

## 5 Caracterização Mecânica de Rocha

### 5.1. Metodologia de Ensaio

#### 5.1.1. Ensaio Compressão Triaxial

O teste triaxial é um dos ensaios de laboratório mais utilizados para determinar propriedades de rocha para um grande intervalo de tensão e temperatura. O teste triaxial foi descrito em detalhe por Bishop e Henkel (1962) [29] e posteriormente uma célula mais avançada foi descrita por Bishop e Wesley (1975) segundo [29].

Um esquema típico de um ensaio triaxial está apresentado na Figura 21, o diâmetro da amostra pode ser de até 101.6mm, a relação entre o comprimento da amostra e o diâmetro pode ser 2 a 2.5:1 e o diâmetro não deve ser inferior a 47mm [15].

A amostra é envolvida por membrana flexível e selada no *cap* superior e inferior. A membrana flexível permite que a amostra se deforme radialmente e que a poro pressão gerada na amostra devido ao carregamento radial esteja separado da tensão aplicada fora da amostra.

O conjunto, composto de amostra, membrana, *caps*, extensômetro radial e axial, é colocado num pedestal. O vaso de pressão desce e é circulado óleo até que o vaso e as linhas estejam completamente preenchidos, a tensão confinante é aplicada axissimetricamente e na vertical no *cap* superior. Posteriormente uma força axial,  $F_a$ , é aplicada na vertical, no cap superior, pelo pistão, conforme Figura 22.

A área da seção da amostra é  $A$ , então a tensão axial total aplicada é:

$$\sigma_a = \sigma_c + \frac{F_a}{A} \dots\dots\dots 215$$

Esta carga uniaxial é aplicada a uma taxa constante, de carregamento ou deformação, definida de modo que o tempo de carregamento do ensaio esteja entre 5 e 15min [15].

É importante notar que a força aplicada pelo pistão não é equivalente a tensão axial, e sim a tensão desviadora [29]:

$$\sigma_d = \sigma_a - \sigma_c \dots\dots\dots 216$$

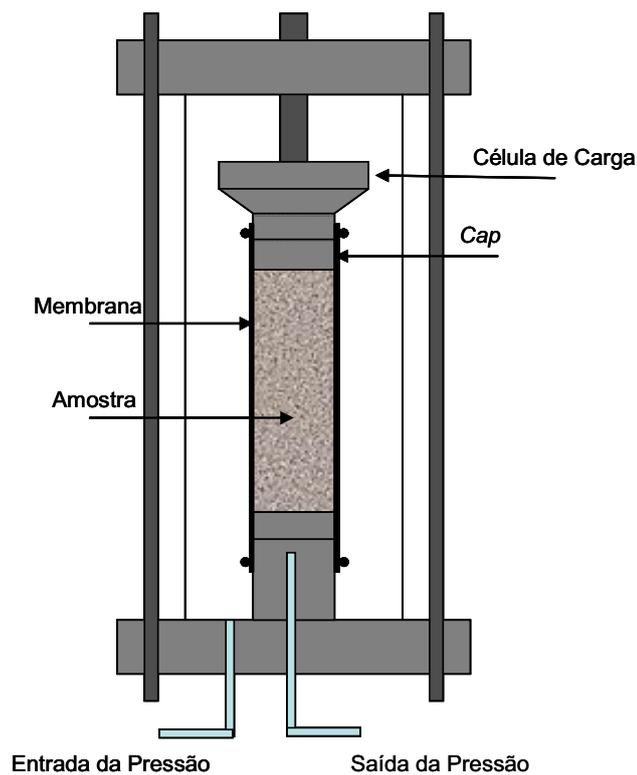


Figura 21 – Representação esquemática do ensaio triaxial.

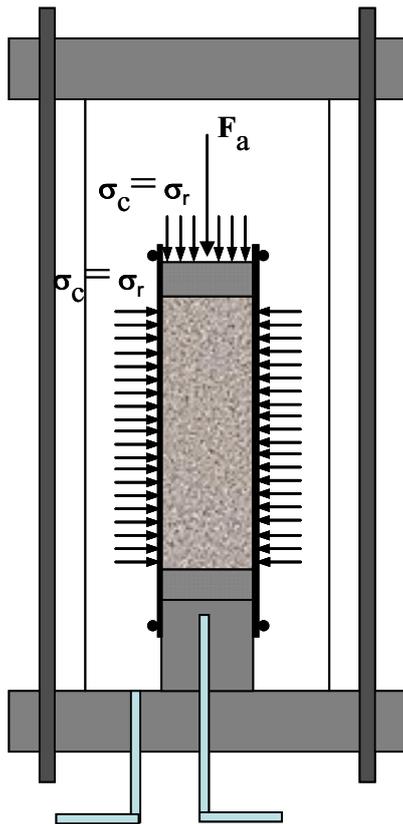


Figura 22 – Representação esquemática das tensões e forças atuantes no ensaio triaxial.

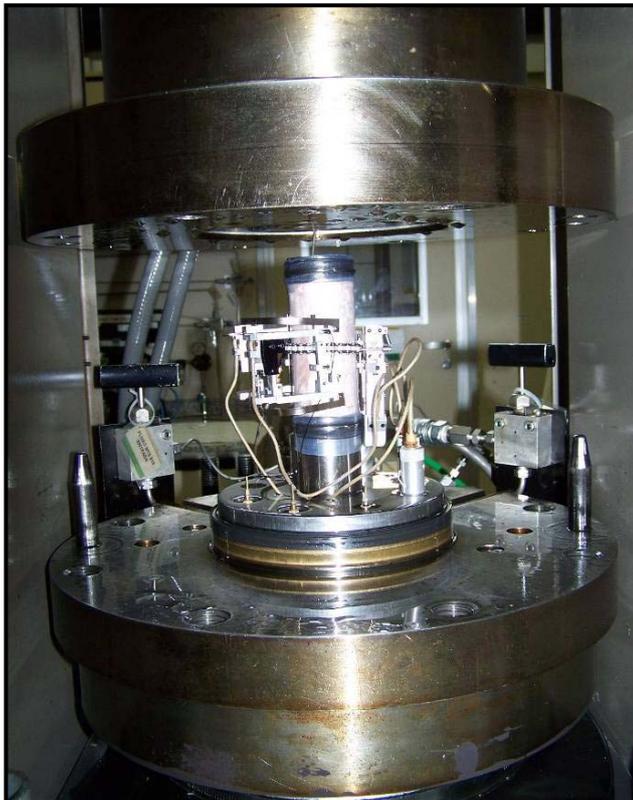


Figura 23 – Foto CP 16 dentro da célula triaxial da MTS815 para realizar ensaio– Bloco B.

Durante o ensaio triaxial é realizada a aquisição dos seguintes dados ao longo do tempo: tensão desviadora e confinante, deformação axial e radial. Com estes dados calculam-se Poisson ( $\bar{\nu}$ ), módulo de deformabilidade ( $E$ ) e módulo de deformabilidade no descarregamento ( $E_u$ ), que corresponde ao módulo de elasticidade, para cada tensão confinante, conforme equação 217 até 219 e Figura 24 até Figura 26.

$$\bar{\nu} = -\frac{\Delta \varepsilon_r}{\Delta \varepsilon_a} \dots\dots\dots 217$$

$$E = -\frac{\Delta \sigma_a}{\Delta \varepsilon_a} \dots\dots\dots 218$$

$$E_u = -\frac{\Delta \sigma_a^u}{\Delta \varepsilon_a^u} \dots\dots\dots 219$$

O módulo de deformabilidade foi obtido através da secante no ponto onde a tensão desviadora corresponde a 50% da ruptura e o módulo de elasticidade foi obtido através da tangente da reta ajustada através dos pontos de carregamento e descarregamento.

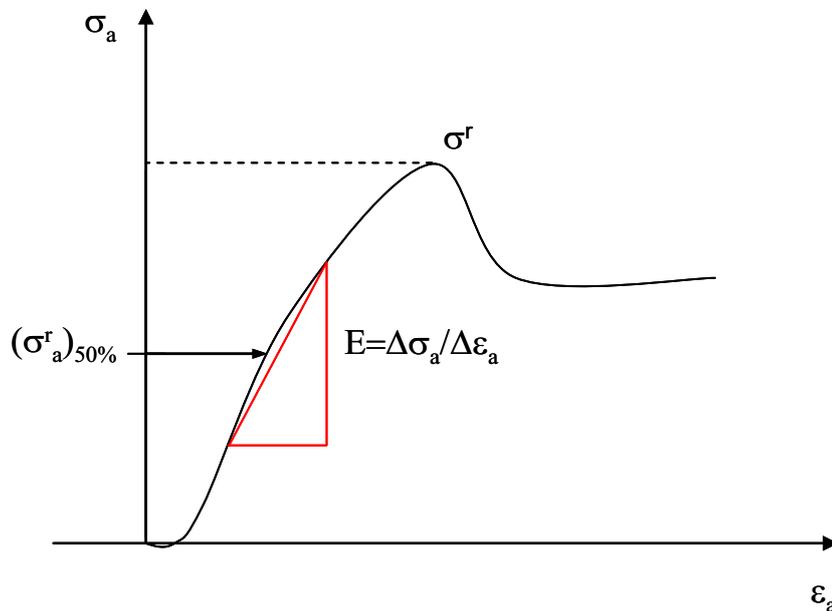


Figura 24 – Curva tensão deformação axial e esquema de como é obtido o módulo de deformabilidade.

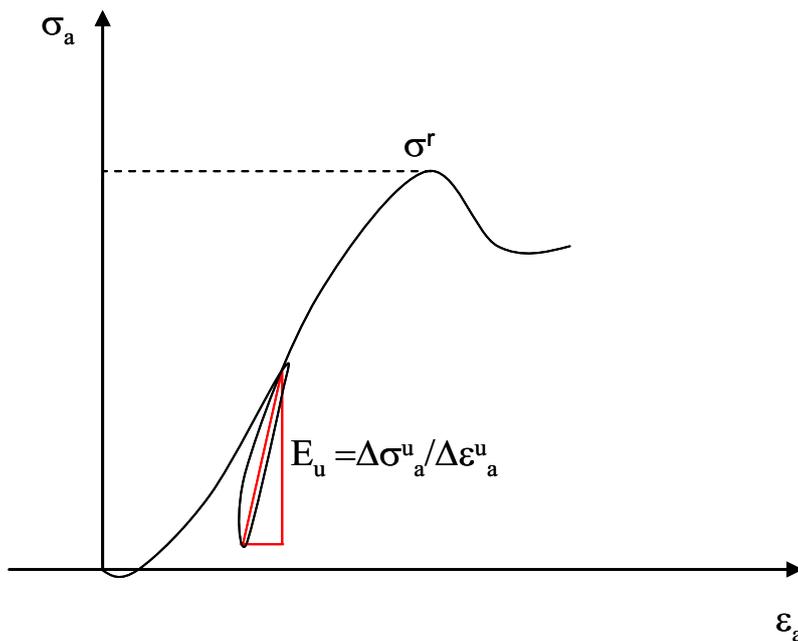


Figura 25 – Curva tensão deformação axial e esquema de como é obtido o módulo de elasticidade no trecho de descarregamento/carregamento.

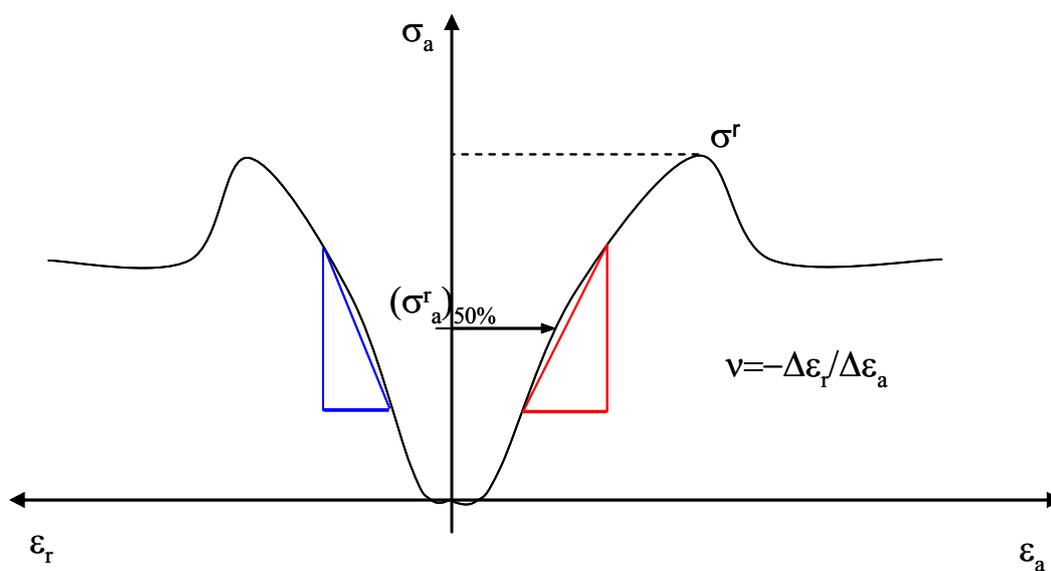


Figura 26 – Curva tensão deformação axial e radial e esquema de como é obtido o Poisson.

Onde:

$F_a$  - força axial;

$\sigma_a$ ,  $\epsilon^a$  - tensão e deformação axial;

$\sigma^r$ ,  $\epsilon^r$  - tensão e deformação ruptura; e

$\sigma_r$  - tensão radial.

### 5.1.2. Ensaio Compressão Uniaxial

O teste de compressão uniaxial no qual, corpos de prova com forma de cilindro ou prisma são comprimidos paralelamente ao eixo longitudinal, conforme Figura 27. É o teste mais utilizado, devido a sua simplicidade, para determinar parâmetros de rocha. No passado as amostras eram cúbica ou cilíndrica, cuja última possuía relação de diâmetro e comprimento de 1:1. Porém observou-se que mesmo que a superfície e os *cap's* sejam perfeitamente paralelos e lisos, a diferença de rigidez entre a amostra e o *cap*, tende a conter a expansão lateral nas extremidades da amostra. Para evitar este efeito passou-se a utilizar uma relação de 1:2 entre o diâmetro e o comprimento, pois segundo Obert et al (1946) [5] encontrou uma correlação entre a resistência uniaxial e a razão entre o diâmetro e o comprimento, segundo equação 220.

$$UCS_0 = UCS_1 [0.778 + 0.222 / L] \dots\dots\dots 220$$

Onde  $UCS_1$  é a resistência uniaxial para  $D/L = 1$ . Isto indica que a resistência diminui com o crescimento do comprimento em relação ao diâmetro. Então se observou que uma boa relação entre comprimento e diâmetro a ser usada é a de 2:1, pois a porção central da amostra é pouco afetada pelo efeito de borda devido à diferença de rigidez entre o *cap* e a amostra.

O ensaio de compressão uniaxial consiste basicamente em montar um conjunto composto de amostra *cap* superior e inferior e extensômetro lateral e axial, então o conjunto é colocado no pedestal, aproxima-se a célula de carga até encostar-se ao *cap* superior, conforme Figura 27. Então se aplica uma carga uniaxial, conforme Figura 28, a uma taxa constante, de carregamento ou deformação, definida de modo que o tempo de carregamento do ensaio esteja entre 5 e 15min [16]. A resistência uniaxial da amostra corresponde à carga axial no momento da ruptura da amostra dividido pela área da amostra, conforme equação 221.

$$UCS = \frac{Fa}{A} \dots\dots\dots 221$$

Durante o ensaio uniaxial é realizada a aquisição dos seguintes dados ao longo do tempo: tensão axial, deformação axial e radial. Com estes dados calculam-se Poisson e módulo de deformabilidade conforme equação 217 e 218.

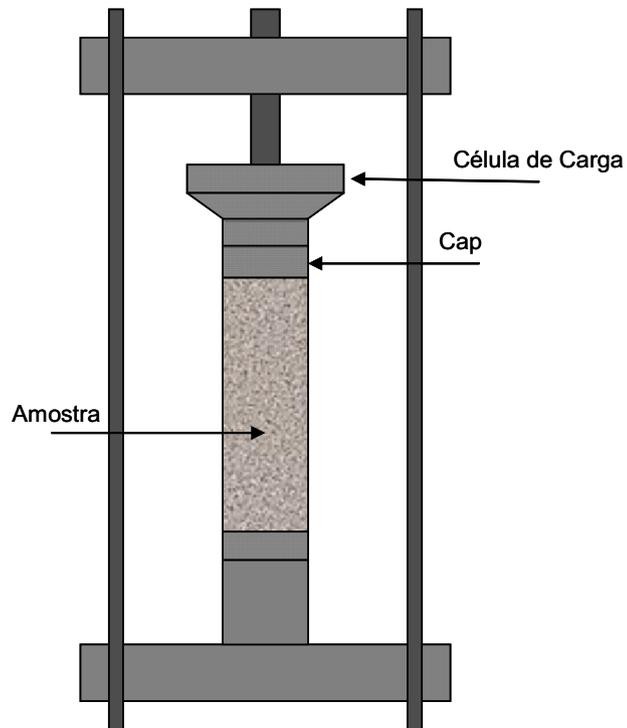


Figura 27 – Representação esquemática do ensaio uniaxial.

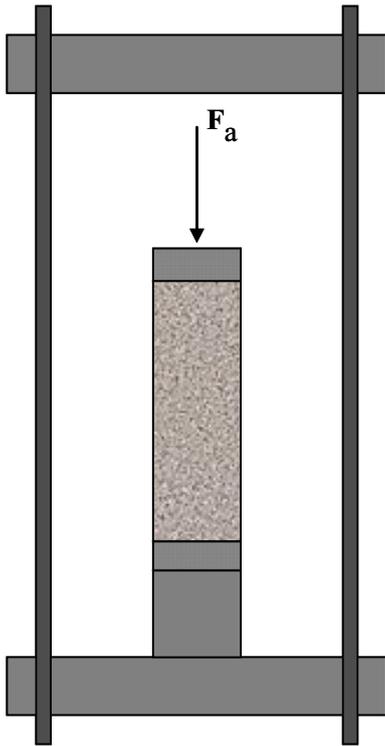


Figura 28 – Representação esquemática da força atuante no ensaio uniaxial.

### 5.1.3. Ensaio Brasileiro

As dificuldades associada à realização de ensaio de tração direta em rocha levou a criação de diversos métodos de medida de resistência a tração indireta, o mais conhecido dele é o ensaio brasileiro. Este consiste em aplicar uma compressão diametral através de mordentes em amostra de rocha, conforme Figura 29. O diâmetro da amostra de ser pelo menos 10x o maior diâmetro do grão, geralmente um diâmetro de 50mm atende a estes critério. A relação entre a espessura da amostra e o diâmetro pode ser entre 0.2 e 0.75, a relação de 0.5 corresponde ao raio da amostra e é uma boa relação para se trabalhar. Nos ensaios realizados o diâmetro utilizado foi de 50mm e a espessura utilizada de 25mm.

O ensaio brasileiro, conforme Figura 31, consiste basicamente em montar um conjunto composto de amostra, mordente superior e inferior e rótula, o conjunto é colocado no pedestal, aproxima-se a célula de carga até encostar-se ao *cap* superior. Então se aplica uma carga uniaxial, que é transmitida a amostra de maneira a comprimi-la diametralmente, conforme Figura 30, a uma taxa constante de carregamento. A duração do ensaio segundo na referência [17] é entre 1 e

10min. Durante o ensaio brasileiro é realizada a aquisição, ao longo do tempo, da carga  $W$  aplicada, conforme Figura 30, com este dado e a área onde esta carga é imposta obtém-se a resistência a tração ( $RT$ ), correspondente a carga  $W$  de ruptura da amostra, da seguinte forma:

$$RT = \frac{2W}{\pi DL} \dots\dots\dots 222$$

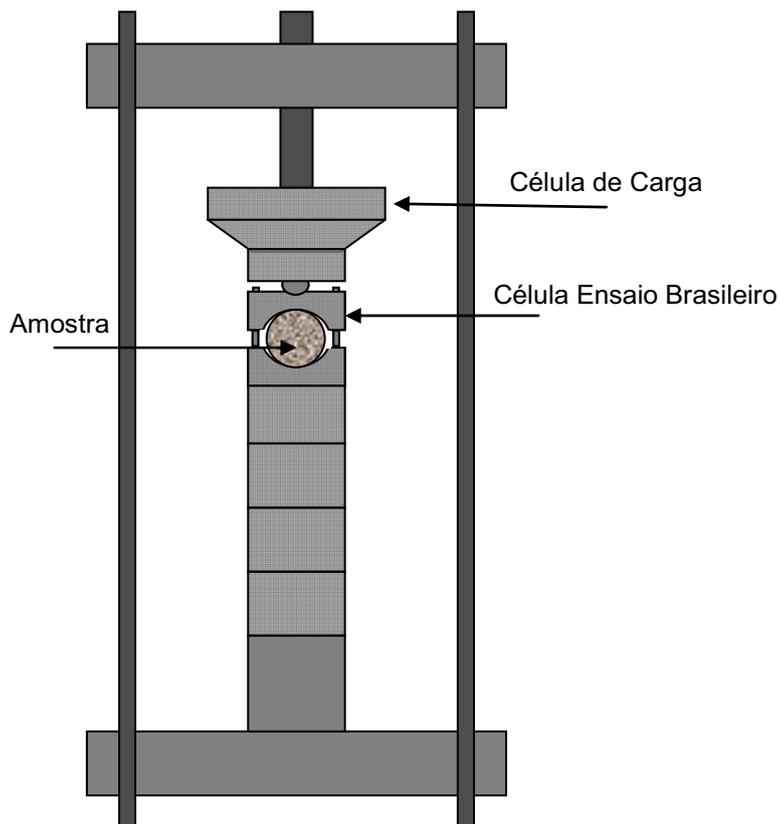


Figura 29 – Representação esquemática do ensaio brasileiro.

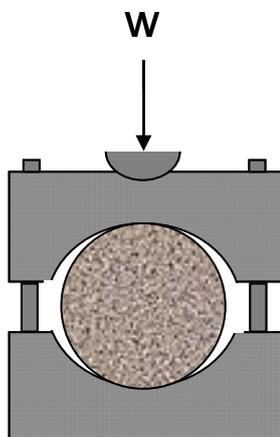


Figura 30 – Representação esquemática da força atuante no ensaio brasileiro.

Onde:

D é o diâmetro da amostra;

L é a espessura da amostra.

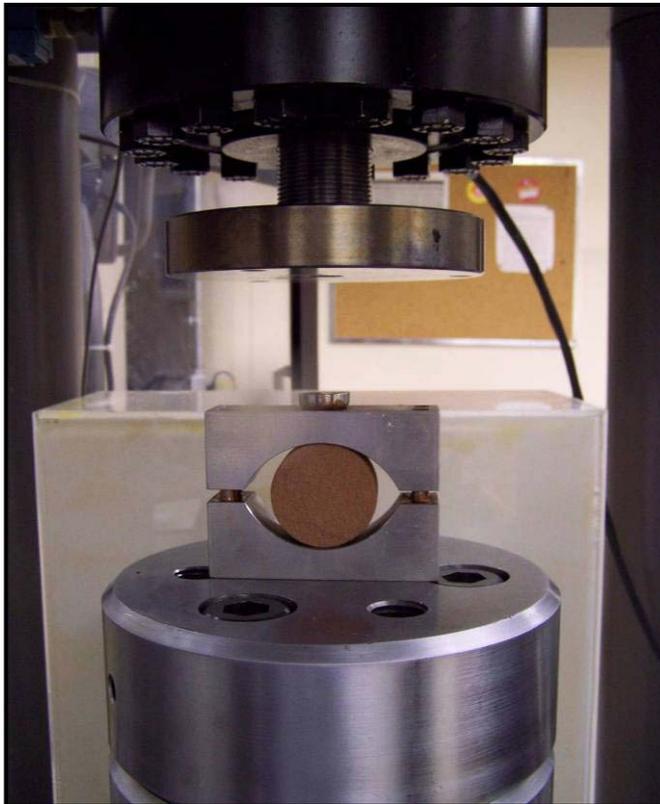


Figura 31 – Foto CP 16A, com diâmetro de 49.71mm e espessura de 24.85mm, dentro da célula para ensaio brasileiro na MTS816 para realizar ensaio– Bloco B.

#### 5.1.4. Ensaio Poliaxial

O termo poliaxial foi escolhido para descrever o teste que é possível aplicar três tensões principais distintas em amostra cúbica. O conceito consiste em aplicar três tensões distintas e controladas separadamente, Figura 33, ao carregar paralelepípedos retangulares contra três superfícies perpendiculares mutuamente. É preciso considerar a existência da fricção entre as superfícies, amostra e a superfície que aplica a carga, pois no caso do ensaio uniaxial ficou demonstrado que este efeito é grande. No caso do ensaio poliaxial, onde pelo menos dois

conjuntos de superfícies são carregados, o efeito da fricção pode invadir a amostra toda, o que comprometeria os resultados quantitativamente.

O ensaio consiste em montar o conjunto, amostra, membranas e célula, interligar as linhas que aplicam pressão, circular com óleo as linhas e garantir que as mesmas estão completamente preenchidas e sem ar, e então carregar a amostra segundo protocolo, conforme Figura 32.

A célula triaxial cúbica foi desenvolvida, em conjunto com a PUC, dentro de um convênio com Petrobrás. O principal interesse em desenvolver esse tipo de equipamento era a possibilidade de aplicação de tensões independentes nas três direções principais e ainda com possibilidade de fluxo nessas mesmas direções a fim de se obter condições de ensaios mais próximas daquelas encontradas em campo.

Esse projeto contemplou inicialmente a construção de um protótipo, que foi totalmente projetado e desenvolvido dentro do CENPES. A célula consistia de um bloco sólido, onde eram encaixadas membranas de borracha, tendo sido dimensionada para aplicação de tensões de até 41,4 MPa. Os corpos-de-prova tinham um formato cúbico com uma dimensão máxima de 55 mm. A utilização dessas dimensões era necessária para utilizar amostras de testemunhos oriundos de poços perfurados para produção de petróleo.

Inicialmente houve diversos problemas de vazamentos na célula. No entanto, eles foram solucionados, conseguindo-se realizar diversos trabalhos experimentais [45-48], demonstrando a sua grande potencialidade, e que o desafio de se colocar uma célula desse tipo em funcionamento foi plenamente alcançado.

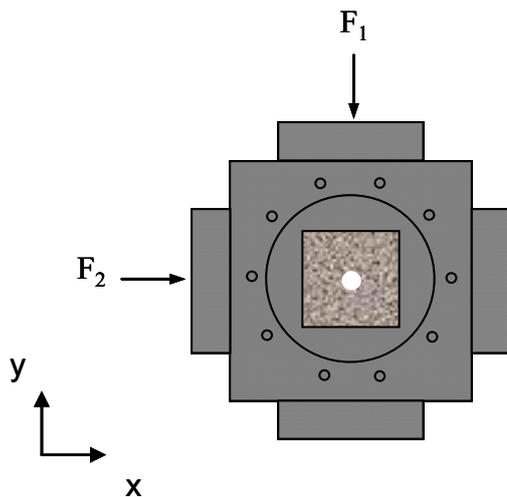


Figura 32 – Representação esquemática das forças atuantes no ensaio poliaxial no plano xy.

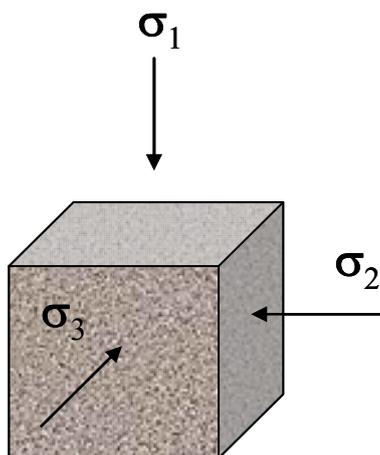


Figura 33 – Representação esquemática das tensões atuantes no ensaio poliaxial.

### 5.1.5. Ensaio Thick-Walled Hollow Cylinder (TWC)

O teste de cilindro vazado com carregamento axial e pressão de fluido interna e externa é um dos ensaios mais úteis para estudar resistência e falha de rocha sob várias condições de carregamento, conforme Figura 34 e Figura 35. A preparação de cilindro vazado de parede fina para amostras de rocha não é de fácil execução, por isto a maior parte dos ensaios em rocha é realizada em cilindro de parede de espessa.

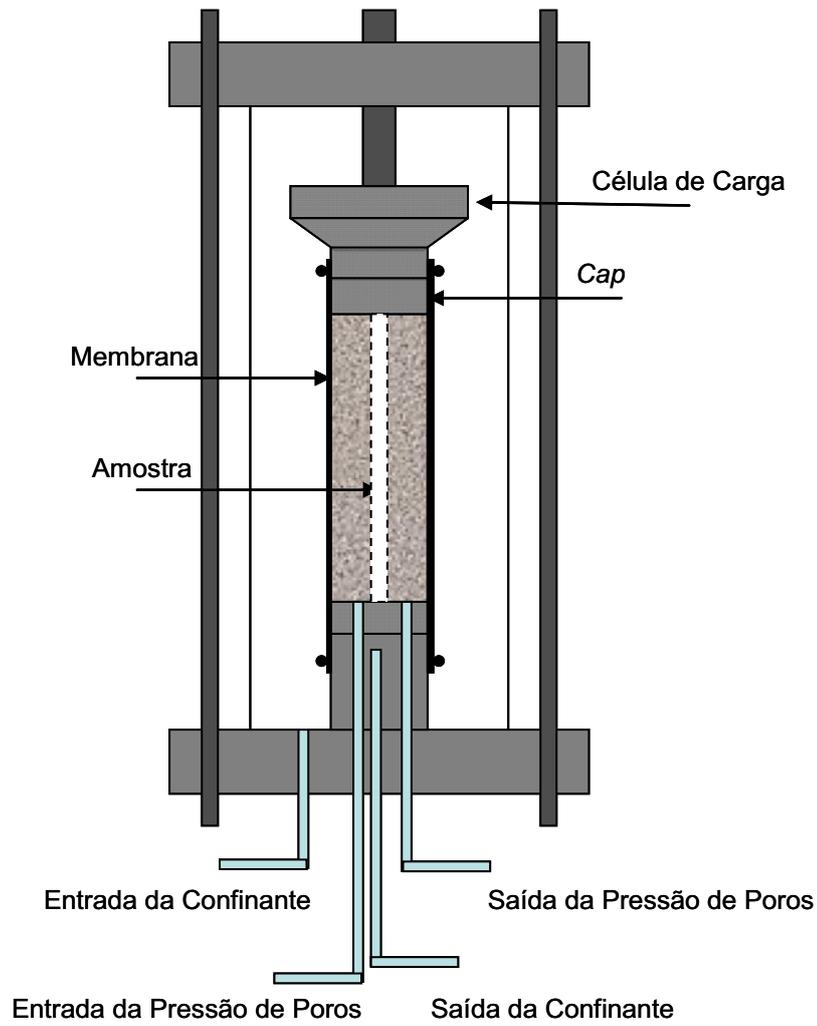


Figura 34 – Representação esquemática do ensaio TWC.

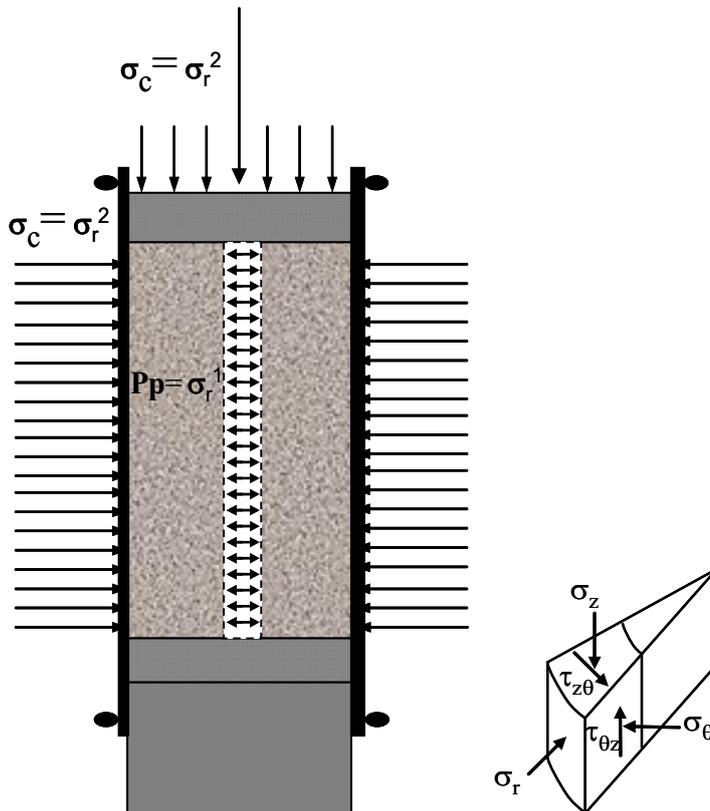


Figura 35 – Representação esquemática das tensões atuantes no ensaio TWC.

### 5.1.6. Ensaio de Granulometria

A amostra é submetida ao ataque químico com HCl (ácido clorídrico) 32% e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (água oxigenada) 200 volumes para eliminar possível presença de carbonatos e matéria orgânica. Posteriormente, é peneirada no Separador RETSCH, modelo AS200, seu intervalo de medição é entre 20µm – 25 mm, e as peneiras podem variar entre 100-203mm, conforme Figura 36. Após a amostra passar pelo separador é obtido às frações de -1,0 a 4,5. No coletor de fundo ficaram retidas as frações de 5,0 a >8,0.

As frações de 5,0 a >8,0 são transferidas para um becher de 100 ml no qual é adicionado 30 ml de solução de Metahexafosfato de Sódio 2 g/l, que evita a floculação das argilas. A amostra em suspensão é submetida ao ultra-som de ponta por 5 minutos e então inserida em um analisador de partículas para obtenção das percentagens das frações que variam de 62 µm a <4 µm (silte grosso a argila), conforme Figura 37.

O Sedigraph determina a granulometria das partículas a partir da técnica de sedimentação de alta resolução e alta reprodutibilidade, que mede as velocidades

de sedimentação de diferentes tamanhos de partículas em um meio líquido de propriedades conhecidas. O intervalo de análise do equipamento está entre 300 e 0,1 $\mu$ m.

A velocidade de sedimentação é medida através de um feixe colimado de baixa energia de raios-X, que passa através da amostra e é capturado num detector. Como as partículas absorvem os raios-X, e somente uma parte do feixe original chega ao detector, através desta porcentagem é possível estimar os diferentes tamanhos das partículas ([http://www.micrometics.com.br/tec\\_tampart.html](http://www.micrometics.com.br/tec_tampart.html)).



Figura 36 – Separador de partícula por frações da Restch, modelo AS200 (<http://www.retsch.com>).

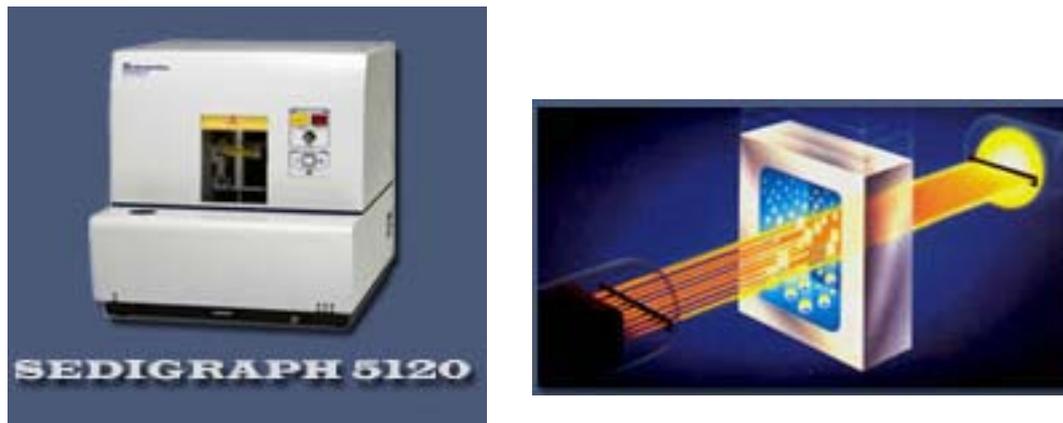


Figura 37 – Analisador de partículas e feixe de raios-X atravessando amostra e atingindo o detector ([http://www.micrometics.com.br/tec\\_tampart.html](http://www.micrometics.com.br/tec_tampart.html)).

### 5.1.7. Ensaio de Densidade

Picnômetro a Gás, conforme Figura 38, pode ser utilizada para medir a densidade de um sólido. O picnômetro para sólidos consiste num vaso de vidro graduado, capaz de medir com grande precisão o volume do líquido nele colocado. Um de seus modelos consta de um vaso de vidro com rolha oca, atravessada por funil especial. Em primeiro lugar, obtém-se separadamente o peso  $M$  do corpo sólido cuja densidade se quer medir e o do picnômetro cheio de água até seu nível de referência. Feito isso, coloca-se o corpo, reduzido a pó, dentro do picnômetro, deixando-se vaziar a água até o nível de referência. Ao se pesar de novo o conjunto, verifica-se ser necessário colocar pesos para que o equilíbrio se restabeleça. A densidade será igual ao quociente da divisão do peso  $M$  do corpo pelo peso  $M'$  da água deslocada (o qual corresponde aos pesos adicionados).



Figura 38 – Picnômetro a gás (<http://www.bonsaiadvanced.com>).

### 5.1.8. Tomografia Computadorizada

A Tomografia Computadorizada de Raios X é uma técnica que permite a avaliação de modo não destrutivo da estrutura interna dos objetos, baseando-se na atenuação de raios X pela matéria. Neste método de inspeção, a imagem gerada preserva a informação espacial completa do objeto analisado, sendo derivada de um grande número de observações sistemáticas em diferentes ângulos, e reconstruída com o auxílio de um sistema computacional.

#### 5.1.8.1. Geração de Raios X e Interação com a Matéria

Os raios X foram descobertos por Wilhelm C. Röntgen em 1895, quando realizava experiências com raios catódicos. A explicação moderna para o fenômeno observado por Röntgen é que moléculas residuais de gás de um tubo de raios catódicos foram ionizadas, e os elétrons liberados foram acelerados através do tubo por causa da tensão aplicada. Como estes elétrons colidiam com várias partes do tubo, fótons de raios X eram liberados através do processo de *bremstrahlung*. Neste processo, quando elétrons acelerados interagem com a matéria, parte de sua energia é convertida em radiação eletromagnética. A fração da energia do elétron convertida em *bremstrahlung* é maior à medida que aumenta a energia do elétron e é mais abundante para materiais de alto número atômico. Este processo é muito importante na produção de raios X em tubos convencionais.

Um tubo de raios X convencional consiste basicamente de uma lâmpada à base de tungstênio que emite fótons dentro de um espectro restrito de energia, que são sucessivamente colimados através de placas metálicas com pequenas aberturas lineares. O conjunto de colimadores absorve os fótons que se chocam contra suas paredes, deixando passar através de sua abertura um feixe contínuo de raios X com abertura e espessura idênticas às dimensões da fenda dos colimadores.

No tubo de raios X, os elétrons provenientes do filamento e acelerados pela alta diferença de potencial entre o catodo e o anodo, ao se chocarem com o anodo (alvo) rapidamente desaceleram e parte de sua energia é convertida em fótons. Elétrons que se aproximam do núcleo atômico do alvo, desaceleram mais rapidamente e criam fótons de alta energia. Esta energia é medida em elétron-volt (eV). A energia dos fótons mais energéticos é igual à diferença de potencial, desta

forma se o catodo está a  $-65\text{kV}$  e o anodo a  $+65\text{kV}$ , então os fótons de maior energia terão  $130\text{keV}$ . Contudo, o núcleo ocupa uma pequena fração da superfície do anodo, assim muitos elétrons são apenas desviados pelo núcleo. Este desvio produz fótons com menores energias. Quanto mais longe estiver o elétron do núcleo, mais baixa será a energia do fóton. Isto produz um espectro de fótons de raios X com poucos fótons de alta energia e um número crescente de fótons com baixa energia.

Quando raios X atravessam um objeto, ocorrem interações entre fóton e matéria, e parte da energia do fóton é removida do feixe incidente. Essa remoção ocorre por absorção e por espalhamento. Para energias acima de  $100\text{keV}$ , os raios X interagem com a matéria predominantemente através do efeito de espalhamento (efeito Compton), o qual é dependente da densidade do material. À medida que a energia diminui a absorção fotoelétrica, dependente do número atômico do material, vai se tornando o mecanismo dominante. A presença desses dois mecanismos permite que, através do controle apropriado do nível energético dos raios X, se façam medições seletivas com a geração de dois tipos de imagens, uma em função da densidade e a outra do número atômico do material.

Um feixe monoenergético de raios X, com intensidade de fótons  $I_0$  e passando através de uma seção transversal de um objeto, sofre uma atenuação que é proporcional ao caminho percorrido pelo feixe no interior do objeto ( $X$ ) e à sua capacidade intrínseca de absorção de raios X, traduzida pelo coeficiente de atenuação de raios X ( $\mu$ ) da matéria que o compõe. A redução do número de fótons do feixe incidente ( $I_0$ ) para a do feixe emergente ( $I$ ) é dada conforme a Lei de *Beer-Lambert* expressa pela equação 223.

$$I = I_0 e^{-\mu X} \dots\dots\dots 223$$

Onde:

$X$  = Distância percorrida pelo feixe de fótons no interior da seção;

$\mu$  = Coeficiente de atenuação linear médio do objeto para fótons de energia do feixe;

$I_0$  = Intensidade do feixe original de fótons medido diretamente por detector exclusivo, sem sofrer qualquer atenuação do objeto em estudo; e

$I$  = Intensidade do feixe de fótons após atenuação provocada pelo objeto.

### 5.1.9. Formação de Imagem Reconstruída

Na tomografia de raios X, um feixe colimado atravessa uma fatia do objeto em várias direções. Observando-se a Figura 39, vemos que esta fatia possui uma espessura determinada e constante. O volume desta fatia pode ser discretizado em elementos de volume designados *voxels*. Tal discretização pode ser compreendida pelo aspecto volumétrico, onde cada elemento discreto de volume possui dimensões laterais e espessura. Deriva de tal discretização a visualização teórica de que a seção transversal seja formada pelo ordenamento matricial de  $n \times n$  *voxels*.

Para a reconstrução da imagem, este volume será representado por uma seção plana reconstruída, cuja área pode por sua vez ser discretizada em pequenas células denominadas *pixels*. Então, a seção transversal atravessada pelo feixe será visualizada como uma seção bidimensional formada por uma matriz de  $n \times n$  *pixels*. Para reconstrução deste plano são necessárias  $n$  medidas independentes da intensidade transmitida atravessando a matriz em diferentes direções.

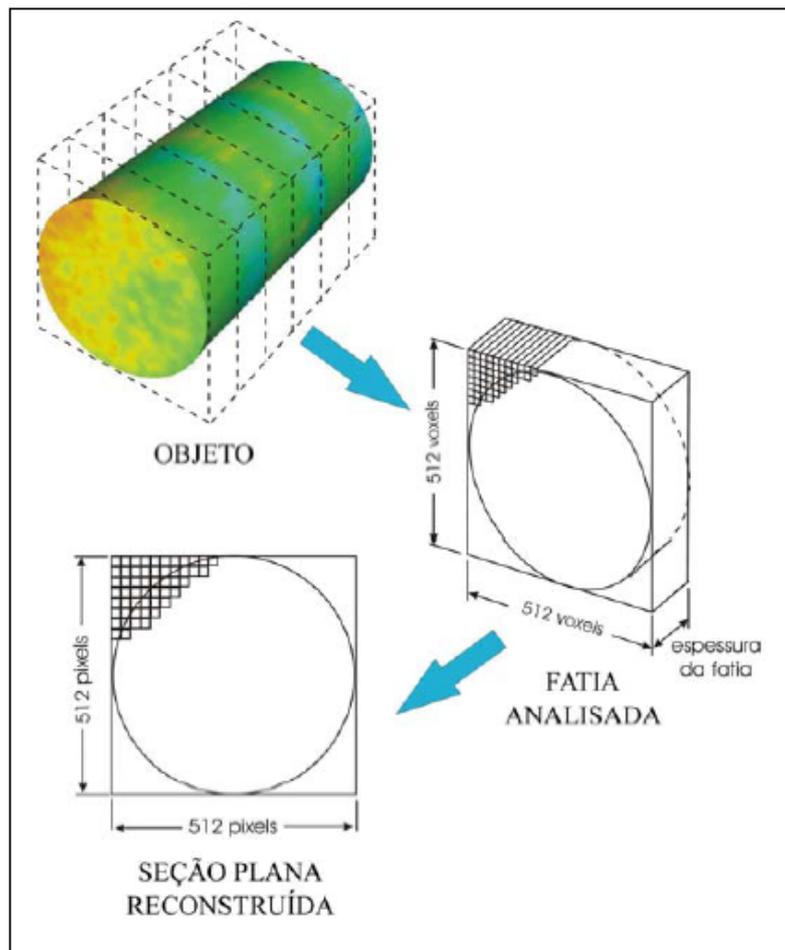


Figura 39 – Formação de imagem reconstruída.

É necessário determinar quais são as características de atenuação para cada pequeno volume do objeto (*voxel*) que influenciará na intensidade final da radiação transmitida. Desse entendimento, podemos interpretar a atenuação global de um feixe de raios X como o somatório da atenuação individual ( $\mu_i$ ) de cada *voxel* situado em sua trajetória (raio soma), conforme visualizado Figura 40.

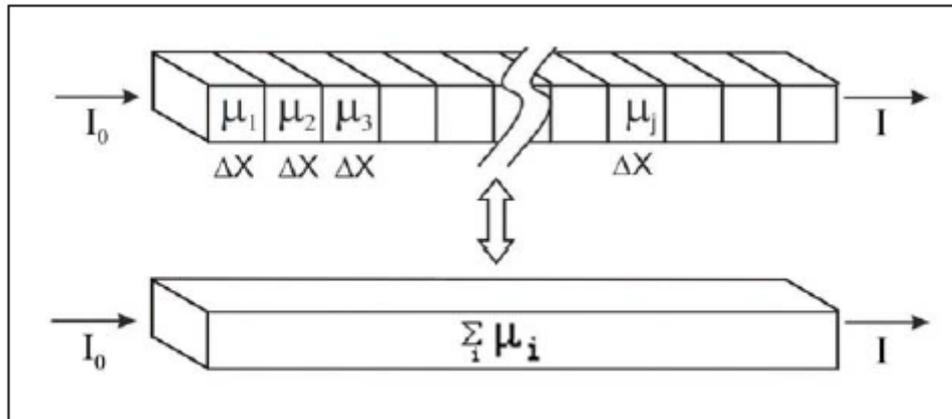


Figura 40 – Atenuação o feixe.

A radiação incidente sobre o primeiro *voxel* de espessura  $\Delta X$  é atenuado de acordo com a 223 por um fator  $e^{(-\mu_1 \Delta X)}$ . A radiação transmitida pelo primeiro *voxel* ( $I_1$ ) se torna a radiação incidente para o segundo *voxel* ( $I_2$ ), o qual reduzirá a intensidade do feixe por um fator de atenuação  $e^{(-\mu_2 \Delta X)}$ . Cada  $i$ -ésimo *voxel* sucessivo atravessado atenua o feixe por seu fator característico  $e^{(-\mu_i \Delta X)}$  até que o feixe final transmitido pela amostra seja medido pelo detector. O somatório dos coeficientes de atenuação  $\mu_i$  está diretamente relacionado à razão entre a intensidade dos raios transmitidos e incidentes, conforme equação 224.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\sum_i \mu_i) \cdot \Delta X} \dots\dots\dots 224$$

Alguns métodos de reconstrução da imagem fazem a deconvolução do raio soma de modo a determinar o valor do coeficiente de atenuação de cada pixel. Os valores obtidos são normalizados para uma escala apropriada, uma vez que na prática não se utilizam os valores absolutos do coeficiente de atenuação linear, e sim uma escala de números tomográficos.

### 5.1.10. Unidades Utilizadas em Imagens Tomográficas

A unidade padrão para tomógrafos médicos é a unidade Hounsfield (HU), que é relacionada à atenuação de raios X pela equação 225.

$$HU_{(x,y)} = \frac{\mu_{(x,y)} - \mu_w}{\mu_w} \cdot 1000 \dots\dots\dots 225$$

Onde:

$HU_{(x,y)}$  = unidade Hounsfield como função da posição;

$\mu_{(x,y)}$  = coeficiente de atenuação para raios X do material, também como função da posição; e

$\mu_w$  = coeficiente de atenuação para raios X da água.

Por convenção, o valor padrão de HU para a água é zero e para o ar é de -1000. Desta forma, cada unidade HU representa uma alteração de 0,1% no coeficiente de atenuação do material investigado em relação à água. Tomógrafos médicos são calibrados utilizando-se ar e água como padrões, exatamente por isso, Unidades Hounsfield representam a escala utilizada em medicina.

Nos trabalhos realizados no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X do CENPES, o equipamento utilizado é calibrado com rochas de composição semelhante àquelas que serão investigadas. Neste caso, os valores gerados pelo tomógrafo não podem ser associados à escala Hounsfield. Por este motivo, apresentamos os resultados como números CT, já que em cada estudo poderemos utilizar materiais diferentes para calibração. Para estudos comparativos será sempre utilizada a mesma calibração.

Na maioria dos tomógrafos, a faixa de unidades CT vai de -1000 representando o ar a 3000, representando materiais bastante densos. Rochas reservatório estão geralmente na faixa de 1000 a 2000.

### 5.1.11. Escala de cores ou tons de cinza

Uma vez obtida à matriz de números CT, estes são convertidos para uma escala de cores ou tonalidades de cinza, gerando uma imagem representativa da estrutura interna do material analisado. Exemplos destes dois tipos de escala podem ser visualizados na Figura 41.

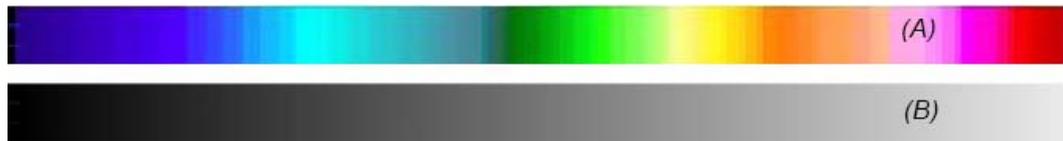


Figura 41 – (a) Escala de cores (b) Tonalidades de cinza.

O mapa de cores que acompanha as seções transversais mostra a variação da atenuação dos raios X por este material. Nele as cores do espectro visível são associadas a números CT, resultantes da absorção dos raios X pela matéria. Para garantir uma melhor visualização das heterogeneidades presentes nas amostras, estas cores são associadas a um intervalo limitado de números CT, de acordo com a absorção apresentada por cada amostra em particular. Por isso, não é possível comparar seções visualizadas com diferentes escalas de cores. Para a análise de um conjunto de imagens transversais deve ser observado seu próprio mapa de cores.