R. C. Scharff and V. Dusek Eds., Blackwell, 2003, pp. 210-212.
83. Coeckelbergh, M., Technology and the good society: A polemical essay on social ontology, political principles, and responsibility for technology. *Technology in Society,* vol. 52, 2018. http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2016.12.002.
84. Nussbaum, M., *Creating Capabilities. The Human Development Approach*. The Belknap Press of Harvard University Press, 2011.
85. United Nations Development Programme - UNDP, *Human Development Report 2023-24: Breaking the gridlock: Reimagining cooperation in a polarized world*. New York, 2024.
86. Nader, R., *Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile*. New York, Grossman Publishers, 1965.
87. National Association for Science Technology and Society – NASTS, *Proceedings of the 7th Annual Technology Literacy Conference*. Alexandria, Virginia, February 6-9, 1992. https://eric.ed.gov/?id=ED350248 ; https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED350248.pdf.
88. Latour, B., *Avenali Lectures: Politics of Nature*. 11th April 2000: 'The end of nature as a way to organize our polity'; 18 April 2000: 'Bringing the sciences into democracy'. https://townsendcenter.berkeley.edu/media/politics-nature.
89. Ferati, F., The rise and decline of the Chautauqua movement and its lessons for 21st century civic adult education. Doctor of Education thesis. Doctor of Education, School of Education University of Pittsburgh, 2017.

90. Hackett, E., Amsterdamska, O., Lynch, M. & Wajcman, J. (Eds.) *The Handbook of Science and Technology Studies*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2008.
91. Ministério da Ciência Tecnologia e Ensino Superior, *Higher Education, Research and Innovation in Portugal. Perspectives for 2030*. Lisboa, Ministério da Ciência Tecnologia e Ensino Superior, 2018.
92. Tversky, A. & Kahneman, D., Advances in prospect theory – cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty,* vol. 5, no. 4, pp. 297–323, 1992. https://doi.org/10.1007/BF00122574.
93. Fox., C. & Poldrack, R., Prospect theory and the brain. in *Neuroeconomics: Decision Making and the Brain*, P. W. Glimcher, C. F. Camerer, E. Fehr, and R. A. Poldrack Eds., Academic Press, 2009, ch. 11, pp. 145-173.
94. Ferreira, P., Santos, F. & Pequito, S., Risk sensitivity and theory of mind in human coordination. *PLOS Computational Biology,* vol. 17, no. 7, p. e1009167, 2021. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009167.
95. Nardon, M. & Pianca, P., Behavioral premium principles. *Decisions in Economics and Finance,* vol. 42, pp. 229-257, 2019. https://doi.org/10.1007/s10203-019-00246-x.
96. Takemura,K. & Murakami, H., Probability weighting functions derived from hyperbolic time discounting: psychophysical models and their individual level testing. *Frontiers in Psychology,* vol. 7, article 778, May 1 2016. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00778.
97. Wu, S., Chen, Z.-S., Pedrycz, W., Govindan, K. & Chin, K.-S., Nonparametric numerical approaches to probability weighting function construction for manifestation and prediction of risk preferences. *Technological and Economic Development of Economy,* vol. 29, no. 4, pp. 1127-1167, 2023. https://doi.org/10.3846/tede.2023.18551.
98. Nioche, A., Bourgeois-Gironde, S. & Boraud, T., An asymmetry of treatment between lotteries involving gains and losses in rhesus monkeys. *Scientific Reports,* vol. 9, no. 1, p. 10441, 2019/07/18 2019. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46975-2.
99. Costa, L., Martins, N. & Oliveira, F., Portugal's bailout and the crisis of the European Union from a capability perspective. *Cambridge Journal of Economics,* vol. 40, no. 6, pp. 1479-1496, 2016. https://doi.org/10.1093/cje/bew007.
100. Pollin, R., Public debt, GDP growth, and austerity: why Reinhart and Rogoff are wrong. ed: blogs.lse.ac.uk, 2014.
101. Bernardo, L., *Sobre as Causas do Atraso Científico em Portugal. Uma Digressão Histórica*. Universidade do Minho, 2021.
102. Johansson, E., The history of literacy in Sweden : in comparison with some other countries. *Educational reports Umeå. Umeå University and Umeå School of Education, Sweden,* no. 12, 1977. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:580289/FULLTEXT01.pdf.
103. de Castro, P., Portugal 2022: Human Capital, Economic Development and Migrations. presented at the *International Migration and Development of Human Potential*, Dnipro, Ukraine, Sept. 14-15, 2022.

http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2022/09/Conference-Proceedings-September-14-15-2022-3.pdf

104. Beck, U., *Risk Society: Towards a New Modernity*. London, UK: Sage Publications, 1992.
105. Virilio, P., *The Original Accident*. Cambridge, UK: Polity Press, 2007.
106. Virilio, P., Surfing the accident. in *The Art of the Accident*, A. Broeckmann, J. Brouwer, B. Lootsma, A. Mulder, and L. Spuybroek Eds. Rotterdam, the Netherlands, NAI Publishers/V2_ Organisatie, 1998, pp. 30-44.
107. Lefranc, A., Boulenger, J., Clouzot, H., Dorveaux, P., Plattard, J. & Sainéan, L., *Oeuvres de François Rabelais*. Paris, Librairie Ancienne Édouard Champion, 1922.
108. Rabelais, F., *Pantagruel, roy des dipsodes, restitué à son naturel; plus Les merveilleuses navigations du disciple de Pantagruel, dict Panurge / composés par feu M. Alcofibras,…* Lyon, Chez Étienne Dolet, 1542.
109. Rawnsley, A., Abuse of unaccountable power is at wicked heart of Post Office scandal. *The Guardian Weekly,* 19th January 2024.
https://www.theguardian.com/commentisfree/2024/jan/13/abuse-of-unaccountable-power-at-wicked-heart-of-post-office-scandal.
110. Crisóstomo, P., Ministério Público arquiva "apagão" dos offshores e afasta sabotagem informática. *Público,* 14 de Março 2023.
https://www.publico.pt/2023/03/14/economia/noticia/ministerio-publico-arquiva-apagao-offshores-afasta-sabotagem-informatica-2042221.
111. Rigano, C., Using artificial intelligence to address criminal justice needs. *NIJ - National Institute of Justice Journal,* no. 280, pp. 1-10, January 2019.
https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/252038.pdf.
112. Miranda Barbosa, M., Dos expert systems aos data systems AI: impacto ao nível da proteção de dados. *Julgar,* no. 45, pp. 13-33, 2021.
https://julgar.pt/dos-expert-systems-aos-data-systems-ai-impacto-ao-nivel-da-protecao-de-dados/.
113. *Rome Call for AI Ethics*, ed. Vatican City: RenAIssance Foundation, 2020.
114. Perlmutter, S. & Galvin, M., This is also a time of great possibility and great capability. *Issues in Science and Technology,* vol. 40, no. 4 pp. 30-33, Summer 2024.
https://doi.org/10.58875/ZKIJ5487.