

6 Apresentação e Análise dos Resultados

6.1. Considerações Iniciais

Na primeira parte deste capítulo estão apresentados os resultados experimentais obtidos. Para o ensaio do chamado “caso base”, foram incluídos os resultados de formato de *breakout* e mecanismos de ruptura. Para os casos 1, 2, 3 e 4, foram incluídos os mecanismos de ruptura e o comportamento do sistema. O estado de tensões a que o CP foi submetido, caracteriza o regime de falha normal, conforme tabela abaixo.

Tabela 6.1 – Valores máximos adotados durante o ensaio.

Direção	Pressão nominal	Pressão Real
$\sigma_1 = S_{hmin}$	0 psi	0 psi
$\sigma_2 = S_{Hmax}$	600 psi	375,6 psi
$\sigma_3 = S_v$	1200 psi	751,2 psi

Na segunda parte deste capítulo estão as comparações entre os casos experimentais e o modelo numérico.

6.2. Resultados obtidos

6.2.1. Mecanismos de Ruptura

Os corpos de prova submetidos a esse estado de tensões apresentaram comportamento frágil.

Em geral, os planos de ruptura típica destes ensaios, formaram ângulo em torno de 60° com a horizontal (fig. 6.1 e 6.2). Como a tensão vertical é a tensão principal maior e a tensão horizontal é a tensão principal menor, isso pode ser explicado considerando-se o critério de ruptura de *Mohr-Coulomb*, onde o plano

de ruptura ocorre a $45^\circ + \frac{\phi}{2}$. Nos casos ensaiados, $\phi \approx 34^\circ$, o que resulta em um plano de ruptura a aproximadamente 62° .



Figura 6.1 – Forma de ruptura típica do ensaio realizado.



Figura 6.2 – Corpos de prova ensaiados.

Em alguns ensaios, realizados em amostras menos resistentes devido à condições adversas de cura, houve também o deslocamento da primeira ou da última camada do cubo, perpendicular à direção da tensão horizontal menor. Este fato, provavelmente, ocorreu devido a efeitos de borda não totalmente eliminados pelo artifício utilizado para distribuição de tensões (fig. 6.3).

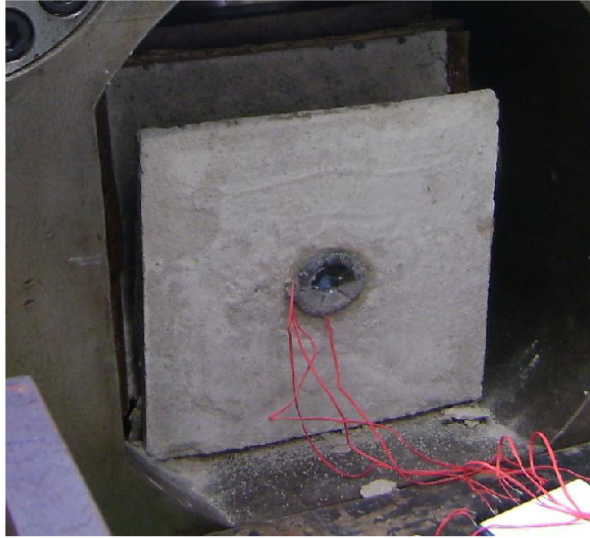


Figura 6.3 – Deslocamento devido ao efeito de bordas.

6.2.2. Caso base

Os ensaios realizados neste cenário, indicaram parâmetros para estipular a rotina dos ensaios seguintes. Baseado nesses resultados, optou-se por uma rotina de ensaio dividida em duas etapas, onde na primeira fase há um ciclo de carregamento e descarregamento e na segunda etapa uma simulação das condições anisotrópicas de tensão. A pressão nominal máxima estipulada foi 1200 psi, equivalente a 751,2 psi de pressão real. Esse valor, no entanto, é um valor médio, pois alguns blocos rompem abaixo e outros acima deste limite.

Também foi possível acompanhar a formação do *breakout*, através da câmera instalada no furo e determinar com que pressão o primeiro grão de areia foi produzido. O vídeo da formação do *breakout* encontra-se no Apêndice B.

A largura dos *breakouts* é função da magnitude das tensões na região do furo e da resistência da rocha. Quanto mais fraca a rocha, maior será a largura destes. A figura abaixo mostra os *breakouts* obtidos nos ensaios de laboratório, sendo a 6.4(a) uma formação menos resistente que a 6.4(b).

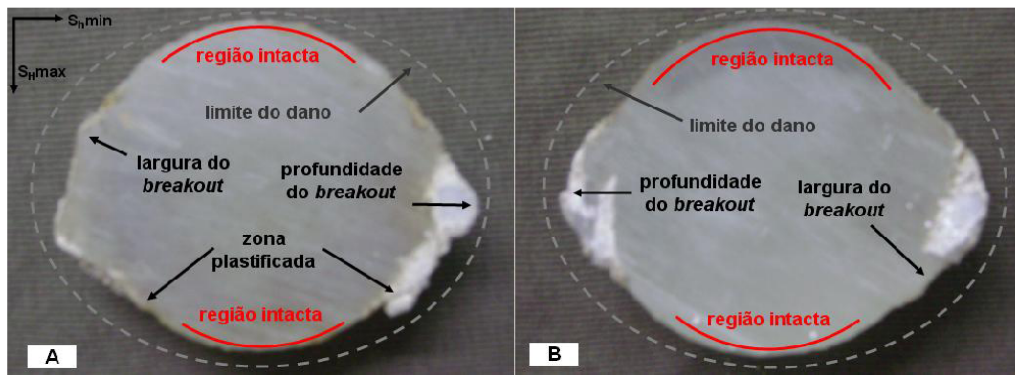


Figura 6.4 – Formato dos *Breakout*

O vídeo do Apêndice B mostra o primeiro grão de areia produzido aos 12' de ensaio, na tensão de 1200 psi (lida no manômetro), corresponde ao início do *breakout*. Esta observação pode ser confirmada a partir de uma solução simplificada, utilizada para calcular a tensão inicial no ponto de início da fratura. As equações de Kirsch (Goodman, 1989), desenvolvidas para um furo circular em uma placa carregada biaxialmente, e consideram algumas hipóteses: o material deve ser homogêneo, isotrópico, contínuo e se comportar de modo linear no regime elástico.

Como é uma superfície livre, duas componentes da tensão são iguais a zero, resultando na tensão máxima de $3p_1 - p_2$, quando $\theta = 90^\circ$. A partir disso, obtém-se o valor de 1880 psi de pressão real para o ponto mais solicitado do furo. Dos ensaios de caracterização, obteve-se que a resistência à compressão uniaxial daquela amostra é 1305 psi, justificando o início do *breakout*.

6.2.3. Comportamento do Sistema *Gravel-tela*

Caso 1.

Ensaio 1. O primeiro ensaio realizado para este caso foi desconsiderado, pois os *strain gages* não foram devidamente calibrados antes da execução do ensaio. Esse procedimento foi corrigido nos ensaios seguintes.

Ensaio 2. A tensão máxima de 1200 psi foi suportada pelo sistema. Após o ensaio, o sistema *gravel-tela* foi retirado e verificou-se que a parede do furo

permaneceu intacta. A figura 6.4 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

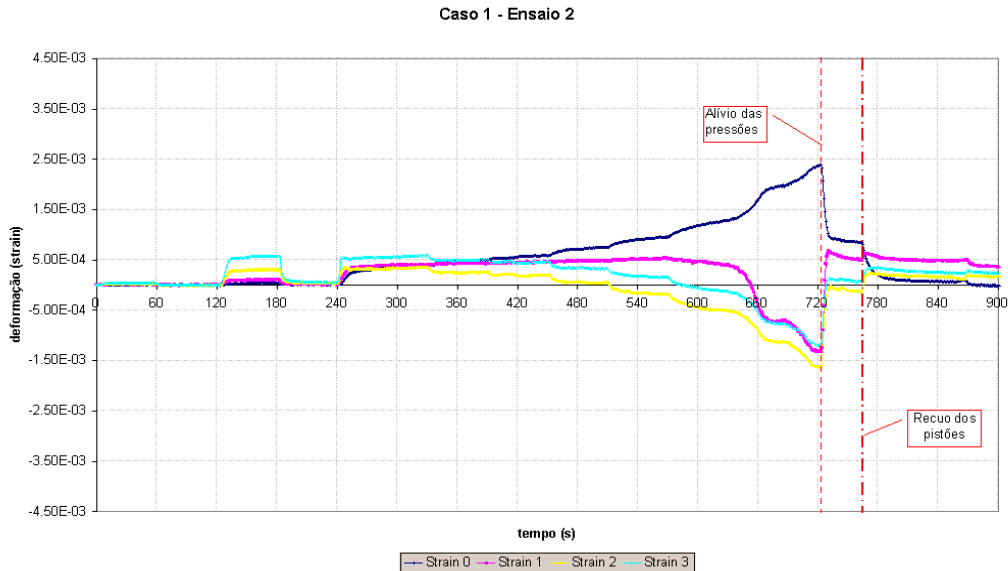


Figura 6.4 – Resultados do ensaio 2, caso 1.

Ensaio 3. O ensaio correu normalmente e foi encerrado aos 11'30", quando o bloco cedeu e a pressão começou a cair. O *strain gage* 3 foi danificado durante o ensaio. O *strain gage* 0 não leu corretamente e a leitura foi descartada. A parede do furo permaneceu intacta após a retirada do sistema *gravel-tela*. A figura 6.5 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

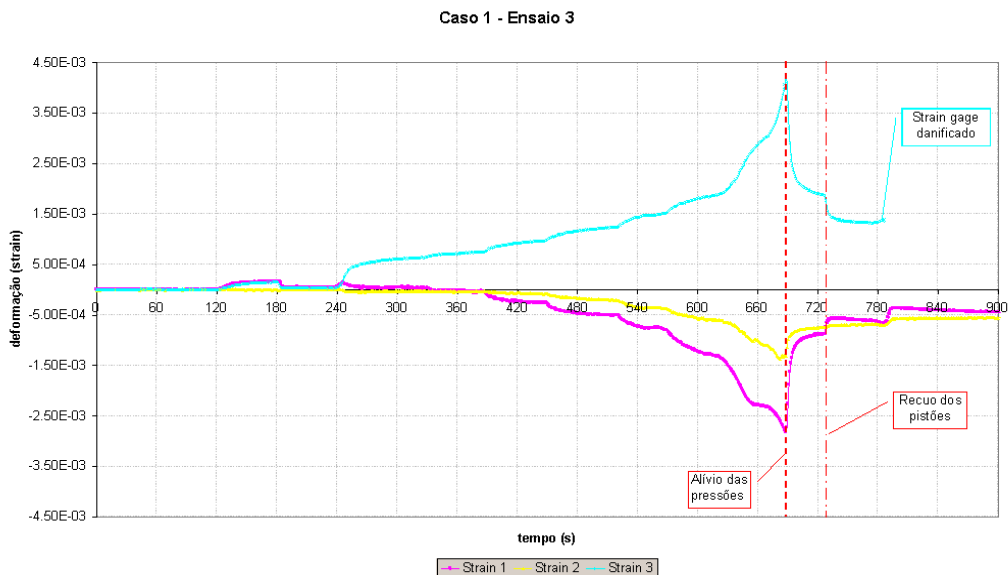


Figura 6.5 – Resultados do ensaio 3, caso 1.

Ensaio 4. Começaram a surgir trincas nos blocos quando o manômetro registrava 1000 psi de pressão nominal. Aos 11' o bloco não suportou as pressões e cedeu. Apesar disso, verificou-se que a parede do furo permaneceu intacta. A figura 6.6 corresponde à deformação medida na parede do tubo.

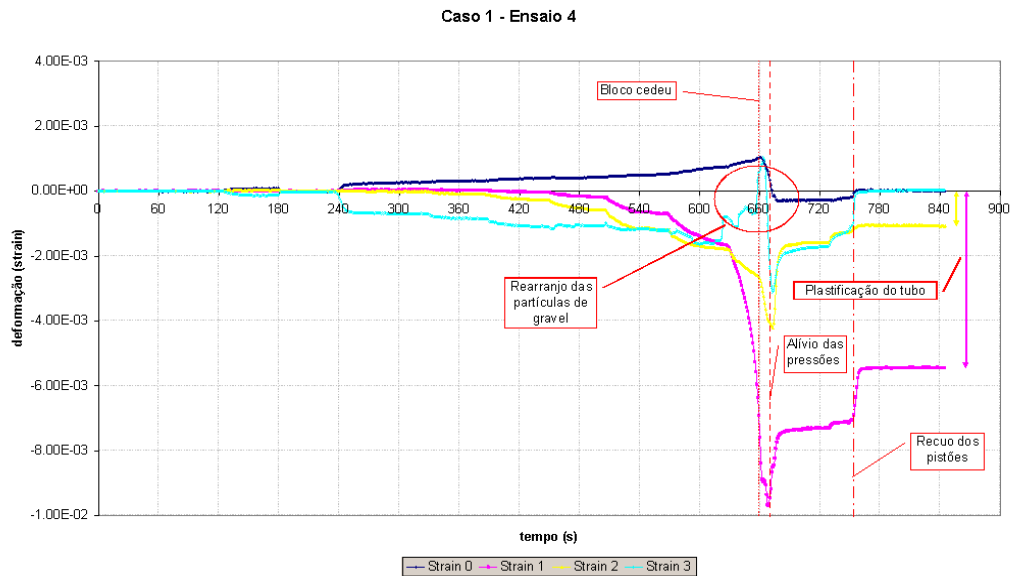


Figura 6.6 – Resultados do ensaio 4, caso 1.

Repetição. O ensaio foi realizado com sucesso. Foi verificado que a parede do furo permaneceu intacta após a retirada do *gravel*-tela. A figura 6.7 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

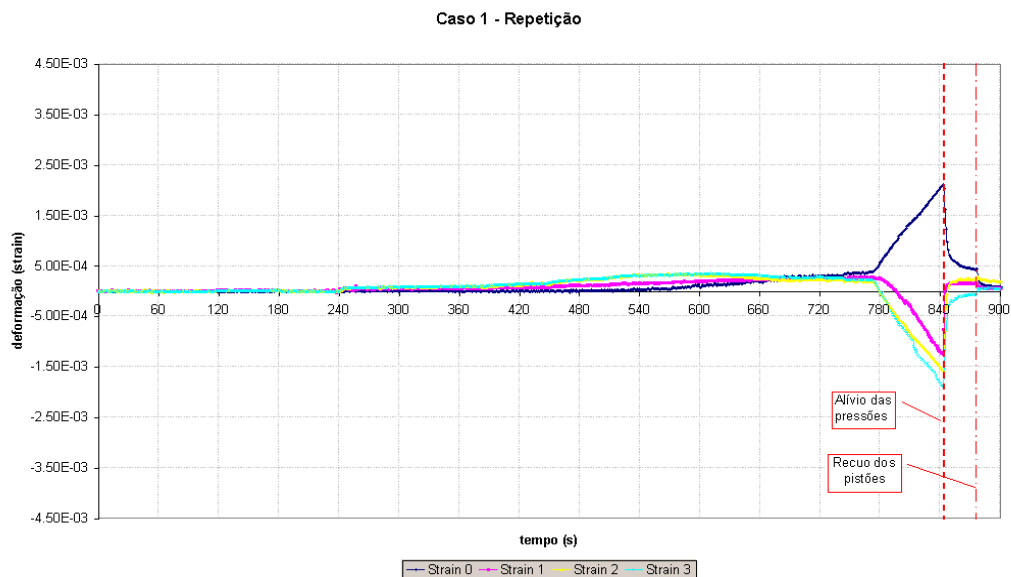


Figura 6.7 – Resultados da repetição do caso 1.

Caso 2.

Ensaio 1. O ensaio foi realizado com sucesso. A figura 6.8 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

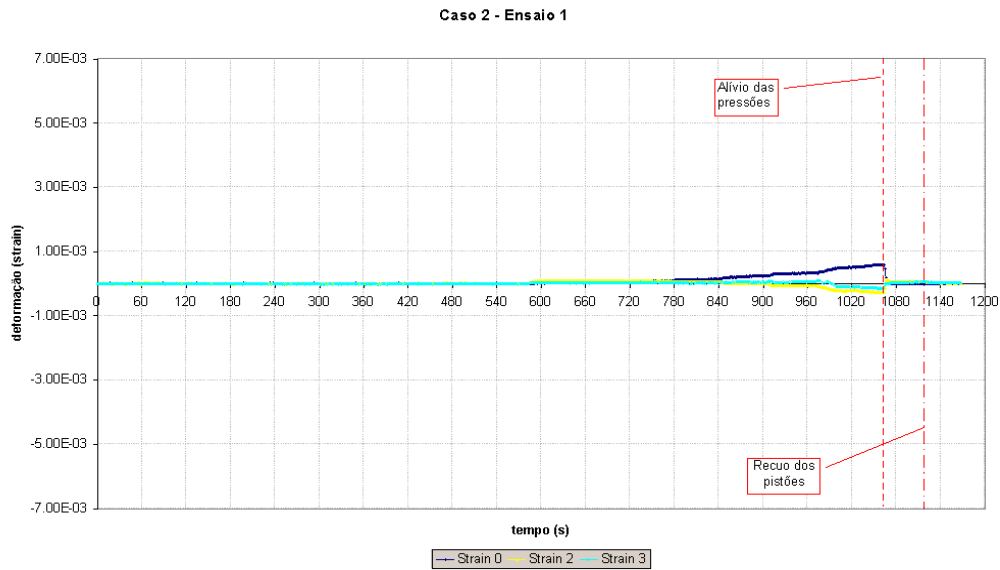


Figura 6.8 – Resultados do ensaio 1, caso 2.

Ensaio 2. A pressão nominal máxima não alcançou 1100 psi. O ensaio foi interrompido aos 10', quando o bloco cedeu e a pressão não foi mantida pelas bombas. Apesar do bloco não ter suportado as tensões, verificou-se ao final do ensaio que a parede do furo estava intacta. A figura 6.9 corresponde à leitura de deformação na parede do tubo utilizado neste ensaio.

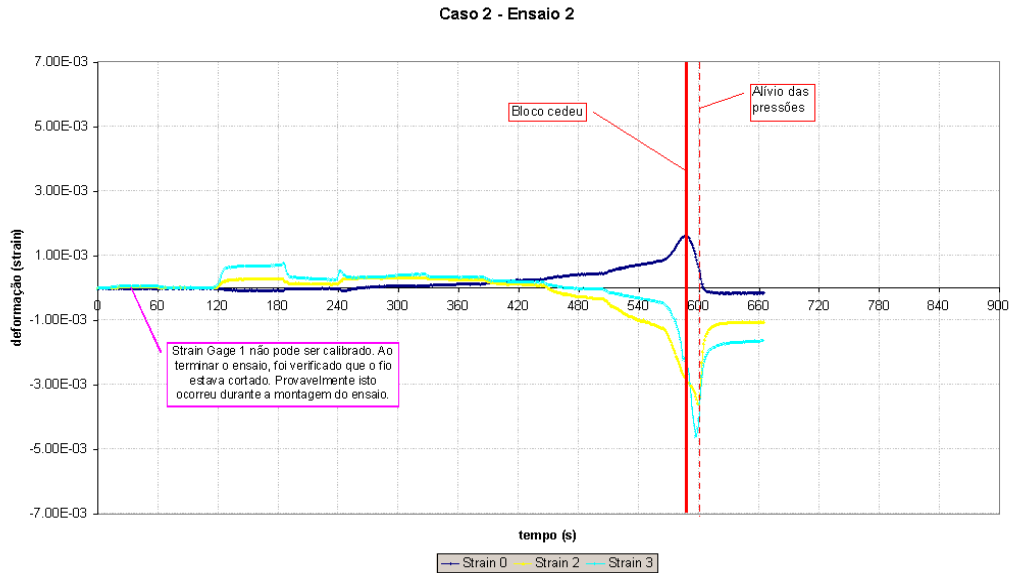


Figura 6.9 – Resultados do ensaio 2, caso 2.

Ensaio 3. A pressão nominal máxima ficou na faixa de 1150 a 1250 psi, não estabilizando até 11'40". A pressão foi aliviada aos 12'30", encerrando o teste. O bloco suportou as tensões; foi possível retirá-lo inteiro. A figura 6.10 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

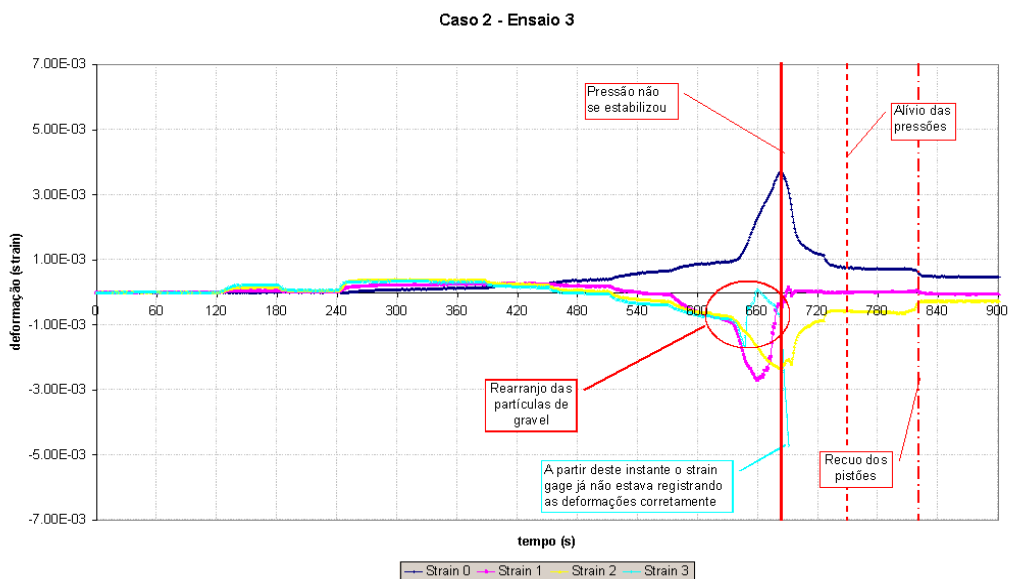


Figura 6.10 – Resultados do ensaio 3, caso 2.

Ensaio 4. A pressão nominal máxima ficou na faixa de 1160 a 1180 psi, não conseguindo se estabilizar. A pressão foi aliviada aos 12'05", encerrando o teste.

A figura 6.11 corresponde à leitura de deformação na parede do tubo utilizado neste ensaio.

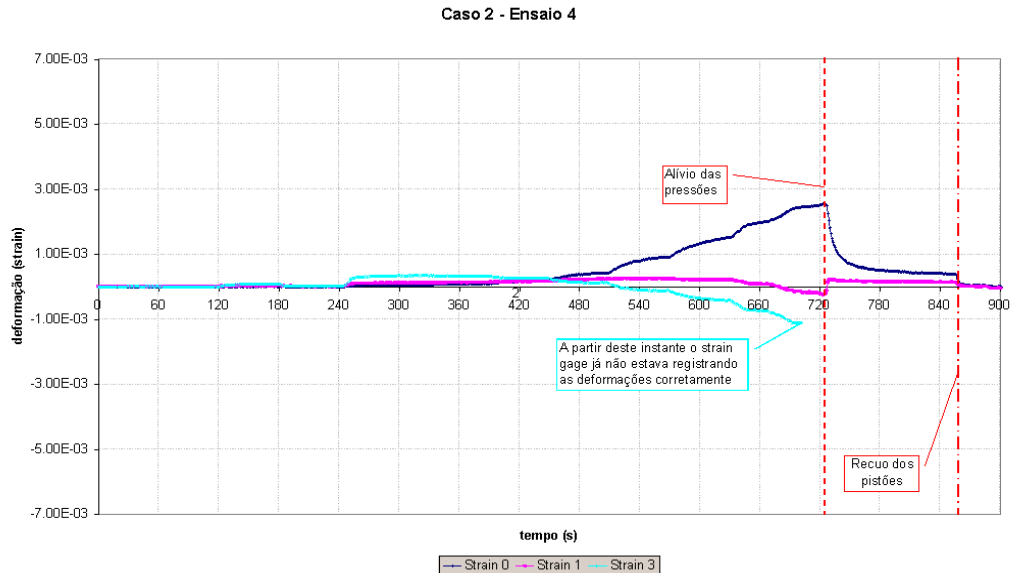


Figura 6.11 – Resultados do ensaio 4, caso 2.

Caso 3.

Ensaio 1. Não foi incluído na análise devido a problemas de leitura. A montagem foi descartada para próximos ensaios, pois as curvas não representam o que foi simulado na célula.

Ensaio 2. A pressão nominal máxima alcançou 1200 psi, entretanto, o ensaio foi interrompido aos 11'30" pois o bloco começou a ceder lentamente passados os 11', fato confirmado pela pressão mantida. O bloco e o sistema não suportaram as tensões. Ao retirar o tubo, foi possível observar que este se deformou plasticamente e que as paredes deste ficaram erodidas em virtude de estar submetido à pressão pontual, ocasionada pelo *gravel*. Apesar disso, verificou-se que a parede do furo se encontrava intacta. A pressão pontual do *gravel* fez com que a proteção dos *strain gages* ficasse comprometida, destruindo o *strain gage* em um determinado instante do ensaio. A figura 6.12 corresponde à leitura de deformação na parede do tubo utilizado neste ensaio.

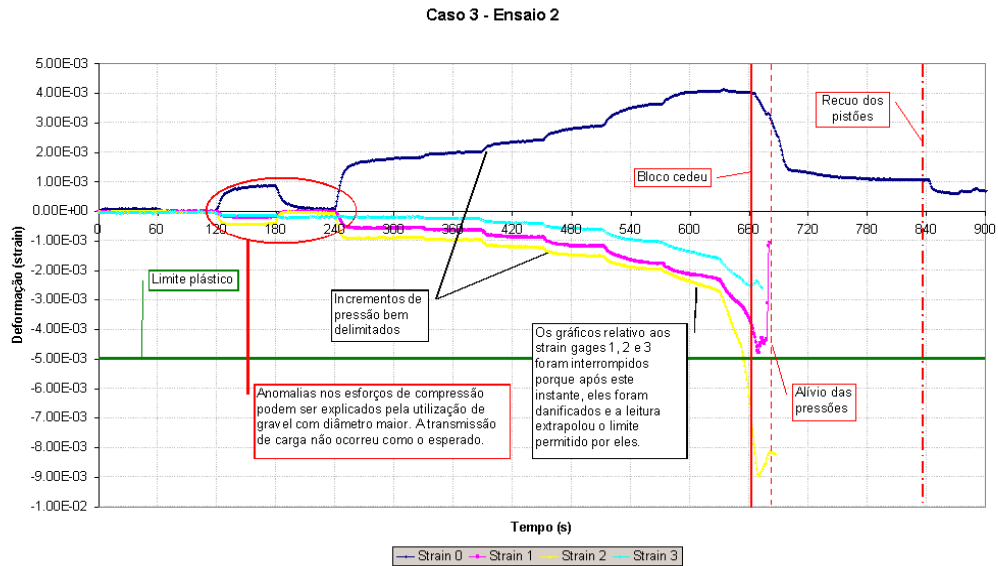


Figura 6.12 – Resultados do ensaio 2, caso 3.

Ensaio 3. A tensão máxima ficou na faixa de 1150 a 1250 psi, não conseguindo se estabilizar até 11'40", quando aparentemente se estabilizou. A pressão foi aliviada aos 12'30", encerrando o teste. O bloco suportou as tensões e foi possível retirá-lo da prensa inteiro. A figura 6.13 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

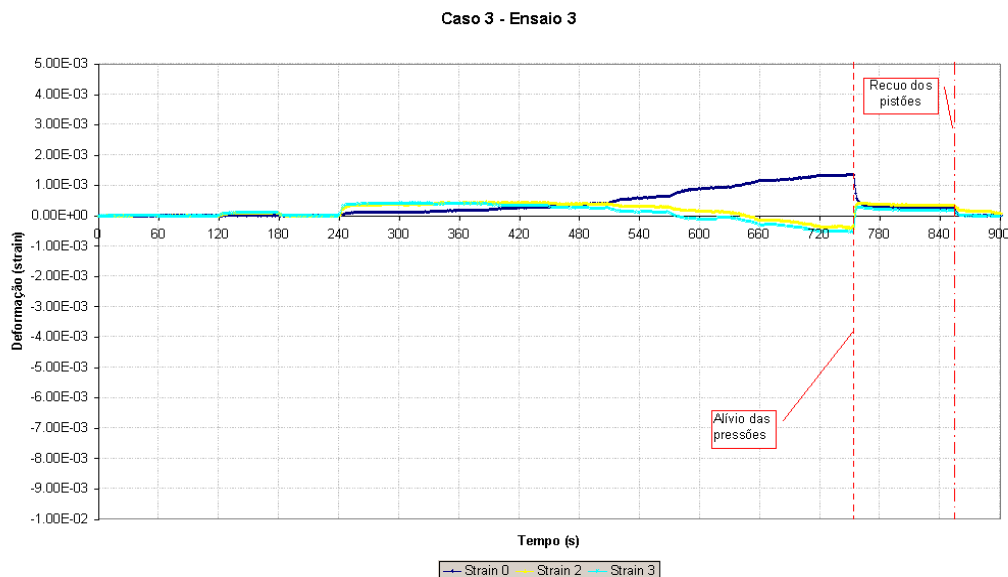


Figura 6.13 – Resultados do ensaio 3, caso 3.

Ensaio 4. A pressão máxima alcançou 1200 psi, porém o sistema não suportou essa tensão e o bloco cedeu aos 10'30". Aos 11'30" o manômetro registrava 600 psi de pressão nominal. Foi verificado que o tubo plastificou, porém a parede do furo estava intacta. A figura 6.14 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

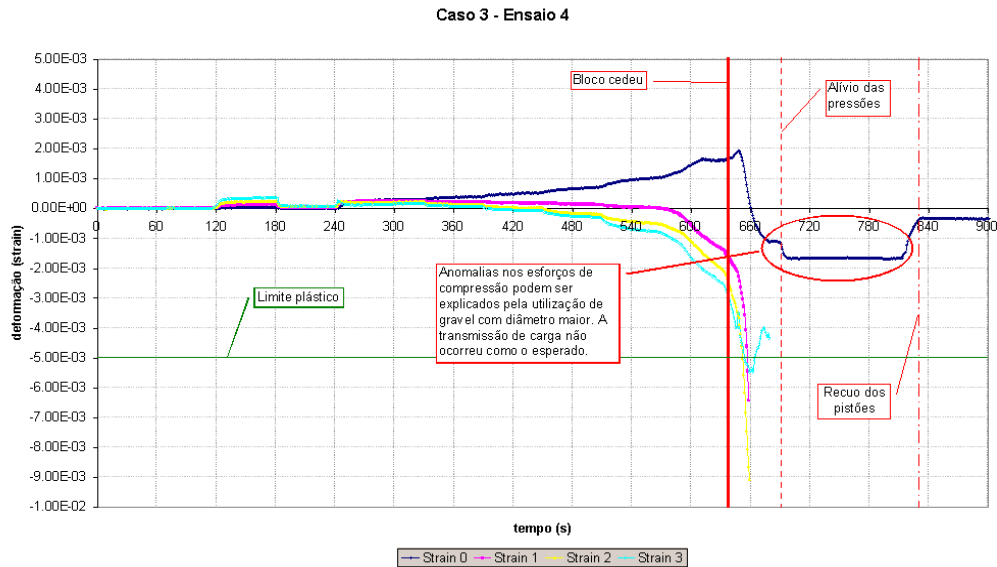


Figura 6.14 – Resultados do ensaio 4, caso 3.

Caso 4.

Ensaio 1. O ensaio foi realizado com sucesso. A figura 6.15 corresponde à leitura de deformação na parede do tubo utilizado neste ensaio.

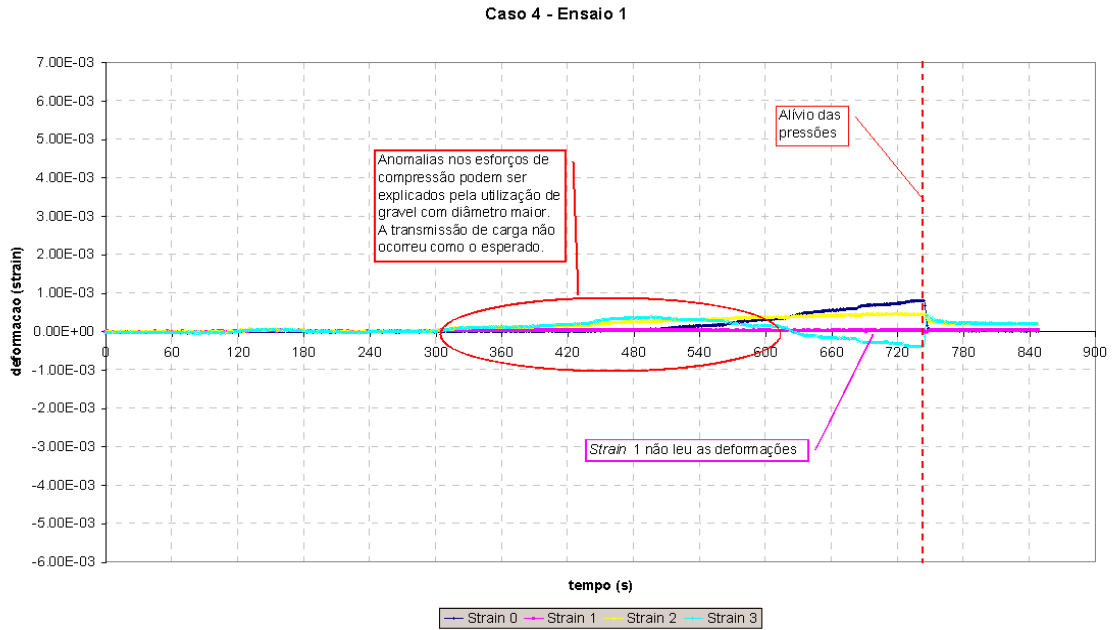


Figura 6.15 – Resultados do ensaio 1, caso 4.

Ensaio 2. A pressão máxima lida no manômetro alcançou 1100 psi e o ensaio foi interrompido aos 10' quando o bloco cedeu e aos 10'15" a pressão caiu para 800 psi. O bloco e o sistema não suportaram as tensões. Ao retirar o tubo, foi possível observar que este se deformou plasticamente e que as paredes do tubo ficaram erodidas, em virtude de estar submetido à pressão pontual, ocasionada pelo *gravel*. Apesar disso, a parede do furo se encontrava intacta, ou seja, o sistema suportou as tensões. A figura 6.16 corresponde à leitura de deformação na parede do tubo utilizado neste ensaio.

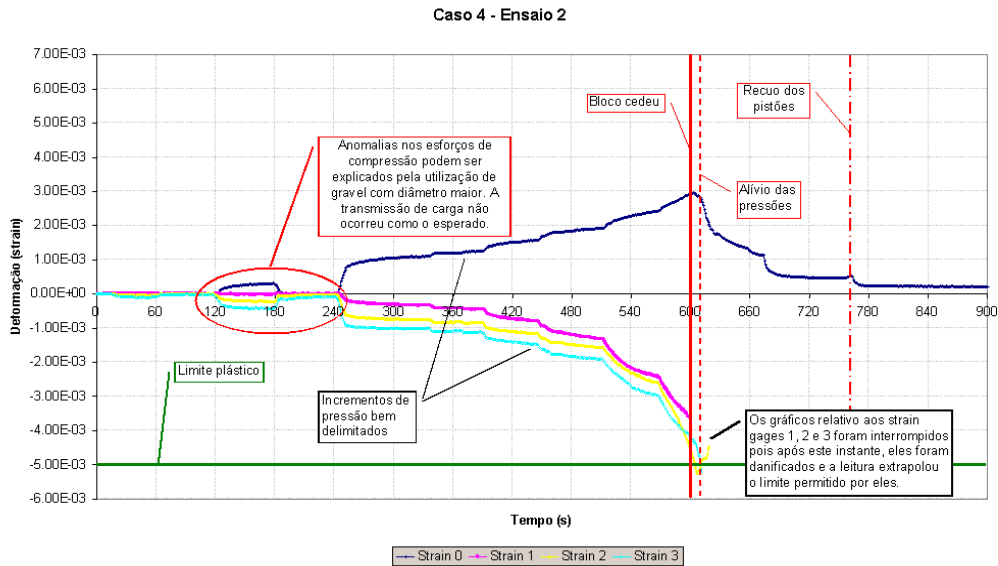


Figura 6.16 – Resultados do ensaio 2, caso 4.

Ensaio 3. O ensaio correu normalmente e foi encerramento aos 12'. O bloco suportou as tensões e foi retirado inteiro. O furo permanece intacto. A figura 6.17 corresponde à deformação medida na parede do tubo utilizado neste ensaio.

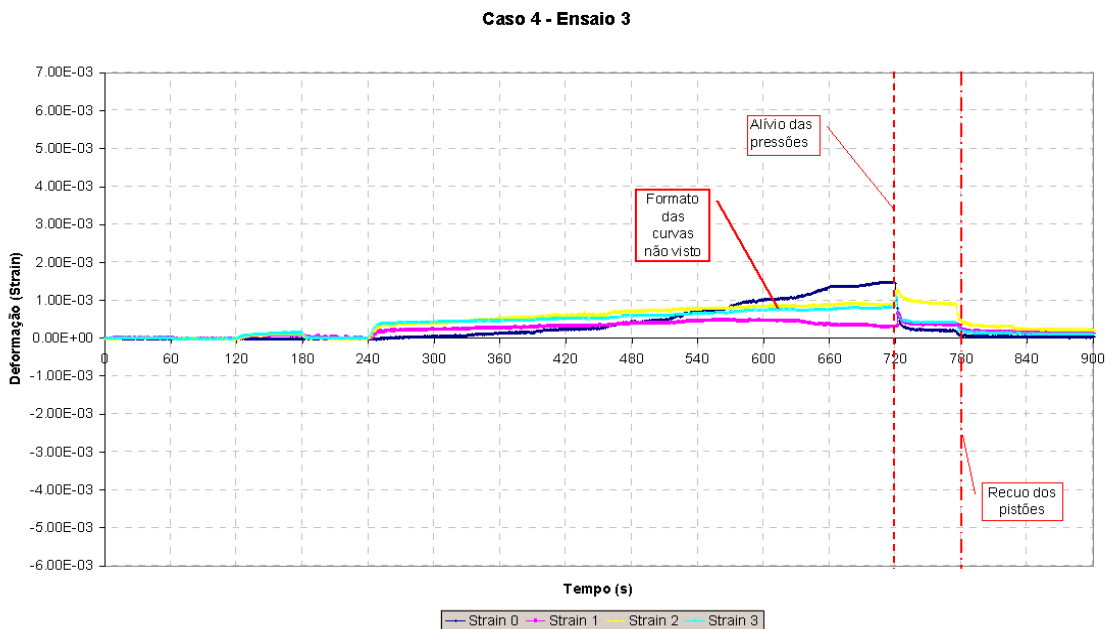


Figura 6.17 – Resultados do ensaio 3, caso 4.

Ensaio 4. Este ensaio reiniciado após 1', com pressão nominal inicial estabilizada em 200psi . Aos 11' a pressão começou a diminuir e aos 11'30" o

bloco cedeu, rompendo o tubo. O alívio da pressão foi feito aos 12'. Foi verificado que o furo permaneceu intacto. A figura 6.18 corresponde à leitura da deformação na parede do tubo utilizado neste ensaio.

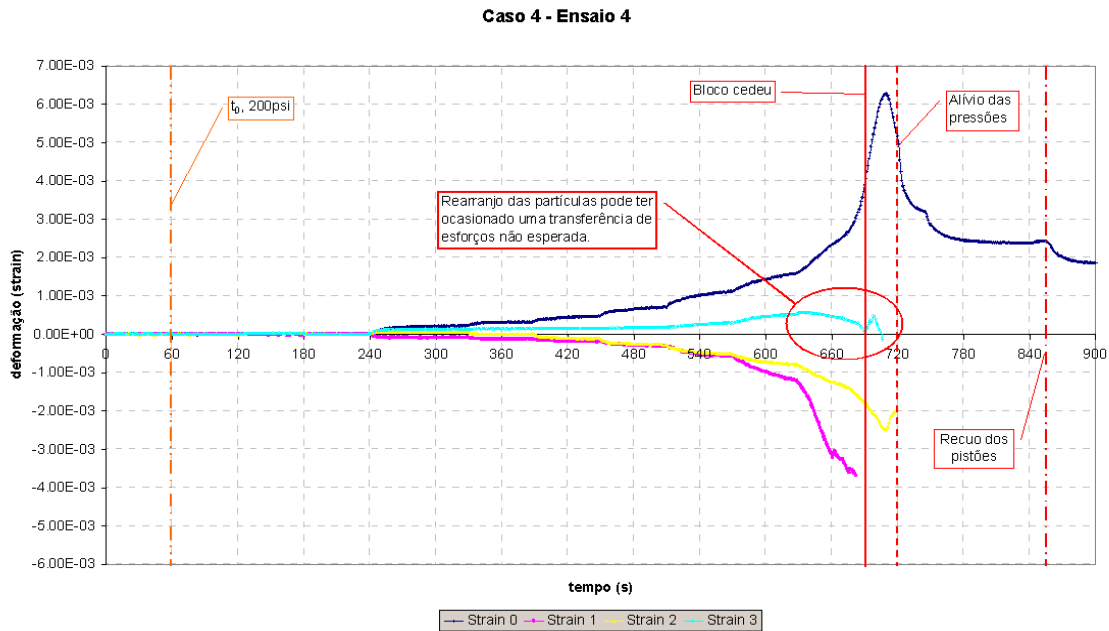


Figura 6.18 – Resultados do ensaio 3, caso 4.

6.3. Curvas Tensão-Deformação

Para entender o comportamento do sistema, foram feitas análises da deformação do tubo de acordo com a tensão aplicada, filtrando os dados de acordo com o comportamento observado durante o ensaio (figs. 6.19 a 6.22). Para tanto, escolheu-se o *strain gage 2* como representativo do ensaio, por estar sujeito a menos interferência ocasionada pelos efeitos de borda. As tensões plotadas nos gráficos correspondem aos valores reais.

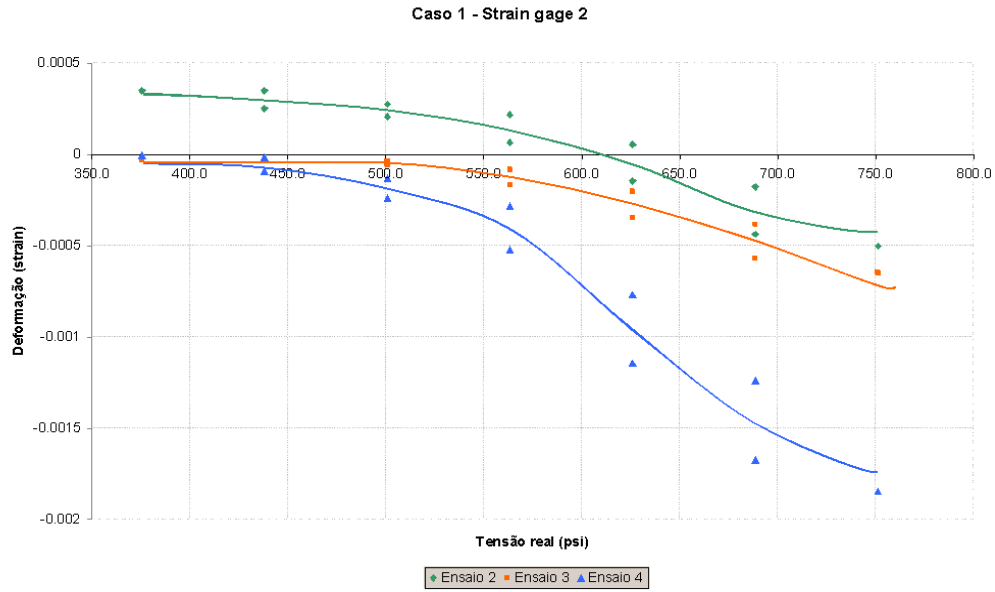


Figura 6.19 – Gráfico de tensão vs deformação do caso 1, análise do *strain gage 2*.

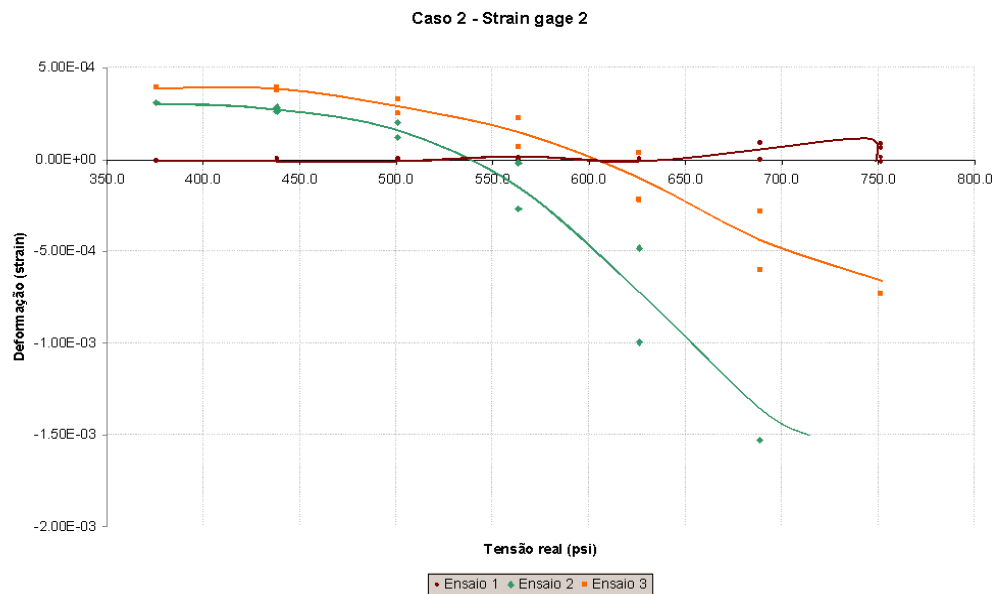


Figura 6.20 - Gráfico de tensão vs deformação do caso 2, análise do *strain gage 2*.

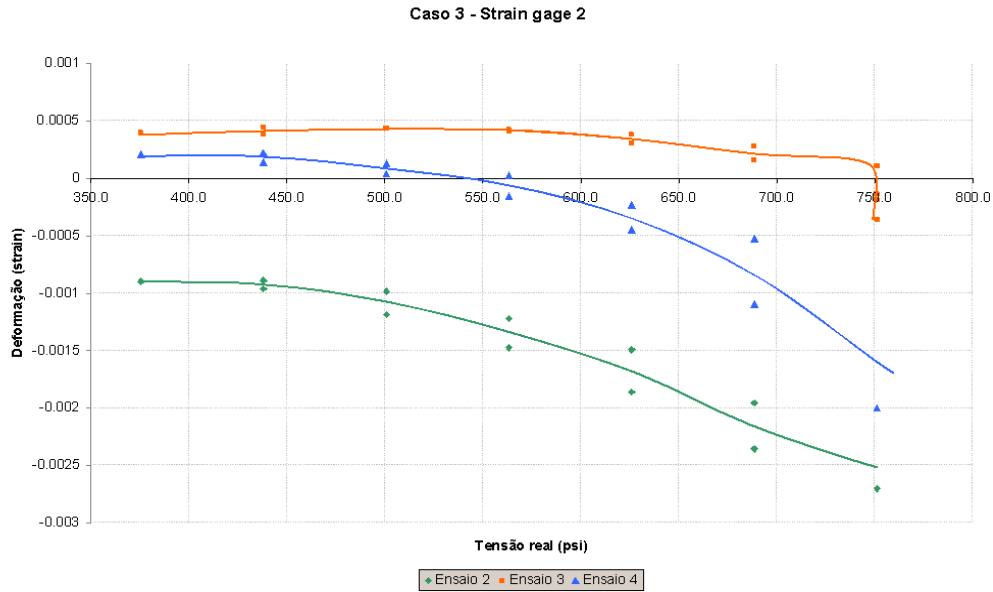


Figura 6.21 - Gráfico de tensão vs deformação do caso 3, análise do *strain gage* 2.

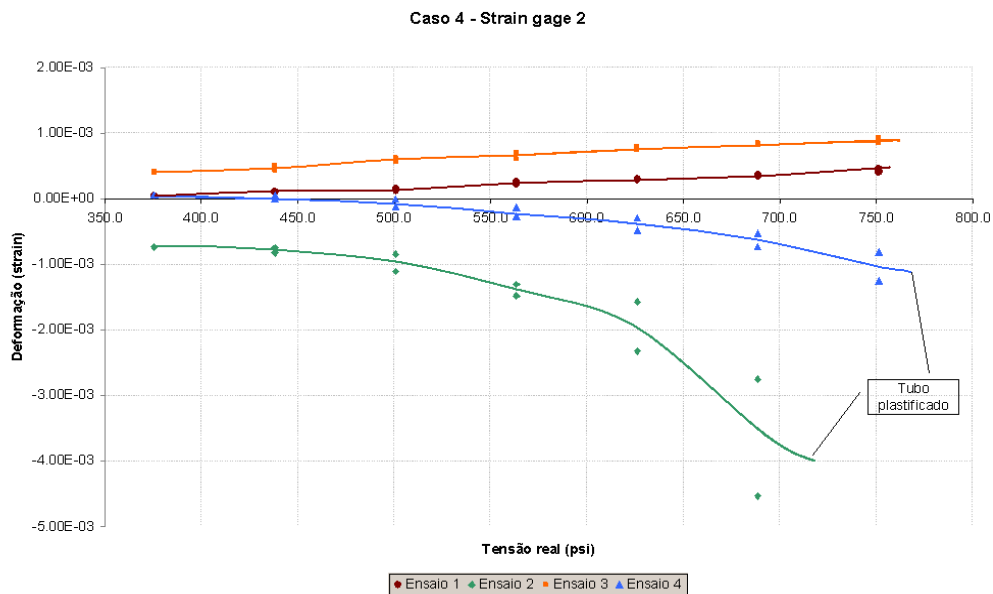


Figura 6.22 - Gráfico de tensão vs deformação do caso 4, análise do *strain gage* 2.

6.4. Comparação com o Modelo Numérico

O problema apresentado neste estudo foi resolvido numericamente através de um programa comercial de elementos finitos. As malhas são compostas por elementos quadrilíneos, sendo a primeira, relativa à formação, com 910

elementos, a segunda, correspondente ao *gravel*, com 260 elementos e a terceira, representando o tubo, com 1407 elementos. O carregamento utilizado para representar as tensões horizontais máximas e mínimas atuantes sobre a formação é substituído por sistemas de forças equivalentes concentradas nos nós.

A figura 6.23 mostra a distribuição de esforços e a malha de elementos.

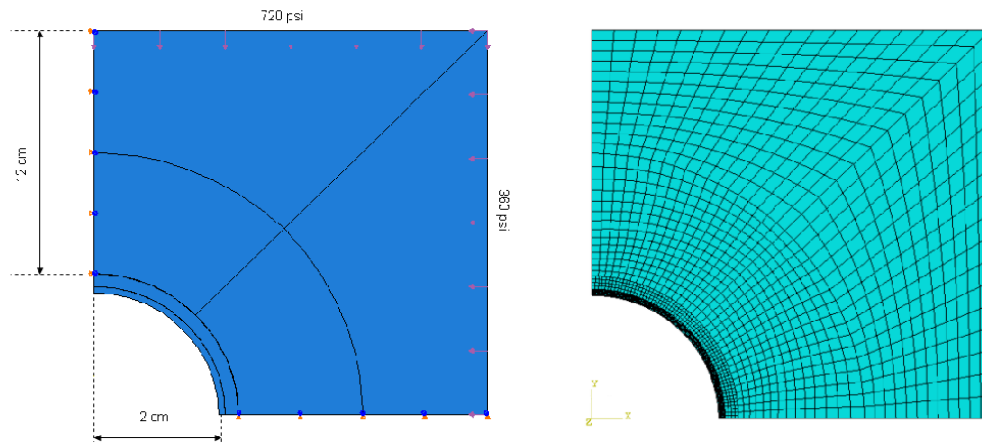


Figura 6.23 – Distribuição de esforços atuantes na formação e malha de elementos.

De acordo com os resultados obtidos, mostrados na figura 6.24, é possível observar uma concentração de tensão ao redor do furo. A convergência para o estado de tensão original da formação pode ser encontrada para distâncias mínimas de 4 vezes o raio do poço.

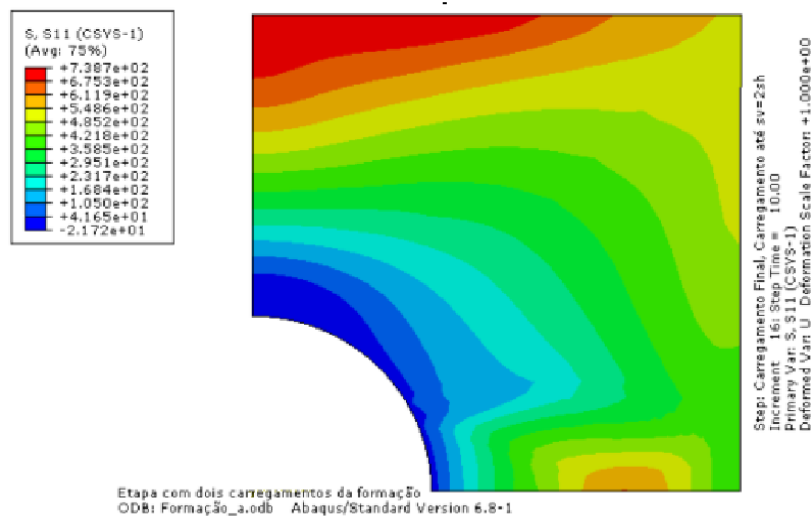


Figura 6.24 – Distribuição das tensões tangenciais.

As comparações entre os resultados numéricos e experimentais, foram realizadas no local onde foi colado o *strain gage* 2, o que corresponde ao nó 1616 da simulação numérica (fig. 6.25).

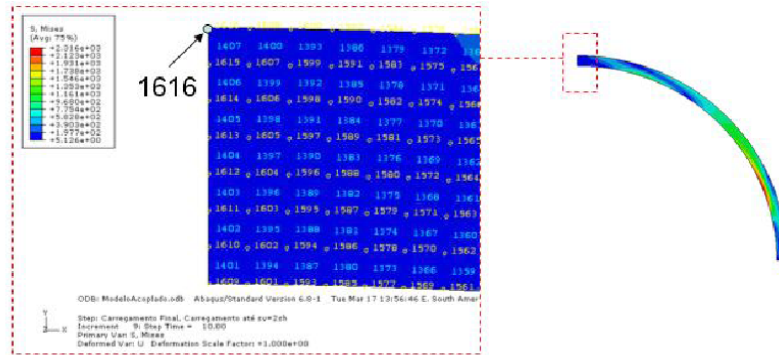


Figura 6.25 – Localização do nó utilizado na comparação entre os resultados numérico e experimental.

Nas figuras 6.26 e 6.27 estão apresentadas as comparações entre as soluções numérica e experimental. Pode-se observar que esses resultados são mais representativos para o caso 1, onde foi utilizado o *gravel* de menor diâmetro. Calculando-se o desvio padrão para ambos os casos, obtêm-se $2.29\text{E}-09$ *strain* para o caso 1, e $4.75\text{E}-08$ *strain* para o caso 3, confirmando o que foi observado.

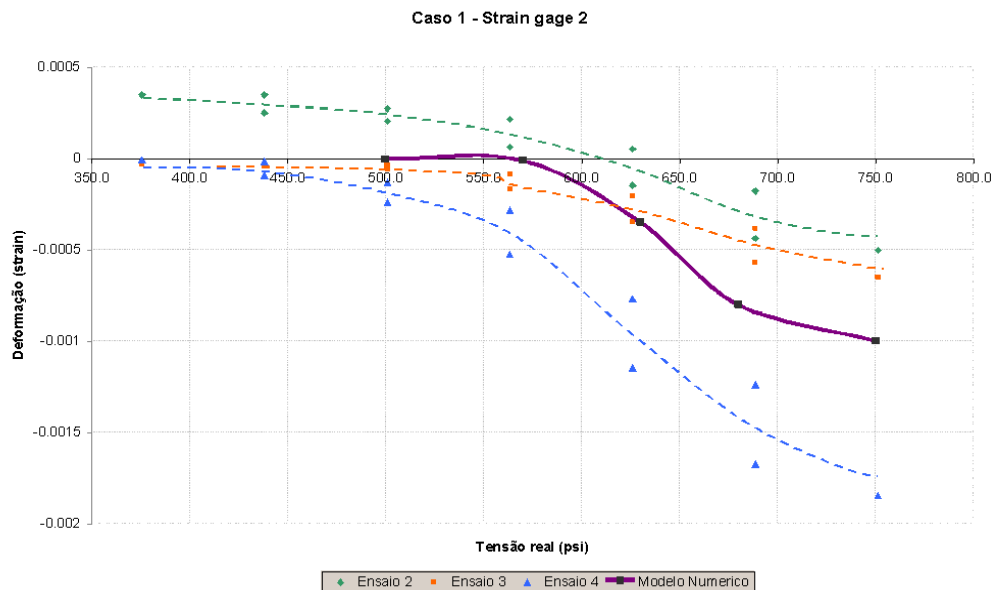


Figura 6.26 – Comparação entre os resultados experimentais e numérico considerando *gravel* de malha 20/40.

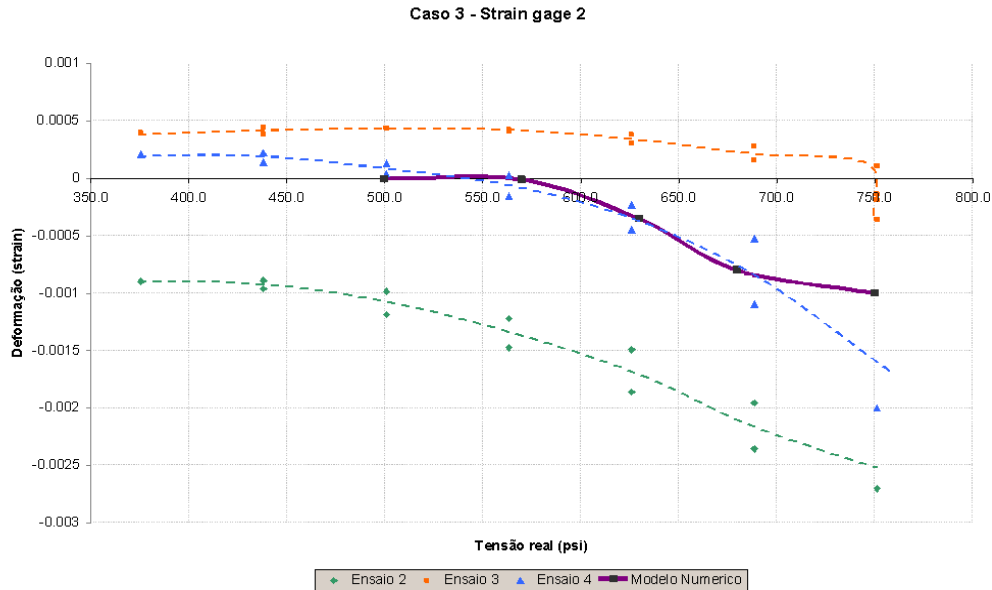


Figura 6.27 – Comparação entre os resultados experimentais e numérico considerando gravel de malha 16/20.

Devido à falta de detalhamento dos parâmetros, ainda não é possível afirmar que o modelo fornece resultados satisfatórios a ponto de ser utilizado para simulações de campo. Entretanto, para casos onde é utilizado o *gravel* de malha 20/40, a curva apresenta uma boa aproximação da tendência do comportamento.

6.5. Considerações Finais

A partir do caso base foi possível entender o comportamento do furo aberto, verificar o início da formação e o formato final de um *breakout*. Através do comportamento observado, definiram-se critérios para execução dos ensaios posteriores. Com o auxílio da câmera, observou-se o início do *breakout* e determinou-se a pressão a que o furo estava submetido quando isto ocorreu. As análises realizadas a partir do molde do furo apontaram um *breakout* largo e pouco profundo e foi possível identificar os principais elementos deste tipo de ruptura. Além disso, é possível afirmar que o formato do *breakout* foi consequência de uma ruptura iniciada por fraturas de cisalhamento e trincas verticais, conforme observado nos vídeos. Baseado nessas observações, é possível afirmar que o corpo de prova sofreu ruptura dúctil.

Em relação aos casos de *gravel*-tela, pode-se dizer que o diâmetro do *gravel* influencia na transferência de carga. Nos casos 1 e 2, onde o diâmetro das partículas é menor, a deformação registrada pelos *strain gages* correspondia, de uma forma geral, ao comportamento esperado, ou seja, compressão nos *strain gages* transversais ao eixo do tubo, alinhados com a tensão vertical e tração no *strain gage* colado na direção do eixo do tubo. Nos casos 3 e 4, houve influência localizada, com o *gravel* erodindo determinadas regiões do tubo e influência generalizada, com o registro de uma distribuição anômala de tensões, verificado através das respostas de deformações não esperadas, que alcançaram limites além das leituras permitidas pelo equipamento e surgimento de esforços de tração em regiões perpendiculares à tensão aplicada.

A compactação do *gravel* também é um fator de influência nas respostas de deformação. Em alguns casos foi verificada uma alteração nas curvas obtidas, sempre no ponto correspondente ao *strain gage* 3 que permitiria o rearranjo das partículas (mais próximo à borda).

Em relação à comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos, observa-se que a curva de deformação, obtida através do modelo numérico, segue a mesma tendência de comportamento do tubo. No entanto, para uma análise qualitativa, é necessário que os parâmetros do ensaio sejam determinados com mais precisão.