



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Controlo fotogramétrico da condição de estruturas quebra-mar

JOÃO CARLOS LAGE RODRIGUES
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil

Orientadores:

Maria Amélia Ramos Loja
José Alberto de Sousa Rodrigues
Rute Maria Gomes de Lemos

Júri:

Presidente: João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais:

Conceição Juana Espinosa Morais Fortes
José Alberto de Sousa Rodrigues

Dezembro de 2014

Resumo

A necessidade de zonas de abrigo em áreas costeiras leva à criação de estruturas como os quebra-mares, sendo o seu dimensionamento habitualmente realizado através de fórmulas semi-empíricas e baseadas na experiência do projetista. Para a confirmação da eficácia do dimensionamento recorre-se a ensaios em modelo reduzido.

No Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil são feitos vários ensaios em modelo reduzido, em canais (bidimensionais) e em tanques (tridimensionais). Nestes ensaios, é feita a avaliação do dano provocado, com a contagem e sinalização das zonas onde existem alterações no quebra-mar, designadamente onde ocorreram quedas dos elementos que constituem o manto.

Esta análise, quando não automatizada, é algo subjetiva, podendo existir algumas quedas impercetíveis para o observador. Adicionalmente é também suscetível ao fator de cansaço do mesmo. A fotogrametria tem vindo a ser implementada como um novo meio de monitorização, uma vez que a recolha e análise de fotografias é um procedimento rápido e económico.

Neste trabalho desenvolveram-se técnicas de análise fotogramétrica, com vista à sua aplicação em fotografias, fornecidas pelo LNEC, referentes a um ensaio real. Em resposta ao solicitado, são identificadas as zonas de quedas e movimentos e registadas na memória fotográfica do ensaio do quebra-mar. Foram aplicadas técnicas matemáticas para estabelecer os procedimentos de análise das fotografias, permitindo avaliar as alterações ocorridas entre dois momentos registados.

Os procedimentos foram desenvolvidos usando o Scilab, sendo no entanto, apresentados os algoritmos que permitem a sua implementação em qualquer outra plataforma ou linguagem de programação. Da aplicação dos procedimentos desenvolvidos resultam: a quantificação e a marcação da área alterada, assim como a possibilidade de avaliação das translações sofridas pelos blocos artificiais que constituem o manto.

Abstract

The need for shelter zones in coastal areas leads to the construction of structures for shore protection such as breakwaters. Its design is mainly made based in semi-empirical formulas and in the experience of the project designer. However the effectiveness of the breakwater is made by physical modelling.

Several experiments to test this effectiveness in bidimensional and tridimensional models are carried out at the Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Through these experiments, it is possible to test the stability of the breakwater and the evaluation of damage is made by counting the armor units' dislocated (movements or displacements). As this damage evaluation is not an automated procedure, but it is based on a visual inspection of the breakwater status before and after the experiments, it is highly man-dependent. Therefore the present evaluation process is subjective and some movements may go unnoticed.

The present method requires a lot of analyzing time, and could be effectively reduced by implementing an automated method. To allow achieving this objective, an extensive work was developed by using photogrammetric techniques, to implement a new monitoring methodology, since the collection and analysis of pictures is a fast and economical task.

This dissertation presents the development of several photogrammetric analysis techniques, for implementation in digital photographs of the experiments carried out on the physical models existent in LNEC. To this purpose, mathematical techniques were applied in the automated procedures, allowing the assessment of changes between two photos taken at different time instants.

The procedures were developed using Scilab a freeware numerical computation environ-

ment. However algorithms could be implemented in other programming languages or platforms, as schematic representations of the algorithms are also presented in this document. With these procedures, it is possible to identify and locate the eroded areas in the breakwater and also to make an assessment of the translational movement of Antifer cubes.

Agradecimentos

Em primeiro quero salientar que este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projecto FCT Ref.: PTDC/ATP-AQI/5355/2012, "ReabOp - Optimização de fluxos de trabalho de documentação em reabilitação de estruturas construídas", cujo apoio se agradece. Em seguida dedico esta página a todos aqueles que me apoiaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho mas também durante o meu percurso académico.

Quero agradecer aos meus orientadores o Professor Doutor José Alberto Rodrigues e a Professora Doutora Maria Amélia Loja, docentes no ISEL, e à Engenheira Rute Lemos do LNEC, responsáveis pela orientação deste trabalho. Agradeço não só pelo incrível apoio prestado mas também pelo acompanhamento permanente e pelos ensinamentos transmitidos ao longo deste percurso, com os quais muito aprendi.

Agradeço também à Engenheira Juana Fortes, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela motivação e interesse no meu trabalho e por toda a disponibilidade oferecida para visitas ao departamento de hidráulica e ambiente. Agradeço também ao Professor Doutor João Alfredo Santos docente no ISEL pelo encaminhamento inicial para este tema e pelas referências bibliográficas facultadas o que permitiu uma melhor pesquisa para este trabalho.

Quero agradecer a todos aqueles que me acompanham desde o início da minha vida académica no ISEL, em especial à turma 160t do ano de 2006, e a todos os outros que se foram juntando a esta "família" e que me acompanharam e apoiaram até chegar aqui.

Quero agradecer também a toda a minha família pelo apoio e pela motivação que sempre me deram, sem eles todo este trabalho teria sido mais difícil de ultrapassar.

Por último mas não menos importante quero agradecer e dedicar este trabalho à Susana Anastácio, sem ela provavelmente não teria chegado a este ponto, foi o meu alicerce durante todo o percurso académico. Apoiou-me, motivou-me e incentivou-me nos momentos difíceis como também celebrou nos bons momentos.

A todos um Obrigado!

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Objetivos	1
1.2	Organização do Documento	2
2	Quebra-mares de Taludes	5
2.1	Introdução	5
2.2	Pré-dimensionamento	7
2.3	Parâmetros de Onda	8
2.3.1	Altura de Onda	8
2.3.2	Rebentação	10
2.3.3	Espraiamento e Refluxo	12
2.4	Parâmetros estruturais do quebra-mar	13
2.4.1	Diâmetro Nominal	13
2.4.2	Número de estabilidade	14
2.4.3	Permeabilidade	14
2.5	Fórmula de Hudson	15
2.6	Fórmula de Van der Meer	16
2.7	Conceito de Dano	19
3	Modelação Física	25
3.1	Introdução	25
3.2	Relações de semelhança	27
3.2.1	Semelhança de Froude e Semelhança de Reynolds	28
3.3	Caso de estudo	30
4	Análise fotogramétrica	33
4.1	Introdução	33
4.2	Fotografia digital	33
4.3	Metodologias	36
4.3.1	Conversão ponderada para níveis de cinzento	36

4.3.2	Isolamento das cores primárias	38
4.3.3	Estratificação	41
4.3.4	Translações	44
4.3.5	Deteção de Movimentos	46
4.4	Guia de procedimentos	47
5	Testes e Resultados	53
6	Conclusões e observações finais	65
6.1	Conclusões	65
6.2	Desenvolvimentos Futuros	66
	Bibliografia	66
A	Funções Scilab	71

Lista de Figuras

1.1	Porto exterior da Corunha, Punta Langosteira	2
2.1	Perfil transversal de um quebra-mar de taludes com superestrutura	6
2.2	Pontos singulares de um quebramar [2]	6
2.3	Modos de rotura associados a um quebra-mar de taludes (adaptado de USACE [3])	7
2.4	Parâmetros de onda uma sinusoidal [retirado de APRH [6]]	9
2.5	Tipos de Rebentação de onda e valores de ξ_0 correspondentes (adaptado de USACE [3])	11
2.6	Representação do ângulo de incidência da agitação β	12
2.7	Espraiamento e Refluxo (adaptado de USACE [3])	13
2.8	Coefficiente de Permeabilidade para diferentes condições [5]	15
2.9	Modelo criado por Van Der Meer [5]	18
2.10	Área erodida dum manto resistente (adaptado de Melby [12])	20
2.11	Área erodida dum manto resistente (adaptado de USACE [3])	21
3.1	Ensaio em canal e em tanque	26
3.2	Modelo físico em estudo	30
4.1	Representação matricial duma imagem digital	35
4.2	Fotografias do modelo físico	38
4.3	Fotografias do modelo físico com reflexo	39
4.4	Imagem de teste para isolamento de cores	40
4.5	Isolamento do azul	40
4.6	Isolamento do vermelho	41
4.7	Imagem original em níveis de cinzento	41
4.8	Gráfico dos níveis de cinzento da imagem original	42
4.9	Gráfico dos níveis de cizento da imagem estratificada	43
4.10	Imagem original estratificada em níveis de cinzento	43
4.11	Teste de cores primárias	44
4.12	Teste com o isolamento do vermelho	45

4.13	Deslocamento do quadrado vermelho	45
4.14	Representação gráfica da matriz P	46
5.1	Ensaio Laboratoriais	53
5.2	Testes de isolamento do Azul utilizando a figura 5.1(a)	54
5.3	Testes de isolamento do vermelho utilizando a Figura 5.1(a)	55
5.4	Testes de isolamento do Azul com a função A.2	56
5.5	Testes de isolamento do Azul com a função A.2	57
5.6	Output de diferenças obtido com a função A.6	58
5.7	Localização das zonas de maior alteração	59
5.8	Ensaio Laboratoriais (Tanque vazio).	59
5.9	Ensaio Laboratoriais (Tanque vazio). Isolamento da cor primária azul. . .	60
5.10	Ensaio Laboratoriais (Tanque vazio). Isolamento da cor primária vermelho	61
5.11	Output de diferenças obtido com a função A.6	62
5.12	Localização das zonas de maior alteração	63

Lista de Tabelas

2.1	Critério de Classificação de Movimentos de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Bidimensionais)	22
2.2	Critério de Classificação de Movimentos de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Tridimensionais)	22
2.3	Critério de Classificação de Quedas de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Bidimensionais)	23
2.4	Critério de Classificação de Quedas de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Tridimensionais)	23

Simbologia

Alfabeto Grego

α	Ângulo do fundo ou talude com a horizontal
β	Ângulo entre a direção de propagação das ondas e a normal à estrutura
Δ	Densidade relativa
Δ_n	Densidade relativa do bloco submerso
ε	Critério para a detecção de movimentos
γ_r	Peso volúmico dos blocos rochosos
μ	Viscosidade dinâmica
ρ_w	Massa volúmica da água
ρ_c	Massa volúmica do bloco de betão
ρ_r	Massa volúmica do enrocamento
ξ	Número de Iribarren
ξ_0	Número de Iribarren definido para grandes profundidades
ξ_m	Número de Iribarren médio
ξ_{mc}	Número de Iribarren médio crítico

Alfabeto Romano

BW	Matriz de níveis de cinzento
d_c	Profundidade mínima de cobertura
d_e	Profundidade erodida

D_n	Diâmetro nominal do bloco
D_{n50}	diâmetro nominal de um enrocamento com a massa correspondente a 50% na curva de distribuição dos pesos acumulados
K_D	Coefficiente empírico de estabilidade
Fr	Número de Froude
g	Força gravítica
H	Altura de onda
H_0	Altura de onda a grandes profundidades
$H_{1/10}$	Média do décimo mais alto das alturas de onda para um dado registo
$H_{1/3}$	Média do terço mais alto das alturas de onda para um dado registo
$H_{2\%}$	Altura de onda excedida por 2% das ondas
H_{m0}	Altura de onda significativa definida a partir do espectro do estado de agitação
\bar{H}	Altura média de onda, consideradas todas as ondas de uma dada série temporal
H_S	Altura significativa da onda
K_D	Coefficiente empírico de estabilidade
l	comprimento característico
L_0	Comprimento de onda a grandes profundidades
l_e	Largura erodida
L_m	Comprimento de onda correspondente ao período médio
L_p	Comprimento de onda correspondente ao período de pico
m_0	Momento espectral de ordem 0
M_{50}	Massa média do enrocamento
M_{50}	Massa do bloco do manto resistente
N_{od}	coeficiente de estabilidade, considerando o número de blocos, numa faixa do manto com a largura do diâmetro nominal do bloco, que se deslocam para fora do manto

$N_{o,mov}$	número de blocos, dentro de uma faixa do manto com a largura do diâmetro nominal do bloco, que se movimentam uma amplitude maior que 0,5 vezes o diâmetro nominal do bloco
N_s	Número de estabilidade
N_z	Número de ondas correspondente a uma tempestade
P	Matriz de posições
P	Coefficiente de Permeabilidade
Re	Número de Reynolds
s_0	Declividade da onda
s_m	Declividade média da onda
T_m	Período médio da onda
T_p	Período de pico do espectro da agitação
U	Velocidade característica do escoamento
W_{50}	Peso médio do enrocamento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

Desde os primórdios da civilização que a relação entre o Homem e o mar existe. A dependência do mar foi crescendo e com ela a necessidade de áreas onde a agitação marítima fosse mínima, por forma a realizar as operações de acostagem, carga e descarga dos navios em segurança. Locais como baías, estuários e zonas protegidas por cabos eram naturalmente escolhidos como zona de abrigo, contudo as zonas de maior interesse económico podiam não ser naturalmente dotadas para esse fim. Assim, a busca contínua de melhores formas de proteção leva ao desenvolvimento de infraestruturas próprias.

Os quebra-mares de taludes (Figura 1.1), que são estruturas com uma secção transversal trapezoidal, surgem assim como obstáculo à propagação das ondas, possibilitando a criação de um abrigo, geralmente para fins portuários, reduzindo a agitação marítima dentro da área protegida. Esta área protegida permite a realização em condições de segurança, de manobras de navegação e operações de carga e descarga dos navios. A estrutura pode ser composta por enrocamento natural ou por blocos artificiais de betão, sendo que quando a capacidade de fornecimento por parte da pedreira não permita a obtenção de enrocamento com peso necessário os quebra-mares de talude são constituídos por blocos artificiais de betão.

Como em todas as estruturas em engenharia civil, o dimensionamento de quebra-mares de taludes busca soluções viáveis e económicas. No entanto, dada a complexidade dos fenómenos envolvidos na interação onda-estrutura, os modelos numéricos ainda têm limitações significativas pelo que a sua utilização ainda é residual.

Perante estas dificuldades, para estudar o comportamento de uma estrutura como um



Figura 1.1: Porto exterior da Corunha, Punta Langosteira

quebra-mar a única solução passa pela realização de ensaios em modelo físico que é a melhor aproximação da realidade, mesmo que possam existir alguns efeitos de escala. Durante os ensaios de modelo reduzido, avaliam-se galgamentos, quedas e movimentos dos blocos, sendo os dois últimos os aspetos fundamentais, sobre os quais este trabalho incidiu. As quedas e movimentos, não devem atingir mais do que uma percentagem admissível, que diferem consoante os critérios aplicáveis ao tipo de obra em estudo.

Nos ensaios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), até este ponto, a avaliação de quedas e movimentos tem sido feita visualmente, dependendo do critério e experiência do observador, sendo assim algo subjetiva, para além de muito suscetível ao fator cansaço do observador.

Assim, o objetivo principal desta dissertação passa pela elaboração de técnicas de análise fotogramétrica que permitam avaliar as diferenças no manto resistente dos quebra-mares entre ensaios consecutivos (entre atuações de diferentes alturas de onda associadas a um período de pico e nível de maré) levando a uma avaliação quantitativa mais rápida e precisa por parte dos técnicos.

1.2 Organização do Documento

O presente documento desenvolve-se ao longo de seis capítulos. Após o capítulo introdutório, o **segundo capítulo** apresenta os conceitos associados a quebra-mares. Neste capítulo é feita uma descrição de quebra-mares de taludes, dos seus constituintes e dos fundamentos do pré-dimensionamento, descrição dos parâmetros de onda e estruturais e das principais fórmulas de estabilidade utilizadas no dimensionamento do manto. Será também referenciado o conceito de dano do quebra-mar.

No **terceiro capítulo** é feita a caracterização do modelo físico e a sua relevância no dimensionamento de quebra-mares, sendo ainda referenciadas as condições de semelhança entre modelo físico e o protótipo. É também apresentado neste capítulo o caso de estudo.

O **quarto capítulo** inicia-se com uma introdução à fotogrametria e a importância no estudo em questão. É ainda apresentado o programa utilizado e as metodologias utilizadas na elaboração dos algoritmos de análise fotogramétrica. Ainda neste capítulo, é apresentado um resumo-manual para a utilização das funções criadas com o Scilab.

No **quinto capítulo** são apresentados os testes efetuados e os resultados obtidos.

Finalmente, no **sexto capítulo** elaboram-se algumas conclusões a partir do estudo efetuado e a possibilidade de maior desenvolvimento, críticas e recomendações futuras.

Capítulo 2

Quebra-mares de Taludes

2.1 Introdução

Um país litoral, com uma extensa costa, tem grande parte da sua estratégia económica ligada ao mar. As atividades que para ela contribuem dependem de importações e exportações, através de navios mercantes, de atividades piscatórias ou simplesmente lúdicas e do transporte de passageiros. Nos locais de maior interesse do ponto de vista destas actividades, existe, por vezes, necessidade de melhoramento das condições naturais de abrigo ou mesmo a criação de raiz de uma zona protegida.

Os quebra-mares, como referido no capítulo 1, são estruturas usadas para a criação de áreas de agitação marítima reduzida, geralmente para fins portuários ou para protecção da linha costeira. De acordo com Vera-Cruz [1], um quebra-mar é “qualquer obstáculo à propagação normal de ondas de gravidade geradas pelo vento sobre uma superfície de água.”

Dos vários tipos de quebra-mares que existem os mais comuns na costa portuguesa são os quebra-mares de taludes.

De acordo com a (Figura 2.1), este tipo de estrutura assume uma forma trapezoidal e é constituído, de uma forma geral, por um núcleo de enrocamento de “todo o tamanho” (designado T.O.T), onde existem materiais de várias dimensões. O núcleo é protegido por um manto resistente composto por blocos, naturais ou artificiais, de peso e volume adequados à agitação marítima da zona de implantação. Entre o núcleo e o manto resistente pode existir um filtro ou sub-manto de uma ou mais camadas de enrocamentos selecionados, de forma a evitar a saída dos finos que compõem o núcleo e aumentar a porosidade do talude. No topo do quebra-mar pode existir ou não uma superestrutura de coroamento geralmente composta por betão maciço, destinada a facilitar o acesso a

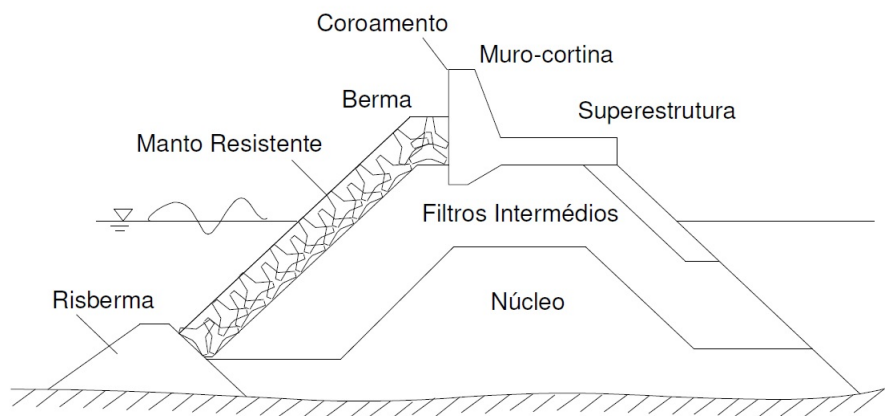


Figura 2.1: Perfil transversal de um quebra-mar de taludes com superestrutura

diferentes zonas da estrutura, à proteção de bens e em certos casos reduzir o galgamento.

A redução da agitação marítima é feita à custa da reflexão e dissipação da energia das ondas sobre o quebra-mar. A dissipação da energia dá-se através rebentação das ondas e pelo escoamento turbulento através da estrutura porosa que compõe o quebra-mar de taludes.

No desenvolvimento de um quebra-mar existem zonas onde o dimensionamento estrutural exige cuidados especiais, e tomam o nome de pontos singulares, que são exemplo, o enraizamento, o tronco, as zonas de curva se existirem e a cabeça, conforme a figura 2.2.

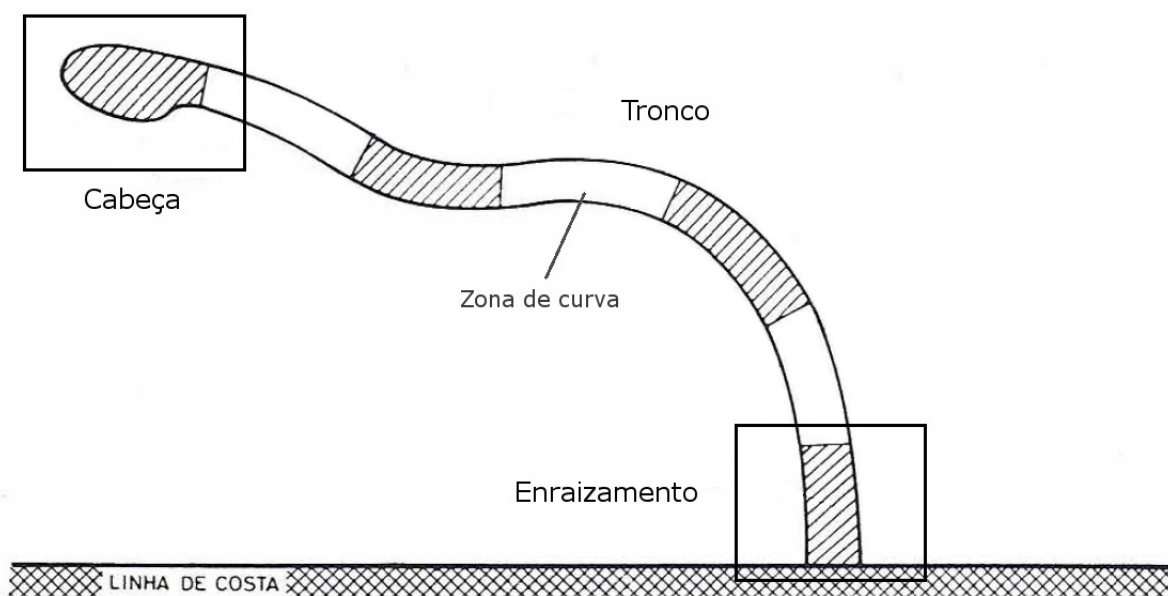


Figura 2.2: Pontos singulares de um quebramar [2]

De acordo com Pita [2] o dimensionamento de um quebra-mar de taludes, apesar de toda a evolução tecnológica, ainda é feito de um modo semi-empírico, baseado em fórmulas deduzidas de considerações teóricas, obtidas através de ensaios em modelo reduzido e na experiência real. Durante anos, quando expostos aos valores extremos da agitação marítima, foram registados vários casos de colapso de quebra-mares de taludes. O registo e posterior análise segundo o U.S.Army Corps of Enginners (USACE [3]) permitiram identificar vários modos de rotura ou ruína que podem ocorrer num quebra-mar durante o período de vida útil da obra (Figura 2.3).

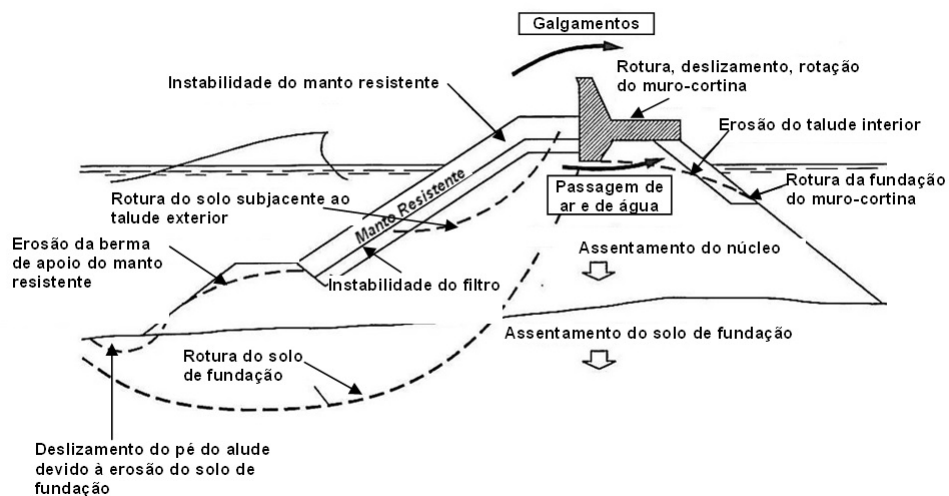


Figura 2.3: Modos de rotura associados a um quebra-mar de taludes (adaptado de USACE [3])

O modo de ruína mais comum está geralmente associado à deterioração do manto resistente do quebra-mar, sendo o que levanta maior preocupação, embora possa ser originado pela instabilidade de outras zonas da estrutura. As falhas no manto resistente leva a uma brecha e deixa exposto o filtro dando origem a fenómenos de infraescavação e consequente saída dos finos. Com este fenómeno a capacidade resistente do quebra-mar fica comprometida, podendo levar à ruína do mesmo se não forem efetuadas as devidas reparações.

2.2 Pré-dimensionamento

A pouca informação de registos de agitação durante extensos períodos de tempo e a falta do conhecimento total dos fenómenos envolvidos constituem um dos principais problemas no dimensionamento do manto resistente de um quebra-mar de taludes, que por esse facto é baseado, como anteriormente referenciado, em modelos semi-empíricos, ou seja com fórmulas de estabilidade deduzidas a partir da experiência.

A estabilidade do manto resistente tem vindo a ser estudada ao longo dos anos por vários autores, como Iribaren, Hudson, Thompson e Shuttler, Van der Meer, Van Gent, Melby, entre outros, com vários métodos de dimensionamento para estruturas deste tipo.

Para o pré-dimensionamento do quebra-mar de taludes é necessário ter em conta as forças instabilizantes, como a agitação marítima, regular, irregular, espectros ou grupos de ondas, que provocam os maiores esforços no manto resistente, conduzindo a movimentos com ou sem choques entre blocos, que pode originar quedas dos mesmos e conseqüente ruína do quebra-mar. Poderão, no entanto, existir outras forças atuantes como as correntes, as marés, os sismos e tsunamis.

Para garantir a estabilidade são necessárias forças contrárias às referidas, que neste caso se traduzem em função do peso dos blocos a utilizar por forma a garantir a estabilidade do quebra-mar. Quanto maior for a altura de onda de projeto maior terá de ser a capacidade resistente do quebra-mar. Assim, no dimensionamento de um quebra-mar existe a necessidade de considerar parâmetros de onda, como a altura de onda incidente, o período de pico, o ângulo de incidência da onda e a profundidade no pé de talude da estrutura.

Os parâmetros estruturais do quebra-mar, resumem-se essencialmente à capacidade de resistir à ação da onda de projeto, como tal a importância recai sobre o tipo, diâmetro e densidade de blocos a utilizar, a porosidade e o número de estabilidade.

Existem várias fórmulas de pré-dimensionamento do peso dos blocos a utilizar, que podem ser generalizados a todo o tipo de blocos ou a um caso específico de blocos. As fórmulas que mais se destacam são a de Hudson [4] e de Van Der Meer [5], sendo as mais utilizadas atualmente.

Para melhor apreender as abordagens destes autores, é necessário referir alguns conceitos sobre os parâmetros de onda e parâmetros estruturais anteriormente referidos.

2.3 Parâmetros de Onda

2.3.1 Altura de Onda

Os quebra-mares devem ser dimensionados de modo a suportar a maior altura de onda significativa para o local de implantação da obra. A definição da altura de onda incidente por

parte do projetista é um fator muito importante para um desempenho estrutural adequado do quebra-mar. Quando é feita uma subavaliação da onda, este sub-dimensionamento pode levar à ruína e quando sobreavaliada tem como consequência direta elevados custos de obra.

Pode-se dizer que a altura de onda, H , é a distância medida entre a crista e a cava da onda, ilustrada pela Figura 2.4.

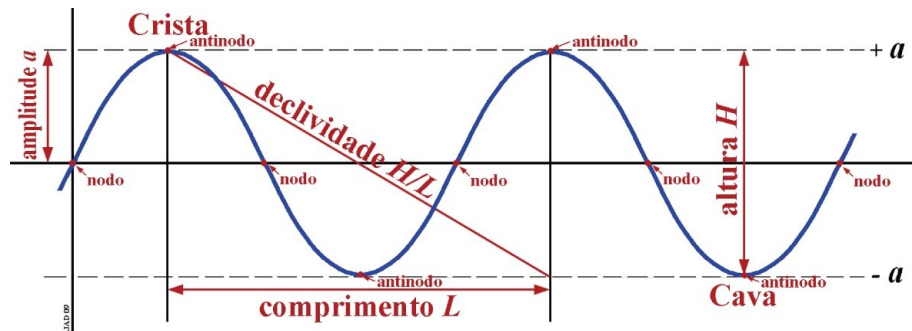


Figura 2.4: Parâmetros de onda uma sinusoidal [retirado de APRH [6]]

A determinação da altura de onda não é um processo que conduza à obtenção de um valor preciso, uma vez que se trata de um procedimento baseado em aproximações probabilísticas. O valor de altura de onda está relacionado com um período de retorno, um nível de risco e uma probabilidade de excedência. Segundo Van Der Meer [5], em grandes profundidades, a altura de uma onda pode ser dado em função da distribuição de probabilidade de Rayleigh. Da distribuição de Rayleigh podem ser relacionadas várias alturas de onda.

Para a escolha da altura de onda de projeto é comum a utilização da altura significativa H_s que pode ser descrita como a média do terço superior das alturas de onda mais altas de uma dada série temporal, $H_s = H_{1/3}$

É comum também o uso de $H_{1/10}$ que é descrita como a altura média da onda que é excedida por 10% das ondas, ou ainda como a altura excedida por 10% das ondas.

Assim em termos de altura de onda significativa, baseado na distribuição de Rayleigh e segundo Kamphuis [7] são comuns as seguintes relações:

- $H_s = H_{1/3} = 1.60 \times \bar{H}$
- $H_{1/10} = 1.27 \times H_{1/3}$
- $H_{1/100} = 1.68 \times H_{1/3}$

em que \bar{H} é a altura média, consideradas todas as ondas de uma dada série temporal.

Quando a altura de onda é estimada a partir da densidade de energia do espectro de onda, a altura significativa é representada por H_{m_0} (equivalente espectral de H_S) e pode ser expressa através de:

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.1)$$

em que m_0 é o momento espectral de ordem 0.

2.3.2 Rebentação

A rebentação é descrita como um fenómeno complexo que depende de vários fatores, entre os quais a declividade e a profundidade da água (Figura 2.4).

A onda ao aproximar-se do quebra-mar de talude, pode entrar em rebentação consequência da súbita diminuição de profundidade, facto que implica um aumento da altura de onda até ao limite máximo da declividade.

Assim o papel assumido pela rebentação é muito importante na determinação do nível de danos no manto protetor do quebra-mar.

A rebentação da onda pode ser classificada através do parâmetro “*Surf Similarity parameter*”, ξ , denominado por número de Iribarren [3]. Este parâmetro foi definido para ondas regulares¹ e é dado pela Equação 2.2

$$\xi_0 = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{s_0}} \quad (2.2)$$

onde α é o ângulo(°) do fundo com a horizontal e s_0 é a declividade da onda.

A declividade da onda - s_0 (*wave steepness*), ilustrada pela Figura 2.4 e representada pela Equação 2.3 é obtida pela razão entre a altura de onda (H_0) e o comprimento de onda (L_0), em grandes profundidades.

$$s_0 = \frac{H_0}{L_0} \quad (2.3)$$

Os vários tipos de rebentação têm condições de fronteira bastante aproximadas [3], no entanto, é possível a identificação de quatro tipos de rebentação de onda representados na Figura 2.5, com os números de Iribarren [3] correspondentes a cada caso.

¹Entende-se por ondas regulares um conjunto de ondas com a mesma frequência, amplitude e comprimento

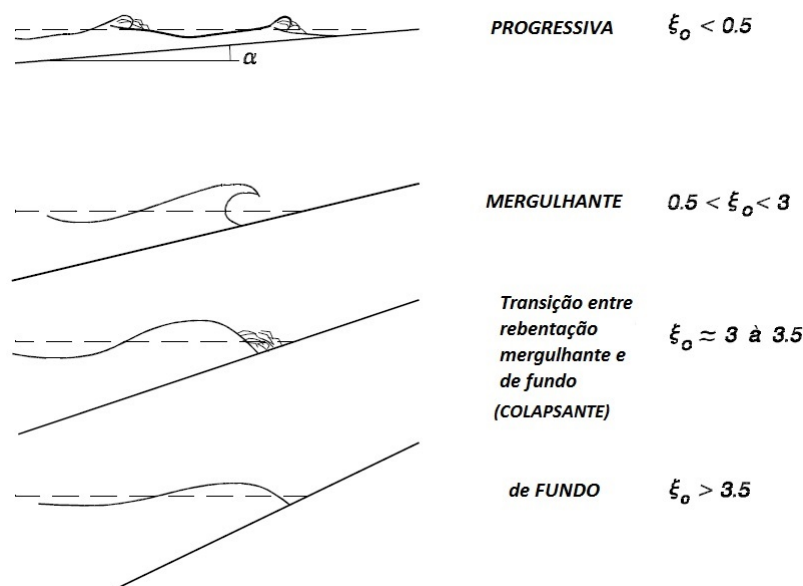


Figura 2.5: Tipos de Rebentação de onda e valores de ξ_0 correspondentes (adaptado de USACE [3])

A rebentação progressiva (*spilling*), corresponde a valores do número de Iribarren inferiores a 0,5 ($\xi < 0,5$). A onda rebenta de forma contínua, a crista deforma-se e rola sobre a cava, criando uma espuma sobre o talude. Este tipo de rebentação ocorre com frequência em praias de declive suave.

A rebentação mergulhante (*plunging*) corresponde a valores do número de Iribarren entre 0,5 e 3 ($0,5 < \xi < 3$). Este tipo de rebentação ocorre quando a crista cria uma curvatura e cai para a frente sobre o talude originando grandes salpicos. Este intervalo de ξ está associado a declives intermédios.

A rebentação colapsante (*collapsing*) surge no cruzamento entre os dois tipos de rebentação explicitados anteriormente e corresponde a valores do número de Iribarren de aproximadamente 3 a 3,5 ($3 \leq \xi < 3,5$). Neste tipo, a onda não rebenta inteiramente e não origina grandes salpicos mas a espuma estende-se pelo talude.

A rebentação de fundo (*surgling*) corresponde a valores do número de Iribarren superiores a 3,5 ($\xi > 3,5$). O tipo de onda associado apresenta pouca declividade e forte reflexão. A rebentação ocorre muito próximo da costa em praias com forte declive, fazendo com que a frente da onda se espraie sobre o talude.

O número de Iribarren ξ , para ondas irregulares, é semelhante, havendo apenas diferenças nos índices associados ao período de onda (médio e pico), como se pode observar nas Equações 2.4 e 2.5:

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_m}} \quad \text{ou} \quad \xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_p}} \quad (2.4)$$

$$s_m = \frac{H_S}{L_m} = \frac{2\pi H_S}{gT_m^2} \quad \text{ou} \quad s_p = \frac{H_S}{L_p} = \frac{2\pi H_S}{gT_p^2} \quad (2.5)$$

onde:

- H_S é a altura significativa de onda;
- L_m e L_p são o comprimento de onda correspondentes ao período médio e ao período de pico, respetivamente;
- T_m e T_p são o período médio da onda e o período de pico do espectro da agitação;

De notar que o número de Iribarren [3] admite que as ondas incidem perpendicularmente sobre a estrutura, ou seja, o ângulo entre a direção de propagação das ondas e a normal à estrutura toma o valor de $\beta = 0$.(Figura 2.6)

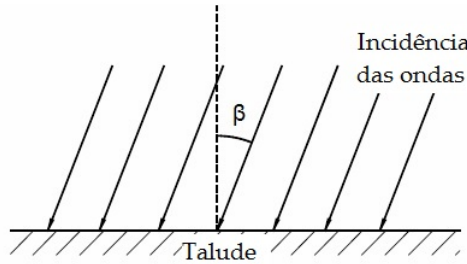


Figura 2.6: Representação do ângulo de incidência da agitação β

Os estudos de vários autores mostraram que em grande parte dos casos, o galgamento diminuía com o aumento do ângulo de incidência da agitação β . Grande parte das fórmulas desenvolvidas foram resultados de testes bidimensionais, aplicáveis apenas para ondas de incidência normal à estrutura, sendo portanto esta situação a mais gravosa.

2.3.3 Espraiamento e Refluxo

O espraiamento (*Run-up*) é o movimento ascendente da água após a incidência da onda e tem maior impacto quando a rebentação é de fundo. Define-se como a cota máxima atingida pela onda após a incidência no talude natural ou numa estrutura como um quebra-mar de taludes.

O refluxo por outro lado é a cota mínima atingida pela onda no sentido descendente do talude, ou seja, contrário à direção de agitação incidente. Os dois casos são exemplificados pela Figura 2.7.

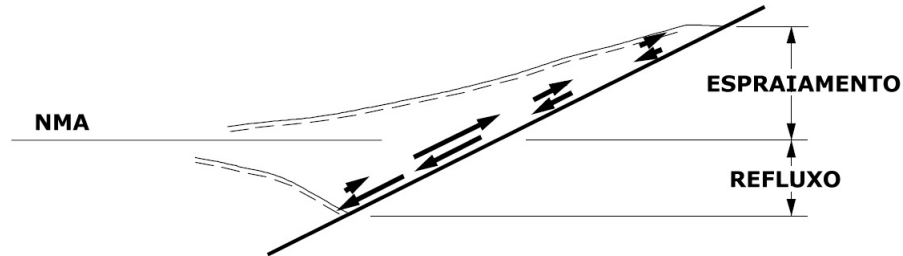


Figura 2.7: Espraçamento e Refluxo (adaptado de USACE [3])

É perceptível que o espraçamento e refluxo dependem do tipo de rebentação, que por sua vez está relacionado com a altura e o período da onda. Para além do espraçamento ter influência no galgamento, quando as velocidades da água durante a incidência são muito elevadas, contribuem também para o arrasto de sedimentos ou blocos.

O refluxo é um dos principais responsáveis pela erosão dos mantos resistentes de estruturas como os quebra-mares de taludes, levando à queda ou destruição dos blocos.

Para o correto dimensionamento dos quebra-mares de taludes, estes fenómenos deverão ser tidos em consideração. Com a adequada definição do material e geometria da estrutura, o espraçamento e o refluxo poderão ser reduzidos, levando a um melhoramento global do desempenho estrutural, evitando galgamentos excessivos e reduzindo o arrasto de blocos.

2.4 Parâmetros estruturais do quebra-mar

Os parâmetros estruturais do quebra-mar como o nome indica relacionam-se com a estabilidade e a resistência que este tem quando sujeito às ações das ondas. Neste ponto, convém realçar alguns aspetos que são importantes para o dimensionamento do manto resistente do quebra-mar de taludes, que serão relacionados mais à frente, tais como o diâmetro nominal do bloco (D_n), número de estabilidade (N_s) ou o coeficiente de Permeabilidade (P).

2.4.1 Diâmetro Nominal

Este parâmetro é a razão entre a massa média do material e a sua respetiva massa volúmica, ou seja, está associado ao peso médio do material.

Para o caso de enrocamento tem-se:

$$D_{n50} = \left(\frac{M_{50}}{\rho_r}\right)^{1/3} \quad (2.6)$$

Para o caso de blocos de betão tem-se:

$$D_n = \left(\frac{M_a}{\rho_c}\right)^{1/3} \quad (2.7)$$

onde:

- M_{50} e M_a são a massa média do enrocamento e a massa do bloco, respetivamente;
- ρ_r e ρ_c são a massa volúmica do enrocamento e a massa volúmica do betão, respetivamente;

2.4.2 Número de estabilidade

O número de estabilidade é um parâmetro bastante importante, sendo a base de várias fórmulas de dimensionamento de quebra-mar, e relaciona a altura de onda e o diâmetro do material do manto resistente,

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (2.8)$$

onde Δ é a densidade relativa e é dada por:

$$\Delta D_n = \frac{\rho_c}{\rho_w} - 1 \quad (2.9)$$

2.4.3 Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade (P) foi proposto por Van Der Meer [5] com o objetivo de quantificar a permeabilidade da estrutura, e é dado em função do tipo de perfil transversal da obra. Este coeficiente é complexo e varia com o tipo de estrutura, sendo normalmente classificado como permeável ou impermeável. Uma maior porosidade traduz-se em maior estabilidade uma vez que a água penetra na estrutura com facilidade, correspondendo a uma maior dissipação de energia da onda incidente. A Figura 2.8 representa a definição deste coeficiente.

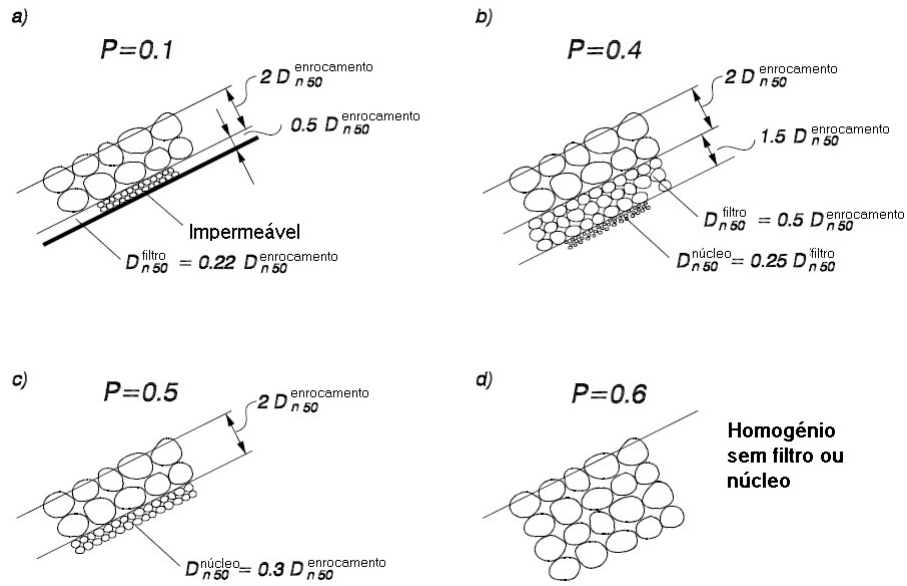


Figura 2.8: Coeficiente de Permeabilidade para diferentes condições [5]

onde:

- a) $P = 0,1$ - Quebra-mar impermeável;
- b) $P = 0,4$ - Quebra-mar com núcleo, sub-manto e manto;
- c) $P = 0,5$ - Quebra-mar apenas com núcleo e manto;
- d) $P = 0,6$ - Quebra-mar apenas de enrocamento;

2.5 Fórmula de Hudson

A fórmula de Hudson [8] [4] que teve como base os trabalhos de Iribarren [9] tem vindo a ser das mais utilizadas até hoje. A formulação teve como base ensaios em modelo físico de quebra-mares de enrocamento não galgáveis com núcleo permeável e ondulação regular [10]. Esta fórmula é dada por:

$$W_{50} = \frac{\gamma_r H_S}{K_D^3 \Delta^3 \cot \alpha} \quad (2.10)$$

onde:

- W_{50} é o peso médio do enrocamento;

- γ_r é o peso volúmico dos blocos rochosos;
- H_S é a altura de onda significativa de projeto no pé de talude;
- K_D é o coeficiente empírico de estabilidade;
- Δ é a densidade relativa ($\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1$);
- α é o ângulo que a inclinação do talude ou o fundo faz com a horizontal;

O pré-dimensionamento de um quebra-mar com esta fórmula é um procedimento vulgar, pela simplicidade e facilidade de aplicação. Contudo, esta expressão ainda apresenta limitações sendo apenas válida para quebra-mares não galgáveis e permeáveis, perante uma agitação regular. O período e número de ondas, a profundidade, a inclinação do fundo e o tipo de rebentação são outros aspetos importantes que não são contabilizados na fórmula de Hudson.

No entanto, alguns destes fatores estão implícitos no coeficiente de estabilidade K_D . Este coeficiente depende, segundo o Shore Protection Manual [11], do tipo e forma de blocos, do número de camadas do manto, da localização do bloco (Cabeça, tronco, enraizamento, etc), do tipo de colocação, da permeabilidade, do ângulo de incidência da onda na estrutura e do tipo de onda (com ou sem rebentação). A fórmula de Hudson pode ainda ser escrita em função do número de estabilidade, N_s :

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (2.11)$$

A equação 2.11 pode ser aplicada também a blocos artificiais de betão, sendo o parâmetro D_{n50} substituído por D_n e a massa volúmica do enrocamento ρ_r pela massa volúmica do bloco de betão ρ_c

2.6 Fórmula de Van der Meer

A fórmula de Van der Meer [5] surge à semelhança da de Hudson [8] [4] baseada em vastos ensaios de modelo físico e permite o pré-dimensionamento de um quebra-mar de taludes. A fórmula proposta por Van der Meer [5] é a seguinte:

$$\frac{H_S}{\Delta D_n} = f(S^{t1} \xi^{t2} N_z^{t3} \alpha^{t4} P^{t5}) \quad (2.12)$$

onde:

- H_S é a altura de onda significativa;
- Δ_n é a densidade relativa do bloco submerso;
- D_n é o diâmetro nominal do bloco;
- S é o parâmetro de danos;
- ξ é o número de Iribarren (Eq. 2.2);
- N_z é o número de ondas correspondente a uma tempestade;
- α é o ângulo que o talude ou o fundo faz com a horizontal;
- P é o coeficiente empírico de Permeabilidade do talude;
- t_1 a t_5 são coeficientes empíricos;

Van Der Meer [5] introduziu novas variáveis, que não existiam nas formulas de Hudson, como :

- Uma definição clara e mensurável de danos, S ;
- O período da onda média, T_m , através no numero de Iribarren, ξ ;
- A influência da permeabilidade ou a porosidade da estrutura, P .

Assim, a presente fórmula conta com fatores como o carácter irregular da agitação, a permeabilidade do núcleo, a duração temporal e a distinção entre condições de agitação (de fundo ou mergulhante). No USACE [3] são apresentadas duas fórmulas propostas por Van der Meer [5] para quebra-mares não galgáveis com mantos resistentes compostos por duas camadas de enrocamento natural, sendo que o efeito do período de onda está associado à forma de declividade da ondulação incidente, incluindo assim o número de Iribarren. As duas fórmulas estão assim ligadas ao tipo de rebentação, mergulhante, de fundo ou de transição.

Para o tipo de rebentação mergulhante ($\xi_m < \xi_{mc}$):

$$N_S = \frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = 6, 2P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad (2.13)$$

Para o tipo de rebentação de fundo ($\xi_m \geq \xi_{mc}$):

$$N_S = \frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = 1, 0P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} (\sqrt{\cot \alpha}) \xi_m^P \quad (2.14)$$

A transição do tipo de rebentação (mergulhante ou de fundo) pode ser determinada através do número de Iribarren médio crítico (ξ_{mc}), que é dado pela equação 2.15 e é definida pelo talude da estrutura e não pelo talude natural, [10] .

$$\xi_{mc} = (6, 2P^{0,31} \sqrt{\tan \alpha})^{\frac{1}{P+0,5}} \quad (2.15)$$

A validade das equações 2.13 e 2.14 têm algumas limitações [3]:

1. As equações 2.13 e 2.14 são válidas para zonas de águas profundas. Para zonas de águas não profundas a altura de onda H_S é substituída por $H_{2\%}/1.4$;
2. Para taludes com $\cot \alpha \geq 4.0$, deve ser apenas usada a equação 2.13;
3. O número de ondas (N_Z), até atingir um equilíbrio no dano, é $N_Z \leq 7500$;
4. A porosidade (P) deverá estar no intervalo $0.1 \leq P \leq 0.6$;
5. A declividade média da onda (s_m) deverá estar no intervalo $0.005 \leq s_m \leq 0.06$;
6. A massa volúmica do enrocamento deverá estar no intervalo $2.0 \text{ ton}/\text{m}^3 \leq \rho \leq 3.1 \text{ ton}/\text{m}^3$;

A Figura 2.9 exemplifica o modelo de Van Der Meer [5].

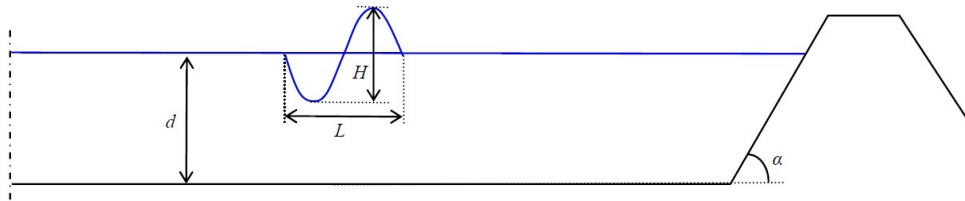


Figura 2.9: Modelo criado por Van Der Meer [5]

As equações 2.13 e 2.14 apresentadas são para estruturas de enrocamento e o dano é dado em função da área erodida, através da variável S . Quando adaptado a mantos constituídos por blocos artificiais de betão, o parâmetro do nível de dano apresenta algumas limitações pela dificuldade em definir um perfil da superfície. Então, o dano é dado pelo número de elementos que se deslocam numa distância maior que o seu diâmetro nominal, D_n [5].

As equações 2.16 e 2.17 tiveram como base ensaios com ondas irregulares e manto resistente com duas camadas de cubos dispostos de forma irregular.

$$N_S = \frac{H_S}{\Delta D_n} = (6, 7 \frac{N_{od}^{0,4}}{N_z^{0,3}} + 1, 0) s_m^{-0,1} \quad (2.16)$$

$$N_S = \frac{H_S}{\Delta D_n} = (6,7 \frac{N_{o,mov}^{0,4}}{N_z^{0,3}} + 1,0) s_m^{-0,1} - 0,5 \quad (2.17)$$

O número de blocos que se deslocam para fora do manto é representado por N_{od} e o número de movimentos dos blocos por $N_{o,mov}$.

Vários autores têm seguido o trabalho de Hudson [4] e Van Der Meer [5] e têm proposto novas formulações para o dimensionamento do manto resistente com a introdução de novas variáveis, como a densidade de colocação dos blocos ou a distância entre o nível da água e o coroamento da estrutura. As formulações têm variado e são adaptadas consoante o material utilizado no manto resistente, enrocamento ou blocos artificiais de betão.

As fórmulas continuam, no entanto, a não conseguir prever a estabilidade do manto resistente quando exposto a uma agitação diferente daquela para que foi projetado. Como referido, as fórmulas devem limitar-se ao pré-dimensionamento, sendo que a confirmação terá de ter recurso como por exemplo a ensaios de modelo físico.

2.7 Conceito de Dano

O dimensionamento de um quebra-mar pressupõe um horizonte de projeto, ou seja é projetado para um determinado tempo de vida útil e durante esse tempo terá de resistir às ações existentes.

Durante a vida útil de um quebra-mar são provocados danos no manto resistente devido, principalmente, às fortes ações provocadas por tempestades. Movimentos, quedas e até a rotura de blocos artificiais de betão, levam a uma diminuição da resistência calculada inicialmente, podendo levar à saída dos finos que constituem o quebra-mar e a sua consequente rotura. Então para que exista um balanço entre o custo inicial da obra e a manutenção é necessário que exista uma previsão precisa do dano no sentido de reduzir custos de manutenção inesperados.

O dano de um quebra-mar têm vindo a ser introduzido como variável em equações de dimensionamento vulgarmente utilizadas, o caso das formulações de Hudson [4] e Van Der Meer [5]. No entanto, o dimensionamento destes últimos é para uma altura de onda correspondente ao pico da tempestade de projeto. Segundo Melby [12] estas formulações [4] [5] são válidas apenas para a determinação de um dano inicial e não para uma evolução do mesmo.

A definição de dano (S) de Broderick e Ahrens [13] e que Van der Meer [5] popularizou é dada pela seguinte expressão:

$$S = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (2.18)$$

em que:

- A_e é o volume erodido por unidade de comprimento ou área erodida do perfil transversal do manto
- D_{n50} é o diâmetro nominal do enrocamento

Com Broderick and Ahrens [13] surge uma definição de dano relacionando a área da secção transversal erodida com o diâmetro nominal do manto resistente (figura 2.10).

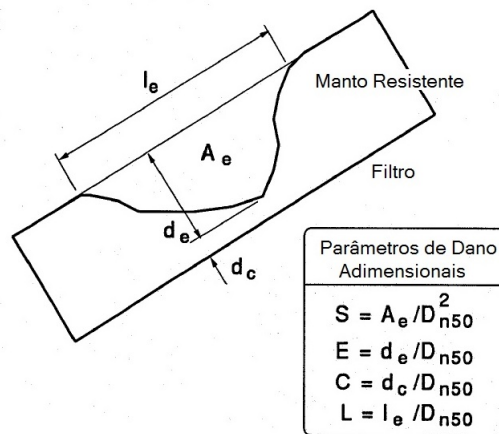


Figura 2.10: Área erodida dum manto resistente (adaptado de Melby [12])

Com necessidade de caracterizar a forma da zona erodida perpendicularmente ao manto, como ao longo do talude, foram também adimensionalizadas as seguintes grandezas: a profundidade erodida (d_e), a profundidade mínima de cobertura (d_c) e a largura erodida (l_e). Esta adimensionalização consiste na relação com o diâmetro nominal D_{n50} do enrocamento.

Na fórmula de Hudson [4], o dano assumido no dimensionamento está implícito no valor de K_D , e é registado pelos movimentos do material constituinte do manto protetor do quebra-mar, não sendo possível prever a evolução do mesmo ao longo da sua vida útil. Os valores de K_D , segundo o USACE [3], têm um valor de dano associado de 0 a 5%, valores de dano aceitável, não sendo a razão para estes valores muito explícita.

Van der Meer [5] por sua vez avalia o dano com dois coeficientes, o parâmetro S que depende diretamente da área erodida associada a mantos de enrocamento e o parâmetro N_{od} referente ao deslocamento dos blocos artificiais.

O dimensionamento do manto resistente de um quebra-mar considera então métodos diferentes de avaliação dos danos, como o método da contagem de blocos e método do volume erodido.

No método do volume erodido é feito o levantamento de vários perfis do modelo de quebra-mar, onde o dano é definido pela média dos levantamentos dos perfis e subtraído a um perfil médio não danificado, de forma a obter uma área erodida (Figura 2.11) média ao longo do quebra-mar.

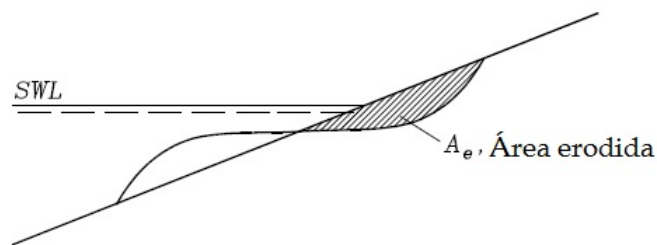


Figura 2.11: Área erodida dum manto resistente (adaptado de USACE [3])

No método da contagem de blocos, que Van Der Meer adaptou é apresentado em função do número de blocos que se deslocam para fora do manto (N_{od}) numa faixa com a largura nominal do bloco. Pode também ser apresentado em função do número de movimentos dos blocos ($N_{o,mov}$). Hughes [14] também contabiliza o dano pela contagem de blocos removidos. A avaliação do dano tem vindo a ser estudada ao longo dos anos, pelos autores já citados, no entanto nos últimos anos a previsão da evolução do dano tem vindo a ser mais estudada, como mostram os diversos ensaios em modelo reduzido com exposição prolongada a vários estados de agitação com o objetivo de avaliar a evolução do dano do manto resistente de quebra-mares de taludes realizados por Melby [12], [15], [16].

No Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do departamento de Hidráulica do LNEC uma das avaliações de dano efetuada durante os ensaios de modelo físico baseia-se no registo de movimentos e quedas dos blocos do manto resistente segundo um critério tabelado. Estas tabelas são válidas para ensaios bidimensionais (Tabelas 2.1 e 2.3) e tridimensionais (Tabelas 2.2 e 2.4) onde são apresentados os critérios de classificação de estragos utilizados no LNEC.

A avaliação dos movimentos é dada pelas tabelas 2.1 e 2.2:

Tabela 2.1: Critério de Classificação de Movimentos de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Bidimensionais)

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO	
0	Muito Ligeiros	Têm movimentos 0-2 % do número de blocos da 1ª camada	Não há movimentos de conjunto
1	Ligeiros	Têm movimentos 2-5 % do número de blocos da 1ª camada	
2	Pequenos	Têm movimentos 5-10 % do número de blocos da 1ª camada	
3	Moderados	Têm movimentos 10-15 % do número de blocos da 1ª camada	
4	Muitos	Têm movimentos 15-20 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	
5	Sérios	Têm movimentos 20-30 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	
6	Muito Sérios	Têm movimentos mais de 30 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	

Tabela 2.2: Critério de Classificação de Movimentos de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Tridimensionais)

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO	
0	Muito Ligeiros	Têm movimentos 0-1 % do número de blocos da 1ª camada	Não há movimentos de conjunto
1	Ligeiros	Têm movimentos 1-2 % do número de blocos da 1ª camada	
2	Pequenos	Têm movimentos 2-3 % do número de blocos da 1ª camada	
3	Moderados	Têm movimentos 3-5 % do número de blocos da 1ª camada	
4	Muitos	Têm movimentos 5-15 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	
5	Sérios	Têm movimentos 15-30 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	
6	Muito Sérios	Têm movimentos mais de 30 % do número de blocos da 1ª camada ou movimentos de conjunto de vários grupos de blocos	

A avaliação das quedas é dada pelas tabelas 2.3 e 2.4:

Tabela 2.3: Critério de Classificação de Quedas de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Bidimensionais)

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO	
0	Muito Ligeiras	Removidos 0-1 % do número total de blocos (1ª e 2ª camadas)	As falhas na 1ª camada são inferiores a 5 blocos
1	Ligeiras	Removidos 1-2 % do número total de blocos	
2	Pequenas	Removidos 2-3 % do número total de blocos	
3	Moderadas	Removidos 3-5 % do número total de blocos ou falhas de 5-10 unidades na 1ª camada	
4	Muitas	Grandes falhas na 1ª camada (superiores a 10 blocos)	
5	Sérias	A 1ª camada foi removida numa grande área; falhas na 2ª camada; núcleo ou filtros do quebra-mar visíveis	
6	Destruição	As duas camadas foram removidas numa grande área; núcleo do quebra-mar afectado	

Tabela 2.4: Critério de Classificação de Quedas de Blocos do Manto Resistente (Ensaio Tridimensionais)

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO	
0	Inexistentes	Não existem quedas	As falhas na 1ª camada são inferiores a 5 blocos
1	Ligeiras	Removidos menos de 1 % do número total de blocos	
2	Pequenas	Removidos 1-2 % do número total de blocos	
3	Moderadas	Removidos 2-3 % do número total de blocos ou falhas de 5-10 unidades na 1ª camada	
4	Muitas	Grandes falhas na 1ª camada (superiores a 10 blocos) ou removidos 3-5 % do número total de blocos	
5	Sérias	A 1ª camada foi removida numa grande área; falhas na 2ª camada; núcleo ou filtros do quebra-mar visíveis	
6	Destruição	As duas camadas foram removidas numa grande área; núcleo do quebra-mar afectado	

Esta avaliação tem limitações, pois, é uma avaliação visual, podendo existir movimentos ou quedas imperceptíveis, como tal é demorada. Poderá também existir uma avaliação diferente consoante o técnico. Este trabalho pretende facilitar estas avaliações de forma automática, utilizando métodos informáticos, isto é, criação de algoritmos para o controlo fotogramétrico, com vista a análise de fotografias tiradas durante os vários ensaios. As metodologias que serão apresentadas poderão substituir progressivamente a análise visual, pois são rápidos e precisos na localização de alterações das fotografias.

Capítulo 3

Modelação Física

3.1 Introdução

A difícil tarefa da representação matemática dos vários parâmetros¹ que permitem o pré-dimensionamento de estruturas de defesa costeira, como os quebra-mares implicam que seja necessário a confirmação da sua eficácia através de ensaios de modelo físico.

Apesar dos progressos ao longo dos anos, graças ao desenvolvimento sobretudo de ferramentas informáticas de modelação matemática, é um facto que as fórmulas de dimensionamento são ainda limitadas a um certo número de parâmetros.

A modelação física permite reproduzir fenómenos físicos sem que seja necessário proceder às simplificações inerentes à modelação numérica. Permite ainda a confirmação de resultados teóricos e a calibração dos modelos associados.

Os ensaios devem ser feitos à menor escala possível de forma a reduzir ao máximo os efeitos de escala, e podem ser classificados como bidimensionais (Figura 3.1(a)), para estudos de estabilidade e galgamentos, ou tridimensionais (Figura 3.1(b)), essencialmente para estudos de estabilidade e de agitação (podendo ser também de galgamentos).

¹exemplos: a agitação marítima ou os fenómenos envolvidos por exemplo na batimetria



(a) Ensaio Bidimensional (canal)

(b) Ensaio Tridimensional (tanque)

Figura 3.1: Ensaios em canal e em tanque

Nos ensaios bidimensionais procura-se reproduzir uma secção transversal da obra em estudo, enquanto que nos ensaios tridimensionais tenta-se reproduzir não só toda a geometria da estrutura, mas também toda a batimetria e linha de costa, que apesar de se conseguirem reproduzir em modelos numéricos os fenómenos envolvidos não são.

Segundo Lemos [17] as classificação dos ensaios em modelo físico segundo os objetivos podem ser:

- Ensaio de Estabilidade - Quantificação visual das quedas e dos movimentos, sendo posteriormente determinadas as suas percentagens e atribuídos os graus dos critérios de classificação de quedas e movimentos.
- Ensaio de Galgamentos - Consistem na qualificação visual dos galgamentos, com atribuição do grau do critério de classificação de galgamentos e na medição do volume de água galgado.
- Ensaio de Agitação - Consistem na aquisição dos dados das sondas colocadas nos pontos característicos que se pretendem estudar, na aquisição dos dados de uma sonda colocada junto ao gerador (ao largo). Posteriormente, é feito o cálculo dos índices de agitação em cada ponto através da relação entre as alturas de onda em cada ponto e ao largo.
- Ensaio de Pressões - Consistem na colocação de sensores de pressão nas zonas em estudo de modo a permitir estudar os seus efeitos na estrutura.

Apesar de ser o mais próximo do protótipo, o modelo físico pode ser afetado por erros na construção do modelo e de medição e ainda devido a efeitos de escala, onde estes últimos são os mais difíceis de evitar.

3.2 Relações de semelhança

Os modelos físicos devem ter um comportamento semelhante ao real. No entanto, é necessário uma certa proporcionalidade, pelo que a sua extrapolação não é direta, sendo a maior dificuldade a de simular o melhor possível o protótipo.

Segundo Quintela [18] na mecânica de fluídos, para que o modelo e protótipo sejam considerados fisicamente semelhantes e os efeitos se mantenham é necessário que se verifiquem semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica.

A semelhança geométrica traduz-se como a semelhança das formas geométricas. Verifica-se quando o rácio da distância entre dois quaisquer pontos homólogos, no modelo e no protótipo, tenham o mesmo valor.

A semelhança cinemática é definida como a semelhança do movimento e consiste em partículas homologas descreverem percursos homólogos em tempos proporcionais.

A semelhança dinâmica é descrita como a semelhança de forças. As partículas homologas do modelo e do protótipo são sujeitas a forças resultantes homologas proporcionais com direção e sentido iguais.

Dois sistemas em que atuem forças de diferentes naturezas e que possuam fronteiras geométricas semelhantes, são dinamicamente semelhantes se lhes corresponderem n^os adimensionais iguais:

- Forças de inércia, pressão e viscosidade: n^o de Reynolds.
- Forças de pressão, gravidade e inércia: n^o de Froude.
- Forças de inércia e pressão: n^o de Euler.
- Forças de inércia e forças elásticas: n^o de Cauchy.
- Forças de inércia e forças de tensão superficial: n^o de Weber.

Para que todos os fenómenos envolvidos fossem bem reproduzidos à escala, ou seja, fossem os mesmos no modelo e no protótipo, os números de Froude, Weber, Reynolds, e Cauchy deveriam ser iguais no modelo e no protótipo. No entanto, estes critérios não podem ser satisfeitos simultaneamente. Assim, de acordo com os principais fenómenos em jogo,

opta-se por um destes n^os e, com base nele, define-se a escala do modelo.

Quando se recorre a um modelo reduzido, como no caso da propagação de ondas em zonas costeiras e portuárias, utiliza-se por norma a Lei de semelhança de Froude (igualdade dos números de Froude no modelo e no protótipo), também é frequente o uso da semelhança de Reynolds.

3.2.1 Semelhança de Froude e Semelhança de Reynolds

A Lei de semelhança de Froude aplica-se no caso das forças intervenientes serem forças de inércia, de pressão e de gravidade.

O número de Froude é dado pela equação 3.1:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gl}} \quad (3.1)$$

Relacionando o modelo e o protótipo tem de existir a seguinte igualdade:

$$\left(\frac{U^2}{gl}\right)_M = \left(\frac{U^2}{gl}\right)_P \Leftrightarrow \left(\sqrt{\frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças de gravidade}}}\right)_M = \left(\sqrt{\frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças de gravidade}}}\right)_P \quad (3.2)$$

onde U é a velocidade característica do escoamento, l é o comprimento característico e g é a força gravítica.

A semelhança de Froude aplica-se então a modelos físicos em que a gravidade seja o fator predominante no escoamento, incluindo escoamentos em superfície livre e especificamente em modelos de onda onde a rebentação é um fenómeno essencialmente gravítico. A lei de Froude implica então uma constante relação das forças de inercia e gravitacionais, sendo que o número de Froude deve ser o mesmo no modelo e no protótipo.

Em situações em que as forças de viscosidade dominam num escoamento, utiliza-se a semelhança de Reynolds e que pode ser representada pela número de Reynolds (equação 3.3).

$$Re = \frac{\rho l U}{\mu} \quad (3.3)$$

onde terá de existir a seguinte semelhança entre modelo e protótipo:

$$\left(\frac{\rho l U}{\mu}\right)_M = \left(\frac{\rho l U}{\mu}\right)_P \Leftrightarrow \left(\sqrt{\frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças de viscosidade}}}\right)_M = \left(\sqrt{\frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças de viscosidade}}}\right)_P \quad (3.4)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica.

A semelhança de Reynolds é essencialmente utilizada para distinguir escoamentos laminares de turbulentos e aplica-se onde as forças de viscosidade predominem, como no interior de condutas ou no contorno de obstáculos. Em modelos de onda o efeito das forças de viscosidade pode ser desprezado, no entanto a não consideração leva a uma perda de rigor dos resultados do modelo para o protótipo. A diferença de valores é tanto maior quanto mais a escala geométrica se afastar da unidade.

O comportamento do modelo não é no entanto o retrato fiel do protótipo devido a algumas distorções provocadas pela construção à escala:

- Salpicos no modelo que são salpicos no protótipo;
- Escoamento através dos filtros (influência no espriamento e galgamento);
- A influência da viscosidade da água na garantia de o escoamento ser turbulento.

Os efeitos de escala em modelos físicos são devidos essencialmente partindo do principio que a gravidade é a força dominante no equilíbrio das forças de inercia. A lei da semelhança de Froude despreza as outras forças envolvidas como a viscosidade, a tensão superficial ou a elasticidade, admitindo que são insignificantes, isto pode levar a erros afetando os resultados. Estes efeitos de escala podem ser quantificados, dependendo dos casos, sendo que existem no entanto métodos empíricos que minimizam as consequências destes efeitos. Podem existir ainda efeitos laboratoriais.

Segundo Hughes [14] os efeitos de escala e efeitos laboratoriais em modelos físicos de quebra-mar de taludes podem estar relacionados com:

- Viscosidade;
- Densidade da água;
- Atrito;
- Arejamento.

3.3 Caso de estudo

O presente trabalho como já foi referido no capítulo 1 tem como principal objetivo criar uma ferramenta de auxílio aos ensaios em modelo reduzido efetuados pelo Núcleo de Portos e Estruturas marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Quando se deu início a este trabalho, o modelo já havia sido construído bem como a recolha fotográfica inerente, pelo que não foi possível acompanhar os procedimentos experimentais do modelo em estudo. Este facto não foi, contudo, condicionante para a realização do trabalho, visto que o mais importante neste caso foi ter as fotografias dos ensaios.

Este caso de estudo é referente a ensaios reais, e foram efetuados num tanque com 30×19.6 m equipado com dois geradores de ondas irregulares com 6 m de largura cada um.

A construção e exploração do modelo reduzido (Figura 3.2) foram realizadas de acordo com a lei de semelhança de Froude tendo sido utilizada a escala geométrica 1:30. O manto resistente desenvolve-se em talude inclinado a 3:2 entre uma cota de fundação variável e a cota de coroamento +5.5 m (ZH), e é constituído por duas camadas de enrocamento de 4 a 6 ton e por cubos Antifer de 3 ton, estando os últimos localizados apenas na zona da cabeça (zona alvo deste trabalho).

O modelo foi sujeito a H_s compreendidas entre 1 e 3.0 m (valores de protótipo).



Figura 3.2: Modelo físico em estudo

O enrocamento utilizado no modelo tem um peso médio de 180 g o que equivale a cerca de 5,5 ton no protótipo, e os blocos Antifer têm um peso no modelo de cerca de 90 g o equivalente a 3 ton no protótipo.

A recolha fotográfica dos ensaios efetuados deste modelo não foram sujeitas a qualquer tipo de tratamento informático ou de ambiente, como o controlo de luz natural ou artificial.

Capítulo 4

Análise fotogramétrica

4.1 Introdução

A fotogrametria tem vindo a ser muito utilizada no último século, principalmente em fotografias aéreas. Nos últimos anos, esta técnica tem vindo a expandir-se a outras áreas desde a medicina aos vários ramos da engenharia. A fotogrametria é então um processo de derivação de informação métrica de um objeto através de medições feitas em fotografias do mesmo objeto. [19]

A técnica apresentada proporciona um novo meio de monitorização, uma vez que a recolha de fotografias regulares é um procedimento relativamente económico comparado, por exemplo, com o "laser scanning" (varrimento laser), pois apenas precisa de um computador e uma máquina fotográfica e permite monitorizar a totalidade das zonas de interesse. No contexto do presente trabalho a técnica de fotogrametria poderá ser adaptada ao caso de estudo referido no capítulo anterior, isto é, a ensaios de modelo físico ou futuramente na manutenção real do quebra-mar.

4.2 Fotografia digital

A utilização de fotografias digitais permite a sua fácil manipulação computacional, razão pela qual a fotogrametria se tem desenvolvido com o incremento dos meios computacionais. Como as fotografias estão repletas de informação, é possível detetar as zonas alteradas, sendo que neste caso concreto a base de estudo é feita em ensaios de estabilidade de quebra-mares de talude onde o interesse reside na avaliação de movimentos e quedas de blocos que compõem o manto resistente.

Nas imagens digitais a informação é guardada em pequenas áreas designadas por pixel. O pixel é definido como a menor unidade de uma imagem - esta designação provém da expressão *picture element* (elemento da imagem). Cada pixel é a composição de três

cores básicas: Vermelho, verde e azul. A este sistema de cores dá-se o nome de RGB da abreviatura em inglês **R**ed, **G**reen e **B**lue.

As imagens são compostas por linhas e colunas de pixels, onde a cor de um pixel é dada pela combinação de entradas homólogas dos três canais de cor que compõem a imagem. Cada cor primária varia numa escala de 0 a 255, existindo por isso 256^3 combinações de tons e luminosidade para as cores.

Assim, a representação numérica dos 3 canais do sistema RGB pode ser visto da seguinte forma:

- R = Vermelho (Red) - (255, 0, 0)
- G = Verde (Green) - (0, 255, 0)
- B = Azul (Blue) - (0, 0, 255)

O branco é dado pelo valor máximo

- Branco - (255, 255, 255)

e o preto pelo valor mínimo

- Preto - (0, 0, 0)

Segundo Schenk [20] um pixel é um quadrado cujo lado mede cerca de $5\mu m$ ($5 \times 10^{-6}m$). Contudo, esse valor não é estático, e com a evolução tecnológica este valor tem tendência a diminuir.

Assim, a qualidade duma imagem depende do número de pixels apresentados por unidade de superfície, normalmente no formato digital é dado por ppi, ponto por polegada do inglês *pixel per inch*, que define o número de pixels num quadrado com uma polegada de lado. O tamanho digital de uma imagem é medido em bytes (B), kilobytes(KB), megabytes (MB) ou ainda gigabytes (GB) e o seu valor é proporcional à dimensão dos pixels. Uma imagem com maior número de pixels reproduz um maior detalhe mas por outro lado requerem maior espaço de armazenamento e a edição das mesmas torna-se mais lenta.

A título de exemplo, uma imagem de 1×1 polegadas com 200ppi contém mais pixels do que a mesma imagem com 100ppi, quatro vezes mais para ser preciso e o tamanho que ocupa é também quatro vezes superior. A dimensão do ficheiro depende da imagem depende ainda da profundidade da cor (bit-depth) e do número de camadas e canais da imagem.

O exemplo anterior realça a influência da qualidade da câmara para a análise fotogramétrica tendo em vista os principais objetivos ao fazer uma análise da fotografia digital, que são a rapidez e a pormenorização das imagens.

Então é necessário utilizar uma câmara que forneça uma imagem com um número de pixels que estabeleça o compromisso entre os objetivos referidos, ou seja, a rapidez na análise e tratamento dos dados fornecidos pela fotografia e qualidade suficiente para a interpretação da mesma.

Para a análise fotogramétrica do modelo físico do quebra-mar foi utilizada uma máquina fotográfica Canon EOS 600D, com uma resolução de 72ppi¹, 3456×2304 pixels de dimensão e com 24bit de profundidade de cor.

A análise fotogramétrica será enormemente facilitada pela utilização de procedimentos automáticos, rápidos e eficazes, de deteção das zonas de quedas ou movimentos de blocos no modelo físico.

Neste sentido, será utilizado o software de cálculo numérico Scilab [21] com o pacote de interpretação de imagens SIVP [22], com o objetivo de desenvolver e implementar algoritmos que facilitem a identificação e quantificação das situações referidas.

Com este software as imagens são interpretadas como hiper-matrizes M de dimensão $\in \mathbb{R}^{nl,nc,3}$, onde as entradas

$$M(i, j, 1), M(i, j, 2) \text{ e } M(i, j, 3), \quad i \in \{1, \dots, nl\}, j \in \{1, \dots, nc\}$$

guardam um valor, entre 0 e 255 correspondente ao código RGB do pixel e onde nl e nc são, respetivamente, o número de linhas e de colunas, conforme se representa na figura 4.1.

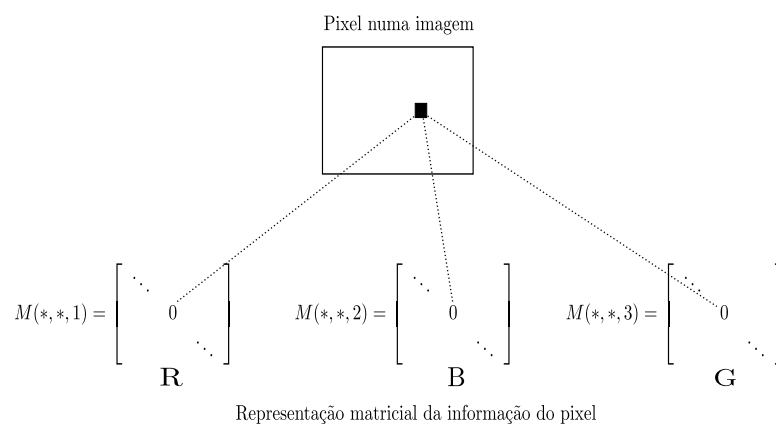


Figura 4.1: Representação matricial duma imagem digital

A fotografia obtida com a máquina fotográfica Canon EOS 600D tem a dimensão de

¹72ppi é a resolução standard para monitores

3456 × 2304 pixels que serão armazenados numa hiper-matriz M constituída por 3 matrizes com 3456 colunas e 2304 linhas.

Face à dimensão destas matrizes, é particularmente evidente o facto de a eficácia (rapidez) dos métodos de análise das imagens aumentarem se não forem baseados no teste de cada um dos elementos da hiper-matriz, pois a análise de cada uma das entradas da matriz com testes lógicos aumenta consideravelmente o tempo de execução.

Desta forma, a generalidade dos testes feitos durante a criação dos algoritmos baseiam-se em manipulações algébricas de matrizes.

4.3 Metodologias

Numa fase inicial, após a familiarização com o software Scilab [21] deu-se início à criação de vários algoritmos de teste para o tratamento das imagens a fim de obter a informação pretendida. Nesse sentido irão ser descritas as várias metodologias que serviram para análise das hiper-matrizes associadas às fotografias.

Usando duas fotografias tiradas em momentos diferentes, o objetivo passou pela determinação das alterações em relação ao estado inicial. Em todas as metodologias utilizadas está subjacente a conversão das fotos a cores para níveis de cinzento usando uma conversão adequada, a descrever posteriormente.

Uma imagem em níveis de cinzento é normalmente resultado do cálculo da intensidade de luz em cada pixel e pode ser representada por uma matriz em que cada elemento tem um valor real entre 0 e 255. No entanto, para facilitar a leitura e análise os valores são divididos por 255, variando os valores entre 0 e 1 sendo que 0 representa o negro (a ausência de luz) e o branco é representado por 1.

Nas sub-seções seguintes, apresentam-se e discutem-se abordagens que foram desenvolvidas e implementadas para dar resposta à necessidade de identificar as zonas onde se verificaram movimentos, bem como a quantificação dos mesmo. Em apêndice, são apresentadas as funções desenvolvidas.

4.3.1 Conversão ponderada para níveis de cinzento

A análise de imagens a cores significaria o multiplicar pelo fator 3 todo o esforço (o número de matrizes associadas às cores primárias) o que implicaria maior tempo de cálculo. Por esta razão, optou-se pela conversão em níveis de cinzento, transformando uma hiper-matriz numa matriz com a mesma dimensão.

O procedimento de conversão para níveis de cinzento é de extrema importância pois relaciona-se com a técnica de subtração que será usada para a deteção de movimentos ou uma mudança de sequência nas imagens.

A literatura apresenta várias fórmulas de conversão para níveis de cinzento: A mais comum pela simplicidade e rapidez é dada pela equação (4.1).

$$\text{Cinzento} = \frac{(\text{Vermelho} + \text{Verde} + \text{Azul})}{3} \quad (4.1)$$

Esta equação representa a média das três cores primárias e apesar de ser uma forma rápida e simples de converter em cinzento é pobre na representação da luminosidade.

A percepção das cores feita pelo olho humano não é dada pela média das três cores, existe então a necessidade de distribuição dessa percepção de acordo com a sensibilidade à cor predominante. A predominância é dada pela seguinte ordem decrescente: verde, vermelho e azul.

A equação (4.2) é largamente utilizada em vários softwares de processamento de imagem como o Photoshop ou GIMP. Segundo Poynton [23], esta conversão é chamada de Luma do inglês Luminance(luminância²) e equilibra a relação das três cores em níveis de cinzento.

$$\text{Cinzento} = (0,3 \times \text{Vermelho} + 0,59 \times \text{Verde} + 0,11 \times \text{Azul}) \quad (4.2)$$

Existe outra distribuição de cor mais recente, sendo esta a equação pré-definida pelo pacote SIVP [22] do Scilab [21] para a conversão em níveis de cinzento(rgb2gray) e é dada pela equação (4.3):

$$\text{Cinzento} = (0,299 \times \text{Vermelho} + 0,587 \times \text{Verde} + 0,114 \times \text{Azul}) \quad (4.3)$$

Segundo o mesmo Poynton [23] a diferença entre as equações (4.2) e (4.3) é desprezável, sendo, no entanto, qualquer uma delas melhor que a média das três cores.

Existem ainda outras formas de conversão menos apuradas como a dessaturação e a decomposição dadas pelas equações 4.4 e 4.5/4.6 respetivamente.

$$\text{Cinzento} = \frac{\text{Máx}(\text{Vermelho} + \text{Verde} + \text{Azul}) + \text{Min}(\text{Vermelho} + \text{Verde} + \text{Azul})}{2} \quad (4.4)$$

$$\text{Cinzento} = \text{Máx}(\text{Vermelho} + \text{Verde} + \text{Azul}) \quad (4.5)$$

²Luminância é uma medida de densidade da intensidade de uma luz refletida numa dada direção. Os raios luminosos de uma fonte de luz não são visíveis, no entanto é a sensação de claridade que é transmitida ao cérebro

$$\text{Cinzento} = \text{Min}(\text{Vermelho} + \text{Verde} + \text{Azul}) \quad (4.6)$$

Cada equação de conversão apresentada é adequada a determinado propósito.

O objetivo passou em seguida por determinar a melhor conversão de forma à detecção de alterações entre dois momentos.

Em apêndice são apresentadas as funções A.1, A.2, A.3 e A.6 que incorporam a conversão em níveis de cinzento. Na função A.3 a conversão é feita com base nas conversões apresentadas na seção 4.3.1, baseada nas formas mais utilizadas para a conversão em níveis de cinzento. Na função A.6, a conversão que incorpora esta função baseia-se na norma da matriz que representa uma cor primária (R, G ou B), ou seja, esta conversão é baseada na predominância de uma das cores primárias.

4.3.2 Isolamento das cores primárias

No caso de estudo, os blocos artificiais de betão Antifer foram pintados com duas cores primárias (azul e vermelho), delimitando zonas previamente estabelecidas como se observa nas fotografias representadas pela Figura 4.2.



Figura 4.2: Fotografias do modelo físico

O isolamento destas zonas será muito relevante para a determinação de alterações em relação ao estado inicial.

A ideia subjacente ao isolamento das cores primárias é a da definição de espaço vetorial. Assim, considerando R , G e B como a base que gera todas as cores duma determinada paleta, interessa, para "uma cor primária" a isolar, determinar coeficientes c_1 , c_2 e c_3 reais tais que:

$$c_1R + c_2G + c_3B = \text{"uma cor primária"} \quad (4.7)$$

Um dos problemas que estes coeficientes têm de resolver é a eliminação do branco, uma vez que esta cor³ recebe contributos de todas as matrizes R , G e B .

Os desafios passam então pela minimização ou remoção do branco ou de cores muito luminosas, que são resultado de reflexos.

Durante os ensaios são retiradas fotografias iniciais, intermédias e finais e a dificuldade em controlar a luminosidade do local de ensaio leva ao aparecimento de reflexos provocados pela água ilustrado pelas fotos da Figura 4.3. Apesar de pouco visível é possível identificar blocos com cor alterada e reflexos distintos na água. Este fator leva a que existam erros de interpretação, ou seja, torna mais difícil distinguir se realmente ocorreram movimentos ou se a alteração foi devida a um reflexo.

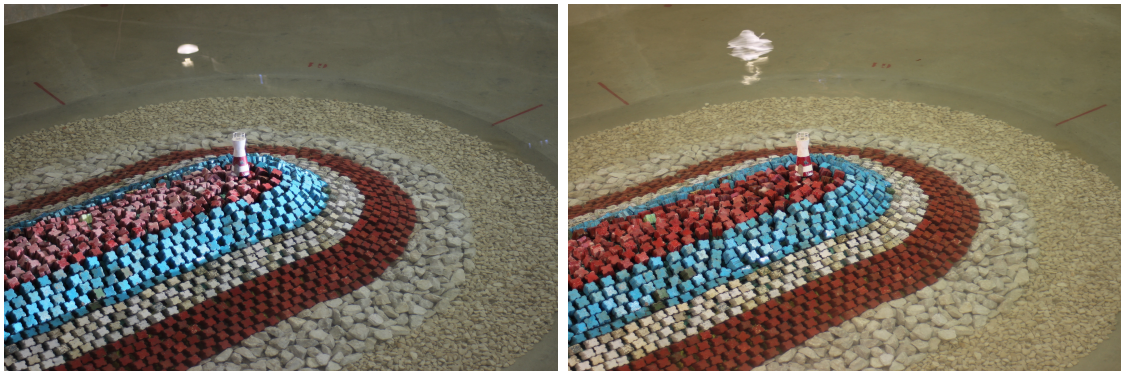


Figura 4.3: Fotografias do modelo físico com reflexo

O isolamento das cores primárias é feito em função de uma conversão em níveis de cinzento que permita realçar a cor pretendida. Com este procedimento, se algum bloco azul for deslocado e cair para o pé do talude que está a vermelho é facilmente identificado. Assim, é importante, caso se deseje, isolar zonas de maior interesse para uma rápida análise.

Tomando a Figura 4.4 como exemplo e os coeficientes " c_i " adequados pode-se isolar uma cor primária pretendida, no caso em questão o azul e o vermelho. Os coeficientes utilizados foram alcançados por várias tentativas até um valor ideal.

³Alguns autores não consideram o branco como cor, mas sim como a junção de todas as cores



Figura 4.4: Imagem de teste para isolamento de cores

No isolamento do azul são utilizados os coeficientes : $c_1 = -0.5$, $c_2 = -0.5$ e $c_3 = 1.5$ e a conversão em níveis de cinzento é dada pela expressão:

$$BW = -0.5 \times M(i, j, 1) - 0.5 \times M(i, j, 2) + 1.5 \times M(i, j, 3) \quad (4.8)$$

em que BW é a designação utilizada para nível de cinzento, e M para a hipermatriz que define uma imagem em que i e j correspondem às linhas e colunas e a numeração 1, 2 e 3 corresponde à matriz que define a cor primária vermelho, verde e azul.

O resultado é ilustrado pela Figura 4.5.

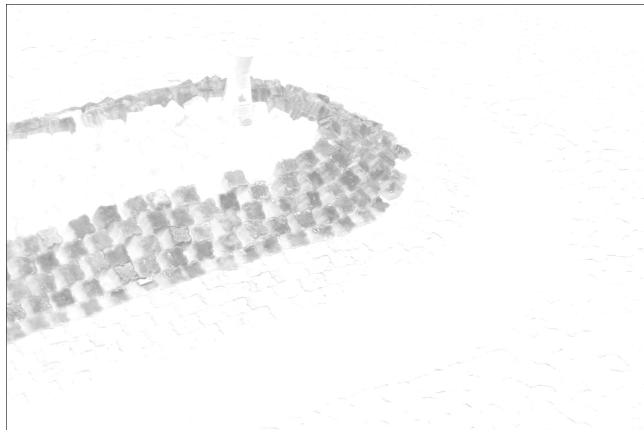


Figura 4.5: Isolamento do azul

No isolamento do vermelho são utilizados os coeficientes : $c_1 = 1.5$, $c_2 = -0.5$ e $c_3 = -0.5$ e a expressão de conversão em níveis de cinzento é dada por:

$$BW = 1.5 \times M(i, j, 1) - 0.5 \times M(i, j, 2) - 0.5 \times M(i, j, 3) \quad (4.9)$$

a ilustração do isolamento do vermelho é dada pela Figura 4.6.

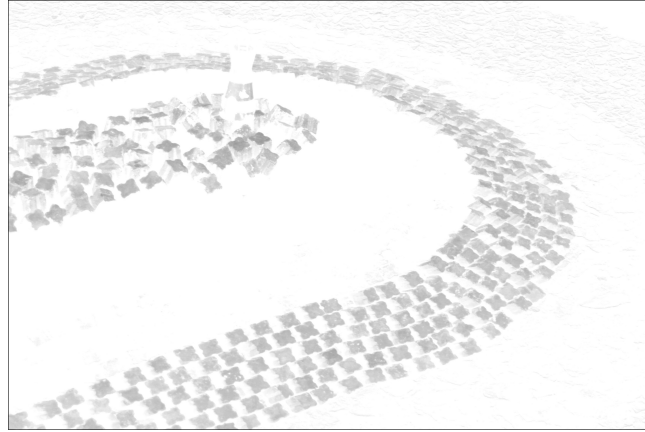


Figura 4.6: Isolamento do vermelho

Com a fórmula de conversão em níveis de cinzento apresentada (equação 4.7) é possível filtrar a cor que mais interessa.

Esta conversão para níveis de cinzento é feita com a função A.2.

4.3.3 Estratificação

Como já se referiu na secção 4.2, uma imagem em níveis de cinzento pode ser representada por uma matriz onde os seus elementos variam entre 0 e 1. A Figura 4.7 representa parte de uma imagem convertida em níveis de cinzento e a Figura 4.8 representa o gráfico de uma coluna da matriz que compõe essa imagem convertida em níveis de cinzento. Neste caso, os valores de cinzento foram ampliados 1000 vezes para uma melhor leitura.

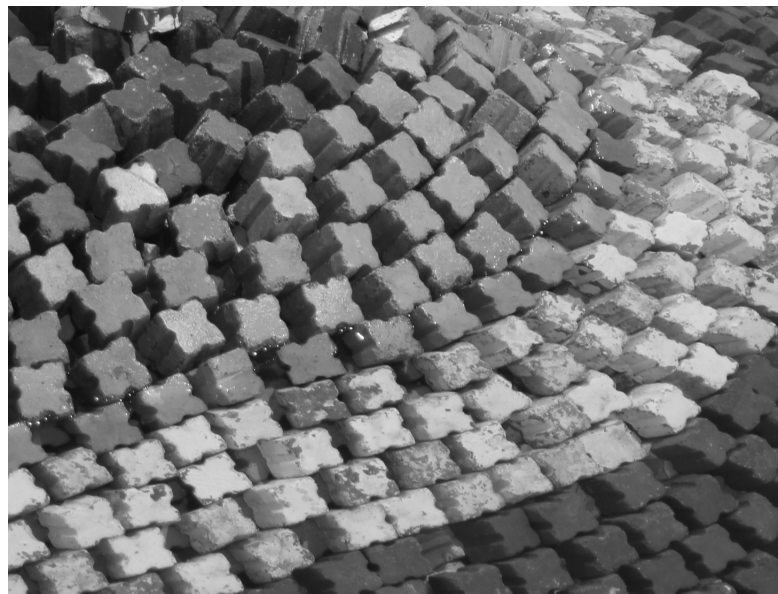


Figura 4.7: Imagem original em níveis de cinzento

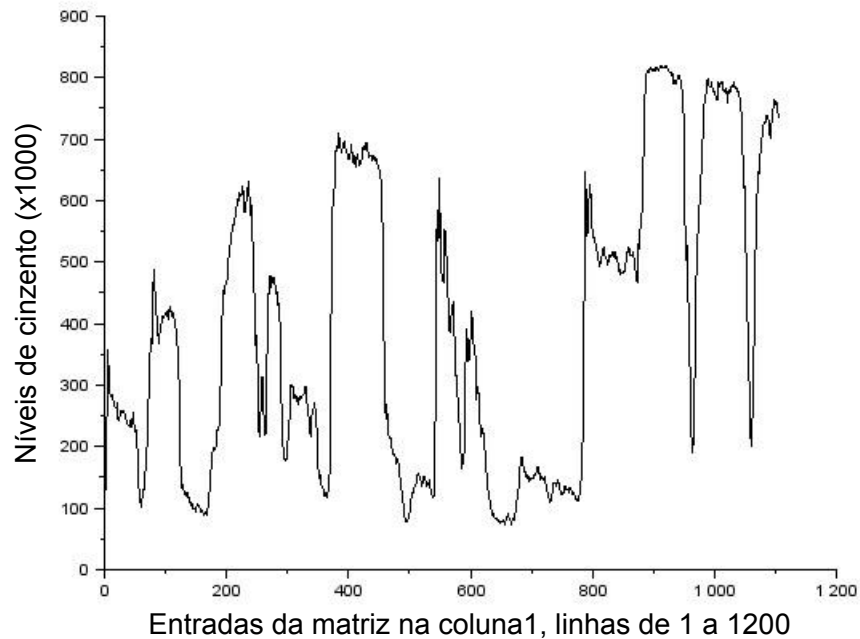


Figura 4.8: Gráfico dos níveis de cinzento da imagem original

Pretende-se fazer uma representação compatível mantendo os contornos do objeto fotografado em níveis de cinzento mas em vez dos elementos da matriz variarem continuamente no intervalo dos números reais entre 0 e 1, são tomados em classes de representação previamente determinadas.

Assim, procurou-se uma forma de reduzir os "dentes de serrote" observados no gráfico representado pela Figura 4.8 sem comprometer a definição da imagem. A aproximação dos valores de cinzento para uma gama de valores intermédios estipulados, permite a definição de classes de várias aproximações, ao que se denominou de estratificação.

Desta forma, escolhendo uma classe, por exemplo, com 6 elementos obtém-se:

$$\mathcal{C}_6 = \{0., 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.\} \quad (4.10)$$

Esta estratificação permite a abertura de "canais" de cinzento que não são utilizados na composição da imagem podendo ser usados para marcações. O gráfico desta estratificação é representado pela Figura 4.9.

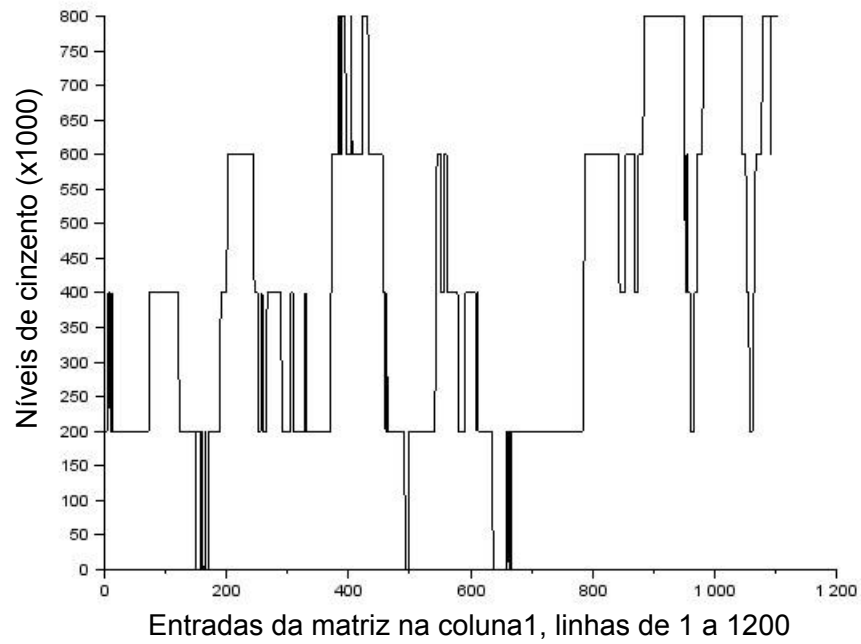


Figura 4.9: Gráfico dos níveis de cinzento da imagem estratificada

A imagem resultante da estratificação é ilustrada pela figura 4.10.

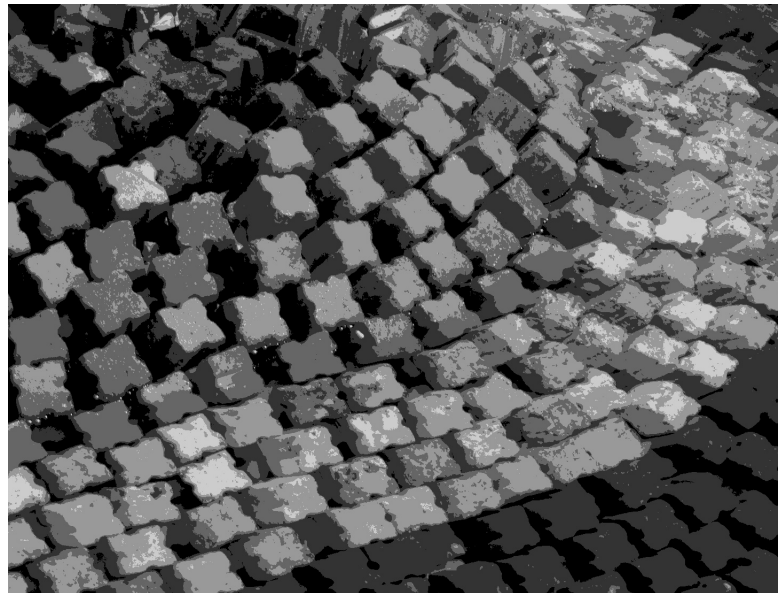


Figura 4.10: Imagem original estratificada em níveis de cinzento

Da comparação visual entre as Figuras 4.7 e 4.10, concluí-se que a estratificação não compromete a definição da imagem e o gráfico 4.9 mostra-nos que a classe \mathcal{C}_6 permite-nos

utilizar, pelo menos 5, marcadores correspondentes aos níveis de cinzento: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 e 0.9.

A marcação de pixels com estes valores é de extrema utilidade quando pretendemos monitorizar o percurso de um objeto numa sequência de imagens.

A estratificação é feita com a função A.4, em apêndice.

4.3.4 Translações

Nesta secção, pretende-se representar os vetores de translação para determinados objetos fotografados em dois momentos. Usando as técnicas de estratificação descritas na secção anterior, são abertos "canais" de níveis de cinzento que permitem a marcação de determinados pixels, segundo a metodologia seguinte:

Nas imagens inicial e final é feita a marcação dum pixel, do objeto em estudo, com um nível de cinzento disponível após a estratificação da imagem. Com o exemplo dado anteriormente para uma classe de 6 elementos, existem 5 canais de nível de cinzento disponíveis:

$$\mathcal{D}_6 = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\} \quad (4.11)$$

Desta forma é possível marcar simultaneamente 5 objetos.

Com esta marcação dos objetos, no caso concreto os blocos de betão, torna-se possível determinar os vetores de translação que determinam o movimento identificado pelas fotos.

A ilustrar esta técnica apresenta-se nas Figuras 4.11(a) e 4.11(b) um teste efetuado para cores primárias, onde foram feitas marcações num quadro branco, de três quadrados com as cores vermelho, verde e azul.

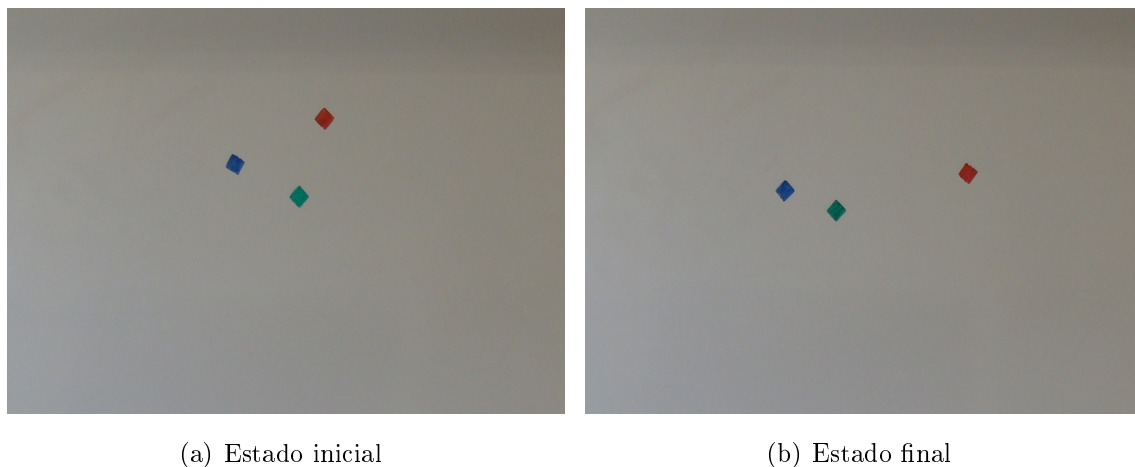


Figura 4.11: Teste de cores primárias

Nestas fotos foi aplicada a metodologia de isolamento das cores primárias, descrita na secção 4.3.2. As Figuras 4.12(a) e 4.12(b) representam o isolamento do vermelho, num estado inicial e final, respetivamente.

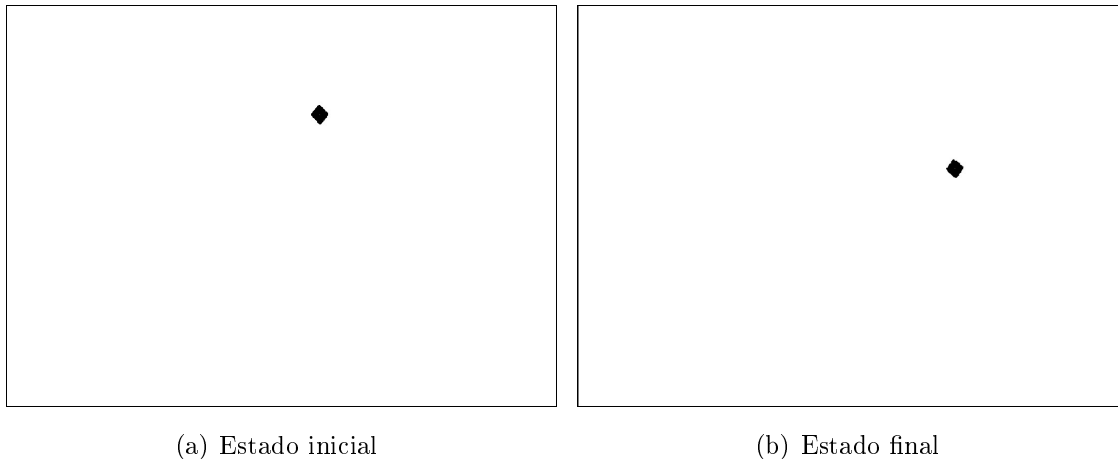


Figura 4.12: Teste com o isolamento do vermelho

Depois de estratificar as Figuras 4.12(a) e 4.12(b) como descrito na secção 4.3.3, e de proceder à marcação das imagens, obtêm-se o vetor associado ao seu deslocamento na figura 4.13 .

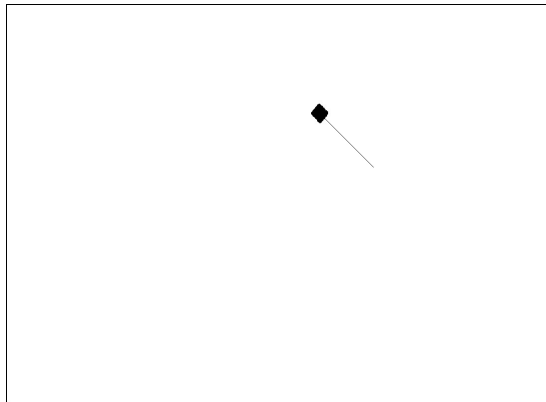


Figura 4.13: Deslocamento do quadrado vermelho

Este procedimento foi inspirado no trabalho realizado por Chilo and Guidance [24] na análise dos movimentos no modelo físico de quebra-mares de taludes, no entanto recorrendo a uma técnica diferente.

Este estudo é limitado pois é necessário conhecer o estado final do objeto, neste caso, o bloco de betão, de forma a fazer a marcação com um pixel. Uma outra possibilidade passaria pelo conhecimento de mais fotografias além dos estados inicial e final, o que não é fácil obter nas devidas condições pois a sua recolha seria durante os ensaios.

A análise da translação dos blocos é feita com a função A.7, em apêndice.

4.3.5 Detecção de Movimentos

Um dos objetivos deste trabalho é a deteção de zonas de maior alteração entre os estados inicial e o final do teste. Assim depois de convertidas as respetivas hiper-matrizes em níveis de cinzento:

$BW_i(i.j)$ matriz de níveis de cinzento inicial

$BW_f(i.j)$ matriz de níveis de cinzento final $i \in \{1, \dots, nl\}, j \in \{1, \dots, nc\}$

irá detetar-se as diferenças relevantes entre as duas matrizes.

Para tal considere-se uma matriz, designada por matriz posição P, com a mesma dimensão das matrizes BW cujas entradas apenas são 0 se a diferença não for relevante, ou 1, se a diferença for relevante.

$$P(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{se } |BW_f(i.j) - BW_i(i.j)| > \varepsilon \\ 0 & \text{se } |BW_f(i.j) - BW_i(i.j)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4.12)$$

Para um determinado valor de ε .

A zona de maiores alterações será detetada usando a norma $\|\cdot\|_1$ para matrizes, definida por:

$$\|A\|_1 = \max_{1 \leq j \leq s} \sum_{i=1}^r |a_{ij}| \quad (4.13)$$

para uma matriz $A = [a_{ij}]_{r \times s}$.

Assim, o bloco matricial correspondente a uma maior alteração é o bloco com maior número de entradas igual a um, ou seja, com maior norma. Este processo é efetuado iterativamente, começando sobre toda a matriz posição, decompondo o bloco inicial em quatro subblocos e procurando o subbloco com maior norma.

A Figura 4.14 representa graficamente a matriz de posição P, para aumentar a visibilidade considerou-se a escuro as zonas com mais entradas iguais a 1. Usando o procedimento descrito, é fácil localizar o bloco da matriz com maior norma (mais entradas iguais a 1).

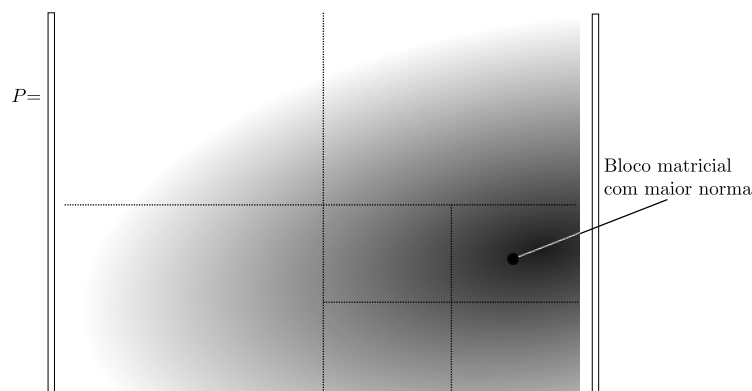


Figura 4.14: Representação gráfica da matriz P

A função A.6, em apêndice, permite desta forma localizar as zonas de maior alteração de todo o quebra-mar fotografado e quantificar em área ou percentagem as alterações.

Sabendo quantos pixels correspondem à aresta de um bloco utilizado no modelo pode-se fazer uma relação para a obtenção da área modificada, sendo que nos testes efetuados 3 cm (aresta do bloco) correspondem aproximadamente a 28 pixels. No entanto a percentagem de modificações pode ser sempre apresentada mesmo que não se tenha uma relação de área, pois relaciona apenas pixels modificados.

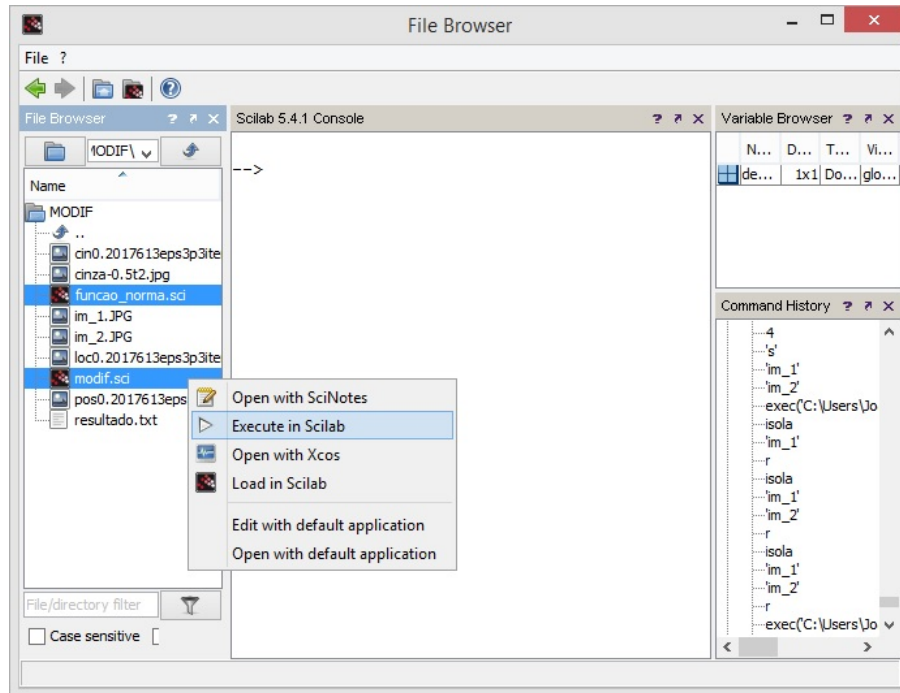
4.4 Guia de procedimentos

Nesta secção é apresentado um guia de utilização para as funções criadas. Têm como objetivo facilitar a aplicação por terceiros. Para as funções funcionarem corretamente as imagens, inicial e final, que se pretendem analisar devem estar na mesma diretoria do ficheiro da respetiva função.

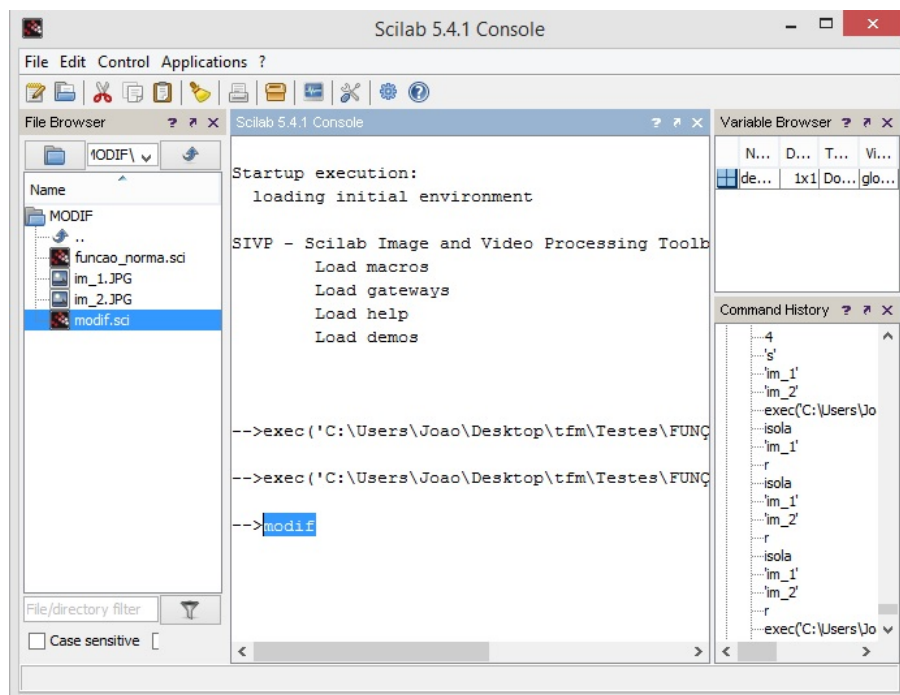
Os outputs são guardados na diretoria onde estão os ficheiros das funções correspondentes. Com a função A.6 é feito um registo em .txt dos dados introduzidos e dos resultados obtidos.

Para a execução da função A.6 seguem-se os seguintes passos:

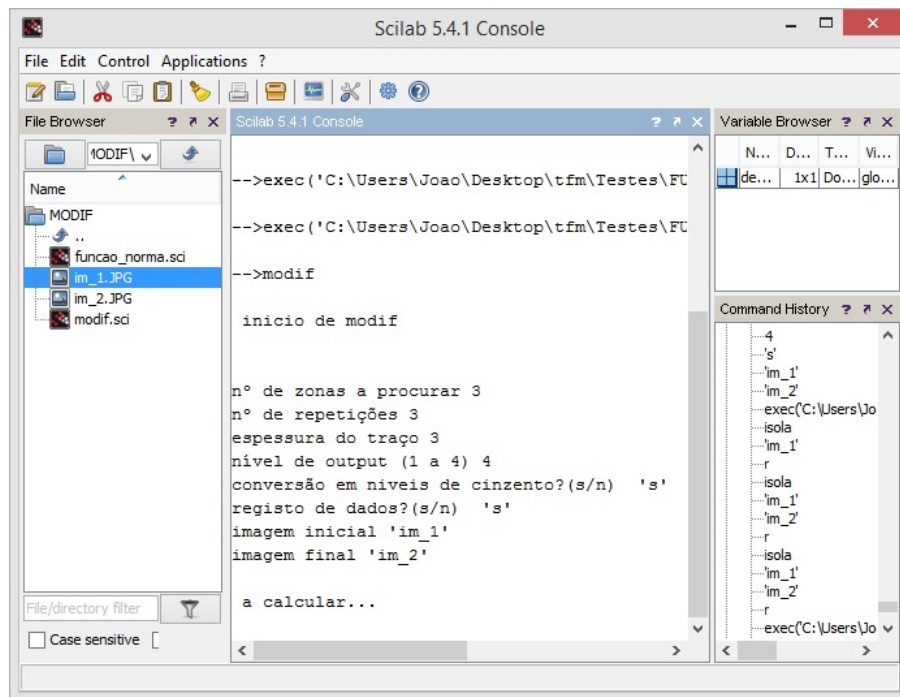
1. Abre-se o programa Scilab e executa-se os ficheiros "função_ norma.sci" e "modif.sci"



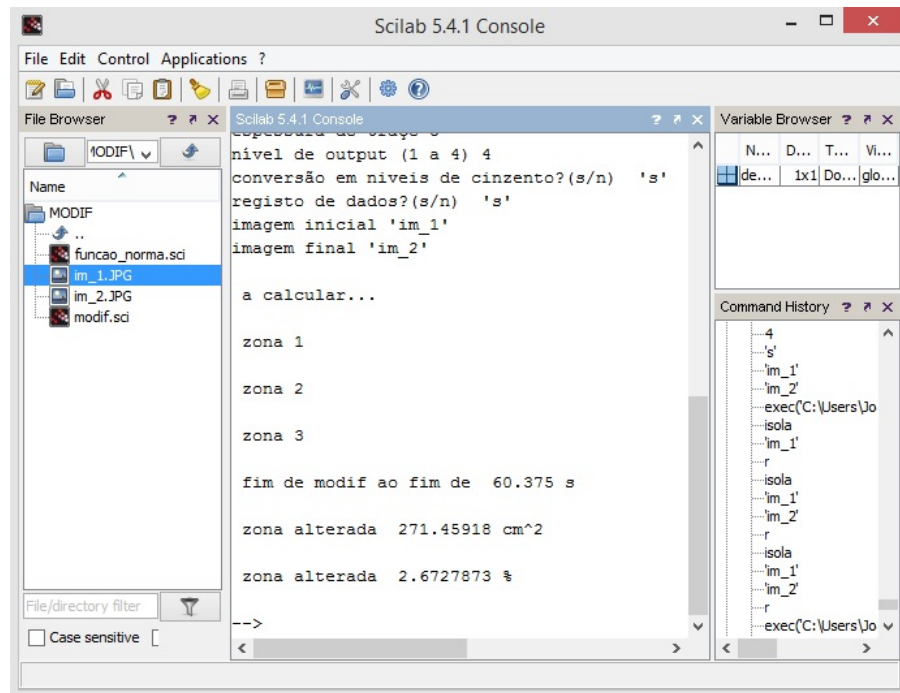
2. Na linha de comandos do Scilab escreve-se "modif" e executa-se.



3. Introduzem-se os parâmetros desejados conforme ilustrado.

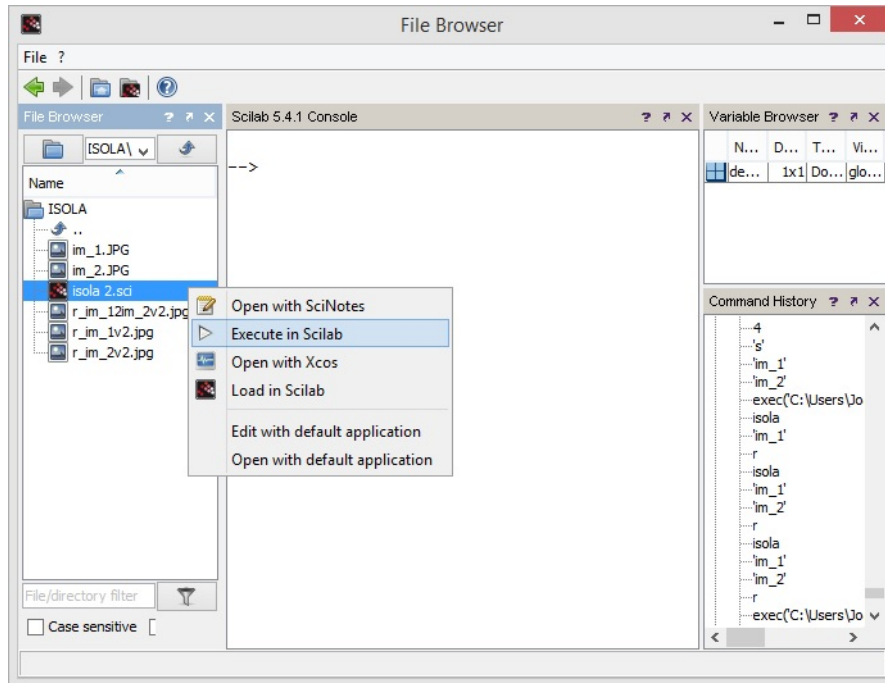


3. Após terminar o cálculo, são obtidos os outputs e um ficheiro .txt de registo do cálculo, guardados na diretoria da função.

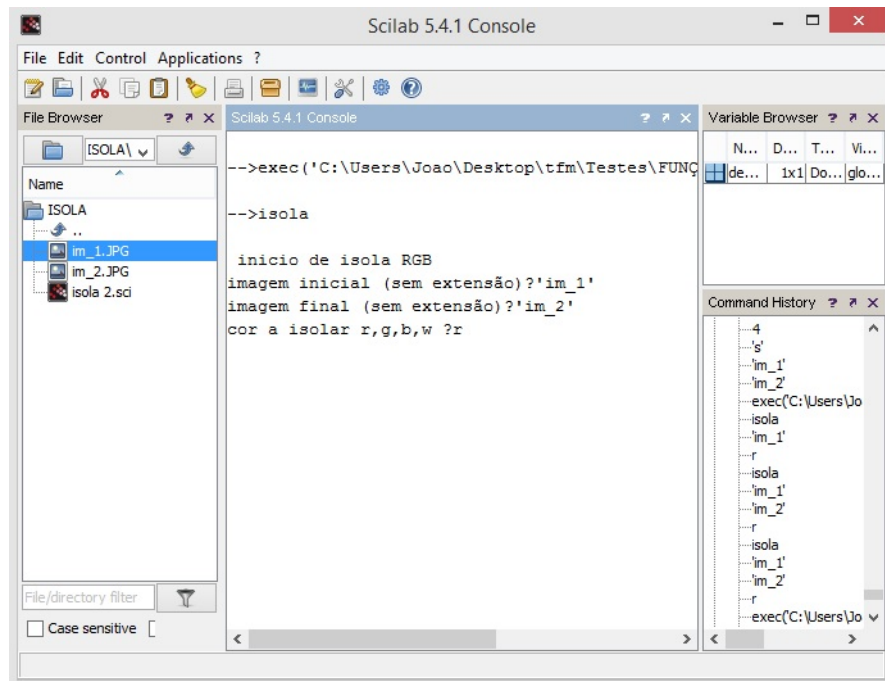


Para a execução das outras funções criadas o procedimento é praticamente o mesmo, por exemplo para a função A.2:

1. Abre-se o programa Scilab e executa-se o ficheiro "isola.sci".

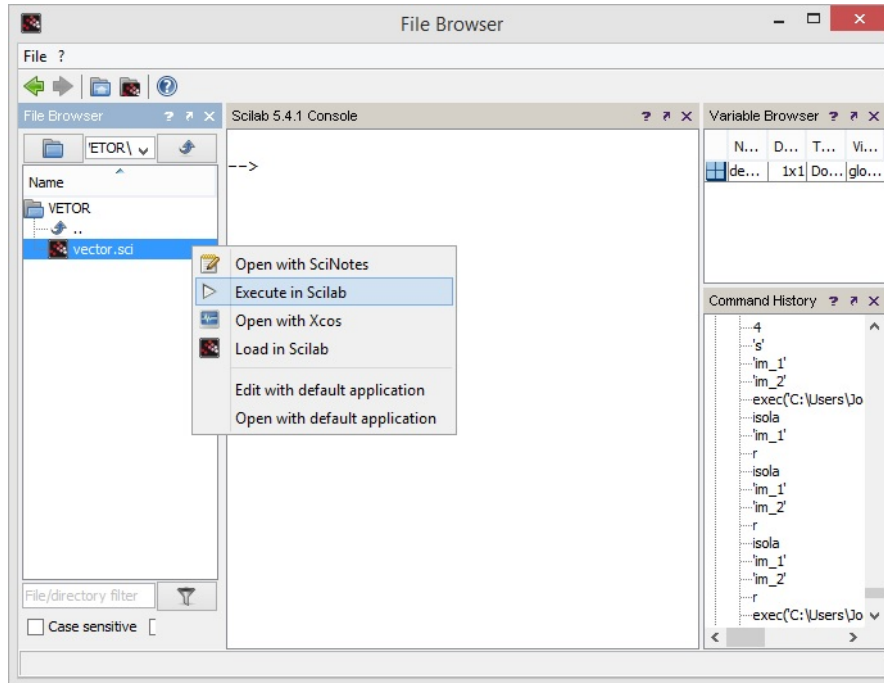


2. Escreve-se na linha de comandos do Scilab "isola" e executa-se. Introduzem-se os dados pedidos conforme a imagem ilustra e é feito o cálculo. Os outputs são guardados na diretoria da função.

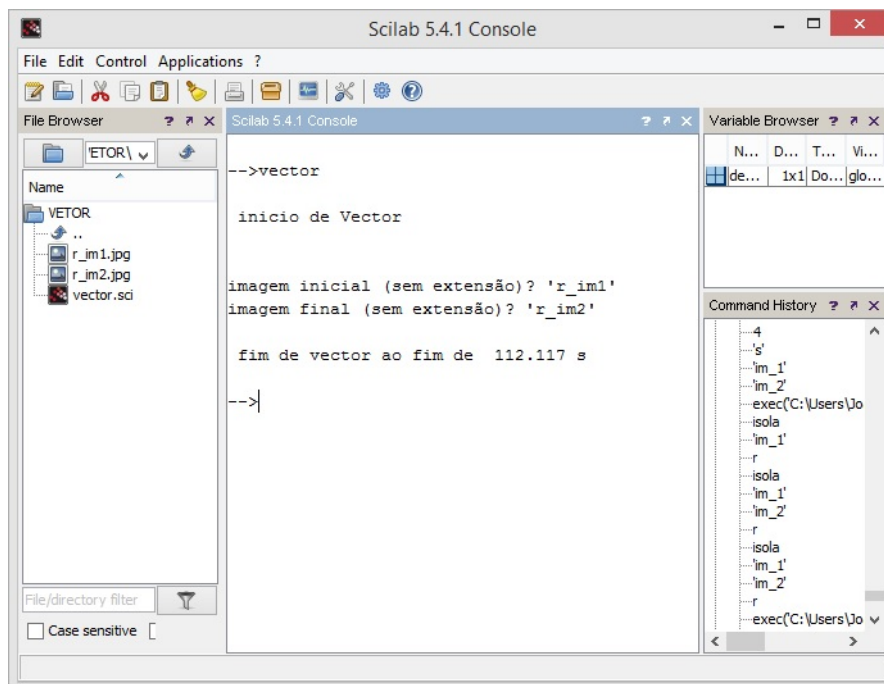


A função A.7 executa-se como as anteriores:

1. Abre-se o programa Scilab e executa-se o ficheiro "vector.sci".



2. Escreve-se "vector" na linha de comandos do Scilab e executa-se. Introduzem-se os dados pedidos conforme a imagem ilustra e é feito o cálculo. Os outputs são guardados na diretoria da função.

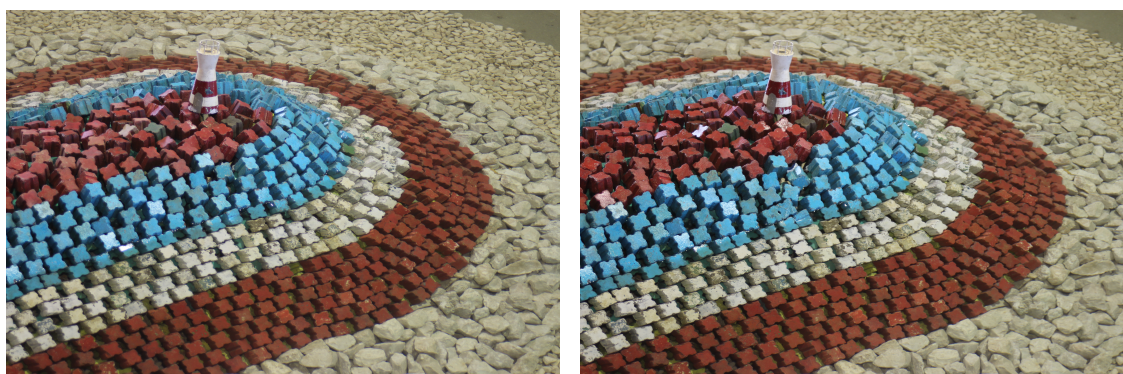


Capítulo 5

Testes e Resultados

As fotografias utilizadas nos testes feitos com o Scilab [21] correspondem a ensaios em modelo reduzido efetuados pelo LNEC.

Numa fase inicial de construção dos algoritmos foram utilizadas as melhores fotografias, com poucos reflexos e com movimentos visíveis. Assim, foram escolhidas as fotos representadas pelas Figuras 5.1(a) e 5.1(b), correspondendo ao estado inicial e final, respetivamente.



(a) Estado inicial

(b) Estado final

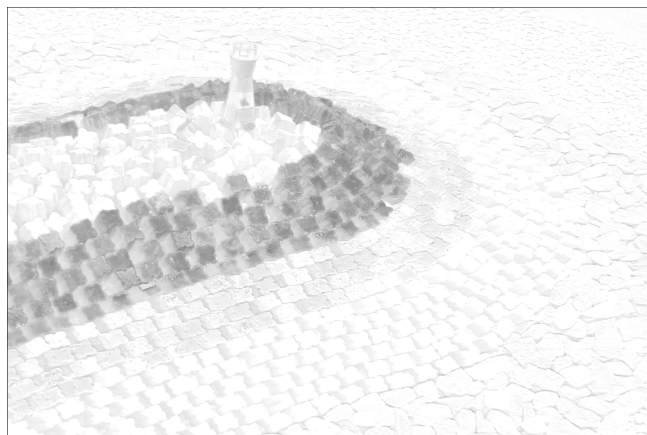
Figura 5.1: Ensaio Laboratoriais

Através de uma conversão adequada em níveis de cinzento foi possível isolar as cores primárias (função A.1), neste caso vermelho e azul. Para a realização destes basta recorrer apenas a uma das fotografias, neste caso foi a da Figura 5.1(a) que corresponde a um estado inicial.

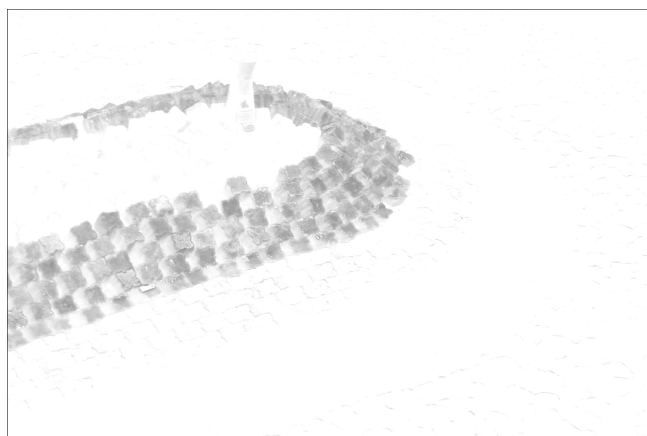
Nas figuras que se se seguem ilustram-se algumas operações de isolamento das cores primárias, variando o parâmetro p ¹.

¹o parâmetro p controla a luminosidade

Isolamento da cor primária azul:



(a) Parâmetro $p=0.9$



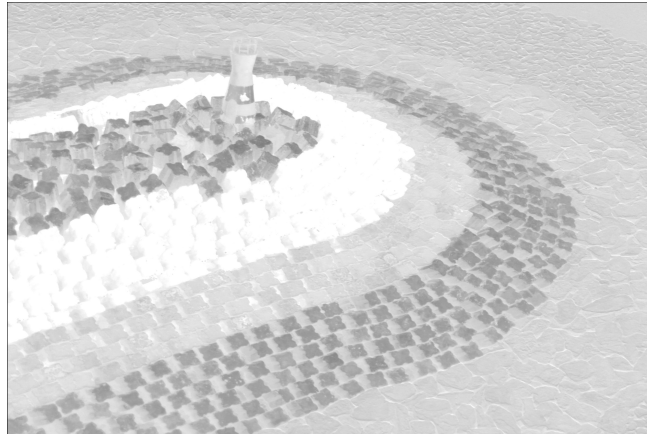
(b) Parâmetro $p=1.0$



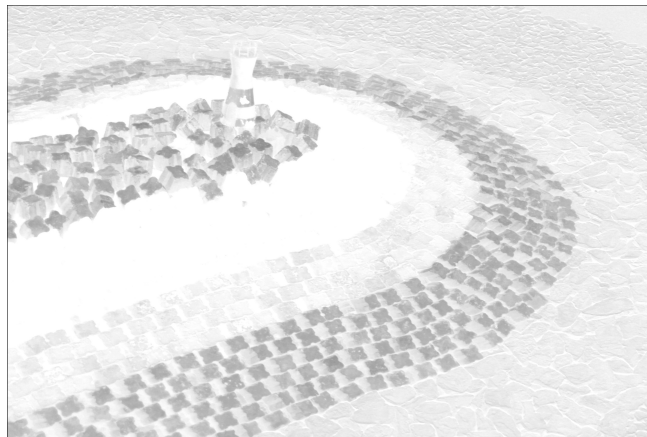
(c) Parâmetro $p=1.1$

Figura 5.2: Testes de isolamento do Azul utilizando a figura 5.1(a)

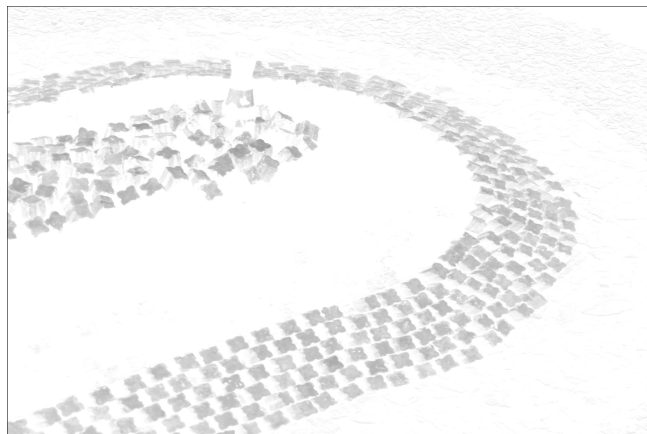
Isolamento da cor primária vermelho:



(a) Parâmetro $p=0.9$



(b) Parâmetro $p=1.0$



(c) Parâmetro $p=1.1$

Figura 5.3: Testes de isolamento do vermelho utilizando a Figura 5.1(a)

Variando o parâmetro p altera-se a luminosidade sendo que para a cor primária azul o valor ideal é $p= 1$ e para a cor primária vermelho $p= 1.1$. Com estes testes foi criada a

função A.2, em apêndice, que com um procedimento diferente na conversão para níveis de cinzento permite o mesmo isolamento de cores primárias.

Isolamento da cor primária azul:



(a) Estado inicial



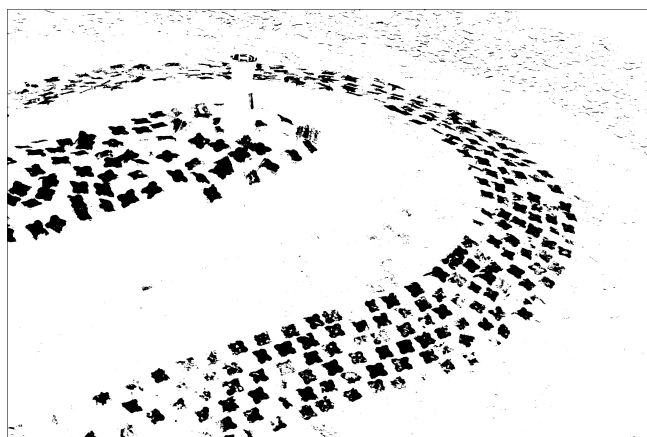
(b) Estado final



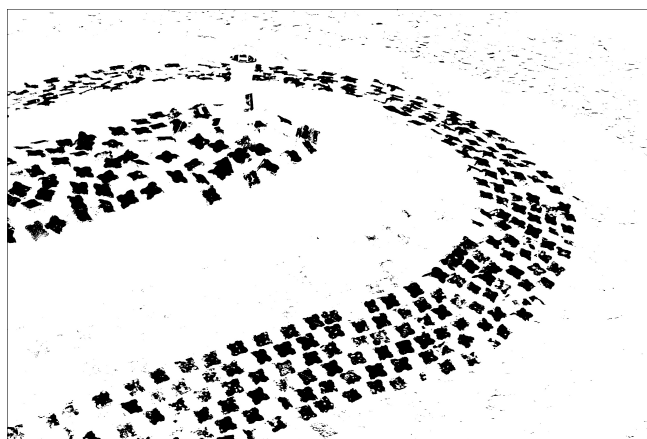
(c) Diferença

Figura 5.4: Testes de isolamento do Azul com a função A.2

Isolamento da cor primária vermelho:



(a) Estado inicial



(b) Estado final



(c) Diferença

Figura 5.5: Testes de isolamento do Azul com a função A.2

A função A.2 além de isolar a cor pretendida faz também uma operação de diferença entre as imagens inicial e final e dá como output o negativo onde o que está a preto representa

alterações, ou seja movimentos de blocos. No caso da Figura 5.2 existe um ligeiro movimento enquanto que na Figura 5.3 não existem movimentos ou quedas consideráveis.

O objetivo deste trabalho foi, sobretudo, a deteção de alterações no manto resistente e quantifica-los. A função A.6, em apêndice, informa a localização dos movimentos e dá uma quantificação em cm^2 e em percentagem, das alterações de todo o quebra-mar.

Com esta função obtêm-se as diferenças em nível de cinzento e a matriz posições (Figura 5.6), que localizam as zonas de alterações.

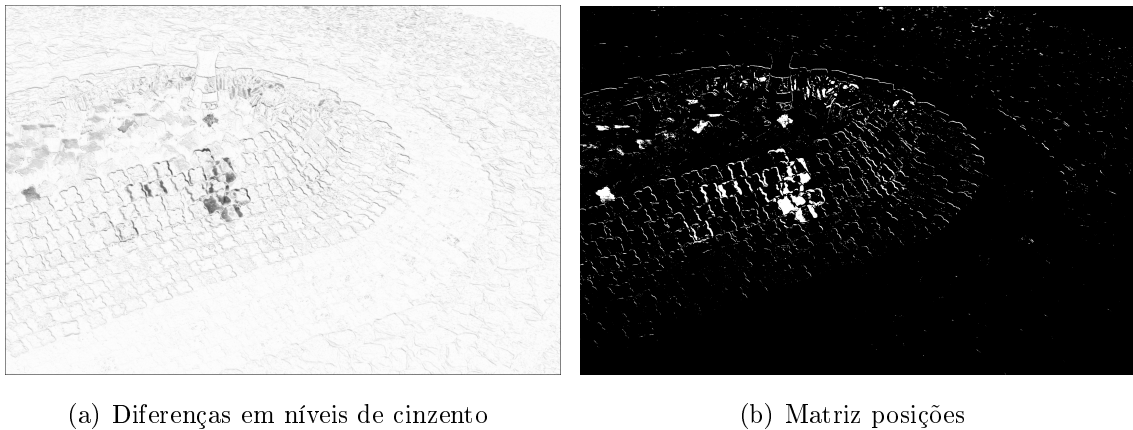


Figura 5.6: Output de diferenças obtido com a função A.6

Além destes dois outputs obtêm-se ainda a localização das zonas de maior alteração na fotografia inicial em níveis de cinzento (Figura 5.7), onde o tamanho e o número de retângulos que marcam a zona são definidos pelo utilizador.

O número de retângulos apresentados nos outputs é dado pelo número de procuras desejado e resume-se basicamente à procura de zonas alteradas, enquanto que o número de repetições está relacionado com o processo iterativo de limitação da zona alterada, procurando assim as zonas com maior alteração até um tamanho pretendido de localização. Quanto maior for o número de iterações menor será o tamanho dos retângulos que vão ser apresentados, sendo o ideal até ao tamanho de um bloco que constitui o manto resistente.

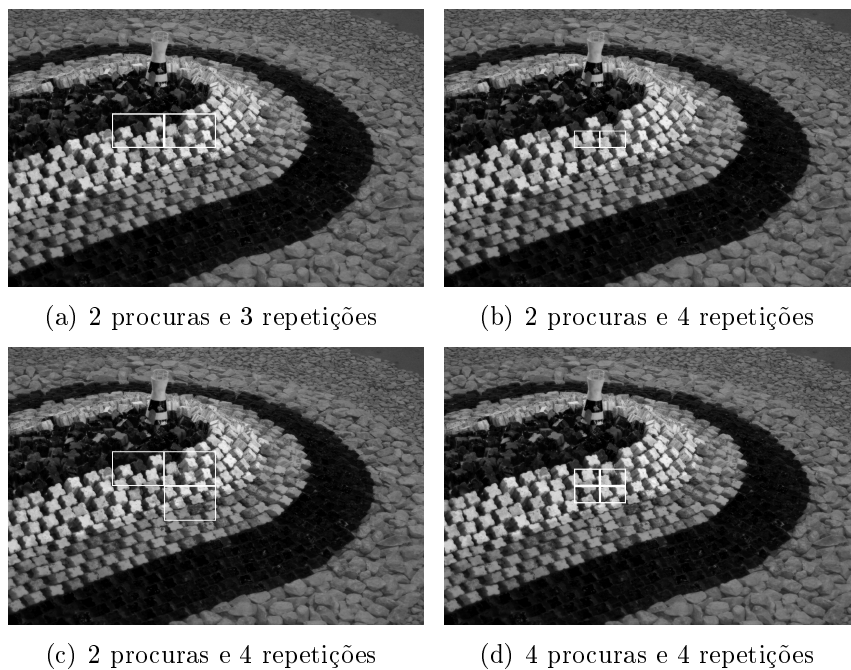


Figura 5.7: Localização das zonas de maior alteração

No entanto, nestes ensaios feitos pelo LNEC não foram registadas quedas de blocos nem grandes movimentos devido ao sobre-dimensionamento do quebra-mar em estudo, houve então necessidade de serem removidos manualmente por forma a simular as quedas de blocos. As Figuras 5.8(a) e 5.8(b) representam essas mesmas fotografias numa fase já com os tanques vazios. Nestas fotografias, as cores apresentadas não são as mais adequadas para o isolamento de cores primárias.

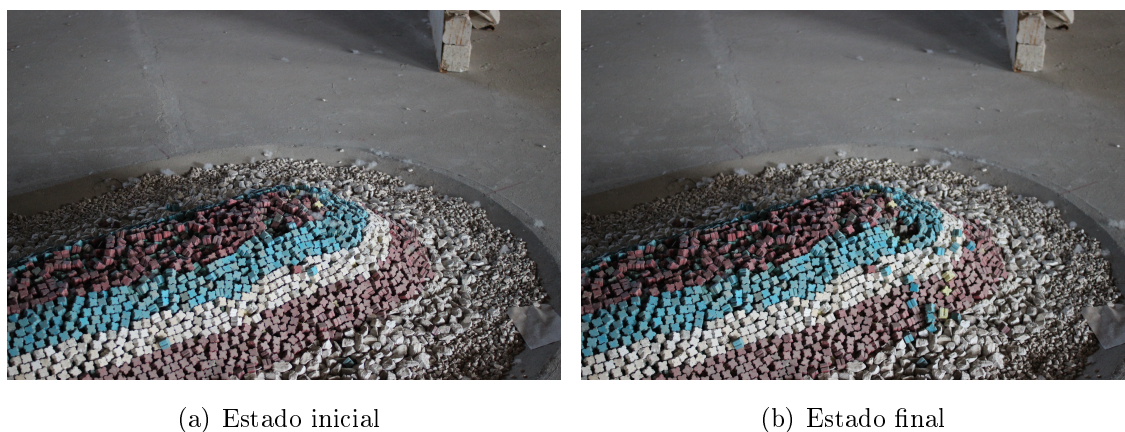
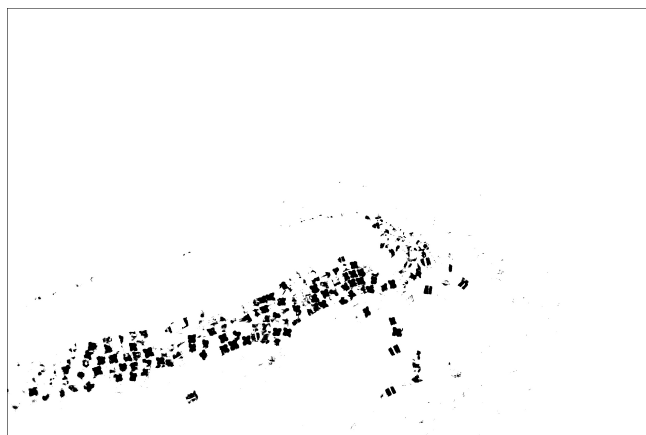
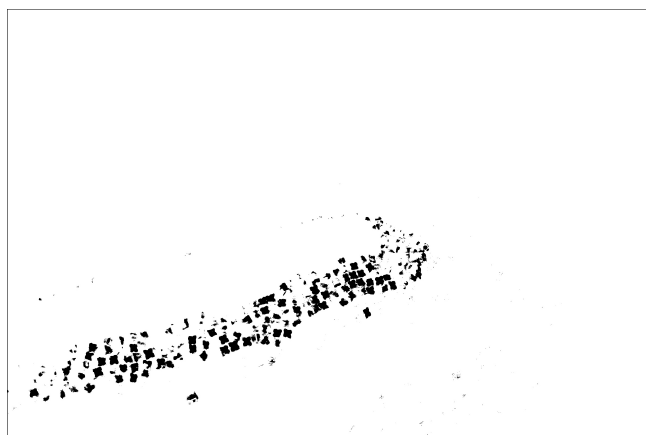


Figura 5.8: Ensaios Laboratoriais (Tanque vazio).

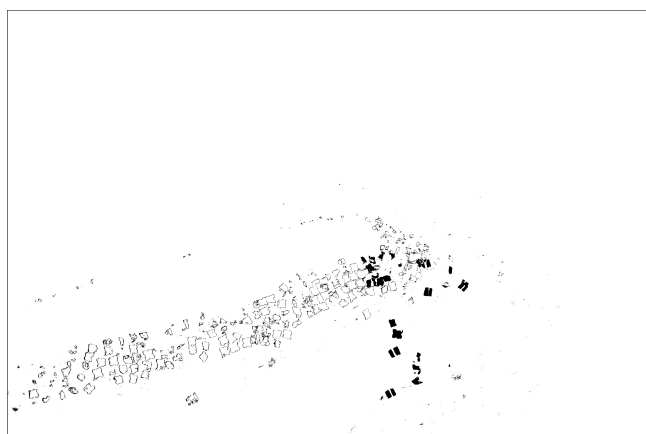
As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram alguns resultados exemplificativos das cores primárias azul e vermelha.



(a) Estado inicial

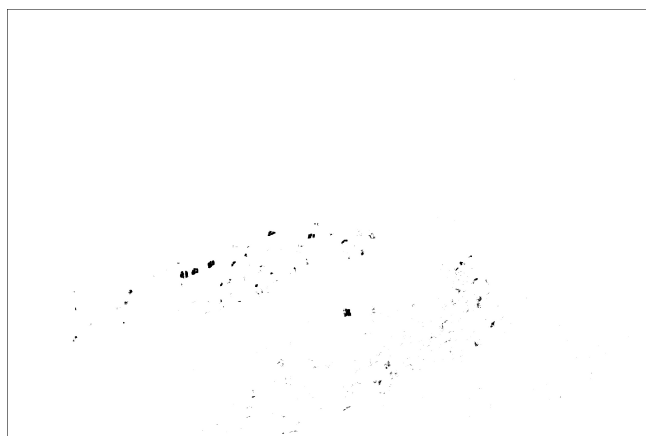


(b) Estado final



(c) Diferença

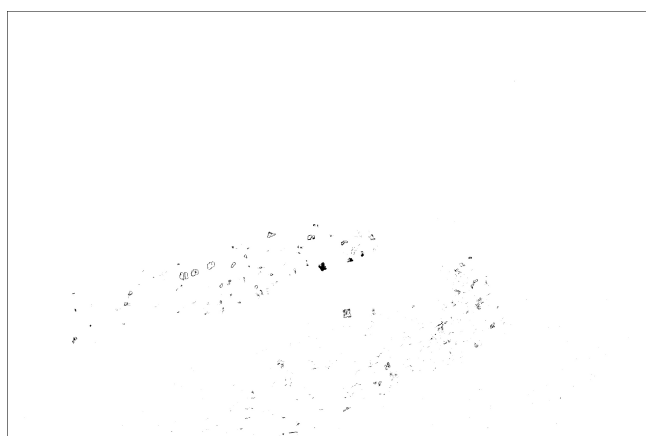
Figura 5.9: Ensaio Laboratorial (Tanque vazio). Isolamento da cor primária azul.



(a) Estado inicial



(b) Estado final



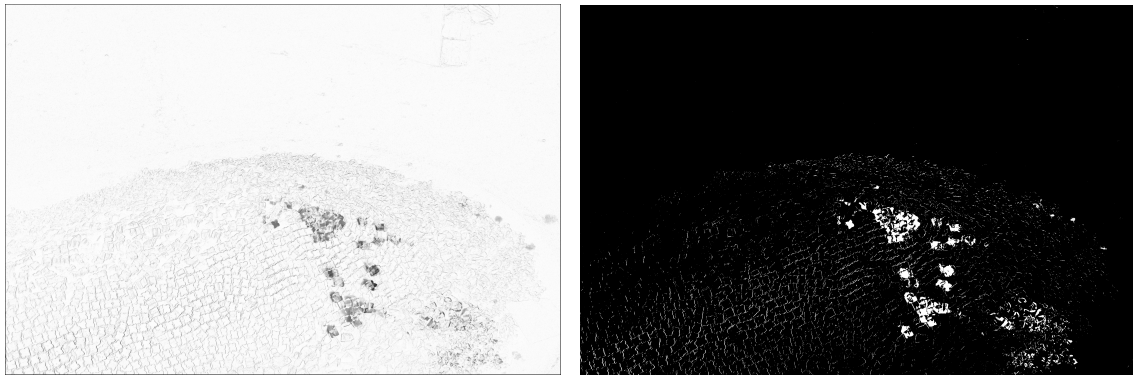
(c) Diferença

Figura 5.10: Ensaio Laboratoriais (Tanque vazio). Isolamento da cor primária vermelho

De acordo com estes resultados apresentados, é possível verificar que no caso do vermelho a conversão utilizada pela função A.2 não é a ideal. Contudo, as cores destas fotografias também não são próprias para o isolamento de cores pois têm tonalidade e luminosidade semelhantes, pelo que se torna difícil identificar as cores primárias.

Seria ideal a utilização de cores próximas em tonalidade e luminosidade das cores primárias Vermelho, verde e azul para o uso desta função.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos com a função A.6, para as fotografias apresentadas na Figura 5.8.

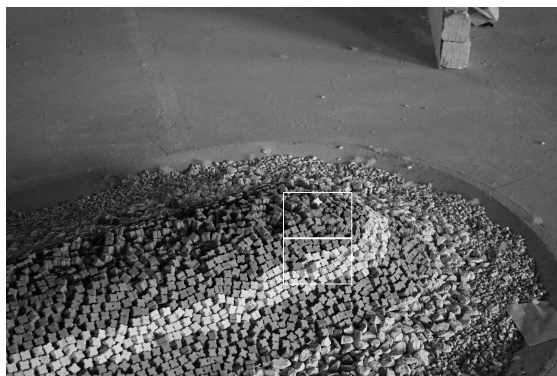


(a) Diferenças em níveis de cinzento

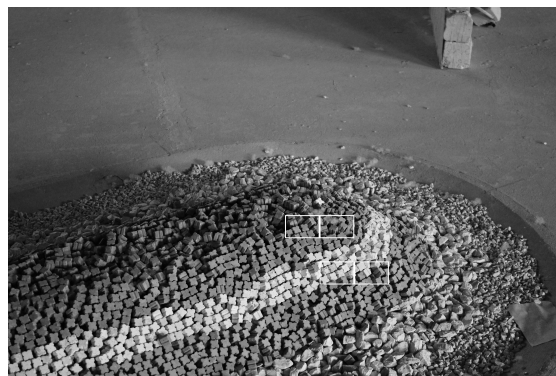
(b) Matriz posições

Figura 5.11: Output de diferenças obtido com a função A.6

Ao contrário dos resultados obtidos com a função A.2, se bem com propósitos diferentes, os resultados obtidos com a função A.6 são satisfatórios, sendo detetados os movimentos através das diferenças de imagens e através da matriz de posições (Figura 5.11(b)) e as zonas onde ocorrem mais movimentos são identificadas com retângulos (Figura 5.12).



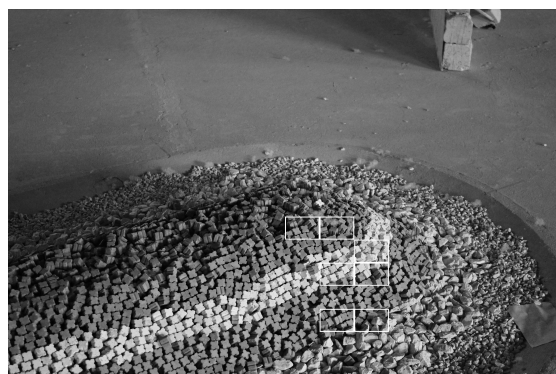
(a) 2 procuras e 3 repetições



(b) 4 procuras e 4 repetições



(c) 5 procuras e 4 repetições



(d) 7 procuras e 4 repetições

Figura 5.12: Localização das zonas de maior alteração

Capítulo 6

Conclusões e observações finais

6.1 Conclusões

Esta tese de Mestrado em Engenharia Civil estabeleceu técnicas de análise fotogramétrica em modelos reduzidos de quebra-mares de taludes, com recurso à programação. Foram desenvolvidas várias funções em Scilab para estabelecer critérios de análise de imagens referentes aos ensaios realizados no departamento de hidráulica do LNEC.

O principal problema era a localização de zonas de ocorrência de danos (quedas e movimentos), e a quantificação da área erodida.

A solução proposta é original, quer pelas imagens utilizadas como suporte, quer pela metodologia matemática. Ao contrário do que é corrente em análises fotogramétricas as imagens usadas não foram obtidas expressamente para este fim, tendo sido obtidas do registo fotográfico de ensaios realizados no LNEC. Por outro lado, na metodologia matemática privilegiou-se a estrutura matricial das imagens conferindo uma maior rapidez de cálculo aos procedimentos elaborados.

Um grande desafio foi o de conseguir "ignorar" os reflexos existentes em algumas imagens. Este desafio foi parcialmente superado com a escolha das fórmulas de conversão para níveis de cinzento que melhor se adequavam a cada caso em estudo.

O facto do modelo do quebra-mar não ter qualquer preparação com vista à análise fotogramétrica aumentou a complexidade dos aspetos numéricos envolvidos. Pressupondo-se que se as cores primárias utilizadas fossem próximas da sua intensidade máxima de cor, todo o isolamento de cores seria mais simples.

A quantificação das alterações não é, no entanto, correspondente à área erodida, pois o cálculo desta área é feito a partir das diferenças de imagem, sendo quantificada a totalidade da área onde são detetadas diferenças, não se distinguindo se elas correspondem a erosão ou a depósito. Para colmatar esta falha, durante a construção do modelo reduzido poderia-se optar por pintar o submanto com uma cor primária (vermelho, verde ou azul) diferente

da cor do manto resistente, o que utilizando a técnica de isolamento de cores primárias permitiria obter apenas uma área de erosão.

Quanto às câmaras fotográficas deverá haver uma distância pré-definida durante todo o ensaio a um determinado modelo físico. Antes de cada ensaio deve haver uma calibração nos funções de cálculo de área, para que a modificação em pixels corresponda à área em cm^2 correta.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Este trabalho permitiu resolver as questões propostas, no entanto durante a sua elaboração surgiram outras questões que podem constituir o tema de trabalhos futuros:

- O reconhecimento automático dos blocos Antifer.
- Monitorização do movimento dos blocos Antifer com uma sequência de imagens.
- Estudo da evolução do dano ao longo de séries de ensaios, com alturas de onda significativas (H_S) crescentes.
- Submantos pintados com uma cor primária diferente do manto resistente, permitindo o cálculo da área de erosão de forma mais precisa.

Bibliografia

- [1] Daniel Vera-Cruz. *Generalidades sobre quebra-mares tradicionais particularidades de quebra-mares de talude*. LNEC, 1969.
- [2] Carlos Pita. *Dimensionamento hidráulico do manto resistente de quebra-mares de taludes*. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1986.
- [3] US Army Corps Of Engineers. Coastal engineering manual. *Engineer Manual, Washington, DC.*, 1110:2–1100, 2011. Part VI, Ch.5.
- [4] Robert Y. Hudson. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. In *Proc. ASCE*, volume 85, pages 93–121, 1959.
- [5] J.W. Van der Meer. *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*. PhD thesis, Delft University of Technology, 1988. Also Delft Hydraulics Publication no. 396.
- [6] APRH. Glossário das zonas costeiras. <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/onda.html>. Acedido em 20 de junho de 2014.
- [7] J.W. Kamphuis. *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Advanced series on ocean engineering. World Scientific, 2002.
- [8] Robert Y. Hudson. Engineering aspects of water waves: A symposium: Wave forces on breakwaters. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 118(1):653–674, 1953.
- [9] R. Iribarren Cavanilles. Una formula para el calculo de los diques en escoller (a formula for the calculation of rock fill dikes). *Revista de Obras Publicas*, 1938.
- [10] CETMEF CIRIA, CUR. *The Rock Manual. The use of Rock in hydraulic engineering*. C683, CIRIA, London, 2nd edition, 2007.
- [11] Shore Protection Manual. Coastal engineering research center. *Department of the Army, Waterways Experiment Station*, 1, 1984.

- [12] Jeffrey A. Melby. *Damage progression on rubble mound breakwaters*. PhD thesis, University of Delaware, Newark, DE, 1999.
- [13] Laurie L. Broderick and John P. Ahrens. Riprap stability scale effects. Technical report, DTIC Document, 1982.
- [14] Steven A. Hughes. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Singapore : World Scientific, 1993.
- [15] Jeffrey A. Melby and N. Kobayashi. Damage progression on breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(26), 1998.
- [16] Jeffrey A. Melby. Damage development on stone-armored breakwaters and revetments. Technical report, DTIC Document, 2005.
- [17] Rute Lemos. Verificação de fórmulas para a evolução da erosão em quebra mares de taludes. Master's thesis, ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- [18] António C. Quintela. Hidráulica, 9ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian. *Lisboa, Portugal*, 2005.
- [19] Edward M. Mikhail, James S. Bethel, and J. Chris McGlone. *Introduction to modern photogrammetry*, volume 1. John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 2001.
- [20] T. Schenk. Introduction to photogrammetry. <http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf>, 2005. Acedido 11 de maio de 2014.
- [21] Scilab Enterprises. Scilab: Free and open source software for numerical computation. <http://www.scilab.org>, 2013. Orsay, France.
- [22] Shigi Yu. Sivp-scilab image and video processing toolbox. <http://sivp.sourceforge.net>, 2011. Acedido 13 de março de 2014.
- [23] Charles Poynton. *Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, USA, 2003.
- [24] Bruno Chilo and Franco Guiducci. Computerised methodology to measure rubble mound breakwater damage. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(24), 1994.
- [25] Paulo Freitas. Estabilidade hidráulica de cubos antifer. Estudo em modelo físico. Master's thesis, IST-Instituto Superior Técnico-Departamento de Engenharia Civil, 2013.

- [26] João Fabião. Estabilidade hidráulica do manto de quebra-mares de taludes. Estudo em modelo físico. Master's thesis, IST-Instituto Superior Técnico-Departamento de Engenharia Civil, 2012.
- [27] J.W. Van der Meer. Design of concrete armour layers. In *Proceedings of the Coastal Structures*, volume 99, pages 213–221, 1999.
- [28] A. Kortenhuis, J.W. Van der Meer, H.F. Burcharth, J. Geeraerts, T. Pullen, D. Ingram, and P. Troch. Quantification of measurement errors, model and scale effects related to wave overtopping, clash wp7 report. *Leichtweiß Institute for Hydraulics, Technical University of Braunschweig, Germany*, 2005.
- [29] H.F. Burcharth. The design of breakwaters. *Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*, page 381, 1993.
- [30] Michael S. Triantafyllou and Franz S. Hover. Maneuvering and control of marine vehicles. *Department of Ocean Engineering, MIT-Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA*, 2002.

Apêndice A

Funções Scilab

Função A.1. Neste procedimento do Scilab são lidas as duas imagens, inicial e final, e é feita a conversão para níveis de cinzento de forma a isolar a cor pretendida e é feita a diferença entre as duas imagens convertidas. Este procedimento funcionou como base para a criação da função 2 ("Isola"). O output são 3 imagens convertidas em níveis de cinzento que são gravadas na diretoria do ficheiro: inicial, final e diferença.

```
cd('directoria');
stacksize('max');
I=imread('imagem inicial.JPG');
F=imread('imagem final.JPG');

p=1.0;
I=double(I)/255.; [nl,nc,nx]=size(I);

I_bw = zeros(nl,nc);

I_bw = -.5*I(:, :, 1)-.5*I(:, :, 2)+1.5*I(:, :, 3); //azul
I_bw =I(:, :, 1)-.5*I(:, :, 2)-0.5*I(:, :, 3); //vermelho
Ibw=ones(nl,nc); //Ibw=Ibw-round(I_bw);
Ibw=abs(Ibw-I_bw);Ibw=p*Ibw;

clear I;
nome1 ="P - "+ string(p)+" - inicial"+" .jpg";
imwrite(Ibw, nome1 );
F=double(F)/255.;

F_bw = zeros(nl,nc);
```

```

F_bw = -.5*F(:, :, 1)-.5*F(:, :, 2)+1.5*F(:, :, 3); //azul
F_bw =F(:, :, 1)-.5*F(:, :, 2)-0.5*F(:, :, 3); //vermelho
Fbw=ones(nl,nc); // Fbw=Fbw-round(F_bw);
Fbw=abs(Fbw-F_bw);Fbw=p*Fbw;

nome2 ="P - "+ string(p)+" - Final"+" .jpg";
imwrite(Fbw, nome2 );

clear F;

D=ones(nl,nc);
D=round(abs(Ibw-Fbw));
//D=D-Ibw;

nome3 ="P - "+ string(p)+ " - Dif_P"+" .jpg";
imwrite(D, nome3 );

```

Função A.2. *Esta função têm como objetivo isolar a cor pretendida, após ser executada são pedidos os dados ao utilizador: imagem inicial e final, cor a isolar (r-vermelho, g-verde, b-azul e w-branco). Esta função tem uma conversão diferente da função A.1, que passa pelo arredondamento dos valores matriciais que formam a imagem para 0 ou 1, tornando assim a diferença entre as duas imagens mais simples. Nesta função são obtidos 3 outputs : imagem inicial e final convertidas com a cor pretendida isolada e a diferença entre estas duas últimas.*

```
function isola()
disp("inicio de isola RGB");
tic();

stacksize('max');

ima1      = input("imagem inicial (sem extensão)?");
ima2      = input("imagem final (sem extensão)?");

cor       = input("cor a isolar r,g,b,w ?","string");
I=imread(ima1+".jpg");
F=imread(ima2+".jpg");

select cor

case 'r' then c1 = 1.5;  c2 = -.5; c3 = -.5;
case 'g' then c1 = -.5;  c2 = 1.5; c3 = -.5;
case 'b' then c1 = -.5;  c2 = -.5; c3 = 1.5;
case 'w' then c1 = 0.4;  c2 = 0.4; c3 = 0.1;

end

//p=1.0;
I=double(I)/255.;  [n1,nc,nx]=size(I);

I_bw = zeros(n1,nc);

I_bw = c1*I(:,:,1)+c2*I(:,:,2)+c3*I(:,:,3);
Ibw=ones(n1,nc); Ibw=Ibw-round(I_bw); //Ibw=abs(Ibw-I_bw); Ibw=p*Ibw;
```

```

clear I;
nome1 = cor+"_"+ ima1+".jpg";
imwrite(Ibw, nome1 );
F=double(F)/255.;

F_bw = zeros(nl,nc);

F_bw = c1*F(:,:,1)+c2*F(:,:,2)+c3*F(:,:,3);
Fbw=ones(nl,nc); Fbw=Fbw-round(F_bw); //Fbw=abs(Fbw-F_bw);Fbw=p*Fbw;

nome2 = cor+"_"+ ima2+".jpg";
imwrite(Fbw, nome2 );

clear F;

D=ones(nl,nc);
D=D-round(abs(Ibw-Fbw));
//D=D-Ibw;

nome3 =cor+"_"+ima1+"2"+ima2+".jpg";
imwrite(D, nome3 );

t=toc();
disp("fim de isola RGB ao fim de "+string(t)+" s");

endfunction

```

Função A.3. *Esta função faz a conversão para níveis de cinzento com os coeficientes normais e vulgarmente adoptados.*

```
function [A]=converter(B,n)

// B hipermatriz da imagem RGB
// conversão RGB para níveis de cinzento entre 0. e 1.

select n

case 1 then A = B(:,:,1);
case 2 then A = B(:,:,2);
case 3 then A = B(:,:,3);
case 4 then A = (B(:,:,1) + B(:,:,2) + B(:,:,3))/3;
case 5 then A = .299*B(:,:,1) + .587*B(:,:,2) + .114*B(:,:,3);
case 6 then A = .3*B(:,:,1) + .59*B(:,:,2) + .11*B(:,:,3);

end

endfunction
```


Função A.4. *Esta função aproxima os vários valores da matriz que representa a imagem, para uma proximidade definida consoante classes escolhidas pelo utilizador.*

```
function [A]=estratificar(B,n)

// B matriz da imagem em niveis de cinzento
// Estratificação dos niveis de cinzento
// em classes C escolhidas pelo parâmetro n

select n
case 1 then C=[0.,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.9,1.];
case 2 then C=[0.,.2,.4,.6,.8,1.];
case 3 then C=[0.,.5,1.];
case 4 then C=[0.,1.];
case 5 then C=[0.5,1.];
case 6 then C=[0.,.6,1.];

end

ncla=size(C);
[nl,nc]=size(B);

for i = 1:nl,

    for j = 1:nc,
        m = abs(B(i,j)-C(1)); A(i,j) = C(1);
        for k=2:ncla(2),
            if abs(B(i,j)-C(k))<m then m=abs(B(i,j)-C(k));
            A(i,j) = C(k);
            end
        end
    end

end

end

endfunction
```


Função A.5. *Esta função divide uma imagem em quatro de forma iterativa, procura a zona com maior norma e volta a dividir em quatro até um número de iterações definido.*

```
function [B]=particao(A,nl1,nc1,nl2,nc2)

L=limites(nl2-nl1+1);
C=limites(nc2-nc1+1);
na=norm(A,1); if (na==0) then disp('A MATRIZ DE POSIÇÃO FICOU NULA'); B=[nl1,nl2
N=[0.;0.;0.;0.];

//1°Blobo
C1=A(nl1:nl1+L-1,nc1:nc1+C-1);
N(1)=norm(C1,1);

//2°Blobo
C2=A(nl1:nl1+L-1,nc1+C:nc2);
N(2)=norm(C2,1);

//3°Blobo
C3=A(nl1+L:nl2,nc1:nc1+C-1);
N(3)=norm(C3,1);

//4°Blobo
C4=A(nl1+L:nl2,nc1+C:nc2);
N(4)=norm(C4,1);

//

[m, ind]=max(N);

select ind
case 1 then B=[nl1,nl1+L-1,nc1,nc1+C-1];
case 2 then B=[nl1,nl1+L-1,nc1+C,nc2];
case 3 then B=[nl1+L,nl2,nc1,nc1+C-1];
case 4 then B=[nl1+L,nl2,nc1+C,nc2];
end
```

```
endfunction
```

```
function N=limites(M)
```

```
    if (modulo(M,2)==0) then N=M/2;
```

```
        else N=(M+1)/2;
```

```
    end
```

```
endfunction
```

Função A.6. *Esta função serve para a deteção de movimentos e contabilização das diferenças entre as imagens. É necessário correr primeiro a função A.5. Nesta função é pedido ao utilizador parâmetros de número de procuras, número de procuras, a espessura do traço com que é feita a marcação na foto, os níveis de output pretendidos, se é necessário a conversão em níveis de cinzento ou não e as duas imagens a tratar, inicial e final.*

Como outputs obtêm-se o negativo das diferenças, onde tudo que aparece a preto são movimentos. As zonas de movimentos são marcadas numa fotografia do estado inicial convertida em níveis de cinzento. Obtêm-se ainda a matriz de localizações, que representa os movimentos, onde tudo o que aparece a branco equivale a 1 e a preto a 0 (matricialmente). Este último é importante para o cálculo da norma 1 da matriz e permite assim começar o processo iterativo de localização da zona com maior norma, ou seja localizar as zonas de maior alteração, e efetuar a marcação na imagem inicial.

Esta função grava ainda um ficheiro .txt onde ficam registado o dia e horas do teste bem como os inputs e outputs.

```
function modif()
disp("inicio de modif");
disp(" ");
tic();

stacksize('max');

//eps      = input("eps ");
nprocuras  = input("nº de zonas a procurar ");
iter       = input("nº de repetições ");
ntra      = input("espessura do traço ");
out       = input("nivel de output ");
con       = input("conversão niveis de cin?(0/1) ");

ima1      = input("imagem inicial ");
ima2      = input("imagem final ");

disp("a calcular");

// eps          parâmetro próximo de 1. para a matriz das posições
// nprocuras    nº de zonas a procurar
```

```

// iter          n° de partições da imagem por procura
// ntra          espessura do traço

// leitura das imagens a cores do teste
// I = imagem inicial
// F = imagem final
I=imread(ima1);
F=imread(ima2);

// conversão [0,255] para [0.,1.]
I=double(I)/255.;
F=double(F)/255.;

// dimensão da hipermatriz
// nl = n de linhas
// nc = n de colunas
// nx = matrizes

[nl,nc,nx]=size(I);

select con

case 1 then
// cálculo da norma 1 (máximo da soma dos módulos das entradas por coluna)
// para as 3 matrizes RGB da hipermatriz I

nor = [0.;0.;0.];
nor(1) = norm(I(:,:,1),1); nor(2)= norm(I(:,:,2),1); nor(3) = norm(I(:,:,3),1);
// disp("n1 = "+string(nor(1))+ " n2 = "+string(nor(2))+ " n3 = "+string(nor(3)));

// determinação das matrizes de maior e menor norma

maximo = nor(1); minimo = nor(1);

[m1,imax]=max(nor); [m2,imin]=min(nor);

// cálculo dos coeficientes otimais para a conversão das

```

```

// hipermatrizes I e F em níveis de cinzento

select imin

case 1 then c1 = nor(imin)/nor(imax); c2 = -1.; c3 = 1.;
case 2 then c2 = nor(imin)/nor(imax); c3 = -1.; c1 = 1.;
case 3 then c3 = nor(imin)/nor(imax); c2 = 1.; c1 = -1.;

end

// conversão das imagens em níveis de cinzento

I_bw =c1*I(:, :,1)+c2*I(:, :,2)+c3*I(:, :,3);
F_bw =c1*F(:, :,1)+c2*F(:, :,2)+c3*F(:, :,3);

B=I_bw;

case 0 then B=I; I_bw=I; F_bw =F; c1=0;
end

I_bw = abs(F_bw-I_bw);    m1=max(I_bw); m2=min(I_bw);

eps = (m1+m2)*.25;

//=====
// negativo da diferença 0=escuro => maior diferença:
//=====
A = ones(nl,nc);  Ibw = A - I_bw;

//c1, c=c1, format('v',4);c

if (out>1) then
nome = "cinza"+string(c1)+"t2.jpg";
imwrite(Ibw, nome );
//imshow(Ibw);

```

```

end

// Construção da matriz de posições
// P(i,j) = 0 , se a diferença for próxima de zero
// P(i,j) = 1 , se a diferença é grande abs(F_bw-I_bw(i,j) ) > eps

Pos=zeros(nl,nc);

t1=timer()
for i = 1:nl,
    for j = 1:nc,
        if (abs(I_bw(i,j)) > eps) then Pos(i,j)=1;
        end
    end
end

end
end

soma = sum(Pos);

if (out>2) then
nome4 = "pos"+string(eps)+"eps"+string(nprocuras)+"p"+string(iter)+"iter.jpg";
imwrite(Pos, nome4);
end

// Procura da zona que mais contribui para a norma 1 da matriz Pos

for np = 1:nprocuras,

disp("zona "+string(np));

    nl1=1;nl2=nl;nc1=1;nc2=nc;

    C=[0;0;0;0];

    for k=1:iter,
        C=particao(Pos,nl1,nc1,nl2,nc2);
    end
end

```

```

        nl1=C(1);nl2=C(2);nc1=C(3);nc2=C(4);
    end

// marcação das linhas de delimitação das zonas de maior diferença
// com traço duplo

    for n=1:ntra, // traço multiplo - vertical
        for i=C(1):C(2),
            B( i, C(3)+n-1 )=1.; B( i, C(4)-n+1 )=1.;
            Ibw( i, C(3)+n-1 )=0; Ibw( i, C(4)-n+1 )=0;
        end
            // traço multiplo - horizontal
        for j=C(3):C(4),
            B( C(1)+n-1,j )=1.; B( C(2)-n+1,j )=1.;
            Ibw( C(1)+n-1,j )=0; Ibw( C(2)-n+1,j )=0;
        end
    end
end

// eliminação da zona já detetada

        for i=C(1):C(2),
            for j=C(3):C(4),
                Pos(i,j) = 0;
            end
        end

end

// fim do ciclo np
if (out>0) then
nome2 = "loc"+string(eps)+"eps"+string(nprocuras)+"p"+string(iter)+"iter.jpg";
imwrite(B, nome2);
end

if (out>1) then
nome3 = "cin"+string(eps)+"eps"+string(nprocuras)+"p"+string(iter)+"iter.jpg";
imwrite(Ibw, nome3);
end
end

```

```
t=toc();
disp("fim de modif ao fim de "+string(t)+" s");
ua= 1/(28*28)*soma;
disp("zona alterada "+string(ua)+" cm^2");
por = 100*soma/(nl*nc)
disp("zona alterada "+string(por)+" %");
endfunction
```

Função A.7. *Esta função serve para fazer a análise de translações. Para funcionar é necessário que a imagem esteja estratificada, o que permite "canais" para a marcação de pixels. Esta função é limitada porque as imagens inicial e final têm de ser marcadas manualmente pelo utilizador, ou seja, com uma cor que esteja nos "canais" abertos é feita a marcação na imagem do momento inicial e é feita também a marcação na imagem do momento final. Após essa marcação é então possível correr esta função. Poderão ser marcados apenas o número de blocos para o mesmo número de "canais" disponíveis. A marcação pode ser feita com um pixel recorrendo a um programa de imagem como o Paint. Dentro da paleta de cores, escolhe-se a correspondente a uma das disponíveis após a estratificação.*

// Lê a imagem já estratificada e sinalizada e representa o vector da translação

```
function vector()
```

```
disp("inicio de Vector");
```

```
disp(" ");
```

```
tic();
```

```
stacksize('max');
```

```
//eps = input("eps ");
```

```
ima1 = input("imagem inicial (sem extensão)? ");
```

```
ima2 = input("imagem final (sem extensão)? ");
```

```
//ncor = input("numero de cores ")
```

```
I=imread(ima1 + ".jpg");
```

```
F=imread(ima2 + ".jpg");
```

```
// conversão [0,255] para [0.,1.]
```

```
I=double(I)/255.;
```

```
F=double(F)/255.;
```

```
    EI=(I(:,:,1) + I(:,:,2) + I(:,:,3))/3 ;
```

```
    EF=(F(:,:,1) + F(:,:,2) + F(:,:,3))/3 ;
```

```
[n1,nc]=size(EI);
```

```
//X=1:1:n1;
```

```
cor=[0.5];[ncor,nx]=size(cor);
```

```

eps=0.03;

kcor=zeros(ncor,4);
for k=1:ncor,

    for i = 1:nl,
        for j = 1:nc,
            if abs(EI(i,j)-cor(k,1))<eps then kcor(k,1)=i;kcor(k,2)=j;
            end
            if abs(EF(i,j)-cor(k,1))<eps then kcor(k,3)=i;kcor(k,4)=j;
            end
        end
    end
end

//marcacao dos vectores na imagem inicial

d1 = abs( kcor(k,3) - kcor(k,1) );
d2 = abs( kcor(k,4) - kcor(k,2) );

m = round(d2/d1)

for i=0:d1, //d1-4,

    n1 = kcor(k,1) + i*( kcor(k,3) - kcor(k,1) )/d1;
    n2 = kcor(k,2) + i*m*( kcor(k,4) - kcor(k,2) )/d2;

    EI(n1,n2) = 0.;

end

//    for i=d1-4:d1

//        n1 = kcor(k,1) + i*( kcor(k,3) - kcor(k,1) )/d1;
//        n2 = kcor(k,2) + i*m*( kcor(k,4) - kcor(k,2) )/d2;

```

```
//      EI(n1,n2) = 0.;  EI(n1,n2-i+d1); EI(n1-i+d1,n2);

//      end

end

nome ="vet_"+ima1+"2"+ima2+".jpg";
imwrite(EI, nome );

t=toc();
disp("fim de vector ao fim de "+string(t)+" s");

endfunction
```