

ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS PARA O PORTO DE SINES*

Engineering Geological Studies for the Sines Harbour (Portugal)

por

RICARDO OLIVEIRA**, J. DELGADO RODRIGUES*** e A. GOMES COELHO****

RESUMO – O Porto de Sines situado cerca de 150 km a Sul de Lisboa será um dos portos mais importantes da Europa e foi previsto essencialmente para navios petroleiros e minerais. O molhe principal tem 2 km de comprimento e atinge a batimétrica (–50 m) no seu extremo. Para a sua construção foram usados cerca de 6 milhões de metros cúbicos de enrocamento parte dos quais é constituída por blocos de rocha de 3 a 6, 6 a 9, 9 a 12 e 12 a 20 toneladas. O projecto inclui ainda outras estruturas distribuídas por uma área de cerca de 5 km².

Esta comunicação descreve os estudos geológicos e geotécnicos relacionados principalmente com as estruturas marítimas e com a selecção da pedreira para extracção do material adequado para este tipo de obras.

SYNOPSIS – The Sines Harbour which is under construction near Sines, 150 km South of Lisbon, will be one of the most important harbours in Europe, and it is mainly intended for oil and mineral tankers. The main breakwater is 2 km long and the depth of water reaches 50 m at its far end. For its construction about 6 million cubic meters of rock fill have been used, part of them made out of rock blocks 3-6, 6-9, 9-12 and 12-20 tons in weight. The layout of the harbour includes many other structures spread over an area of about 5 km².

The paper describes the engineering geological studies concerning mainly the foundations of the marine structures and the selection of a quarry for the extraction of rock material adequate to the type of works.

1 – INTRODUÇÃO

O Porto de Sines, em construção cerca de 150 km a Sul de Lisboa, é uma das mais importantes estruturas marítimas já construídas e está projectada essen-

* Trabalho apresentado no III International Congress of Engineering Geology. Madrid, September 1978.

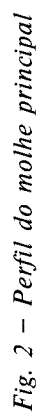
** Geólogo, Especialista Chefe da Divisão de Prospekção do LNEC.

*** Geólogo, Especialista do LNEC.

**** Geólogo, Estagiário para Especialista do LNEC.



Fig. 1 – Implantação geral do Porto de Sines



cialmente para petroleiros (até 500 000 toneladas na presente fase) e minerais. O seu quebra-mar principal tem cerca de 2 km de comprimento, atinge a batimétrica (- 50 m) no seu extremo sul, tendo sido necessários cerca de 6 milhões de metros cúbicos de enrocamento para a sua construção (Figs. 1 e 2).

O porto faz parte de um projecto de desenvolvimento para a Área de Sines cuja administração está a cargo do “Gabinete da Área de Sines” que é uma organização estatal com jurisdição sobre uma zona de 400 km², onde estão em curso muitas outras obras integradas em projectos urbanos e industriais.

Por ser uma região subdesenvolvida, muito pouco era conhecido da sua geologia e das propriedades geotécnicas das formações ocorrentes, quer em terra quer no mar, quando se iniciou o projecto.

Em relação ao projecto das estruturas portuárias tiveram de ser considerados dois aspectos geotécnicos fundamentais: i) condições de fundação do quebra-mar e das outras estruturas marítimas, e ii) selecção de um local para implantação de uma pedreira para exploração de 10 milhões de metros cúbicos de rocha parte dos quais constituída por blocos de rocha de 3 a 20 toneladas.

O presente trabalho descreve os estudos geológicos e geotécnicos empreendidos, os resultados obtidos e as conclusões tiradas pelos autores.

2 – CONDIÇÕES GEOLÓGICAS GERAIS

O cabo de Sines é formado por um maciço eruptivo pós-jurássico que interrompe a longa linha de praias e dunas entre Setúbal e Sines, formando um promontório com arribas rochosas.

A formação eruptiva está fortemente desmantelada pela erosão e apresenta uma topografia suave atingindo a sua máxima altitude em Chãos (101 m). Níveis de erosão com praias levantadas podem ainda ver-se no cimo das actuais arribas.

As rochas ígneas estão muito alteradas e decompostas junto à superfície e encontram-se cobertas por um manto de solo residual com poucos afloramentos rochosos.

A formação eruptiva tem uma estrutura sub-vulcânica em anel, alongada na direcção Este-Oeste formando dois complexos eruptivos:

- um complexo sienítico que forma o Cabo de Sines;
- um complexo gabro-diorítico na parte oriental (maciço de Chãos).

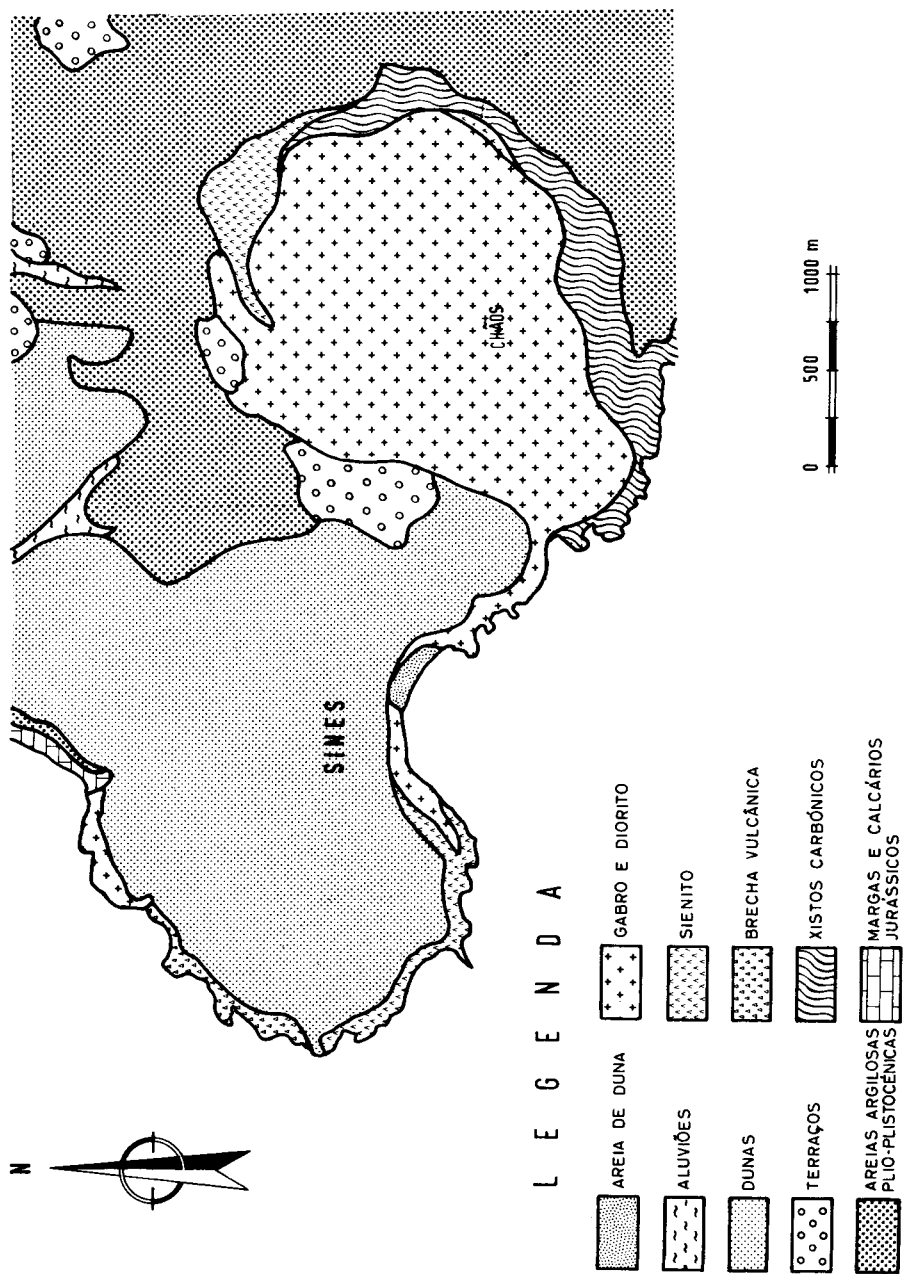


Fig. 3 – Mapa geológico da zona de Sines

Estes complexos estão intensamente fracturados e são atravessados por grande número de filões de vários tipos petrográficos. Os filões ocorrem com diversas atitudes mas predominam as inclinações subverticais e direcções em torno de E-W.

A intrusão das rochas ígneas originou uma zona de metamorfismo de contacto formada por corneanas cálcicas no flanco norte em contacto com as margas e calcários jurássicos e por corneanas pelíticas nos flancos sul e sudeste em contacto com os xistos do Carbónico.

As rochas eruptivas, os xistos carbónicos e as margas e calcários jurássicos encontram-se cobertas nalgumas zonas por depósitos pliocénicos constituídos por areias argilosas e seixos e por depósitos arenosos e dunas de idade quaternária.

Na parte submersa encontrou-se o mesmo dispositivo geológico. O maciço de rochas ígneas, envolvido por xistos carbónicos, em parte coberto por sedimentos arenosos, forma o fundo do mar na zona prevista para implantação das estruturas marítimas.

A Fig. 3 mostra uma carta geológica esquemática da zona em estudo.

3 – INVESTIGAÇÃO DAS CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS NO FUNDO DO MAR

O plano de investigação visando a definição da natureza e espessura dos depósitos superficiais e as características das formações rochosas subjacentes na área do quebra-mar e das outras estruturas portuárias, consistiu numa campanha de prospecção sísmica seguida de uma campanha de prospecção mecânica.

A campanha de prospecção sísmica consistiu num levantamento sísmico de toda a baía de Sines, usando o método sísmico de reflexão, durante a qual foram executados 30 perfis, com cerca de 3 km de comprimento cada, orientados normalmente à linha de costa e separados 100 m entre si.

A interpretação dos resultados desta campanha de prospecção confirmou a presença de sedimentos móveis cobrindo um firme rochoso para além da batimétrica (- 30 m). Para a interpretação da espessura destes sedimentos assumiu-se a velocidade de 1800 m/s para a propagação das ondas sísmicas nos sedimentos, tendo em consideração a sua natureza arenosa, conforme tinha sido sugerido por reconhecimento anterior.

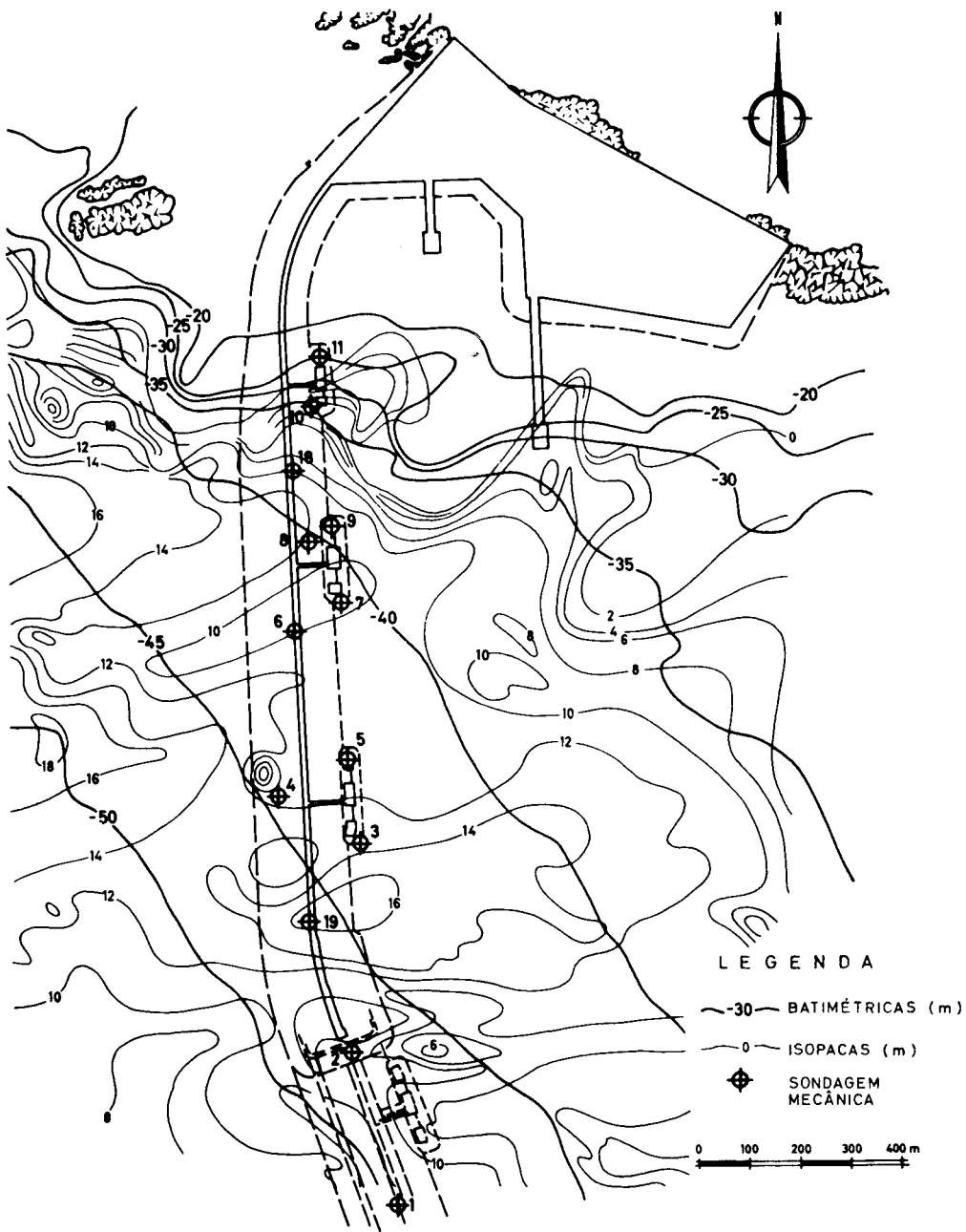


Fig. 4 – Isopacas dos sedimentos dos fundos marinhos

Ao longo do quebra-mar principal, entre as batimétricas (- 30 m) e (- 50 m), a espessura dos sedimentos assim calculada variou entre os 8 e os 15 m.

A interpretação dos registos sísmicos permitiu também obter a definição preliminar do contacto entre o maciço eruptivo e os xistos carbónicos pela análise de algumas variações na natureza acústica do sinal reflectido pelas rochas. Esta definição coincide com a mudança brusca de inclinação do firme.

As Figs. 4 e 5 mostram, respectivamente, uma carta de isopacas dos sedimentos móveis e um perfil geológico e geotécnico ao longo do molhe.

Tendo em vista reconhecer a natureza dos sedimentos móveis e definir as condições geotécnicas das rochas de fundação, foi executado um programa de prospecção por sondagens mecânicas e ensaios *in situ* ao longo do quebra-mar principal e das outras estruturas portuárias. Esta campanha consistiu na execução de 34 sondagens executadas à percussão através dos sedimentos e à rotação após ser atingido o firme rochoso*. Foram executados ensaios de penetração dinâmica (SPT), colhidas amostras representativas dos sedimentos e tarolos de rocha para ensaios de laboratório.

Fez-se a classificação visual das amostras, a classificação geotécnica dos sedimentos e executaram-se alguns ensaios de corte directo nestas amostras. A determinação do RQD, os ensaios de compressão uniaxial, a compressão pontual e os ensaios de desgaste em meio húmido permitiram obter um bom conhecimento das características geológicas e geotécnicas das formações rochosas.

O perfil geológico e geotécnico apresentado na Fig. 5 resume grande parte da informação relativa às fundações do molhe.

No primeiro terço do molhe, o firme rochoso está praticamente aflorante (máxima espessura dos sedimentos é 3 m) correspondendo ao prolongamento para o mar do maciço eruptivo que aflora no Cabo de Sines. O maciço rochoso consiste essencialmente em rochas gabro-dioríticas intersectadas por filões basálticos compactos e zonas brechificadas, mostrando importante fracturação devida à actividade tectónica (milónitos e zonas brechóides). Até às profundidades investigadas (3 a 6 m dentro do maciço rochoso) as rochas estão muito alteradas na maior parte dos tarolos obtidos nas sondagens.

* Devido às condições do mar muito severas (a altura da vaga atingiu 7 m nos dias de maior agitação) e à grande profundidade do fundo do mar (atingindo - 50 m) as operações de furação encontraram consideráveis dificuldades e tiveram que ser executadas em 3 fases ao longo de 18 meses.

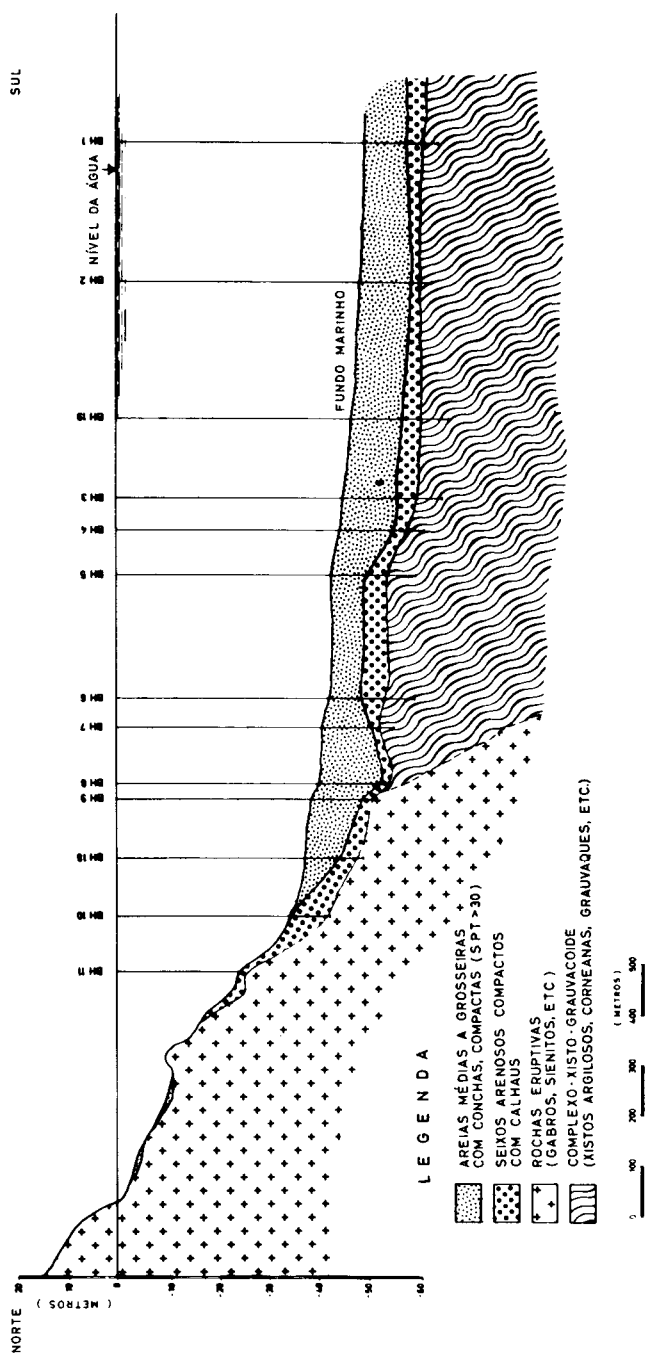


Fig. 5 - Perfil geotécnico da zona de implantação do molhe

Nos dois terços finais do molhe, o firme rochoso está coberto por espessa camada de sedimentos (11 a 15 m) cuja parte superior é formada por areias mal calibradas e muito compactas (os 2 m superficiais são geralmente areias soltas) sob a qual ocorrem seixos compactos e bem calibrados. O maciço rochoso subjacente é constituído pelo complexo xistoso (xistos grafitosos com camadas intercaladas de grauvaques) ligeiramente alterado e moderadamente fracturado, também intersectado por veios de quartzo e filões de rochas básicas. Este maciço é o prolongamento para o mar do complexo de xistos carbónicos que contacta com o maciço eruptivo no seu flanco sul.

Os resultados obtidos com a prospecção e ensaios conduziram à conclusão que os sedimentos do fundo do mar e o maciço rochoso alterado constituem fundação aceitável para o molhe. Não é de esperar rotura por corte e os assentamentos estimados, devidos essencialmente aos sedimentos arenosos soltos da camada mais superficial, são desprezáveis e ocorrerão durante a construção.

As fundações das estruturas portuárias rígidas deverão atingir o firme, considerando-se que as características geotécnicas são aceitáveis cerca de 2 a 3 m abaixo da sua superfície.

4 – ESTUDO DA PEDREIRA

A construção do Porto de Sines requeria uma importante quantidade de materiais de construção sendo o volume de enrocamento (incluindo os blocos) da ordem dos 10 milhões de metros cúbicos.

A selecção de uma pedreira para exploração de tal volume de rocha com características adequadas constituía um importante problema de Geologia de Engenharia.

Através do conhecimento da geologia regional conclui-se que apenas as formações ígneas do maciço eruptivo de Sines poderiam servir para a instalação de uma pedreira com esta finalidade. De acordo com o reconhecimento geológico do maciço foi decidido estudar as formações gabrodioríticas do maciço de Chãos (Fig. 3) por se considerar a zona mais favorável dentro do maciço eruptivo de Sines.

4.1 – *Trabalhos de prospecção*

O estudo começou com uma campanha de prospecção geofísica que consistiu na execução de perfis de resistividade eléctrica, tendo em vista a elaboração

de cartas de resistividades eléctricas aparentes, e na execução de sondagens geo-eléctricas e de perfis sísmicos pelo método de refacção.

A carta de resistividades cobriu uma área de cerca de 1 km², com perfis afastados de 30m, tendo sido utilizado um dispositivo geométrico caracterizado pelas seguintes dimensões:

$$\overline{AB} = 180 \text{ m}$$

$$\overline{MN} = 6 \text{ m}$$

A interpretação dos resultados (Fig. 6) mostra 3 sub-zonas: uma zona central com baixos valores de resistividades eléctricas aparentes ($<80 \Omega \cdot \text{m}$) e duas laterais com valores mais elevados.

As sondagens geoeléctricas mostraram que na zona central as baixas resistividades mantêm-se até aos 50m, enquanto que nas zonas laterais estes valores apenas se mantêm até aos 6 a 15 m de profundidade.

Tendo em vista a clarificação do significado geotécnico de tais variações da resistividade eléctrica, foi efectuado um conjunto de perfis sísmicos de refacção nas diferentes zonas detectadas. As velocidades de propagação de ondas longitudinais confirmaram que os baixos valores de resistividade eléctrica aparente correspondiam a baixos valores de velocidades ($V_L < 2500 \text{ m/s}$), características de maciços rochosos de fraca qualidade e que os valores de resistividade mais altos correspondiam aos mais altos valores das velocidades ($V_L > 4000 \text{ m/s}$).

Tendo em atenção estes resultados, foi preparado um programa de prospecção mecânica visando, numa primeira fase, confirmar a validade das considerações atrás apontadas e, numa segunda fase, obter as necessárias informações geológicas e geotécnicas sobre o maciço considerado de boa qualidade.

As sondagens efectuadas na zona de baixas resistividades confirmaram também a fraca qualidade do maciço indicando a sua profunda alteração até cerca dos 50 m de profundidade. Pelo contrário, na zona de maiores resistividades as sondagens mostraram que, sob uma camada de solo residual de 6 a 15 m de espessura, ocorre um maciço gabrodiorítico, não alterado, geralmente com ligeira fracturação e atravessado por alguns filões.

Foram executadas 31 sondagens de rotação, inclinando 45 a 90° e os seus comprimentos variando entre 25 e 60 m.

Pela observação dos tarolos de sondagem concluiu-se que a qualidade da rocha parecia aceitável para a construção do enrocamento do molhe. Acei-

tando esta conclusão como satisfatória, o principal problema a resolver era determinar a possibilidade de obter os blocos de rocha com as dimensões requeridas no projecto. Para estudar este problema foi feita a análise do espaçamento de fracturas, nos tarolos obtidos nas sondagens efectuadas na zona mais favorável para a instalação da pedreira. Foram registados todos os tarolos com comprimento superior a 0,3 m, tendo a análise dos resultados mostrado que grandes espaçamentos (>1 m e mesmo >3 m) eram bastante frequentes. Como exemplo dos resultados obtidos apresenta-se na Fig. 7 a distribuição da frequência dos comprimentos dos tarolos de 11 sondagens, com um comprimento total furado de 296,75 m. Com base nesta análise concluiu-se que havia elevada probabilidade de que o maciço rochoso fosse adequado para a exploração dos blocos de rocha para a construção do molhe e das outras estruturas portuárias.

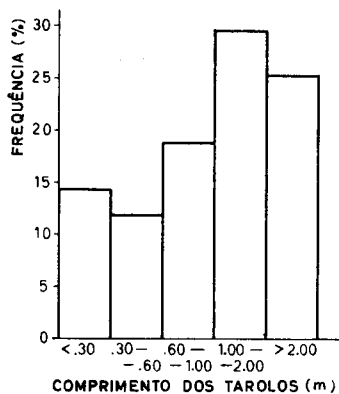


Fig. 7 – Distribuição dos comprimentos dos tarolos obtidos nas sondagens

Esta conclusão foi confirmada durante a exploração da pedreira, tendo até fins de 1977 sido extraídas as seguintes quantidades de blocos:

- até 3 toneladas – 370 000 m³
- 3 a 6 toneladas – 600 000 m³
- 9 a 12 toneladas – 12 000 m³
- 9 a 20 toneladas – 100 000 m³
- 16 a 20 toneladas – 70 000 m³

4.2 – *Determinação da qualidade da rocha*

O maciço eruptivo é formado, essencialmente, por uma rocha escura de grão grosseiro com cristais bem desenvolvidos de feldspato e de minerais ferromagnesianos. Ao microscópio verifica-se que a rocha é holocristalina, de grão grosseiro e textura alotriomórfica e por vezes com tendência intersertal. Os seus componentes principais são: plagioclase do domínio do labrador, piroxena e biotite; nalgumas lâminas estudadas identificou-se hornblenda e olivina. Identificou-se, ainda, minerais opacos, apatite e minerais de alteração. A plagioclase (juntamente com alguns cristais de feldspato alcalino) é predominante (35-70%), apresenta-se por vezes zonada e a sua composição é cerca de 58% moles de An. A piroxena (augite) ocorre em grandes cristais, englobando, por vezes, cristais de plagioclase exibindo uma textura poecilítica; mostra uma alteração muito fraca, exibindo decomposição incipiente nos bordos dos cristais e ao longo das clivagens com pequena penetração para o interior dos cristais.

Os feldspatos estão frescos, mas fissurados. As fissuras são mais desenvolvidas na vizinhança dos minerais ferromagnesianos alterados sendo frequentes as fracturas que atravessam cristais contíguos.

Entre os minerais ferromagnesianos, a olivina apresenta-se com estado de alteração mais avançado e por vezes mesmo completamente transformada nos seus produtos de alteração (iddingsite, serpentina, minerais opacos de óxidos de ferro). A biotite e hornblenda estão apenas ligeiramente alteradas.

As fracturas da rocha estão frequentemente preenchidas com produtos de alteração que consistem essencialmente em minerais argilosos. Por análise aos Raios X foram identificados minerais expansivos de tipo montmorilonítico.

A rocha foi classificada como um gabro e como gabro olivínico quando a olivina está presente.

As características físicas e mecânicas foram determinadas em laboratório e os resultados obtidos estão apresentados no Quadro I.

Estes valores mostram a excepcional qualidade da rocha. A sua compacidade extrema é salientada pela sua reduzidíssima porosidade ($<0,2\%$) e pela resistência à rotura extremamente elevada (>160 MPa). Estes resultados estão de acordo com as altas velocidades de propagação dos ultrassons determinadas, que estão muito próximas dos valores teóricos calculados com base nas velocidades individuais dos seus constituintes minerais (6550 m/s para o feldspato, 7200 m/s para o piroxena e 5130 m/s para a biotite) e nas percentagens de ocorrência destes

QUADRO I
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS

AMOSTRA	SD 1	SD 3	SD 4	SD 5	SD 6
Velocidade ultra-sónica, m/s	6560	6240	6130	6140	6120
Módulo de Young, MPa x 10 ³	103	88			
Resistência à compressão simples, MPa	160	183			
Coefficiente de Poisson	0,27	0,27			
Massa volúmica, Kg.m ⁻³	3060	2905	2900	2920	2900
Massa volúmica aparente, Kg.m ⁻³	3060	2900	2900	2920	2890
Porosidade, %	0,00	0,13	0,14	0,10	0,15
Permeabilidade, mdy	0,003	0,001	0,006	0,004	0,006
Los Angeles, %		9	11	11	11

minerais, demonstrando uma baixíssima fissuração do material. O valor do coeficiente de permeabilidade demonstra igualmente este facto.

Para além do conhecimento das características da rocha na pedreira pretendia-se igualmente prever o comportamento do material no enrocamento, no que diz respeito à sua alterabilidade, tendo em vista avaliar o comportamento dos blocos de rocha sob condições físicas e químicas muito severas como as que se verificam em estruturas marítimas.

Como foi dito anteriormente, apesar da presença de cristais de olivina alterados e de zonas alteradas nos cristais de piroxena, o aspecto global é de uma rocha sã. Contudo ocorrem na rocha fissuras preenchidas por minerais expansivos de natureza montmorilonítica.

Tendo em conta estes factos o principal objectivo desta parte do estudo era avaliar a influência dos minerais de natureza montmorilonítica na estabilidade dos blocos quando colocados em água.

Como não existem especificações para este tipo de estudos, adoptou-se uma metodologia própria com execução de diversos tipos de ensaios: ensaio de expansão por embebição conforme proposto por Nascimento, U. *et al.* 1968, o ensaio de alteração pelo sulfato de maganésio de acordo com a norma ASTM C88, o ensaio de ataque pela água oxigenada conforme proposto por

Struillou, R. 1969, e o ensaio de tratamento com etileno-glicol conforme proposto por Delgado Rodrigues, J. 1976.

No Quadro II apresentam-se os resultados obtidos.

QUADRO II
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ALTERABILIDADE

AMOSTRA		SD 3	SD 4	SD 5	SD 6
Perda no ensaio de MgSO ₄ , %		1,4	0,4	0,3	1,2
Perda no ataque com H ₂ O ₂	Ciclo 1.º		0,07	0,00	0,00
	2.º		0,02	0,07	0,10
	3.º		0,07	0,10	0,22
	4.º		0,22	0,22	0,20
	5.º		0,20	0,25	0,02
Expansibilidade $\frac{\Delta L}{L}$		0,0	0,0	0,0	0,0
Perda por desgaste (tratado com etileno-glicol), %			0,0		

Tendo em consideração a baixa porosidade e permeabilidade, a elevada resistência do material e os resultados do Quadro II, pode esperar-se que os minerais montmoriloníticos no interior da rocha não são suficientes para originar um mau comportamento do material. De facto isto é sugerido pelas características não expansivas da rocha, pela pequenissima perda no ataque pela água oxigenada e pela insensibilidade ao tratamento com etileno-glicol. Também o ensaio de alteração com o sulfato de magnésio, embora respondendo a diferente mecanismo de alteração, confirma a elevada durabilidade do material.

Por isso a rocha foi aceite para a construção do molhe tendo, contudo, sido recomendado um rigoroso controlo de qualidade efectuado periodicamente na frente da pedreira, tendo em vista garantir a homogeneidade do material a empregar.

Nos maiores blocos para a protecção do molhe foi ainda recomendada uma inspecção adicional para detecção de fracturas preenchidas com minerais argilosos porque a divisão destes blocos torna-los-ia subdimensionados e, portanto, inadequados para dissiparem a energia da vaga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Gabinete da Área de Sines a autorização para publicação dos resultados e à CONSULMAR (co-projectista do porto) pela colaboração prestada na obtenção dos elementos gráficos apresentados no trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C88 – Standard method of test for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate.
- BERTLIN; CONSULMAR; LUSOTECNA – Porto de Sines. Anteprojecto, vol. 5, Anexo II, Geotecnia Local. Lisboa, 1972.
- CANILHO, M. H. – “Estudo geológico-petrográfico do maciço eruptivo de Sines”. Bul. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências de Lisboa, vol. 12, Fasc. 2.º. Lisboa, 1972.
- DAMES and MOORE – “Marine site investigation, Breakwater and berthing facilities. Proposed Port of Sines, Portugal”. Report. Dezembro, 1974.
- DELGADO RODRIGUES, J. – “Estimation of the content of clay minerals and its significance in stone decay”. Proc. 2nd Int. Congress on the Deterioration of Building Stones” Athens. Setembro, 1976.
- LNEC – “Prospecção geofísica da pedreira para o Porto de Sines”, LNEC, relatório interno. Lisboa, 1972.
- LNEC – “Estudo da alteração e alterabilidade de materiais para o enrocamento do Porto de Sines”. LNEC, relatório interno. Lisboa, 1973.
- LNEC – “Carta Geotécnica da Área de Sines”. LNEC, relatório interno. Lisboa, 1974.
- NASCIMENTO, U. *et al.* – “Rock swelling test”. Int. Symp. on Rock Mechanics. Madrid, 1968.
- STRUILLLOU, R. – “Prévision de l'altérabilité des matériaux en fonction de leurs caractéristiques propres et de leurs utilisations”. Colloque de Géotechnique. Toulouse, Março, 1969.