

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Flavia Mara Guzmán Villarroel

Simulação Física do Comportamento Mecânico de Poços de Petróleo

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Mauro Bloch

Rio de Janeiro
Março de 2009



Flavia Mara Guzmán Villarroel

Simulação Física do Comportamento Mecânico de Poços de Petróleo

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Mauro Bloch

Co-orientador

Petrobrás

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Paulo Dore Fernandes

CENPES/Petrobrás

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de março de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Flavia Mara Guzmán Villarroel

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio em 2006. Ingressou no mestrado na mesma universidade em 2007, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Villarroel, Flavia Mara Guzmán

Simulação Física do Comportamento Mecânico de Poços de Petróleo/ Flavia Mara Guzmán Villarroel; orientador: Eurípedes Vargas do Amaral Jr. – 2009,

123 f. il; 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, 2009
natureza da ficha catalográfica

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Produção de Areia 3. *Gravel Pack* 4. Ensaio Poliaxiais 5. Amostras de grandes dimensões 6. Simulação Física 7. Poços de Petróleo I. Eurípedes Vargas do Amaral Jr. II. Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. III. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais.
Ao meu amor.

Agradecimentos

À Deus, por me proteger e dar forças para chegar ao fim de mais um ciclo.

Ao meu orientador, professor Eurípedes do Amaral Vargas Jr., por aceitar o desafio de ser meu orientador (mesmo eu fugindo dos modelos numéricos!) e pela confiança depositada.

Ao meu co-orientador, Mauro Bloch por todo o apoio ao longo desse ano de dissertação. Pela participação em momentos decisivos e em momentos de lazer. Pelas conversas técnicas e pelos assuntos diversos. Pela ajuda nas análises de resultados, assistência nos momentos de desespero e todos os desabafos. Sem seu apoio eu certamente não estaria nesse ponto agora. Sua compreensão e paciência foram muito importantes para mim no desenvolvimento desta dissertação, que é produto do trabalho de ambos.

Aos meus pais, que entre conselhos, carinhos e discussões me mostraram os melhores caminhos. Todo esse apoio e incentivo me abriu muitas portas para o futuro. À minha mãe, pelas rezas e preocupações e ao meu pai, pelas conversas e pelo “paitrocínio” em várias etapas desse estudo. Amo vocês.

A minha querida família, avós, tios e primos pela torcida e por se preocuparem comigo. Em especial a minha avó Martha, pelas preces diárias e puxões de orelha para que eu descansasse.

Ao meu grande amor, Danilo. Se você soubesse quão importante foi o seu apoio... As palavras de força, os abraços, os finais de semana de estudo, as ajudas na organização das intermináveis planilhas de dados e formatações de arquivos, as esperas na salinha, os lanchinhos e cinemas “para dispersar”, etc, etc, etc...

Ao meu amigo e aluno Gabriel, pelas idéias e trabalho durante a fase de preparação e execução dos ensaios. Pelas opiniões sensatas e até pelas opiniões fora de hora. Com certeza aprendi com a convivência. Espero ter podido ensinar alguma coisa também.

Ao engenheiro de Roncador Anderson Rapello. Por me ensinar, através de conversas, aulas e reuniões boa parte do que sei hoje sobre engenharia de poço. E claro, pelo desenvolvimento do tão esperado modelo numérico.

Ao Vinícios Azevedo, pela ajuda nestes momentos finais e pelas sugestões no trabalho.

À equipe de técnicos e auxiliares do TEP. Ao pessoal do laboratório de cimentação: Cléber, Ronaldo, Sílvio, Samuel, William, Aline... À grande paciência e boa vontade do Luís e às horas extras gratuitas do Windson. Aos ensinamentos técnicos do Lincoln. Aos incontáveis (!!) ensaios de caracterização feitos pelo pessoal do Laboratório de Mecânica das Rochas: Rodrigo, Rafael, Soares e Dantas.

Ao pessoal do TMEC, os técnicos Chiapim e Daniel por toda a paciência em me ensinar a instrumentar todos aqueles tubos. Ao engenheiro Meniconi pela valiosa ajuda na interpretação dos meus resultados.

À Michéle, amiga e, sobretudo profissional muito competente, que não só ouviu meus desabafos, mas que encontrou “no meio do seu material” todo tipo de resposta para as minhas dúvidas inexplicáveis.

Ao pessoal dos laboratórios de química e estruturas da PUC-Rio, por me permitirem “inventar moda” por lá. Roberta, Evandro, Zé, Euclides. E ao

professor Gusmão pela disposição em me ajudar a desenvolver o sistema de iluminação.

A todos os meus amigos da “favelinha”, pelos papos, almoços, ajudas técnicas, abraços e conselhos. Gostaria de citar todos os que fazem parte desse convívio, mas estou certa de que cada um sabe da importância que tem para mim. Não posso deixar de mencionar a enorme força que a amiga Jacqueline me deu nessas últimas semanas e as consultas do Wagner e do Silvestre.

Ao meu primeiro chefe, Chris Ward, pelo incentivo que dado para que eu cursasse esse mestrado, num momento em que eu estava com dúvidas. Ao amigo Ewerton Araújo que há muitos anos me mostrou algumas oportunidades desse enorme mundo de possibilidades que a indústria do petróleo oferece. A todos os amigos “americanos” que continuam a participar desse processo.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pela infra-estrutura, cada vez melhor, e suporte. À Rita, grande “ombro” dos alunos desesperados. A todos os professores do departamento, em especial àqueles que me transmitiram valiosos conhecimentos.

À FAPERJ e à Vice-reitoria de Desenvolvimento Acadêmico da PUC-Rio, pelo apoio financeiro.

E finalmente, mas não menos importante, aos meus amigos de sempre. Mesmo não entendendo o que eu faço e muito menos porque eu “ando sumida”, seguem ali, nas horas difíceis e nas comemorações.

Resumo

Villarroel, Flavia Mara Guzmán; Vargas, Eurípedes do Amaral. **Simulação Física do Comportamento Mecânico de Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2009. 123p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos maiores desafios para a produção de hidrocarbonetos em reservatórios de arenitos pouco consolidados é o controle da produção de areia. Os mecanismos envolvidos nesse fenômeno são complexos e isto é resultado de uma grande variedade de fatores, como por exemplo, a magnitude das tensões *in situ*, a resistência mecânica da formação e as operações de desenvolvimento do poço. Este problema pode ser resolvido ou amenizado até níveis aceitáveis através de estratégias de completação específicas, como a instalação de telas ranhuradas ou do *gravel pack*, desde que haja uma previsão do potencial de produção de areia da formação. Apesar do grande número de modelos numéricos desenvolvidos para prever este comportamento, a consistência dos mesmos pode ser questionada, uma vez que podem ser observadas diferenças entre as predições e os dados de campo. Para validar esses modelos, são necessários dados confiáveis, que podem ser obtidos através de ensaios de laboratório. Os objetivos do trabalho foram determinados considerando esses pontos, além da questão do uso em larga escala do *gravel pack* como técnica de controle da produção de areia nos campos brasileiros. São eles: (i) investigar o comportamento de um sistema de contenção de areia instalado em uma formação com potencial de produção de areia, (ii) verificar a influência do aumento de tensão efetiva na produção de areia e entender como a carga é transmitida para o sistema e (iii) validar um modelo numérico desenvolvido para o estudo das condições de campo. Para os ensaios, realizados em uma célula poliaxial sob condições controladas, utilizaram-se blocos de grandes dimensões. Foram analisados 5 casos representativos, sendo cada um deles simulado 4 vezes. O primeiro caso consiste na verificação da formação de um *breakout* em poço aberto, sem a utilização de nenhum sistema de contenção de areia. Os outros quatro casos são reproduções do sistema *gravel*-tela, com diferentes configurações. Os resultados foram satisfatórios e de acordo com eles, é possível identificar uma tendência de comportamento para cada cenário:

gravel com distribuição uniforme no anular e diâmetro da partícula utilizada no *gravel*. A verificação de um modelo numérico, desenvolvido na Petrobrás, foi feita a partir destes resultados e mostrou uma boa aproximação dos resultados de laboratório.

Palavras-chave

Gravel Pack; Simulação Física; Amostras de Grandes Dimensões, Produção de Areia.

Abstract

Villarroel, Flavia Mara Guzmán; Vargas, Eurípedes do Amaral (Advisor). **Physical Simulation of Wellbore Mechanical Behavior**. Rio de Janeiro, 2009. 123p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A major problem during hydrocarbon production from poorly consolidated sandstone is the influx of sand, or sand production. This problem is complex and can occur as a result of a large variety of reasons, like magnitude of the in situ stresses, formation strength, and wellbore-development operations. If the potential for sand production could be predicted, then the problem may be solved or reduced to an acceptable level by a proper completion strategy, such as the use of stand alone screens or gravel pack. Although a large number of numerical models for sand production prediction have been developed, the consistency of the models could be questioned, due to the differences between the predictions and field observations. To improve and validate these models, reliable data are necessary. This study has been developed based on these concerns, and also, considering the massive use of the gravel-pack as sand control technique on Brazilian fields. The objectives were (i) investigation of the gravel-pack system behavior, (ii) verification of the increase on effective stress on sand production and (iii) validation a numerical model developed for field sand production prediction. The large-scale laboratory tests were carried out on a poliaxial cell. It was selected 5 representative cases, and they were developed on an artificial well, under controlled conditions. On the first one, it was observed a breakout formation on an openhole. On the other 4 cases, it was simulated the gravel pack, submitted to different conditions, each of them reproduced 4 times. The numerical model was developed by Petrobras/Roncador field engineers, using a commercial numerical modeling program. Results were satisfactory. According to them, is possible to identify a behavior tendency for each condition: the influence of the gravel uniform distribution on the annulus and the influence of gravel diameter. The numerical model showed a very good approach to the laboratory results.

Keywords

Gravel Pack; Physical Simulation; Large Scale Test, Sand Production

Sumário

| | |
|---|----|
| Lista de Símbolos | 20 |
| Lista de Abreviaturas | 22 |
| 1 Introdução | 23 |
| 1.1. Relevância da Pesquisa e Objetivos | 24 |
| 1.2. Organização do Trabalho | 25 |
| 2 Produção de Areia e Sistemas de Contenção | 26 |
| 2.1. Introdução | 26 |
| 2.2. Produção de Areia | 27 |
| 2.2.1. Problemas Relacionados à Produção de Areia | 27 |
| 2.2.2. Mecanismos de Produção de Areia | 28 |
| 2.3. Métodos de Contenção de Areia | 30 |
| 2.3.1. Métodos Não-Mecânicos | 31 |
| 2.3.2. Métodos Mecânicos | 33 |
| 2.4. Comentários Finais | 40 |
| 3 Fundamentos Teóricos | 41 |
| 3.1. Introdução | 41 |
| 3.2. Caracterização de Materiais Através de Ensaio de Laboratório | 41 |
| 3.3. Modos de Ruptura | 43 |
| 3.4. Modos de Ruptura Induzidos | 45 |
| 3.5. Efeitos de Escala | 46 |
| 3.6. Modelagem Numérica – Método dos Elementos Finitos | 47 |
| 4 Ensaio Poliaxiais | 48 |
| 5 Procedimento Experimental | 53 |
| 5.1. Introdução | 53 |

| | |
|---|-----|
| 5.2. Célula Poliaxial | 53 |
| 5.3. Confeção dos Corpos de Prova | 58 |
| 5.4. Especificações e Instrumentação dos Tubos | 64 |
| 5.4.1. Propriedades Químicas e Mecânicas | 64 |
| 5.4.2. Medidores de Deformação | 68 |
| 5.5. Outras especificações | 71 |
| 5.5.1. Interface atuador-cubo | 71 |
| 5.5.2. Lubrificante | 73 |
| 5.5.3. Propriedades dos agentes de contenção | 74 |
| 5.5.4. Instalação de Câmera no interior do furo | 75 |
| 5.5.5. Preparação da Resina e do Gesso | 75 |
| 5.6. Casos Estudados | 76 |
| 5.7. Preparação do Ensaio | 77 |
| 5.8. Execução do Ensaio | 80 |
| | |
| 6 Apresentação e Análise dos Resultados | 83 |
| 6.1. Considerações Iniciais | 83 |
| 6.2. Resultados obtidos | 83 |
| 6.2.1. Mecanismos de Ruptura | 83 |
| 6.2.2. Caso base | 85 |
| 6.2.3. Comportamento do Sistema <i>Gravel-tela</i> | 86 |
| 6.3. Curvas Tensão-Deformação | 96 |
| 6.4. Comparação com o Modelo Numérico | 98 |
| 6.5. Considerações Finais | 101 |
| | |
| 7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros | 103 |
| 7.1. Conclusões | 103 |
| 7.2. Recomendações | 104 |
| 7.3. Sugestões para Trabalhos Futuros | 105 |
| | |
| Bibliografia | 107 |
| | |
| Apêndice A – Análise mineralógica do material utilizado para confecção dos blocos de arenito sintético | 114 |

Apêndice B – Fotos do ensaio e vídeos da formação do *breakout* em poço aberto e execução do ensaio.

120

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Equipamentos internos erodidos pelo carreamento de grãos. | 28 |
| Figura 2.2 – Esquema de canhoneio. | 32 |
| Figura 2.3 – Esquema da pré-consolidação do arenito (Borges, 2007). | 33 |
| Figura 2.4 – Esquema de poço aberto com tubo ranhurado e foto do tubo ranhurado (Weatherford, 2009). | 34 |
| Figura 2.5 – Disposição das ranhuras no tubo (Borges, 2007). | 35 |
| Figura 2.6 – Telas <i>Wire Wrapped</i> (Weatherford, 2008). | 35 |
| Figura 2.7 – Telas <i>Premium</i> (Weatherford, 2008). | 36 |
| Figura 2.8 – Telas Pré-empacotadas (Weatherford, 2008). | 36 |
| Figura 2.9 – Expansão das telas do tipo ESS (Weatherford, 2003). | 36 |
| Figura 2.10 – Esquema de empacotamento de grãos pelas telas expansíveis (Weatherford, 2003). | 37 |
| Figura 2.11 – Esquema de instalação do <i>Gravel Pack</i> . Acima o esquema de disposição do <i>gravel</i> pela onda α e abaixo o esquema de disposição pela onda β . | 38 |
| Figura 2.12 – Esquema de Indução de Pontos Críticos a partir da Taxa de Preenchimento e Formação de Dunas (BJ, 2008). | 39 |
| Figura 3.1 – Tipos de ensaio (GMI, 2006). | 42 |
| Figura 3.2 – As setas finas indicam compressão por fluido confinante e as setas espessas indicam compressão ou torção aplicada por atuadores (Mogi, 1971). | 42 |
| Figura 3.3 – Representação esquemática das rupturas frágeis a dúcteis com as respectivas deformações típicas e curvas de tensão-deformação para compressão uniaxial e tração (adaptado Griggs e Handin, 1960). | 44 |
| Figura 3.4 – Classificação das Rupturas de Amostras Submetidas a Ensaios Triaxiais, (Jaeger e Cook, 1979). | 44 |
| Figura 3.5 – Modos de ruptura mais comuns em um furo circular (apresentação comercial da GMI, 2006). | 45 |
| Figura 3.6 – Tipos de <i>breakouts</i> , (a) ruptura frágil (a) e (b) dúctil (Papamichos, 2008). | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 – Célula biaxial (Haimson e Lee, 2004). | 49 |
| Figura 4.2 – Equipamento utilizado na Universidade de Wisconsin (Haimson, 2007). | 49 |
| Figura 4.3 – Equipamento utilizado na Universidade Tecnológica de Delft (Dam <i>et al</i> , 2000). | 50 |
| Figura 4.4 – Equipamento utilizado na Terra Tek Inc (Kooijman <i>et al</i> , 1992). | 51 |
| Figura 4.5 – Vista Geral da Célula Poliaxial. | 52 |
| Figura 5.1 – Detalhes da célula poliaxial (Bloch, 2003). | 55 |
| Figura 5.2 - Válvulas de acionamento da célula poliaxial. | 56 |
| Figura 5.3 – Esquema de funcionamento das válvulas (Bloch, 2003). | 57 |
| Figura 5.4 – Sistema de válvulas secundário. | 57 |
| Figura 5.5 – Instalação dos atuadores. | 58 |
| Figura 5.6 – Placas e parafusos utilizados. | 58 |
| Figura 5.7 – Corpos de prova sintéticos. | 59 |
| Figura 5.8 – Forma utilizada para moldar os blocos da segunda fase. | 59 |
| Figura 5.9 – Imagem da areia por Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV. | 61 |
| Figura 5.10 – Confeção dos blocos (mistura). | 63 |
| Figura 5.11 – Moldagem dos blocos. | 63 |
| Figura 5.12 – Corpos de prova em cura. | 63 |
| Figura 5.13 – Ensaio de tração do latão. | 64 |
| Figura 5.14 – Corpos de prova de latão. | 65 |
| Figura 5.15 – Gráfico Tensão vs. Deformação (CP1 a CP4). | 66 |
| Figura 5.16 – Gráfico Tensão vs. Deformação (CP5 a CP8). | 66 |
| Tabela 5.4 – Propriedades do tubo de latão. | 67 |
| Figura 5.17 – Ensaio de compressão lateral do tubo. | 67 |
| Figura 5.18 – Gráfico Ovalização vs. Carga. | 68 |
| Figura 5.19 – Estrutura dos medidores de deformação (apresentação comercial da Kyowa). | 69 |
| Figura 5.20 – Equipamento utilizado para leitura dos medidores de deformação. | 69 |
| Figura 5.21 – Medidores de deformação utilizados. | 70 |
| Figura 5.22 – Preparação dos tubos para colagem dos medidores de deformação. | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.23 – Disposição dos medidores de deformação no tubo. | 71 |
| Figura 5.24 – Efeitos de borda. | |
| Figura 5.25 – Surgimento de forças cortantes devido à colocação de folhas de neoprene. | 72 |
| Figura 5.26 – Minimização do efeito do pistão sobre o corpo de prova | 72 |
| Figura 5.27 – Atuador sendo untado com a mistura. | 74 |
| Figura 5.28 – Cerâmica comercial <i>Carbolite</i> , malha 16/20 e malha 20/40. | 74 |
| Figura 5.29 – Câmera preparada para o ensaio. | 75 |
| Figura 5.30 – Corpo de prova sendo preparado para colocação da resina | 76 |
| Figura 5.31 – Montagem dos casos 3 (A) e 4 (B). | 77 |
| Figura 5.32 – Inspeção dos corpos de prova. | 78 |
| Figura 5.33 – Tubo alinhado. | 79 |
| Figura 5.34 – Instalação do sistema <i>gravel</i> -tela. | 79 |
| Figura 5.35 – Sistema montado. | 80 |
| Figura 5.36 – Ensaio em andamento. | 81 |
| Figura 5.37 – Visão geral do encerramento do ensaio. | 82 |
| Figura 5.38 – Encerramento do ensaio. | 82 |
| Figura 6.1 – Forma de ruptura típica do ensaio realizado. | 84 |
| Figura 6.2 – Corpos de prova ensaiados. | 84 |
| Figura 6.3 – Desplacamento devido ao efeito de bordas. | 85 |
| Figura 6.4 – Formato dos <i>Breakout</i> | 86 |
| Figura 6.4 – Resultados do ensaio 2, caso 1. | 87 |
| Figura 6.5 – Resultados do ensaio 3, caso 1. | 87 |
| Figura 6.6 – Resultados do ensaio 4, caso 1. | 88 |
| Figura 6.7 – Resultados da repetição do caso 1. | 88 |
| Figura 6.8 – Resultados do ensaio 1, caso 2. | 89 |
| Figura 6.9 – Resultados do ensaio 2, caso 2. | 90 |
| Figura 6.10 – Resultados do ensaio 3, caso 2. | 90 |
| Figura 6.11 – Resultados do ensaio 4, caso 2. | 91 |
| Figura 6.12 – Resultados do ensaio 2, caso 3. | 92 |
| Figura 6.13 – Resultados do ensaio 3, caso 3. | 92 |
| Figura 6.14 – Resultados do ensaio 4, caso 3. | 93 |
| Figura 6.15 – Resultados do ensaio 1, caso 4. | 94 |
| Figura 6.16 – Resultados do ensaio 2, caso 4. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.17 – Resultados do ensaio 3, caso 4. | 95 |
| Figura 6.18 – Resultados do ensaio 3, caso 4. | |
| Figura 6.19 – Gráfico de tensão <i>vs</i> deformação do caso 1, análise do <i>strain gage</i> 2. | 97 |
| Figura 6.20 - Gráfico de tensão <i>vs</i> deformação do caso 2, análise do <i>strain gage</i> 2. | 97 |
| Figura 6.21 - Gráfico de tensão <i>vs</i> deformação do caso 3, análise do <i>strain gage</i> 2. | 98 |
| Figura 6.22 - Gráfico de tensão <i>vs</i> deformação do caso 4, análise do <i>strain gage</i> 2. | 98 |
| Figura 6.23 – Distribuição de esforços atuantes na formação e malha de elementos. | 99 |
| Figura 6.24 – Distribuição das tensões tangenciais. | 99 |
| Figura 6.25 – Localização do nó utilizado na comparação entre os resultados numérico e experimental. | 100 |
| Figura 6.26 – Comparação entre os resultados experimentais e numérico considerando gravel de malha 20/40. | 100 |
| Figura 6.27 – Comparação entre os resultados experimentais e numérico considerando gravel de malha 16/20. | 101 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 5.1 – Traços testados e seus respectivos valores de resistência à compressão uniaxial. | 61 |
| Tabela 5.2 – Propriedades do arenito sintético. | 62 |
| Tabela 5.3 - Ensaio de Tração no Latão - Determinação das Propriedades Mecânicas. | 65 |
| Tabela 6.1 – Valores máximos adotados durante o ensaio. | 83 |

Lista de quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 – Comparação entre as vantagens e desvantagens das técnicas de contenção de areia. | 40 |
| Quadro 5.1 – Definição das linhas Hidráulicas de Acionamento da Célula Poliaxial (Bloch, 2003). | 56 |
| Quadro 5.2 – Diagrama para estimativa visual de esfericidade e arredondamento (API,1995). | 60 |

Lista de Símbolos

Romanos

| | |
|------------|--------------------------|
| C | Coesão |
| E | Módulo de elasticidade |
| N | Norte |
| p_1 | Tensão maior aplicada |
| p_2 | Tensão menor aplicada |
| S_{Hmax} | Tensão horizontal máxima |
| S_{hmin} | Tensão horizontal mínima |

Gregos

| | |
|---------------|--|
| ε | Deformação |
| ϕ | Ângulo de atrito |
| σ | Tensão |
| σ_1 | Tensão principal maior |
| σ_2 | Tensão principal intermediária |
| σ_3 | Tensão principal menor |
| θ | Ângulo entre o ponto escolhido e a direção da tensão |
| ν | Coefficiente de Poisson |

Lista de Abreviaturas

| | |
|-----|--|
| CP | Corpo de prova |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| TEP | Gerência de Tecnologia e Engenharia de Poços |