



# ***Verificação da Segurança de Estruturas Marítimas Utilizando Métodos Probabilísticos de Níveis II e III***

*Maria Teresa Reis*

*João Alfredo Santos*



# SUMÁRIO

- > Introdução
- > Conceitos básicos
- > Software
  - PARASODE-BALI
  - @RISK
- > Casos de estudo
  - Galgamento de uma estrutura de protecção costeira
  - Instabilidade hidráulica do manto de um quebra-mar de taludes
- > Considerações finais



# Introdução

- > A sociedade em geral, bem como as normas para o projecto, construção e manutenção de estruturas, exigem, cada vez mais, uma quantificação dos riscos e um aumento da sua fiabilidade
- > Numa era de aquecimento global, subida de nível do mar e aumento de ocorrência de temporais, a gestão de riscos é uma ferramenta com crescente aplicação para apoio à decisão
- > Os procedimentos convencionais de dimensionamento e de verificação da segurança de estruturas marítimas não se baseiam numa avaliação de riscos explícita e sistemática, sendo essencialmente de natureza determinística
- > As estruturas marítimas são de grande complexidade, são muito dispendiosas e têm associadas inúmeras incertezas

# Introdução

- > As novas recomendações para o projecto, construção e manutenção de estruturas marítimas já incluem abordagens de gestão de riscos, baseadas em métodos probabilísticos e de optimização
- > As abordagens de gestão de risco não foram ainda totalmente implementadas na prática corrente

## Objectivo

Ilustrar o trabalho que o Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do LNEC tem vindo a desenvolver no âmbito da verificação da segurança à estabilidade e ao galgamento de estruturas marítimas utilizando métodos probabilísticos de Níveis II e III

# Conceitos Básicos

$$\text{Risco} = P_f \times \text{Consequências}$$

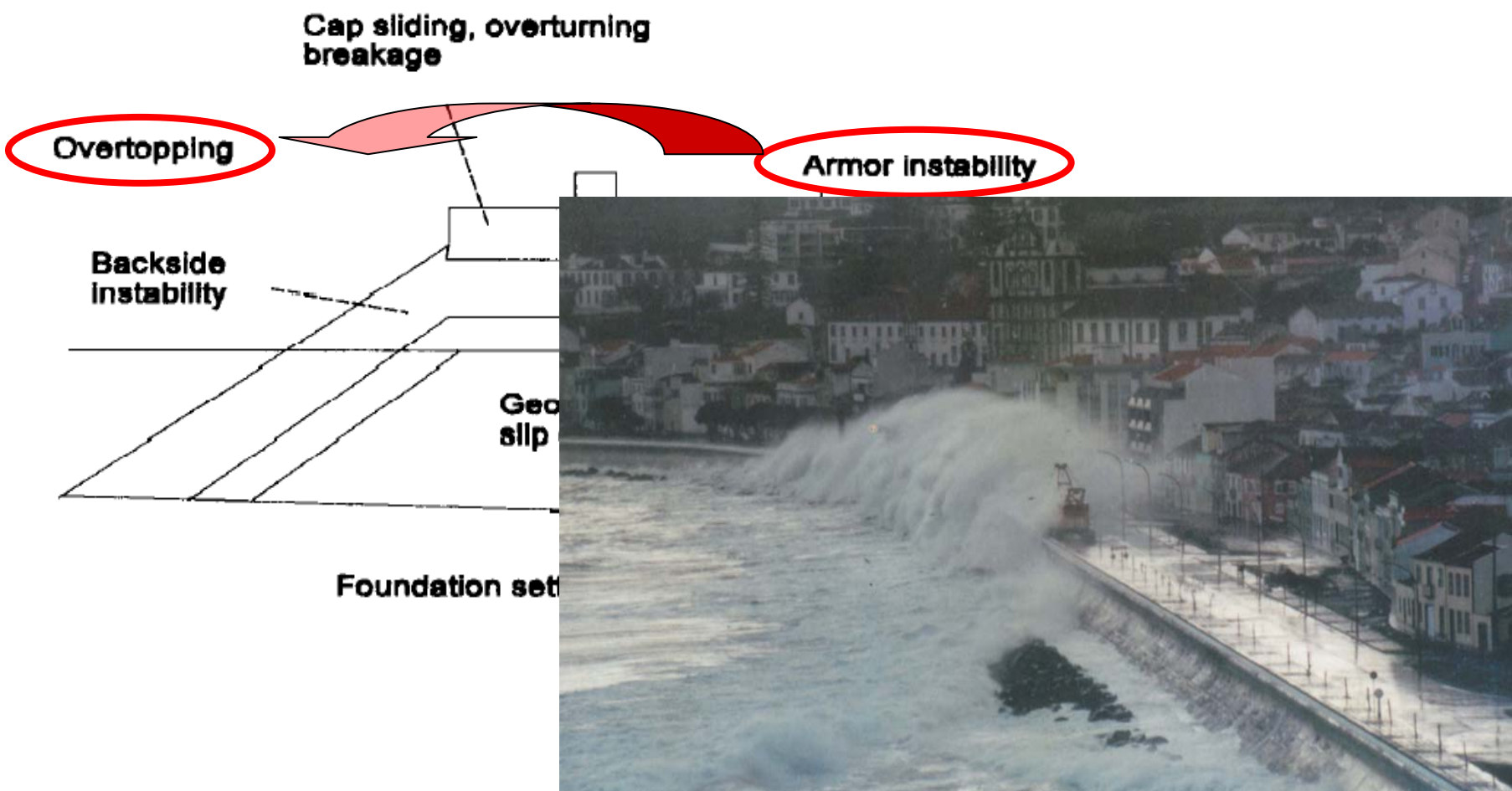
## > Probabilidade de falha, $P_f$

- Avaliada através de métodos probabilísticos
- Diz respeito:

- *Falha da estrutura como um todo (sistema) – é necessário decompor a falha generalizada em diferentes modos de falha e caracterizar as interações entre os vários modos de falha*
- *Falha da estrutura relativamente a um modo de falha em particular*

# Conceitos Básicos

> Modos de falha para um quebra-mar de taludes



# Conceitos Básicos

> Estudo de modos de falha isolados

$$Z = Z(X_1, \dots, X_n)$$

Função de falha

$$Z > 0 \longrightarrow \text{Não ocorre falha}$$

$$Z \leq 0 \longrightarrow \text{Ocorre falha} \longrightarrow P_f = P(Z \leq 0)$$

## Conceitos Básicos

- > Como algumas das variáveis  $X_i$  têm um carácter aleatório (algumas até podem estar correlacionadas entre si),  $Z$  define uma variável aleatória, sendo  $P_f$ :

$$P_f = P(Z \leq 0) = \int_{Z \leq 0} \int \dots \int f_{X_1, \dots, X_n} dX_1 \dots dX_n$$

$f_{X_i}$  – densidade conjunta de probabilidade das variáveis  $X_i$

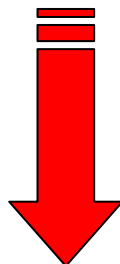
- > Excepto em casos com funções de falha muito simples e com um número muito baixo de variáveis, a integração múltipla não se pode realizar analiticamente e tem que ser aproximada através de métodos de cálculo mais simples: este é o objectivo dos métodos probabilísticos de dimensionamento e verificação da segurança



# Conceitos Básicos

- > Os métodos probabilísticos são classificados consoante o tipo de aproximação feito e o tipo de cálculo empregue
- > Distinguem-se normalmente na literatura três níveis de métodos probabilísticos:

- Nível III
- Nível II
- Nível I



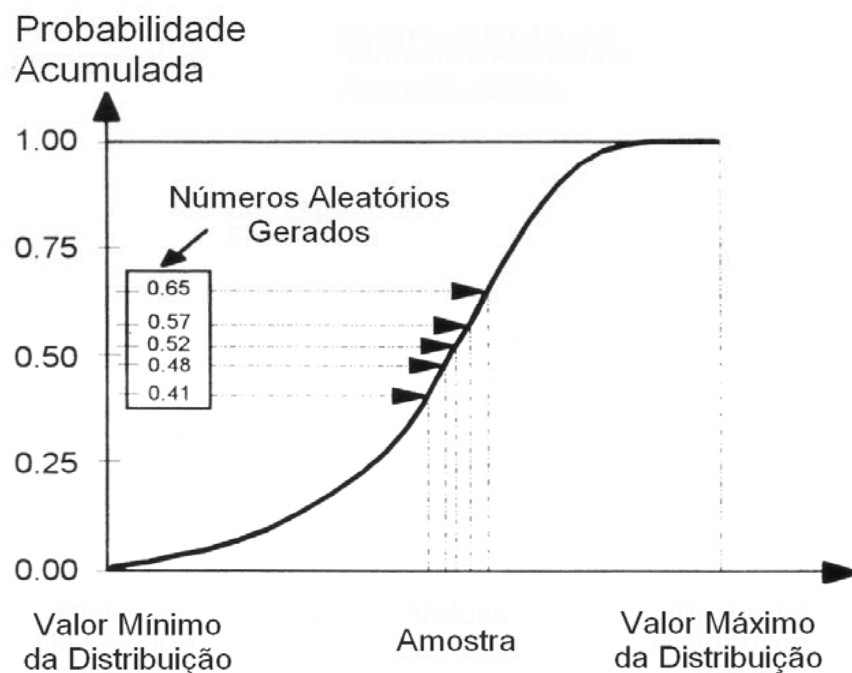
***Ordem decrescente de  
precisão e complexidade***

# Conceitos Básicos

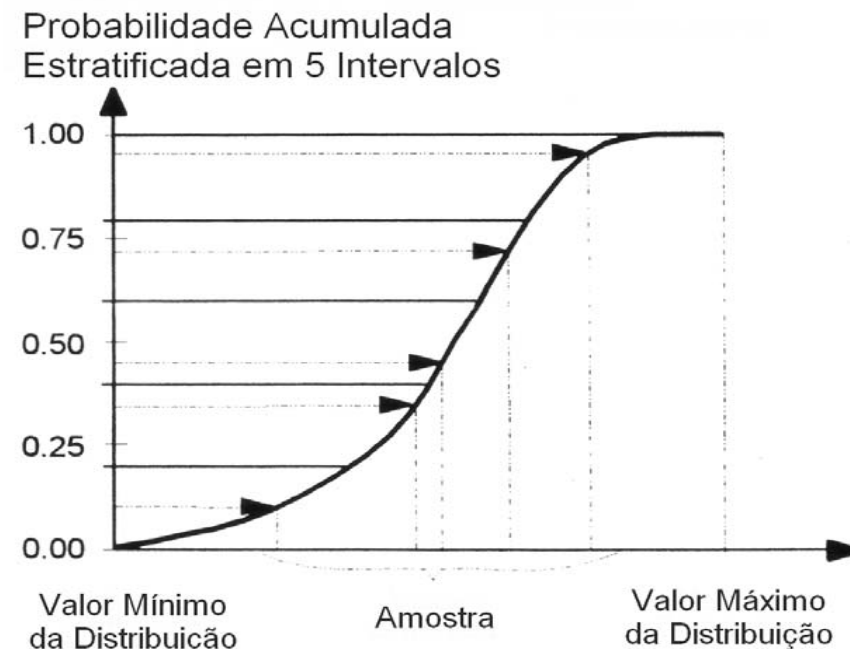
## > Métodos de Nível III

- $P_f$  é calculada de forma "exacta" a partir da função densidade de probabilidade conjunta das variáveis, incluindo correlações entre elas
- Consistem em:
  - Integração numérica
  - Técnicas de amostragem

### Amostragem Monte Carlo



### Latin Hypercube Sampling



# Conceitos Básicos

## > Métodos de Nível II

Variáveis correlacionadas e/ou não normais

Caracterização original

Distribuição Normal

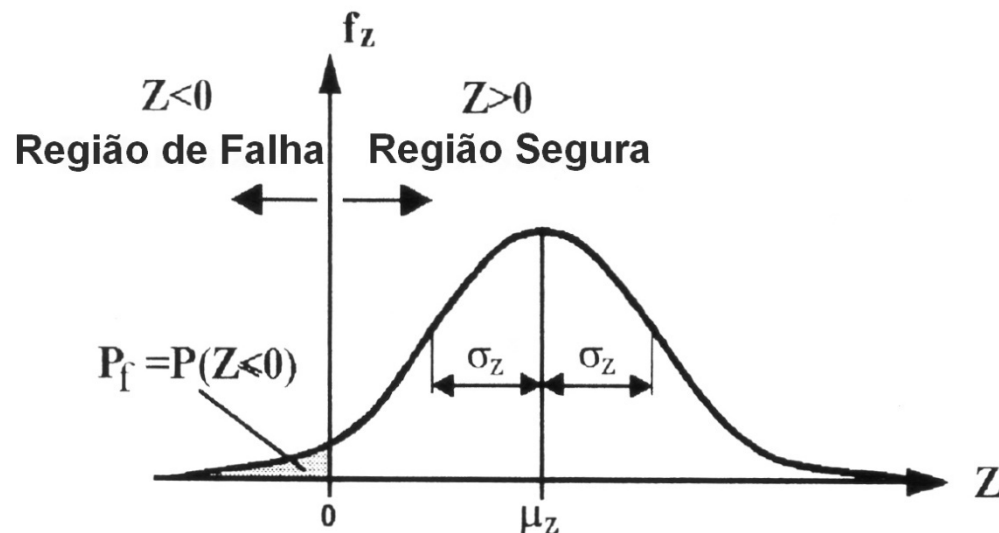
Independentes

Função de falha não linear

Linearizada (FORM) ou aproximada por um polinómio (SORM)

$$P_f = P(Z \leq 0) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$$

$\Phi$  - Função de distribuição de uma variável normal  
 $\mu$  - Média       $\sigma$  - Desvio Padrão



# Software

## PARASODE-BALI e @RISK

### > PARASODE-BALI:

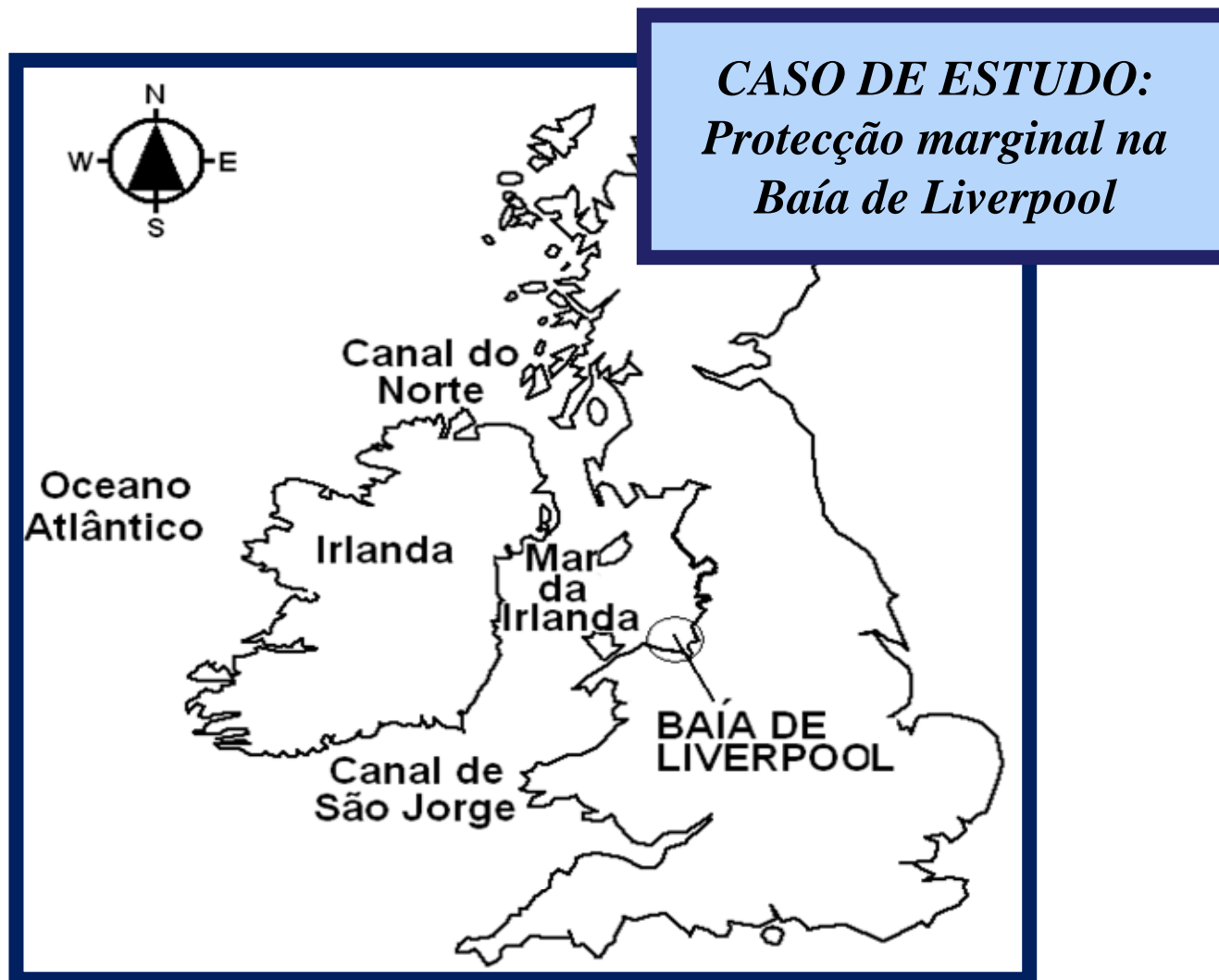
- Desenvolvido no LNEC
- Métodos probabilísticos de Nível II (FORM)
- Dois modos de funcionamento:
  - *Verificação da segurança de estruturas existentes*
  - *Dimensionamento de novas estruturas*
- Validação dos resultados com métodos de Nível III (@RISK)

### > @RISK:

- Comercializado pela Palisade Corporation
- Métodos probabilísticos de Nível III (Monte Carlo e LHS)
- Add-in do Microsoft Excel

# Caso de Estudo

## Galgamento – Protecção marginal na Baía de Liverpool



# Caso de Estudo

## Galgamento – Protecção marginal na Baía de Liverpool

### VAN DER MEER & JANSSEN (1995, 1998)

$$Z = Q - \frac{0.06 \xi_p \sqrt{gH_s^3}}{\sqrt{\tan \alpha}} \text{EXP} \left[ -A \frac{CL - SWL}{r \xi_p H_s} \right] \Rightarrow \xi_p \leq 2$$
$$Z = Q - 0.2 \sqrt{gH_s^3} \text{EXP} \left[ -B \frac{CL - SWL}{r H_s} \right] \Rightarrow \xi_p > 2$$

### HEDGES & REIS (1998, 2004)

$$Z = Q - A \sqrt{g(CH_s)^3} \left( 1 - \frac{CL - SWL}{rCH_s} \right)^{e_{GB}} \Rightarrow 0 \leq \frac{CL - SWL}{rCH_s} < 1$$
$$Z = Q \Rightarrow \frac{CL - SWL}{rCH_s} \geq 1$$

**CL** – a altura de coroamento da protecção marginal

**Q** – caudal médio que é admissível transpor a estrutura  
(manuais de galgamentos)

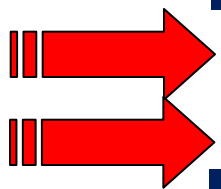
# Caso de Estudo

## Galgamento – Protecção marginal na Baía de Liverpool

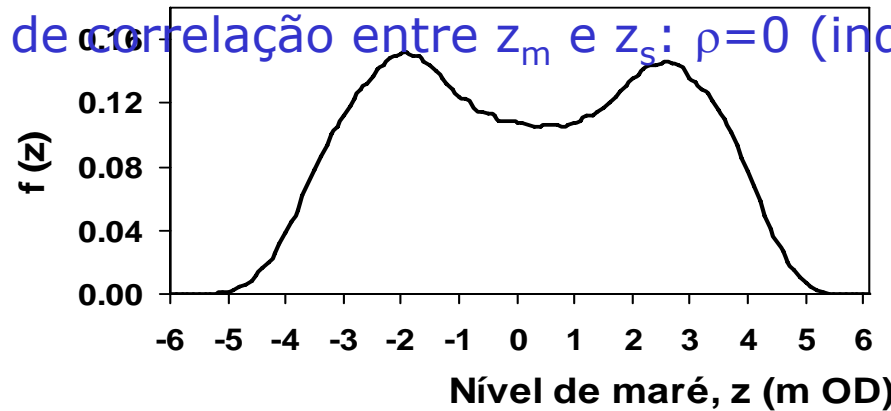
### > Caracterização das variáveis:

- Nível de água = **maré astronómica + surge** (*surge - sobrelevação de origem meteorológica*)
- Distribuições dos níveis de maré,  $z_m$ , e do surge,  $z_s$

Variável	Distribuição	Média, $\mu$	Desvio Padrão, $\sigma$	Limite Inferior
$z_m$ (m OD)	Empírica	0,275	2,362	-----
$z_s$ (m)	Gumbel	0,019	0,192	-----



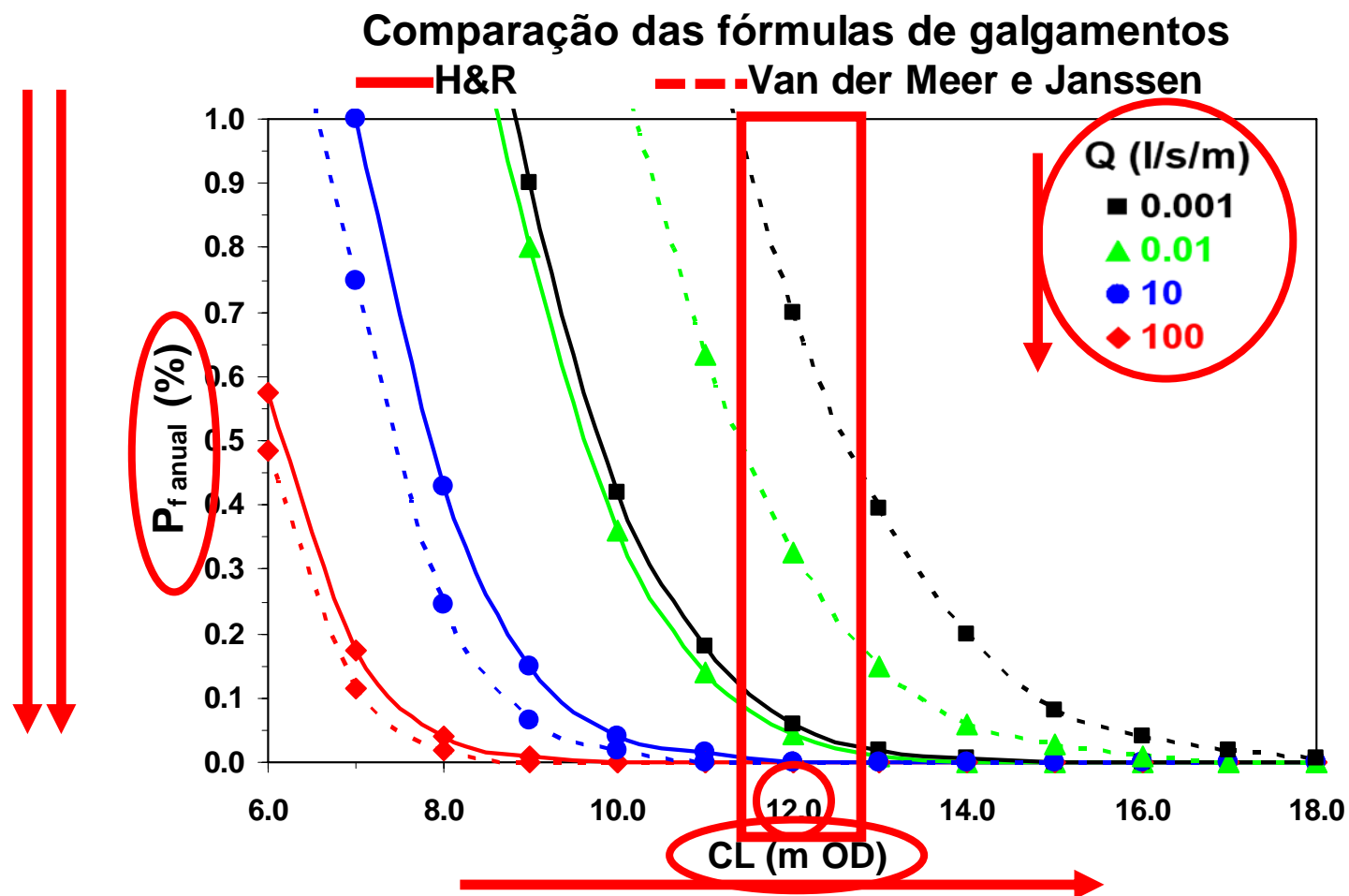
Liverpool  
 Coeficiente de correlação entre  $z_m$  e  $z_s$ :  $\rho=0$  (independentes)



# Caso de Estudo

## Galgamento – Protecção marginal na Baía de Liverpool

> Probabilidade de falha anual,  $P_f$ , versus altura de coroamento, CL, para diferentes valores do caudal médio admissível, Q





# Caso de Estudo

## Galgamento – Protecção marginal na Baía de Liverpool

> Probabilidade de falha anual,  $P_f$ , versus altura de coroamento, CL, para diferentes valores do caudal médio admissível, Q

Comparação das fórmulas de galgamentos

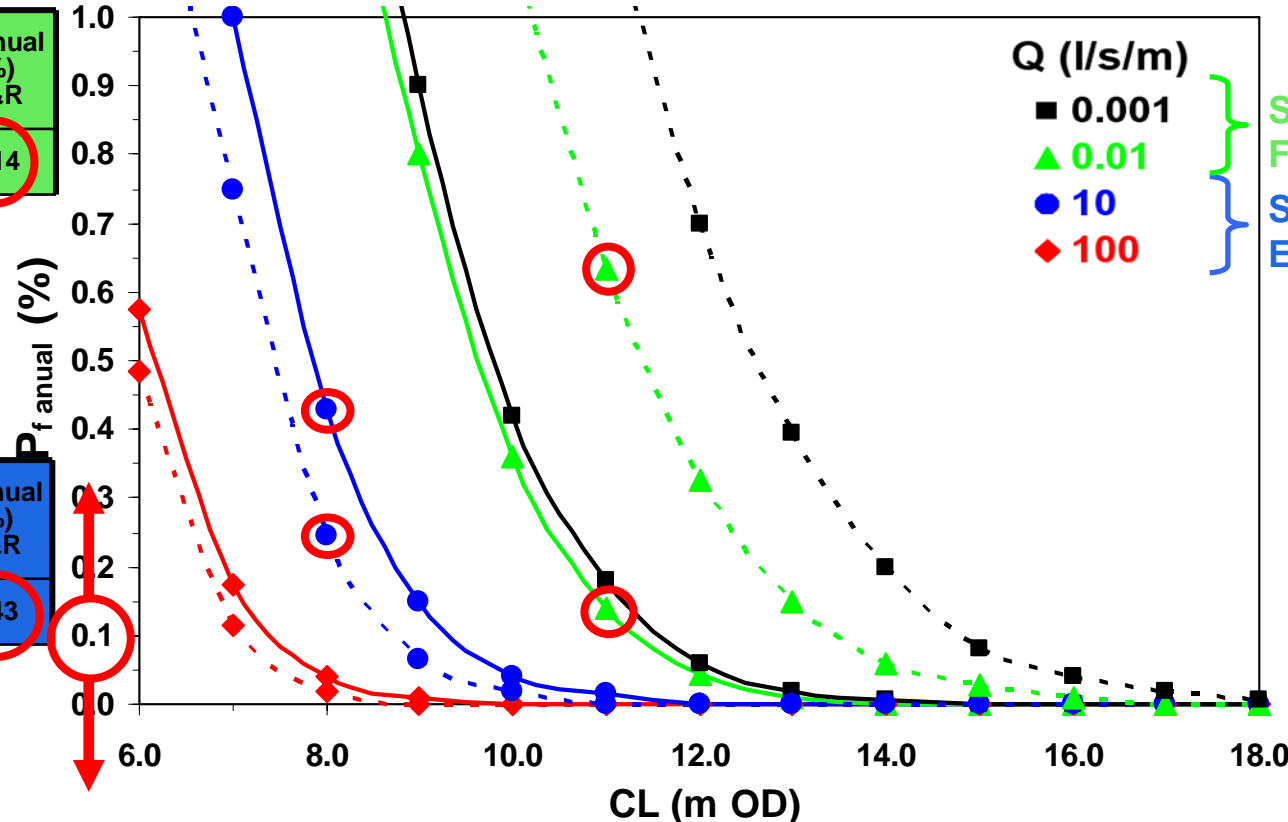
— H&R      - - - - Van der Meer e Janssen

Q=0.01l/s/m

CL (m)	$P_f$ anual (%) VM&J	$P_f$ anual (%) H&R
11	0.64	0.14

Q=10l/s/m

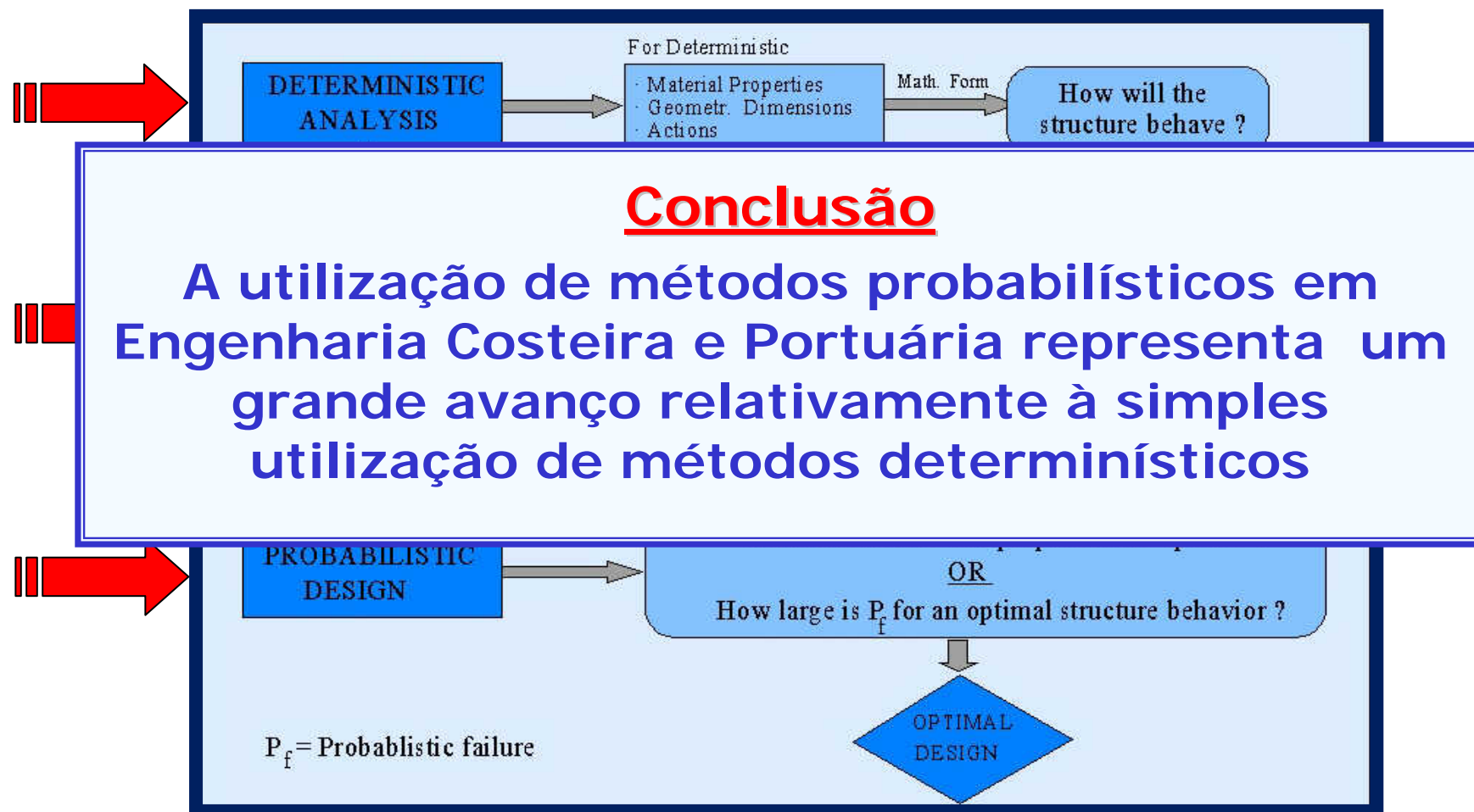
CL (m)	$P_f$ anual (%) VM&J	$P_f$ anual (%) H&R
8	0.25	0.43



Segurança Funcional  
 Segurança Estrutural

# Considerações Finais

> Os métodos determinísticos são desadequados a uma prática de engenharia que se pretende rigorosa e sustentada pelo conhecimento e interpretação científica da realidade



# Considerações Finais



A qualidade dos resultados obtidos através dos métodos probabilísticos depende de vários factores, incluindo:

- a fidelidade com que as funções de falha utilizadas retratam a realidade
- a veracidade dos dados utilizados



*Obrigada pela vossa atenção!*