

Contribuição de Manuel Rocha para a mecânica das rochas e as fundações de barragens

Contribution of Manuel Rocha to rock mechanics and dam foundations

Organização e Introdução
Organisation and Introduction

José Vieira de Lemos • Luís Lamas



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

José Vieira de Lemos

Licenciado em Engenharia Civil, Doutor em Engenharia Civil

Luís Lamas

Licenciado em Engenharia Civil, Doutor em Mecânica das Rochas

Departamento de Barragens de Betão

Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha – 1913-2013

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

Divisão de Divulgação Científica e Técnica

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-e: livraria@lnec.pt

www.lnec.pt

Editor: LNEC

Coleção: Obras Escolhidas

Série: OE 2

1ª edição: 2013

Tiragem: 150 exemplares

Descritores: Mecânica das rochas / Fundação de barragem / Fundação rochosa / Barragem de betão / Investigação científica e técnica / PT

Descriptors: Rock mechanics / Dam foundation / Rock foundation / Concrete dam / Scientific and technical research / PT

CDU 624.12.001.5(469)
624.12:627.82.001.5(469)

ISBN 978-972-49-2259-1

1.	Introdução	5
2.	Mecânica das rochas	8
2.1.	Deformabilidade	8
2.2.	Resistência ao corte	14
2.3.	Tensões <i>in situ</i>	16
2.4.	Estrutura do maciço rochoso	19
3.	Fundações de barragens.....	21
4.	Publicações de Manuel Rocha	30
5.	Publicações reproduzidas neste livro	37

1.	Introduction	5
2.	Rock mechanics	8
2.1.	Deformability.....	8
2.2.	Shear strength	14
2.3.	<i>In situ</i> stresses	16
2.4.	Rock mass structure	19
3.	Dam foundations	21
4.	Publications of Manuel Rocha	30
5.	Publications reproduced in this book.....	37

1. Introdução

O interesse de Manuel Rocha pelo estudo das barragens de betão e as suas fundações rochosas nasceu da necessidade de o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) intervir nos projetos das novas grandes barragens, que se iniciaram após o final da Segunda Guerra Mundial, em resultado da decisão do Governo português de incentivar a eletrificação do país. O LNEC, criado em 1946, tinha, naturalmente, entre os seus objetivos, apoiar o país nesta iniciativa. Manuel Rocha, um dos fundadores do LNEC e seu Diretor entre 1954 e 1974, definiu as estratégias de investigação e soube reunir os recursos humanos e financeiros que lhe permitiram atingir esses objetivos.

As atividades de investigação aplicada de Manuel Rocha foram sempre ditadas pela necessidade prática de resolver problemas. A publicação dos resultados das investigações, a sua divulgação ao meio técnico e a interação com organismos internacionais congéneres eram consideradas tarefas essenciais. Manuel Rocha teve uma intensa atividade internacional desde o início da sua carreira, como fundador da RILEM¹ em 1947, como membro ativo da ICOLD², ou como Presidente da ISRM³ e organizador do seu primeiro congresso em Lisboa, em 1966. A nível nacional, foi fundador da Sociedade Portuguesa de Geotecnia e Presidente da Ordem dos Engenheiros.

As atividades letivas de Manuel Rocha estiveram intimamente relacionadas com a investigação. Em 1970 iniciou a disciplina de Mecânica das Rochas no Instituto Superior Técnico, em Lisboa, e em 1976 foi pioneiro no ensino da disciplina de Estruturas Subterrâneas na Universidade Nova de Lisboa, em ambos os casos refletindo a experiência adquirida no LNEC nestas matérias. Para ambos os cursos escreveu textos de apoio que vieram a dar lugar aos seus livros mais divulgados: *Mecânica das Rochas e Estruturas Subterrâneas*.

A atividade científica de Manuel Rocha apresenta uma diversidade notável e abrange uma larga gama de assuntos

1. Introduction

The interest of Manuel Rocha in concrete dams and their rock foundations is a direct consequence of the need to intervene in the projects of new large dams that resulted from the governmental decision to improve Portugal's electrification scheme after the end of the Second World War. The National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) was formally created in 1946, and supporting the country in this field was considered one of its main missions. Being one of founders of LNEC founders and his Director from 1954 to 1974, Manuel Rocha was able to pursue this objective by defining the right research strategies and engaging the right people and financial resources.

Therefore, Manuel Rocha's applied research activities were always dictated by a practical need to solve problems. Publishing the research results and making them available to the technical community were considered essential, as was also the interaction with other international organisations working in the same fields. From the beginning Manuel Rocha had an intense international activity, as founder of the RILEM¹ in 1947, as an active member of ICOLD², or as President of the ISRM³ and organiser of its first congress in Lisbon in 1966. At a national level he was the founder of the Portuguese Geotechnical Society and President of the Institute of Engineers.

Manuel Rocha's teaching activities must also be noted, since they are closely linked with his research. In 1970 he started teaching the new subject of Rock Mechanics at the Technical University of Lisbon and in 1976 he pioneered the teaching of Underground Structures at the New University of Lisbon. The subjects of these two courses reflected his experience gained at LNEC and for teaching them he wrote several chapters of what were to become his most well-known text books: *Rock Mechanics and Underground Structures*.

1 RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

2 ICOLD – International Commission on Large Dams

3 ISRM – International Society for Rock Mechanics

de engenharia estrutural e geotécnica. A compreensão do comportamento dos materiais, naturais ou artificiais, é um aspeto central das suas investigações. No entanto, o avanço do conhecimento científico é sempre visto na perspetiva do engenheiro, como um meio para melhorar a capacidade de projetar e construir novas estruturas, obedecendo a rigorosos requisitos de segurança e economia. O enfoque na atividade experimental é transversal a toda a sua obra, o que fica claro da leitura das suas publicações. Inclui, naturalmente, ensaios laboratoriais e de campo, que fornecem informação sobre o comportamento dos materiais estruturais e dos maciços rochosos sob diversos tipos de carregamentos. No entanto, uma componente essencial do seu trabalho experimental corresponde ao ensaio de modelos físicos de estruturas e das suas fundações, em laboratório, em modelo reduzido, por forma a obter os aspetos essenciais da sua resposta mecânica e a prever o seu desempenho. A opção pelo método experimental foi uma consequência das limitações existentes na utilização das técnicas analíticas, mas quando os modelos matemáticos se tornaram disponíveis, no final dos anos 60, Manuel Rocha deu um forte apoio ao seu desenvolvimento, prevendo claramente o seu efetivo potencial.

A presente publicação debruça-se sobre as principais contribuições de Manuel Rocha para a mecânica das rochas e as fundações de barragens. No entanto, os interesses da sua investigação e o seu trabalho inovador transvasam em muito estas áreas. No início da sua carreira, a sua atividade desenvolveu-se no domínio da engenharia estrutural, que continuou a marcar toda a sua vida, com particular ênfase nos métodos experimentais para estudo do comportamento estrutural, quer recorrendo a ensaios laboratoriais em modelos reduzidos, quer a resultados da observação de estruturas reais. O estudo de barragens em arco de betão foi o seu tema de eleição, que abordou de forma integrada, considerando todos os aspetos do projeto e da análise do comportamento, prestando particular atenção à interação entre a estrutura e a fundação rochosa. Os seus interesses abrangeram também diversas aplicações geotécnicas, incluindo problemas de mecânica dos solos e de estruturas subterrâneas em maciços rochosos. Finalmente, as suas contribuições para o ensino e a organização da investigação em Engenharia Civil devem também ser salientadas.

Para este livro, preparou-se uma lista completa das publicações de Manuel Rocha, que incluem os seus dois

The scientific activity of Manuel Rocha, presents a remarkable diversity, encompassing a wide range of structural and geotechnical subjects. The understanding of the behaviour of engineering materials, natural or man-made, is a central theme in his research. The advancement of scientific knowledge, however, is always viewed from an engineer's perspective, as a means to improve our ability to design and build new structures, subject to strict demands of safety and economy. The focus on experimental activity pervades all his work, as the reading of his publications makes clear. It naturally includes laboratory and *in situ* testing, to provide information on the behaviour or structural materials and rock masses under a variety of loading conditions. A major component of his experimental work, however, involves the testing of physical models, *i.e.* scale models, of structures and their foundations in the laboratory, in order to grasp the essential aspects of their mechanical response and to predict their performance. The choice of the experimental method was a consequence of the limitations of the analytical techniques available at the time, but when mathematical models became available in the late 60s, Manuel Rocha strongly supported their development, clearly foreseeing their real potential.

The present publication is focused on the main contributions made by Manuel Rocha to rock mechanics and dam foundations. However, his research interests and innovative work extend much beyond these areas. His early work was pursued within the field of structural engineering, which continued to draw his attention throughout his career, with particular emphasis on the experimental methods of investigating structural behaviour, whether by means of laboratory tests on scale models or the monitoring of the constructions. Concrete arch dams were his theme of election, which he studied in an integrated manner, considering all aspects of design and behaviour analysis, with particular attention paid to the interplay of structure and rock foundation. His interests and activity also extended to a variety of geotechnical applications, including soil mechanics problems and underground structures in rock masses. Finally his insightful contributions on the teaching and on the organisation of research in Civil Engineering should also be remarked.

principais livros técnicos, capítulos de livros, artigos em revistas técnicas, comunicações apresentadas a seminários nacionais e internacionais, relatos gerais e conferências. A sua maioria foi também publicada como Memórias do LNEC. Após uma análise detalhada das suas publicações mais relevantes, decidiu-se selecionar as oito que se reproduzem neste livro como as que poderão dar uma melhor visão da atividade científica e técnica de Manuel Rocha nos domínios da mecânica das rochas e das fundações de barragens.

For this book a complete list Manuel Rocha's publications was prepared. They include his two main text books mentioned above, chapters of books, papers in peer-reviewed journals, papers presented at international and national conferences, general reports and lectures. The vast majority was also published as LNEC's Technical Papers. After a careful analysis of his most relevant publications, the eight that are reproduced in this book were selected as those that can best give a global picture of Manuel Rocha's scientific activity in the fields of rock mechanics and dam foundations.



Barragem de Venda Nova. Venda Nova dam.

2. Mecânica das rochas

2.1. Deformabilidade

A relevância dada por Manuel Rocha à disciplina de mecânica das rochas deve-se aos estudos que iniciou no final da década de 40, relativos ao comportamento estrutural de barragens em arco de betão. O reconhecimento da influência da deformabilidade da fundação rochosa nas tensões no corpo da barragem levou a que os seus primeiros estudos se concentrassem, primordialmente, neste aspeto. A comunicação “Deformabilidade de rochas de fundação” apresentada por Manuel Rocha, Laginha Serafim, António da Silveira e Ressurreição Neto [21] ao 5.º Congresso da ICOLD em Paris, em 1955, apresenta em detalhe os principais problemas a considerar, nomeadamente a relação entre os módulos de elasticidade do maciço rochoso e do betão e a heterogeneidade da fundação. A obtenção de valores corretos para o módulo de elasticidade da fundação constituía um desafio que enfrentava grandes dificuldades. O reconhecimento de que os valores comumente obtidos em ensaios laboratoriais de amostras de rocha não podiam ser considerados representativos da deformabilidade da fundação, devido à influência das descontinuidades e da alteração da rocha, levou ao desenvolvimento de métodos de ensaio de campo, que começaram a ser utilizados em todos os estudos de locais de implantação de grandes barragens.

Os ensaios de campo devem envolver grandes volumes de maciço rochoso, representando o comportamento global do maciço, e aplicar carregamentos semelhantes aos impostos pela barragem, às profundidades em jogo. Os ensaios de pressão hidrostática em galerias circulares foram primeiramente utilizados para as barragens de Castelo do Bode e de Salamonde e para o túnel de adução do Biópio, em Angola. A secção carregada da galeria era isolada por intermédio de rolhões de betão e era instrumentada com extensómetros de corda vibrante, montados em barras de invar, por forma a medir os deslocamentos segundo três diâmetros. Para obter o módulo de elasticidade, as pressões hidrostáticas eram aplicadas em ciclos de carga e descarga até valores

2. Rock mechanics

2.1. Deformability

The relevance of rock mechanics in Manuel Rocha’s work originated from the studies that he started at the LNEC in the late 40s, concerning the structural behaviour of concrete arch dams. Very early he recognised the influence of the foundation rock deformability on the stresses in the dam’s body, reason why his first rock mechanics studies were mainly concerned with this issue. The paper “Deformability of foundation rocks” presented to the 5th ICOLD Congress, in Paris, in 1955, by Manuel Rocha, Laginha Serafim, António da Silveira and Ressurreição Neto [21], details the main problems that needed to be addressed, namely the influence of the rock mass to concrete modulus of elasticity ratio and of the foundation heterogeneity. Obtaining meaningful values for the foundation modulus of elasticity constituted a challenge that faced major difficulties. The values commonly obtained from laboratory tests on rock samples could not be considered representative of the foundation deformability, owing to the influence of the discontinuities and of weathering. Therefore, development of *in situ* tests became a necessity and they started being used in all studies of large dams sites.

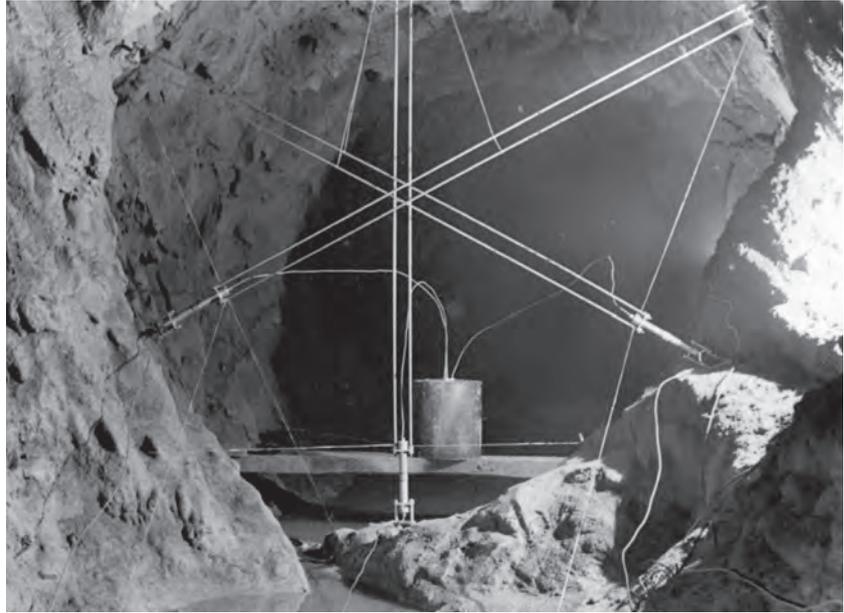
In situ tests should be able to involve large volumes of rock mass, thus representing the overall rock mass behaviour, and to apply loads similar to those imposed by the dam at the depths of interest. Water loading tests in circular galleries were first carried out for the Castelo do Bode and Salamonde dams and for the Biópio pressure tunnel in Angola. The loaded section of the gallery was closed with concrete plugs and was instrumented with vibrating wire strain gauges mounted on invar rods to measure the displacements along three diameters. Water pressures up to a maximum of 0.6 MPa were applied in cycles to obtain the modulus of elasticity. Water loading tests in galleries continued to be applied in other sites, but

máximos de 0,6 MPa. Estes ensaios de pressão hidrostática em galerias continuaram a ser aplicados em outros locais, mas vieram a revelar-se particularmente úteis para o estudo de revestimentos de túneis sob pressão interna.

Para as barragens de Salamonde, Cabril e Caniçada foram utilizados pela primeira vez os ensaios de carga na superfície. Eram ensaios mais rápidos e económicos do que os ensaios de pressão hidrostática e permitiam a aplicação de pressões uniformes mais elevadas, até 3 MPa, numa área de 1 m², utilizando macacos planos preenchidos por óleo, especialmente desenvolvidos para o efeito. A direção do carregamento podia ser escolhida por forma a coincidir com a direção dos impulsos da barragem.

Com os ensaios realizados no início da década de 50, foi possível desenvolver um conhecimento circunstanciado, relativamente aos principais fatores que influenciam a deformabilidade dos maciços rochosos, nomeadamente a alteração da rocha, as descontinuidades, a direção de aplicação das forças e o comportamento irreversível durante os ciclos de carga e de descarga. Para estudo do efeito das injeções eram, ainda, realizados ensaios antes e depois de injetar o maciço rochoso na zona de ensaio. Foi possível concluir que, em todos os locais que foram estudados, o módulo de elasticidade da fundação era muito inferior ao do betão, mesmo após as injeções, e que, num mesmo local, o módulo de elasticidade do maciço podia apresentar grandes variações, mesmo em formações rochosas com o mesmo aspeto e composição petrográfica semelhante.

No 8.º Congresso da ICOLD em Edimburgo, em 1964, Rocha [53] apresentou a comunicação “Comportamento mecânico de fundações rochosas de barragens de betão” com as conclusões dos estudos, que entretanto tinha realizado utilizando ensaios de carga em superfície, numa altura em que este método se tinha tornado um ensaio de rotina, com mais de 500 ensaios realizados nos locais de 23 barragens, numa grande diversidade de formações rochosas. Nesta comunicação é discutido o número de ensaios a realizar, a influência das tensões iniciais e da



Ensaio de pressão hidrostática no local da barragem de Castelo do Bode. Water loading test at the Castelo do Bode dam foundation.

revealed to be particularly suited for the study of the linings of pressure tunnels.

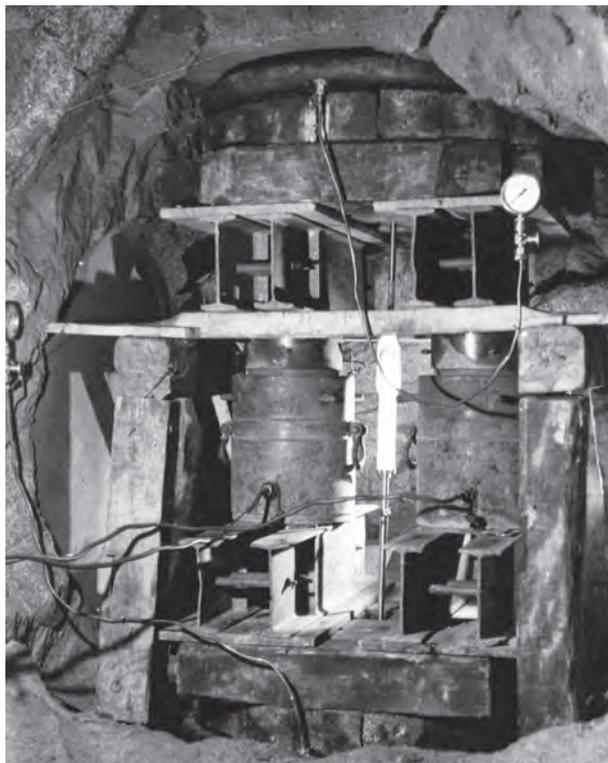
Jack loading tests in galleries were first used for the Salamonde, Cabril and Caniçada dams. This technique was quicker and cheaper than water loading tests, and allowed application of higher loads through specially designed metallic cushions filled with oil, that were able to apply a uniform pressure up to 3 MPa, in an area of 1 m². The loading direction could be chosen to coincide with the direction of the dam thrusts.

With these tests, done in the early 50s, a significant knowledge was built regarding the main factors that influence the deformability of the foundation rock masses, namely the rock weathering, the rock joints, the loading direction and the irreversible behaviour during loading and unloading cycles. The effect of grouting was studied by testing before and after grouting the rock mass around the test area. It was found out that in all the sites the foundation modulus of elasticity was much lower than that of the concrete, even after grouting, and that the modulus of elasticity of the rock mass, in the same site, can vary within a wide range, even in rock formations with the same aspect and petrographic composition.

Additional conclusions from the results of jack loading tests are presented in Rocha's paper “Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams” to

direção de aplicação das forças, o comportamento diferido no tempo, bem como a consideração e o significado dos valores do módulo de elasticidade obtidos durante as fases de carga e de descarga.

O interesse em caracterizar a deformabilidade dos maciços rochosos, em zonas afastadas da superfície das galerias, conduziu ao desenvolvimento no LNEC de um novo equipamento de ensaio, o dilatómetro, que permitia a determinação da deformabilidade ao longo de furos de sondagem, até profundidades de 100 m e abaixo do nível freático. Este ensaio foi apresentado



Ensaio de carga na superfície. Jack loading test.

numa comunicação ao 1.º Congresso da ISRM em Lisboa, em 1966, por Manuel Rocha, António da Silveira, Nuno Grossmann e Emídio de Oliveira [60]. O dilatómetro é, basicamente, um cilindro oco com um diâmetro de 74 mm e um comprimento de 540 mm, com uma camisa de borracha que pode ser insuflada por água sob pressão, a qual pode atingir os 15 MPa. Os deslocamentos das paredes do furo de sondagem são medidos em quatro direções, fazendo ângulos de 45° entre si, o que permite estudar a anisotropia. A principal desvantagem deste novo ensaio, que se deve ao pequeno volume de maciço que solicita, era compensada pelo facto de ele ser muito mais económico e rápido do que os outros ensaios de campo, podendo por isso ser realizado em grande número, ao longo de vários furos de sondagem, permitindo assim uma determinação em contínuo da deformabilidade e uma análise estatística dos resultados. A mesma comunicação discute, ainda, em detalhe, a influência das fissuras radiais que se podem desenvolver devido à pressão aplicada.

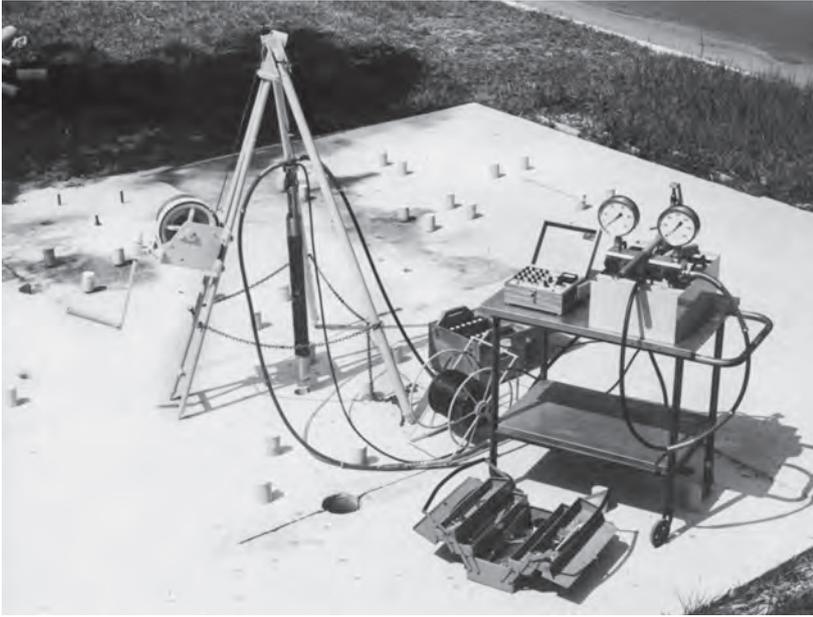
Em 1970, em Belgrado, Rocha e outros apresentaram uma comunicação ao 2.º Congresso da ISRM [78], com os resultados de um grande número de ensaios com dilatómetro realizados para várias barragens e túneis, em que analisam a anisotropia da deformabilidade e a variação da deformabilidade em profundidade, e efetuam análises

the 8th ICOLD Congress in Edinburgh, in 1964 [53]. By that time this was a well-established technique and more than 500 tests had been performed in 23 dam sites with a variety of rock formations. The paper discusses the number of tests to be performed, the influence of the initial stress and loading direction, the time dependent behaviour, as well as the consideration and significance of the modulus of elasticity values during loading and unloading.

The interest to characterise rock mass deformability away from the surface or from galleries originated the development, at LNEC, of a new testing device, the

borehole dilatometer, which was able to determine the deformability along boreholes, down to depths of 100 m and under water. Description of this new test was presented in a paper to the 1st Congress of the ISRM in Lisbon, in 1966, by Manuel Rocha, António da Silveira, Nuno Grossmann and Emídio de Oliveira [60]. The dilatometer is basically a 74 mm diameter, 540 mm long, hollow cylinder, with rubber walls that can be inflated by water under pressures up to 15 MPa. Borehole wall displacements are measured in four directions at angles of 45°, thus allowing the study of anisotropy. The main disadvantage of this new test, which has to do with the small rock mass volume involved, was compensated by the fact that it was much cheaper and quicker than the other existent *in situ* tests, and therefore could be performed in large numbers along several boreholes, for a continuous determination of the deformability and a statistical analysis of the results. In the same paper, the influence of the radial fissures that may be generated due to the applied pressure is thoroughly discussed.

In 1970, in Belgrade, Rocha and others presented a paper to the 2nd Congress of the ISRM [78] with the results of many dilatometer tests performed for several dam and tunnel sites, where they analyse the



Ensaio dilatométrico. Borehole dilatometer test.



estatísticas dos resultados. Concluem que “os ensaios com dilatômetro permitem a obtenção de um índice de qualidade para os maciços rochosos, que é de especial relevância para a caracterização da sua deformabilidade”. Este método, que veio a sofrer diversas atualizações ao longo do tempo, ficou conhecido como “*Borehole Dilatometer Test*” (BHD), ou ensaio dilatométrico, e tem sido utilizado continuamente em milhares de ensaios.

Na comunicação “Mecânica das rochas em Portugal” apresentada ao 1.º Congresso da ISRM em Lisboa, em 1966 [58], Rocha introduziu um novo método de ensaio, que estava a ser desenvolvido por forma a obviar às principais dificuldades dos ensaios de carga na superfície: a perturbação do maciço devido à escavação e o volume relativamente pequeno de maciço rochoso envolvido. Este novo método consistia em abrir uma fenda no maciço, usando uma serra circular, e em inserir uma ou mais almofadas planas, com 1 m de largura e com transdutores de deslocamentos embebidos. As almofadas planas eram insufladas com óleo por forma a carregar o maciço rochoso perpendicularmente ao seu plano. Rocha publicou os primeiros resultados obtidos com este método no Simpósio Internacional de Mecânica das Rochas em Madrid, em 1968 [66], e em Belgrado, no 2.º Congresso da ISRM, em 1970, Manuel Rocha e Neves da Silva [74] apresentaram uma comunicação detalhada sobre este novo ensaio. O modelo interpretativo deste ensaio tinha uma dificuldade particular, relacionada com a necessidade de assumir que se formava uma fissura

deformability anisotropy and variation with depth, and perform statistical analyses of the results. They conclude that “dilatometer testing allows a quality index to be ascribed to the rock masses, which is of special significance for their characterization as to deformability”. This method, which was later upgraded, became known as the “Borehole Dilatometer Test” (BHD) and has been used continuously in thousands of tests.

In the paper “Rock mechanics in Portugal” presented to the 1st Congress of the ISRM in Lisbon, in 1966 [58], Rocha introduced a new testing method, that was being developed in order to face the main criticisms of the jack loading tests, *i.e.*, the rock mass disturbance due to excavation and the relatively small rock mass volume involved. This new method consisted in opening a slot in the rock mass, using a circular diamond saw, and inserting one or more 1 m wide flat jacks, instrumented with embedded displacement transducers. The flat jacks were inflated with oil in order to load the rock mass perpendicularly to it. Rocha presented the first results obtained with this method to the International Symposium on Rock Mechanics, in Madrid, in 1968 [66]. A detailed paper was presented to the 2nd Congress of the ISRM in Belgrade, in 1970, by Manuel Rocha and Neves da Silva [74]. This test had a particular difficulty in the interpretation of the results, which had to do with the necessity to assume that an infinite crack forms in the

infinita no plano das almofadas, de tal forma o ensaio pudesse ser analisado assumindo uma situação de um quarto de espaço. Uma vez que não existiam soluções analíticas para o efeito, foi utilizado um modelo físico em gesso para derivar os parâmetros a utilizar nas expressões analíticas que relacionam o módulo de elasticidade do maciço rochoso com os deslocamentos medidos e as pressões aplicadas.

As comunicações referidas acima [58 e 66] apresentam estudos interessantes sobre o efeito de escala, a partir de resultados de ensaios utilizando de uma até três almofadas complanares. No trabalho de 1970 [74], os autores concluem que os ensaios com almofadas planas representam um avanço considerável relativamente aos métodos existentes para caracterização da deformabilidade dos maciços rochosos, tanto mais se utilizados em combinação com ensaios dilatométricos. Em resultado disso, vieram gradualmente a substituir os ensaios de carga em superfície. O equipamento foi posteriormente atualizado e o modelo interpretativo sofreu diversas evoluções. Este método ficou conhecido como ensaio “*Large Flat Jack*” (LFJ) ou “ensaio de almofadas planas de grande área” e tem sido utilizado,



plane of the jacks, so that the situation on site can be simulated by a quarter-space. Since no analytical solution was available, a physical model made of plaster was used to derive the parameters to use in the analytical expressions relating the rock mass modulus of elasticity with the measured displacements and the applied pressures.

The papers mentioned above [58 and 66] present interesting studies of the scale effect, by increasing the loaded area from one up to three co-planar flat jacks. In the paper of 1970 [74], the authors conclude that the flat jack tests represent a considerable advance with respect to the existing methods to characterize the deformability of rock masses, the more so if combined with dilatometer tests. As a result, they gradually completely replaced the jack loading tests. The equipment was later upgraded and the interpretation model was refined. This method became known as the “*Large Flat Jack*” (LFJ) test and has been used to the present in hundreds of tests in dam foundations and some underground works.

In the paper “*Present possibilities of studying foundations of concrete dams*” [86] delivered to the 3rd Congress of the ISRM in Denver, in 1974, Rocha elaborates on the strategy to be followed for characterising the deformability of a rock foundation.



Ensaio de almofadas planas de grande área. *Large flat jack test*.

até ao presente, em centenas de ensaios em fundações de barragens e em alguns casos de obras subterrâneas.

Na comunicação “Possibilidades atuais de estudar fundações de barragens de betão” apresentada ao 3.º Congresso da ISRM em Denver, em 1974 [86], Rocha efetuou considerações sobre a estratégia a seguir para caracterização da deformabilidade de fundações rochosas. Os ensaios dilatométricos são considerados essenciais para uma primeira avaliação e um subsequente zonamento do maciço rochoso, e devem ser mais frequentes nas formações rochosas de pior qualidade e mais heterogêneas. Apenas após o zonamento do maciço deverá ser considerada a realização de ensaios de almofadas planas e escolhida a sua localização.

Para estudo da deformabilidade dos maciços eram também realizados sistematicamente ensaios laboratoriais, devendo salientar-se o estudo da fluência e da influência da humidade. O trabalho “Anisotropia dos granitos” apresentado por Peres Rodrigues ao 1.º Congresso da ISRM em Lisboa, em 1966, representa um importante contributo para o estudo da anisotropia.

A possibilidade de estabelecer índices de qualidade, que em resultado da realização de um ensaio rápido e económico pudessem caracterizar as propriedades de um maciço rochoso, nomeadamente a deformabilidade e a resistência, era considerada de grande interesse por Manuel Rocha, tendo os mais utilizados sido a absorção de água e o índice petrográfico, baseado na análise de secções delgadas de rocha [58].

Dilatometer tests are considered invaluable for a first assessment and a subsequent zoning of the rock mass, and should be more frequent in the more deformable and more heterogeneous formations. Only after zoning the rock mass should flat jack tests be considered and its location chosen.

Laboratory tests were also systematically carried out for rock mass deformability studies, with relevance to the study of creep and the influence of humidity. The paper “Anisotropy of granites” by Peres Rodrigues presented to the 1st Congress of the ISRM, in Lisbon, in 1966, represents an important contribution to the study of anisotropy.

Another issue that interested Manuel Rocha was the possibility to establish quality indices which, by means of a quick and economical test, can characterize the properties of a rock mass, namely deformability and strength. Water absorption and the micropetrographic index, based on analysis of thin sections of rock, were indices used in several dam sites [58].

2.2. Resistência ao corte

A questão da rotura das fundações e a necessidade de caracterizar a resistência ao corte das rochas mediante ensaios de campo foi tratada na comunicação de Manuel Rocha ao 8.º Congresso de ICOLD, em 1964 [53]. Estes ensaios eram realizados em blocos de rocha saturados, preparados no local, geralmente em galerias, tendo a superfície de rotura uma área de $70 \times 70 \text{ cm}^2$. O ensaio era realizado por aplicação, em primeiro lugar, de uma força normal à superfície de rotura, após o que se realizava a aplicação da força de corte. Quatro ensaios, em quatro blocos diferentes, realizados sob diferentes forças normais, eram necessários para obter a envolvente de rotura. À data da apresentação daquela comunicação, mais de 200 ensaios deste tipo tinham sido realizados para o estudo de fundações de barragens em diferentes tipos de rocha e, no caso de rochas xistosas, em diferentes direções. É de referir o extenso programa de ensaios realizado para estudo do maciço granítico de fundação da barragem do Alto Rabagão, justificado pela alteração da rocha e pela sua variação ao longo da fundação.

Da experiência obtida com estes ensaios, concluiu-se que os ângulos de atrito da maior parte das rochas são geralmente superiores a 50° , ou mesmo a 55° , e diminuem lentamente com o grau de alteração. Os valores da coesão são baixos, geralmente inferiores a 1 MPa. Ensaios realizados em superfícies rugosas de ligação rocha-betão mostraram que a rotura ocorria sempre pela rocha. Em trabalhos posteriores [58 e 86] foram confirmadas estas conclusões e foram apresentados estudos sobre a forma como a distribuição de tensões na superfície de



Ensaio de corte de rocha e preparação de um conjunto de quatro ensaios. Rock shear strength test and setup for a set of four tests.

2.2. Shear strength

Rocha's paper to the 8th ICOLD Congress, in 1964 [53], addresses the issue of the failure of foundations and the need to characterize the rock mass shear strength by *in situ* tests. These tests were done in saturated rock blocks prepared on site, usually inside galleries, and the failure surface had a square section of $70 \times 70 \text{ cm}^2$. A force normal to the failure surface was first applied, and afterwards it was sheared to failure. Four tests in four different blocks, with different normal forces, were required to obtain the failure envelope. At the time of writing that paper, more than 200 such tests had been carried out for the study of dam foundations in different rock types and in different directions in the case of schist. A particularly extensive testing programme was carried out for the granite rock mass of the foundation of the Alto Rabagão dam, in view of the weathering of the rock and of its variation along the foundation.

From the experience gained with these tests, it was concluded that friction angles usually exceed 50° , or even 55° , in most rock types, and decrease slowly with the weathering degree. Values of cohesion are small, usually under 1 MPa. Concrete-rock bond tests performed on rough surfaces showed that failure always occurred through the rock. Later papers [58 and 86] corroborated these main conclusions and presented studies regarding the influence of the distribution of stresses on the failure surface on



rotura influencia os resultados do ensaio. No trabalho apresentado em Denver em 1974 [86], Rocha discutiu a questão da dimensão das amostras, concluindo que a resistência ao corte de rochas homogêneas pode ser avaliada mediante ensaios laboratoriais, em amostras de $20 \times 20 \text{ cm}^2$, e apresentou o equipamento de ensaios desenvolvido no LNEC para o efeito. No entanto, os ensaios de campo de resistência ao corte eram ainda considerados necessários no caso de rochas com marcada heterogeneidade devida a fissuração ou a alteração, ou de rochas do tipo de brechas ou conglomerados, ou, ainda, em zonas de falha.

Os ensaios de resistência ao corte de superfícies de descontinuidade iniciaram-se, no LNEC, no início dos anos 60, principalmente em planos de xistosidade ou em interfaces entre estratos. Os valores do ângulo de atrito obtidos nos ensaios laboratoriais revelaram-se ligeiramente inferiores aos obtidos em ensaios de campo, mas não mais do que 3° [86].

Na comunicação “Alguns problemas relativos à mecânica das rochas dos materiais de baixa resistência” apresentada ao V Congresso Pan-Americano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações em Buenos Aires, em 1975 [89], Manuel Rocha define o que entende por rocha de baixa resistência e apresenta uma síntese sobre o comportamento das rochas e dos maciços rochosos por elas constituídos, no que respeita à deformabilidade e à resistência. Assuntos de especial interesse abordados nesta comunicação são a caracterização e o comportamento mecânico de superfícies contínuas de baixa resistência, uma vez que o deslizamento ao longo de estruturas deste tipo tem sido responsável pela maior parte dos acidentes em fundações de barragens, taludes e estruturas subterrâneas. O acidente ocorrido pouco tempo antes na chaminé de equilíbrio de Cahora Bassa, onde um veio contínuo de lamprófiro de baixa resistência foi responsável por um importante acidente, é apresentado como um exemplo da importância deste tipo de estruturas. Rocha realça a necessidade de caracterizar corretamente a sua resistência ao corte e, em particular, a importância da ondulação, e dá exemplos de como considerar o seu efeito em conjunto com os valores da resistência ao corte obtidos em ensaios sobre amostras de pequena dimensão. Uma abordagem mais teórica deste assunto, bem como da importância da dilatação durante os ensaios de corte de superfícies de descontinuidade, é apresentada no livro *Mecânica das Rochas* de 1971 [80].

the test results. In the paper presented in Denver in 1974 [86], Rocha discusses the issue of the sample size and concludes that the shear strength of homogeneous rocks may be assessed by laboratory tests in $20 \times 20 \text{ cm}^2$ samples and presents the testing machine developed at the LNEC for the purpose. For rocks with marked heterogeneity in connection with fissures and weathering, or with large components such as breccia and conglomerate, or even in faulted zones, *in situ* shear tests were still required.

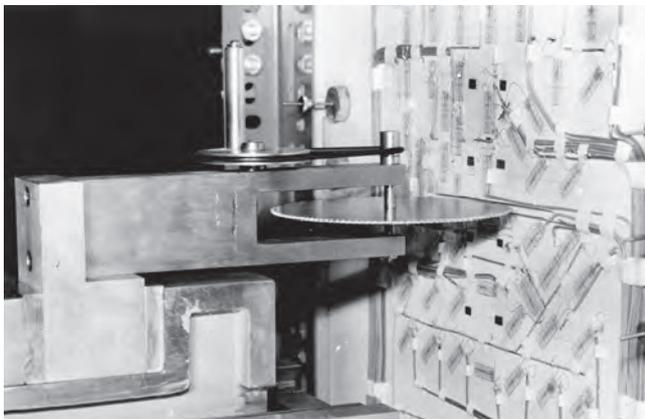
As for the shear strength of joints, joint shear tests started being performed in LNEC's laboratory in the late 60s, mainly on schistosity planes and on interfaces between strata. Laboratory values of the friction angle proved to be slightly lower than *in situ* values, but by no more than 3° [86].

In the paper “Some problems concerning rock mechanics of low strength materials” presented to the V Pan-American Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering in Buenos Aires, in 1975 [89], Manuel Rocha defines low strength rock and sums up the deformability and strength behaviour of low strength rocks and rock masses. An issue of particular interest addressed in this paper concerns the characterization and the mechanical behaviour of low strength continuous surfaces. Sliding along this type of structures has been responsible for most accidents in dam foundations, slopes and underground structures. The accident that had recently occurred in the Cahora Bassa surge chamber, where a continuous, low strength lamprophyre vein was responsible for an important failure, is presented as an example of the importance of such structures. Rocha elaborates on the necessity to correctly characterize its shear strength and, in particular, on the importance of undulation, and gives examples on how to consider it so as to combine its effect to the shear strength values obtained in tests of small samples. A more theoretical approach to this subject and to the importance of dilation during shear tests of joints is presented in the book *Rock Mechanics* of 1971 [80].

2.3. Tensões *in situ*

O reconhecimento da importância de medir as tensões *in situ* nos maciços rochosos, nomeadamente para o projeto de túneis e cavernas subterrâneas associados a alguns dos empreendimentos hidroelétricos construídos em Portugal, conduziu ao desenvolvimento pelo LNEC de dois métodos de ensaio. Foi projetado um equipamento para aplicação do bem conhecido método de compensação das tensões, com a característica original de utilizar uma serra circular para abrir o rasgo, onde almofadas planas delgadas eram instaladas, em vez do procedimento habitual de abrir o rasgo recorrendo a furos curtos, contíguos, e de preencher esse espaço com argamassa.

Este método de ensaio possibilita a determinação de uma componente do estado de tensão no hasteal de um túnel, na direção normal ao rasgo, pelo que o estado de tensão bidimensional no hasteal pode ser obtido realizando vários ensaios. Este método foi apresentado em primeiro lugar por Manuel Rocha, Batista Lopes e Neves da Silva numa comunicação ao 1.º Congresso da ISRM em Lisboa, em 1966 [59], e posteriormente no Simpósio de Madrid, em 1968 [66]. Na primeira foram apresentados todos os estudos realizados para validar os resultados dos ensaios, incluindo o ensaio em modelos físicos de gesso e de argamassa, onde todo o procedimento de ensaio foi reproduzido. Devido à pequena dimensão das almofadas planas, quando comparada com a das “almofadas planas de grande área”, este ensaio veio a ficar conhecido como ensaio “*Small Flat Jack*” (SFJ) ou “ensaio de almofadas planas de pequena área”. Foi reconhecido como um ensaio fiável e tem sido utilizado abundantemente ao longo dos anos.



Ensaio de almofadas planas de pequena área e modelo laboratorial.
Small flat jack tests and laboratory model.

2.3. *In situ* stresses

Recognition of the importance of measuring the *in situ* stresses in rock masses, mainly for the design of tunnels and underground caverns, such as those of the hydraulic conduits associated with some of the hydroelectric schemes constructed in Portugal, led to the development of two testing methods at the LNEC. An equipment for application of the well-known stress compensation method was designed with the original feature of using a circular diamond saw to cut the slot, where reusable thin flat jacks were installed, instead of the usual procedure of opening the slot with short contiguous boreholes and filling the resulting space with mortar.

With this method one component of the state of stress on a tunnel wall, normal to the slot, could be determined, and by making several tests with different orientations, the two-dimensional state of stress on the wall was obtained. This method was first presented in a paper by Manuel Rocha, Batista Lopes and Neves da Silva to the 1st ISRM Congress in Lisbon in 1966 [59], and later in the paper to the Madrid Symposium in 1968 [66]. In the earlier paper all the studies done to validate the test results are presented, including the testing of physical models made of plaster and of concrete, in a loading frame, where the whole testing



As limitações do ensaio de almofadas planas de pequena área, quando é necessário determinar o estado de tensão no interior de um maciço rochoso, são óbvias. Este ensaio mede apenas uma componente do estado de tensão, numa zona de concentração de tensões em redor de um túnel, onde a perturbação introduzida pelo processo de escavação pode afetar os resultados. Por esse motivo, foi desenvolvido no LNEC um novo equipamento para determinação do estado de tensão completo num furo de sondagem, usando o princípio da libertação do estado de tensão por sobre-carotagem. Neste método, um cilindro maciço de plástico, com nove extensómetros embecidos, é colado às paredes de um furo de sondagem com diâmetro de 37 mm, e subsequentemente o estado de tensão é libertado em resultado da execução de um furo de sondagem concêntrico com o anterior e de maior diâmetro. Se se conhecerem as constantes elásticas da rocha, as variações das extensões medidas podem ser convertidas no estado de tensão completo, usando um modelo interpretativo apropriado. Este método foi primeiramente apresentado por Manuel Rocha ao 1.º Congresso da ISRM em Lisboa, em 1966 [58]. No mesmo Congresso, Leeman e Hayes apresentaram a comunicação “Uma técnica para determinação do estado de tensão completo utilizando um único furo de sondagem”. Estes foram os dois primeiros equipamentos para determinação do estado de tensão tridimensional utilizando o que ficou conhecido como o método da sobre-carotagem.

Os sucessivos desenvolvimentos do método de sobre-carotagem do LNEC foram apresentados na comunicação já referida ao Simpósio de Madrid, em 1968 [66], e especialmente num artigo publicado por Manuel Rocha e Arnaldo Silvério na revista “Géotechnique” [71], onde os autores descrevem em detalhe o complexo procedimento para derivação das soluções analíticas que foram utilizadas para converter as nove extensões medidas nas seis componentes do estado de tensão. Foram realizados ensaios laboratoriais, em prismas de rocha de grande diâmetro, para confirmar a adequação do

sequence was reproduced. Due to the comparatively small size of the jacks, when compared with the “Large Flat Jacks”, this test became known as the “Small Flat Jack” (SFJ) test. It proved to be a reliable test and has been used extensively throughout the years.

The limitations of the small flat jack method, when the complete state of stress inside a rock mass needs to be determined, are obvious. It measures only one stress component in a zone of stress concentration around a tunnel, and the disturbance of the tunnel walls due to excavation may affect the results. That is why a new equipment for determination of the complete state of stress inside a borehole, using the principle of stress release by overcoring, was developed at the LNEC. In this method, a solid plastic cylinder with 9 embedded strain gauges is glued to the walls of a 37 mm diameter borehole, and subsequently the stresses are released by drilling a concentric, large diameter borehole. Once the elastic constants of the rock were known, the measured strain changes could be converted into the complete stress state, using an appropriate interpretation model. The method was first presented by Manuel Rocha in the paper to the 1st ISRM Congress in Lisbon, in 1966 [58]. In the same Congress, Leeman and Hayes presented their paper “A technique for determining the complete state of stress using a single borehole”. These were the two first equipments for determination of the three-dimensional state of stress using what became known as the overcoring method.

The successive developments of LNEC’s overcoring method were presented in the paper to the Madrid Symposium of 1968 [66] mentioned above and especially in an article by Manuel Rocha and Arnaldo Silvério published in the journal “Géotechnique” [71], where the authors describe in detail the complex derivation of the analytical solutions that were used in order to convert the nine measured strains into the desired six stress components. Tests in large size prisms of rock were carried out in the laboratory in order to



Defórmetro tridimensional. Stress tensor gauge.



procedimento de ensaio, nomeadamente a ligação entre a rocha e o cilindro de plástico, e também para confirmar que as extensões medidas, sob um estado de tensão conhecido, correspondiam às calculadas analiticamente.

O cilindro de plástico do LNEC sofreu uma importante alteração no início dos anos 70. O cilindro maciço foi substituído por um cilindro oco, com o mesmo diâmetro exterior e uma parede de 2 mm onde os extensómetros são embudidos a meia espessura. Foi, desta forma, consideravelmente reduzida a rigidez do cilindro, o que aumentou o sucesso da ligação entre o plástico e a rocha. Este novo desenvolvimento foi apresentado numa comunicação de Manuel Rocha, Arnaldo Silvério, Oliveira Pedro e Sintra Delgado ao 3.º Congresso da ISRM em Denver, in 1974 [88]. Tornou-se necessário derivar novas expressões para expressar as extensões, nos locais onde estão instalados os extensómetros, em função das tensões a determinar, o que foi feito recorrendo a soluções analíticas e numéricas utilizando o método dos elementos finitos. Este equipamento veio posteriormente a ficar conhecido como “*Stress Tensor Tube*” (STT) ou “defómetro tridimensional”. Foi sujeito a desenvolvimentos contínuos e tem sido utilizado, até ao presente, num grande número de projetos.

confirm the adequacy of the whole test procedure, namely the bond of the rock and the plastic cylinder, and also to confirm that the strains measured under a known state of stress complied with those analytically predicted.

LNEC’s plastic cylinder suffered an important change in the early 70s. The solid cylinder was replaced by a hollow cylinder, with the same external diameter, and a 2 mm thick wall where the strain gauges embedded at mid-thickness. This considerably reduced the cylinder stiffness, thus increasing the success of the rock-plastic bonding. This new development was presented in a paper by Manuel Rocha, Arnaldo Silvério, Oliveira Pedro and Sintra Delgado to the 3rd Congress of the ISRM in Denver, in 1974 [88]. New equations had to be derived for expressing the strains in the locations of the strain gauges as a function of the stresses to be determined, and this was done with the help of analytical and also of numerical solutions using the finite element method. This device became later known as the “Stress Tensor Tube” (STT). It suffered continuous developments and has been extensively used in many projects to the present.

2.4. Estrutura do maciço rochoso

Para Manuel Rocha [86], a caracterização da estrutura de um maciço rochoso implicava definir os limites das zonas cujas propriedades de interesse para o problema em questão pudessem ser consideradas uniformes, as características petrográficas de cada zona e a compartimentação, especialmente as superfícies de descontinuidade e as falhas.

No que se refere às superfícies de descontinuidade, o trabalho sobre rochas de baixa resistência já mencionado [89] recorda que a maioria dos casos de rotura se deve à presença de superfícies de descontinuidade extensas e que a caracterização da dimensão das descontinuidades, a partir de observações no campo, não pode ser feita mediante um simples valor médio, mas sim estatisticamente, considerando funções de distribuição de probabilidades adequadas, para que a probabilidade de ocorrência de descontinuidades extensas possa ser avaliada.

Rocha considerava indispensável a amostragem do maciço rochoso por meio de furos de sondagem para obter dados sobre a natureza petrográfica das formações, as suas propriedades mecânicas e as descontinuidades. No entanto, entendia que os métodos de amostragem habituais eram precários, pois não permitiam obter a informação necessária sobre as zonas de baixa resistência ou fraturadas, que são as que condicionam o comportamento do maciço rochoso. Para obviar este problema, foi desenvolvido no LNEC um “método de amostragem integral” (*Integral sampling method-ISM*), que consiste essencialmente na obtenção de um testemunho do maciço rochoso, previamente reforçado com uma barra de aço, que garante a integridade de todo o material. Os testemunhos obtidos desta forma são orientados e incluem todas as descontinuidades e os seus materiais de preenchimento, o que é de grande interesse para análise da estrutura do maciço rochoso. Esta técnica foi apresentada por Manuel Rocha na revista “*Rock Mechanics*”, em 1971 [82], e diversos exemplos da sua aplicação a fundações de barragens foram apresentados em detalhe na comunicação de Manuel Rocha e Manuel Barroso ao Simpósio da ISRM em Nancy, em 1971 [85].

De posse do método da amostragem integral, Rocha podia obter muitos dos parâmetros da compartimentação que influenciam a permeabilidade dos maciços rochosos. Em 1977, Rocha e Franciss publicaram um artigo na

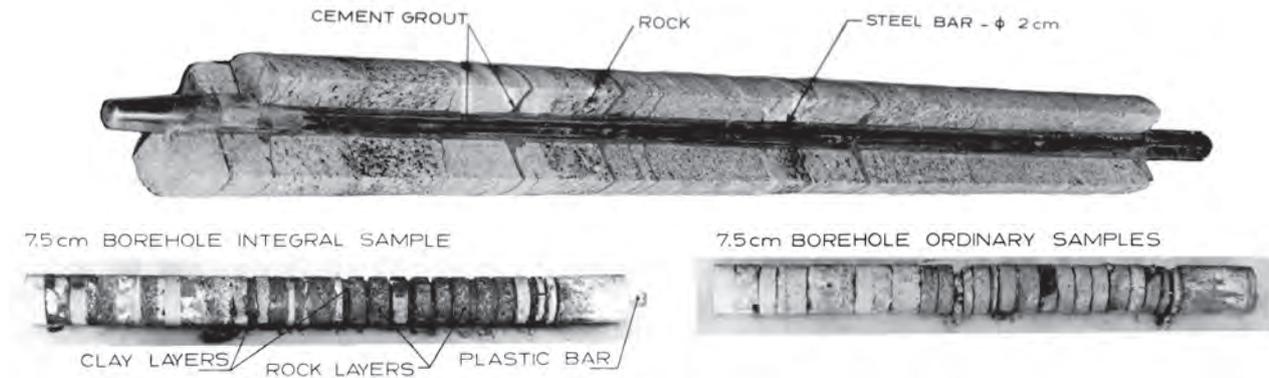
2.4. Rock mass structure

For Manuel Rocha [86], characterizing the structure of a rock mass implied defining the limits of the zones whose properties of interest for the problem to be solved may be considered uniform, the petrographic characteristics of each zone and the pattern of discontinuities, especially joints and faults.

As regards the characterization of joints, the paper on weak rocks mentioned above [89] reminds that most cases of failure are a consequence of the presence of large, continuous discontinuity surfaces and that characterization of the size of discontinuities from field observations cannot be done by a simple mean value, but statistically, considering adequate probability distribution functions, so that the probability of occurrence of large discontinuities may be assessed.

Rocha considers sampling the rock mass from boreholes as indispensable to obtain data on the petrographic nature of the formations, on their mechanical properties and on discontinuities. However, he recognises the usual sampling methods as precarious, because they do not allow obtaining the required information on the weak and fractured zones, which are the zones that condition the rock mass behaviour. In order to overcome this problem, an “Integral Sampling Method” (ISM) was developed, which essentially consists in obtaining a core sample from the rock mass previously reinforced with a steel bar, which secures the integrity of the whole material. The core samples so obtained are oriented and include all the discontinuities and their infilling materials, which is of great interest for the assessment of the rock mass structure. This technique was first presented by Manuel Rocha in the journal “*Rock Mechanics*” in 1971 [82], and several examples of its application to dam foundations were detailed in the paper by Manuel Rocha and Manuel Barroso to the 1971 Nancy Symposium of the ISRM [85].

Once having developed the Integral Sampling Method, Rocha could obtain many of the parameters on the pattern of discontinuities, which influence the rock mass permeability. In 1977, Rocha and Franciss presented a paper to the journal “*Rock Mechanics*” [92], where they introduce a methodology for obtaining the anisotropic permeability tensor of a rock mass from jointing data of integral samples. The



Testemunhos de amostragem integral. Integral sampling cores.

revista *"Rock Mechanics"* [92], em que introduzem uma metodologia para obter o tensor de permeabilidade anisotrópico de um maciço rochoso a partir dos dados sobre as descontinuidades obtidos em amostras integrais. O tensor de permeabilidade é calculado a partir da orientação e da abertura das descontinuidades e, caso estas estejam preenchidas, do coeficiente de permeabilidade do material de preenchimento, assumindo que as descontinuidades amostradas são contínuas e planas.

Os estudos estatísticos de dados obtidos de amostras integrais e a partir de outros métodos de amostragem, nomeadamente medições em superfícies, foram considerados de grande interesse para a correta caracterização de um maciço rochoso e tiveram um importante desenvolvimento no LNEC, no final da década de 60 e durante a década de 70. A Tese para Especialista de Nuno Grossmann, de 1977, "Contribuição para o estudo da compartimentação dos maciços rochosos", constituiu um importante contributo neste domínio.

permeability tensor is calculated from the orientation and openings of the joints and, if infillings are present, also from their coefficient of permeability assuming that the sampled joints are continuous and plane.

Statistical studies of discontinuities data from integral sampling and from other sampling methods, namely measurements on surfaces, were considered of great interest for the correct characterization of a rock mass and had an important development at LNEC in late 60s and the 70s. The Specialist Thesis of Nuno Grossmann, in 1977, "Contribution to the Study of the Jointing of the Rock Masses", was an important input in this field.

3. Fundações de barragens

Os métodos experimentais constituíram o cerne dos estudos de investigação iniciais de Manuel Rocha, centrados no desenvolvimento e aplicação de métodos de ensaio de modelos físicos em laboratório, tendo por objetivo a análise e a previsão do comportamento das estruturas e suas fundações. A opção pela via experimental deveu-se, no essencial, às limitações das técnicas analíticas disponíveis na época. Na realidade, estas técnicas baseavam-se, em regra, na hipótese de elasticidade linear dos materiais, para além de não permitirem a representação de formas estruturais complexas. O artigo intitulado “Dimensionamento experimental de estruturas” [9], publicado em 1951, apresenta de forma rigorosa e completa os conceitos fundamentais dos métodos de modelação física, abordando as questões teóricas da semelhança mecânica, a seleção dos materiais para os modelos, e as técnicas de medição da resposta experimental. Este trabalho também descreve a aplicação destes métodos no estudo de várias estruturas, nomeadamente o primeiro ensaio em modelo realizado

3. Dam foundations

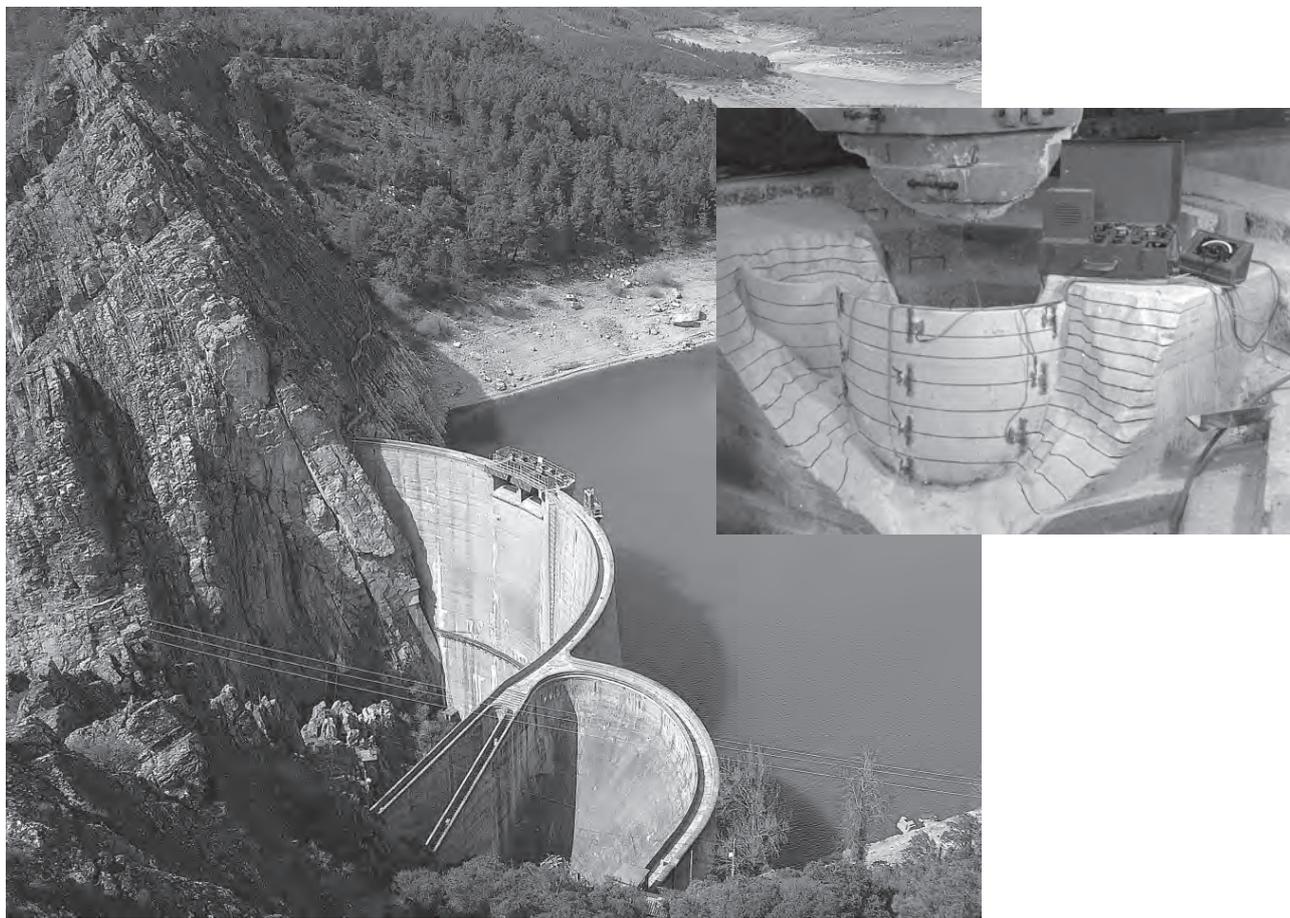
Experimental methods were the focus of the early research conducted by Manuel Rocha, which was mainly concerned with the development and application of physical (or scale) models tests in the laboratory, in order to analyse and predict the behaviour of structures and their foundations. The experimental approach was mainly determined by the limitations of the analytical techniques then available. In fact, these were generally based on the assumption of linear elasticity, and had difficulty to address complex structural shapes. The paper on “Experimental design of structures” [9], published in 1951, provides a comprehensive discussion of the fundamental concepts of physical modelling, including the theoretical questions of mechanical similitude, the options for the selection of model materials and the techniques to measure the response in the tests. It also describes the application of this methodology to various structures then under study, including the first model study of a concrete dam in



Laboratório de ensaio de modelos de barragens. Dam physical models testing laboratory.

em Portugal de uma barragem de betão, a barragem de Santa Luzia, uma abóbada de 70 m de altura projetada por André Coyne e concluída em 1943. Este trabalho experimental tinha sido objeto da comunicação “Ensaio em modelo da barragem de Santa Luzia” [5], da autoria de Rocha e Laginha Serafim, apresentada no 3.º Congresso da ICOLD em Estocolmo em 1948. Os ensaios do modelo de gesso-diatomite, à escala 1/100, conduziram a uma

Portugal, Santa Luzia dam, a 70 m high concrete arch dam, designed by André Coyne and completed in 1943. This experimental study had been the subject of the paper by Rocha and Laginha Serafim presented to the 3rd ICOLD Congress in Stockholm in 1948, entitled “Model tests of Santa Luzia dam” [5]. The tests of the plaster-diatomite model, at a 1/100 scale, provided a prediction of deflections which compared satisfactorily



Barragem de Santa Luzia e modelo físico. Santa Luzia dam and physical model.

previsão dos deslocamentos estruturais que apresentou uma concordância satisfatória com os resultados da observação da obra durante o primeiro enchimento da albufeira. A aplicação de extensómetros no modelo permitiu ainda obter o campo de tensões na abóbada, cuja forma complexa não se adequava facilmente ao método *trial load*, a técnica analítica então mais utilizada.

O projeto da barragem de Castelo do Bode, no âmbito do aproveitamento hidroelétrico do Zêzere iniciado em 1947, integrava uma ensecadeira de 34 m de altura que foi objeto de um conjunto significativo de estudos publicados

with the prototype observation during the filling of the reservoir. Extensometer readings allowed the determination of the stress field in the arch, which displays a complex shape not approachable by the trial load method, the prevalent analytical technique at the time.

The project of Castelo do Bode dam, part of the Zêzere river hydroelectric scheme started in 1947, included a concrete arch cofferdam, 34 m high, which was the subject of extensive studies published in the ASCE journal in 1955 [24]. These studies provide a view of

na revista da ASCE em 1955 [24]. Este trabalho permite compreender a abordagem integrada dos problemas que norteava a ação de Manuel Rocha, envolvendo a utilização conjunta de modelos experimentais e de métodos analíticos, sempre confrontados com os dados da observação do protótipo, que constituem o teste decisivo da adequação e precisão dos resultados da modelação. A representação da abóbada de betão pelo método *trial load* denotava limitações claras face aos modelos físicos, o que no entanto não impedia Manuel Rocha de insistir no interesse de aperfeiçoar as ferramentas analíticas. Os ensaios em modelo apontavam para o desenvolvimento de uma fratura na base do paramento de montante, que também foi detetada no protótipo, evidenciando a importância de fenómenos não lineares, em particular os relacionados com o comportamento da fundação.

A influência da deformabilidade do maciço rochoso de fundação sobre o estado de tensão na barragem era um problema que assumia um grande relevo para os projetistas, sobretudo no caso de heterogeneidade do maciço. O artigo apresentado no 5.º Congresso da ICOLD, que teve lugar em Paris em 1955 [21], da autoria de Rocha, Laginha Serafim e António Ferreira da Silveira, com o título “Deformabilidade de formações rochosas”, relata os ensaios *in situ* realizados pelo LNEC nos locais das barragens de Salamonde, Caniçada e Cabril por meio das várias técnicas experimentais mencionadas na secção anterior. A importância da utilização de extensómetros na fundação rochosa para aferir os efeitos da construção da barragem é já referida. Contudo, a instrumentação das obras é principalmente dirigida para o comportamento da estrutura, como é visível no artigo sobre observação apresentado no mesmo congresso [23], em que a questão da monitorização das subpressões é tratada ainda de modo sumário.

O projeto da barragem do Alto Rabagão, implantada num maciço com contrastes significativos de deformabilidade, motivou um conjunto de estudos de grande relevância, que permitiram o aperfeiçoamento dos métodos de caracterização do maciço rochoso e incluíram ensaios em modelo físico tendo em vista avaliar o impacto das



Barragem de Castelo do Bode. Castelo do Bode dam.

the comprehensive approach that guided the action of Manuel Rocha, as they involve the integrated use of experimental models, analytical techniques and the information obtained from the monitoring of the prototype, which provides the definite test of the significance and accuracy of the modelling results. The analysis of the arch behaviour by the trial load method had clear limitations in face of the physical models, which did not prevent Manuel Rocha from insisting on the need to continue investing on the analytical tools. The tests showed the development of a crack at the base of the upstream face, also detected on the prototype, indicating the importance of non-elastic effects, namely regarding the foundation behaviour.

The influence of the deformability of the foundation rock mass on the dam stresses was always a major concern for the designers, particularly in the case of heterogeneous conditions. The paper to the 5th ICOLD Congress, which took place in Paris in 1955 [21], by Rocha, Laginha Serafim and António Ferreira da Silveira, and entitled “Deformability of foundation rocks”, reports the *in situ* tests carried out by LNEC at Salamonde, Caniçada and Cabril dams, by means of the techniques already mentioned in the previous section. The importance of placing extensometers in the rock foundation to assess the effects of the dam construction is already noted. However, the focus on the dam instrumentation is still perceptible in the paper on the dam monitoring, presented at the same congress [23], which briefly addresses the measurement of uplift pressures.



Barragem de Salomonde. Salomonde dam.

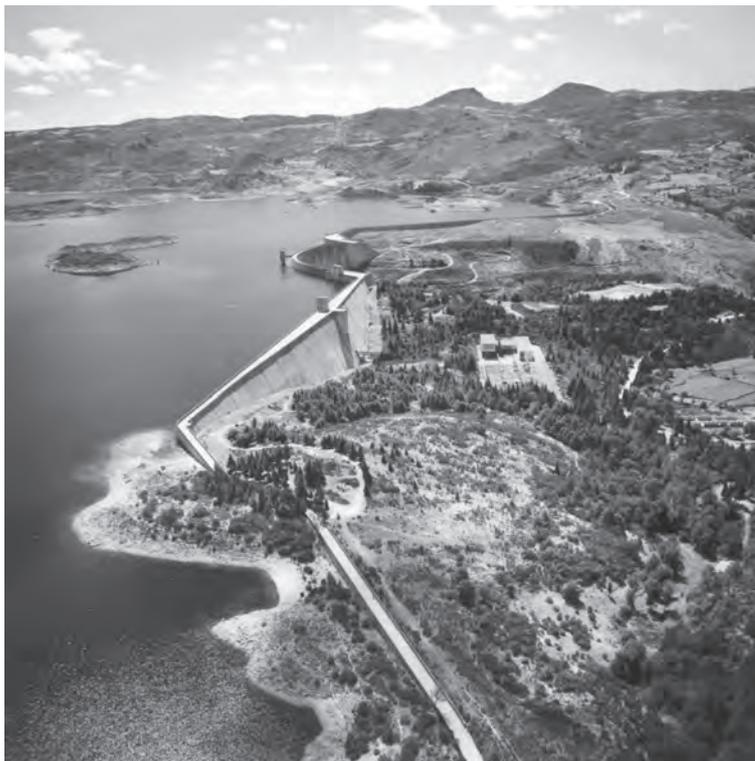


Barragem da Caniçada. Caniçada dam.



Barragem do Cabril. Cabril dam.

condições de fundação sobre a segurança da estrutura. Uma discussão detalhada destes trabalhos de investigação encontra-se no artigo “Comportamento mecânico de fundações rochosas de barragens de betão”, apresentado no 8.º Congresso da ICOLD, que decorreu em Edimburgo em 1964 [53]. Estes estudos conduziram a conclusões importantes, e largamente citadas na literatura internacional, sobre a influência que a relação das deformabilidades da barragem e do maciço pode assumir no comportamento estrutural. O primeiro enchimento da albufeira facultou dados da observação que confirmaram a justeza das conclusões da caracterização geotécnica, bem como dos ensaios em modelo físico, tendo sido expostos na comunicação ao 9.º Congresso da ICOLD, em Istambul, em 1967, da autoria de Rocha, Ferreira da Silveira, Orlando Rodrigues e Carlos Florentino [65]. Os autores salientam, em particular, o acordo entre a deformabilidade previamente estimada e os



Barragem do Alto Rabagão. Alto Rabagão dam.

resultados obtidos com os extensómetros de fundação. Os estudos efetuados para a barragem de São Simão, no Brasil, evidenciaram outro caso de uma fundação com zonas de deficientes características mecânicas, em que o conhecimento anteriormente adquirido foi aplicado com sucesso [87]. O bem conhecido artigo “O problema físico das barragens de betão” [57], apresentado no simpósio da Universidade de Southampton, em 1964, condensa de forma brilhante as conclusões decorrentes dos estudos sobre o projeto de abóbadas efetuados até essa data, abordando designadamente as questões da conceção da forma estrutural, dos materiais, das distribuições de tensões devidas ao peso próprio, pressão hidrostática e variações térmicas, assim como da importância do comportamento da fundação.

O trabalho apresentado no Congresso de Edimburgo da ICOLD de 1964, acima citado, aborda, pela primeira vez, o problema da elaboração de modelos conceptuais do comportamento de um maciço rochoso, em que se destaca sempre o papel das diaclases e demais superfícies de descontinuidade. A importância de ir além do paradigma de meio contínuo é já clara para Manuel Rocha, que salienta a necessidade de “pelo menos para certos casos, desenvolver uma mecânica de um meio cortado por famílias de descontinuidade” [53]. Discute,

The design of Alto Rabagão dam in a site with large contrasts in rock deformability was the motivation for detailed investigations, comprising the advancement of *in situ* testing techniques to characterize the rock mass, and model tests to study its potential impact on dam safety. The problem is discussed at length in the paper on “Mechanical behaviour of rock foundations of concrete dams”, presented at the 8th ICOLD Congress in Edinburgh in 1964 [53]. These studies led to important, and widely quoted, conclusions relating the ratio of concrete to rock deformability to its potential influence on dam behaviour. The first filling of the reservoir provided monitoring data which supported the fairness of the conclusions obtained in the geotechnical characterization and in the physical model studies, as described in the contribution to the 9th ICOLD Congress that took place in Istanbul, in 1967, authored by Rocha, Ferreira da Silveira, Orlando Rodrigues and Carlos Florentino [65]. In particular, it is stressed the agreement between the rock mass deformability estimates and the data acquired from foundation extensometers. The study of São Simão dam, in Brasil, provided another case of a foundation with areas of low mechanical properties in which the previously acquired knowledge was successfully

neste trabalho, o problema da idealização de vários tipos de padrões de diaclasamento, e identifica os parâmetros geométricos e mecânicos que podem condicionar a resposta em cada caso. Face às limitações dos métodos analíticos existentes, propõe a via de ensaios laboratoriais de provetes representando meios diaclasados, ou sistemas de blocos, para a compreensão dos aspetos fundamentais do seu comportamento. A análise dos resultados de um vasto conjunto de ensaios de corte *in situ*, realizados em Portugal e no estrangeiro, fornece informação valiosa sobre a resistência ao corte da interface betão-rocha e do maciço rochoso, nomeadamente da sua anisotropia em função da orientação dos planos de xistosidade. A influência das descontinuidades do maciço na sua resistência ao corte era assumida como questão essencial na análise das condições de segurança, justificando estudos de investigação envolvendo ensaios de campo e ensaios de deslizamento de diaclases em laboratório, de forma a apoiar o progresso dos modelos conceituais.

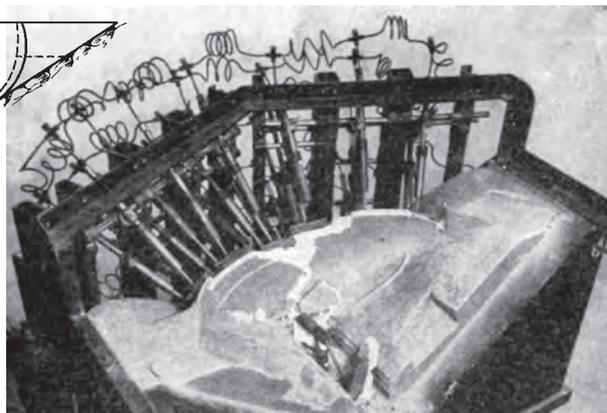
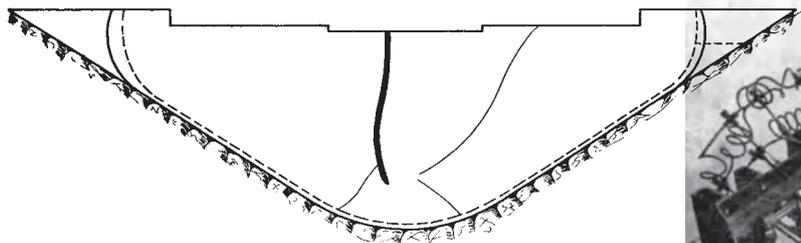
O interesse de modelar o comportamento estrutural até ao colapso, indo para além da resposta linear típica das condições de serviço, com o intuito de obter uma medida mais precisa da margem de segurança, havia já sido salientado na comunicação de Rocha e Laginha Serafim ao 6.º Congresso da ICOLD em Nova Iorque, em 1958 [35]. Descrevem-se, neste trabalho, os ensaios à rotura de modelos de gesso das barragens da Bouçã e Slettedalen, empregando uma técnica de aplicação simultânea das cargas devidas ao peso próprio e à pressão hidrostática, por meio de macacos, o que permitia simular um cenário de progressiva redução da resistência do betão. A questão da avaliação da segurança por métodos experimentais é formulada, num quadro de maior generalidade, na palestra proferida em Swansea, em 1964 [55], na qual se oferece um panorama da atividade do LNEC nesta área, referindo-se nomeadamente os ensaios dinâmicos de modelos de barragens com recurso a um equipamento de vibração eletromagnético. Nesta época, um dos argumentos invocados em defesa dos ensaios em modelo físico era a sua capacidade de representar comportamentos não elásticos dos materiais, o que não estava ainda ao alcance dos métodos analíticos.

Os avanços no domínio dos métodos numéricos ocorridos nos anos 60, em especial o desenvolvimento do método dos elementos finitos, ampliaram drasticamente os meios de análise de tensões por via analítica, vindo a substituir progressivamente métodos como o *trial load*. A

applied [87]. The well-known article entitled "Statement of the physical problem of the arch dams" [57], given at the Southampton University symposium in 1964, summarizes the investigations of the previous years on arch dam design, discussing the issues of dam shapes, materials, stress distributions due to the self-weight, hydrostatic and thermal loading, as well as the importance of the foundation behaviour.

The above mentioned paper to the 1964 Edinburgh ICOLD Congress also addresses, for the first time, the problem of the conceptual modelling of the rock mass behaviour, given the critical role of the rock joints and other discontinuity surfaces. The importance of going beyond the continuum paradigm is already clear to Manuel Rocha, which envisages it may be necessary "at least in certain cases, to develop a mechanics of media divided by families of discontinuities" [53]. Idealized representation of various types of joint patterns is discussed, and the geometric and mechanical parameters that govern the response in each case are identified. Given the shortcomings of the existing analytical methods, he proposes experiments with jointed or blocky media as the best way to simulate the complexity of rock mass structure in order to gain insight into its behaviour. The results of *in situ* shear tests conducted at various dam sites, in Portugal and abroad, are listed in the paper, providing valuable information on the shear strength of the concrete-rock interface and rock mass planes parallel and normal to the schistosity. The influence of the rock mass discontinuities on the shear strength was viewed as a key issue in safety analysis, prompting further experimental research, by means of *in situ* tests and laboratory tests on cores and rock joints, to support the elaboration of more satisfactory conceptual models.

The importance of modelling the dam behaviour up to structural collapse, going beyond the elastic response prevalent for operating conditions, in order to reach a more meaningful estimate of the margin of safety, had already been addressed in the paper authored by Rocha and Laginha Serafim and presented to the 6th ICOLD Congress in New York, in 1958 [35]. Tests up to failure of plaster models of the Bouçã and Slettedalen dams were reported, employing a technique of loading with jacks that increases simultaneously the dead weight and water loads, thus reproducing



Ensaio à rotura da barragem da Bouçã. Test up to failure of the Bouçã dam.

comunicação apresentada ao 10.º Congresso da ICOLD, em Montreal, em 1970 [76], por Rocha, Ferreira da Silveira, Cruz Azevedo e Oliveira Pedro, inclui resultados de análises pelo método dos elementos finitos, em complemento da modelação física, no estudo da influência da pressão hidrostática na cortina de impermeabilização sobre o comportamento estrutural. Os modelos de elementos finitos, que haviam sido desenvolvidos na Tese de Especialista do LNEC de José Oliveira Pedro, mostravam ser uma ferramenta de grande utilidade na análise de barragens. A generalidade e versatilidade eram vantagens óbvias dos métodos numéricos, por exemplo, no estudo do estado de tensão na vizinhança da fundação da barragem e no maciço rochoso.

A palestra proferida no 3.º Congresso da ISRM, em Denver em 1974, sobre “Possibilidades atuais de estudar fundações de barragens de betão” [86], integra os desenvolvimentos mais importantes no campo dos métodos de caracterização dos maciços rochosos, sintetizando o conhecimento adquirido através do grande número de ensaios efetuados pelo LNEC. As questões da avaliação da resistência ao corte das fundações e dos critérios de segurança a utilizar no projeto de barragens são também abordadas. De referir, a discussão do problema da interpretação dos ensaios de corte *in situ*, um tópico já tratado em anteriores publicações, mas que agora se apoia também em análises do provete pelo método dos elementos finitos, que mostram o carácter não uniforme das distribuições de tensões normais e tangenciais no plano de corte, com implicações importantes no processo de rotura. O rápido desenvolvimento das técnicas numéricas e dos meios computacionais começava a disponibilizar as ferramentas fiáveis para análise de tensões que Manuel Rocha sempre procurara. O relato apresentado no simpósio do Rio de Janeiro, em 1978, “Análise e projeto

a scenario of progressive reduction of the concrete arch strength. The problem of safety assessment by experimental methods is taken, within a more general framework, in the paper presented at Swansea in 1964 [55], which provides an overview of the work being carried out at LNEC, including dynamic tests with an electromagnetic shaker to study the seismic behaviour of arch dams. At this time, an argument invoked to defend the advantage of experimental methods was their ability to represent non-elastic stress-strain curves, when adequate model materials were selected, a feature still beyond the reach of the analytical methods.

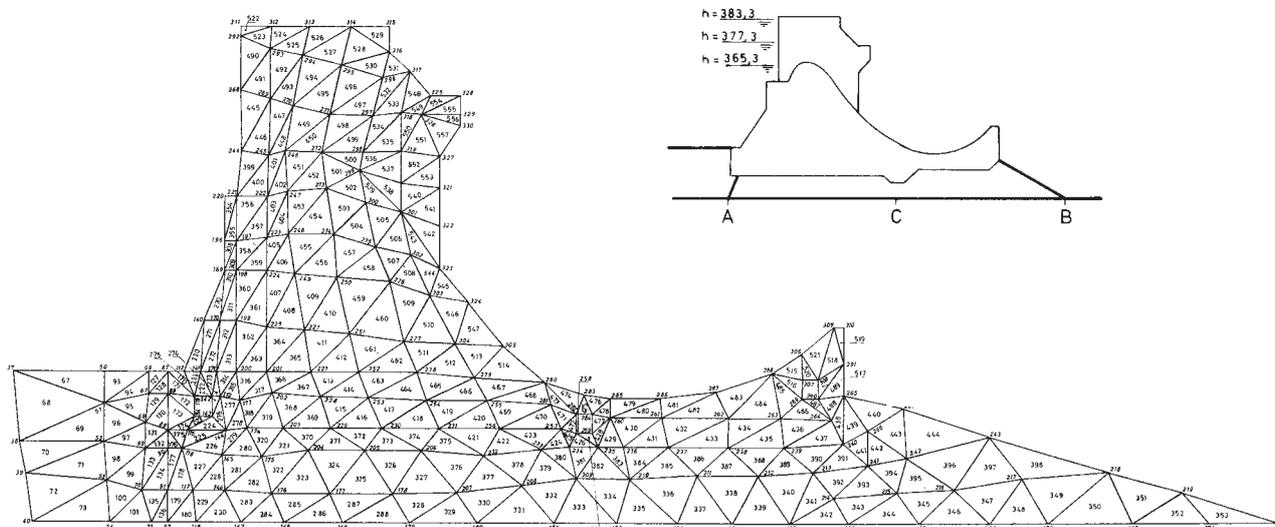
The development of the numerical methods in the 1960s, in particular the finite element method, was going to extend significantly the capabilities of stress analysis, superseding the trial-load method, until then the dominant analytical tool in arch dam design. The paper submitted to the 10th ICOLD Congress in Montreal in 1970 [76], by Rocha, Ferreira da Silveira, Cruz Azevedo and Oliveira Pedro, includes the results of a finite element analysis, as a complement to experimental model tests, in the investigation of the influence that the hydrostatic pressure on the grout curtain may have on arch dam behaviour. The finite element models developed in the Specialist Thesis of José Oliveira Pedro at LNEC were proving a very helpful tool for stress analysis. In particular, the generality and versatility of the numerical methods was clear in the estimation of the state of stress that developed in the vicinity of the dam foundation and in the rock mass.

The address to the 3rd ISRM Congress in Denver in 1974, on “Present possibilities of studying foundations of concrete dams” [86], integrates the important advancements in the rock mass characterization

das fundações de barragens de betão” [95], cuja versão portuguesa publicada nos números 29 e 30 da revista *Geotecnia* é bem conhecida, inclui resultados de cálculos de elementos finitos considerando o comportamento não linear das superfícies de descontinuidade, realizados no LNEC com recurso a desenvolvimentos recentes na modelação de meios diaclasados inseridos na Tese de Especialista de Luís Ribeiro e Sousa. O caso da barragem de Água Vermelha, no Brasil, em que a presença de uma descontinuidade horizontal extensa exigia a sua consideração na análise da segurança da obra, foi estudado em pormenor por Manuel Rocha, que explorou a facilidade com que os modelos numéricos permitem efetuar estudos paramétricos, de modo a compreender a influência de cada uma das propriedades físicas no comportamento da barragem e na sua segurança.

A questão da avaliação da segurança de fundações de barragens foi abordada em profundidade no artigo de 1978, na sequência de um percurso já discernível nos trabalhos anteriores de Manuel Rocha. Neste artigo, examina o problema da identificação e análise dos modos de rotura potenciais através da fundação, para os casos de barragem gravidade e abóbada, tendo em consideração o tipo de compartimentação do maciço rochoso. Analisa, em seguida, as diferentes hipóteses de idealização do maciço rochoso, desde os modelos mais simples de meio elástico contínuo, até aos modelos mais complexos de meio descontínuo, sendo o campo de aplicação de cada idealização, e as suas vantagens e limitações, definido de forma clara e precisa. Os modelos numéricos com representação explícita das superfícies

techniques discussed in the previous section, elaborating on the lessons gained from the large number of *in situ* tests performed by LNEC at dams sites in Portugal and abroad. The shear strength of the foundations and the design safety criteria are also examined. The interpretation of the *in situ* shear tests, a topic already present in previous publications, is again discussed, but now supported by finite element stress analyses, which highlight the non-uniform distributions of normal and shear stresses on the failure surface, with a considerable potential influence on the rupture process. The rapid development of numerical techniques was finally providing the reliable analysis tools that Manuel Rocha had always sought. The general report to the 1978 Symposium in Rio de Janeiro, “Analysis and design of the foundations of concrete dams” [95], with a well-known Portuguese version published in the journal *Geotecnia*, issues 29 and 30, included results of finite element models taking into account the non-linear behaviour of rock discontinuities. These analyses, performed at LNEC, employed the recent advancements in numerical modelling of jointed media accomplished in the Specialist Thesis of Luís Ribeiro e Sousa. The case of the foundation of Água Vermelha dam, in Brazil, in which the presence of an extensive horizontal discontinuity created a major safety concern, was examined in detail by Manuel Rocha, exploring in particular the ability of numerical models to perform series of parametric simulations, in order to gain insight into the importance of the various physical properties.



Modelo numérico da barragem de Água Vermelha. Água Vermelha dam numerical model.

de descontinuidade, com modelos de comportamento adequados, são apontados como a ferramenta mais apropriada para a análise até à rotura. A questão crucial da determinação experimental dos parâmetros a introduzir nos modelos está sempre presente na mente de Manuel Rocha, uma vez que a falta de dados fiáveis sobre as condições *in situ* ou as propriedades dos materiais constituem o maior entrave à aplicação dos novos modelos numéricos. Por fim, os conceitos fundamentais da avaliação da segurança são tratados com grande generalidade, salientando a importância de metodologias que permitam a quantificação da segurança em relação ao colapso, e dando especial relevo aos critérios aplicáveis às obras em maciços rochosos.

O estudo das barragens de betão e suas fundações constituiu um desafio fundamental para o talento ímpar de Manuel Rocha, como cientista e engenheiro. O sucesso no tratamento deste difícil problema, combinando a engenharia estrutural e a mecânica das rochas, áreas em que deu contributos de grande relevo, só foi possível graças à sua notável capacidade de procurar métodos científicos inovadores, e de os transformar e aperfeiçoar continuamente, nunca perdendo de vista o objetivo essencial da sua aplicação às obras de engenharia.

The safety assessment of dam foundations was studied in depth in the 1978 paper, following a path of development discernible in Manuel Rocha's previous works. The problem of identifying and analysing the potential failure modes involving the foundation is addressed, for the cases of gravity and arch dams, taking into consideration the effects of the dominant rock mass joint patterns. The different modes of idealizing the rock mass, ranging from the simpler assumption of an elastic continuum to the more elaborate one of a discontinuous medium, are carefully examined, and the situations calling for each one, in face of their strengths and limitations, are defined in clear and concise terms. The use of numerical models with explicit consideration of discontinuities, incorporating appropriate constitutive relations, is proposed as the best tool for the analysis up to failure. The crucial question of the experimental determination of the model parameters is always in Manuel Rocha's mind, since the lack of reliable knowledge of the materials and *in situ* conditions poses the greatest constraint to the application of the new numerical techniques. Finally, the philosophy of safety assessment is addressed with great generality, emphasizing the importance of the methodologies that allow the quantification of safety with respect to the ultimate failure condition, and focusing on the criteria applicable to rock engineering structures.

The study of concrete dam foundations offered Manuel Rocha a challenge to his outstanding scientific and engineering talents. This difficult problem combined the areas of structural engineering and rock mechanics, in both of which he made great contributions, demanding his remarkable ability to seek the most innovative scientific methods available and further extend and improve them to suit the needs of engineering projects.

4. Publicações de Manuel Rocha Publications of Manuel Rocha

- [1] Rocha, M. (1940). A fotoelasticidade nos equilíbrios elásticos de revolução. *Revista Técnica*, n. 115, pp. 65-73, Lisboa.
- [2] Rocha, M. (1941). A fotoelasticidade no ensino e na técnica. *Revista Técnica*, n. 122, pp. 465-494, Lisboa.
- [3] Rocha, M. (1943). Estudo das estruturas hiperestáticas pelos teoremas de Castigliano e pelo método de Beggs. *Revista Técnica*, n. 139-142, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 1.
- [4] Rocha, M. (1946). A Física e a Engenharia Civil. *Gazeta de Física*, vol. 1, fasc. 1, pp. 24-31, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 6.
- [5] Rocha, M.; Serafim, J.L. (1948). Model tests of Santa Luzia dam. *Proc. 3rd Congress on Large Dams*, Stockholm. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 7.
- [6] Rocha, M.; Borges, J.F. (1949). Photographic methods for model analysis of structures. *Society for Experimental Stress Analysis*, New York. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 18.
- [7] Rocha, M.; Coutinho, A.S.; Neves, A.B. (1949). État actuel des mortiers et bétons d'ouvrages portuaires Portugais. *17th International Congress of Navigation*, Lisbon. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 12.
- [8] Oliveira, E.A.; Rocha, M.; Nascimento, U.; Santos, P.; Seguro, J.M.; Castilho, A.; Simões, A. (1951). L'étude du sous-sol des routes. *Proc. 9th World Road Congress*, Lisbon. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 23.
- [9] Rocha, M. (1951). Dimensionamento experimental de estruturas. *Revista Técnica*, n. 215-217, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 21.
- [10] Rocha, M. (1952). General review of the present status of the experimental method of structural design. *Report of the 4th Congress of the International Association for Bridges and Structural Engineering*, Cambridge, pp. 329-352. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 52.
- [11] Rocha, M.; Borges, J.F. (1952). Photoelasticity applied to structural design. *Report on the 4th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineers*, Cambridge, pp. 354-369. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 41.
- [12] Rocha, M. (1953). Similarity conditions in model studies of soil mechanics problems. *3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 42.
- [13] Rocha, M. (1954). A mecânica dos solos; seu papel na Engenharia Civil. *Revista Técnica*, n. 238, pp. 199-234, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 46.
- [14] Rocha, M.; Folque, J.; Castro, G. (1954). Compactação em barragens de terra. *Boletim da Ordem dos Engenheiros*, Lisboa, III (7). LNEC, Memória (Technical Paper) n. 59.
- [15] Rocha, M.; Serafim, J.L. (1954). Barragens abóbada: Fundações, projecto sobre modelo e observações dos protótipos. *Anais do 1^o Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*, Porto Alegre, vol. II, pp. 74-118. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 93.
- [16] Rocha, M. (1955). Conditions de similitude dans l'étude sur modèles de problèmes de mécanique du sol. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n. 86, pp. 154-166. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 35.

- [17] Rocha, M. (1955). The study of structures by models in Portugal. *Atti del Convegno di Venezia "I Modelli nella tecnica"*, vol. I. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 84.
- [18] Rocha, M.; Borges, J.F.; Marecos, J. (1955). Observation of some reinforced concrete structures. *RILEM, Symposium sur l'observation d'ouvrages*, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 102.
- [19] Rocha, M.; Folque, J. (1955). Quelques résultats d'observations de tassements sur des constructions réelles et sur modèles. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n. 86, pp. 167-170. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 36.
- [20] Rocha, M.; Serafim, J.L. (1955). Analysis of concrete dams by model tests. *Proc. 5th International Congress on Large Dams*, Paris, vol. IV, pp. 1307-1344. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 81.
- [21] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F. (1955). Deformability of foundation rocks. *Proc. 5th Congress on Large Dams*, vol. III, Paris, 1955, pp. 531-561. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 82.
- [22] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F. (1955). Observation of dams. Methods and apparatus used in Portugal. *RILEM, Symposium sur l'observation d'ouvrages*, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 104.
- [23] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F.; Rodrigues, O. (1955). The observation of the behaviour of the Portuguese concrete dams. *Proc. 5th Congress on Large Dams*, Paris, vol. IV, pp. 1219-1265. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 80.
- [24] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F.; Neto, J.M.R. (1955). Model tests, analytical computation and observation of an arch dam. *Journal of the Power Division, Proc. American Society of Civil Engineers*, n. 696, vol. 81. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 68.
- [25] Rocha, M. (1956). Métodos não destrutivos de ensaios de materiais. *Boletim da Ordem dos Engenheiros*, Lisboa, V (2), pp. 1-9. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 83.
- [26] Rocha, M. (1956). Organization, management and activity of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil. *Lição no Instituto Nacional de Tecnologia*, Rio de Janeiro. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 79.
- [27] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F. (1956). Arch dams: Design and observation of arch dams in Portugal. *Journal of the Power Division, Proc. American Society of Civil Engineers*, n. 697, vol. 82. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 95.
- [28] Rocha, M. (1957). A investigação e a indústria. *II Congresso da Indústria Portuguesa*, Lisboa.
- [29] Rocha, M. (1957). The possibility of solving soil mechanics problems by the use of models. *Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics*. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 77.
- [30] Rocha, M.; Borges, J.F. (1957). A utilização de modelos no dimensionamento de estruturas; aplicações diversas. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 92.
- [31] Rocha, M.; Nascimento, U.; Castro, E. (1957). Determination of moisture content in porous materials by means of the relative humidity inside a cavity. *Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics*. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 116.
- [32] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F.; Neto, J.M.R. (1957). Model tests, analysis and observation of an arch dam (with discussions). *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 122, n. 1, pp. 903-934. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 68.
- [33] Rocha, M.; Carlos, A.P.; Folque, J.; Esteves, V.P. (1958). Portuguese experience on the compaction control of earth dams. *6th International Congress on Large Dams*, New York, vol. III, pp. 185-204. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 127.
- [34] Rocha, M.; Serafim, J.L. (1958). Determination of thermal stresses in arch dams by means of models. *Proc. 6th International Congress on Large Dams*, New York, vol. IV, pp. 269-296. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 133.

- [35] Rocha, M.; Serafim, J.L. (1958). Rupture studies on arch dams by means of models. *Proc. 6th International Congress on Large Dams*, New York, vol. IV, pp. 439-464. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 142.
- [36] Rocha, M.; Serafim J.L.; Silveira, A.F. (1958). A method of quantitative interpretation of the results obtained in the observation of dams. *6th International Congress on Large Dams*, New York, vol. II, pp. 371-396. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 128.
- [37] Rocha, M.; Serafim J.L.; Silveira, A.F. (1958). Observation of concrete dams. Results obtained in Cabril dam. *Proc. 6th International Congress on Large Dams*, New York, vol. II, pp. 877-926. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 129.
- [38] Rocha, M.; Serafim J.L.; Silveira, A.F.; Matos, M.E. (1958). Model tests and observation of Bouçã dam. *Proc. 6th International Congress on Large Dams*, New York, vol. II, pp. 927-960. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 130.
- [39] Rocha, M. (1959). Practical application of models. General report. *International Colloquium on Models of Structures*, Madrid.
- [40] Rocha, M. (1960). O Laboratório Nacional de Engenharia Civil. *Congresso Luso-Espanhol para o progresso das ciências*. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 149.
- [41] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Azevedo, M.C. (1960). Determination of thermal stress in arch dams by means of models. *Bulletin RILEM*, n. 10. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 206.
- [42] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F.; Ferreira, M.J.E. (1960). The determination of the safety factor of arch dams by means of models. *Bulletin RILEM*, n. 7. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 163.
- [43] Rocha, M.; Serafim, J.L. (1961). Modern techniques of concrete dams for wide valleys and ancillary works. General report. *Proc. 7th International Congress on Large Dams*, Rome.
- [44] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Fernandes, A.J.; Costa, J.P. (1961). Experimental studies of buttress and multiple arch dams. *Proc. 7th International Congress on Large Dams*, Rome, vol. III, pp. 641-664. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 241.
- [45] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C. (1961). Special problems of concrete dams studied by models. *Bulletin RILEM*, n. 12. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 155.
- [46] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F.; Fernandes, A.J. (1961). Experimental studies of multiple arch dams. *Bulletin RILEM*, n. 11. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 202.
- [47] Rocha, M. (1962). A reforma do ensino da Engenharia. *Congresso do ensino de engenharia*, IST, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 209.
- [48] Rocha, M.; Folque, J.; Esteves, V.P. (1962). The application of cement stabilized soil in the construction of earth dams. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 194.
- [49] Rocha, M.; Serafim, J.L.; Azevedo, M.C. (1963). Note on some comparisons between experimental and analytical values of the stresses and displacements of concrete dams. *Proc. Symposium on Concrete Dam Models*, Lisbon, pp. XXV.1-XXV.27. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 214.
- [50] Rocha, M.; Silveira, A.F. (1963). The use of models to determine temperature stresses in concrete arch dams. *Proc. Symposium on Concrete Dam Models*, Lisbon, pp. XXIII.1-XXIII.25. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 230.
- [51] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Pereira, A.C. (1963). Note on the study of large span multiple arch dams. *Proc. Symposium on Concrete Dam Models*, Lisbon, pp. XX.1-XX.19. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 237.
- [52] Rocha, M. (1964). Some problems on the failure of rock masses. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, Supplement I. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 258.
- [53] Rocha, M. (1964). Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams. *Proc. 8th International Congress on Large Dams*, vol. I, Edinburgh, pp. 785-831. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 244.

- [54] Rocha, M.; Silveira, A.F. (1964). Assessment of observation techniques used in Portuguese concrete dams. *Proc. 8th International Congress of Large Dams*, Edinburgh, vol. II, pp. 757-790. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 254.
- [55] Rocha, M. (1965). Structural model techniques. Some recent developments. *Stress Analysis – Recent Development in Numerical and Experimental Methods*, Zienkiewicz-Holister (ed.), Ch. 16, pp. 385-424. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 264.
- [56] Rocha, M. (1965). In situ strain stress and measurements. *Stress Analysis – Recent Development in Numerical and Experimental Methods*, Zienkiewicz-Holister (ed.), Ch. 17, pp. 425-461. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 265.
- [57] Rocha, M. (1965). Statement of the physical problems of the arch dams. *International Symposium on theory of arch dams*, Southampton, Rydzewski (ed.). LNEC, Memória (Technical Paper) n. 263.
- [58] Rocha, M. (1966). Rock mechanics in Portugal. *Proc. 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, Portugal, pp. 121-141. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 299.
- [59] Rocha, M.; Lopes, J.B.; Silva, T.N. (1966). A new technique for applying the method of the flat-jack in the determination of stresses inside rock masses. *Proc. 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, vol. II, pp. 57-65. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 324.
- [60] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Grossmann, N. F.; Oliveira, E (1966). Determination of the deformability of rock masses along boreholes. *Proc. 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, vol. I, pp. 679-704. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 339.
- [61] Rocha, M. (1967). A investigação na Engenharia Civil. *2^{as} Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil*.
- [62] Rocha, M. (1967). Contribution to the discussion of Question 32. *9th International Congress on Large Dams*, Istanbul.
- [63] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C. (1967). Barragens de abóbadas múltiplas. *2^{as} Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil*. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 471.
- [64] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C.; Lopes J.B. (1967). Influence of a very high deformability of the foundation on the conception and behaviour of an arch dam. *Proc. 9th International Congress of Large Dams*, Istanbul, vol. I, pp. 441-461. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 471.
- [65] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Rodrigues, O.V.; Florentino, C.A. (1967). Assessment of the behaviour of a large dam during its first loading. *Proc. 9th International Congress of Large Dams*, Istanbul, vol. III, pp. 403-418. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 311.
- [66] Rocha, M. (1968). New techniques for the determination of the deformability and state of stress in rock masses. *International Symposium on Rock Mechanics of the ISRM*, Madrid, pp. 289-302. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 328.
- [67] Rocha, M. (1968). A educação permanente. *Revista Análise Social*, n. 20-21, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 333.
- [68] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C.; Lopes, J.B. (1968). Influência da muito alta deformabilidade da fundação na concepção e comportamento de uma barragem abóbada. *Revista Técnica*, n. 375, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 320.
- [69] Rocha, M. (1969). Dam foundation measurements. *Revista Técnica*, n. 386, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 334.
- [70] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C.; Ferreira, M.J.E. (1969). The use of model tests in the determination of the safety factor in arch dams. *Water Power*, vol. 21, n. 12. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 433.
- [71] Rocha, M.; Silvério, A. (1969). A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses. *Géotechnique* 19, n. 1, pp 116-132. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 329.

- [72] Rocha, M. (1970). New techniques in deformability testing of "in situ" rock masses. *Determination of the in Situ Modulus of Deformation of Rock*, ASTM, STP. 477, pp. 39-57. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 368.
- [73] Rocha, M. (1970). A investigação em Portugal. *Revista Indústria Portuguesa*, n. 508, pp. 387-394. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 399.
- [74] Rocha, M.; Silva, T.N. (1970). A new method for the determination of deformability in rock masses. *Proc. 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Belgrade, vol. I, pp. 423-437. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 361.
- [75] Rocha, M.; Silveira, A.F. (1970). Determination of thermal stresses in concrete dams by means of model tests. *American Concrete Institute Special Publication*, vol. 24, pp. 387-406. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 403.
- [76] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C.; Pedro, J.O. (1970). Influence on the behavior of an arch dam of the hydrostatic pressure on the grout curtain and of the stresses in the ground upstream. *Proc. 10th International Congress on Large Dams*, Montreal, vol. IV, pp. 541-558. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 383.
- [77] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Rodrigues, O.V.; Azevedo, M.C.; Florentino, C.A. (1970). Behavior of a large dam built in a very deformable foundation. *Proc. 10th International Congress on Large Dams*, Montreal, vol. III, pp. 655-674. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 436.
- [78] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Rodrigues, F.P.; Silvério, A.; Ferreira, A. (1970). Characterization of the deformability of rock masses by dilatometer tests. *Proc. 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Belgrade. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 360.
- [79] Rocha, M. (1971). A Mecânica das Rochas. *Geotecnia*, n. 1, Lisboa.
- [80] Rocha, M. (1971). Mecânica das Rochas. *Coleção Cursos e Seminários CS 5*, 1^a edição, 4 volumes, 448 p., LNEC, Lisboa.
- [81] Rocha, M. (1971). Método para amostragem integral de maciços rochosos. *Revista Técnica*, n. 404, Lisboa. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 374.
- [82] Rocha, M. (1971). A method of integral sampling of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 3, issue 1, pp. 1-12. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 382.
- [83] Rocha, M. (1971). O papel dos Laboratórios de Engenharia Civil. *Revista Técnica*, n. 404. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 371.
- [84] Rocha, M. (1971). The role of laboratory activities in civil engineering practice. *European Civil Engineering*, n.6. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 402.
- [85] Rocha, M.; Barroso, M. (1971). Some applications of the new integral sampling method in rock masses. *Rock Fracture Symposium*, International Society for Rock Mechanics, Nancy. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 397.
- [86] Rocha, M. (1974). Present possibilities of studying foundations of concrete dams. *Proc. 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Denver, CO, National Academy of Sciences, Washington, DC, vol. IIA, pp. 879-897. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 457.
- [87] Rocha, M.; Brito, S.; Nieble, C. (1974). Application of advanced techniques to the study of the foundations of São Simão dam. *Proc. 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Denver, CO, National Academy of Sciences, Washington, DC, vol. IIB, pp. 913-921. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 458.
- [88] Rocha, M.; Silvério, A.; Pedro, J.O.; Delgado, J.S. (1974). A new development of the LNEC stress tensor gauge. *Proc. 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Denver, CO, National Academy of Sciences, Washington, DC, vol. IIA, pp. 464-467. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 455.
- [89] Rocha, M. (1975). Alguns problemas relativos à mecânica das rochas dos materiais de baixa resistência. *Proc. V Pan-American Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, pp. 489-514. *Geotecnia*, n. 18. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 491.

- [90] Rocha, M. (1976). Possibilidades presentes de estudo das fundações de barragens de betão. *Geotecnia*, n. 17, Lisboa.
- [91] Rocha, M. (1976). Estruturas Subterrâneas - Túneis, Cavernas e Poços. *Edição provisória*, 102 p., LNEC, Lisboa.
- [92] Rocha, M.; Franciss, F. (1977). Determination of permeability in anisotropic rock-masses from integral samples. *Rock Mechanics*, Springer-Verlag (ed.), vol. 9, n. 2-3, pp. 67-93. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 495.
- [93] Rocha, M. (1978). Introduction to session 4 – The problems of interaction between stored products and rock mass. *Proc. of the 1st International Symposium Rockstore 77 "Storage in Excavated Rock Caverns"*, Stockholm, vol. II, pp. 395-398.
- [94] Rocha, M. (1980). Armazenamento em cavernas. Problema da interação entre os produtos armazenados e o maciço rochoso. *Geotecnia*, n. 28, Lisboa.
- [95] Rocha, M. (1981). Analysis and design of the foundation of concrete dams. *ISRM International Symposium on Rock Mechanics Applied to Dam Foundations*, Rio de Janeiro, Brazil, vol. 3, pp. III.11-III.70. LNEC, Memória (Technical Paper) n. 562.
- [96] Rocha, M. (1981). Mecânica das Rochas. *Coleção Cursos e Seminários CS 5*, 2ª edição, 448 p., LNEC, Lisboa.
- [97] Rocha, M. (1994). A reforma do ensino da Engenharia. A educação permanente. A investigação em Portugal. *Coleção Obras Escolhidas OE 1*, LNEC, Lisboa.
- [98] Rocha, M. (2013). Mecânica das Rochas. *Coleção Não Seriados NS 128*, 1ª edição, 432 p., (Edição revista e aumentada da 2ª edição, inserida na coleção Cursos e Seminários CS 5, 1981), LNEC, Lisboa.
- [99] Rocha, M. (2013). Estruturas Subterrâneas. *Coleção Não Seriados NS 129*, 1ª edição, 158 p., LNEC, Lisboa.