

## ANÁLISE DAS EROSÕES LOCALIZADAS EM FUNDAÇÕES DE ESTRUTURAS OFFSHORE

Tiago Fazeres Ferradosa<sup>1</sup>, Francisco Taveira-Pinto<sup>1</sup>, Luciana das Neves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto,

Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto

dec12008@fe.up.pt; fpinto@fe.up.pt; lpneves@fe.up.pt

### Resumo

As erosões localizadas são uma ameaça à segurança de fundações de estruturas offshore. No projeto MARINET, proposta 61, a FEUP, em parceria com o IMDC – Bélgica, o HR Wallingford – Reino Unido e a UGhent – Bélgica, realizou ensaios experimentais em modelo físico, com vista à otimização do dimensionamento de sistemas de proteção contra erosões localizadas em torno de fundações de estruturas offshore. No âmbito da referida proposta, foram testados sistemas de proteção em enrocamento com comportamento do tipo dinâmico sob escoamento unidirecional (correntes e ondas) em torno de um pilar. A importância prática deste estudo é considerável pois, os custos associados à instalação e à manutenção dos sistemas de proteção estáticos são significativos. Neste artigo é apresentada a Análise em Componentes Principais (ACP) das medições efetuadas, que permitiu explicar o fenómeno com maior objetividade e validar as medições. Os resultados confirmaram que a análise dos dados medidos pode ser reduzida à interpretação de 3 variáveis sendo a perda de informação residual.

**Palavras Chave:** Erosões Localizadas; Fundações de Estruturas Offshore; Sistemas de Proteção Dinâmicos; Análise em Componentes Principais.

### Abstract

Scour represents a threat to the foundation of offshore structures safety. Within the MARINET project, proposal 61, FEUP in a partnership with IMDC – Belgium, HR Wallingford – United Kingdom and UGhent – Belgium has conducted experimental tests in physical model, in view of Optimizing the design of a scour protection system around offshore foundations. In the framework of the mentioned proposal, dynamic scour protection systems of armour rock were tested under unidirectional flow (waves and currents) around a slender pile. The practical relevance of this study is significant, because of the high costs associated to the installation and maintenance of static scour protection systems. In this paper, the Principal Components Analysis (PCA), which permitted to explain the scour phenomenon with better objectivity and to validate the measurements, is presented. The results confirm that the analysis of the measured data may be reduced to the interpretation of 3 variables, with minimization of the information losses to residual levels.

**Keywords:** Scour; Offshore Structures' Foundations; Dynamic Scour Protection Systems; Principal Components Analysis.

### Introdução e Enquadramento

As erosões localizadas são uma das principais ameaças à segurança de fundações de estruturas offshore e, por isso, os sistemas de proteção contra esse fenómeno são uma componente fundamental para garantir níveis adequados de segurança ao longo da vida útil da estrutura. Tipicamente, o dimensionamento dos referidos sistemas de proteção é efetuado para que estes tenham um comportamento estático que, na prática, corresponde a utilizar elementos com dimensão maior do que a estritamente necessária, por forma a circunscrever e limitar o movimento dos elementos individuais.

No âmbito do programa europeu MARINET, proposta 61, a FEUP, em parceria com o IMDC – Bélgica, o HR Wallingford – Reino Unido e a Universidade de Ghent – Bélgica, realizou um programa experimental em modelo físico, com vista à otimização do dimensionamento de sistemas de proteção contra erosões localizadas, em torno de fundações de estruturas offshore. Nessa otimização foram testados sistemas com um comportamento do tipo dinâmico. A importância deste estudo do ponto de vista prático é considerável porque, por um lado os custos associados à instalação e à manutenção periódica dos sistemas de proteção do tipo estático são muito significativos e, por outro, existem lacunas de conhecimento importantes sobre o comportamento e o dimensionamento dos sistemas dinâmicos.

Em modelo físico, realizado na Universidade de Aalborg – Dinamarca, foram testadas, sob a ação de escoamento unidirecional (correntes e ondas) em torno de um pilar, diferentes estruturas de proteção em enrocamento, quanto à espessura e ao diâmetro nominal dos blocos do manto de proteção. Neste artigo é apresentada a Análise em Componentes Principais (ACP) dos resultados experimentais com o intuito de procurar uma descrição precisa do fenómeno em causa, com minimização do esforço de análise e computação dos dados experimentais. A metodologia ACP, enquadra-se nas técnicas de estatística descritiva, aplicadas à análise de dados multivariados e permite, a partir de um conjunto de  $n$  variáveis dependentes e  $m$  observações, efetuar o cálculo de novas variáveis estatisticamente independentes entre si (Vicini, 2005). A principal vantagem da sua aplicação reside no facto de as novas variáveis (componentes principais) resultarem de uma redução de dimensionalidade considerável (Marôco, 2003). Esta redução conduz a esforços de computação e de análise de dados menores do que em estudos de comparação e validação de resultados experimentais, em modelo físico ou numérico, ou de campo. No caso particular dos estudos relativos a erosões localizadas, a proficuidade deste método torna-se evidente, uma vez que os parâmetros envolvidos no fenómeno são numerosos o que, em laboratório, obriga à medição e compilação de séries de dados relativas a diversas grandezas.

A metodologia ACP tem vindo a ser utilizada em diversas aplicações no âmbito da engenharia costeira, tendo em vista a descrição de fenómenos físicos, que envolvem a recolha de quantidades de informação consideráveis. Por exemplo, Buonaiuto *et al.* (2008) estudou as alterações batimétricas, devido à influência de marés na zona costeira de New York, recorrendo à ACP para analisar os padrões de alteração morfológica, Liang *et al.* (1992) utilizou esta abordagem estatística, para analisar perfis batimétricos sob condições marítimas de agitação, em Siuslaw no estado de Oregon, Kroon *et al.* (2008) utilizou uma variante deste método, designada de análise complexa em componentes principais, para analisar as alterações morfológicas e definir padrões de alteração anuais e de dez em dez anos, em fundos sedimentares. Outras investigações semelhantes foram desenvolvidas por Winant *et al.* (1975), Miller (2007), Ruessink *et al.* (2004), entre outros.

Durante os ensaios realizados foram efetuadas medições de 12 variáveis estatisticamente dependentes, incluindo as profundidades de erosão ao fim de 1000, 3000 e 5000 ondas. Com a ACP foram definidas 3 novas variáveis, estatisticamente independentes (componentes principais -  $Y$ ). Esta metodologia permite interpretar o fenómeno em estudo, com maior simplicidade e ainda confirmar correlações entre as variáveis originais, para efeitos de validação dos resultados experimentais. Além disso, possibilita a identificação das variáveis responsáveis pelo maior grau de variância dos dados originais e, como tal, do maior impacto das erosões localizadas.

A realização de ensaios laboratoriais, em consonância com a aplicação de conhecimentos estatísticos, tem permitido uma melhor compreensão do problema e igualmente a obtenção de resultados consideráveis, no que concerne à otimização de soluções de conceção de estruturas funcionais, seguras e economicamente viáveis.

Sempre que uma estrutura se encontra fundada sobre fundos móveis sujeitos à ação de um escoamento, sejam eles não-coesivos como as areias e gravilhas ou coesivos como é o caso das argilas, ocorre o fenómeno de erosão localizada observável na figura 1.

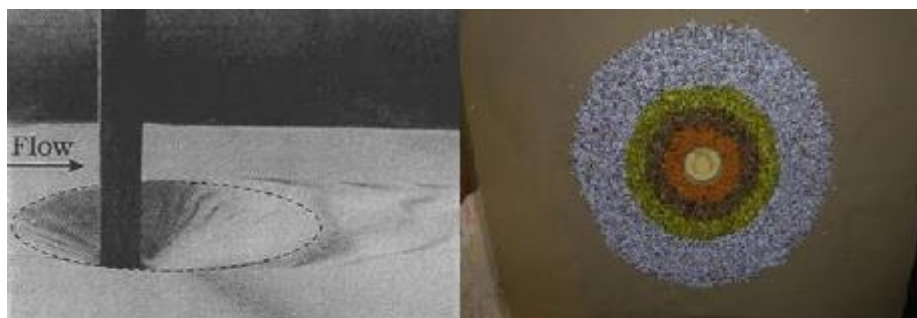


Figura 1 - Esquerda: forma típica da cavidade de erosão localizada (Sumer & Fredsøe, 2002); Direita: arranjo tipo do manto de protecção usado, sem inserção do pilar.

Este fenómeno conduz a um abaixamento generalizado da camada de solo de fundação, formando-se assim a denominada cavidade de erosão que tende a colocar em risco a estabilidade da estrutura. A incapacidade de prever com determinado grau de certeza os valores da profundidade de erosão e, conseqüentemente, o volume erodido em torno dos pilares, resulta em dois problemas extremamente graves. O primeiro prende-se com o colapso da própria estrutura que, para lá das perdas patrimoniais e danos ambientais e/ou financeiros, pode culminar com a irreparável perda de vidas humanas. O segundo é o sobre-dimensionamento, como resultado direto do desconhecimento desta realidade. Isto é, a dificuldade de prever o valor crítico da profundidade de erosão, tal como o seu comportamento e evolução ao longo do tempo, leva ao dimensionamento das fundações por excesso, a fim de evitar eventuais colapsos. Nesse sentido, muitas vezes ocorre o desperdício de recursos financeiros e materiais em quantidades consideráveis.

#### Instalação laboratorial e Testes

As experiências laboratoriais referidas consistiram na colocação do modelo de um pilar circular simples fundado em solos não-coesivos, no presente caso areia, sujeitando-o à passagem de um escoamento combinado de correntes e ondas.

De modo a minimizar os efeitos erosivos associados à estrutura, para cada experiência, foi construído um sistema de proteção na fundação do pilar que consistia na colocação de blocos de maiores dimensões (com tamanhos pré-definidos) que tenderiam não só a apresentar deslocamentos reduzidos, como também a garantir que o solo de fundação não sofreria erosões localizadas significativas. Este sistema de proteção encontra-se exposto na figura 1 do lado direito, sem a inserção do pilar que viria a ser posteriormente acoplado e sujeito aos agentes de erosão.

O programa laboratorial desenvolvido compreendeu um total de 22 testes onde foram monitorizadas e medidas as profundidades de erosão ao fim de  $i$  ondas ( $H_{iw}$  mm), velocidade média da corrente ( $U$  m/s), alturas de onda significativas ( $H_s$  m), período característico ( $T_p$  s), diâmetro médio nominal das partículas ( $D_{n50}$  mm), espessura da camada de proteção ( $E_p$  mm), altura de água ( $d_p$  m), grau de alteração visual da estrutura ( $S3D$  adimensional). Os dados foram recolhidos durante o período útil de realização de cada ensaio laboratorial, sendo que este poderia variar entre 3 a 5 horas.

Os testes decorreram num canal gerador de ondas e de correntes, cuja instalação está representada na figura 2. O modelo físico reduzido construído à escala 1/50, era representativo de condições existentes, por exemplo no Mar do Norte que banha a costa dinamarquesa e norueguesa assim como a costa inglesa e holandesa, onde não raras vezes são colocadas estruturas como Plataformas de Exploração Petrolífera ou Eólica.

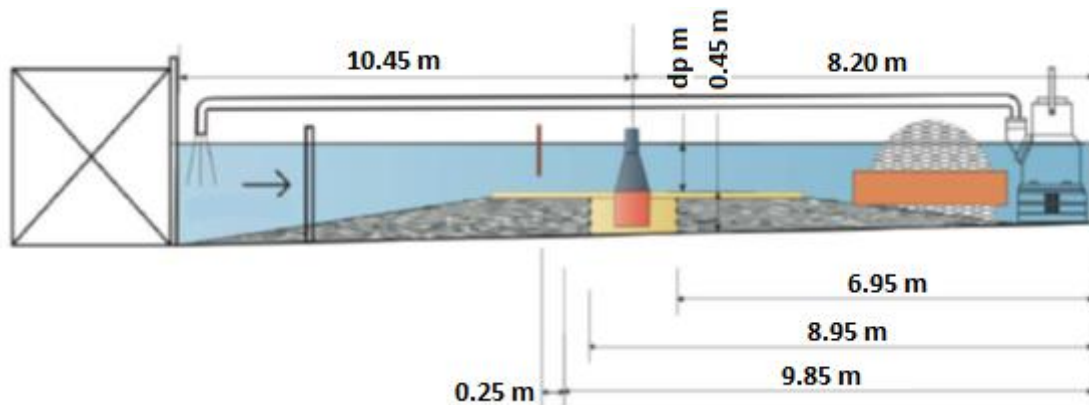


Figura 2 - Instalação laboratorial do canal de testes (sentido de escoamento da esquerda para a direita)

Em cada ensaio realizado eram medidos os perfis batimétricos (i.e. medidas das profundidades de erosão) em quatro momentos distintos. Primeiramente, antes de se iniciar qualquer tipo de escoamento, era realizado o levantamento de um perfil inicial, onde as profundidades assumiram a designação  $H_{0w}$ . De seguida, iniciava-se o escoamento em corrente e executava-se uma série de 1000 ondas que originaria um novo perfil ( $H_{1000w}$ ). Posteriormente, submetia-se de novo o pilar a uma outra série de 2000 ondas medindo-se novamente a batimetria na zona de protecção ( $H_{3000w}$ ), e tornava-se a repetir este passo com mais 2000 ondas gerando-se o perfil final de erosão ( $H_{5000w}$ ). A matriz geográfica dos pontos medidos foi organizada em sectores circulares dispostos por anéis, figura 3.

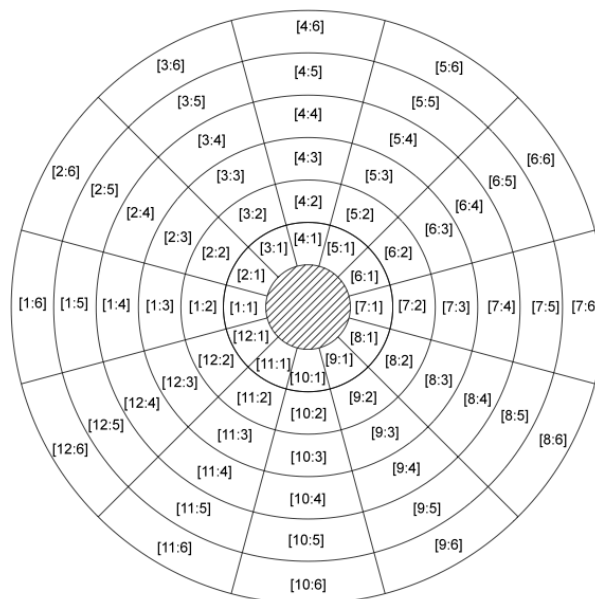


Figura 3 - Grelha de Coordenadas para cada secção. i;j em que i representa o setor e j o anel (sentido do escoamento de baixo para cima)

Os ensaios laboratoriais foram agrupados em três séries de acordo com a profundidade de água utilizada, assumindo as seguintes designações:  $sx_n$ , onde  $s$  é a série do ensaio (com  $x$  de 1 até 3) e  $n$  corresponde ao número do ensaio na própria série. Por exemplo, o quarto ensaio da segunda série surge com a nomenclatura  $s2_{004}$ .

As condições do protótipo constam na tabela 1, assim como as profundidades de água mediante cada série que viriam a ser convertidas segundo a escala 1/50, tomou-se como diâmetro de partida a medida de um pilar de fundação circular com 5 m ( $D_{pilar} = 5$  m).

Tabela 1 - Condições do Protótipo

Série	$d_p$ (m)	$U$ (m/s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$D_{pilar}$ (m)	$d_p/D_{pilar}$	Cenário
1ª	12	1.3	5 - 7	11	5	2.4	Baixa Profundidade (sem rebentação)
2ª	18	1.3	7	11	5	3.6	Profundidade Média
3ª	25	1.3	7	11	5	5.0	Águas Profundas

As condições alvo do modelo físico reduzido são apresentadas na tabela 2, como se segue:

Tabela 2 - Condições no modelo à escala geométrica 1:50

Série	$d_p$ (m)	$U$ (m/s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$D_{pilar}$ (m)
1ª	0.24	0.18	0.14	1.56	0.1
2ª	0.36	0.18	0.14	1.56	0.1
3ª	0.50	0.18	0.14	1.56	0.1

No que concerne aos blocos utilizados para construção do sistema de proteção, apenas foram estudados materiais de características não-coesivas. O cálculo da espessura da camada de proteção foi efetuado por múltiplos do diâmetro médio nominal utilizado em cada caso. O ângulo de talude aplicado no anel, localizado na zona mais exterior ao pilar (anel branco – figura 1), foi de 1/3 em todos os ensaios. A espessura de cada anel era de 5 cm, sendo que o anel exterior possuía 5 cm mais a distância necessária para perfazer o talude com a inclinação mencionada.

A tabela 3 sumariza os valores relativos aos solos utilizados, sendo que a camada de filtro corresponde ao material colocado por baixo dos anéis de proteção.

Tabela 3 - Caracterização dos solos utilizados em modelo físico na camada de proteção

Nome	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{50}$ (mm)	$D_{n50}$ (mm)	Granulometria do Protótipo	Função
Dansand n°2	2632	0.99	0.83	10 – 80 kg	Filtro Granular
Dansand n°5	2604	1.78	1.49	50/150 mm	Camada de Proteção
Dansand n°6	2567	2.69	2.26	80/120 mm	
Dansand n°7	2597	4.13	3.47	5 – 40 kg	
Dansand n°8	2564	6.01	5.05	10 – 60 kg	

As medições das profundidades de erosão foram obtidas com recurso a um *Laser Profiler* em mm e com um erro médio de  $\pm 0,1\%$ . No caso das velocidades o aparelho utilizado foi um *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)* cujas medições são obtidas em mm/s apresentando um erro médio de  $\pm 0,5\%$ .

#### Metodologia: Análise em Componentes Principais (ACP)

A ACP é utilizada com a intenção de descrever um conjunto de dados contidos num quadro organizado por indivíduos/observações ( $n$  linhas) e variáveis ( $p$  colunas) numéricas. A análise, em causa, não corresponde apenas a uma simples seleção de  $k$  variáveis (com  $k < p$ ), mas sim à criação de novas variáveis, designadas de Componentes Principais ou Factores, que sintetizam a informação contida nas variáveis originais, através da combinação linear destas.

Assim, o raciocínio que descreve o objectivo desta técnica é o seguinte: tendo um conjunto de variáveis  $p$  com  $n$  indivíduos, cuja quantidade é extremamente elevada, pretende-se transformar esse conjunto em  $k$  variáveis, garantindo que a perda de informação (variabilidade) é a menor possível. Após a aplicação desta metodologia, obtém-se um novo espaço de dimensão  $k$ , que permite a análise do fenómeno, em causa, recorrendo a um menor esforço de cálculo e análise interpretativa. A aplicação desta técnica ao presente estudo permite também identificar as variáveis que, em futuros programas de teste, deverão ser alvo de maior escrutínio.

A ACP facilita a interpretação de bases de dados extensas e, permite também identificar quais as variáveis com maior influência num determinado fenómeno. Desta forma é possível seleccionar e focar a análise sobre um conjunto mais restrito de variáveis, garantido que a perda de informação significativa é minimizada.

A redução de variáveis só pode ser efetuada se as  $p$  variáveis originais não forem independentes e tiverem coeficientes de correlação de Pearson não nulos (Vicini, 2005). Cada componente é determinada pela combinação linear das variáveis originais, que apresentam a maior variabilidade na matriz de co-variância. Assim, o método ACP determina as referidas componentes e maximiza a variância dos dados originais. Reter a máxima variância corresponde a minimizar as perdas de informação no novo modelo protagonizado pelas componentes principais.

O cálculo das diversas componentes principais baseia-se na obtenção dos valores e vetores próprios da matriz de variância-covariância ( $\epsilon$ ), ou em alternativa, da matriz de correlação ( $R$ ).

Por vezes pode ser necessário colmatar eventuais diferenças nas unidades dos dados sobre os quais se trabalha, ou ser conveniente “standardizar” as variáveis originais antes dos cálculos. Pode-se resumir o algoritmo desta análise através da figura 4.

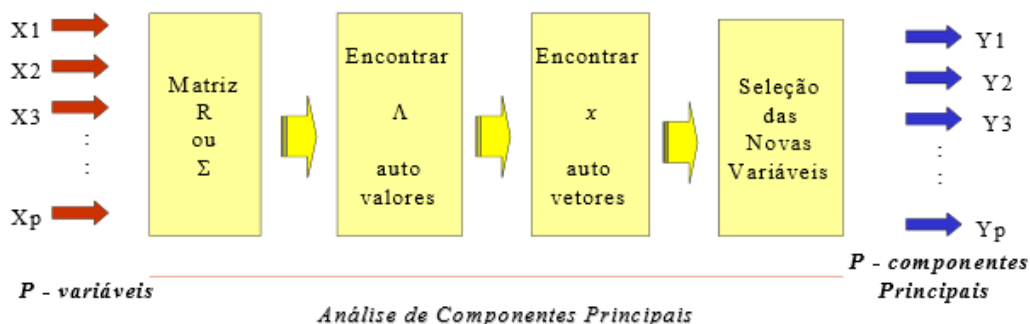


Figura 4 - Algoritmo de aplicação da Análise em Componentes Principais (Souza, 2000)

Note-se que auto-valores e auto-vectores é a designação dada por Souza (2000) para valores próprios ou vectores próprios.

A interpretação do significado real de  $Y_i$  é efetuada com base na correlação existente entre cada uma das variáveis e a componente principal, ou seja, averiguando-se qual a influência de uma determinada variável sobre a componente. Assim, a correlação entre  $X_j$  e  $Y_i$  pode ser dada pelo coeficiente de Pearson entre ambos  $\rho(X_j; Y_i)$ .

O recurso à matriz R garante que todas as variáveis têm o mesmo grau de importância e que as componentes principais não são influenciadas por contrastes equívocos, quer nas unidades quer na magnitude das observações analisadas. É importante notar que a matriz R possui uma diagonal principal formada apenas por “1”. Portanto, tem tantos valores 1 quanto as  $p$  variáveis existentes. Assim, a proporção explicada pelo  $k$ -ésimo componente principal é obtida do seguinte modo:  $\lambda_k / \sum(\lambda_1 + \dots + \lambda_p)$  com  $k = \{1, 2, \dots, p\}$  ou então  $\lambda_k / \text{traço}(R)$ .

Pode-se dar o caso de a matriz de correlação R apresentar valores próprios nulos, o que acontece quando duas variáveis são linearmente dependentes entre si. Nesse caso, a variação total das variáveis  $X$  pode ser explicada pelas primeiras componentes principais que não chegam a atingir o número  $p$ . Outro caso semelhante corresponde a variáveis cujos valores próprios de R, que, embora não sejam nulos estão muito próximos de 0 na prática essas

variáveis irão assumir pouca importância e acrescentam pouca informação acerca da variação total dos dados originais. Consequentemente, a escolha de componentes principais pode ser feita em menor número do que as  $p$  componentes obtidas.

Existem diversos critérios para definir o número  $k$  de componentes principais a serem utilizadas para explicar a variação das observações do quadro de dados iniciais, sem que exista perda de informação significativa. O presente estudo coloca em evidência 3 dos critérios mais utilizados, na tabela 4: Critério de Kaiser, Critério de Cattell e o Critério de Pearson.

Tabela 4 - Critérios de retenção das componentes Y (criado a partir de Vicini, 2005)

Critério de retenção de componentes	
<b>Kaiser</b>	Reter as componentes cujo $\lambda > 1$ ou cuja variância acumulada seja superior a 70%
<b>Cattell</b>	Reter até às componentes cuja $(\lambda_{Y_i} - \lambda_{Y_{i+1}}) \approx 0$
<b>Pearson</b>	Reter as componentes que expliquem uma variância acumulada superior a 80%

O critério de Cattell recorre por vezes ao gráfico  $\lambda_{Y_i}$  vs  $Y_i$ , ou em alternativa à curva  $\lambda_{Y_i}$  vs %variância acumulada, como se apresenta na figura 5, escolhendo o ponto onde a curva referida se aproxima da horizontal. Na prática, trata-se do ponto, onde a consideração de mais uma componente principal deixa de ser profícua, por comparação com o incremento percentual verificado na variância acumulada, que se consegue explicar. A figura 5 coloca em evidência a referida representação gráfica, onde o ponto A indica o número de componentes a reter, que neste caso é  $k=2$ .

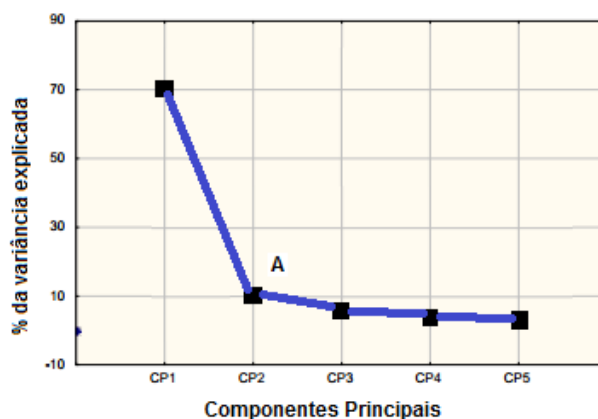


Figura 5 - Curva de aplicação genérica do critério de Cattell

A aplicação do método ACP foi efetuada recorrendo ao *software* de estatística SPSS versão 19, que efetua o cálculo automático das componentes principais, sendo que a lista de variáveis sobre as quais incidiu análise consta na tabela 5. A notação HiwS+ reporta-se à mesma grandeza de Hiw: no entanto, refere-se apenas ao setor cuja média de profundidades de erosão ao fim de 0, 1000, 3000 e 5000 ondas é mais elevada. O valor de Hf-Hi presta-se à maior diferença de profundidades entre o perfil de 5000 ondas e o perfil inicial de 0 ondas, os valores negativos indicam erosão, e os valores positivos reportam-se a situações de acresção.

O caso da variável Hmáxabsoluto refere-se ao valor mais elevado, em módulo, relativamente a Hiw de um determinado teste, uma vez mais, os valores negativos são indicadores de erosão.

Tabela 5 - Lista de variáveis sobre as quais se aplicou a ACP recorrendo ao SPSS

Variáveis Analisadas segundo ACP
$D_{n50}$ (mm)
$E_p$ (mm)
$d_p$ (m)
$H_s$ (m)
$H_{0wS+}$ (mm)
$H_{1000wS+}$ (mm)
$H_{3000wS+}$ (mm)
$H_{5000wS+}$ (mm)
HmáxAbsoluto (mm)
Hf-Hi (mm)
S3D (m/m)
U (m/s)

### Apresentação e Discussão de Resultados

Utilizando *software SPSS* obtiveram-se os resultados da tabela 6, nomeadamente, os valores das extrações (Ferradosa, 2013). Do lado esquerdo, encontra-se o valor unitário que corresponde a 100% da variabilidade dos dados iniciais, para uma certa variável, e, do lado direito, encontra-se a percentagem ou o valor entre 0 e 1 que corresponde à variabilidade que foi extraída daquela variável face à redução de dimensionalidade efectuada. Assim, por exemplo, poder-se-à observar que a informação relativa à variável  $d_p$  no cálculo das novas componentes tem uma retenção de 94.3%.

A tabela 6 é extremamente importante para dar uma primeira noção relativamente às variáveis que estão associadas às perdas de informação mais significativas. Deste modo, torna-se possível perceber que, se uma variável tiver uma extração próxima de zero, então, as componentes calculadas explicam com menor eficiência a variabilidade da matriz de dados inicial associada a esta variável. Caso contrário, i.e. uma extração próxima de 1 implica que a perda de informação é reduzida, e as componentes explicam bem a informação contida nos dados originais.

Tabela 6 - Valores das Extrações relativas à variabilidade inicial dos dados medidos nos 22 testes

Variáveis	Variabilidade original	Extração
$D_{n50}$ (mm)	1,000	0,767
$E_p$ (mm)	1,000	0,564
$d_p$ (m)	1,000	0,943
$H_s$ (m)	1,000	0,868
$H_{0wS+}$ (mm)	1,000	0,924
$H_{1000wS+}$ (mm)	1,000	0,967
$H_{3000wS+}$ (mm)	1,000	0,974
$H_{5000wS+}$ (mm)	1,000	0,965
HmáxAbsoluto (mm)	1,000	0,987
Hf-Hi (mm)	1,000	0,958
S3D (m/m)	1,000	0,952
U (m/s)	1,000	0,823

Como se constata pela observação dos valores expostos na tabela anterior, as perdas de informação não foram significativas, dado que a maioria das variáveis apresenta extrações bastante próximas de 1, nomeadamente no que respeita aos valores associados às profundidades de erosão. É importante realçar que as perdas de informação se acentuaram ao nível do diâmetro nominal das partículas ( $D_{n50}$  com 76.7%) e da Espessura da camada de proteção (56.4%). Foram os dados relativos às variáveis “do sistema de proteção” cuja variabilidade ficou pior explicada, com o cálculo das componentes principais. Em contrapartida, as profundidades e as características hidrodinâmicas tiveram extrações próximas da variabilidade total, não evidenciando perdas de informação consideráveis.

Como é habitual nas técnicas de redução de dimensionalidade, os ganhos são evidentes em diversos aspetos que têm vindo a ser referidos, contudo as perdas de informação são sempre inevitáveis. A aplicação do método ACP convive bem com essa inevitabilidade, na medida em que minimiza as perdas de informação para níveis diminutos, que pouco afetam as potencialidades de eventuais considerações que venham a ser feitas com base na análise das componentes principais, em vez do tratamento das variáveis originais.

A tabela 7, apresenta o cálculo das componentes principais. Podem-se observar os valores da variância explicada por cada uma das componentes, a variância explicada acumulada e os diversos valores próprios, associados a cada valor de  $Y_i$  de acordo com o algoritmo descrito. O *software* recorre, por defeito, ao critério de Kaiser para selecionar o número de componentes que devem ser tomadas em consideração. Assim, neste caso, apesar da ACP originar, a partir de 12 valores próprios, 12 componentes principais, o programa informático recomenda a retenção de 3 componentes. Isto ocorre porque apenas três delas têm valores próprios superiores a 1, como se pode ver pela coluna denominada de Total onde  $\lambda_1=5,243>\lambda_2=2,833>\lambda_3=2,616$ .

Tabela 7 - Valores próprios de R, Variância Explicada, e Seleção das Componentes Principais

Componente	Valores Próprios		
	Total ( $\lambda$ )	% Variância	Acumulada %
1 -----Y <sub>1</sub>	5,243	43,695	43,695
2 -----Y <sub>2</sub>	2,833	23,610	67,304
3 -----Y <sub>3</sub>	2,616	21,800	89,104
4	0,615	5,125	94,229
5	0,292	2,431	96,660
6	0,203	1,690	98,350
7	0,107	0,893	99,244
8	0,042	0,347	99,590
9	0,026	0,213	99,804
10	0,014	0,114	99,917
11	0,006	0,053	99,970
12	0,004	0,030	100,000

No entanto, repare-se que o critério de Cattell e o critério de Pearson são igualmente cumpridos, pelo que a escolha de 3 componentes principais sugerida pelo SPSS parece ser bastante adequada. Na coluna referente à variância explicada acumulada, constata-se que as 3 primeiras componentes principais explicam 89,104% da variância total (>80% mencionada no critério de Pearson). Atendendo ao gráfico Scree Plot, figura 6, onde consta a relação entre os valores próprios e as componentes obtidas, observa-se que a quarta componente possui já um valor próprio extremamente próximo da décima segunda componente. Deste modo, a perda de informação é extremamente reduzida quando não se utilizam estas componentes, por comparação com a que se observa nas três primeiras. A consideração da quarta componente leva a um incremento de cerca de 5% na variabilidade explicada, pelo que se torna plausível considerar somente as 3 componentes referidas no início, já que estas explicam uma percentagem muito considerável e satisfatória dos dados originais, face à redução de variáveis a considerar inicialmente. Não se justifica, pois, a consideração de mais um valor de  $Y_i$  para um ganho de apenas 5% na variabilidade explicada. Note-se, que considerar por exemplo, a terceira componente levou a um incremento de variabilidade explicada da ordem dos 22%. A escolha de três componentes permite, então, ter em conta a sugestão dada pelo critério de Cattell, apesar de esta se prestar à eventual consideração da quarta componente. Acrescenta-se, ao que foi mencionado, o facto de ser difícil encontrar um significado físico correcto para  $Y_4$ , uma vez que a variância explicada é já um pouco residual e pode não corresponder a um

conjunto de variáveis bem definido, com uma natureza semelhante, segundo uma perspectiva real do fenómeno.

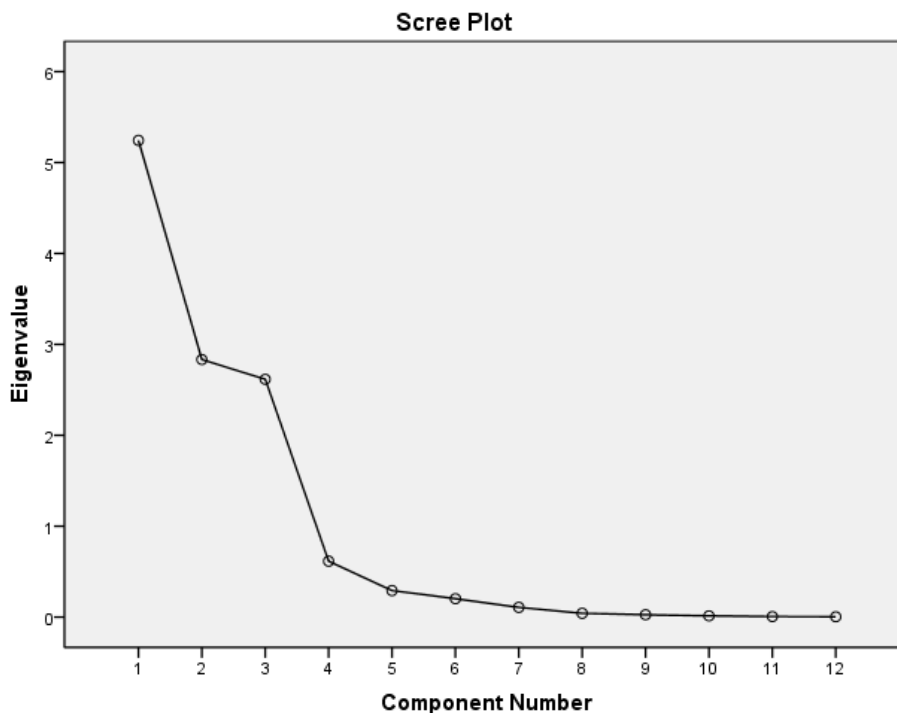


Figura 6 - Scree Plot: valores próprios ( $\lambda$ ) vs Componentes Principais (Critério de Cattel)

A informação evidenciada na tabela 7 pode ser ainda analisada de acordo com as extrações compiladas na tabela 6. As 3 componentes principais explicam, como se referiu, 89,104% da variância total dos dados observados, o que deixa 10,896% da variância dos dados originais por explicar. Atendendo ao que se concluiu da tabela 6, é possível afirmar que, desta percentagem inexplicada, a quantidade de informação perdida está maioritariamente relacionada com as variáveis diâmetro nominal das partículas e espessura da camada de proteção. Este facto advém de estas variáveis apresentarem os menores valores de extração, sendo portanto as que ficaram com a sua variabilidade pior explicada.

Tão importante quanto perceber quais as variáveis que estão associadas à informação que se perdeu, é compreender de que forma as variáveis originais se relacionam com as componentes principais calculadas, isto é, de que forma  $X_i$  contribui para  $Y_i$ . Para o devido efeito, torna-se essencial obter a tabela 8, denominada de Component Matrix, que coloca em evidência a correlação entre as variáveis originais e cada uma das componentes. Portanto, a tabela 8 dá os coeficientes de Pearson para cada par  $(X_i, Y_j)$ . Estes coeficientes permitem analisar quais as variáveis que estão melhor correlacionadas com determinada componente. Esta análise permite, inclusive, classificar cada componente de acordo com a natureza das variáveis que mais contribuem para a sua formação.

Relativamente à primeira componente, observa-se que as variáveis que apresentam correlações mais fortes são aquelas que se reportam ao comportamento das profundidades de erosão localizada. Repare-se que as variáveis  $H_{iwS+}$  e  $H_{máxabsoluto}$  possuem coeficientes superiores a 0,90, i.e. muito próximos de 1. Na prática, pode-se dizer que as variáveis inerentes à profundidade de erosão contêm uma variabilidade que é muito bem representada, pela primeira componente principal. Colocando a questão noutros termos, é possível afirmar que a contribuição destas variáveis para a componente, em questão, é elevada. Além disso, não só estes coeficientes são indicadores de correlações fortes, como são positivos, o que indica que aumentos nos valores destas variáveis que traduzem a severidade do processo, geram incrementos na primeira componente principal. Constatase, portanto, que as variâncias

de  $H_iwS+$  e  $Hmáxabsoluta$  encontram-se bem explicadas nos 43,695% de variância explicada por  $Y_1$ .

Tabela 8 - Contribuições de  $X_j$  para  $Y_i$  - Coeficientes de Pearson

Component Matrix			
Variáveis	Y1	Y2	Y3
$D_{n50}$ (mm)	-0,312	-,341	,744
$E_p$ (mm)	-0,349	-,430	-,508
dp (m)	-0,104	0,944	-0,204
Hs (m)	-0,345	0,854	-0,137
H0wS+ (mm)	0,913	0,287	0,091
H1000wS+ (mm)	0,959	0,141	0,168
H3000wS+ (mm)	0,977	-0,091	0,106
H5000wS+ (mm)	0,958	-0,185	0,117
HmáxAbsoluto (mm)	0,974	-0,158	0,112
Hf-Hi (mm)	-0,270	0,328	0,881
S3D (m/m)	-0,235	0,314	0,893
U (m/s)	0,438	0,732	-0,309

Se se atentar nas restantes variáveis, identificam-se coeficientes de correlação muito menores, indicadores de correlações fracas e pontualmente moderadas. Os sinais negativos desses coeficientes indicam que, quando as variáveis em causa diminuem, a componente principal aumenta, o que é plausível dada a influência que essas variáveis têm no incremento das profundidades de erosão. Por exemplo, se  $D_{n50}$  diminui as tensões de arrastamento críticas são menores, pelo que as profundidades aumentam, sabendo que os aumentos de  $H_iwS+$  e  $Hmaxabsoluta$  implicam um acréscimo nesta componente principal, seria estranho se o coeficiente de correlação para o par  $(D_{n50}; Y_1)$  fosse positivo. Note-se que  $\rho(D_{n50}; Y_1) = -0,312$ . O mesmo ocorre, por exemplo, para a espessura da camada de proteção e para a altura de água. O raciocínio inverso é igualmente válido, pois, da observação da velocidade média do escoamento unidirecional ( $U$ ), conclui-se que o valor de  $\rho$  é positivo (0,438). Ou seja, se  $U$  aumenta, então,  $Y_1$  também aumenta, o que é perfeitamente plausível, uma vez que velocidades maiores estão associadas a profundidades de erosão mais severas, graças ao aumento da capacidade de transporte do escoamento e conseqüente erosão mais acentuada.

A erosão localizada na vizinhança de um pilar, e no seu sistema de proteção pode ser representada pela variável S3D. Assim, um S3D “mais negativo” significa que houve erosões em maior quantidade do que acressões, pelo que se considera que a severidade do processo aumentou. Como tal, se S3D diminui (possui valores negativos em maior quantidade i.e. mais erosões) então a primeira componente principal aumenta.

Repare-se na vantagem que é poder comparar cada uma das doze variáveis originais com uma só componente (nova variável  $Y_1$ ) que traduz de forma bastante adequada, a severidade do processo que está a ser estudado. Este facto, por si só, reduz significativamente o trabalho, esforço de computação e complexidade de raciocínios, inerentes à análise de 12 variáveis com 22 indivíduos (matriz original-  $22 \times 12 = 264$  elementos) entre si.

No que concerne a  $Y_1$ , observou-se que esta se encontra fortemente correlacionada com as profundidades de erosão localizada e que tende, portanto, a traduzir informação que, de forma bastante direta, se pode correlacionar com a severidade do processo. Deste modo,  $Y_1$  chamar-se-á Componente das Profundidades de Erosão e o seu significado físico ou real corresponde à severidade do processo de erosão em si.

Prosseguindo agora para a segunda componente principal comprova-se que as variáveis que evidenciam uma maior contribuição para  $Y_2$  são, por ordem decrescente: a profundidade de água (0,944), a altura de onda (0,854) e a velocidade média do escoamento unidirecional (0,732). A análise e interpretação desta componente principal, que explica 23,610% da

variância presente nos dados originais, deve ser feita de forma mais cautelosa à semelhança do que acontece com a terceira componente principal, uma vez que os valores de  $\rho$  apesar de indicarem correlações fortes ou moderadas (perto do forte) não são tão elevadas como as que se apresentam para as profundidades na Componente das Profundidades de Erosão.

Observando a natureza das variáveis que têm maior correlação com a segunda componente, constata-se que as três formam um conjunto de dados originais que, na prática, traduzem as condições que caracterizam o escoamento na sua forma combinada, ou seja, que descrevem o escoamento quer em termos de corrente, quer em termos de estado de agitação. Verifica-se ainda que os incrementos associados a estas três variáveis geram aumentos na componente, pois os valores dos coeficientes de Pearson são positivos. Poder-se-ia afirmar que se fosse pretendida uma análise das condições inerentes à dinâmica do escoamento, utilizado para estes testes laboratoriais, essa análise deveria incidir sobre a segunda componente principal. Tendo em consideração o que foi supracitado, nomeadamente no que respeita à natureza de  $Y_2$ , é plausível afirmar que esta componente principal poderia ser denominada de Componente das Características Hidrodinâmicas, dado o facto de o seu significado físico corresponder à caracterização da corrente unidirecional e do estado de agitação.

Da análise da tabela 8, identificam-se 4 variáveis originais como sendo as que melhor se correlacionam com  $Y_3$ . A terceira componente obtida através da aplicação de ACP deve ser interpretada, essencialmente, face às contribuições de  $D_{n50}$ ,  $E_p$ , ( $Hf-Hi$ ) e de  $S3D$ , visto que, os coeficientes  $\rho$  destas variáveis apresentam consonância de sinais, relativamente, às considerações teóricas, que têm vindo a ser efetuadas, sobre o fenómeno de erosão localizada. Os valores positivos para todas as variáveis, exceto  $E_p$ , indicam que acréscimos nas suas observações geram acréscimos em  $Y_3$ . Quando  $D_{n50}$  aumenta os perfis batimétricos tendem a ser menos erodidos, pelo que as diferenças iniciais e finais de profundidades, assim como o grau de alteração visual da estrutura, tendem a ter valores mais próximos da acessão, ou seja, assumem valores cada vez “mais positivos”, o que indica, regra geral, menores alterações da morfologia batimétrica, na vizinhança do pilar. Ou seja, entende-se que seja plausível esta concordância de coeficientes de Pearson positivos, pois, um maior  $D_{n50}$  gera menores erosões (maior massa dos blocos de proteção=menos arrastamentos) e mais acessões devido a partículas menores do que as da camada de proteção que podem vir de montante. Em contrapartida, para a correlação com a espessura da camada de proteção o valor obtido é negativo, pois, camadas mais espessas implicam maior estabilidade do perfil, assim, se esta variável aumenta, a componente  $Y_3$  diminui, já que a propensão para uma alteração batimétrica não é tão elevada. Maiores valores de  $E_p$  levam a menores alterações no entanto, se estas alterações forem geradas por acessões, como é o caso, devidas a material não pertencente à camada de proteção, que surgiu de montante, então esta interpretação deve ser mais cautelosa, pois apesar de  $E_p$  aumentar ocorrem alterações batimétricas por causa da acessão gerada.

Num raciocínio análogo ao que foi efetuado para as duas primeiras componentes, torna-se possível afirmar que o significado físico desta componente é da mesma índole que as 4 variáveis originais mencionadas, por isso um nome adequado para a  $Y_3$  poderia ser Componente das Características do Sistema de Proteção. Quanto maior a magnitude de  $Y_3$  menor é a propensão para existirem alterações batimétricas do perfil junto do sistema.

Se for contabilizado o total das três componentes percebe-se que as doze variáveis assumem correlações fortes com pelo menos uma delas, e que a variância fica suficientemente bem explicada. A consideração de uma quarta componente revela-se então desnecessária e apenas consideraria uma parte já residual da variância total original. É possível que a correlação das variáveis com a quarta componente não evidenciasse nenhuma de cariz forte, i.e. superior a 0,7. A ser incluída na presente análise, e a verificar-se a ausência de correlações fortes, poder-se-ia denominar  $Y_4$  de Componente de Variâncias Residuais: no entanto, a existência de um significado físico não seria de todo clara ou inequívoca.

A tabela 9 resume a natureza e significado das 3 componentes principais calculadas. Os cálculos efetuados, através do *software* SPSS, partiram da matriz de correlação ( $R$ ) dos dados originais, isto é da matriz  $R$ . Desta feita para se obterem os valores pretendidos para cada

componente principal, os cálculos devem ter em conta os valores das variáveis originais “standardizadas”. Os valores assumidos para cada uma das componentes são, portanto, apresentados na tabela 10. Note-se que, como seria de esperar, o número de elementos de cada vetor que traduz a sua componente é de 22, pois, cada variável original foi observada para os 22 testes, não tendo existido qualquer tipo de falha na recolha de dados.

Tabela 9 - Significado físico das 3 Componentes Principais Calculadas com ACP

Componente Principal	Designação	Significado Físico
$Y_1$	Componente das Profundidades de Erosão.	Severidade do processo de erosão localizada.
$Y_2$	Componente das Características Hidrodinâmicas	Caracterização da dinâmica do escoamento e do estado de agitação, atendendo à ação combinada da corrente com as ondas e a profundidade de água.
$Y_3$	Componente das Características do Sistema de Protecção	Propensão para a existência de alterações batimétricas, atendendo às características do sistema de protecção.

Tabela 10 - Componentes Principais após as combinações lineares (variáveis standard)

Teste	Valores <i>standard</i> de:		
	Y1	Y2	Y3
S1_001	-0,801	-2,066	0,294
S1_002	0,195	-1,235	1,862
S1_003	1,016	-1,108	0,365
S1_004	0,951	-0,981	0,245
S1_005	1,304	-1,760	-1,623
S1_006	0,642	-1,027	0,164
S2_001	-1,877	-0,155	1,064
S2_002	-0,412	0,095	1,373
S2_003	0,012	-0,091	0,028
S2_004	-0,223	0,121	0,799
S2_005	-0,752	-0,508	-1,670
S2_006	-1,146	-0,065	-0,613
S3_002	1,046	1,340	0,881
S3_003	0,881	0,919	-0,245
S3_004	1,617	1,196	0,764
S3_005	-0,866	0,722	-1,168
S3_006	0,849	1,048	-0,679
S3_007	0,483	0,555	-1,515
S3_008	0,360	0,974	-0,146
S3_009	-1,699	0,785	0,322
S3_010	-0,477	0,946	0,744
S3_011	-1,102	0,296	-1,246

Na tabela 10, os diversos elementos “standardirizados” de cada componente, podem ser transformados nas mesmas unidades das variáveis originais, multiplicando-se pelo desvio padrão e somando a média. Note-se que não existe teste s3\_001, devido à ocorrência de dificuldades técnicas. Da tabela anterior, poderão ser comparados os diferentes testes consoante a componente que se deseja privilegiar. Por exemplo, pode-se referir que os testes identificados como mais gravosos, em termos de severidade das erosões localizadas (profundidades maiores), dentro da sua série, foram respetivamente s1\_005, s2\_003 e s3\_004. O objectivo primordial do presente estudo não passa pela comparação dos testes em si, mas sim por averiguar a proficuidade da análise ACP para este tipo de comparações: no entanto, fica esta nota a comprovar a utilidade do presente método. Outra vantagem da ACP reside no facto de os testes comparados, por uma determinada componente principal incluírem os efeitos combinados de todas as variáveis envolvidas e não apenas uma única grandeza considerada.

Refira-se ainda que cada um destes vetores próprios é ortogonal ao que se lhe segue, pois não foi utilizado no método ACP qualquer tipo de rotação de eixos principais. Havia sido oportunamente referido no início da presente secção que o cálculo dos vetores próprios associados a  $\lambda_i$  deveria ter em conta as condições de normalidade e ortogonalidade, para uma correta aplicação da Análise em Componentes Principais. A independência estatística das diversas componentes principais era resultado do cumprimento destas condições. Portanto, se os vetores próprios calculados garantirem que as Componentes das Profundidades de Erosão, das Características Hidrodinâmicas e das Características do Sistema de Proteção são independentes, então, a matriz de correlação relativa aos 3 factores ( $R_Y$ ) deverá ser igual à matriz identidade, isto é com ausência de correlações lineares  $\rho(Y_i; Y_j)=0$ , e com a diagonal principal formada por uns.

De facto, esta premissa está correta, como se pode confirmar observando a tabela 11, que apresenta a matriz  $R_Y$ , onde o resultado culmina com a aceitação de que  $R_Y=I$  (matriz identidade) e portanto, confirma-se que  $\{Y_1; Y_2; Y_3\}$  são independentes.

Tabela 11 - Matriz Correlação  $R_Y$  entre Componentes Principais, que prova que  $\{Y1; Y2; Y3\}$  são estatisticamente independentes.

Componente	Y1	Y2	Y3
Y1	1,000	0,000	0,000
Y2	0,000	1,000	0,000
Y3	0,000	0,000	1,000

## Conclusões

A ACP demonstrou ser uma técnica adequada na análise dos resultados experimentais obtidos em modelo físico. Designadamente, constatou-se que a referida metodologia permitiu, não só identificar que variáveis são mais preponderantes para o desenvolvimento de erosões localizadas em torno de fundações de estruturas offshore, como também identificar aquelas que deverão integrar programas experimentais futuros (tabela 8). A redução de dimensionalidade obtida através da ACP revelou-se eficaz também na diminuição do esforço de computação e interpretação das variáveis representativas do fenómeno em estudo.

A ACP permitiu concluir que a retenção de informação adequada, para as 12 variáveis dos 22 testes realizados, podia ser resumida por 3 componentes principais, cuja variância total explicada era de 89.104% da variância original. Além disso, observou-se que a análise das referidas componentes acarretava uma perda de informação que foi minimizada pela aplicação do próprio método e que se prendia, essencialmente, com a variável relativa à espessura da camada de proteção ( $E_p$ ) que apresentou o menor valor de extração (0,564). Constatou-se ainda que a variância dos dados originais se devia, primordialmente, às variáveis profundidades de erosão e logo de seguida às variáveis de natureza hidrodinâmica.

As fortes correlações entre variáveis da mesma natureza contribuíram para a identificação de 3 componentes principais, cuja interpretação permitiu obter um significado físico claro. Deste modo, observou-se que a primeira componente poderia ser designada de Componente das Profundidades de erosão e que o seu significado real correspondia a uma medida de

interpretação do grau de severidade do processo de erosão localizada, em torno do pilar. No caso da segunda componente, esta foi designada de Componente das Características Hidrodinâmicas e a sua interpretação física prestou-se à caracterização da dinâmica de escoamento e das condições do estado de agitação, durante o fenómeno. A propensão para existência de alterações batimétricas ao nível da zona de medição, isto é, no local onde o sistema de proteção foi implementado, pôde ser interpretada pela terceira componente, referente às Características do Sistema de Proteção.

Face ao manifesto contraste entre componentes e à elevada variância original retida pelas mesmas (89.104%), constatou-se que a redução de dimensionalidade, não só é passível de ser aplicada a ensaios experimentais anteriormente descritos, como permite contribuir para a otimização de procedimentos laboratoriais, medindo-se apenas as variáveis mais importantes, e simplificando-se os processos de computação e análise de dados em programas laboratoriais de maior extensão. Embora sejam necessárias as devidas cautelas, a análise em componentes principais encerra em si a vantagem de transformar um conjunto de variáveis dependentes, e torná-las estatisticamente independentes, o que poderá ser extremamente útil, no âmbito do tratamento estatístico inferencial, para efeitos de estudo das teorias de previsão das profundidades e batimetrias de equilíbrio.

### Referências Bibliográficas

- Buonaiuto Jr., Bokuniewicz H., FitzGerald D. (2008) *Principal Component Analysis of Morphology Change at a Tidal Inlet: Shinnecock Inlet, New York*, Coastal Research Journal vol.24 issue 4 pp. 867 – 875.
- Kroon A., L. Magnus, Möller I., Yokoki H., Rozynski G., Cox J., Larroude P. (2008), *Statistical analysis of coastal morphological data sets over seasonal to decadal time scales*, Coastal Engineering, vol.55 issue 7 – 8, pp. 581 – 600.
- Liang G., White T., Seymour R. (1992) *Complex Principal Component Analysis of Seasonal Variation in Nearshore Bathymetry*, Coastal Engineering, nº23 chapter 172.
- Marôco, João. (2003) *Análise Estatística com utilização do SPSS*; Edições Silabo.
- Miller J., Dean R. (2007) *Shoreline via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics*, Coastal Engineering, vol.54 issue 2, pp. 111 – 131.
- Miller J., Dean R. (2007) *Shoreline via empirical orthogonal function analysis: Part II relationship to nearshore conditions*, Coastal Engineering, vol.54 issue 2, pp. 133 – 150.
- Montgomery Douglas, (2011) *Engineering Statistics* Edições John Wiley & Sons Inc.
- Souza, A. M., (2000) *Monitoração e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados*, Tese de Doutorado, Edições Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
- Sumer, B. & Fredsøe J. (2002). *The mechanics of scour in marine environment*. Edições World Scientific, Singapore.
- Ferradosa, T. J. (2013), *Análise de Dados Multivariados: Aplicação ao estudo de erosões localizadas em estruturas offshore*, PRODEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Vicini L. (2005), *Análise Multivariada da Teoria à Prática*, Tese de Doutorado, Edições Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
- Winant L., Nordstrom I. (1975) *Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions*, Journal of Geophysical Research, vol.80, issue 15, pp. 1979 – 1986.
- Ruessink B., Enckevort I., Kuriyama Y. (2004) *Non-linear principal component analysis of nearshore bathymetry*, Marine Geology, vol.203 issue 1 – 2. Pp. 185 – 197