

BRUNO YOSHIDA TOMASELLI

**ENSAIOS DE FLUÊNCIA EM CILINDROS
VAZADOS DE ROCHA SALINA**

**São Paulo
2004**

BRUNO YOSHIDA TOMASELLI

**ENSAIOS DE FLUÊNCIA EM CILINDROS
VAZADOS DE ROCHA SALINA**

Trabalho de Formatura do curso de graduação
em Engenharia de Minas.
Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da
Silva

São Paulo

2004

TF-2004
T591e

1421086

BRUNO YOSHIDA TOMASELLI

ENSAIOS DE FLUÊNCIA EM CILINDROS
VAZADOS DE ROCHA SALINA

Trabalho de Formatura do curso de graduação
em Engenharia de Minas

Universidade de São Paulo

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005441

de São Paulo

M2004C

FICHA CATALOGRÁFICA

Tomaselli, Bruno Yoshida

**Ensaaios de fluência em cilindros vazados de rocha salina /
B.Y. Tomaselli. – São Paulo, 2004.**

32 p.

2004

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

**1.Ensaaios de fluência 2.Mecânica de rochas (Ferramenta)
3.Evaporitos (Amostra) I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo II.t.**

A Deus
Aos meus pais e meu irmão
Aos meus amigos do Centro Cultural Itaim

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as coisas que Ele me tem feito.

Aos meus pais Fulvio e Neusa, que me deram tudo que tenho na vida e por sempre terem me apoiado.

Ao meu irmão Fernando, que é acima de tudo um grande amigo.

Aos meus amigos do Centro Cultural Itaim, por terem me ajudado no meu crescimento.

Ao meu orientador Prof. Lineu A. A. da Silva, por sua inestimável contribuição à conclusão do trabalho.

Ao Eng. Vilmondes Ribeiro, com quem pude aprender muitas coisas durante os anos que trabalhei no IPT.

Ao pessoal do IPT, em especial o Eng. Lúcio Coelho e os técnicos Alcides, Ademir, Agostini, Joaquim, Manoel e Ronei, por terem me auxiliado neste trabalho e durante o tempo que trabalhamos juntos.

A todos os meus amigos da Poli, por todos esses anos de convivência.

Resumo

Os corpos-de-prova na forma de cilindros vazados são uma ferramenta muito versátil, podendo ser utilizados numa ampla gama de aplicações, desde uma simulação das condições de tensão nas aberturas de túneis até o estudo do comportamento de materiais sob diversos caminhos de tensão. No entanto, as dificuldades apresentadas para a realização do ensaio são um empecilho para estudos experimentais.

Diversos estudos já foram realizados, voltados principalmente para a área de fluência das rochas. Nos ensaios triaxiais de compressão convencionais e nos ensaios de extensão, é medida a resposta do material para estados de tensão no qual duas das tensões principais são iguais. Para uma modelagem mais exata do comportamento termomecânico do sal, são utilizados ensaios com cilindros vazados. Esses possibilitam um estado mais geral de tensões, onde as três tensões principais são únicas e controladas independentemente.

Este trabalho teve como base o desenvolvimento de pesquisa realizada no IPT como continuação de um projeto convênio entre o IPT e a FINEP para exploração de horizontes profundos através da perfuração de grandes espessuras de sal.

Palavras – chave

Ensaio mecânico, fluência, cilindros vazados, rocha salina, poços de petróleo.

Abstract

Specimens in the form of hollow cylinders are versatile tools which can be used in many applications ranging from simulating stress conditions around underground openings to studying the behavior of geomaterials under a wide variety of stress paths. Nevertheless, they remain little utilized in experimental studies due to the difficulties involved in developing such tests.

Many studies have been developed in the area of the salt creep. Conventional triaxial compression and extension tests measures material response for stress state in which two of the principal stress are equal. Hollow cylinder tests are used for a more accurately model of the thermo mechanical behavior of salt. These allow a general stress state test to be performed in which all three principal stresses are unique and independently controlled.

This work was based in a development research realized at IPT as a continuation of a project between IPT and FINEP for the exploration of deeply horizons by drilling thickness salt deposits.

Sumário

Resumo

Palavras-chave

Abstract

1.	Justificativa.....	7
2.	Escopo.....	7
3.	A Fluência.....	8
3.1	Introdução.....	8
3.2	Leis Empíricas.....	8
3.3	Modelos Reológicos.....	9
3.4	Leis de Fluência Associadas a Processos Físicos.....	10
3.4.1.	Fluência Estacionária.....	10
3.4.2.	Fluência Primária Transitória.....	12
3.4.3.	Fluência Terciária.....	12
3.4.4.	Fluência por Compactação em Meio Poroso.....	13
3.4.5.	Mecanismos de Deformação do Regime de Fluência.....	14
4.	A Rocha Salina.....	17
4.1	Introdução.....	17
4.2	Modelos e Parâmetros de Fluência da Rocha Salina.....	18
5.	Ensaio em Cilindro Vazados.....	21
5.1	Introdução.....	21
5.2	Teoria.....	21
6.	Metodologia Proposta.....	24
6.1	Introdução.....	24
6.2	Amostragem e Corpos-de-prova.....	24
6.3	Aparelhagem.....	25
6.4	Procedimento.....	29
6.5	Análise de Resultados.....	29
7.	Conclusão.....	30
8.	Bibliografia.....	30

1. Justificativa

Na indústria do petróleo, muitos problemas de instabilidade ocorrem em folhelhos e rochas salinas, os quais compreendem uma porção significativa das formações de óleo e gás exploradas. A instabilidade pode levar a uma série de problemas, como: custos elevados de perfuração e colapso parcial ou total dos poços, podendo ocorrer a perda total da jazida.

Muitas locações de poços apresentam alvos geológicos em profundidades superiores aos 5000 metros, geralmente em ambientes de alta pressão e alta temperatura, podendo também estar presentes certos tipos de evaporitos em suas seções estratigráficas. A presença dessas seções aumenta a possibilidade de sucesso exploratório, devido às condições propícias para a formação de armadilhas (*traps*) adjacentes aos corpos de halita, além da possibilidade de deposição de matéria orgânica logo após o estrato da halita. Por outro lado, a perfuração nesse ambiente é desafiador, já que os evaporitos sofrem uma deformação elástica instantânea e uma deformação lenta com o tempo (fluência). Com o aumento da temperatura e dos níveis de tensão diferencial, aumenta a velocidade de deformação por fluência.

Historicamente, na Bacia de Campos, foram perfurados até o ano de 1985, um total aproximado de 26 poços atravessando seções evaporíticas. Desses, 11 apresentaram prisão de coluna nas passagens em halita e um deles teve o revestimento colapsado numa seção em halita. Devido a esses problemas, 3 poços foram desviados e outros 3 foram abandonados.

A previsão do comportamento de fluência da halita e seus efeitos, tanto em poço aberto quanto em poço revestido, tem grande valia para o projeto de perfuração como um todo, pois permite dimensionar o peso do fluido de perfuração a níveis que mantenham a fluência da halita sob controle, sem fraturar as formações acima da mesma.

2. Escopo

A pesquisa teve como objetivo a análise de um método de ensaio inédito para o estudo da fluência de rochas salinas em poços de petróleo, submetidas a níveis de tensão e temperaturas elevados. O projeto envolveu a concepção, desenvolvimento, montagem e a realização de ensaios, aproveitando toda a experiência adquirida com os projetos de fluência do sal, especialmente relacionado com um estudo recente conduzido pelo Laboratório de Mecânica e Hidráulica das Rochas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (LMHR/IPT) sobre ensaios de fluência em evaporitos.

Tendo participado do desenvolvimento do projeto apresentado por Cella (2003), o autor julgou relevante a continuação da pesquisa para um melhor entendimento do fenômeno da fluência em rochas salinas, com a utilização de corpos-de-prova vazados. Esses permitem uma melhor aproximação das condições encontradas *in situ*.

Com base nos resultados obtidos, espera-se fornecer dados mais exatos para uma correta simulação do comportamento de fluência da halita em poços de petróleo ou cavidades subterrâneas destinadas à extração mineral.

Outra importância do projeto será o desenvolvimento para aplicação em estudos de aberturas subterrâneas como poços e túneis.

3. A Fluência

3.1 Introdução

A fluência é um comportamento da rocha que depende do tempo, sendo caracterizado por uma deformação que evolui de forma contínua, sem que haja um aumento de tensão aplicada à rocha. Em geral, os danos provocados na textura são permanentes, mesmo que a remoção do carregamento seja realizada na fase inicial. Dessa forma, a deformação é preferencialmente plástica. Excetuam-se, nesses casos, rochas submetidas a temperaturas muito elevadas, como a halita (NaCl) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), as quais comportam-se de modo elástico quando é realizada a remoção da tensão na fase de fluência primária.

De uma maneira geral, as rochas, quando carregadas, sofrem fluência. Ela é, no entanto, ignorada, pois na maioria das rochas o regime de fluência só é atingido em temperaturas e tensões acima dos limites usuais das estruturas de engenharia. No caso das rochas salinas e alguns folhelhos, a fluência é significativa para faixas de temperaturas e pressões que são usuais na prática da engenharia. As características da fluência podem ser estudadas mediante ensaios de laboratório ou *in situ*, sendo esta uma das propriedades mais complexas do comportamento das rochas. No regime de fluência estacionária, a razão de deformação é lenta e constante, permitindo uma redistribuição eficiente das tensões impostas a uma estrutura rochosa, não ocorrendo uma concentração de tensão significativa. Dessa forma, a ruptura da rocha poderá ocorrer após um longo período de atuação, podendo atingir de meses até anos.

A fluência é geralmente descrita em termos de taxa ou velocidade de deformação:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \text{ (com } \sigma_1 - \sigma_3 \text{ e } T \text{ constantes)} \quad (1)$$

Onde:

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação ou fluência;

$d\varepsilon$ = variação da deformação no intervalo de tempo dt ;

$\sigma_1 - \sigma_3$ = tensão diferencial;

T = temperatura.

Para o desenvolvimento de projetos de engenharia, o estudo mais completo consiste na abordagem integrada de modelos de fluência, que incluem: leis empíricas de fluência, leis fundamentadas em modelo reológicos e leis baseadas nos mecanismos físicos de deformação da matriz rochosa.

3.2 Leis Empíricas

A Figura 1 (Dusseault & Fordham, 1995) mostra a forma mais geral da curva deformação versus tempo para a fluência. A primeira deformação que se observa é uma quase instantânea (ε_0), correspondente a uma deformação elástica. Logo após, observa-se uma desaceleração da deformação inicial, representando uma redistribuição da tensão aplicada. É a fluência primária ou transitória. Na fase de fluência secundária ou estacionária, que aparece em seguida, ocorre uma deformação sob taxa constante. Por último, antes da ruptura do material, pode ocorrer a fluência terciária.

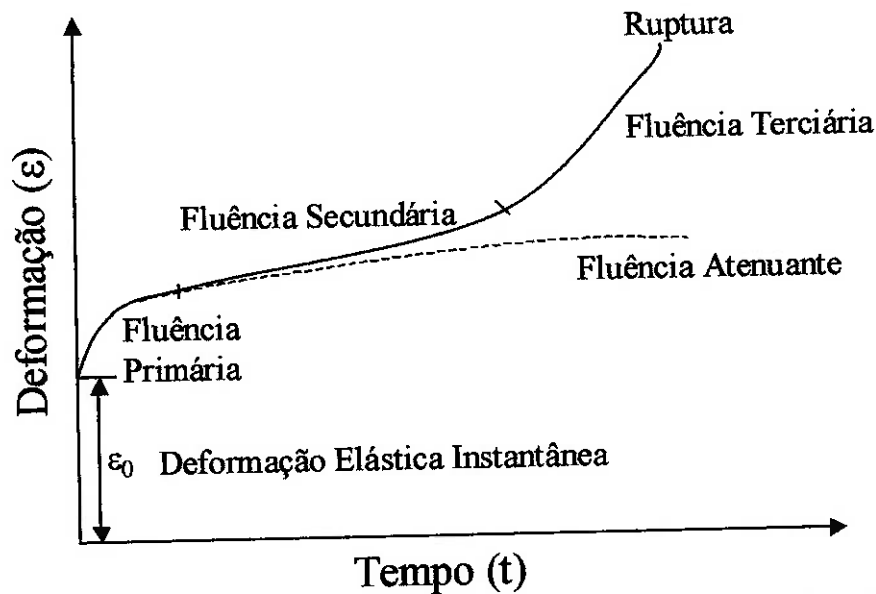


Figura 1 – Gráfico deformação versus tempo para a fluência em três estágios: Primária (desaceleração da deformação), secundária ou estacionária (taxa constante) e terciária (aceleração e ruptura) (apud Dusseault & Fordham, 1995)

As primeiras leis empíricas da fluência apresentadas por Phillips (1905; em Dusseault & Fordham, 1995) e por Andrade (1910; em Langer, 1981) consistiam em curvas ajustadas a dados referentes a deformações extensionais. No entanto, elas apresentavam as seguintes limitações:

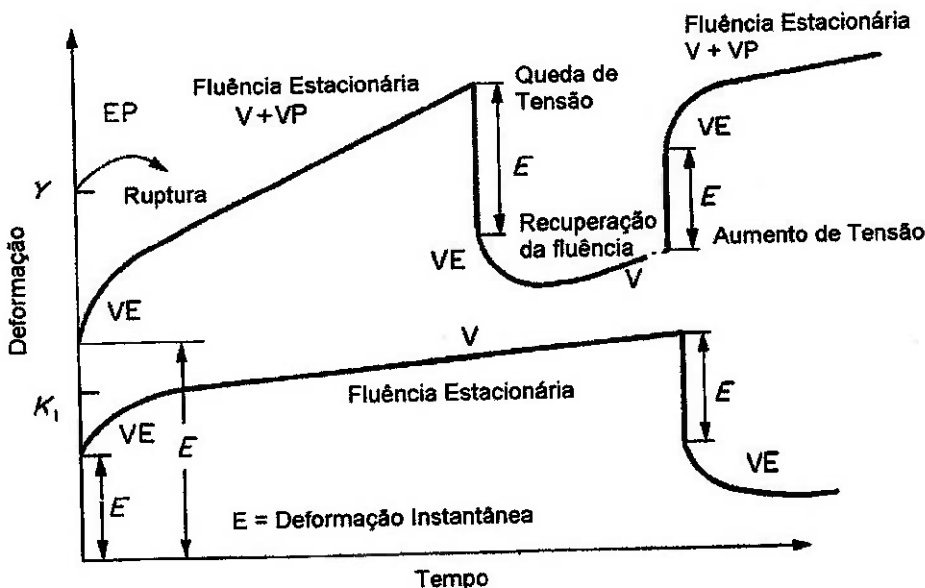
- Períodos curtos e grandes taxas de deformação;
- *Strain hardening* constante (endurecimento da deformação);
- Não diferenciação entre tensões de tração e compressão;
- Puramente empíricas, não demonstrando mecanismos físicos;
- Ignoravam o efeito da temperatura.

Se a matriz permanecesse inalterada, a rocha apresentaria somente o estágio de fluência primária.

3.3 Modelos Reológicos

Do ponto de vista macroscópico, utilizam-se os modelos reológicos para representar o comportamento tensão – deformação – tempo – cedência através de quatro elementos básicos: mola (deformação elástica), amortecedor (fluência), deslizante (deformação plástica) e ruptura (cedência frágil).

Esses elementos não levam em consideração o efeito da temperatura ou a estrutura intrínseca da rocha. Para a modelagem dos diversos tipos de regime e comportamento, pode-se associá-los em série e paralelo. A Figura 2 representa um modelo para o comportamento do sal. No entanto, deve-se notar que essas leis não podem ser extrapoladas além do domínio validado por dados experimentais e que elas só são válidas para períodos curtos de tempo ou intervalos limitados de tensão.



Q = energia de ativação associada a um determinado mecanismo;
R = constante universal dos gases;
T = temperatura (K).

Na equação normalizada, a tensão diferencial é dividida por σ_0 , que pode ser o módulo de cisalhamento G ou a tensão limiar pré-determinada, a fim de que as unidades sejam racionais. A sua fórmula será, então:

$$\dot{\epsilon} = A \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_0} \right)^n \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \quad (3)$$

Os valores das constantes e expoentes são variáveis, de acordo com as condições de temperatura e pressão, das variações texturais e do teor de impureza presente no sal. Para ensaios em temperaturas de até 300°C e tensões diferenciais de até 15-20 MPa, os valores usuais são de 1 MPa para σ_0 , 54 kJmol⁻¹ para Q e 0,18 dia⁻¹ para A, com um valor predominante de 5 para n.

A influência desse expoente n pode ser melhor entendida na Figura 3, que consiste num diagrama padrão log-log, com a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) nas ordenadas e a tensão diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$) nas abscissas, sendo o fator variável de acordo com o mecanismo de deformação. Para uma faixa mais ampla na variação da tensão efetiva, esses mecanismos podem ser combinados.

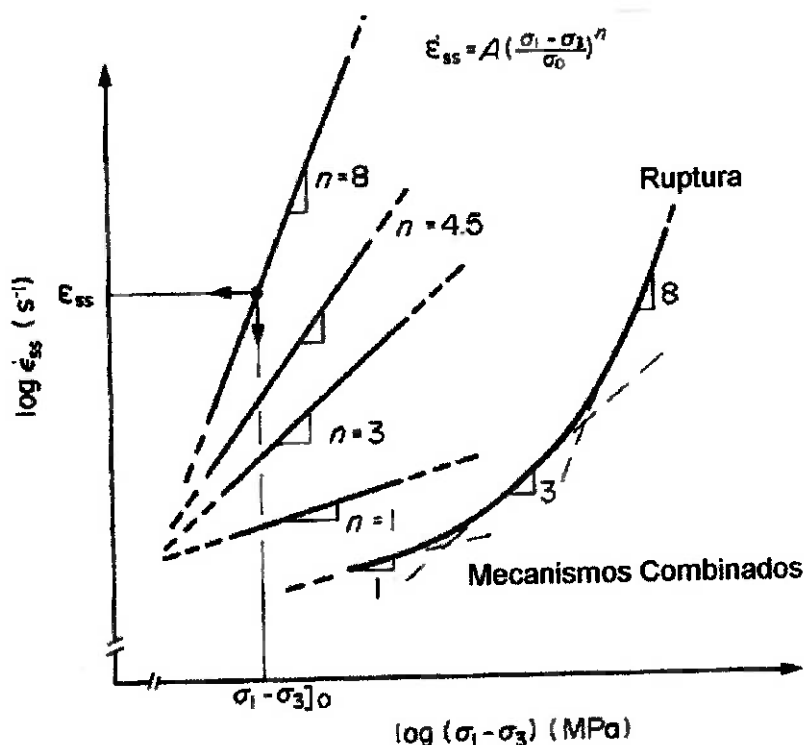


Figura 3 – Diagrama padrão log-log de $\dot{\epsilon}$ versus $(\sigma_1 - \sigma_3)$ para vários mecanismos de deformação. O valor do expoente n é condicionado pelo tipo de mecanismo físico que controla a fluência (Dusseault & Fordham, 1995; apud Cella, 2003).

3.4.2. Fluência Primária Transitória

A aproximação mais comum para uma lei física baseada no comportamento transitório da fluência consiste na lei da diminuição da taxa utilizando a cinética de primeira ordem. Ao se fixar, a taxa de deformação primária decai a uma taxa proporcional ao componente primário atual remanescente, levando a seguinte expressão (Dusseault & Fordham, 1995):

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-\alpha t) \quad (4)$$

Onde α e $\dot{\epsilon}_0$ são determinados pelo ajuste na curva dos dados de fluência *in situ* ou de laboratório. Na realidade, o único fundamento físico nessas equações é a consideração de que a taxa de decaimento é uma função linear da 'concentração' da fluência transitória primária corrente, sendo que nenhum mecanismo físico é postulado.

Segundo os autores, há 4 processos primários de fluência muito claros:

- A resposta transitória aparece a partir da redistribuição das tensões em materiais não-Newtonianos;
- A ΔT leva a uma reação transitória por causa da variação na taxa de deformação (equação 2) e da variação no volume termal;
- A reação transitória é relacionada ao dano rochoso durante a escavação ou na preparação do corpo-de-prova;
- A reação transitória intrínseca surge devido ao comportamento na escala dos grãos dos materiais policristalinos.

No campo, os quatros podem agir. Para ensaios em laboratório com corpos-de-prova danificados, somente os últimos dois. Por fim, para corpos-de-prova de alta qualidade, somente o último, uma vez que os ensaios são normalmente realizados a temperatura constante T. Os modelos são empíricos e baseados no conhecimento prático.

3.4.3. Fluência Terciária

Segundo Dusseault & Fordham (1995), a aceleração da fluência pode ser causada pelo aumento do dano textural relacionado com o crescimento e coalescência das micro-fissuras. Sob certa T e estados de tensão, normalmente elevada por variações cíclicas, a ruptura poderá eventualmente ocorrer por causa da aceleração dos danos. As micro-fissuras se desenvolvem ao longo dos limites granulares, podendo ser nucleadas pelos defeitos cristalinos. A fluência terciária nas rochas é acompanhada pela dilatação, já que o crescimento na concentração de micro-fissuras requer um aumento volumétrico. No campo, se a dilatação é suprimida pelo material presente no seu entorno, as tensões excedentes são redistribuídas, causando um surgimento de condições de tensão críticas. Não há uma equação fundamental para descrever o comportamento das taxas de fluência terciária, sendo que são utilizadas equações empíricas baseadas em leis potenciais, exponenciais ou outros tipos similares de curva, com a predição totalmente determinada a partir de medições de campo específicas. Essas consistem, normalmente, em medições das taxas de deformação, com o ajuste dos dados em curvas empíricas obtidas de experiências anteriores.

3.4.4. Fluência por Compactação em Meio Poroso

Os reservatórios de petróleo podem apresentar uma fluência volumétrica associada à compactação do meio poroso, a qual pode estar relacionada com a expulsão atrasada ou a absorção de água dos poros (consolidação e enchimento), o colapso ou esmagamento dos grãos, ou outros processos de fluência na escala granular, tais como solubilização e precipitação ou a deformação viscoplástica no contato granular.

A consolidação e o enchimento são processos de transporte de fluido difusivo induzidos pelos gradientes de saturação, concentração, T e P. A viscoplasticidade dos contatos granulares rapidamente se atenua por causa do aumento rápido da área de contato, reduzindo as tensões locais. A precipitação e a solubilização podem prolongar-se por longos períodos, sendo um processo importante para o caso da halita ou quando as temperaturas são elevadas (como nos processos de recuperação térmica avançada de óleo).

Alguns mecanismos, como: a perda de coesão, a pressão de poros negativa e a resistência ao cisalhamento, podem ser simulados utilizando ensaios de laboratório em grande escala, mas não há relações fundamentais e os ensaios deverão ser suplementados com instrumentação de campo. Como a re-saturação depende do clima e do estado de drenagem, as previsões exatas de tempo são praticamente impossíveis. A Figura 4 mostra um resumo dos mecanismos.

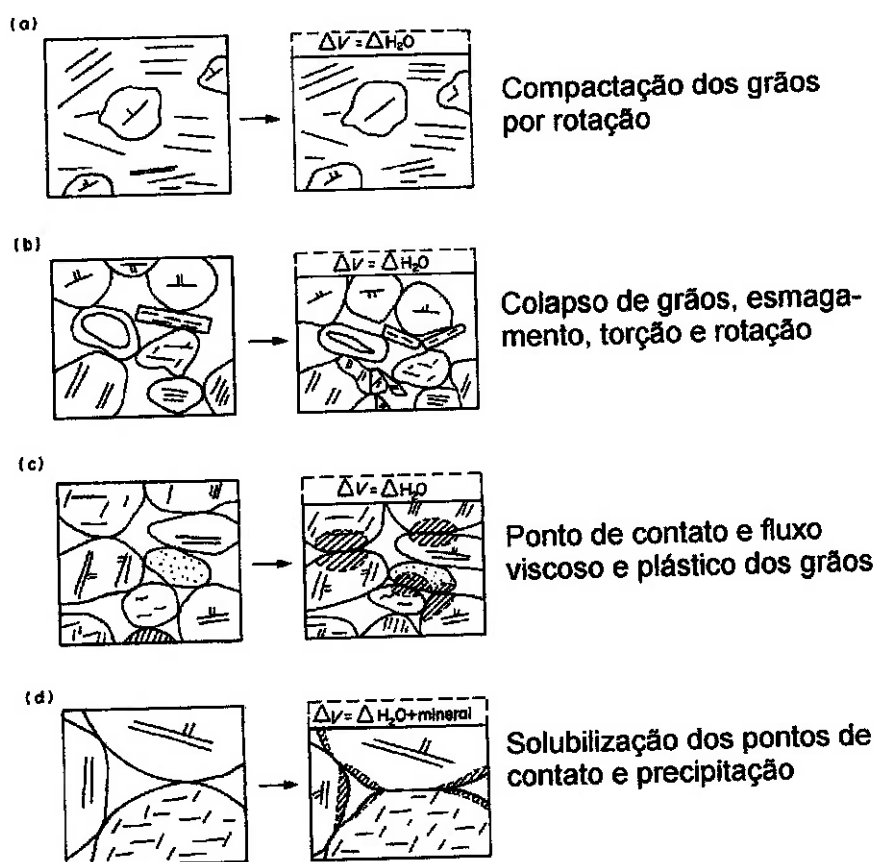


Figura 4 – Mecanismos de fluência por compactação: (a) Consolidação, (b) Colapso de grãos, (c) Comportamento viscoplástico do grão, (d) Transferência de massa por solubilização – precipitação (apud Dusseault & Fordham, 1995)

3.4.5. Mecanismos de Deformação do Regime de Fluência

A fluência é causada por diferentes mecanismos físicos correlacionados à estrutura interna dos agregados policristalinos e às variáveis de estado como a pressão e a temperatura. A taxa de fluência é essencialmente controlada pelo mecanismo de deformação dominante num certo estado de temperatura ou pressão. Os principais mecanismos são:

- Deformação a partir da propagação de distorções originais no retículo cristalino, tais como *dislocation climb* ou *dislocation glide*;
- Difusão de massa líquida ou sólida;
- Solubilização sob pressão (*pressure solution*);
- Deslizamento ou superplasticidade de interfaces granulares;
- Catáclase e suas variações, incluindo esmagamento de contatos granulares e propagação de micro-fissuras, com ou sem selagem dinâmica.

A estrutura cristalina de um sólido contém imperfeições no arranjo atômico ao longo de uma aresta ou de um plano do retículo que são denominadas de deslocamentos em defeitos cristalinos. Essas distorções deformam o arranjo atômico planar típico do cristal, gerando forças atômicas localizadas muito elevadas na estrutura do cristal. Quando a resistência da ligação atômica é superada sob tensão, o equilíbrio interatômico é rompido, e a deformação se propaga como uma frente de deslocamento, inicialmente através de compensações atômicas planares (*glide*), até atingir um novo estado de imbricamento e a criação de novas interfaces subgranulares. Se esse imbricamento não é superado, há uma tendência de desaceleração contínua da fluência, conhecida como *hardening* (Dusseault & Fordham, 1995), até a atenuação completa da deformação ao longo do tempo. Ocorre, porém, que o estado de imbricamento pode ser superado em certas condições através da movimentação escalonada de átomos no retículo cristalino (*climb*), que tende a manter a deformação, num processo conhecido como *dynamic recovery* (Rutter, 1995). De acordo com Hunsche e Hampel (1999), é do equilíbrio entre o processo de bloqueio dos deslocamentos (*hardening*) e o do galgamento que a fluência estacionária se estabelece. Segundo os autores, quando os dois processos não estão em equilíbrio, a fluência varia no tempo e a rocha encontra-se no regime transitório.

Com a continuidade da deformação e à medida que os defeitos internos nos cristais acumulam-se, as interfaces dos grãos são afetadas, com a indução de micro-fissuras (separação física nas faces dos cristais) que causam a iniciação de novos planos de distorção (*glide planes*) nos cristais adjacentes, até a fragilização da estrutura policristalina como um todo (Dusseault & Fordham, 1995).

Sob temperaturas muito elevadas (acima de 35% da temperatura de fusão da rocha salina, em Langer), os mecanismos de difusão de massa envolvem a movimentação da fase líquida (íons em solução) ou sólida (átomos), com a produção de lacunas (*vacancies*) no arranjo atômico original do cristal (fluência de Nabarro-Herring) ou ao longo de interfaces granulares (fluência de Coble) do aglomerado policristalino. A migração das lacunas ocorre na direção oposta à deformação por fluência, sendo necessário um mecanismo de geração de lacunas.

Rutter (1995) enquadra os deslocamentos em defeitos cristalinos e a difusão atômica como fenômenos dominantes na plasticidade intracristalina, ressaltando que são processos que

modificam a estrutura cristalina, porém não envolvem a dilatação da rocha. Por isso, não são suscetíveis à variação da pressão de confinamento.

A transferência difusiva de massa da fase líquida ocorre através da movimentação iônica nas películas de água nos contatos dos grãos em aglomerado policristalino de baixa porosidade, ou através do líquido intersticial em meio poroso. Exemplos comuns são: a fluência da halita e o processo de diagênese. Átomos são dissolvidos (solubilizados) nas regiões de tensões elevadas, incluindo os defeitos pontuais produzidos na superfície dos grãos, de onde o material solubilizado é removido e, obedecendo às trajetórias dos gradientes de concentração de tensão, são precipitados nas regiões de tensão baixa, ou seja, na estrutura porosa granular (Dusseault & Fordham, 1995).

Em minerais altamente solúveis como a halita, a taxa de transporte do solubilizado controla a taxa de deformação por fluência. Numa microtextura de baixa porosidade, o controle da taxa de fluência é exercido pela velocidade de precipitação (Cella, 2003).

Resumindo, no processo difusivo da fase líquida, a taxa de deformação por fluência é dependente da velocidade de três processos concorrentes: solubilização, transporte e precipitação.

O mecanismo de deslizamento ao longo dos contatos granulares acomoda a mudança de forma dos cristais adjacentes produzidas pelos processos de distorção e difusão previamente discutidos. Por isso, eles sempre acompanham a fluência difusiva e, frequentemente, associam-se à fluência por deslocamentos em distorções cristalinas, sendo causados por tensões de cisalhamento entre os grãos. O processo é mais importante em rochas muito porosas, que não é o caso da halita (Cella, 2003).

O mecanismo de catáclase é uma deformação em regime frágil, geralmente no contato dos grãos, mas também afeta o interior dos grãos, produzindo, no limite, a pulverização local do material. Ela ocorre quando a carga aplicada ultrapassa o limite de atrito, quando a resistência dos grãos é superada ou quando a resistência da estrutura de poros do material é atingida. O mecanismo cessa pela redistribuição das tensões abaixo desses limites (Dusseault & Fordham, 1995).

O processo de micro-fissuração estável envolve a geração de rupturas ao longo dos contatos entre os grãos, acompanhado de uma selagem decorrente da transferência de massas em estado fluido na escala da micro-fissuração. Nos evaporitos, o processo de micro-fissuração estável é importante e predomina na fluência produzida no nível de tensões e taxas de deformação (10^{-6} a 10^{-10} s^{-1}) geralmente produzidas nos ensaios de laboratório, sendo dependente da tensão de confinamento (Dusseault & Fordham, 1995).

Cada um dos mecanismos, com exceção da catáclase, possui uma taxa de fluência distinta e introduz um intervalo característico nos gradientes do diagrama log - log entre a taxa de fluência estacionária e a tensão diferencial aplicada, sob uma certa temperatura. Em suma, cada mecanismo específico possui uma amplitude de valores de temperatura e tensão diferencial no qual um prevalece sobre o outro, conforme a Figura 3.

A Figura 5 apresenta um mapa dos principais mecanismos de deformação por fluência estacionária identificados para a halita (Dusseault & Fordham, 1995), desenvolvido a partir de dados teóricos e experimentais.

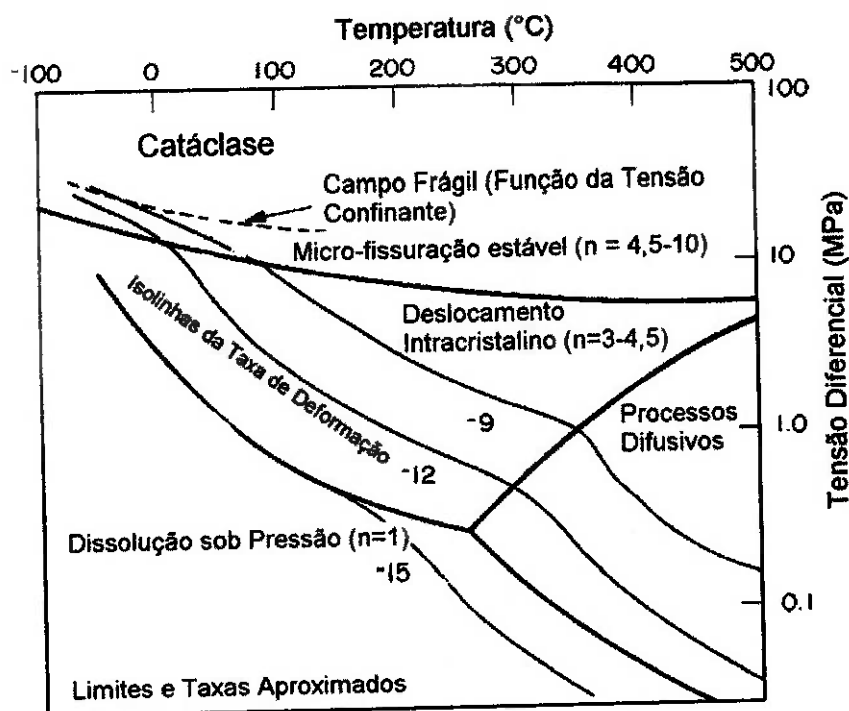


Figura 5 – Mapa de mecanismos de deformação para a halita

A Tabela 1 resume as características dos principais mecanismos.

Tabela 1 – Resumo dos principais mecanismos de fluência (apud Cella, 2003)

Mecanismo	Fenômeno	Características
Deslocamento em planos atômicos (dislocations)	Alterações no arranjo cristalino em função do re-equilíbrio de forças interatômicas	- Ampla faixa de pressão e temperatura - Mecanismo intracristalino de alta plasticidade - Não dilatante
Difusão atômica	Migração massiva por aumento excessivo da energia cinética do sistema	- Requer alta temperatura e taxa de deformação muito lenta (baixa tensão) - Proporcionalidade com a tensão aplicada
Difusão da fase líquida	Transporte de íons dissolvidos sob pressão em película de água nos contatos de grãos	- Pressão e temperatura da ordem da deformação - Na halita, a taxa de fluência é controlada pela velocidade do transporte iônico
Deslizamento nos contatos de grãos	Deslocamentos diferenciais nas interfaces granulares	- Deflagrado pelo excesso de deformação intracristalina por mecanismo de deslocamento atômico nas imperfeições do cristal

Mecanismo	Fenômeno	Características
Micro-fissuração estável	Geração de fissuras acompanhada de selagem dos planos por precipitação dos fluidos de inclusões	- Temperatura equivalente ou superior à da formação e tensão confinante significativa - Regime parcialmente dilatante
Micro-fissuração franca	Geração de fissuras com propagação instável	- Tensão diferencial elevada e baixo confinamento - Regime dilatante

4. A Rocha Salina

4.1 Introdução

As rochas salinas, principalmente os minerais como halita, silvinita, carnalita e taquidrita, fluem quando submetidas a uma tensão cisalhante apreciável. Sob uma variação na tensão, a rocha salina exibe uma deformação instantânea seguida pela fluência, sendo as taxas iniciais rápidas, mas em desaceleração (fluência primária). Se todos os fatores permanecem constantes, $\dot{\epsilon}$ se torna constante, resultando num estado de fluência estacionária. Se a estrutura se altera (i.e. se a micro-fissuração continua), o sal poderá se enfraquecer com a deformação ou romper; mais provavelmente $\dot{\epsilon}$ irá alterar e a estrutura se ajustará para um novo estado de equilíbrio. (Dusseault & Fordham, 1995).

A halita está entre as rochas evaporíticas mais estudadas pela sua abundância nos estratos salinos das bacias sedimentares em todo o mundo. A rocha salina apresenta diversos mecanismos de controle e taxas dentro da amplitude de T e σ encontradas na engenharia. De forma geral, os processos de fluência são variáveis de acordo com o nível de tensão diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$). Dessa forma (Dusseault & Fordham, 1995):

- Entre 4 – 8 MPa, domina a fluência por solubilização e precipitação;
- Entre 10 – 15 MPa, dependendo do tipo de sal, dominam os processos de deslocamento;
- Na faixa entre 25 – 30 MPa e dependendo de σ_3 , domina o estado de fluência estacionária com micro-fissuração e selagem;
- Acima de 25 – 30 MPa e com σ_3 menor que 15 MPa, ocorre uma catáclase com enfraquecimento pela deformação;
- Para σ_3 maior que 15 MPa e grandes tensões de cisalhamento, ocorre uma deformação viscoplástica 'ideal' com enfraquecimento pela deformação.

Para cada regime há uma $\dot{\epsilon}$ associada, sendo que nos últimos três ela é sensível à σ_3 , devido a micro-fissuração envolvida.

O comportamento das rochas salinas também será dependente do teor de umidade, o qual deverá ser especialmente preservado no momento do armazenamento.

A Figura 6 reproduz de forma idealizada um tipo de *dislocation* ou a distorção no arranjo atômico da halita (NaCl), que se cristaliza no hábito cúbico.

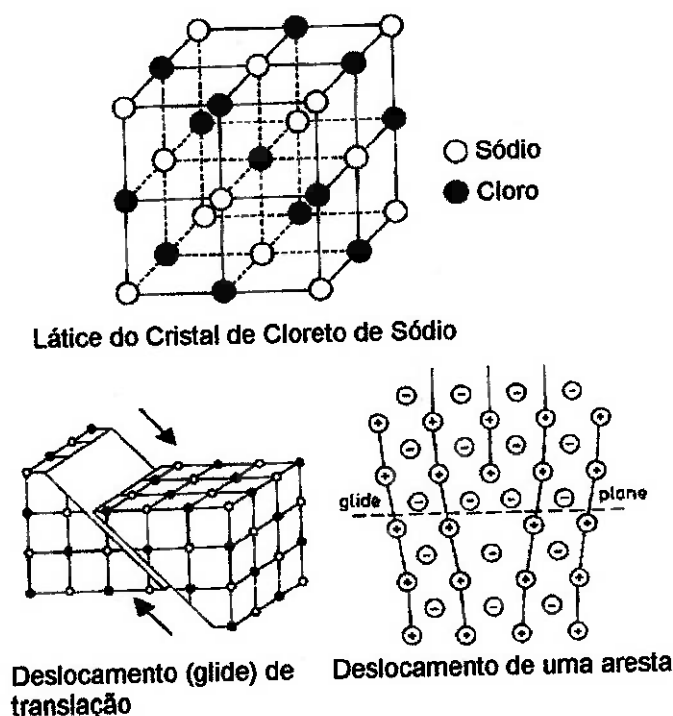


Figura 6 – Sistema de cristalização cúbico da halita (NaCl) e deslocamento (*glide*) idealizado em um plano atômico no láctice. Esquema simplificado de uma distorção ou imperfeição no arranjo atômico ideal em razão da presença de uma aresta (*edge*) adicional em um plano do retículo cristalino (Gangi et al, 1981)

4.2 Modelos e Parâmetros de Fluência da Rocha Salina

As pesquisas sobre a fluência das rochas salinas foram precedidas por inúmeras outras abrangendo materiais e rochas em geral, com especial ênfase no campo da Geofísica. A Metalurgia e a Ciência dos Materiais são outras fontes de desenvolvimento que se aplicaram ao estudo da fluência.

A lei geral da fluência estacionária para o estudo de aplicações de engenharia em maciços constituídos de rocha salina envolve deformações que se estabelecem em períodos de tempo muito menores quando comparados com os fenômenos terrestres naturais, nos quais as taxas de deformação são mais lentas que 10^{-16} s^{-1} . No caso das aplicações práticas, essa taxa de deformação é, em geral, superior a 10^{-10} s^{-1} , sendo que os ensaios de laboratório são normalmente condicionados para deformações superiores.

Analizando as diversas formas de estudo do comportamento da fluência de sais e dos modelos empregados, como os estudos de Hansen & Carter, Hunsche, Langer, Lindner & Brady, Munson & Brady e outros, conclui-se que a lei mais utilizada para a fluência do sal até os dias atuais permanece sendo a expressão geral apresentada por Rutter (1995), na forma de Arrhenius:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) f(\sigma) \quad (5)$$

Sendo A uma constante empírica e $f(\sigma)$ uma função da tensão efetiva. Essa representação da influência da temperatura na viscosidade da deformação lenta de sólidos cristalinos surge do fato de que as flutuações nas vibrações e migrações atômicas podem explicar a superação das barreiras à mobilidade dos deslocamentos intracristalinos, sob tensão constante.

Atualmente, Hunsche & Hampel (1999) apresentaram um modelo bastante elaborado, denominado *composite model*, ou modelo composto. Ele é fundamentado em parâmetros microestruturais dos sais e nos fenômenos que se desenvolvem no nível do retículo cristalino da rocha, em especial os deslocamentos em defeitos cristalinos. Segundo o autor, é importante a aplicação de uma lei da fluência baseada na descrição dos mecanismos de deformação microestruturais para uma extrapolação confiável. Eles apontam as seguintes vantagens do modelo:

- É estritamente baseado em cuidadosas observações microscópicas;
- É baseado num grande número de cuidadosos ensaios realizados em poucos tipos litológicos distintos de sal;
- É baseado também em teorias consolidadas, desenvolvidas em campos específicos do conhecimento das ciências dos materiais e, portanto, válida para a grande maioria dos materiais cristalinos;
- Todos os parâmetros, valores e constantes da formulação matemática têm um significado físico, sendo que eles são bem conhecidos e podem ser checados através de observações ou medições independentes.

O modelo final apresentado é o seguinte:

$$\dot{\epsilon} = \frac{b}{M} \rho v_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \sinh\left(\frac{b\Delta a \sigma_{eff}}{MkT}\right) \quad (6)$$

A dependência exibida pela taxa de fluência em relação ao quociente exponencial da termodinâmica é mantida, reaparecendo a função do seno hiperbólico previamente derivada para o *dislocation glide* (Langer, 1981). São introduzidos, no entanto, uma série de parâmetros relativos à microestrutura da rocha. As demais variáveis são:

$b = 3,99 \times 10^{-10}$ (comprimento do vetor de Burgers);

$M = 3$ (fator de Taylor);

k = constante de Boltzmann;

ρ = densidade de deslocamentos em defeitos cristalinos nas zonas interiores dos sub-grãos;

v_0 = constante de velocidade. O produto desse parâmetro pela parcela exponencial e do seno hiperbólico representa a velocidade média v da progressão do deslocamento termicamente ativado (velocidade de propagação da frente de deslocamento – *dislocation*);

Δa = área de ativação do movimento termicamente ativado dos deslocamentos livres. A área de ativação é um fator essencial do modelo e pode ser interpretada como a área média de troca de um deslocamento num passo da deformação do sub-grão;

σ_{eff} = tensão interna efetiva.

Na Figura 7 é apresentado um exemplo de corpo-de-prova de halita submetido a um ensaio de fluência. Nota-se que a amostra sofreu um embarrigamento devido à fluência. A Figura 8 mostra o gráfico resultante do ensaio para essa amostra. Quando essa mesma amostra é submetida a um ensaio de compressão simples, por exemplo, ela costuma romper de forma frágil, resultando em uma fragmentação dos cristais constituintes da rocha.

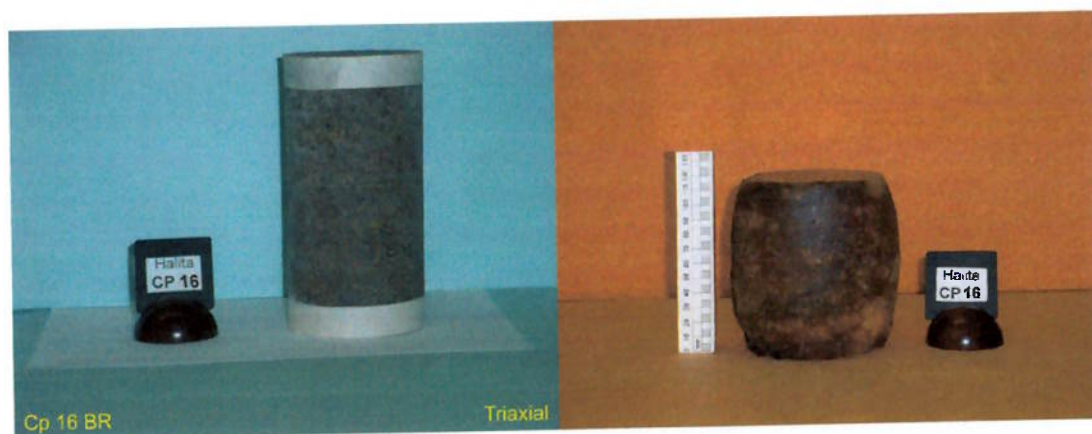


Figura 7 – Halita antes e após o ensaio

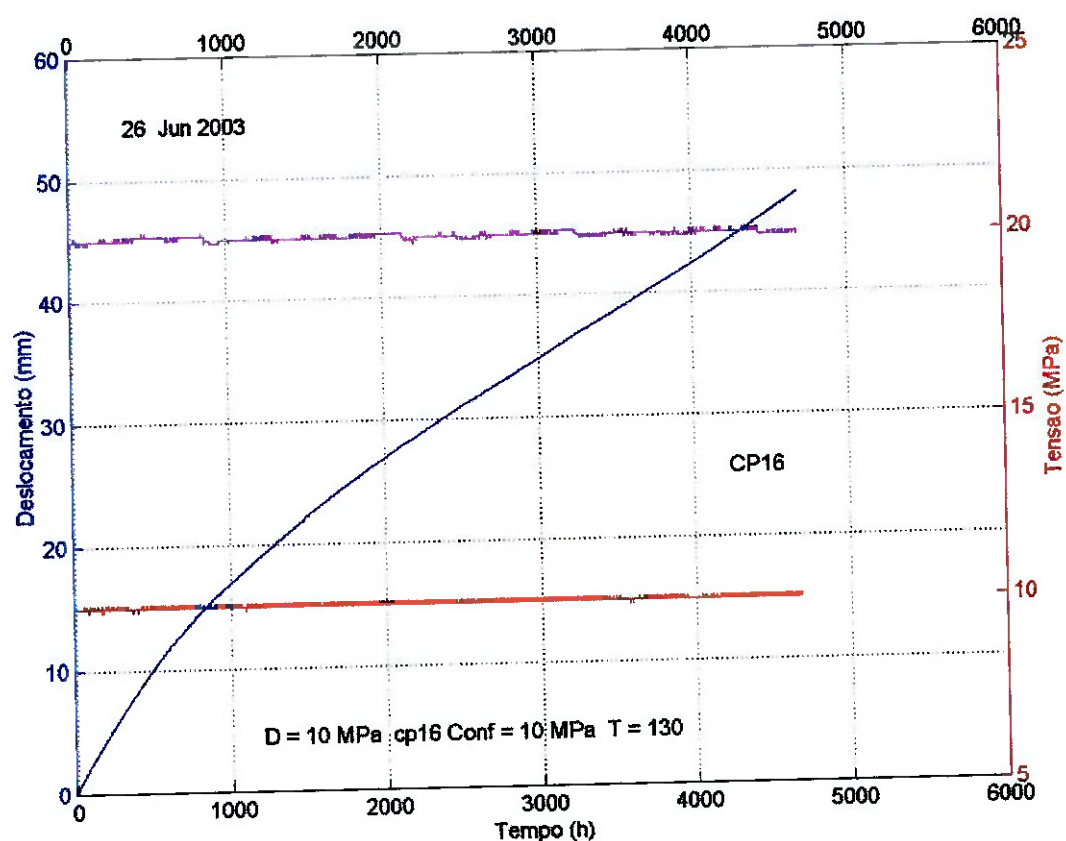


Figura 8 – Resultado do ensaio, mostrando as condições (D = tensão diferencial, Conf = pressão confinante, T = Temperatura) e o deslocamento resultante (em azul) em função do tempo

5. Ensaaios em Cilindro Vazados

5.1 Introdução

Segundo Alsayed (2002), o uso de ensaios convencionais, tais como os de compressão uniaxial e triaxial, há muito tempo têm sido considerados inadequados para a predição do estado de tensão encontrado na natureza ou nas obras de engenharia. Dessa forma, foram desenvolvidas novas técnicas multiaxiais de ensaio para um estado de tensão bidimensional (ou biaxial) ou para um estado tridimensional (ou poliaxial). Uma dessas técnicas consiste no ensaio de corpos-de-prova na forma de cilindros vazados submetidos a uma carga axial e uma pressão confinante interna e externa.

Os ensaios com corpos-de-prova cilíndricos vazados são muito versáteis e podem ser utilizados em diversas aplicações. A sua geometria particular permite a realização de ensaios que reproduzam as condições no entorno de aberturas subterrâneas e a simulação de uma ampla variedade de caminhos de tensão. No entanto, eles têm sido muito pouco utilizados devido às complicações envolvidas na sua realização. Ressalte-se, ainda, que os problemas relativos ao efeito escala estão ainda em aberto e propiciam a necessidade de estudos aprofundados para a correta interpretação dos resultados obtidos quando transportados ao maciço. Ringstad et al (1993) realizaram um estudo com cilindros vazados para determinar a influência do efeito escala.

O termo multiaxial designa um estado geral de tensões. Essa condição fica muito limitada ao realizarmos os ensaios de compressão uniaxial ou triaxial. Considerando as tensões principais σ_1 (maior), σ_2 (intermediária) e σ_3 (menor), pode-se definir os seguintes estados de tensão:

Compressão Uniaxial	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$
Compressão Biaxial	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$
Compressão Triaxial	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$
Compressão Poliaxial	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$
Compressão Isotrópica ou Hidrostática	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 > 0$

5.2 Teoria

As tensões desenvolvidas num cilindro vazado de rocha submetida a pressões hidrostáticas internas e externas devem ser analisadas de acordo com a espessura da parede do cilindro. Para o caso de cilindros com paredes finas, cuja parede possui uma espessura muito pequena quando comparada com seu diâmetro interno, as tensões são praticamente homogêneas e devem ser assumidas como sendo uniformemente distribuídas ao longo da parede do cilindro. Essa condição não pode ser assumida para o caso dos cilindros vazados de paredes grossas. Nesses tipos de cilindro a parede possui uma espessura igual ou maior que o seu diâmetro interno. Nesse caso, as tensões na parede do cilindro não podem ser assumidas como sendo homogêneas. Uma solução integral para esse tipo de condição pode ser encontrada em Coates (1981), através do uso da teoria da elasticidade linear.

Considerar o caso geral ilustrado na Figura 9 de um cilindro vazado de parede grossa com raio interno R_i , raio externo R_o , comprimento axial L e submetido a pressões confinantes hidrostáticas internas e externas (P_i e P_o , respectivamente) e uma carga axial F .

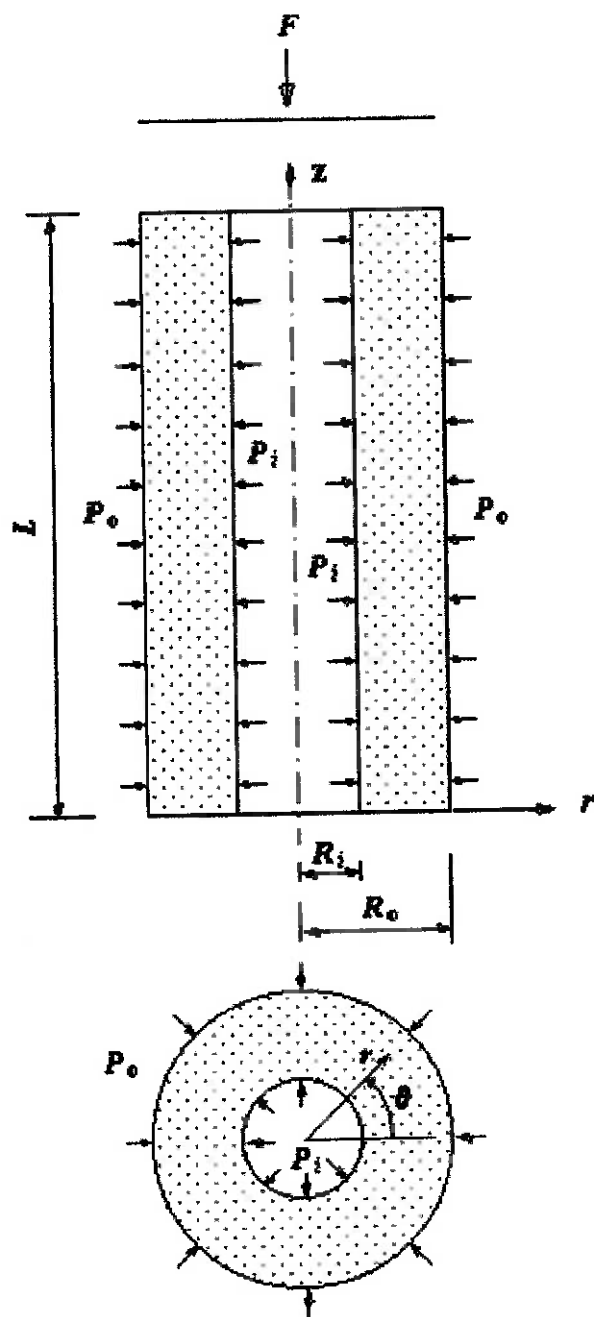


Figura 9 – Ilustração de um cilindro vazado de parede grossa sob uma carga axial e uma pressão confinante interna e externa, mostrando o sistema de coordenadas e a notação usadas (apud Alsayed, 2002)

De acordo com o sistema convencional de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) e denotando as tensões principais como radial (σ_r) , tangencial (σ_θ) e axial (σ_z) , as equações seguintes são usadas para calcular o valor de σ_r e σ_θ a qualquer ponto e à uma distância radial r :

$$\sigma_r = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi (R_o^2 - R_i^2)} - \frac{P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (9)$$

Enquanto que σ_z é assumido como sendo uniformemente distribuído ao longo da superfície das extremidades do cilindro, nota-se que para σ_r e σ_θ há uma variação ao longo da parede do cilindro dependente de r . Uma ilustração da distribuição de σ_r e σ_θ ao longo da parede do corpo-de-prova para uma condição limitante de $P_i = 0$ e $P_o = 0$ é representado nas Figuras 10 e 11.

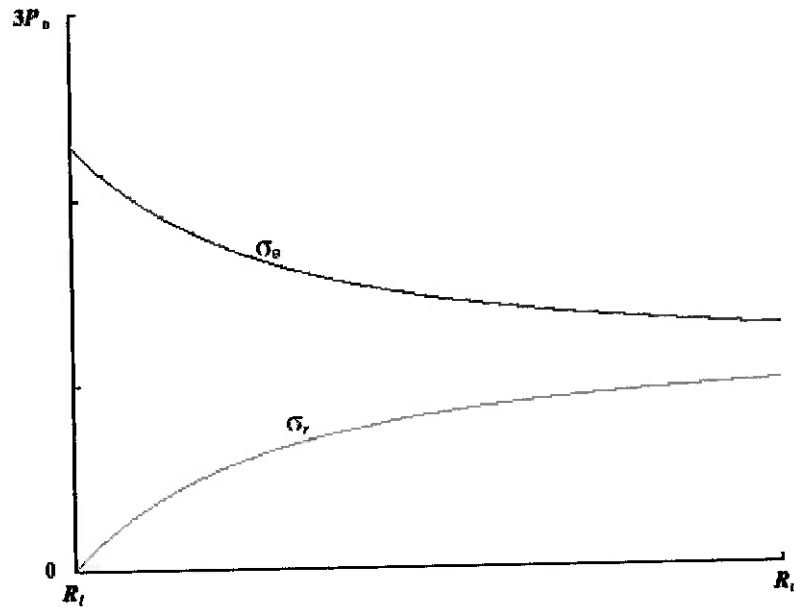


Figura 10 – Distribuição de σ_r e σ_θ nas paredes do corpo-de-prova cilíndrico para pressão externa P_o . (apud Alsayed, 2002)

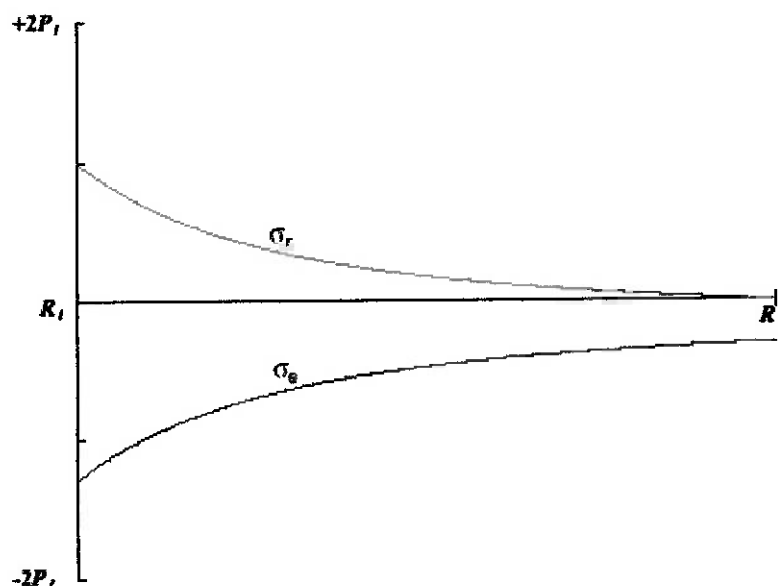


Figura 11 – Distribuição de σ_r e σ_θ nas paredes do corpo-de-prova cilíndrico para pressão interna P_i (apud Alsayed, 2002)

As tensões radial, tangencial e axial induzidas no cilindro podem ser classificadas como maior, intermediária ou menor, dependendo da magnitude da carga axial e da pressão confinante interna e externa aplicada. Uma outra opção é a aplicação conjunta da torção. Isso fará com que a direção das tensões principais não seja necessariamente fixa, possibilitando que elas assumam qualquer ângulo com o eixo longitudinal do cilindro, podendo rotacionar tanto continuamente ou intermitentemente durante o carregamento.

6. Metodologia Proposta

6.1 Introdução

O layout delineado nesse trabalho foi desenvolvido baseado em procedimentos de ensaio utilizados em programas com halita, carnalita e taquidrita; sendo, no entanto, aplicável para ensaios de fluência com qualquer tipo rochoso. Vale a pena ressaltar que as rochas brandas e solúveis são as mais propícias a apresentarem fluência, além de serem também as mais difíceis de serem amostradas e preparadas. Portanto, a exposição dos testemunhos ou dos corpos-de-prova a condições diferentes das encontradas *in situ* deverão ser minimizadas. É importante ressaltar que os ensaios são de longa duração e, portanto, as condições dos mesmos devem ser mantidas constantes por longos períodos de tempo.

6.2 Amostragem e Corpos-de-prova

Inicialmente, a rocha utilizada para essa etapa piloto de ensaios é a halita, proveniente de testemunhos de sondagem da Mina de Taquari – Vassouras. Elas possuem um diâmetro efetivo de 4 “(100 mm), um diâmetro interno de 1” (25 mm) e altura de 185 mm.

A halita é formada por íons de cloro e sódio, conjugados através de ligações iônicas, cristalizando preferencialmente no sistema cúbico. A halita pura é normalmente incolor ou branca, apresenta fratura conchoidal, dureza Mohs relativamente baixa (2,5) e densidade

moderada (2100 kg/m^3). A halita a ser usada possui coloração parda, com cristais de granulação grosseira da ordem de 5 mm.

Senseny et al (1989) apresentam um modo eficaz de realizar o trabalho de preparação dos corpos-de-prova, sendo a realização do furo central uma fase muito complexa e importante para a confiabilidade do ensaio.

6.3 Aparelhagem

O esquema geral do ensaio consiste em:

- Uma unidade de carregamento axial, constituída de bombas ou intensificadores de pressão hidropneumáticos de 70 MPa;
- Um sistema de manutenção e carregamento da pressão confinante externa;
- Uma célula triaxial para o acomodamento do corpo-de-prova (Figura 12);
- LVDTs para medida da deformação externa do corpo-de-prova, com curso máximo de 100 mm e sensibilidade nominal de 80mV/V;
- Uma unidade de carregamento da pressão interna com medição volumétrica da deformação (GDS - Figura 13);
- Uma estufa em aço carbono e com revestimento de manta cerâmica, responsável pela manutenção da temperatura interna do conjunto formado pela célula triaxial e pelo corpo-de-prova (Figura 14);
- Três termopares tipo J, para controle da temperatura da resistência, do corpo-de-prova e da temperatura ambiente;
- Uma unidade de aquisição de dados;
- Membranas de revestimento interno e externo do corpo-de-prova, constituídas de nitrila e viton;
- Um microcomputador responsável pelo registro e tratamento dos dados.

Os ensaios utilizarão o mesmo esquema geral adotado por Cella (2003). Um esquema simplificado da unidade de ensaio é apresentado na Figura 15, com uma pequena adaptação para a inclusão do GDS. A Figura 16 apresenta a célula triaxial mostrando os pontos de entrada e saída de óleo para a pressão confinante. O GDS é um equipamento que permite medir a variação volumétrica interna do corpo-de-prova com capacidade de 200 cm^3 e resolução de 1 mm^3 , além da variação da pressão interna. Ele pode trabalhar de duas formas: volume constante ou pressão constante. Seu intervalo de tensões é de até 64 MPa. A Figura 17 apresenta um esquema simplificado do princípio de funcionamento desse equipamento.



Figura 12 – Célula triaxial montada sobre a base com a unidade de carga ao fundo

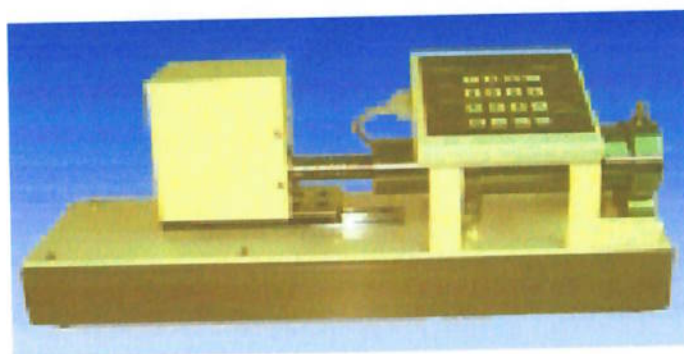


Figura 13 – GDS utilizado para o carregamento da pressão confinante interna e pela medição da variação volumétrica interna



Figura 14 – Estufa em aço carbono

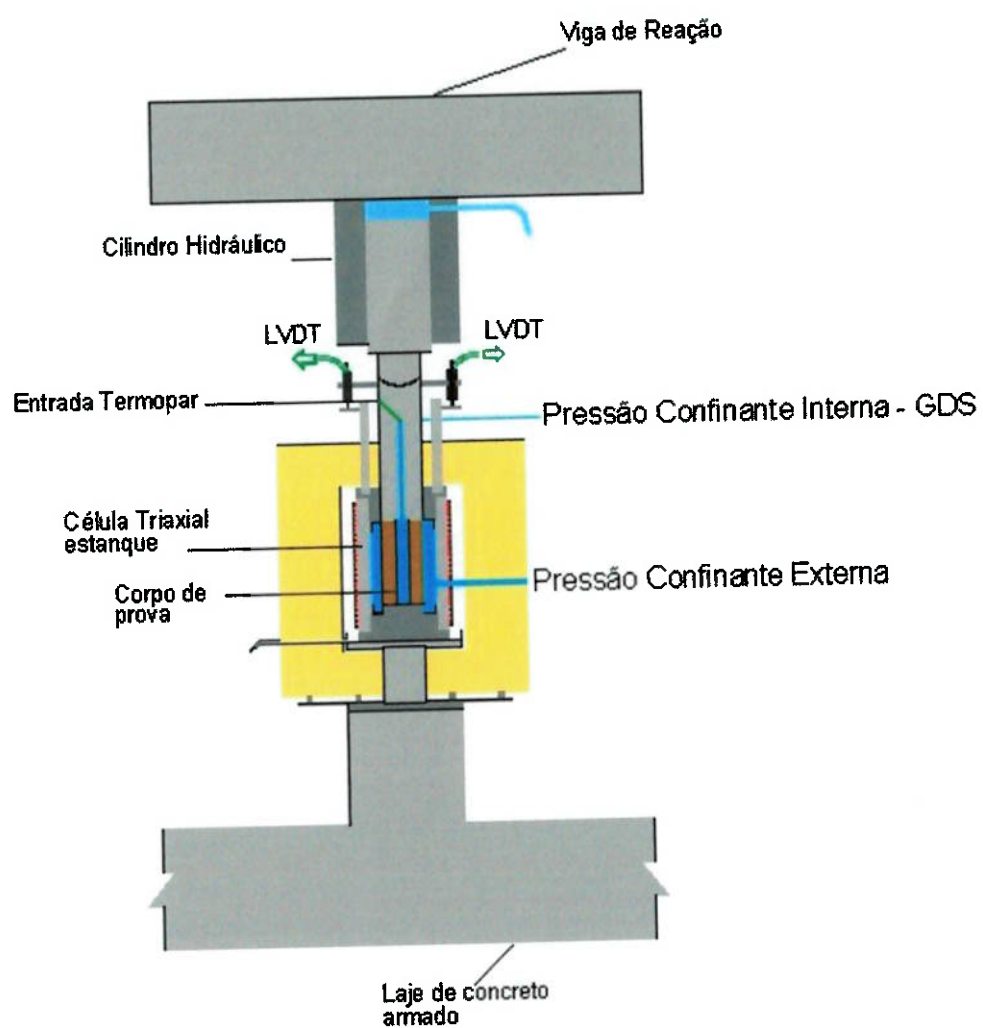


Figura 15 – Unidade Hidráulica Básica

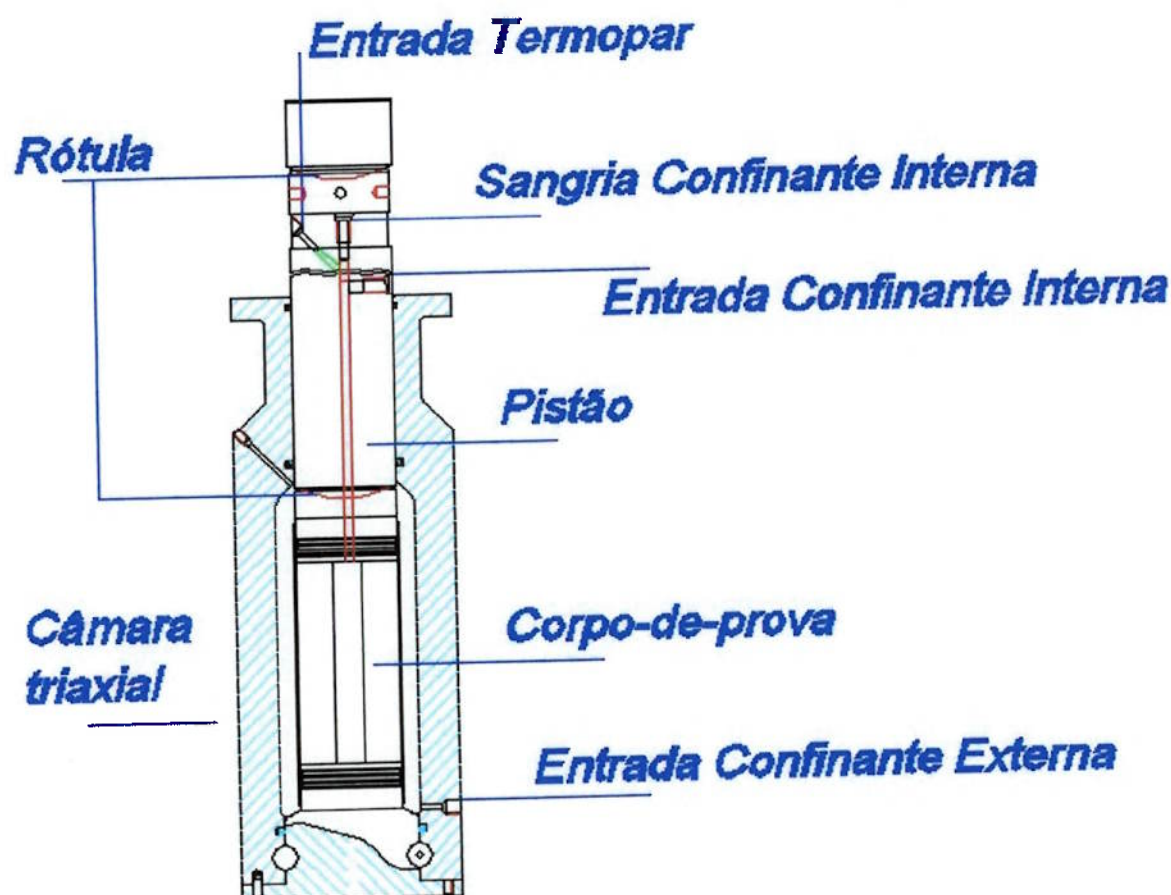


Figura 16 – Adaptação para o GDS, com a entrada e a saída (sangria) de óleo na rótula

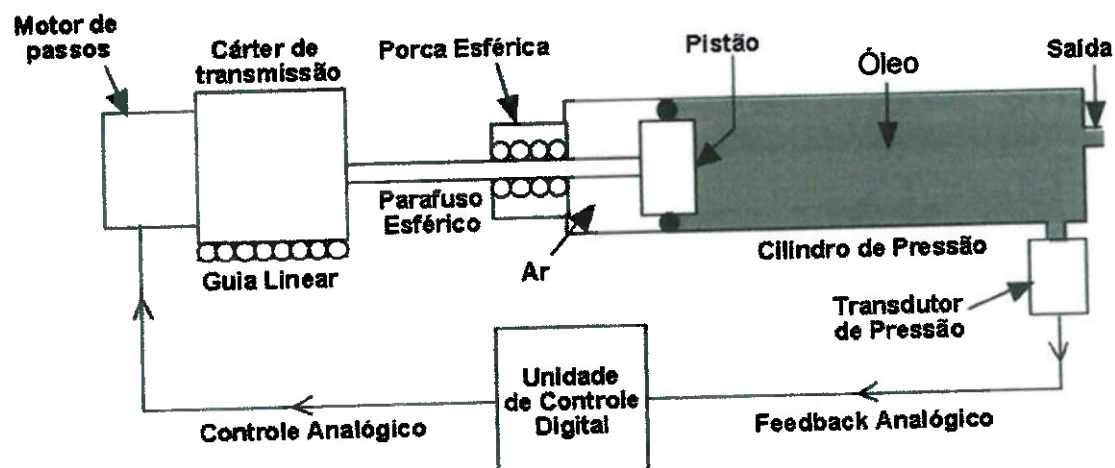


Figura 17 – Princípio de funcionamento do Controlador Digital de Pressão/Volume GDS

6.4 Procedimento

Uma parte muito importante para a realização do ensaio é a montagem do corpo-de-prova. A fim de garantir a perfeita selagem do corpo-de-prova e impedir o vazamento do óleo, é necessário que a montagem seja realizada com extremo cuidado. Outro fator importante é a correta colocação dos O-rings e das membranas internas e externas, que garantirão o isolamento total do ensaio.

De maneira geral, o carregamento será feito de forma hidrostática até que as três tensões atinjam o valor da tensão requerida para o ensaio. Com isso estabelecido, aumenta-se a temperatura do sistema até a temperatura do ensaio (43, 86 ou 130° C). Após ser atingida a temperatura do ensaio, espera-se a estabilização do sistema. Com o sistema estável, realiza-se a retirada da pressão confinante interna, que simulará a queda de tensão devido à abertura do poço. Mantém-se a pressão confinante interna constante e, com o auxílio do GDS, realiza-se a leitura da perda volumétrica interna. Com isso, é possível calcular a deformação sofrida internamente pelo corpo-de-prova de acordo com as tensões calculadas (Equações 7, 8 e 9).

6.5 Análise de Resultados

Os resultados dos ensaios poderão ser utilizados para a construção de gráficos a partir dos quais serão determinados os parâmetros requeridos para o cálculo da taxa de fluência. A Figura 18 apresenta uma forma de ajuste da fluência transitória a uma lei exponencial e a Figura 19 duas formas de determinação da taxa de fluência.

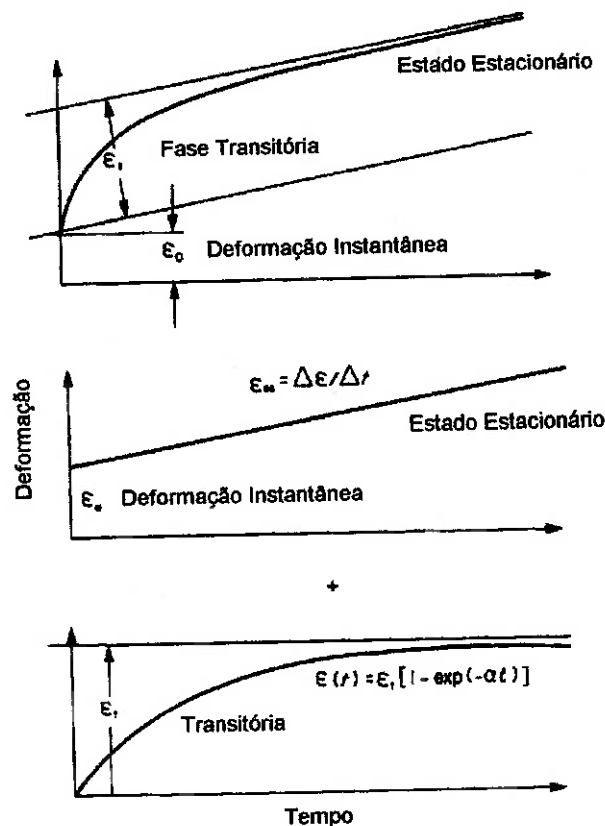


Figura 18 – Ajustando a fluência transitória a uma lei exponencial (apud Dusseault & Fordham, 1995)

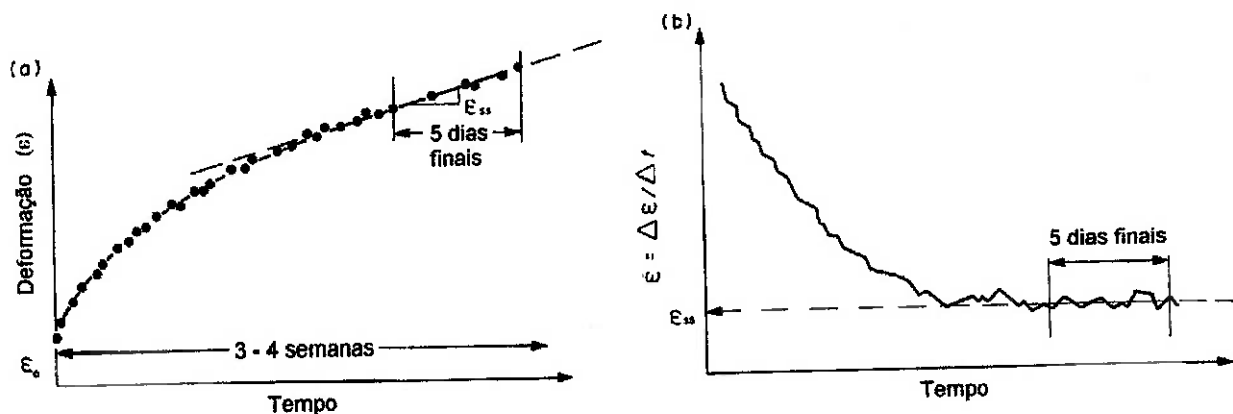


Figura 19 – Determinação de $\dot{\epsilon}$ a partir dos dados de ensaio: (a) ajustando a curva; (b) usando um método de médias pela plotagem da diferencial (apud Dusseault & Fordham, 1995)

7. Conclusão

As equações constitutivas do comportamento termomecânico da rocha salina deverão fornecer um modelo mais preciso do comportamento do material para o caso em que as três tensões principais são distintas. Dessa forma, os resultados poderão, considerados os efeitos de escala, serem utilizados para uma modelagem semi-empírica de predição do comportamento do material *in situ*. A vantagem em relação a um ensaio de fluência que utiliza um corpo-de-prova maciço reside no fato de que as condições de ensaio se aproximam mais das reais condições encontradas no campo. Outra vantagem a ser apontada é a possibilidade de medição e predição da deformação interna do corpo-de-prova com o auxílio do GDS, considerados os efeitos de escala.

Atualmente, o IPT está iniciando a fase piloto de ensaios com amostras de halita. Sabe-se, no entanto, que outras rochas salinas, tais como a carnalita e em especial a taquidrita são as que apresentam as maiores taxas de fluência.

Este trabalho visa a apresentação de conceitos e a introdução do tema de fluência num estado poliaxial de tensões com o intuito de um melhor entendimento do fenômeno e de uma melhor compreensão do comportamento termomecânico do sal.

Com isso, espera-se que esse melhor entendimento permita que um projeto de engenharia em estruturas em sal seja mais seguro e eficiente.

8. Bibliografia

ALSAYED, M. I. Utilising the Hoek Triaxial Cell for Multiaxial Testing of Hollow Rock Cylinders. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 39, 2002, pp. 355-366.

CELLA, P. R. C. Desenvolvimento e Execução de Ensaio Triaxiais de Fluência Estacionária em Rocha Salina Sob Altas Pressões e Temperaturas. 2003 Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo.

- CHEN, X.; TAN, C. P.; HABERFIELD, C. M. **Numerical evaluation of the Deformation Behaviour of Thick-walled Hollow Cylinders of Shale.** *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 37, 2000, p. 947-961.
- COATES, D. F. **Rock Mechanics Principles.** Canmet Energy, Mines and Resources Canada, Monograph 874 (Revised 1981).
- DUSSEAULT, M. B.; FORDHAM, C.J. Time-Dependent Behaviour of Rocks. CH. 6, p. 119-149, In: **Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practices & Projects, Vol. III – Rock Testing and Site Characterization**, Ed. John A. Hudson, Pergamon Press, 1995.
- DUSSEAULT, M. B.; MRAZ, D. M. **Creep Behaviour of Salt Rocks.** *Proc. Canadian Geotechnical Conference*, 40th, Regina, Saskatchewan, 1987.
- EWY, R. T.; COOK, N. G. W.; MYER, L. R. **Hollow Cylinder Tests for Studying Fracture Around Underground Openings.** *Key Questions in Rock Mechanics: Proc. 29th US Symposium*, Minneapolis, 13-15 June 1988, p. 67-74. Publ. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988.
- GAMA, C. D.; MENEZES, J. **The Hollow Cylinder Test in the Measurement of Mechanical Properties.** *Proc. 2nd Int. Congress, IAEG*, São Paulo, 1974.
- HAMBLEY, D. F.; DUSSEAULT, M. B.; MRAZ, D. Z. **Characterization of Saltrock Creep Behavior.** *Key Questions in Rock Mechanics: Proc. 29th US Symposium*, Minneapolis, 13-15 June 1988, p. 179-189. Publ. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988.
- HOSKINS, E. R. **The Failure of Thick-walled Hollow Cylinders of Isotropic Rock.** *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* Vol. 6, No. 1, 1969, p. 99-116.
- HUNSCHE, U.; HAMPEL, A. **Rock Salt – the Mechanical Properties of the Host Rock Material for a Radioactive Waste Repository.** *Eng. Geol.* 52, p. 271 – 291, Elsevier, 1999.
- LANGER, M. **The Rheological Behaviour of Rock Salt**, *Proc. First Conf. The Mechanical Behaviour of Salt*, ed. H. Reginald Hardy & Michael Langer, Pennsylvania State University, 1981. *Trans Tech Publications*, p. 241-273.
- LEE, D. H.; JUANG, C. H.; CHEN, J. W.; LIN, H. M.; SHIEH, W. H. **Stress Paths and Mechanical Behavior of a Sandstone in Hollow Cylinder Tests.** *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 36, 1999, p. 857-870.
- LEE, D. H.; JUANG, C. H. ; LIN, H. M.; YEH, S. H. **Mechanical Behavior of Tien-Liao Mudstone in Hollow Cylinder Tests.** *Can. Geotech. J.* Vol. 39, 2002, p.744-756.
- MORGAN, H. S.; WAWERSIK, W. R. **Computer and Measured Responses of a Thick-walled Hollow Cylinder of Salt Subjected to Both Homogeneous and Inhomogeneous Loading.** *Rock Mechanic as a guide for efficient utilization of natural resources: Proc. 30th US Symposium*, Morgantown, 19-22 June 1989, p. 361-368. Publ. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989.

MORGAN, H. S.; WAWERSIK, W. R. **Use of Thick-walled Hollow Cylinder Creep Tests for Evaluating Flow Criteria for Rock Salt.** Proc. 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen, 16-20 September 1991, Vol. 1, p. 303-310. Publ. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991.

RINGSTAD, C.; ADDIS, M. A.; BREVIK, I.; SANTARELLI, F. J. **Scale Effects in Hollow Cylinder Tests.** Proc. Second International Conf. on Scale Effects in Rock Masses, Lisbon, 25 June 1993, p. 75-80. Publ. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993.

ROUSSET, G.; BAZARGAN-SABET, B.; LENAIN, R. **Time-dependent Behaviour of Rocks: Laboratory Tests on Hollow Cylinder.** Rock Mechanic as a guide for efficient utilization of natural resources: Proc. 30th US Symposium, Morgantown, 19-22 June 1989, p. 385-391. Publ. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989.

RUTTER, E. H. The Mechanics of Natural Rock Deformation, CH. 3, p.63-92, In: JOHN A. HUDSON, PERGAMON PRESS. **Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practices & Projects – Geological Setting, Vol. I**, Ed. John A. Hudson, Pergamon Press, 1995.

SANTARELLI, F. J.; BROWN, E. T. **Failure of Three Sedimentary Rocks in Triaxial and Hollow Cylinder Compression Tests.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 26, No. 5, 1989, p. 403-413.

SENSENY, P. E.; MELLEGARD, K. D.; WAGNER, L. A. **Hollow Cylinder Tests on Natural Rock Salt,** Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 12, No. 2, Junho 1989, p. 157-162.

TALESNICK, M. L.; HAIMSON, B. C.; LEE, M. Y. **Development of Radial Strains in Hollow Cylinders of Rock Subjected to Radial Compression.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, 1997, p. 1229-1236.