

CORTINAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO EM MACIÇOS DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS *

GROUT CURTAINS IN DAM FOUNDATION ROCK MASSES

por

VASCO G. FERNANDES **

RESUMO – Com o presente trabalho pretende levar-se ao conhecimento dos técnicos ligados à execução de cortinas de impermeabilização de barragens algumas sugestões de carácter prático, a fim de reduzir o seu custo e melhorar a sua eficiência.

Os temas tratados focam, fundamentalmente, a supressão de alguns ensaios de injeção de água considerados técnica e economicamente prejudiciais, sobretudo na fase de execução das cortinas de impermeabilização, os valores das pressões de injeção de água e de calda, bem como uma sugestão, em termos de esquema, com vista ao estudo do afastamento mais recomendável para os furos das referidas cortinas.

As sugestões apresentadas não têm carácter rígido pelo que terão de ser ajustadas a cada caso esperando-se que os ensinamentos colhidos, sejam divulgados para que possam contribuir para a eventual criação de normas de execução daquelas cortinas.

SYNOPSIS – Some suggestions of a practical nature are made regarding the execution of dam grout curtains, with a view to reduce their cost and make them more efficient.

The subjects dealt with are, fundamentally, the elimination of some water grouting tests, considered technically and economically unsuitable, chiefly during the execution of the grout curtain, the values of the grouting pressures for water and grout, and a scheme suggesting the most adequate spacing for the holes in these curtains.

The suggestions presented are not of a rigid nature and must be adjusted to each case. It is expected that results will be made available so as to assist in the possible preparation of standards for the execution of grout curtains.

* Manuscrito recebido em Dezembro de 1983. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Eng.º de Minas, D.G.R.A.H.

1 – GENERALIDADES

É do conhecimento geral dos técnicos ligados aos projectos e obras de aproveitamentos hidráulicos de superfície que as perdas, por circulação subterrânea, de água armazenada nas albufeiras devem ser reduzidas ao mínimo. Com este fim procede-se à execução de cortinas de impermeabilização nos maciços de fundação das barragens de maiores dimensões. Estas cortinas consistem na execução de furos paralelos, afastados entre si de poucos metros, nos quais se injecta calda com o objectivo de obturar as fissuras envolventes e impedir a fuga de caudais significativos de água nas albufeiras.

Na quase totalidade dos casos, as cortinas de impermeabilização não impedem totalmente a percolação da água nem eliminam as subpressões. O valor destas, como é sabido, é avaliado a partir de piezómetros e o seu controlo feito com furos de drenagem.

As considerações que se seguem referem-se a especificações ligadas à execução de cortinas de impermeabilização e não anulam as providências a tomar, sobretudo em barragens rígidas, quanto ao tratamento de consolidação da «capa» superior do maciço rochoso subjacente à obra, bem como à instalação de piezómetros e à drenagem, com o fim de medir e reduzir as subpressões, respectivamente, ou outras medidas consideradas necessárias à sua segurança.

Num maciço rochoso muito permeável considera-se indispensável proceder à execução de uma cortina de impermeabilização não só pela importância que os caudais de fuga podem atingir mas também pelo provável arrastamento dos minerais que preenchem as descontinuidades do referido maciço, com reflexos negativos na sua capacidade de carga. Este arrastamento poderá, eventualmente, provocar, ainda, um incremento no valor das subpressões se forem desobstruídas algumas descontinuidades subjacentes à obra e colmatadas outras que ocorram imediatamente a jusante. Todavia, face a uma eficiente cortina de estanqueidade, os valores fornecidos pelos piezómetros podem tornar dispensáveis os furos de drenagem.

Em maciços pouco permeáveis, alguns especialistas consideram que a drenagem é indispensável e que a cortina de impermeabilização tem uma função praticamente inútil, tornando-se desnecessária a sua execução. Este ponto de vista não parece, à priori, tecnicamente aceitável uma vez que não existe a garantia temporal de que a drenagem não seja passível de provocar o arrastamento dos minerais que preenchem as fracturas e, por consequência, vir a proporcionar um aumento progressivo da fuga de caudais, que até podem alterar o comportamento mecânico rochoso. Por outro lado, a execução de uma cortina de impermeabilização depois da barragem entrar em exploração, corre o elevado risco de colmatar parte dos furos de drenagem e dos piezómetros, bem como dos filtros, se existirem.

Como é sabido, em barragens de média ou grande dimensão é usual realizarem-se, em fase de estudo ou de anteprojecto, sondagens mecânicas com recuperação de

tarolos e ensaios de injeção de água tipo Lugeon.

Estas sondagens têm dois objectivos principais; um consiste em determinar o comportamento hidráulico do maciço de fundação, e o outro, em muitos casos considerado o mais importante, é de natureza geológica e tem por fim prospectar eventuais acidentes tectónicos e zonas de esmagamento, dados petrográficos, etc., elementos imprescindíveis à previsão da capacidade de carga do maciço rochoso.

2 – ENSAIOS DE INJEÇÃO DE ÁGUA TIPO LUGEON⁽¹⁾

2.1 – Fase de estudo

O estudo do comportamento hidráulico dos maciços rochosos é efectuado com base nos elementos colhidos nos ensaios de injeção de água sob pressão, realizados durante a execução das já referidas sondagens mecânicas.

A partir daqueles elementos determinam-se os valores dos coeficientes de absorção expressos em Unidades Lugeon (U.L.), ou em Unidades de Absorção (U.A.).

As absorções de água pelo maciço rochoso, também designadas por admitâncias, permitem calcular, para cada troço de furo e patamar de pressão, o valor do coeficiente de absorção, também chamado coeficiente de admitância.

Dos valores obtidos para este coeficiente infere-se, em fase de projecto, a profundidade que a cortina de impermeabilização deverá atingir nas imediações de cada furo.

Ao longo do alinhamento da cortina, nos troços compreendidos entre os furos executados, a profundidade daquela é estimada a partir dos valores obtidos nestes.

É, ainda, com base nos valores das admitâncias e das correspondentes pressões que se determinam os tipos de escoamento, dos quais se pode inferir a provável abertura e grandeza relativas das fissuras e dos minerais que as preenchem.

Aquelas absorções permitem, também, concluir da tendência das fracturas para a colmatagem, desobstrução ou indiferença, bem como de eventuais deformações elásticas ou a existência de bolsas de ar responsáveis pela devolução de água após a conclusão de alguns ensaios.

⁽¹⁾ também vulgarmente conhecidos por «ensaios de permeabilidade» designação esta que não parece ajustar-se às determinações gerais obtidas a partir daqueles ensaios pois só os casos de escoamento laminar em regime permanente permitem conhecer, aproximadamente, o coeficiente de permeabilidade.

2.1.1 – Unidades de admitância e pressões de injeção

A anteceder a apresentação de algumas considerações sobre os valores das pressões de injeção de água, parece oportuno lembrar que uma Unidade de Lugeon (U.L.) correspondente à absorção de 1 litro de água por minuto e por metro de furo, num ensaio realizado à pressão de 10 kgf.cm^{-2} durante 10 minutos.

Os furos onde se realizam estes ensaios têm, frequentemente, um diâmetro compreendido entre 50 e 100 mm e o comprimento dos troços ensaiados varia entre 3 e 5 m.

Por vezes, a pressão referida para a U.L. não é atingida, devido à grande absorção de água pelo maciço rochoso associada à falta de capacidade da bomba, o que conduz a que aquelas unidades sejam, nestes casos, calculadas por extrapolação.

Este facto, associado ao da quase totalidade das barragens portuguesas executadas e a projectar a curto prazo terem alturas muito inferiores a 100 m, leva a considerar tecnicamente desaconselhável a utilização do valor de 10 kgf.cm^{-2} para a pressão de injeção de água, nos maciços rochosos de fundação daquelas obras, quando a sua carga hidráulica for bastante inferior àquele valor.

SABARLY (1968) afirma que:

«a influência da pressão sobre a abertura das fissuras está longe de ser desprezável e pode ser mesmo preponderante no caso de um terreno, pouco permeável na origem, poder proporcionar notáveis absorções de água a uma pressão de 10 kgf.cm^{-2} »

Assim, parece perfeitamente admissível que as injeções de água a pressões elevadas (durante as quais ocorrem, em geral, arrastamentos de algumas partículas minerais que preenchem as fissuras) possam, por vezes, dar origem a roturas no maciço rochoso de fundação, onde as deformações elásticas são frequentes.

É por isso que se julga tecnicamente preferível injectar a água a pressões mais baixas e exprimir os valores dos coeficientes de admitância em Unidades de Absorção (U.A.).

Esta unidade corresponde à absorção de um litro de água por minuto, por metro de furo e por kgf. cm^{-2} , num ensaio realizado à pressão máxima para a qual se sugere esteja compreendida entre 0.1 e 0.15 vezes a mais elevada carga hidráulica prevista para a barragem, expressa em metros, tendo por valor máximo 10 kgf.cm^{-2} .

Os limites dos diâmetros dos furos e dos comprimentos dos troços ensaiados são idênticos aos referidos para a U.L.

Por outro lado, as conclusões que presentemente se inferem destes ensaios apoiam-se, apenas, em 3 patamares de pressão, em que o valor máximo desta, atingido em segundo lugar, é geralmente duplo dos utilizados no primeiro e terceiro patamares, que são iguais.

Mesmo em fase de estudo, a execução destes ensaios de injeção de água com 5 ou 7 patamares de pressão não consta que tenha conduzido à obtenção de mais dados

úteis para as injeções de calda do que os determinados a 3 pressões. Pelo contrário, têm o inconveniente de encarecer o estudo geo-hidráulico e sujeitar o maciço rochoso, no bolbo envolvente de cada furo, a repetidas e bruscas variações do valor da pressão hidráulica ao passar de um para outro, situação que não ocorre durante a fase de exploração da barragem.

Assim, é de crer que o elevado número de ensaios possa alterar as condições de escoamento do fluido injectado além de provocar a saturação do maciço rochoso em condições que se afastam das reais.

Esta suposição conduz a admitir que os resultados a obter nos posteriores ensaios de injeção de água, a realizar nos troços seguintes, não deverão corresponder a condições naturais, pelo que parece preferível reduzir, o mais possível, o número de patamares de pressão.

Em fase de obra, a injeção de água a vários patamares de pressão reduz, ainda, a absorção de calda.

Ainda acerca das pressões de injeção de água V. de Mello e P. Cruz (1959) sugeriram que estas obedecessem às seguintes expressões:

$$P_1 = (\gamma - 1) h + (\gamma - 2) h' \text{ Ton.m}^{-2}$$

$$P_2 = 0,75 (H + h) \quad \text{»}$$

$$P_3 = 2 P_2 \quad \text{»}$$

em que:

γ — é o peso específico da rocha constituinte do maciço rochoso expresso em Ton m^{-3} ;

h — é a distância vertical, em m , medida entre a boca do furo e o ponto médio do troço a ensaiar quando este se localizar acima do nível freático;

h' — é a distância vertical, em m , medida entre o nível freático e o ponto médio do troço a ensaiar abaixo deste nível;

H — é a altura de água, expressa em m , medida acima da boca do furo quando a albufeira estiver ao N.P.A.

Embora bem aceites do ponto de vista teórico os ensaios realizados às pressões obtidas a partir daquelas expressões não resultaram na prática devido, à frequente dificuldade em determinar o nível freático, aos valores das pressões P_1 e P_2 serem, por vezes, vizinhos e, ainda, pela difícil leitura no manómetro de valores calculados até aos décimos de kgf.cm^{-2} .

Aqueles especialistas sugeriram ainda, que a duração dos ensaios fosse de cerca de 15 minutos, ou até de 30, com leituras de 5 em 5 minutos, todavia, não referiram as vantagens práticas da utilização daqueles dados nas injeções de calda.

Discorda-se que, por sistema, seja adoptado o valor de 30 minutos para a duração de cada ensaio, mesmo que seja apenas em fase de estudo.

O motivo desta discordância apoia-se, em parte, nos argumentos apontados a propósito do número de patamares de pressão e, ainda, porque, na prática, de todos os elementos colhidos nos ensaios Lugeon, apenas é utilizado, nas injeções de calda, o valor do coeficiente de absorção medido em cada troço de furo, que determina a profundidade máxima da cortina no ponto estudado.

Uma vez que o valor do coeficiente de admitância tem grande probabilidade de, na realidade, ser ligeiramente superior ao que é medido nos furos, em consequência das partículas resultantes do «corte» da rocha pela coroa da broca só em parte serem removidas para a superfície pelo caudal de retorno que tem lugar durante a perfuração, parece perfeitamente admissível que o aumento da duração dos ensaios deva conduzir à obtenção de resultados mais ajustados às características do maciço de fundação, durante a fase de exploração da barragem, devido a eventuais fenómenos de fluência.

Muito embora a morosidade destes ensaios, com os elevados tempos de injeção de água que se traduzem em aumento do seu custo, pareça desaconselhar a sua execução, julga-se que algo deverá ser feito neste sentido.

Assim, sugere-se que, em fase de estudo e apenas num troço em cada furo, sejam prolongados de 10 para 30 minutos os ensaios programados para os 3 patamares de pressão, devendo a leitura do hidrómetro ser feita de 5 em 5 minutos.

Dos resultados obtidos, se forem oportunamente divulgados, se aquilatará do interesse em sistematizar a sua execução, eventualmente à pressão mais elevada em cada troço de furo.

Além disso, recomenda-se que cada ensaio de injeção de água tipo Lugeon seja sempre precedido de uma lavagem do furo com água limpa (tal como a daquele) durante 5 minutos, por exemplo, de preferência com maior caudal do que o utilizado no corte dos tarolos e com o conjunto de perfuração colocado junto do fundo do furo para aumentar a velocidade de circulação daquele fluido e arrastar as partículas (cuttings) mais grosseiras não removidas anteriormente.

Das considerações apresentadas pode concluir-se que os ensaios Lugeon, executados em fase de estudo, têm um objectivo mais vasto, ainda não totalmente aproveitado, do que os realizados imediatamente antes da injeção de calda, durante a construção da barragem.

Tendo em conta o aspecto económico, e sem prejuízo da colheita de dados técnicos, sugere-se que os ensaios Lugeon em fase de estudo, a executar preferencialmente com sonda rotativa e amostrador de parede dupla, sejam realizados em avanço e por troços de 5 m de comprimento. Se durante a execução de um destes ensaios

ocorrer numa absorção muito elevada o sondador pode, de seguida, colocar o obturador a 4 m do fundo do furo e repetir o ensaio a uma só pressão, e assim sucessivamente com troços de 3, 2 e 1 metros, até à medição de um volume de água acentuadamente menor do que o da anómala admitância. Este facto permite a posterior análise do tarolo correspondente ao troço do furo onde foi medida aquela absorção mais elevada.

Em fase de estudo e para barragens inferiores a 50 metros sugere-se a realização de ensaios Lugeon às pressões de 2,5, 5 e 2,5 kgf.cm⁻², de 50 a 70 metros 3,5, 7 e 3,5 kgf.cm⁻², e nas superiores a 70 metros 5, 10 e de novo 5 kgf.cm⁻².

2.1.2 – Regimes de escoamento

Descrevem-se, seguidamente, as definições dos regimes de escoamento a partir de dados colhidos em ensaios de injeção de água tipo Lugeon.

A lei de variação das admitâncias de água no maciço rochoso, em função das pressões de injeção, traduz-se pela fórmula

$$P = CA^n \quad \text{em que;}$$

P – é a pressão de injeção em kgf.cm⁻²;

A – é a absorção de água em litros durante o tempo de ensaio;

n – é um coeficiente que permite caracterizar o regime de escoamento, e

C – é uma constante.

Aplicando logaritmos àquela expressão resulta:

$$n = \frac{\log \frac{P_1}{P_0}}{\log \frac{A_1}{A_0}}$$

A determinação dos valores de *n* exige a realização de ensaios de injeção de água a duas pressões diferentes, e deles se deduzem e classificam os regimes de escoamento que a seguir se indicam.

$n < 1$ – Regime anormal por aumento de absorção	Aa
$n = 1$ – Regime laminar ($v = ki$)	L
$1 < n < 2$ – Regime intermédio	I
$n = 2$ – Regime turbulento ($v = k \sqrt{i}$)	T
$n > 2$ – Regime anormal por diminuição de absorção	Ad

Considerando que existem erros provenientes das leituras, do manómetro, do hidrómetro e do cronómetro, bem como da falta de constância da pressão durante o tempo de ensaio, admite-se para o valor de n uma variação de mais ou menos 10%.

Na prática, para cada um dos referidos regimes de escoamento atribui-se ao bolbo do maciço rochoso, envolvente do furo, as seguintes características de percolação:

— *Regime anormal por aumento de absorção.*

As aberturas das fissuras do bolbo rochoso abrangidas pela água injectada não se mantêm durante o ensaio devido ao arrastamento dos minerais que as preenchem e, ou, à deformação elástico-plástica do próprio maciço.

— *Regime laminar.*

Ou as fissuras são muito fechadas ou, no caso de estarem ligeiramente abertas, estão preenchidas por minerais de grão muito fino e homogéneo.

— *Regime turbulento.*

As fissuras estão relativamente abertas e de paredes rugosas, ou, se estas forem lisas, os minerais que preenchem aquelas deverão ser de grão heterogéneo.

— *Regime anormal por diminuição de absorção.*

Admite-se neste caso que os minerais que preenchem as fendas existentes no maciço rochoso envolvente do troço em ensaio, são arrastados pela água injectada e fixam-se em fracturas um pouco mais afastadas, obturando-as parcialmente.

A subida do «nível freático» ou a compressão do ar retido em bolsadas poderão contribuir para a ocorrência deste regime.

Convém recordar que as pressões referidas são indicadas pelo manómetro instalado à boca do furo. O valor da pressão de injeção a meio do troço ensaiado será dado pela expressão:

$$P = P_m + \frac{H}{10} - \frac{P_c}{10} \text{ em que:}$$

P — é a pressão de injeção a meio do troço em ensaio, em kgf.cm^{-2} ,

P_m — a pressão lida no manómetro, instalado à boca do furo, em kgf.cm^{-2} ,

H — a diferença de cotas, expressa em metros, medida entre o manómetro e o ponto médio do troço a ensaiar, ou entre aquele e o nível freático se este estiver acima do ponto referido, e

P_c — o somatório das perdas de carga, distribuídas e localizadas ao longo da tubagem e acessórios, expressa em metros de altura de água. Quando não houver absorções este valor reduz-se a zero.

Aquela expressão apenas tem interesse teórico dada a dificuldade da sua utilização prática.

2.1.3 — Tendência das fracturas e devoluções de água

A tendência das fracturas para a colmatagem ou desobstrução, e eventualmente para a indiferença, determina-se por comparação dos valores da admitância medidos, à mesma pressão e durante o mesmo intervalo de tempo, nos ensaios que antecedem e sucedem os da injeção à pressão máxima que, em geral, é dupla das outras duas.

Embora o comportamento das fracturas ainda leve a prever a tendência natural do maciço rochoso para a colmatagem ou para a desobstrução, já os regimes de escoamento não têm qualquer interferência nos trabalhos subsequentes quer de impermeabilização quer de consolidação, facto que leva a pôr em dúvida a sua determinação dentro do actual aproveitamento de dados. Talvez as gerações vindouras encontrem interesse prático naquela determinação.

Como se disse, dos ensaios hidráulicos tipo Lugeon, realizados durante a fase de estudo, apenas o valor do coeficiente de admitância conta para a definição da profundidade acima da qual se torna necessário injectar o maciço rochoso. As devoluções de água, que por vezes ocorrem imediatamente a seguir aos ensaios Lugeon, resultam da deformação elástica do maciço rochoso, ou da descompressão de bolsas de ar comprimido por aquela água, devem ser tidas em conta na condução dos trabalhos de injeção de calda.

Quando estas devoluções ocorrem devem ser registados o valor da pressão e o volume de água devolvida.

2.1.4 – Profundidade máxima dos furos

O termo da perfuração de cada furo será determinado, como é habitual, quando o coeficiente de admitância, expresso em U.A. e calculado a partir do volume de água absorvida, for inferior a determinado valor que depende do tipo de barragem, da sua carga hidráulica e da natureza geológica do maciço rochoso de fundação.

Em fase de estudo, recomenda-se que, em formações de litologia mais ou menos homogénea, qualquer furo só seja dado por concluído depois de perfurar dois troços consecutivos⁽¹⁾, de 5 metros cada, com absorções iguais ou inferiores ao valor da admitância previamente fixado.

Para os limites inferiores do coeficiente de admitância, sugerem-se os valores de 0,1 U.A. para as barragens rígidas e de 0,2 U.A. para as não rígidas de alturas superiores a cerca de 30 metros, e de 0,3 U.A., ou mesmo mais incluindo o não tratamento, para as pequenas unidades de armazenamento hídrico construídas em estruturas não rígidas e com uma extensa base de apoio.

Para as barragens de estrutura rígida inferiores a 30 metros o limte de admitância deveria ser de 0,2 U.A., valor que poderá subir à medida que a altura daquelas diminui.

Todavia, considera-se que a profundidade máxima a atingir em cada furo não deva exceder, em geral, 1,5 vezes a máxima altura da barragem.

Esta sugestão apoia-se no facto do somatório das perdas de carga sofridas pela água, ao percolar em regime laminar abaixo daquela profundidade, serem de tal modo elevadas, sobretudo nas barragens de terra, que somente caudais desprezíveis atingem, normalmente, o pé de jusante destas.

Exceptuam-se, como é óbvio, casos pontuais quando comprovados pelos elevados valores das absorções.

É do conhecimento geral que os maciços rochosos com admitâncias inferiores a 0,1 U.A. (1 U.L.), são praticamente impermeáveis, e por conseguinte não injectáveis com calda.

2.2 – Em fase de obra

Nos últimos anos, nalguns projectos de cortinas de impermeabilização de barragens, sobretudo de terra, constava a execução preliminar de um pequeno número de furos primários, com sonda mecânica rotativa equipada com amostrador de parede dupla, onde se realizavam ensaios de injeção de água tipo Lugeon, seguidos da injeção de calda.

⁽¹⁾ mas um troço na fase de execução da cortina.

Após a apreciação dos elementos colhidos naqueles furos deveria proceder-se ao «ajustamento» de algumas especificações técnicas do projecto da cortina. Todavia, a demora na elaboração e apreciação do respectivo relatório impediam que, em data oportuna, tivesse lugar, qualquer alteração àquele. Também não consta que dos dados obtidos naqueles furos se tenha alguma vez concluído qual o afastamento mais recomendável para os restantes furos da cortina.

Este facto permite concluir que esta metodologia não tem interesse técnico e apenas serve para onerar o custo da cortina.

Apesar destes furos fazerem parte da cortina de impermeabilização, o custo da sua furação é bastante mais elevado do que se esta tivesse sido executada com supermartelo, como é recomendável.

Por outro lado, nos ensaios Lugeon a realizar em fase de obra, que deverão ser seguidos da injeção de calda antes do abandono de cada furo, é frequente utilizar, pelo menos, 3 pressões diferentes de injeção de água com a duração de 10 minutos cada, o que totaliza um tempo mínimo de 30 minutos, excluindo os períodos em que as pressões não estão estabilizadas.

A baixa permeabilidade que caracteriza, em geral, os maciços rochosos meteorizados, leva a admitir que apenas um pequeno volume daquele fluido se afasta de cada furo, embora com certa lentidão, até estabilizar o «nível freático».

Parece evidente que a água retida nas imediações de cada troço ensaiado deva prejudicar a penetração da calda uma vez que esta terá de vencer a oposição daquela.

2.2.1 — Número de patamares de pressão. Tempo de ensaio

Com base naquela interpretação sugere-se que, na fase de execução das cortinas de impermeabilização, a injeção de água deva ter lugar a uma só pressão, o tempo de injeção seja reduzido de 10 para 5 minutos e a realização destes ensaios restringida apenas, à parte terminal de cada furo. O primeiro destes ensaios deveria ser realizado cerca de 5 metros acima do limite inferior previsto no projecto para a cortina de impermeabilização.

A aceitação desta sugestão irá traduzir-se não só numa redução do custo da cortina, embora pequena, mas também, e sobretudo, pela desnecessária e até prejudicial injeção de água na parte superficial do maciço rochoso — aliás a mais importante no processo não só de impermeabilização mas também de consolidação — que as sondagens executadas na fase de estudo evidenciaram já a necessidade de tratamento. A «substituição» de água por calda nas fracturas onde esta penetre irá, logicamente, favorecer a eficácia da cortina de impermeabilização.

2.2.2 – Pressões de injeção

Os valores das pressões a utilizar nos ensaios Lugeon durante a execução da cortina de impermeabilização são idênticos aos referidos no capítulo 2.1.1. para a fase de estudo. Em qualquer dos casos, aqueles valores deveriam ser representados por números inteiros, a fim de facilitar o trabalho do operador na leitura do manómetro durante a execução dos ensaios.

Na zona dos encontros da barragem, onde a carga hidráulica à superfície do terreno tende para zero à medida que a cota desta se aproxima da do pleno armazenamento, não parece justificável que se altere a pressão de injeção da água, porque a calda ali a injectar não irá sofrer qualquer redução no valor da pressão.

3 – MINICORTINAS DE ENSAIO

3.1 – Esquema, perfuração e ensaios Lugeon

Em substituição dos furos primários, que como foi referido no início do capítulo 2.2. constituíam a fase preliminar da cortina de impermeabilização, julga-se preferível, técnica e economicamente, executar com supermartelo alguns furos de ensaio em cada margem, no alinhamento e com a atitude geral da cortina, em locais que pareçam reunir características representativas do maciço rochoso, com o fim de determinar o afastamento mais recomendável entre os furos daquela.

Se o coroamento da barragem tiver um desenvolvimento muito reduzido sugere-se a realização daquele estudo apenas na margem que reunir características petrográficas e estruturais predominantes.

A experiência colhida no País sobre o afastamento de furos em cortinas de impermeabilização conduz a afirmar que, em geral, as distâncias entre estes têm oscilado entre 3 e 6 metros.

Os furos da minicortina, por exemplo em número de 5, deverão ser executados por ordem numérica e como se indica no esquema da Fig. 1, acompanhados da realização de alguns ensaios de injeção de água tipo Lugeon, o primeiro dos quais (como se sugeriu em 2.2.1.) no troço de 5 metros imediatamente acima da máxima profundidade prevista para a cortina (assim como nos troços seguintes se as admissões o justificarem) com a duração de 5 minutos e num só patamar de pressão.

As considerações que se seguem referem-se ao estudo de uma minicortina.

Depois de terminada a perfuração no primeiro dos 5 furos, este deverá ser tamponado de modo que na extremidade superior possa ser roscada uma tampa preparada para receber um manómetro destinado a medir o valor da pressão de interferência da água e da calda a injectar nos outros furos.

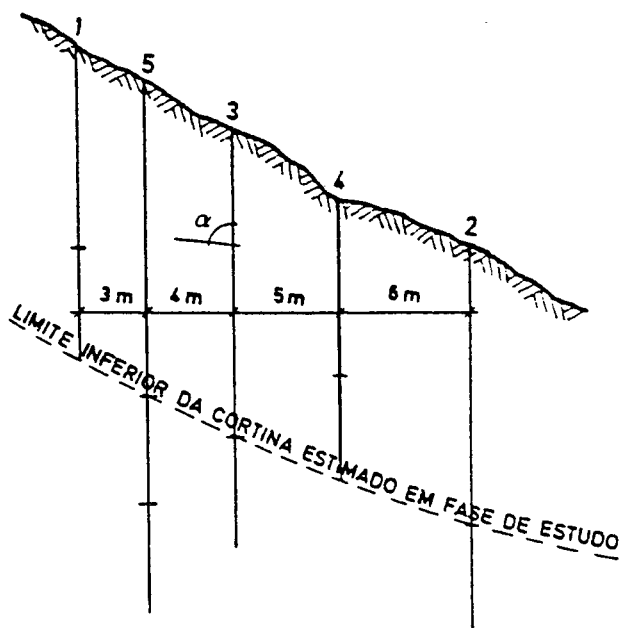


Fig. 1 – Esquema de uma minicortina

Idêntico dispositivo deverá ser, progressivamente, instalado nos restantes furos.

Antes do início de qualquer ensaio Lugeon, deverão ser medidos e registados os níveis da água em cada furo da minicortina. Analogamente, durante a execução daqueles ensaios, convirá que se proceda à leitura dos manómetros ali instalados.

Apesar das heterogeneidades estruturais que ocorrem em qualquer maciço rochoso julga-se que, durante a execução dos ensaios de injeção de água em cada troço, todos, ou quase todos, os restantes furos deverão ser afectados pela água injectada.

Os diferentes valores medidos para as pressões, relacionados com os registados nos troços dos furos que lhes deram origem, são elementos que convém registar para posterior análise e provável determinação da direcção e sentido preferencial de circulação da água, e posteriormente da calda, factor que, eventualmente, poderá contribuir para melhorar a eficácia da cortina de impermeabilização.

Os furos desta cortina, bem como os das minicortinas, deverão interceptar, nas melhores condições de atitude, as referidas discontinuidades com circulação aquífera.

3.2 – Injecções de calda

Uma vez concluído o último ensaio Lugeon no furo 5 deverá ser iniciada a injeção de calda por troços ascendentes de 5 metros cada.

De acordo com a Fig. 1 sugere-se que a ordem dos furos a injectar com calda seja a seguinte:

4, 5, 3, 2 e 1

Esta ordem tem por fim controlar o efeito da calda nos furos 2 e 3, afastados de 6 m e 5 m, respectivamente, do 4, onde aquela será injectada em primeiro lugar. Analogamente para os furos 1 e 3, afastados de 3 m e 4 m, respectivamente, do 5, que será o segundo a ser injectado.

Durante a injeção da calda em cada troço do primeiro furo, o 4, os restantes, ou pelo menos os mais próximos, deverão, com grande probabilidade, ficar cheios de calda, facto que obrigará à reperfuração destes para o prosseguimento das injeções no segundo furo, o 5, e assim sucessivamente.

Quando qualquer dos furos estiver a ser injectado é indispensável que se proceda à medição e registo dos valores das pressões em cada um dos restantes.

Aquando da injeção de calda em cada um dos diferentes troços do furo 4, ou dos seguintes, mesmo que a pressão não suba em qualquer manómetro, convém que, depois, sejam registados os comprimentos obturados dos furos vizinhos, bem como o trecho do que foi injectado, o valor da pressão de injeção e a relação cimento/água da calda que lhe deu origem.

Depois, deverá proceder-se à reperfuração dos furos obturados, com excepção dos troços já definitivamente injectados.

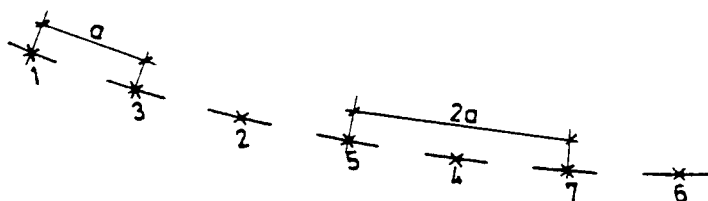
Durante a injeção de calda no furo 2 não parece justificável a reperfuração do 1, dada a distância que os separa. Todavia, como este é o último a ser injectado, há, pois, que proceder à sua reperfuração, se estiver obturado, de preferência antes da injeção daquele, a fim de se avaliar da eventual, embora remota, interferência entre ambos.

4 – RESTANTES FUROS DA CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Depois de concluídas as minicortinas e definida a distância mais recomendável entre os restantes furos da cortina de impermeabilização sugere-se que estes sejam executados pela ordem numérica indicada na planta esquemática que se segue:

Se o afastamento a não for superior ao tecnicamente recomendável, a quantidade

de calda absorvida por metro nos furos 3, 5, 7, etc., não deverá, em geral, ser superior aos valores injectados em cada um dos furos 1 e 2, 2 e 4, 4 e 6, etc., respectivamente.



a) afastamento inferido do estudo das minicortinas.

Fig. 2 – Ordem de execução dos restantes furos da cortina.

Em qualquer destes furos, sugere-se que a injeção de calda tenha lugar após a perfuração do primeiro troço de 5 metros em rocha, no qual, como é habitual, não deve ser executado qualquer ensaio Lugeon.

Com aquela injeção pretende-se impermeabilizar a parte externa do maciço rochoso a fim de evitar eventuais fugas ascendentes de calda a injectar nos troços inferiores de cada furo.

Depois dos primeiros 5 metros de cada furo serem injectados com calda, a perfuração deverá prosseguir, sem ensaios Lugeon, até que seja, aproximadamente, atingido o limite inferior do maciço rochoso a tratar.

Como foi sugerido em 2.2.1., é nos 5 metros anteriores que, em cada furo da cortina, deverá ter lugar o primeiro daqueles ensaios com injeção de água a uma só pressão, igual ao valor mais elevado aplicado nas minicortinas de ensaio. Depois disto, a perfuração deverá prosseguir por troços de 5 metros, acompanhada da realização de ensaios Lugeon, também a uma só pressão e durante 5 minutos, até à medição de admitâncias inferiores ao valor previamente fixado para aquele local de barragem.

Em cada furo, após concluída a perfuração, deverá iniciar-se de seguida a injeção da calda por troços ascendentes de cerca de 5 metros cada.

A determinação da dimensão destes troços obtém-se dividindo o comprimento total do furo pelo número de trechos a injectar.

O troço superior dos 0,00 aos 5,00 deverá ser reinjectado imediatamente antes da conclusão de cada furo.

A atitude geral dos furos da cortina de impermeabilização, poderá ser determinada, por exemplo, por meio de projecção estereográfica, com base nas atitudes médias das famílias das descontinuidades existentes no maciço rochoso; diaclases, juntas de estratificação (se for caso disso), etc.. Das soluções possíveis deverá ser preferida, como é sabido, a atitude mais próxima da vertical que desça para montante.

Dentro da cronologia de execução da obra, quer os furos das minicortinas de ensaio quer os da restante cortina de impermeabilização poderão ser realizados já em fase adiantada de construção da barragem ou antes do saneamento da fundação que, sobretudo em barragens de terra, é preferível em muitos casos.

Para esta solução deverá ser aberta uma vala, com retroescavadora, segundo o traçado previsto para a execução da cortina e até à profundidade de cerca de 2 metros.

No fundo daquela vala convém que seja colocada uma capa de betão ciclópico, de cerca de 0,5 metro de espessura, com o fim de dificultar as fugas de calda dos furos das cortinas localizadas no seu eixo.

Esta solução tem a vantagem de permitir controlar eventuais fugas daquele fluído para a superfície.

O critério de execução de cortinas de contenção a montante e, ou, a jusante da de impermeabilização só parece merecedor de aceitação quando os maciços rochosos se apresentam muito fracturados (com importantes filões de quartzo), em zonas de calcários carsificados ou em formações lávicas cavernosas.

Na execução destas cortinas, sobretudo nas formações cavernosas, torna-se, por vezes, necessário proceder ao alargamento dos furos e ao seu enchimento com betão, para posterior contenção da calda a injectar na cortina de impermeabilização.

Mostra a experiência que não existe, em geral, nenhuma relação entre os volumes de água admitidos pelo maciço rochoso nos ensaios Lugeon e os da calda injectada.

A justificação para este facto deve residir nas diferentes pressões e viscosidades dos fluídos aplicados.

O problema da lavagem das fissuras antes das injeções de calda é bastante controverso e porque se aplica, quase exclusivamente, na consolidação de maciços rochosos, não parece oportuno dar-lhe algum desenvolvimento uma vez que o presente trabalho foca, fundamentalmente, a impermeabilização.

5 – PRESSÕES E TIPOS DE CALDAS DE INJEÇÃO

Trata-se, também, de um problema susceptível de polémica, tal como os anteriormente tratados.

Como se referiu, o primeiro troço a ser perfurado em rocha (com cerca de 5 metros de comprimento) deve ser seguidamente injectado com calda. Para este caso sugere-se, que o valor da sua relação cimento/água seja, inicialmente, da ordem de

1/4. Todavia, se houver uma apreciável perda de água durante a perfuração do troço referido, aquela relação poderá subir, por exemplo, para 1/2 ou mesmo mais.

Nos troços seguintes de cada duro, mas anteriores ao primeiro com ensaios Lugeon, o maior ou menor caudal de retorno da água de perfuração é um elemento importante para a escolha da composição inicial da calda.

Se durante a injeção do primeiro volume de calda, preparada com uma baixa concentração de cimento, o manómetro da bomba não acusar subida da pressão, proceder-se-á de seguida, como é habitual, à introdução de nova calda menos fluida, e assim sucessivamente.

A injeção de calda, em cada troço, só será dada por concluída quando o ponteiro do manómetro atingir o valor previamente fixado para a pressão e apresentar tendência para subir, ou a absorção for baixa.

Com vista a aumentar a penetrabilidade da calda sugere-se que, na medida do possível, seja utilizado cimento especial de grão muito fino.

Cita-se a título de exemplo que os americanos utilizam cimento de grão inferior a 325 «mesh», isto é, de dimensão menor do que 45μ .

Para o primeiro troço de 5 metros, dada a proximidade da superfície, a pressão de injeção da calda não pode ser muito elevada e depende das tensões transmitidas ao maciço de fundação pela obra já construída, se as injeções tiverem lugar em data posterior ao seu início. Neste caso o obturador terá de ficar instalado imediatamente acima da superfície de fundação, para que possa injectar o contacto da obra com o terreno.

Assim, considera-se que a pressão máxima de injeção deva ser dada pela seguinte expressão:

$$P = 0,1 \times 0,1 \times C \times \gamma \times h \dots\dots\dots \text{kgf.cm}^{-2}$$

em que,

C – é o valor do coeficiente a aplicar e deverá variar entre 1 e 1,5

γ – é o peso específico do material constituinte da obra em Ton.m^{-3} (aterro = 1,9 betão simples = 2,4 e betão armado = 2,5) e

h – é a altura do aterro ou do betão expressa em metros.

No caso da cortina ser executada a partir da vala referida (nos locais onde o maciço rochoso for mais são poderá não existir) e uma vez que é possível exercer um controlo directo das fugas de calda para a superfície, sugere-se que a pressão de injeção nos primeiros 5 metros de furo abaixo do betão seja da ordem dos $2,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$, a que correspondem os valores de $C = 1,5$ $\gamma = 2,8 \text{ Ton.m}^{-3}$ (o xisto tem um peso específico compreendido entre 2,77 e 2,84) e $h = 5,9 \text{ m}$.

Convém salientar que as pressões de injeção desempenham um papel importante na deformação da rocha e na abertura das fissuras, a qual aumenta com a pressão e é inversamente proporcional ao módulo de deformabilidade do maciço rochoso.

Segundo Sabarly (1968) a variação das pressões de injeção com a profundidade apoia-se em duas regras; a europeia e a americana.

Na regra europeia utiliza-se o valor de 1 kgf.cm^{-2} por metro de profundidade e na americana 1 p.s.i. (libra por polegada quadrada) por pé, isto é, $0,23 \text{ kgf.cm}^{-2}$ por metro.

A fórmula anteriormente referida para estimar o valor da pressão de injeção de calda nos primeiros 5 metros procura situar-se entre as duas regras e pretende ser uma solução equilibrada para aquele objectivo.

A partir da primeira dezena de metros de profundidade a regra europeia tem sido correntemente aplicada, salvo casos raros de maciços rochosos muito fracturados nos quais, por razões óbvias, não seria sensato aplicá-la. Todavia, como a parte mais importante do maciço rochoso a consolidar e a impermeabilizar se localiza no seu «bolbo superior», subjacente à barragem, as grandes pressões de injeção utilizadas em profundidade parecem ter um interesse muito reduzido, com excepção de casos particulares, onde a fuga de caudais significativos tenha elevada probabilidade de ocorrência.

A utilização de uma calda com grãos muito finos parece preferível às grandes pressões de injeção que, sobretudo em descontinuidades horizontais, podem provocar a subida da rocha contribuindo negativamente para a estabilidade da obra.

De qualquer modo, julga-se que as pressões máximas de injeção de calda devam ter em conta o número de casos de devolução de água ocorridos nos ensaios Lugeon bem como os valores da sua pressão de devolução.

Se nos ensaios Lugeon em fase de estudo houver vários casos de devolução de grandes volumes de água (donde se infere a presença de cavernas de importantes dimensões) sugere-se que os máximos valores das pressões de injeção de calda não sejam muito elevados uma vez que podem dar origem a roturas.

Cite-se a propósito que há cerca de 13 anos o encontro direito da Barragem da Bravura (Odeáxere) foi reconsolidado com injeções de calda cuja pressão máxima não excedeu 7 kgf.cm^{-2} .

Para barragens de grande altura e cortinas profundas as máximas pressões de injeção poderão atingir 40 kgf.cm^{-2} , ou mesmo mais, desde que as características do maciço rochoso o permitam e justifiquem.

Quanto ao tipo de calda a aplicar há que ter em conta, mais uma vez, os aspectos técnico e económico.

Se se trata de uma cortina cuja função é exclusivamente impermeabilizar, por razões económicas considera-se haver interesse em utilizar elevada percentagem de argila da região, se houver.

Para consolidação do maciço rochoso parece recomendável que a calda seja constituída, quase exclusivamente, por cimento. Todavia, o factor petrográfico também desempenha um papel importante no processo uma vez que a aderência cimento-rocha é muito baixa quando o maciço rochoso é constituído por xistos (ou filádios), grafitosos, talcosos, etc.

De qualquer modo, é do conhecimento geral que quanto mais fino for o produto a injectar maior será o raio de acção da calda e menor a sua velocidade de decantação.

A propósito de tipos e características de caldas parece oportuno referir que a cortina de impermeabilização da Barragem de Peruca, na Jugoslávia (de enrocamento com núcleo de argila) com 63 metros de altura, foi executada com uma mistura de 70 a 75% de argila e 30 a 25% de cimento Portland 250.

Os resultados dos ensaios laboratoriais desta calda foram os seguintes:

N.º de dias decorridos	Resistência à compressão (kgf.cm ⁻²)	Retracção (%)	Permeabilidade (cm/s)
7	12	—	—
28	34	—	—
56	53	—	—
90	—	0,2	10 ⁻¹⁰

O tempo de sedimentação daquela calda era de 24 horas.

Desconhece-se o tipo de argila utilizada, todavia, julga-se que ela deve ter sido retirada de «terra rossa» (solo residual do calcário), uma vez que a barragem e a albufeira se desenvolvem sobre um maciço calcário. Da análise do quadro anterior infere-se que a mistura argila-cimento, nas proporções referidas, deu origem a uma calda óptima, do ponto de vista de permeabilidade. Quanto à retracção e resistência à compressão também se pode considerar excelente para ser utilizada não só na impermeabilização mas também na consolidação do maciço rochoso de fundação de qualquer barragem.

Na bibliografia que se cita no fim do presente trabalho, consta parecer estar comprovado em diversas obras hidráulicas que se uma calda, depois de consolidada, tem uma resistência à compressão superior a 20 kgf.cm⁻² existe a garantia de que ela terá um bom comportamento quer do ponto de vista mecânico quer à erosão interna do maciço rochoso.

Parece, pois, oportuno sugerir que, nos Cadernos de Encargos referentes a estas empreitadas, deva ser exigido aos concorrentes a apresentação, nas suas propostas, de

dados quanto à composição das caldas (em argila, cimento e água) e suas características, tendo em conta a natureza litológica do respectivo maciço rochoso.

Com base nesta litologia convém que sejam apresentadas as características das caldas mais ajustadas ao fim em vista, tais como:

- granulometria da fase sólida ou a percentagem de grãos de dimensão inferior a determinado valor, por exemplo 325 «mesh» (45μ) ou 200 «mesh» (74μ).
- estabilidade da suspensão
- fluidez e viscosidade dinâmica
- tixotropia
- resistência mecânica à compressão
- retracção
- permeabilidade
- aderência à rocha a tratar
- etc.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Julga-se que as sugestões apresentadas caracem de alguma meditação no que se refere aos aspectos técnico e económico.

No que se refere à execução das minicortinas de ensaio, admite-se que possam ocorrer eventuais dificuldades não só na sua execução mas também, e sobretudo, na interpretação dos resultados que terão de ser devidamente estudados com o fim de se atingir o objectivo pretendido.

Ainda parece oportuno salientar que, para uma maior eficácia das cortinas de impermeabilização, deve passar a haver controlo dos desvios dos furos de injeccção relativamente à sua atitude de projecto.

Para cortinas profundas, sobretudo nos furos inclinados, devem ser controladas com clinómetro as atitudes daqueles, recusando os que apresentem desvios superiores a 3,0% por exemplo.

Os outros aspectos aqui abordados, na grande maioria de índole prática, tiveram sempre por objectivo obter, por um lado, a eliminação de trabalho supérfluo, com o consequente abaixamento do custo da obra, e, por outro, o aumento da eficácia das cortinas de impermeabilização de maciços de fundação de barragens.

É evidente que se um dia for possível determinar outras características do maciço rochoso a partir dos ensaios de injeção de água tipo Lugeon, a realizar a pressões eventualmente superiores a 10 kgf.cm^{-2} , bem como a sua correlação com as pressões de injeção de calda, grande parte das sugestões apresentadas poderão perder o interesse que presentemente possam ter.

É por isso que a matéria apresentada não constitui uma receita infalível, pelo que deve ser tomada como sugestão para que cada técnico, com a sua experiência, possa aproveitar as ideias expostas de modo a contribuir para a economia e e segurança das obras de aproveitamentos hidráulicos de superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO ALVAREZ MARTINEZ (1970) – Ministério de Obras Públicas. Direccion General de Obras Públicas. Serviço Geológico. – Informaciones y Estudios. Boletin n.º 33.
- SABARLY (1968) – “Les injections et les drainages de fondations de barrages en roches peu permeables”. Géotechnique – Vol. XVIII, June.
- VICTOR F.B. DE MELO e PAULO T. DA CRUZ (1959) – “Some quantitative investigations on curtain grouting in rock foundations of earth dams”, Pan American Conference on Soil Mech. and Found. Eng., México.