

GILBERTO HARUO HASHIMOTO

Caracterização Geomecânica de Rochas Salinas

**São Paulo
2010**

GILBERTO HARUO HASHIMOTO

Caracterização Geomecânica de Rochas Salinas

Trabalho de formatura apresentada ao Curso de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo como requisitos para a obtenção de Grau em Engenheiro de Minas.

Orientador : Prof. Eduardo César Sansone

São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
2010

TF-2010
H273c
Depo 2169519

GILBERTO HARUO HASHIMOTO

Caracterização geomecânica de rochas salinas

M2010t

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700008311

FICHA CATALOGRÁFICA

Hashimoto, Gilberto Haruo
Caracterização geomecânica de rochas salinas / G.H.
Hashimoto -- São Paulo, 2010
p. 30

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Caracterização tecnológica de rochas 2. Sal (Depósito mineral) 3. Mecânica de rochas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, amigos, professores e ao meu aprendizado no Laboratório de Hidráulica e Mecânica das Rochas do IPT que de alguma forma contribuíram para a sua elaboração.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Textura inicial de halita na foto à esquerda e textura após deformação axial com temperatura à direita.	12
FIGURA 02 - Testemunhos de sondagem de rochas salinas	14
FIGURA 03 - Ensaio de compressão indireta	15
FIGURA 04 – Esquemas das máquinas - IPT	18
FIGURA 05 - Esquema de uma das unidades de ensaio	19
FIGURA 06 – Face principal do CatMan - IPT	20
FIGURA 07 – Preparação do CP - IPT	21
FIGURA 08 – Montagem do equipamento - IPT	21
FIGURA 09 – Carregamento simultâneo das tensões axiais e confinantes - IPT	22
FIGURA 10 – Desmontagem do equipamento após ensaio - IPT	22
FIGURA 11 – Parâmetros dinâmicos	23
FIGURA 12 – Curvas de onda P e S em tempo real - IPT	24
FIGURA 13 - Cálculo da taxa de fluência estacionária	24
FIGURA 14 - Equação constitutiva da fluência estacionária	25
FIGURA 15 - Halita submetida a uma tensão desviatória de 16MPa e temperatura de 86°C. 28	
FIGURA 16 - Resultados dos ensaios de fluência das rochas salinas, taquidrita, carnalita e halita, quando submetidas a uma tensão desviatória de 10MPa e a temperatura de 86°C.....	29
FIGURA 17 – Taxa de deformação em regime de fluência permanente, para diferentes faixas de tensão desviatória	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Valores das tensões de tração	26
TABELA 02 – Valores de ensaio de compressão uniaxial	26
TABELA 03 - Valores de ensaio triaxial com fluência em halita.....	27

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
1 . INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
2. REVISÃO DA LITERATURA	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON E MÓDULO DE DEFORMABILIDADE.....	15
3.1.1 Material.....	15
3.1.2 Procedimento de Preparação de Corpos de Prova de Rochas Salinas.....	16
3.1.3 Procedimento para Execução de Ensaio	16
3.1.4 Resultados dos ensaios	16
3.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL COM DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON E MÓDULO DE DEFORMABILIDADE.....	17
3.2.1. Material.....	17
3.2.2 Procedimento de Preparação de Corpos de Prova de Rochas Salinas.....	17
3.2.3 Procedimento para Execução de Ensaio	17
3.2.4 Resultados dos ensaios	17
3.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL COM FLUÊNCIA.....	17
3.3.1 Procedimento de Preparação de Corpos de Prova de Rochas Salinas.....	20
3.3.2 Procedimento para Execução de Ensaio	20
3.3.3 Resultados dos ensaios	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	25
4.2 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	26
4.3 INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL COM FLUÊNCIA	27
5. CONCLUSÕES.....	30
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

RESUMO

Este trabalho visa estudar o comportamento geomecânico de rochas salinas (evaporíticas). Que estão presentes na camada pré-sal e corresponde a um conjunto de reservatórios mais antigos que a camada de sal, principalmente halita e anidrita. Métodos de determinação das propriedades mecânicas, cuidado na preparação de amostras, equipamentos de ensaio, taxas de deformação e fluência e interpretação dos resultados farão parte deste trabalho e com isso, a obtenção de um relatório de caracterização geomecânica. É fundamental a obtenção das propriedades mecânicas das rochas evaporíticas nas variáveis de estado, pressão e temperatura previstas para simular o comportamento no tempo dessas rochas durante a perfuração de um poço e de uma melhor compreensão dos efeitos que o fenômeno da halocinese de evaporitos exerce na alteração do estado inicial de tensões ou anomalia gravitacional. O Laboratório de Mecânica e Hidráulica de Rochas (LMHR) do IPT propiciou a otimização de diversas operações de campo na Petrobras e ainda permitiu a criação de um banco de dados de propriedades estáticas e dinâmicas. Espera-se, com a divulgação das atividades do LMHR, ampliar a dimensão desta atuação.

Palavras chave: Geomecânica; rocha salina; fluência; ensaios laboratoriais; tensão desviatória.

ABSTRACT

This work aims to study the geomechanical behavior of rock salt (evaporitic). In which is present in pre-salt layer and corresponds to a set of reservoirs older than the layer of salt, mainly halite and anhydrite. Methods for determining the mechanical properties, care in sample preparation, test equipment, and creep strain rates and interpretation of results will be part of this work and with this, obtaining a report geomechanical characterization. It is essential to obtain the mechanical properties of the evaporitic rocks in the state variables, pressure and temperature requirements for simulating the behavior in time of these rocks during drilling of a well and a better understanding of the effects that the phenomenon of halokinesis evaporites has on change the initial state of tension or gravitational anomaly. The Laboratory of Hydraulics and Mechanics of Rocks (LMHR) IPT allowed the optimization of various field operations at Petrobras and also allowed the creation of a database of static and dynamic properties. It is expected, with the release of the activities of LMHR, expand the scale of this activity.

Key Words: Geomechanics, rock salt, fluency, laboratory tests, tension deviant.

1. INTRODUÇÃO

A mecânica de rochas pode ser definida como a ciência que estuda a resposta das rochas com tensões aplicadas a ela. Maciços rochosos contêm fraturas de várias dimensões, de micro a longas fraturas. Em tensões baixas, a fratura pode-se fechar e o maciço se comporta elasticamente. Já em altas tensões, as fraturas podem se abrir e novas fraturas podem aparecer em seções intactas do maciço. Estimativas e dados do estado de tensões na crosta da Terra podem ser derivados por meio de vários métodos. Até 1970, maioria das medições das tensões foi motivada e iniciada por engenheiros para o desenvolvimento de construções subterrâneas como túneis e escavações em minas subterrâneas.

Este projeto atual que abrange as propriedades das rochas evaporíticas está relacionado com a ampliação do conhecimento das propriedades mecânicas e dos mecanismos de deformação das rochas salinas, os quais vem sendo estudados e desenvolvidos nestes últimos cinco anos no Laboratório de Mecânica e Hidráulica das Rochas no IPT em conjunto com a Petrobrás.

Neste contexto, ressalta-se que desde 2001, o LMHR vem desenvolvendo estudos sobre o comportamento de deformações por fluência de rochas salinas, visando a aplicação dos resultados nas simulações matemáticas em projetos de poços exploratórios através de camadas espessas de rochas salinas. Os ensaios têm sido realizados tanto em corpos de prova cilíndricos (CP), como em cilindros vazados (simulando-se um modelo reduzido de poço) visando ampliar o conhecimento das propriedades mecânicas e dos mecanismos de deformação das rochas salinas.

Técnicas semelhantes às que vêm sendo desenvolvidas no LMHR, podem ser também aplicadas no desenvolvimento de estudos relacionados com a estabilidade de cavernas para o armazenamento de gás em formações rochosas disponíveis nas regiões mais promissoras abrangem desde os Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro, até São Paulo, eixo de maior produção e consumo. Atualmente, utilizando-se a tecnologia desenvolvida para ensaios laboratoriais em célula de cilindro vazado, vêm sendo realizados ensaios em escala de laboratório para estudos da resistência à tração (fraturamento) de amostras de rochas salinas, simulando-se um ensaio de fraturamento hidráulico no laboratório.

Tendo-se em mente que nos estudos para determinação das propriedades das rochas, o efeito de escala tem bastante relevância devido às características pronunciadas de heterogeneidade e anisotropia dos maciços rochosos, torna-se necessário a realização de ensaios *in situ*, com o emprego de equipamentos e técnicas apropriadas, para confirmação de valores obtidos no laboratório.

Em termos globais, verifica-se existir hoje em dia, uma vasta literatura dedicada ao comportamento mecânico de rochas salinas, como também um grande interesse na sua determinação para alimentar os modelos matemáticos existentes, usando as medidas obtidas por meio da realização de ensaios laboratoriais, como dados de entradas para as simulações efetuadas.

No Brasil, infelizmente, embora o conhecimento das propriedades mecânicas seja conhecido pelos engenheiros atuando nas áreas de engenharia de minas e petróleo, a tecnologia nacional ainda está em desenvolvimento. Na engenharia de petróleo, mesmo que a técnica seja empregada visando o aumento da produção de poços, o seu uso para a

determinação do estado de tensões em horizontes profundos (>300m a 400m) ou para avaliar a estabilidade de cavernas para armazenamento de gás, ainda se constitui em obstáculo para a comunidade. O “*know-how*” sobre a interpretação dos ensaios ainda não é dominado pela comunidade técnica nacional. Devido à falta de conhecimento, associado tanto com o domínio das técnicas de execução e interpretação dos ensaios, como com a falta de equipamento apropriado para executar os ensaios, as medidas para determinação dessas propriedades têm estado até hoje na dependência de profissionais internacionais, os quais dominam a tecnologia de execução e interpretação dos ensaios. Estes, por sua vez, executam o seu trabalho sem, contudo, repassar o conhecimento tecnológico para o país. Este fato tem resultado no dispêndio de elevadas quantias em moeda estrangeiras.

Na perfuração de poços de petróleo em zonas de sal, o principal problema é o fechamento do poço ou mais conhecido como *squeeze*, este fenômeno provoca o aprisionamento da coluna de perfuração. A causa é o comportamento do evaporito definido como fluência, que é a tendência que um material tem para movimentar-se ou deformar-se permanentemente para aliviar as tensões. As deformações acontecem quando o material é sujeito a níveis de tensões prolongados, menores aos da tensão de ruptura.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho está relacionado com a ampliação do conhecimento das propriedades mecânicas e hidráulicas das rochas salinas, de interesse ao desenvolvimento da indústria de petróleo e gás. Os estudos estão principalmente associados com a realização de ensaios laboratoriais e o desenvolvimento de equipamentos para realização de ensaios visando à aplicação dos resultados nas simulações do comportamento de camadas rochosas profundas, atravessadas pelos poços exploratórios. Neste trabalho constará o acompanhamento e análise do comportamento de fluência do sal por meio de ensaios mecânicos como de compressão triaxial com temperatura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O evaporito é uma rocha sedimentar que apresenta camadas de minerais salinos, entre eles a halita principalmente. Esta ocorre naturalmente como um mineral de estrutura cristalina cúbica. Associada à altas deformações, sua textura cristalográfica também alterará. Observa-se um alto grau de anisotropia plástica em monocristais (Carter e Heard, 1970; Skrotzki e Haasen, 1981; Guillope e Poirier, 1979), um comportamento que é atribuído ao seu baixo grau de deslizamento. A textura da halita foi pesquisada por um número de pesquisadores (Kern e Braun, 1973). Em todos os casos, o desenvolvimento da textura substancial foi observada e relatada como figuras experimentais. Na época, a análise quantitativa ainda não era rotineiramente disponível. Skrotzki e Welch (1983) ensaiaram uma gama de rochas de sal em diversas condições de temperatura e pressão, gerando fortes texturas em altas tensões como mostrado na FIGURA 01 seguinte. Em altas deformações, a deformação foi acompanhada por uma recristalização dinâmica. Franssen e Skrotzki (1996) observaram em um ensaio de cisalhamento simples em halita uma textura padrão assimétrica semelhante às texturas de torção em metais. Um aspecto negativo para a interpretação destes dados experimentais é de que a textura, a descrição mecânica e microestrutural são incompletos, portanto, parecia valer a pena realizar uma série de experiências com objetivos bem definidos e uma caracterização completa das condições experimentais.

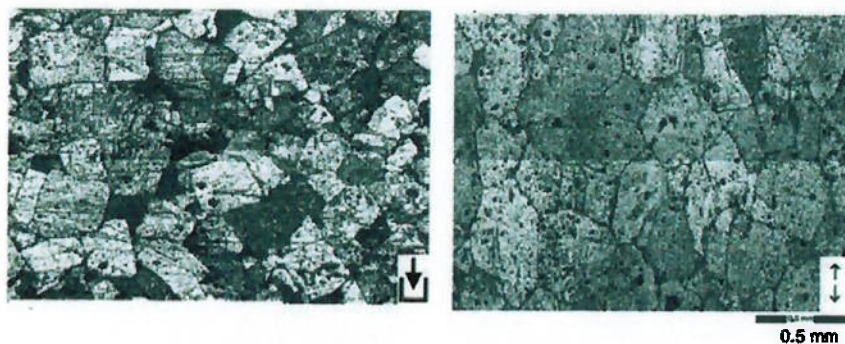


FIGURA 01 – Textura inicial de halita na foto à esquerda e textura após deformação axial com temperatura à direita. .

(Fonte:Ricardo A.Lebensohn, Paul R.Dawson,Hartmut M.Kern and Hans-Rudolf Wenk (2003).)

Medidas *in situ* e laboratoriais foram conduzidos afim de se estudar as propriedades do evaporito (permeabilidade, porosidade e eventual grau de saturação) em locais que na época se desejava estocar material radioativo. Wieczorek e Rothfuchs (1986) demonstraram que rochas salinas poderiam ter baixa permeabilidade (em torno de 10^{-15} a 10^{-21} m²) relacionado ao dano mecânico (ao redor de escavações). Atualmente, ainda é pouco conhecido sobre a permeabilidade de rochas salinas intactas longe, além da zona de rocha não perturbável criado por danos mecânicos.

Em relação a abordagem puramente mecânica, análises de deformação induzido por escavações subterrâneas estão sendo realizados. A influência da deformação dependente do tempo das escavações, devido ao comportamento viscoplástico da rocha salina é estudado ambos em laboratório e *in situ* (Langer e Munson, 1981). Nesta análise mecânica, o efeito de permeabilidade e da percolação de fluidos são raramente levados em conta devido aos resultados laboratoriais sobre os efeitos da salmoura quimicamente ativos na deformação da rocha salina. Reações físico-químicas entre a salmoura e contornos de grão ou microfraturas conduzidos por fraquezas nas propriedades mecânicas do sal.

A halita, que é o sal mais comum, é o menos móvel. Entretanto, se o sal é submetido a diferenciais de pressão e temperatura, o sal pode apresentar taxas relevantes de movimentação. Na Bacia de Campos, as taxas de fechamento dos poços de petróleo é da ordem de 2,5 cm em 20 horas na seção que prevalece a halita (Costa, 1998). Quanto maior a profundidade de perfuração, maiores serão as tensões desviatórias assim como maior a temperatura. Como resultado, mais rápido será o fechamento do poço causando o aprisionamento da broca de perfuração e seu fechamento em si.

Um entendimento mais aprofundado do comportamento que os evaporitos exercem no estado de tensões do maciço é fundamental hoje em dia na qual, a exploração do pré-sal e de minérios que compõem fertilizantes (carnalita) está sendo estudado. O fenômeno de halocinese cria no maciço rochoso uma anomalia gravitacional na qual o estado inicial de tensões gravitacionais é afetado pela movimentação da rocha salina. Esta afeta a determinação do peso específico da lama utilizada para conter o colapso do poço (Fredrich, 2003; Costa, 2005).

Espessas camadas de rochas salinas ou adjacentes necessitam de um estudo mais aprofundado quanto ao planejamento de lavra que se deseja executar. Na mina de potássio de Taquari-Vassouras foi feito na época um estudo completo quanto à abertura do poço que daria acesso ao minério. Logo, é fundamental a execução de ensaios laboratoriais das propriedades mecânicas das rochas evaporíticas nas variáveis de estado, pressão, temperatura para o poço a ser perfurado, e sobre o comportamento no tempo da rocha salina a diferentes tensões diferenciais e de temperatura. A simulação do comportamento de fluência da rocha evaporítica envolve uma modelagem do comportamento físico de natureza não-linear exigindo para tal aplicação, algoritmos de integração no tempo incrementais iterativos. O simulador foi desenvolvido por Costa (1984) e exige grande esforço computacional pela característica não-linear do modelo, assim como o nível de discretização para a correta aproximação do modelo do processo de perfuração do poço com a realidade.

Os evaporitos possuem a propriedade de dissolver-se em pouco tempo e ainda movimentar-se com uma rapidez significante frente a um projeto de poço. Além de possuir grande solubilidade na presença de água, o evaporito consegue deformar-se plasticamente no decorrer do tempo. O fenômeno de fluência está presente em todos os materiais, sendo caracterizado pela deformação plástica com o tempo mesmo em condições em que não há alteração do estado de tensões sobre o material. As rochas evaporíticas são conhecidas por apresentar elevadas taxas de deformação por fluência quando comparadas com outras rochas. Essa característica deve-se à presença de uma grande quantidade de discordâncias ou falta de átomos em sua estrutura cristalina. A característica mais comum de fluência em rochas, pode ser entendido na deformação de um corpo de prova versus tempo, quando submetido a uma tensão desviatória constante. Inicialmente, o material deforma-se instantaneamente (deformação elástica) e em seguida, ocorre uma desaceleração da deformação inicial, que representa a redistribuição da tensão aplicada no CP. Essa fase é conhecida como fluência primária, depois tem o início da fase secundária ou estacionária, na qual a rocha salina deforma-se sob uma taxa constante até aparecer a fluência terciária que precede a ruptura do material.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados 3 tipos de ensaios em halita (NaCl): ensaio de compressão uniaxial com determinação do coeficiente de Poisson e Módulo de Deformabilidade; ensaios de compressão triaxial sob altas pressões e temperatura, com medidas de V_p (velocidade de propagação de ondas ultrasônicas longitudinais) e V_s (velocidade de propagação de ondas ultrasônicas cisalhantes); e ensaio de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração, com determinação do coeficiente de Poisson e Módulo de Deformabilidade. A figura 02 ilustra os testemunhos de sondagens de rochas salinas.



FIGURA 02 - Testemunhos de sondagem de rochas salinas.

(Fonte : Sal Geologia e Tectônica, Webster Mohriak, Peter Szatmari, Sylvia M. Couto Anjos)

O foco dos ensaios de compressão triaxial realizados nas amostras de halita foi obter as deformações por fluência estacionária, isto é, a deformação axial que ocorre ao longo do tempo quando se aplica uma tensão desviatória constante. Foi observado o comportamento e medido a velocidade de propagação de ondas compressoriais e cisalhantes ao longo do ensaio.

Os ensaios foram realizados seguindo-se as orientações constantes nas Normas Técnicas para Ensaios da ASTM (*American Society for Testing Materials*): ASTM D2664-04; D2938-95; D3148-02; D3967-08; D4543-08; D5607-08; D7012-07, segundo solicitação da Petrobras. Quando aplicável também foram empregadas as orientações constantes nos "Suggested Methods" da *International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, documento de referência; (ISRM, 2007) e procedimentos internos do laboratório.

Os ensaios triaxiais foram executados empregando-se a célula de Hoek (Franklin & Hoek, 1970) e seguindo-se o procedimento convencional para este tipo de ensaio (ISRM, 2007). Segundo este procedimento, o corpo de prova cilíndrico é submetido a um

carregamento axial e a uma tensão de confinamento transmitida por meio de um fluido ao longo da superfície lateral do cilindro. Neste ensaio, a tensão axial corresponde à tensão principal maior. As duas componentes ortogonais decorrentes do confinamento durante o ensaio são iguais e correspondem às tensões principais menor e intermediária do tensor de tensões.

3.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON E MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

Para determinar a resistência à tração foi utilizada a norma ASTM D 3967-05 para ensaios para determinação da resistência à tração. Enquanto a força de tração direta pode ser obtida por meio de testes em um testemunho de rocha uniaxial, no entanto, esse teste é complicado e caro para aplicação de rotina. O ensaio de tração oferece uma alternativa desejável. Nesse ensaio, é usado normalmente um disco de rocha com comprimento/diâmetro = 0.5 é carregado diametralmente entre placas rígidas (com tiras de rolamento), até a ruptura. Ver Figura 03 para um exemplo de pós-ensaio típico de um CP de halita.



FIGURA 03 - Ensaio de compressão indireta.

(Fonte : Stephen J. Bauer and Scott T. Broome)

3.1.1 Material

Foram enviadas amostras de halita para execução de ensaio de compressão diametral, com determinação do coeficiente de Poisson e módulo de deformabilidade elástico (Módulo de Young). Os corpos de prova foram preparados a partir de testemunhos de sondagem, recebendo tratamento das suas superfícies.

3.1.2 Procedimento de Preparação de Corpos de Prova de Rochas Salinas

Testemunhos de sondagem provenientes de furos de petróleo devem ter diâmetro e altura de corpo de prova de $H = 0,5.D$ (altura do corpo de prova com metade do valor do diâmetro). Normalmente, usa-se a retífica para facear as duas faces do CP, mas recomenda-se o faceamento manual com diferentes lixas pois a retífica utiliza água no processo de faceamento. As amostras cilíndricas devem ter topo e base perfeitamente paralelos e planos, e devem ser também perpendiculares às superfícies de topo e base. Obtido o corpo de prova, mede-se a massa e utiliza-se o paquímetro devidamente aferido para medir o diâmetro e altura.

3.1.3 Procedimento para Execução de Ensaio

O ensaio é realizado da seguinte forma:

- a) preparação e aquisição das dimensões e propriedades do corpo de prova;
- b) instrumentação do corpo de prova com medidores de deformação do tipo *strain gage*;
- c) montagem do corpo de prova na máquina de ensaio;
- d) aplicação da tensão diametral até a ruptura da amostra;
- e) descarregamento, desmontagem e manutenção/limpeza do sistema;
- f) tratamento dos dados monitorados e registrados durante o ensaio.

3.1.4 Resultados dos ensaios

A resistência à tração é calculado pela fórmula seguinte:

$$\sigma_t = \frac{2 P}{\pi D L}$$

onde:

σ_t = resistência à tração

P = carga máxima aplicada

L = altura da amostra

D = diâmetro da amostra

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão pelo Método Brasileiro apresentam um conjunto de dados relativos aos testemunhos de sondagem de onde foram retirados os corpos de prova para ensaios, bem como as dimensões do CP, massa específica, força e tensão de ruptura no ensaio (correspondente à resistência a tração do material, σ_t).

3.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL COM DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON E MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

A tensão de ruptura por compressão uniaxial, é indicativa da resistência das rochas ao cisalhamento quando submetidas à pressão de carga, o que normalmente ocorre em funções estruturais.

3.2.1. Material

Foram enviadas amostras de halita para execução de ensaio de compressão uniaxial, com determinação do coeficiente de Poisson e módulo de deformabilidade elástico (Módulo de Young). Os corpos de prova foram preparados a partir de testemunhos de sondagem, recebendo tratamento das suas superfícies.

3.2.2 Procedimento de Preparação de Corpos de Prova de Rochas Salinas

Testemunhos de sondagem provenientes de furos de petróleo devem ter diâmetro e altura de corpo de prova de $H = 2D \sim 2,5D$ (altura do corpo de prova acima do dobro do valor do diâmetro). Normalmente, usa-se a retífica para facear as duas faces do CP, mas recomenda-se o faceamento manual com diferentes lixas pois a retífica utiliza água no processo de faceamento. As amostras cilíndricas devem ter topo e base perfeitamente paralelos e planos, e devem ser também perpendiculares às superfícies de topo e base. Obtido o corpo de prova, mede-se a massa e utiliza-se o paquímetro devidamente aferido para medir o diâmetro e altura.

3.2.3 Procedimento para Execução de Ensaio

O ensaio é realizado da seguinte forma:

- g) preparação e aquisição das dimensões e propriedades do corpo de prova;
- h) instrumentação do corpo de prova com medidores de deformação do tipo *strain gage* e clipe *gage*;
- i) montagem do corpo de prova na máquina de ensaio;
- j) aplicação da tensão axial até a ruptura da amostra;
- k) descarregamento, desmontagem e manutenção/limpeza do sistema;
- l) tratamento dos dados monitorados e registrados durante o ensaio.

3.2.4 Resultados dos ensaios

Os dados registrados forneceram funções no tempo como tensões axiais, deformações axiais e radiais, e com esses dados é possível obter gráficos de deformação, módulos de deformabilidade axial e radial e coeficiente de *Poisson*.

3.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL COM FLUÊNCIA

Com relação às propriedades de fluência, são utilizadas ensaios triaxiais de longa duração, para diferentes pressões e temperaturas (*American Society for Testing and Materials*,

2004c). Utiliza-se como dito anteriormente, o laboratório de reologia para rochas evaporíticas construído pela PETROBRAS e FINEP (projeto CT – PETRO) no IPT-SP .

No IPT, foi construído e desenvolvido um laboratório com seis estações de ensaios servo-controladas independentemente, sendo totalmente automatizadas. A Figura 04 ilustra as estações servo-controladas.

As estações dos ensaios triaxiais são compostas por sistemas hidropneumáticos (pressão axial e de confinamento), resistência elétrica (controle de temperatura), instrumentos de medição de deslocamentos (LVDTs – Linear Variable Displacement Transducers), transdutores de pressão e termopares. A Figura 05 ilustra o esquema de uma das unidades de ensaio.



FIGURA 04 – Esquemas das máquinas - IPT .

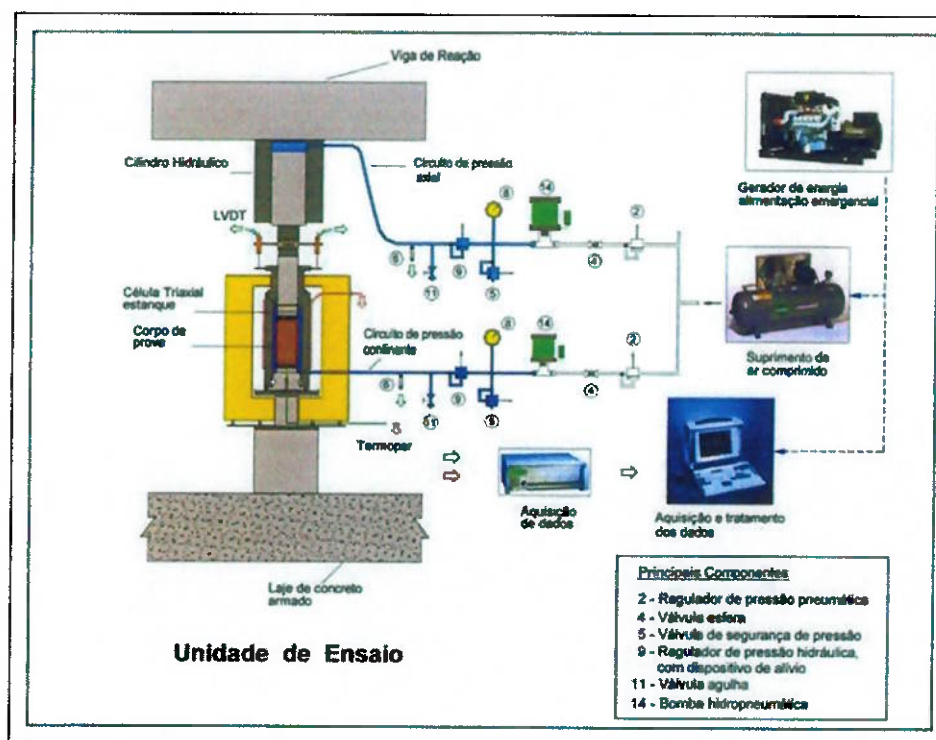


FIGURA 05 - Esquema de uma das unidades de ensaio

Todos os instrumentos estão conectados em um sistema de aquisição de dados (MGC Plus – HBM), que por sua vez está conectado a um computador industrial, que é conectado por uma rotina especialmente desenvolvida no programa CatMan (HBM) para controlar os ensaios, com a facilidade de plotar em tempo real as variáveis e armazenar as medições num banco de dados. Para garantir que os ensaios de fluência fossem realizados sem flutuação ou interrupção da rede elétrica de energia, *no-breaks* e um gerador de energia foram instalados, pois os ensaios de fluência podem durar vários meses.

O programa CatMan (HBM) possui um diferencial que é de plotar em tempo real múltiplas variáveis (Figura 06 ilustra a face principal das seis estações de ensaio). Uma dessas variáveis é a da velocidade de onda P e S de um corpo de prova salina, na qual, com o auxílio de dados essenciais como altura, diâmetro, massa e velocidade de onda medida no PUNDIT, pode-se medir variáveis dinâmicas como a velocidade de onda P e S e o Módulo de Poisson para cada diferencial de tempo.

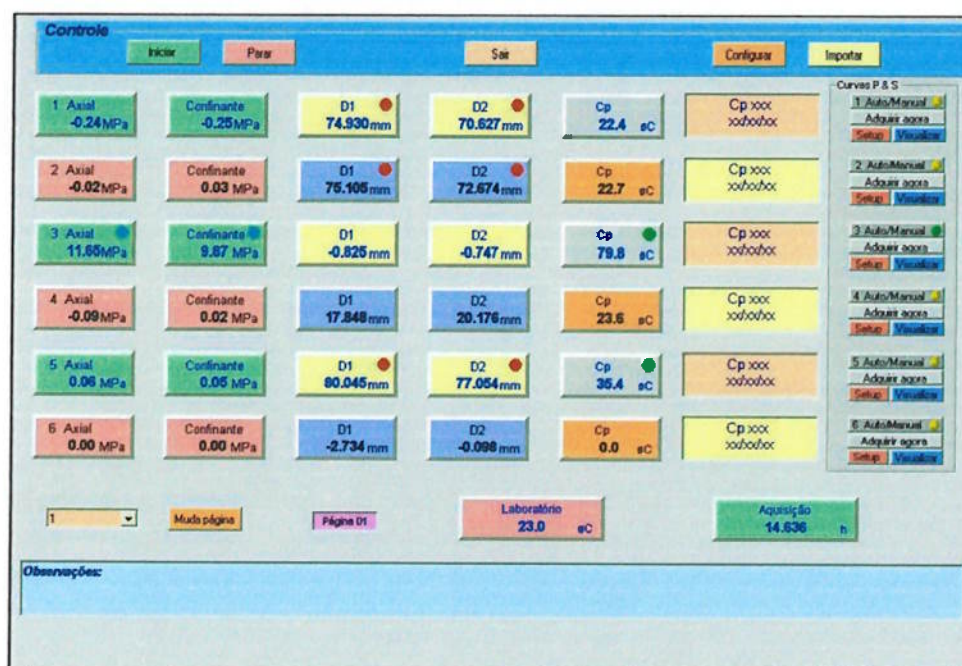


FIGURA 06 – Face principal do CatMan - IPT .

3.3.1 Procedimento de Preparação de Corpos de Prova de Rochas Salinas

Testemunhos de sondagem provenientes de furos de petróleo devem ter diâmetro e altura de corpo de prova de $H = 2D \sim 2,5D$ (altura do corpo de prova acima do dobro do valor do diâmetro). Normalmente, usa-se a retífica para facear as duas faces do CP, mas recomenda-se o faceamento manual com diferentes lixas pois a retífica utiliza água no processo de faceamento. As amostras cilíndricas devem ter topo e base perfeitamente paralelos e planos, e devem ser também perpendiculares às superfícies de topo e base. Obtido o corpo de prova, mede-se a massa e utiliza-se o paquímetro devidamente aferido para medir o diâmetro e altura.

3.3.2 Procedimento para Execução de Ensaio

O ensaio é realizado da seguinte forma:

- m) preparação e aquisição das dimensões e propriedades do corpo de prova. A figura 07 abaixo ilustra a preparação delicada do CP de halita;

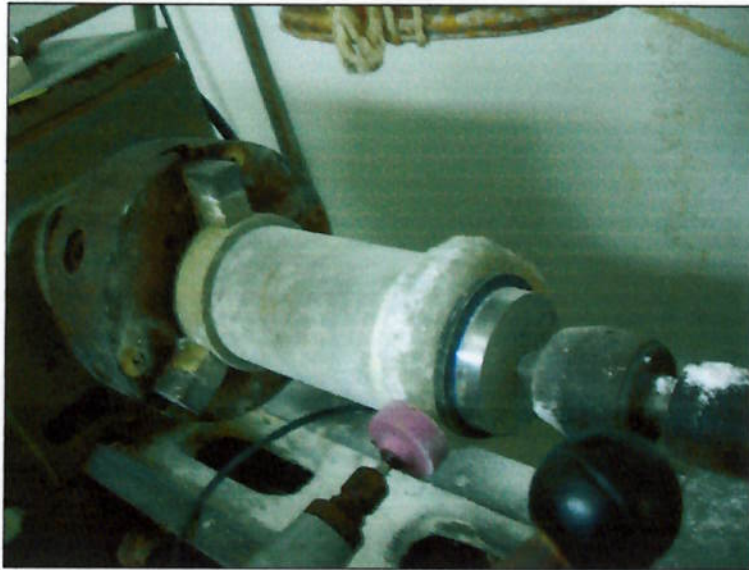


FIGURA 07 – Preparação do CP - IPT .

n) montagem do corpo de prova na máquina de ensaio;



FIGURA 08 – Montagem do equipamento - IPT .

- o) aplicação da tensão axial e tensão confinante até obter a diferencial de carga desejada e regulagem da temperatura no CP em condições definidas. A figura 09 abaixo ilustra o carregamento simultâneo do CP salino;

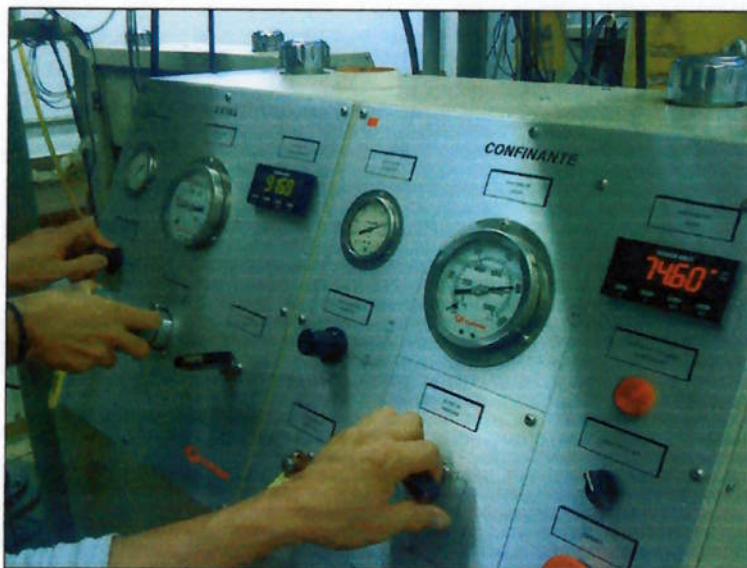


FIGURA 09 – Carregamento simultâneo das tensões axiais e confinantes - IPT .

- p) descarregamento, desmontagem e manutenção/limpeza do sistema;

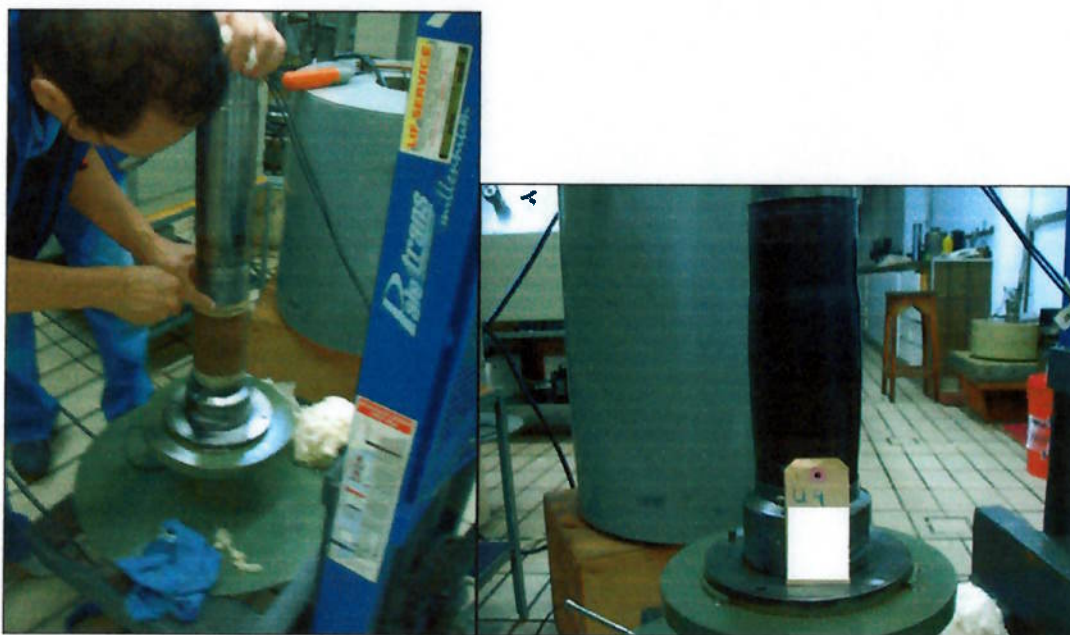


FIGURA 10 – Desmontagem do equipamento após ensaio - IPT .

- q) tratamento dos dados monitorados e registrados durante o ensaio.

3.3.3 Resultados dos ensaios

Os dados registrados forneceram funções no tempo como tensões axiais, deformações axiais e radiais, e com esses dados é possível obter gráficos de deformação, módulos de deformabilidade axial e radial e coeficiente de *Poisson*.

Com o auxílio dos LVDT's, consegue-se medir a deformação axial do evaporito. Logo, a altura do corpo de prova varia com o tempo, e por conseguinte a velocidade de onda também irá variar. As fórmulas a partir dos valores de onda P e S para obtenção do módulo de Poisson (ν) está logo abaixo (Figura 11):

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}}$$
$$V_p = \left[\frac{Ed(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2}$$
$$V_s = \left[\frac{Ed}{\rho 2(1+\nu)} \right]^{1/2}$$
$$\nu = \frac{1 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

FIGURA 11 – Parâmetros dinâmicos

Com esses parâmetros dinâmicos e com a visualização das curvas P e S em tempo real, tem como resultado final o valor do módulo de Poisson dinâmico naquele tempo, temperatura e deformação do corpo de prova. Abaixo, na Figura 12 ilustra-se a face do programa na qual pode-se obter tais parâmetros.

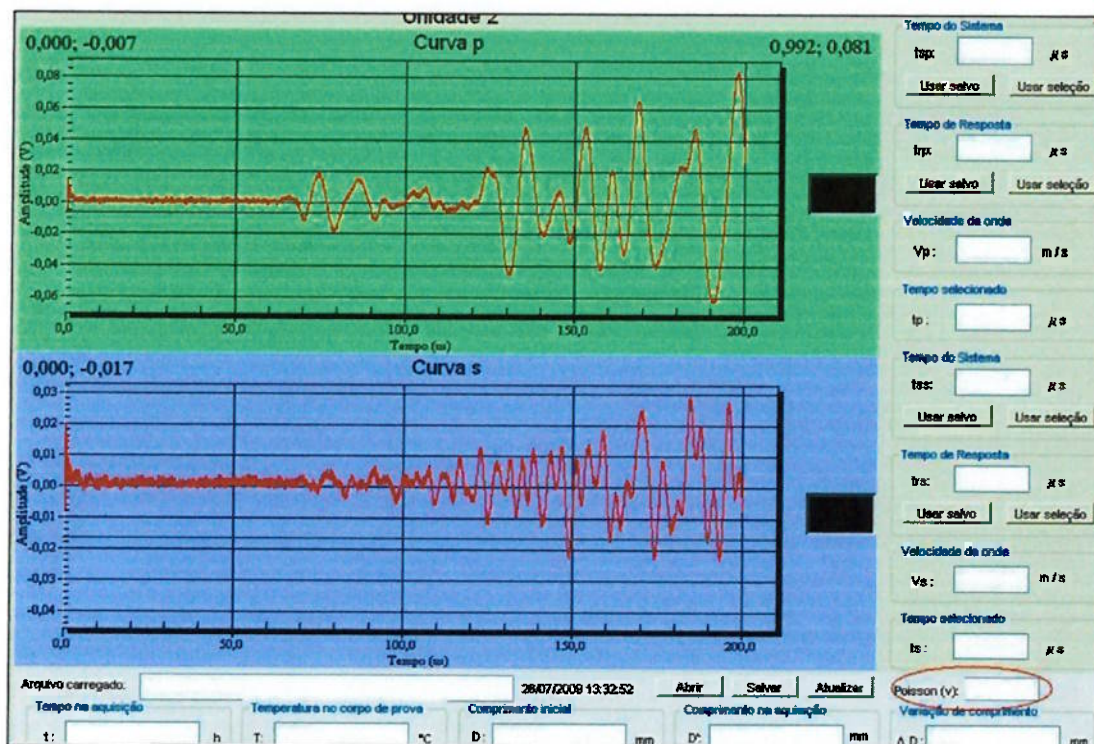


FIGURA 12 – Curvas de onda P e S em tempo real - IPT 1

Segue-se como observação que o maior interesse do cliente em questão das ondas ultrassônicas foi em verificar o comportamento das ondas P e S quanto a diferentes cargas axiais e de confinamento para simular o CP em tal profundidade de onde o testemunho foi extraído (V_p em torno de 4400 m/s para halita). Ocorre o relaxamento do testemunho na extração ($V_p = 4000$ m/s – medido no PUNDIT), logo a velocidade de onda diminui como consequência. Quando em equilíbrio de cargas ($\sigma_1 = \sigma_3$), A V_p aumenta acima de 4000 m/s e no aumento da temperatura ocorre a decaída da velocidade de onda.

Com os dados obtidos pelos LVDT's, consegue-se obter a taxa de fluência estacionária para cada diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$) desejado. O memorial de cálculo para a obtenção desta taxa em laboratório está na figura 13 seguinte:

$$\epsilon = \frac{\Delta \ell}{h}$$

$$Taxa = \frac{\epsilon}{\Delta T}$$

FIGURA 13 - Cálculo da taxa de fluência estacionária 1

Onde :

Δl : diferença de deslocamento axial da amostra ;

h : altura da amostra ;

ϵ : deformação específica ;

ΔT : trecho de tempo onde a deformação ocorre linearmente.

A equação constitutiva de fluência estacionária de mecanismo duplo de deformação é dada por (FIGURA 14) :

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp \left[\frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$
$$n = \begin{cases} n_1; & \sigma_{ef} \leq \sigma_0 \\ n_2; & \sigma_{ef} > \sigma_0 \end{cases}$$

FIGURA 14 - Equação constitutiva da fluência estacionária 1

(Fonte : Sal Geologia e Tectônica, Webster Mohriak, Peter Szatmari, Sylvia M. Couto Anjos)

Onde :

ϵ : taxa de deformação por fluência na condição de regime permanente (steady-state) ;

ϵ_0 : taxa de deformação por fluência de referência ;

σ_{ef} : tensão efetiva de fluência ;

σ_0 : tensão efetiva de referência ;

Q : energia de ativação, para halita, $Q=12$ Kcal/mol, (Munson, Torres & Blankenship, 1989) ;

R : constante Universal dos Gases, $R=1,9858 \times 10^{-3}$ kcal/mol.k ;

T_0 : temperatura de referência em K ;

T : temperatura absoluta da rocha na profundidade em estudo em K ;

n : coeficiente que depende do nível de tensões aplicadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Interpretação do ensaio de compressão diametral

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão pelo Método Brasileiro estão mostrados na TABELA 01. Nesta tabela apresenta-se, o conjunto de dados relativos aos testemunhos de sondagens de onde foram retirados os corpos de prova para ensaios, bem como profundidade e tensão de ruptura no ensaio (correspondente à resistência a

tração do material, σ_t). A tensão tracional de ruptura varia de 1,03 a 1,72 MPa e sua média é de 1,36 MPa.

Amostra	Profundidade (m)	σ_t (MPa)
Halita	317,0	1,52
	323,7	1,38
	335,3	1,72
	336,8	1,28
	356,0	1,38
	364,8	1,38
	366,7	1,72
	369,7	1,17
	374,9	1,21
	377,0	1,17
	380,4	1,03
	385,0	1,38

TABELA 01 - Valores das tensões de tração .

(Fonte : Stephen J. Bauer and Scott T. Broome).

4.2 Interpretação do ensaio de compressão uniaxial

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão pelo Método de Compressão Uniaxial estão mostrados na TABELA 02. Nesta tabela apresenta-se, o conjunto de dados relativos aos testemunhos de sondagens de onde foram retirados os corpos de prova para ensaios, bem como profundidade, densidade da amostra, velocidade compressional de onda e tensão de ruptura no ensaio (correspondente à resistência a compressão axial do material, σ_c). A tensão axial de ruptura varia de 8,80 a 19,6 MPa e sua média é de 14,60 MPa e está na faixa para o material de halita.

Amostra	ID	Profundidade (m)	Densidade (g/cm ³)	Vp (m/s)	σ_c (MPa)
Halita	UC01	379,5	2,16	3864	16,0
	UC02	355,4	2,18	4517	19,6
	UC03	379,8	2,16	4552	8,8
	UC04	354,5	2,17	4515	9,8
	UC05	317,0	2,22	4599	17,2
	UC06	385,6	2,21	3412	16,1

TABELA 02 – Valores de ensaio de compressão uniaxial .

(Fonte : Stephen J. Bauer and Scott T. Broome).

4.3 Interpretação do ensaio de compressão triaxial com fluência

Os resultados dos ensaios para determinação da resistência à compressão pelo Método de Compressão Triaxial com Fluência estão mostrados na TABELA 03. Nesta tabela apresenta-se, o conjunto de dados relativos aos testemunhos de sondagens de onde foram retirados os corpos de prova para ensaios, bem como profundidade, temperatura de ensaio, densidade da amostra, velocidade compressional de onda, tensão desviatória do ensaio e a taxa de fluência estacionária. A tensão diferencial varia de 15,0 a 27,6 MPa e nota-se que para a amostra A3#1 e A2#2, ambas com tensão desviatória de 27,6 MPa, tiveram suas taxas de fluência 2,7 vezes maior quando aumentada a temperatura de 35 °C para 55 °C.

Amostra	ID	Temp. °C	Profundidade (m)	Densidade (g/cm3)	Vp (m/s)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	Taxa de fluência estacionária E-05 (h ⁻¹)
Halita	A2#1	52	338,0	2,23	4204	15,0	42,6	27,6	1,16
	A1#1	55	343,2	2,18	4104	20,7	48,3	27,6	6,16
	A3#1	55	384,7	2,2	4595	27,6	55,2	27,6	27,65
	A3#2	55	343,5	2,18	4101	24,1	51,7	27,6	8,39
	A3#3	55	349,0	2,19	4542	13,8	41,4	27,6	0,50
	A1#2	55	348,4	2,15	3961	20,7	48,3	27,6	6,05
	A2#2	35	348,7	2,17	4111	27,6	55,2	27,6	10,33

TABELA 03 - Valores de ensaio triaxial com fluência em halita.

(Fonte : Stephen J. Bauer and Scott T. Broome).

A figura 16 seguinte ilustra o resultado de ensaio para halita quando submetida a uma tensão desviatória de 16 MPa e temperatura de 86 °C. Três estágios de fluência (comentada na revisão bibliográfica) compreendem uma curva de de fluência das rochas salinas. Quando o corpo de prova é submetido a uma tensão desviatória muito alta, a taxa de deformação também será alta, resultando numa curva com forte inclinação. Nota-se pela figura 16 que a deformação permanece constante do período de 200 a 1600 horas. No ensaio, a halita apresenta fluência primária nas primeiras 200 horas e a seguir fluência secundária até 1600 horas. No período de 1600 a 2200 horas, o material entra na fluência terciária tornando visível a rápida taxa de deformação por fluência e o ângulo em que a curva de deformação apresenta, ocorrendo a dilatação do esqueleto mineral da rocha pelo aumento do volume através de micro fraturamentos conduzindo à ruptura.

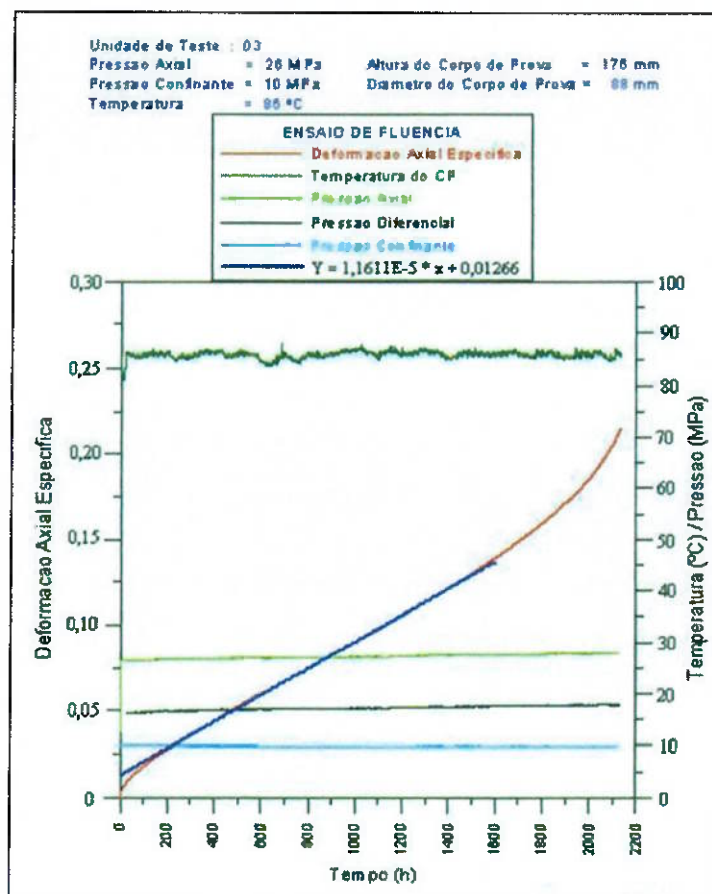


FIGURA 15 - Halita submetida a uma tensão desviatória de 16MPa e temperatura de 86°C.
 (Fonte : Sal Geologia e Tectônica, Webster Mohriak, Peter Szatmari, Sylvia M. Couto Anjos)

A figura 16 seguinte ilustra os resultados de ensaio de fluência das rochas evaporíticas taquidrita, carnalita e halita, quando submetidas a uma tensão desviatória de 10 MPa e temperatura de 86 °C. Nota-se que a taxa de deformação da halita é muito baixa comparada com outras rochas evaporíticas como taquidrita e carnalita que possuem moléculas de água na sua composição. As deformações axiais específicas para taquidrita, carnalita e halita são da ordem de 0,15 ; 0,055 ; 0,0014; respectivamente. A taquidrita possui uma taxa de deformação por fluência cerca de 107 vezes maior que a halita e 2,7 vezes maior que a carnalita (Poiate, Costa & Falcão, 2006).

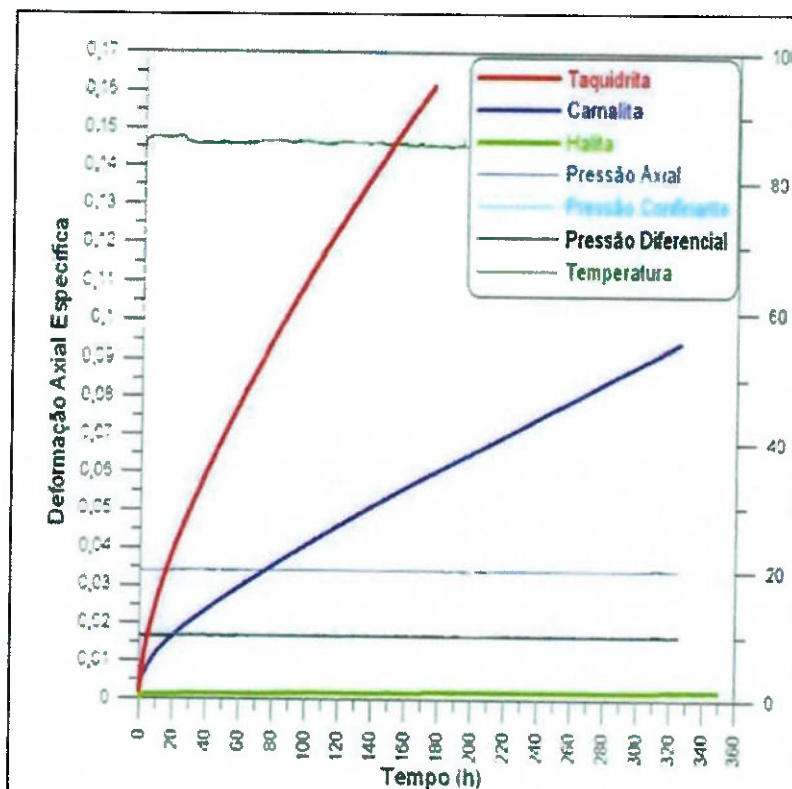


FIGURA 16 - Resultados dos ensaios de fluência das rochas salinas, taquidrita, carnalita e halita, quando submetidas a uma tensão desviatória de 10MPa e a temperatura de 86°C.

(Fonte : Sal Geologia e Tectônica, Webster Mohriak, Peter Szatmari, Sylvia M. Couto Anjos)

A figura 17 ilustra a taxa de deformação em regime de fluência permanente para diferentes faixas de tensão desviatória (4-20 MPa) na temperatura de 86 °C para taquidrita e halita. O comportamento da taquidrita muda após 7 MPa (σ_0), mostrando a passagem para outro mecanismo de fluência, na qual o coeficiente angular passa de 2,40 para 7,12 e na halita passa de 3,36 para 7,55 após uma tensão diferencial de 9,9 MPa.

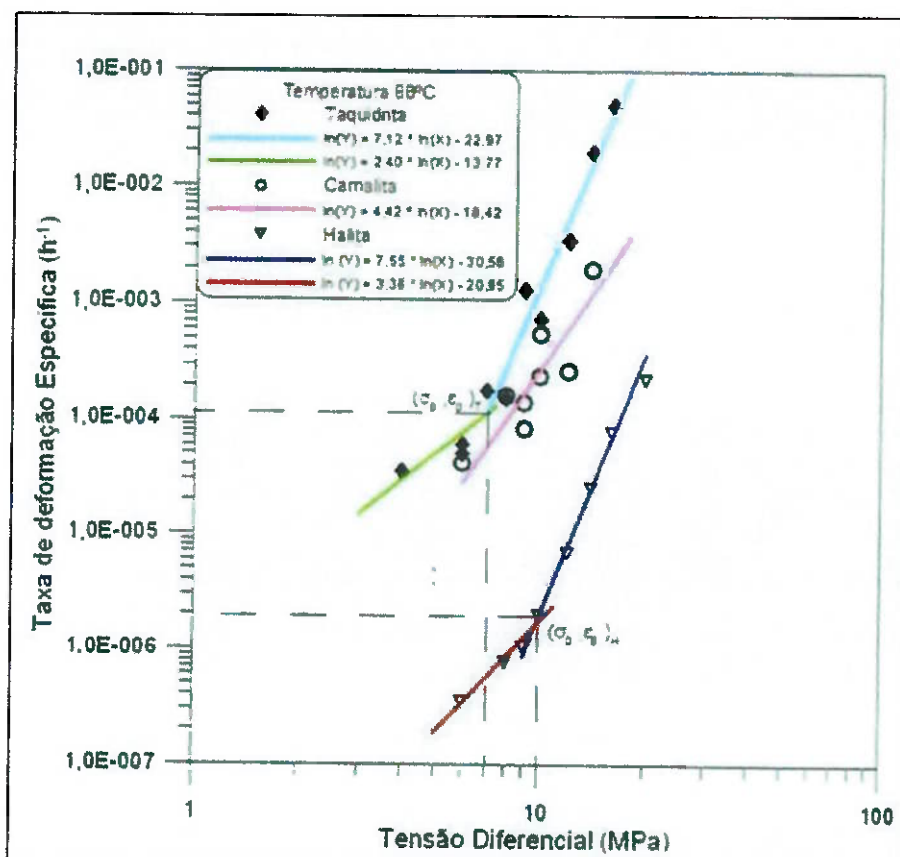


FIGURA 17 – Taxa de deformação em regime de fluência permanente, para diferentes faixas de tensão desviatória.

(Fonte : Sal Geologia e Tectônica, Webster Mohriak, Peter Szatmari, Sylvia M. Couto Anjos)

5. CONCLUSÕES

O estudo sobre o comportamento mecânico das rochas salinas está em crescimento no Brasil, em razão da perfuração de poços de petróleo no pré-sal e na extração de potássio para a indústria de fertilizantes. Este trabalho em si, é uma pesquisa sobre a caracterização geomecânica de rochas salinas, o trabalho mostra o comportamento do sal frente a diferentes métodos de ensaios mecânicos e enfatiza bastante em relação a fluência do material. Ainda há muito o que se estudar em relação a ele, pois cada ensaio de compressão triaxial com fluência leva em média três meses para sua conclusão e levou dois anos para elaborar o gráfico da taxa de deformação em regime de fluência da FIGURA 17. Logo, estudos laboratoriais ainda devem ser feitos, afim de aprimorar as técnicas de perfuração de poços em rochas salinas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Franklin J. & Hoek, E. (1970). "Developments in triaxial testing technique". *Rock Mechanics*, 2, 223-228.

Franklin, J.A. & Dusseault, M.B. (1989). *Rock Engineering*. Ed. McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-021888-9.

ISRM (2007). *International Society for Rock Mechanics (ISRM). The Complete Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. ISRM Commission on Testing Methods – "Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials" e "Suggested Method for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version" (ISRM, 1983, 2007).*

ASTM (American Society for Testing Materials): ASTM D2664-04; D2938-95; D3148-02; D3967-08; D4543-08; D5607-08; D7012-07,

Langer M. (1981), *The rheological behavior of rock salt. Proc. 1st Conf. On Mech. Behavior of Salt, Penn-State University, pp. 201-231, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.*

MOHRIAK, W.; SZATMAN, P.; ANJOS, S. M. C. Sal: Geologia e Tectônica. 1º Ed. São Paulo: Beca, 2009. 363-384p.

Stephen J. Bauer and Scott T. Broome. *Revised Results for Geomechanical Testing of MRIG-9 Core for the Potential SPR Siting at the Richton Salt Dome-SANDIA REPORT*, 2010.

Ricardo A. Lebensohn, Paul R. Dawson, Hartmut M. Kern and Hans-Rudolf Wenk (2003). *Heterogeneous deformation and texture development in halite polycrystals: comparison of different modeling approaches and experimental data. Tectonophysics* 370 (2003) 287-311.

Wieczorek P., Rothfuchs T. (1986), *In situ permeability measurements in Results of temperature tests 6 in the Asse Mine, Vol I., Rapport C.E.C. EUR 10827 EN/I.*