

4

A técnica do Pressiômetro e sua Aplicação na Determinação de Propriedades Mecânicas das Rochas

4.1.

Introdução

O primeiro modelo de pressiômetro foi desenvolvido por Kogler no ano de 1933 na Alemanha. Na década de 60, o engenheiro francês Louis Menard fez avanços significativos no aparelho original de Kogler. Voltando para França depois de terminar seus estudos na Universidade de Illinois Menard fundou o Centre d'études Louis Menard com a finalidade de difundir a aplicação deste equipamento, segundo Briaud apud Bello (2004) a primeira aplicação ocorreu na cidade de Chicago, EUA com o intuito de obter propriedades de deformabilidade do solo para fins de projeto de fundações.

O engenheiro francês Jezequel, desenvolveu o primeiro pressiômetro autoperfurante (PAF) no Laboratoire des Points et Chaussées (LPC), e desde então tem ocorrido avanços significativos em termos de equipamentos, metodologia de interpretação prática e aplicação do ensaio pressiométrico. Consequentemente, grupos especializados no desenvolvimento e comercialização de novos equipamentos foram constituídos ao redor do mundo, incluindo *Cambridge in situ*, *Fugro B.V.*, *Hogentogler*, *Rocktest*, *Texas A & M University* e a *Universidade de British Columbia* para citar alguns exemplos (Bello, 2004).

O ensaio pressiométrico basicamente consiste na expansão de uma membrana flexível dentro de um furo por efeito de um fluido injetado, até conseguir deformar o furo. A pressão do fluido e o volume de fluido equivalente ao volume de deslocamento do material são registrados. O módulo de deformabilidade é encontrado a partir de gráficos de pressão interna em função da quantidade de volume do fluido injetado na membrana ou em função das variações de diâmetro ocorrido pela membrana flexível (Galera, 2005).

Os primeiros modelos de pressiômetro desenvolvidos na década de 60 foram aplicados a solos de alta deformabilidade e que não requeriam grande precisão nas medidas de deformação (que se realizava volumetricamente), nem nas de pressão.

O pressiômetro usado em rocha geralmente apresenta uma membrana mais grossa e resistente para poder conseguir aplicar pressões maiores. Devido a estas características, elas são menos sensíveis e tem menos capacidade de expansão (Galera, 2005).

O dilatômetro surgiu na década de 70 como adaptação do pressiômetro de Menard, para aplicação em rochas. Rocha no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal) foi um dos primeiros a desenvolver este tipo de equipamentos. A inovação deste equipamento era o sistema de medida da deformação, a qual não era volumétrica senão direta.

Diferentemente da maioria dos solos, um maciço rochoso é muito mais heterogêneo, descontínuo e bastante anisotrópico, resultando que em alguns casos (xistos, filitos, rochas estratificadas, etc.) é indispensável considerar a forte anisotropia existente, já que afeta fortemente sua deformabilidade.

Em um ensaio dilatométrico mede-se a deformação direta em seis direções (três diâmetros) a partir de sensores localizados ao redor do furo. A leitura se realiza em 6 canais correspondentes a 6 sensores que formam um ângulo de 60° um de outro, podendo-se posteriormente representar indistintamente os três raios medidos, ou a curva média de deformação (Galera, 2005).

Como resultado de um ensaio pode-se conhecer a anisotropia do terreno, aliás, permite medir módulos na fase de descarregamento. Um dos modelos mais usados é o chamado Dilatômetro de Alta Pressão (High Pressure Dilatometer – HPD), desenvolvido por Hughes & Ervin (1980).

Um outro método cujo princípio básico é também a injeção de fluido dentro de uma membrana expansível é o método do *Sleeve Fracturing*, originalmente desenvolvido para determinar tensões *in situ*, permite também a partir da estimativa do coeficiente de Poisson determinar o módulo de deformabilidade.

O método foi primeiro proposto por Stephansson (1983) e em linhas gerais segue o mesmo princípio do fraturamento hidráulico desenvolvido para a determinação de tensões *in situ*. Uma membrana é inserida dentro de um furo e depois pressurizada, como no caso do fraturamento hidráulico, uma fissura é

iniciada nas paredes do furo, uma vez que a pressão aplicada excede a resistência à tração da rocha gerando uma fratura em direção perpendicular à menor tensão horizontal *in situ* (Serata, 1986).

As tensões principais máximas e mínimas atuantes no plano perpendicular ao furo são determinadas pela pressão de fechamento e de abertura de uma fratura simples ou dupla nas paredes do furo, a obtenção das tensões é feita com base na solução de Kirsch. Até a fratura o ensaio é essencialmente um ensaio dilatométrico o qual pode ser usado para determinar o módulo de deformabilidade do maciço rochoso, assumindo um valor do coeficiente de Poisson (Amadei, 1997).

Galybin et al. (1997) propôs um novo método para determinar os módulos de deformabilidade do maciço rochoso além de permitir determinar também a magnitude das tensões *in situ* em grande escala. Este método é baseado no método do macaco cilíndrico proposto por Dean & Beatty (1968), que consiste na medição de deslocamentos radiais gerados na rocha pelo macaco cilíndrico dentro de um furo de sondagem. Galybin (1997) observou algumas imperfeições nesse método:

- ü Proximidade entre a posição dos pinos e o furo principal, restringindo a escala de medida das tensões e afetando o grau de exatidão.
- ü O sistema de medidas interfere com nas operações de perfuração e por isso para a execução têm que ser utilizados transdutores removíveis.

O esquema proposto por Galybin et al. (1997) elimina estas falhas e permite a reconstrução dos parâmetros de deformabilidade da rocha na escala de escavação.

O trabalho aqui apresentado baseia-se na técnica original desenvolvida por Dean & Beatty e modificada por Galybin, foram também feitas algumas modificações para melhorá-la sem afetar seu grau de precisão e exatidão.

4.2.

Hipótese e Fundamentos da Técnica

4.2.1.

Descrição Geral do Método

O método consiste em injetar pressão de óleo dentro de uma membrana flexível, a membrana é expandida lateralmente até alcançar as paredes de um furo previamente perfurado. Medem-se posteriormente os deslocamentos produzidos

pelo processo de furação e pela expansão da membrana. Estes deslocamentos são relacionados com a magnitude das tensões principais *in situ*, e com os parâmetros de deformabilidade existentes na zona onde se realiza o ensaio.

O método está distribuído em várias etapas. Na primeira etapa são inseridos na rocha pinos de referência distribuídos nos vértices de um hexágono, aonde são instalados sensores de deslocamento colocados radial e circunferencialmente ao furo central.

Na segunda etapa é feito um furo central de aproximadamente 45 cm de profundidade e 6 cm de diâmetro aonde será colocado o equipamento. Durante a execução da perfuração é monitorada a variação da distância entre pinos (deslocamento relativo entre os pontos) até o furo atingir uma profundidade entre 30 a 40 cm; nesse momento a perfuração é paralisada e são registrados os deslocamentos produzidos pelo processo de relaxação da rocha.

Na terceira etapa continua-se com a perfuração do furo principal até alcançar uma profundidade de 45 cm, aqui o testemunho é retirado e é colocado o pressiômetro dentro do furo. Em seguida começa o processo de pressurização, aonde é injetado pressão de óleo na membrana do pressiômetro até conseguir deslocamentos significativos na rocha. São feitos vários ciclos de pressurização em estágios de carregamento e descarregamento medindo-se a variação de distância entre pinos. Os deslocamentos produzidos são registrados mediante um sistema de aquisição de dados, posteriormente os dados adquiridos são processados em um computador e são calculados os módulos de deformabilidade e a magnitude das tensões *in situ*. Na figura 4.1, mostra-se um esquema do ensaio.

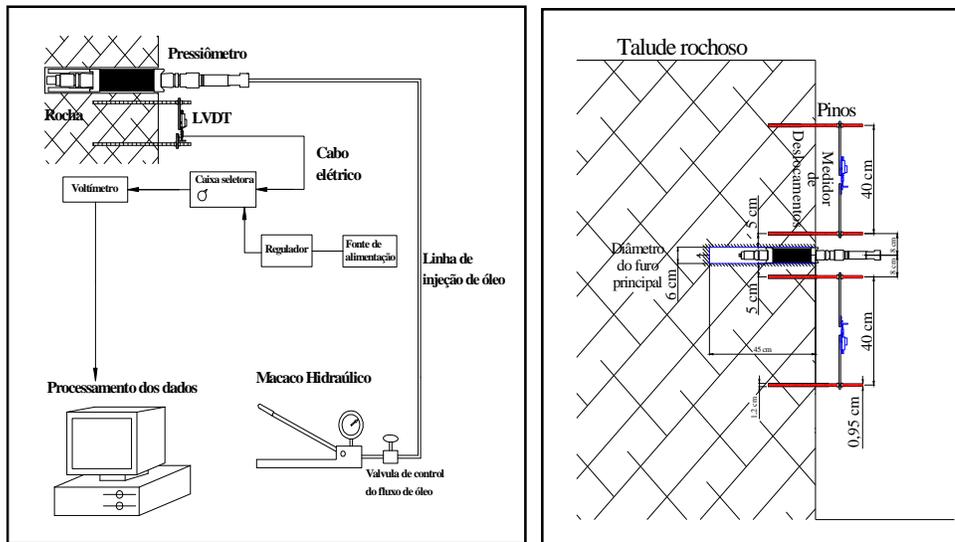


Figura 4.1 – Esquema do ensaio do pressiômetro

4.2.2.

Hipótese Adotada

Embora a análise das propriedades do maciço rochoso considere a complexidade do seu comportamento, o problema pode ser inicialmente simplificado considerando-o como um material contínuo, homogêneo, isotrópico e linearmente elástico.

Jaeger (1968) analisou o comportamento das tensões no interior de um furo em um maciço rochoso para medir o módulo de deformabilidade a partir da pressão de fluido uniformemente distribuído, que é injetado através de uma membrana impermeável a qual é inserida dentro de um furo. O diâmetro dos furos pode variar de poucos centímetros a vários metros como é o caso do ensaio de pressão de câmara. Os deslocamentos radiais u_R produzidos por uma pressão interna Q em um furo circular de raio R é dado pela equação 4.1.

$$u_R = -\frac{QR}{2G} \quad 4.1$$

Medidas da expansão diametral $2u_R$ e da pressão interna Q permitem determinar o módulo cisalhante G da rocha ao redor de um furo de sondagem ou de um túnel. Estes deslocamentos dependem do coeficiente de Poisson, portanto medidas em duas direções diferentes devem ser feitas para que o coeficiente de Poisson e o módulo cisalhante G sejam determinados.

A perfuração de um furo ou a escavação de um túnel é um processo de depressurização, o qual é definido como o inverso do processo de pressurização

descrito anteriormente. Assumindo-se que as dimensões do túnel ou do furo são conhecidas, a deformação resultante pode ser definida como a deformação causada pelo processo de remoção do campo das tensões na circunferência do furo. A deformação induzida na circunferência de um furo de raio R é definida pela equação 4.2.

$$ur = R(1 + u)[s_x + s_y + (s_x - s_y)(3 - 4u) \cos q] / 2E \quad 4.2$$

Essa equação é formulada para condições de deformação plana, onde s_x e s_y são as tensões normais ao eixo do furo e q é a direção entre o raio R e a direção de s_x . Se as deformações induzidas são medidas ao longo de três ou mais diâmetros em diferentes orientações e o módulo de Young é encontrado por um ensaio de pressurização a equação 4.2 pode ser usada para estimar o estado de tensões ao redor de um túnel o de um furo de sondagem.

As assunções feitas por Jaeger descritas anteriormente são as mesmas usadas no presente trabalho, mas como será visto nos próximos itens à formulação matemática empregada nos cálculos apresenta algumas variantes.

4.2.3.

Modelos Matemáticos Empregados

Matematicamente o método esta baseado na solução de Kirsch para um furo circular em um plano elástico isotrópico baixo condições de deformação plana. As mudanças em deslocamento são devidas primeiramente à perfuração do furo de raio R e depois à pressurização do furo aplicando uma pressão Q são representados pela equação 4.3 usando números complexos.

$$u_r(r, q) + iu_q(r, q) = \frac{R^2}{2Gr} \left\{ \frac{s_1 + s_2}{2} - Q + \frac{s_1 - s_2}{2} \left[ke^{-2i(q-j)} + \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) ke^{-2i(q-j)} \right] \right\} \quad 4.3$$

Onde r e q são as coordenadas polares com a origem situado no centro do furo, $u_r + iu_q$ é a expressão complexa para as componentes do vetor deslocamento em coordenadas polares, G é o módulo cisalhante, $k = 3-4\nu$, ν é o coeficiente de Poisson, s_1 e s_2 são as tensões principais, j é o ângulo entre a primeira direção principal e o eixo x do sistema de coordenadas de referência (x, y) .

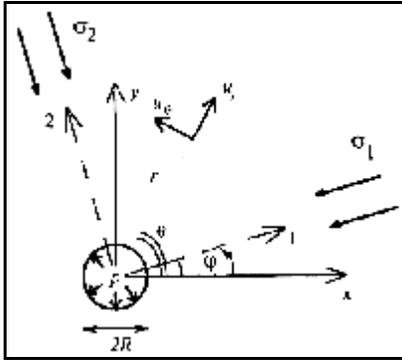


Figura 4.2 – Sistema de coordenadas relacionadas com o problema: (x, y) é o sistema de coordenadas relacionadas ao furo central; 1 e 2 são as direções das tensões principais (u_r, u_θ) são as componentes dos deslocamentos em coordenadas polares.

A equação 4.3 contém 5 parâmetros não conhecidos: os módulos de deformabilidade (G, k) e as características das tensões *in situ*, (s_1, s_2, j) . Para obter estes parâmetros, é necessário primeiramente considerar quatro medidas independentes de deslocamento em diferentes direções depois de perfurar o furo $(Q = 0)$, e pelo menos uma medição (uma componente de deslocamento) depois da pressurização.

Além disso, deve notar-se que a diferença dos deslocamentos antes e depois da pressurização é definida pela equação 4.4.

$$[u_r(r, q) + iu_q(r, q)]_{antes} - [u_r(r, q) + iu_q(r, q)]_{depois} = \frac{R^2 Q}{2Gr} \quad 4.4$$

Conhecendo a magnitude da pressão Q e a diferença entre as componentes de deslocamento radial é possível determinar diretamente o módulo cisalhante, enquanto a componente tangencial se mantém invariante, o qual poderia ser usado para controlar a qualidade das medidas.

4.3.

Esquema de Medidas Adotado

4.3.1.

Método Proposto por Dean & Beatty (1968)

Três características do campo de tensões *in situ* podem ser determinadas a partir de medidas feitas na superfície livre de escavação: $s_1, s_2, (s_3 = 0$ na superfície livre) e o ângulo j . No entanto precisam ser determinados os parâmetros de deformabilidade para o caso elástico isotrópico que são somente dois: o módulo de Young E e o coeficiente de Poisson ν . Estes parâmetros totalizam um valor de cinco parâmetros, que no caso bidimensional caracterizam

o estado tensão-deformação. Isto é para uma situação ideal 5 medidas independentes devem ser executadas e pelo menos uma delas deverá ter a unidade das tensões, a qual provê a reconstrução das magnitudes das tensões e do módulo de Young.

O método de macaco cilíndrico proposto por Dean & Beatty (1968) provê uma medida independente de tensões, a pressão fornecida pelo macaco. O esquema de execução do ensaio proposto por eles foi o seguinte:

1. Foram perfurados furos nos vértices de um octógono.
2. Pinos foram inseridos e deformametros colocados para medir as distâncias em quatro direções radiais.
3. Os medidores de deformação foram removidos e o furo central foi perfurado.
4. O macaco cilíndrico foi inserido dentro do furo central e os medidores de deformação foram reinstalados.
5. Foram medidas contrações entre os pinos radiais.
6. Mudanças entre as distâncias radiais foram monitoradas durante a pressurização do furo.
7. Os valores das tensões e os módulos cisalhantes foram obtidos mediante a análise de mínimos quadrados das medidas de deformação.

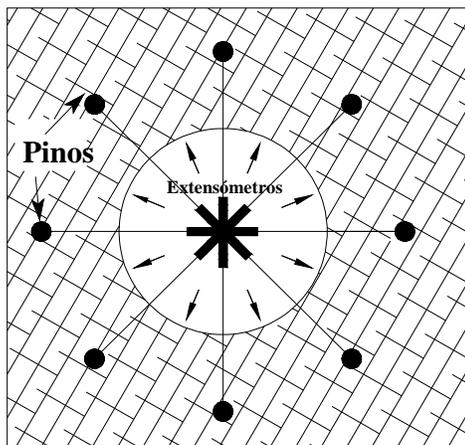


Figura 4.3 – Esquema de medidas proposto por Dean & Beatty para o método do macaco cilíndrico.

4.3.2.

Esquema de Medidas Proposto por Galybin & Dyskin (1999)

Galybin & Dyskin observaram alguns fatos no esquema de medidas adotado por Dean & Beatty (1968). Um fato é que foram monitorados somente deslocamentos radiais o que não é suficiente para recuperar a constante de Poisson (requerer-se-ia pelo menos uma medida na direção perpendicular); devido ao fato que os pinos de medida foram localizados perto ao contorno do furo central a escala de medida seria somente da ordem do diâmetro do furo.

Uma complicação relacionada com as equações 4.3 e 4.4 mostradas no item 4.2.3 é que as medidas das componentes radial e tangencial de deslocamento na superfície de escavação requereriam equipamentos especiais. Por isso Galybin propõe a medição dos deslocamentos (alongação e contração) ao longo de uma linha; as medições podem ser feitas utilizando transdutores ópticos, strain gauges de corda vibrante ou transdutores de deslocamento (LVDT's).

O número mínimo de medidas a ser tomadas vai depender das características da rocha. Para rochas isotrópicas são precisos pelo menos quatro extensômetros localizados em direções diferentes. Isto proporcionara quatro medidas independentes da mudança de deslocamentos depois que o furo foi perfurado e outras quatro depois da pressurização. Dessa maneira, têm-se medidas de redundância para a determinação do módulo de cisalhamento. Para a determinação do módulo de cisalhamento a melhor orientação dos extensômetros seria em direção radial de acordo com a equação 4.4. Porém, como foi visto da equação 4.3, somente as medidas de deslocamento radial ($\theta = \text{cte.}$) não são suficientes para separar $\sigma_1 - \sigma_2$ e k de seu produto. Por isso, adicionalmente são necessárias outras medições além das radiais..

Com todo isto se conclui que deve evitar-se que o esquema de medidas não interfira com as operações de perfuração e pressurização. Para satisfazer estas condições, Galybin sugere o arranjo simétrico mostrado na figura 4.4. Neste arranjo N medidas são obtidas em direções radiais (linhas A_1-C_1 , A_2-C_2 ,..., A_N-C_N na figura 4.4) e N medidas na direção circunferencial (linhas B_1-B_2 , B_2-B_3 ,..., B_N-B_1 na figura 4.4). O número de medidas N deve ser escolhido de tal forma que satisfaça os requerimentos de redundância (quatro como mínimo) e proveja a precisão para determinar as tensões e os módulos.

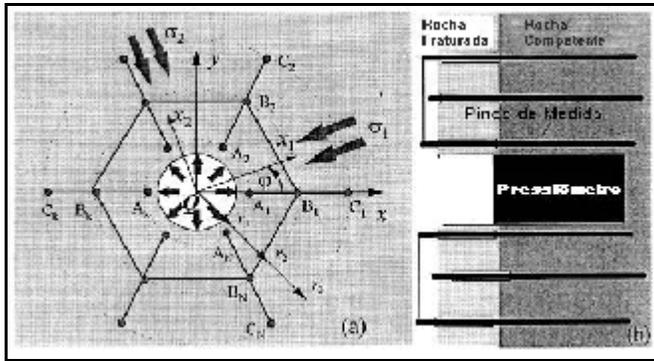


Figura 4.4 – Esquema de medidas proposto por Galybin et al

4.3.3.

Procedimento para a Reconstrução das tensões e o Módulo

4.3.3.1.

Variação da distância entre Pinos

Sejam $P_m(x_m, y_m)$ as coordenadas iniciais dos pinos inseridos dentro da rocha antes da perfuração do furo central e $I_{mn} = P_m - P_n$ seja o vetor que conecta dois pinos qualquer. O vetor deslocamento produzido depois da perfuração será $V(x, y) = \{u(x, y), v(x, y)\}$, por tanto pequenas variações de longitude d_{mn} dos vetores I_{mn} podem ser expressos pelo produto escalar apresentados na equação 4.5.

$$d_{mn} = \Delta V_{mn} I_{mn} \quad 4.5$$

Aqui:

$$I_{mn} = \{\cos \alpha_{mn}, \sin \alpha_{mn}\}, \quad \Delta V_{mn} = V(P_m) - V(P_n) \quad 4.6, 4.7$$

Onde α_{ij} é o ângulo entre o vetor I_{mn} e a direção positiva do eixo x.

Para o arranjo mostrado na figura 4.4 os deslocamentos relativos (alongamento ou encurtamento) entre pinos podem ser expressos pelo índice $k=1\dots N$. A expressão complexa para as coordenadas dos pinos é representada na equação 4.8.

$$A_k = r_1 \exp\left(\frac{2ipk}{N}\right) \quad B_k = r_2 \exp\left(\frac{2ipk}{N}\right) \quad C_k = r_3 \exp\left(\frac{2ipk}{N}\right) \quad 4.8$$

Para os transdutores circunferenciais, as equações 4.6 e 4.7 tomam a forma:

$$I_k = i \exp\left(ip \frac{2(k+1)}{N}\right) \quad \Delta V_k = V(B_{k+1}) - V(B_k) \quad 4.9, 4.10$$

Similarmente para os transdutores radiais:

$$I_{k+N} = \exp\left(ip \frac{2k}{N}\right) \quad \Delta V_{k+N} = V(C_k) - V(A_k) \quad 4.11, 4.12$$

Os alongamentos/encurtamentos entre os pinos podem agora ser expressos somente por uma equação contendo os vetores deslocamento $V_k = u(x_k, y_k) - iv(x_k, y_k)$. Assim:

$$d_k = \text{Re}(I_k \bar{V}_k), \quad k = 1, \dots, 2N \quad 4.13$$

Para rochas isotrópicas a dependência tensão - deslocamento é dada pela equação 4.3. Para simplificar o tratamento de dados são introduzidos novos parâmetros:

$$P = \frac{S_2 + S_1}{2}, \quad S = \frac{S_2 - S_1}{2} \cos 2j, \quad t = \frac{S_2 - S_1}{2} \text{sen} 2j \quad 4.14$$

Então o vetor deslocamento em coordenadas cartesianas é definido na equação 4.15

$$u(x, y) + iv(x, y) = \frac{R^2}{2Gr} e^{iq} [P - Q - ke^{-2iq}(S + it) - (1 - R^2 r^{-2}) e^{2i} q(S - it)] \quad 4.15$$

4.3.3.2.

Reconstrução do Módulo Cisalhante

O módulo cisalhante G pode ser encontrado com base a equação 4.4. Se a pressão interna Q é aplicada no furo, a diferença nas leituras dos transdutores estariam em concordância com o seguinte campo de deslocamento:

$$u_r = \frac{Q}{2G} \frac{R^2}{r} \quad u_q = 0 \quad 4.16$$

Os deslocamentos radiais ocasionam encurtamentos nos transdutores radiais (vetor L_r) e alongamento nos transdutores circunferenciais (vetor L_c).

Assim o módulo cisalhante pode ser expresso separadamente para os dados radiais e circunferenciais pelas equações:

$$G_r = \frac{\Delta Q}{2} \frac{R^2}{r_3 - r_1} \frac{D}{\langle L_r \rangle} \quad G_c = -\frac{\Delta Q}{2} \frac{R^2}{r_2^2} \frac{d}{\langle L_c \rangle} \quad 4.17, 4.18$$

Aqui D e d são as distancias dos transdutores radiais e circunferenciais respectivamente, $\langle L_r \rangle$ e $\langle L_c \rangle$ são os valores médios de L_r e L_c respectivamente.

4.3.3.3.

Reconstrução das Tensões *in situ* e da Constante de Poisson

Assumindo que o módulo cisalhante já foi obtido e considerando o estágio de $Q = 0$, o problema contém quatro parâmetros não conhecidos P, s, t, k . O número de leituras disponíveis segundo o esquema sugerido por Galybin (1997) seria igual a $2N$. Se o número de leituras independentes é muito maior que quatro então tem-se disponível suficiente redundância de valores, e o problema de determinação simultânea do módulo e das tensões pode ser reduzido a um problema de minimização de quatro variáveis.

Sendo δ o vetor de leituras do campo, $W(P, s, t, k)$ é o vetor deslocamento dado pelo lado direito da equação 4.15, então o problema pode ser expresso pela equação 4.19.

$$F(P, s, t, k) = \|d - W(P, s, t, k)\| \rightarrow \min \quad 4.19$$

4.3.4.

Análise de Sensibilidade

Para a disposição dos LVDT's ao redor do furo inicialmente se considerou o esquema proposto por Galybin&Dyskin (1999) o qual consiste em distribuir os pinos nos vértices de um hexágono inscrito em um círculo. Os raios de distribuição são obtidos pela equação 4.20.

$$d = 2r_2 \text{sen}(P/N), r_1 = r_2 - d/2, r_3 = r_2 + d/2 \quad 4.20$$

Onde:

d = tamanho admissível do transdutor de deslocamento,

N = número de medidas obtidas na direção radial.

r_1, r_2 e r_3 = raios que dependem da distribuição escolhida para os pinos.

Galybin (1997) recomenda que à escolha das distâncias de medida devem estar sujeitas a uma boa relação entre a necessidade da escala de medição e a sensibilidade dos transdutores. Por este motivo não foram utilizadas as formulações por ele recomendadas, optou-se por fazer uma análise de sensibilidade para a distribuição dos pinos. Desta forma permite-se ter uma boa relação entre a escala de medição, sensibilidade dos transdutores e faixa de deslocamentos.

A análise de sensibilidade foi feita com base à equação. 4.3 da solução de Kirsch. Os valores de σ_1 e σ_2 e das propriedades mecânicas das rochas foram tomados de (Hees, 1996), (Ver tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Valores usados para a análise de sensibilidade; Hess 1996.

Q (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (MPa)	u	G (MPa)
15	5,90	2,87	15200	0,2	6333,33

Para a determinação do r_1 , buscou-se que o ponto A estivesse o mais perto do furo central, considerando-se, porém que esta distância também não afeta-se a estabilidade do furo. De acordo com as respostas das análises de sensibilidade (figura 4.5) foi escolhida um valor de r_1 de 8 cm a partir da origem das coordenadas (centro do furo central).

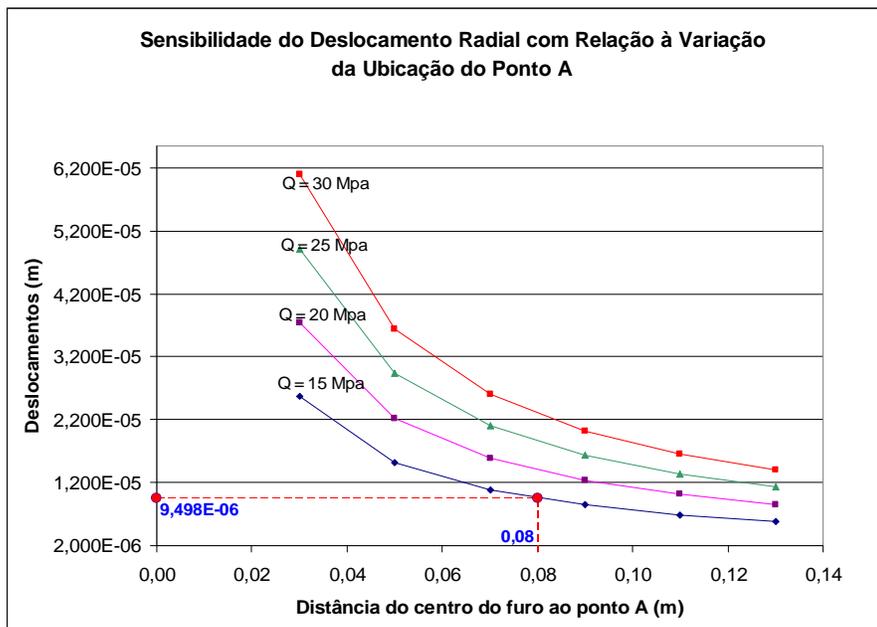


Figura 4.5 – Sensibilidade dos deslocamentos radiais com relação à variação da localização do ponto A.

Para a localização do ponto B a análise de sensibilidade mostrou que a uma distância de 40 cm a partir da localização do ponto B (48 cm da origem) seria a melhor possibilidade para realizar o ensaio, levando em consideração que o ponto C deve estar o mais longe possível para que este aja como ponto fixo do sistema.

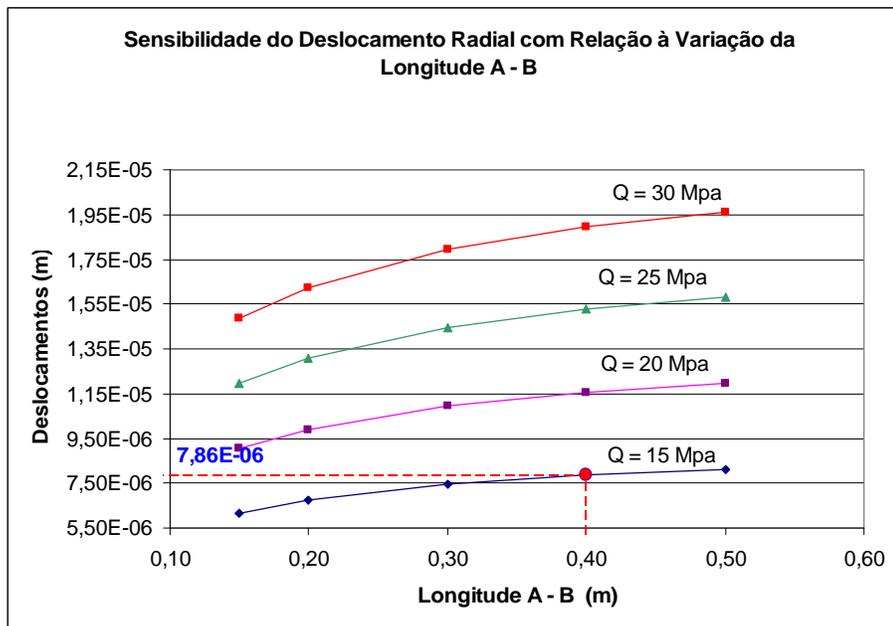


Figura 4.6 – Sensibilidade dos deslocamentos radiais com relação à variação da longitude A - B.

4.3.5.

Distribuição Final dos Pinos

Com base na análise de sensibilidade, foi projetada a distribuição dos pontos para a colocação dos pinos, conforme a figura 4.7.

A distância de 15 cm de raio para o ponto C (localização dos transdutores de deslocamentos para o registro dos deslocamentos circunferenciais), foi escolhida com base na mínima distância que podem ter os suportes dos transdutores. Considerando-se que estes devem estar localizados perto do furo central para conseguir uma maior sensibilidade dos transdutores.

Finalmente como mostra a figura 4.7, a rede de medição ficou com um furo central de raio $r = 0,03\text{m}$, $r_1 = 0,08\text{m}$, $r_2 = 0,48\text{m}$, $r_3 = 0,15\text{m}$.

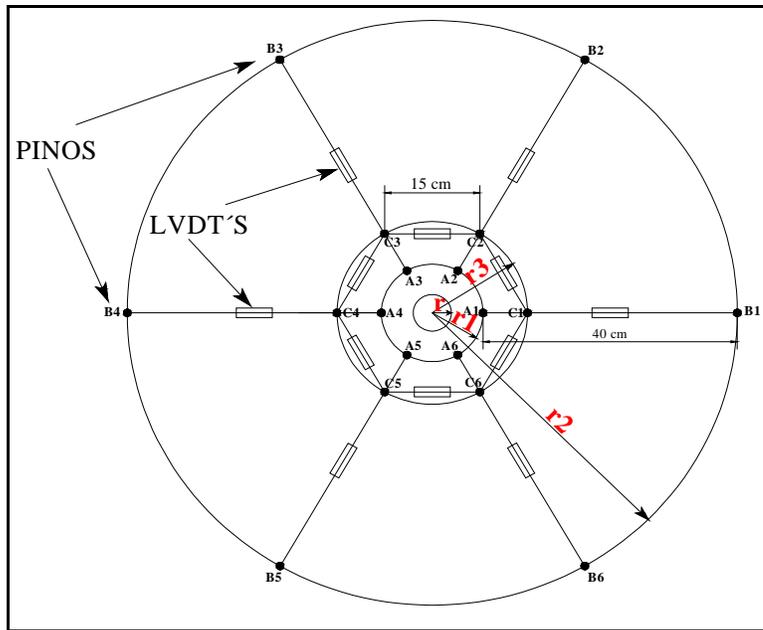


Figura 4.7 – Distâncias entre pinos e distribuição final dos LVDT's ao redor do furo.

Os deslocamentos esperados para estas condições foram da faixa de $7,86 \cdot 10^{-6}$ m para os deslocamentos radiais e de $5,03 \cdot 10^{-6}$ m para os deslocamentos circunferenciais.