

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1. Rochas Carbonáticas

As rochas-reservatório carbonáticas são descritas por Ahr, (2008) como rochas porosas e permeáveis que contém hidrocarboneto, estes reservatórios apresentam características petrofísicas e geológicas complexas. Muitas vezes são naturalmente fraturados e com sistema poroso complexo.

Os carbonatos são rochas sedimentares, de origem clástica, química ou bioquímica, composta principalmente por Calcita ( $CaCO_3$ ), Dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) e Aragonita ( $CaCO_3$ ), além de minerais secundários não carbonáticos como anidrita, gesso, siderita, quartzo, argilominerais, pirita, óxidos e sulfatos (Arh *et al.*, 2005). Estas rochas são depositadas naturalmente em ambientes marinhos ou continentais de águas claras, quentes e rasas, também podem se formar pela erosão ou lixiviação e posterior transporte do material carbonático de zonas dissolução a zonas de precipitação que leva à sedimentação destas rochas em camadas paralelas e horizontais, conforme a figura 2.1. (Acocella & Turrini, 2010).

Pode ser formada também por origem metabólica de microorganismos, dando origem aos carbonatos bioconstruídos.

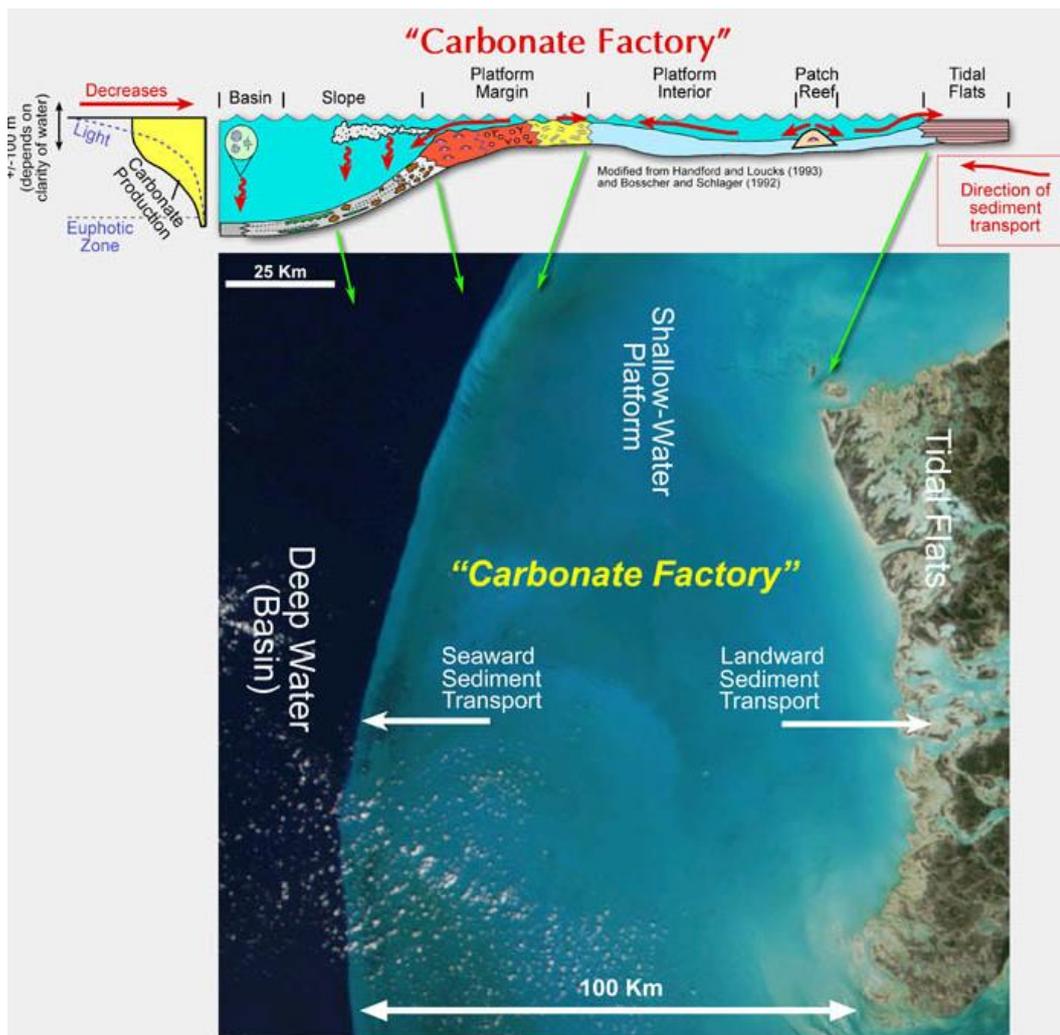


Figura 2.1 Fábrica de carbonatos.

Para a análise e classificação de muitos tipos de rochas carbonáticas é indispensável à identificação da presença de matriz a definição do tipo de arcabouço - matriz suportado ou grão suportado – além dos principais grãos formadores. (Terra *et al*, 2009).

Segundo Terra *et al* (2009) e Pilotto (2011) a matriz ou micrita, material primário na formação da rocha, é composta por cristais de calcita com dimensões menores a quatro de micrômetro ( $\mu\text{m}$ ). O cimento ou esparita é um agregado de cristais de carbonato formados principalmente por aragonita, calcita magnesiana, calcita de baixo teor de magnésio ou dolomita com tamanhos maiores a quatro micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), que precipitam nos espaços vazios existentes entre os grãos dos sedimentos carbonáticos. Dentre os grãos chamados também de grãos aloquímicos, encontram-se oólitos, oncolitos, pelóides, pellets, extraclastos, intraclastos e bioclastos.

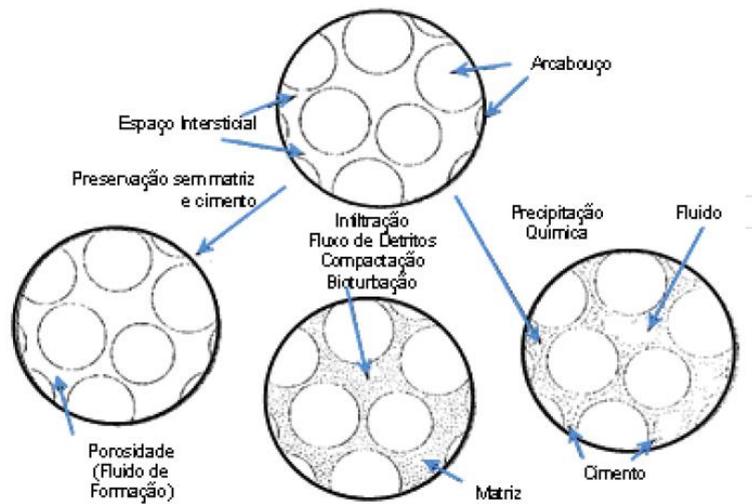
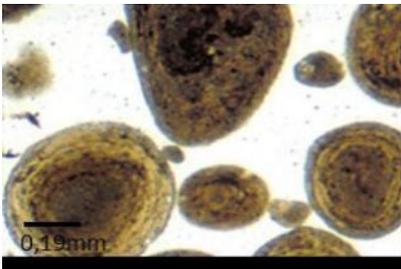
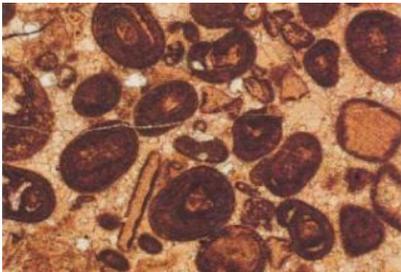


Figura 2.2 Principais elementos componentes das rochas carbonáticas.



### Micrita:

Equivale à matriz e é formado por calcita microcristalina ( $<4 \mu\text{m}$ ).

Normalmente de cor pardo.

Material de origem primário na formação da rocha.

### Espato:

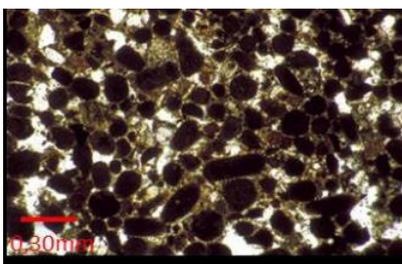
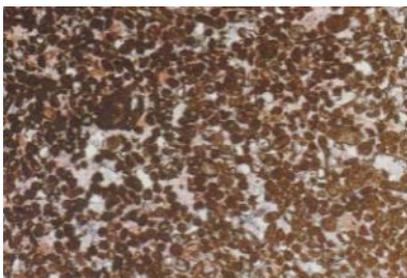
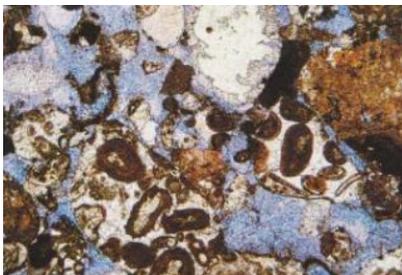
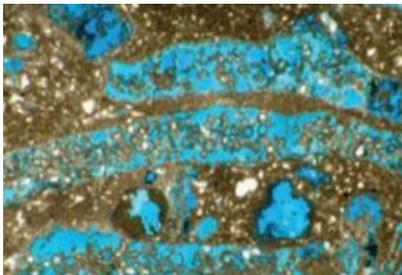
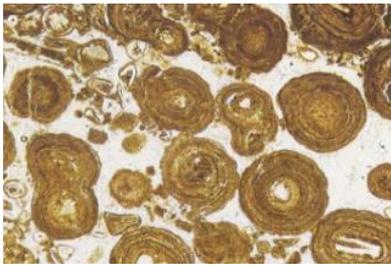
Cimento carbonático precipitado quimicamente.

Agregado de cristais de carbonato ( $>4 \mu\text{m}$ ), precipitado nos espaços entre grãos de um sedimento carbonático ou nos espaços internos dessas partículas.

### Oólitos:

Partículas esféricas ou ovais de estrutura concêntrica principalmente de carbonato de cálcio, ( $<2 \text{mm}$ ).

Forma-se em águas ricas em carbonato de cálcio, por precipitação inorgânica em águas marinhas tropicais.



### **Oncólitos:**

Partículas formadas por lâminas micríticas concêntrica geradas por algas azuis que formam crostas descontínuas em águas agitadas e calmas. Tamanho variável até centímetros e com seleção pobre.

### **Bioclastos:**

Esqueletos e pedaços de esqueletos de organismos de carapaça calcária.

### **Extraclastos:**

Fragmentos arredondados ou angulosos procedentes da erosão das rochas carbonáticas e fora da bacia. Estrutura interna sofreu processos digenéticos. Evidência de cimentação bem desenvolvida e bordas.

### **Intraclastos:**

Componente de um calcário como fragmento erodido dentro da bacia de deposição e ré-deposição, na mesma formação. Morfologia geralmente angulosa, de tamanhos variáveis.

### **Peloides:**

Corpos de > 0,15 mm arredondados ou ovalados resultantes de fragmentos de conchas.

### **Pellets:**

Pequenos corpos ovalados (< 0,15 mm) sem estrutura interna e origem fecal.

Figura 2.3 Principais Grãos.

### 2.1.1. Classificação das rochas carbonáticas

Diversas classificações têm sido desenvolvidas como resultado da heterogeneidade presente nas rochas carbonáticas. Estas rochas têm sido classificadas com base em sua textura, composição, mineralogia, parâmetros físicos assim como pelos tipos de poros característicos.

Roehl e Choquette, (1985), Folk, (1959 e 1962) e Dunham, (1962) apresentam classificações com base nas quantidades relativas à **textura** e **componentes digenéticos** (partículas, matriz, cimentos e poros) além das características partículas “versus” matriz. Uma década mais tarde Embry e Klovan (1972) deram uma nova dimensão à proposta de Dunham, distinguindo mais dois grupos entre calcários alóctones com elementos figurados, de diâmetro superior a dois milímetros.

#### 2.1.1.1. Classificação de Dunham (1962)

Segundo Terra *et al* (2009), esta classificação é baseada na textura deposicional, onde são definidos quatro grupos de rocha: carbonatos com matriz (grão-suportado ou não), carbonatos sem matriz (grão suportado), carbonatos relacionados a componentes originais ligados durante a deposição, e carbonatos essencialmente formados por cristais que podem ser calcita e/ou dolomita.

**Mudstone** – Rocha carbonática suportada pela matriz com menos de 10% de grãos tamanho areia ou maior.

**Wackestone** – Rocha carbonática suportada pela matriz com mais de 10% de grãos tamanho areia ou maior.

**Packstone** – Rocha suportada pelos grãos com matriz.

**Grainstone** – Rocha carbonática suportada pelos grãos, sem matriz (máximo de 5%).

**Boundstone** – Rocha carbonática formada *in situ*, cujos componentes da trama original foram ligados durante a deposição.

**Cristalline** – Rocha carbonática totalmente recristalizada, não sendo possível identificar sua textura deposicional original.

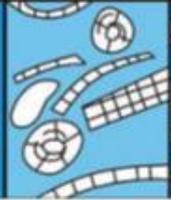
TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição				Componentes originais ligados durante a deposição	
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)					
Suportado pela matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz	Sem matriz, grão-suportado		
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos				
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Boundstone</i>	<i>Crystalline</i>
					

Figura 2.4 Classificação de Dunham.

#### 2.1.1.2. Classificação de Embry e Klovan (1972)

Segundo Terra *et al* (2009), esta classificação é uma ampliação de Dunham (1962) para rochas recifais. Os autores substituíram a categoria Boundstone por cinco novas categorias: Floatstone, Rudstone, Bafflestone, Bindstone e Framestone.

CALCÁRIOS ALÓCTONES					CALCÁRIOS AUTÓCTONES					
Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição (<10% grão >2 mm)				Textura deposicional não-reconhecível	Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição			Componentes originais ligados organicamente durante a deposição		
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)					>10% grãos >2 mm			Organismos que atuam como obstáculos	Organismos que encrustam e ligam	Organismos que constroem um arcabouço rígido
Suportado por matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz	Sem matriz, grão-suportado		Suportado pela matriz	Suportado por componentes maiores que 2 mm				
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos									
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Crystalline</i>	<i>Floatstone</i>	<i>Rudstone</i>	<i>Bafflestone</i>	<i>Bindstone</i>	<i>Framestone</i>	

Figura 2.5 Classificação de Embry e Klovan

## 2.1.2. Processos de Formação

As rochas carbonáticas apresentam uma grande variedade de tipos de poros, porosidade heterogênea além de estruturas e distribuição espacial complexa. Isso devido aos processos de formação físicos e químicos que se iniciam logo após a sedimentação, em ambientes marinhos e continentais.

Após a sedimentação os sedimentos passam a sofrer processos de litificação ou diagênese. A diagênese compreende uma ampla gama de processos físicos, químicos e biológicos, em estágios, nos quais, os sedimentos e águas preenchendo poros intersticiais, reagem procurando um equilíbrio geoquímico e textural com o ambiente. Isto gera mudanças mineralógicas, geoquímicas, texturais e estruturais. Assim, os mecanismos de diagêneses podem ser mecânicos, biológicos, químicos ou a combinação desses mecanismos. (Ahr, 2008).

A diagênese é o processo responsável pela porosidade, permeabilidade e resistência mecânica das rochas carbonáticas. Dentre os fatores ambientais na diagênese, podemos destacar a pressão, temperatura, as propriedades dos fluidos diagenéticos e o tempo. Também fatores intrínsecos ao sedimento como a composição mineralógica, a textura, a porosidade e a permeabilidade.

Os principais processos diagenéticos sofridos pelas rochas carbonáticas são a compactação, a cimentação, a dissolução, a recristalização e a dolomitização.

A compactação é gerada pelo aumento da carga, gerando uma reorganização de partículas e com isso uma redução na porosidade. Pode ser mecânica, que

começa ao final da sedimentação e química, como resultado do aumento de solubilidade no contato entre grãos e superfícies de descontinuidade quando é aplicada uma força como a pressão de soterramento ou processos tectônicos em presença da água.

A dissolução é o processo de iteração da composição da água dos poros e a mineralogia de partículas. Este processo é o causador da porosidade secundária dos carbonatos (vugs, caverna, etc.).

A recristalização é um processo que compreende transformações de minerais e texturas dando como resultado cristais novos de morfologia e tamanhos diferentes.

A dolomitização é o processo que envolve a substituição da calcita e aragonita por dolomita, é um processo geoquímico em que íons magnésio substituem íons cálcios ( $\text{Ca}^{2+}$ ) de calcitas, originando dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). A circulação de águas carregadas de sais magnesianas é responsável pelo processo de dolomitização. Quando chega o ponto em que o calcário está muito enriquecido em carbonato de magnésio, ela passa a constituir um calcário dolomítico. Como o volume dos cristais de dolomita é menor do que o da calcita, o processo de dolomitização é acompanhado por um aumento da porosidade das rochas, bem como o alívio de tensões. Ela se torna cavernosa o suficiente para perder os traços de estratificação primitiva.

### **2.1.3. Travertinos**

Segundo Chafetz & Folk (1984) o termo travertino é italiano, constituindo uma derivação do latim Tiburtinus cuja tradução do latim significa “pedra de Tibur”, em referência à cidade de Tivoli.

Os travertinos são rochas sedimentares não clásticas com microestrutura cristalina. Segundo Folk (1959) originam-se em águas termais e não apresentam nenhum vestígio de plantas ou animais, apenas de atividades microbianas de bactérias tolerantes ao calor.

Para Pentecost (2005) o travertino é um calcário continental, quimicamente precipitado e formado no entorno de infiltrações, nascentes, rios e eventualmente lagos. Sua constituição é de calcita ou aragonita, de baixa a moderada porosidade

intercristalina e elevada porosidade móldica (formada pela remoção seletiva ou dissolução do material sedimentar) ou framework. Para o autor a precipitação resulta principalmente da transferência do dióxido de carbono de ou para as fontes de água subterrânea levando à supersaturação de carbonato de cálcio, com a nucleação e crescimento de cristais que ocorre sobre uma superfície submersa.

#### **2.1.4. Porosidade e comportamento mecânico**

A porosidade e como ela se distribui na rocha está diretamente correlacionada com a resistividade, permeabilidade, velocidade acústica e comportamento mecânico. Segundo Arns et al (2002), as propriedades elásticas das duas fases (poros e sólido) do material poroso dependem da geometria natural do espaço poroso e da fase sólida assim como do valor da porosidade. Aspectos relevantes dos materiais porosos podem incluir forma do poro e tamanho, assim como tamanho e tipo de interconexão entre as regiões sólidas.

##### **2.1.4.1. Porosidade**

A porosidade por definição é a razão entre o espaço vazio total e volume total da rocha. Nesta seção serão apresentadas as definições de porosidade.

- Porosidade absoluta é a relação entre volume total de vazios de uma rocha e o volume total da mesma.
- Porosidade efetiva é a relação entre espaços vazios interconectados de uma rocha e o volume total da mesma. Do ponto de vista da engenharia de reservatórios a porosidade efetiva é o valor que se deseja quantificar, pois representa o espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados do meio poroso.
- Porosidade primária é aquela que se desenvolveu durante a deposição do material sedimentar.
- Porosidade secundária é resultante de alguns processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rochas.

A porosidade efetiva pode ser determinada através de diferentes métodos:

- Volume de poros medidos por injeção de hélio, utilizando-se o método da lei de Boyle;
- Porosidade em corpos de prova medida através das técnicas de saturação das amostras e avaliação de pesos seco e saturado;
- Porosidade obtida de lâminas delgadas através da contagem de poros no microscópio;

Choquette & Pray (1970) fizeram uma representação dos diferentes tipos de porosidade, sendo divididas em três grupos, conforme a figura 2.6.

A porosidade das rochas é bastante variável. No caso das rochas sedimentares, formadas pelo acúmulo de grãos, fragmentos de rochas ou conchas, geralmente decresce com a idade geológica e com a profundidade. Quanto mais antiga a rocha, maior a presença de minerais estáveis. Os instáveis já foram alterados, lixiviados e substituídos por outros estáveis, conferindo menor espaço vazio ao material (GOODMAN, 1989).

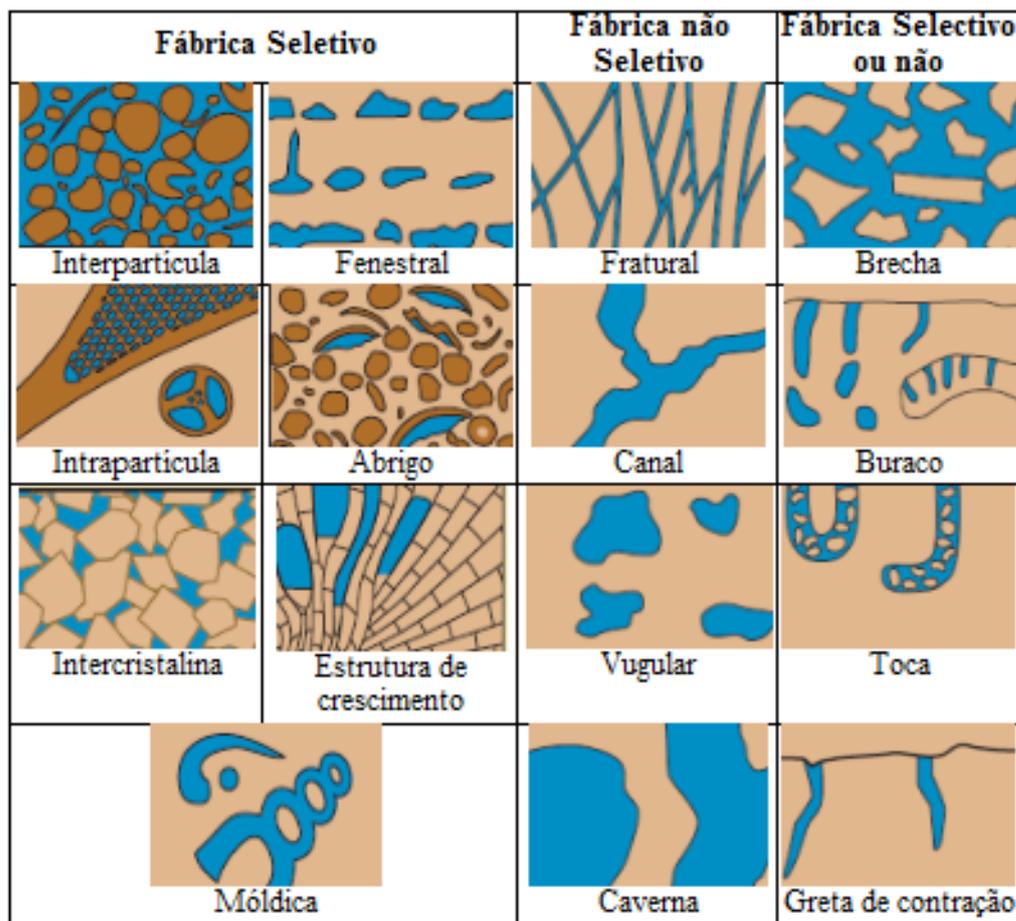


Figura 2.6 Classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970). (Fonte: Modificado Scholle & Scholle, 2003).

No primeiro grupo de fábrica seletivo, a responsável da formação do poro são os grãos e cristais ou outras estruturas físicas, sendo que os poros não atravessam seus limites primários (grãos e fábrica de posição). Neste grupo, inclui-se a porosidade:

- Interpartícula onde o espaço poroso é formado pelas partículas sedimentares, com um diâmetro de poro maior que 10  $\mu\text{m}$ .
- Intrapartícula, onde o espaço poroso se forma no interior das partículas ou grãos das rochas, com um diâmetro de poro menor que 10  $\mu\text{m}$ .
- Intercristalina, em que o espaço poroso é formado entre cristais da rocha.
- Mórdica, formada pela remoção seletiva ou dissolução do material sedimentar.

- Fenestral, este termo é usado para definir as aberturas maiores e mais longas que os interstícios formados pelos grãos das rochas, com diâmetros maiores a 100  $\mu\text{m}$ .
- Shelter ou abrigo, na qual as partículas cobrem a superfície da rocha em formação, deixando um espaço vazio formando o poro e evitando que seja preenchido por material mais fino.
- Growth – Framework ou estrutura de crescimento, que é um tipo de porosidade primária criada a partir do crescimento in situ da estrutura da rocha carbonática.

No grupo de fábrica não seletivo, os poros podem atravessar seus limites primários, incluindo-se os seguintes tipos:

- Fratural, originada pelo faturamento da rocha, que pode induzir à formação de outros tipos de poros e aumentos significativos da permeabilidade.
- Canal, os poros ou sistema de poros são alongados e há continuidade dos poros em uma ou duas dimensões em relação à terceira dimensão.
- Vugular, com diâmetros maiores a um mm, não apresentando relação com a textura da rocha, e sendo formados geralmente por dissolução com um baixo grau de comunicação.
- Caverna, este tipo de porosidade originada por processos de dissolução é caracterizada pelo maior tamanho, que são grandes cavidades ou cavernas.

O último grupo de fábrica seletiva ou não; inclui a porosidade:

- Brecha, que acontece principalmente na zona de falha, dissolução com fluxo de detritos e deslizamento ou deformação tectônica.
- Boring ou buraco, no qual os poros são criados em sedimentos relativamente rígidos, conchas e outros matérias pela perfuração de organismos.
- Burrow ou Toca, neste caso os poros também são formados por organismos, porem em sedimentos pouco consolidados.
- Shrinkage ou gretas de contração, sendo estes vazios originados por processos de secagem que são associados com a ocorrência de gretas e fissuras de tamanho variável, que se apresentam majoritariamente

em sedimentos finos (Scholle & Scholle, 2003). Estão geralmente associados à exposição da rocha e ao intemperismo.

#### 2.1.4.2. Comportamento Mecânico

Pico (2013) fez um levantamento das propriedades dos travertinos. A porosidade varia entre 5,18%-24,99%, a densidade de travertinos varia entre 2,02 e 2,7g/cm<sup>3</sup>, a resistência encontrada varia na faixa de 36,82 até 49,48 MPa, velocidades de onda de compressão (Vp) entre 4,07 e 5,6 km/s e velocidades de onda de cisalhamento (Vs) entre 2,2 até 3,06 km/s. Em sua dissertação podemos encontrar uma vasta coleção de trabalhos dos mais variados autores e assuntos sobre caracterização mecânica de carbonatos.

Garder et al. (2010) apresentaram um estudo em rochas carbonáticas, retiradas de poços terrestres em Abu Dhabi, comparando o módulo de elasticidade dinâmico obtido através de ensaios de laboratório confinados com a técnica de Física Digital de Rochas. A comparação se encontra na figura 2.7 e mostra resultados satisfatórios na comparação das duas técnicas. Os triângulos abertos são dos ensaios em laboratório e os triângulos fechados de ensaios numéricos. As rochas estudadas em laboratório foram rochas de poços adjacentes ao poço às rochas usadas para análise numérica.

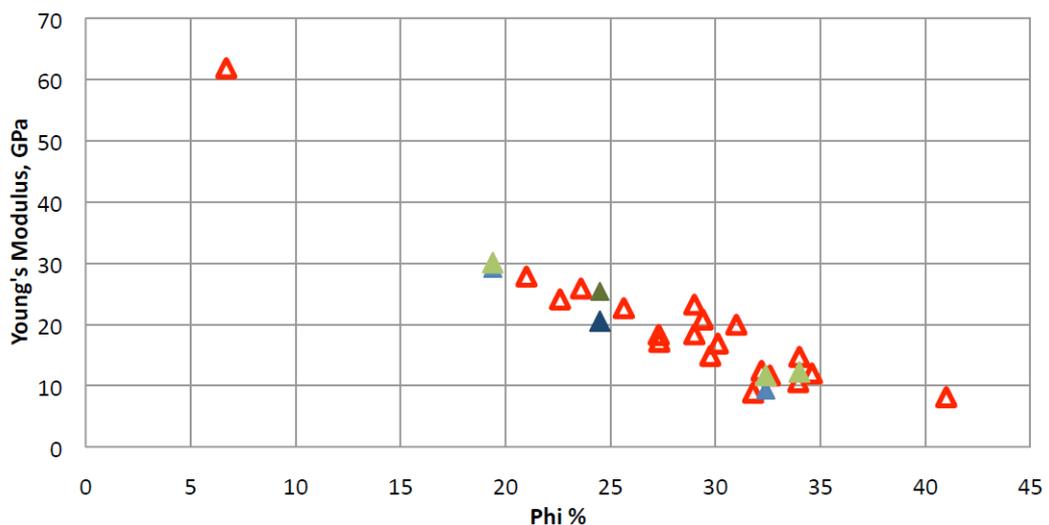


Figura 2.7 Módulo de elasticidade x porosidade (Garder et al, 2010).

Pilotto (2011) e Palchik (2010) apresentaram a comparação entre as correlações do módulo de Young com a porosidade obtida em laboratório para diferentes tipos de rochas carbonáticas. Palchik (2010) coletou amostras em diferentes locais de Israel entre dolomitos e calcários. Pilotto (2011) coletou amostras de travertinos de Itaboraí. Nas rochas estudadas por Palchik (2010), verificou-se que os valores do módulo de Young decresciam com o aumento da porosidade. Nos ensaios realizados por Pilotto (2011) verificou-se o contrário, talvez pela pequena variação da porosidade nos três ensaios e um número limitado de amostras que não são suficientes para se estabelecer uma tendência. A análise digital de imagens pode responder por resultados alheios apenas a porosidade.

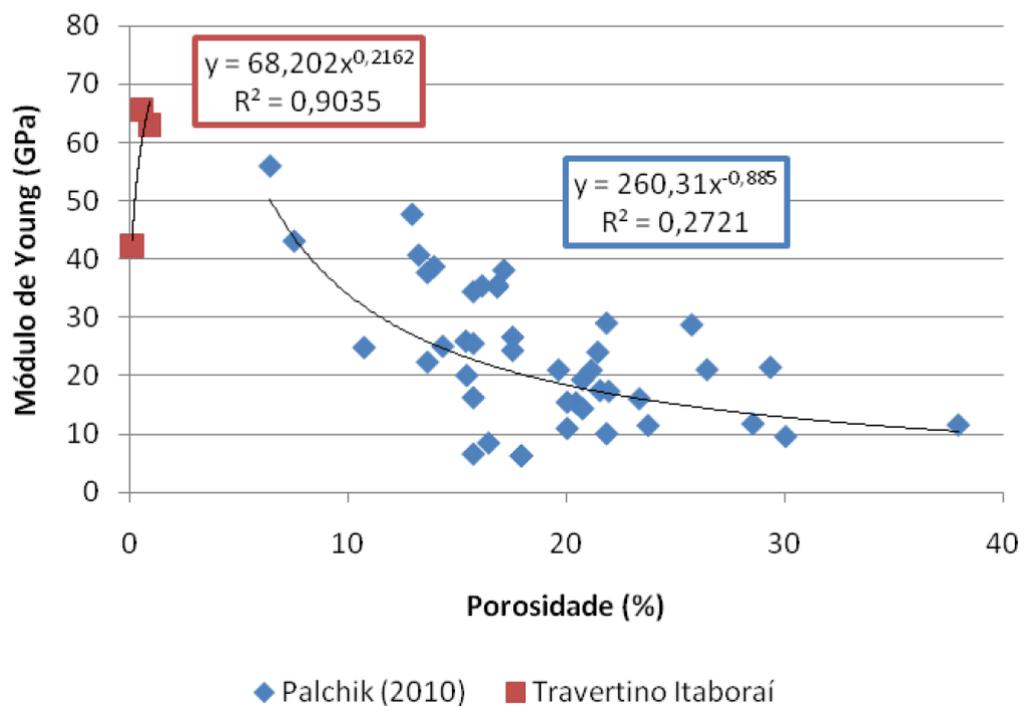


Figura 2.8 Módulo de elasticidade x porosidade (Pilotto, 2011 e Palchik, 2010).

Como mostra a figura 2.8, para a mesma porosidade, existe uma variação do módulo de elasticidade que pode ser explicada tanto pela mineralogia, tanto quanto e pela distribuição de poros. Palchik (2010) apresenta em seu artigo uma tabela com a porosidade e o módulo de elasticidade. Para amostras da mesma região com porosidades iguais, o módulo de elasticidade é diferente.

## 2.2. Processamento e Análise Digital de Imagens

O Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI) é uma ferramenta relativamente recente que cresce acompanhando o desenvolvimento dos recursos computacionais. Consiste na utilização de operações matemáticas para alterar os valores dos pixels de imagens digitais, modificando-as, para facilitar sua visualização e/ou para proceder à extração de dados quantitativos (Gomes, 2001).

O Processamento e Análise Digital de Imagens podem ser divididos em três etapas: aquisição, processamento e análise. A aquisição é a obtenção de uma imagem digital. Na etapa de processamento as imagens são tratadas e preparadas para análise que é a etapa de extração de atributos e reconhecimento de padrões. A figura abaixo mostra a sequência do PADI.

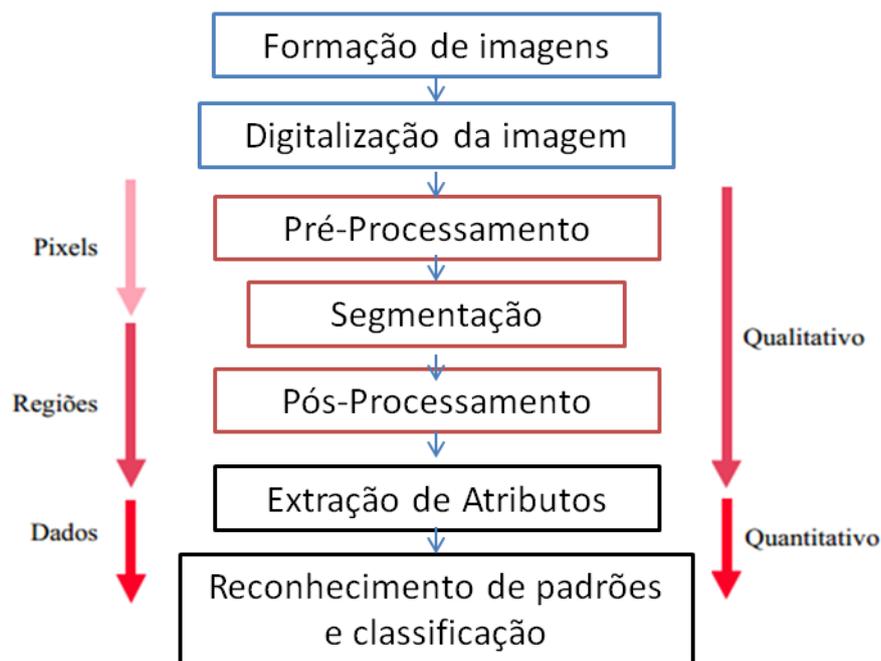


Figura 2.9 Fluxo de trabalho (imagens).

### 2.2.1. Aquisição da imagem

O objetivo do bloco de Aquisição é a obtenção de uma imagem digital. Uma imagem digital é um arquivo de computador composto basicamente por um cabeçalho, com informações diversas, e uma matriz de números, onde cada um deles identifica a cor ou intensidade do pixel de posição correspondente na

imagem. Assim, esta matriz constitui-se num mapa que reproduz a imagem pixel a pixel.

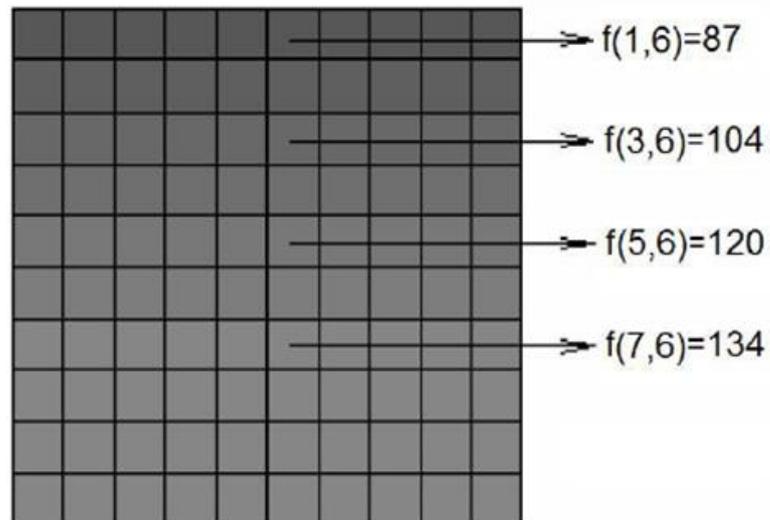


Figura 2.10 Matriz de uma imagem.

O pixel, abreviação de picture element, é a unidade básica da imagem digital em duas dimensões, para três dimensões a unidade básica é o voxel (combinação de volume e pixel).

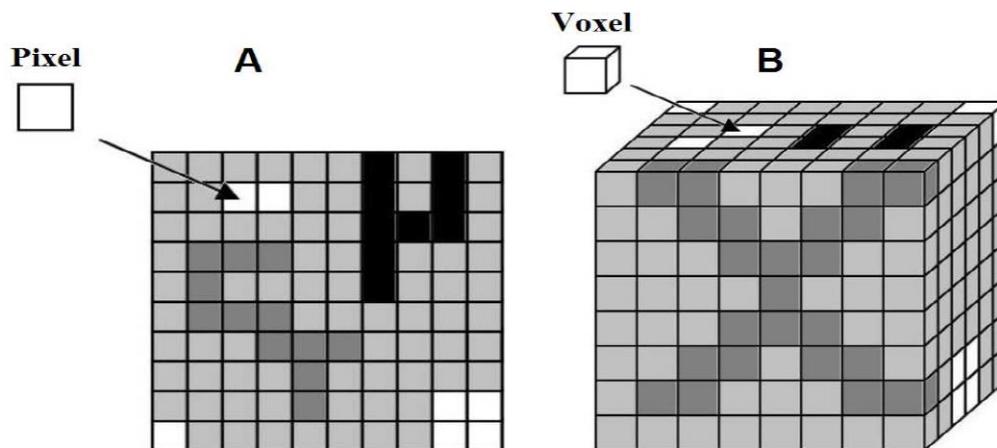


Figura 2.11 Pixel e Voxel.

Existem vários instrumentos para obtenção de imagens digitais como máquinas de fotografia, microscópios eletrônicos e óticos, microtomografia, entre outros. É importante ressaltar que o termo imagem não se restringe apenas ao princípio óptico, podendo ser geradas imagens acústicas, magnéticas, radioativas, etc.

### 2.2.1.1. Microtomografia

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica de ensaio não destrutivo que permite a obtenção de imagens de uma seção de um corpo de prova, através de um conjunto de projeções do plano e com o auxílio de um computador com um programa de reconstrução de imagens. Múltiplos raios projetados sobre o corpo de prova, em vários ângulos em um mesmo plano, fornecem uma imagem 3D do objeto. No caso da tomografia de raios-x a principal vantagem é ser uma técnica não invasiva que nos fornece certa proporcionalidade entre os valores de atenuação de raios-x adquiridos em cada *voxel* e o valor da densidade real do material neste subdomínio. Tal fato dá origem ao termo de radiodensidade aos resultados do equipamento (Machado, 2012).

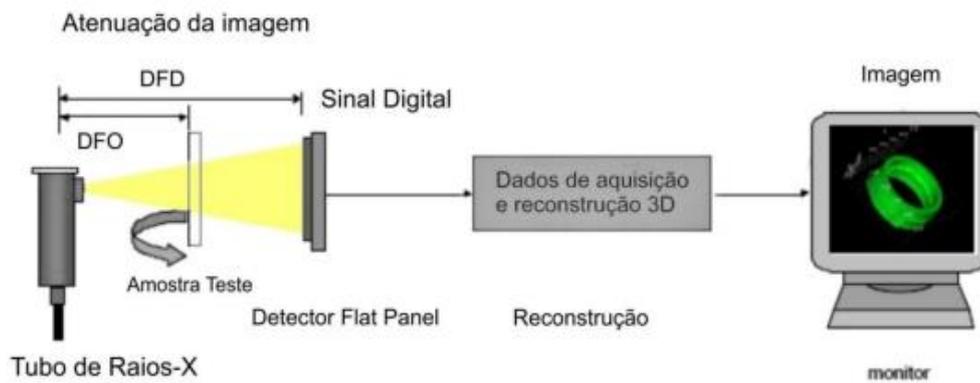


Figura 2.12 Esquema do sistema Tomográfico.

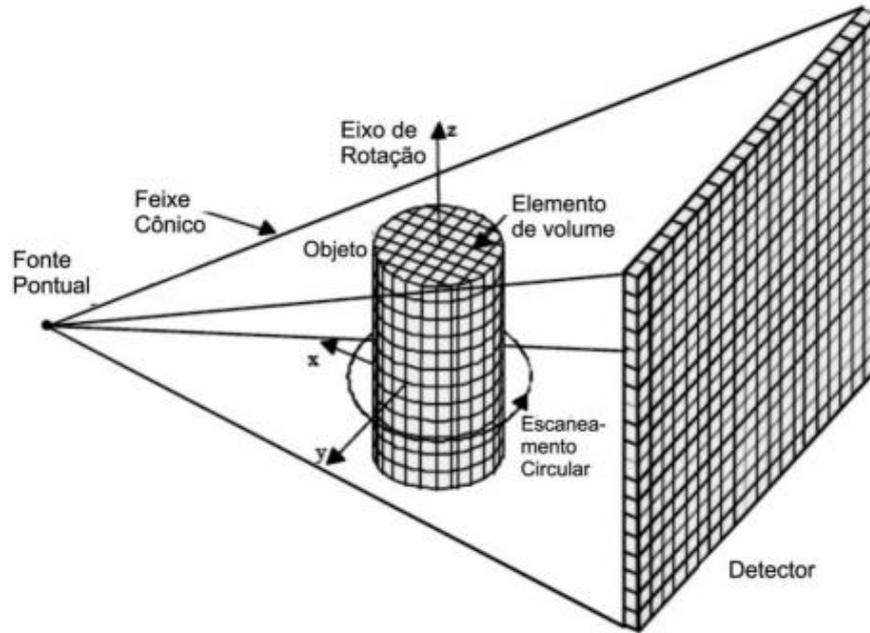


Figura 2.13 Princípio da formação da imagem tomográfica.

A Microtomografia Computadorizada possui o mesmo embasamento da tomografia, tendo sido especialmente desenvolvida para a inspeção de microestruturas. O diferencial desta técnica está relacionado ao tamanho do foco do tubo de raios x e à resolução do detector. Essa metodologia possibilita a caracterização detalhada de propriedades petrofísicas, tais como, porosidade e distribuição de tamanho dos poros e também inferência da permeabilidade.

As imagens utilizadas nesta pesquisa correspondem a imagens de três amostras de travertinos (TRI-09, TRR-01 e TRT-01) capturadas no microtomógrafo da marca SkysCan, modelo 1173, (Figura 2.14), no Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagesed) do Instituto de Geociências da UFRJ, durante a dissertação de mestrado realizada por Pilotto, (2011).

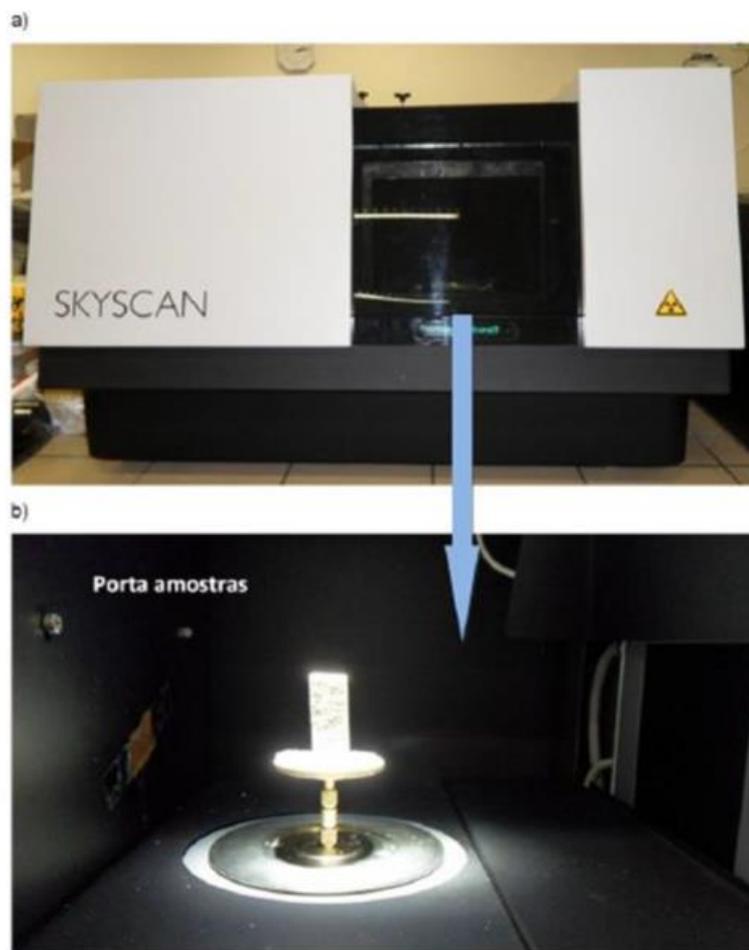


Figura 2.14 Microtomógrafo SkysCan 1173 utilizado no programa experimental: a) vista frontal do equipamento e b) porta amostras. (Pilotto, 2011).

A tensão utilizada na aquisição das imagens foi de 80 kV, com uma corrente de 100  $\mu$ A. O microtomógrafo possui um tubo de raios-X com uma potência de 8W. A Tabela 2.1 apresenta os parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras.

Tabela 2.1 Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras analisadas. (Pilotto, 2011)

Amostra	Tensão (KV)	Rotação Total (°)	Passo angular (°)	Resolução espacial ( $\mu$ m)	Tempo de exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
TRI-09	80	0 a 180	0,5	33,84	800	5	32' 37"
TRR-01	80	1 a 180	0,5	26,08	800	5	32' 28"
TRT-01	80	2 a 180	0,5	26,08	800	5	32' 35"

O resultado são pilhas de imagens bidimensionais. Na Tabela 2.2 são apresentadas as informações do número de imagens bidimensionais e sua equivalência em *GigaBytes*, para as três amostras dos travertinos microtomografadas.

Tabela 2.2 Características das imagens bidimensionais procedentes do processo de microtomografia para os travertinos.

Amostra	Número de imagens bidimensionais	Equivalência em <i>GigaBytes</i>
TRI-09	2057	9,62
TRR-01	1813	8,47
TRT-01	2383	11,1

### 2.2.1.2.

#### Conceitos/ Propriedades/ características da Imagem digital

A resolução espacial ou simplesmente resolução consiste no tamanho, na imagem real, que um pixel da imagem digital representa, ou seja, a resolução é a capacidade máxima de discriminação de dois pontos na imagem.

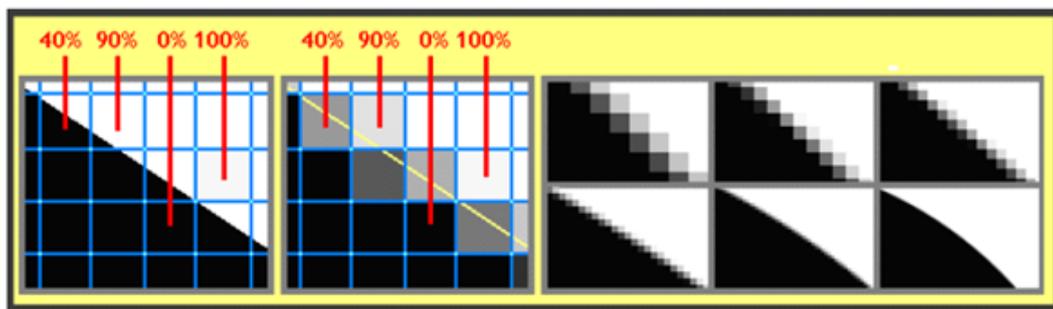


Figura 2.15 Resolução.

A profundidade, quantização ou resolução espectral de uma imagem digital consiste no número máximo de níveis de intensidade que esta imagem pode apresentar. Em microtomografia as imagens são de 8 bits, geralmente representados opticamente por 256 tons de cinza Assim, este trabalho trata somente de casos onde as imagens adquiridas tem esta profundidade.



Figura 2.16 Resolução e intensidade.

O histograma de uma imagem digital constitui-se na representação gráfica da função distribuição dos tons de cinza de seus pixels. O histograma é um gráfico que tem como eixo horizontal a escala de tons de cinza e cujo eixo vertical representa as probabilidades de ocorrência dos tons de cinza na imagem, o histograma fornece uma descrição global da aparência da imagem, mas nada diz sobre seu conteúdo.

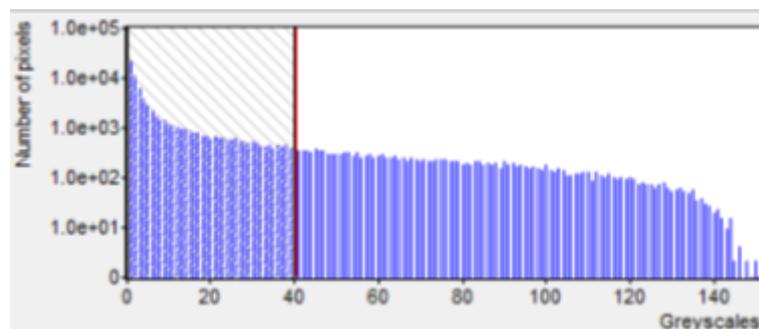


Figura 2.17 Histograma de imagem.

### 2.2.2. Pré-processamento

O pré-processamento é a etapa que tem por objetivo melhorar a imagem, corrigindo defeitos gerados durante sua aquisição e/ou realçando detalhes de interesse específico.

Segundo Gomes (2001), os procedimentos desta etapa podem ser divididos em duas categorias, procedimentos realizados no domínio do espaço real e procedimentos realizados no domínio das frequências. O domínio do espaço real refere-se à imagem propriamente dita e os procedimentos nele realizados são baseados na direta manipulação dos pixels da imagem. Já os procedimentos no domínio das frequências são feitos através da modificação da imagem da transformada de Fourier da imagem original, seguida da obtenção de sua transformada inversa.

Existem na literatura vários procedimentos no domínio do espaço e no domínio da frequência, porém neste trabalho serão considerados apenas as operações locais e as operações geométricas que são procedimentos do domínio do espaço.

Operações locais são operações onde o tom de cinza de um determinado pixel na imagem de saída é função não apenas de seu tom de cinza na imagem de entrada, mas também dos tons de cinza de seus pixels vizinhos nesta imagem.

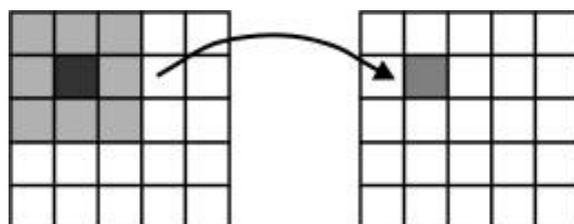


Figura 2.18 Operação local.

As operações geométricas são operações onde a relação de posição entre os pixels é alterada. Consistem em uma transformação espacial, que, caso leve à criação de pixels inexistentes na imagem original, é seguida por uma interpolação das intensidades dos pixels.

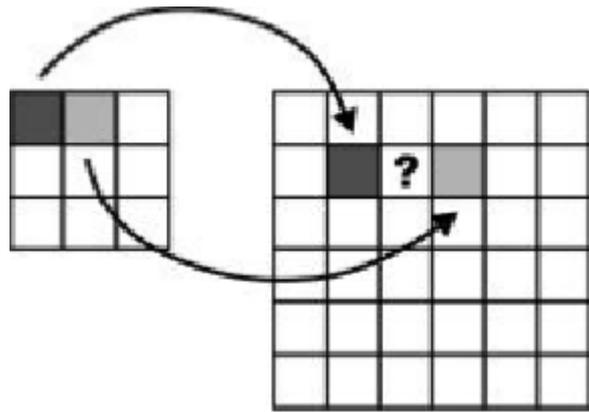


Figura 2.19 Operação Geométrica.

A operação geométrica mais comum é certamente a reamostragem (*resampling*), que consiste numa transformação espacial linear de mudança de escala, definida como:

$$X' = S * x \quad (2.1)$$

$$Y' = S * y \quad (2.2)$$

Onde S é o fator de escala.

### 2.2.2.1. Segmentação

Segundo Gomes (2001), o objetivo da segmentação é reproduzir digitalmente a tarefa de reconhecer regiões de uma imagem como objetos, um processo cognitivo extremamente sofisticado realizado pela visão humana. A segmentação divide a imagem em regiões e distingue essas regiões como objetos independentes uns dos outros e do fundo. A segmentação costuma ser a etapa crítica da sequência padrão de PADI, pois é através dela que se reconhece e se identifica os objetos de interesse, sobre os quais será feita a análise.

No caso mais simples de diferenciar objetos de um fundo, a segmentação tem como produto uma imagem binária, onde os pixels pretos representam o fundo e as regiões de pixels brancos contíguos são considerados objetos, ou vice-versa. Neste trabalho, fica convencionado que, a notação é: os pixels pretos (0) são os poros e as regiões de pixels brancos (1) representam o arcabouço sólido da rocha.

A figura 2.20 mostra em exemplo de segmentação. Uma seção de amostra de um travertino em 256 tons de cinza, obtida por microtomografia é segmentada, gerando uma imagem binária onde a calcita (região dos pixels brancos) distingue-se dos poros (fundo preto).

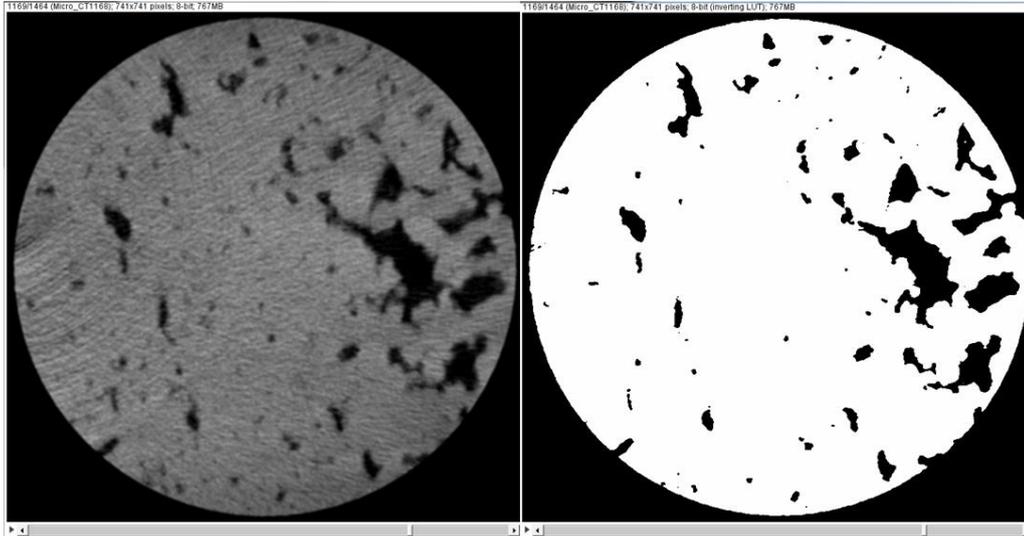


Figura 2.20 Segmentação.

### 2.2.2.1.1. Limiarização

Dentre as diversas técnicas de segmentação, a mais utilizada é a segmentação por faixa tonal, também chamada de *thresholding*. A limiarização usa o tom de cinza dos pixels para distingui-los, considerando como objetos, as regiões de pixels contíguos com tom de cinza dentro de uma faixa tonal delimitada a partir de um limiar ou tom de corte.

Limiarização bimodal: discrimina duas fases na imagem, o fundo e os objetos, já a limiarização multimodal: pode ser utilizada para distinguir a imagem em mais de duas fases.

A escolha do tom de corte é a etapa mais sensível da limiarização, esta escolha é feita a partir do histograma da imagem. Ela pode ser manual, o operador decide o tom de corte, ou automática.

Na prática, determinar o exato tom de cinza de uma fronteira não é uma tarefa simples, a escolha manual não é acurada e nem reprodutível, ela depende da experiência do operador. Os métodos automáticos realizam a operação buscando classes no histograma, sendo algumas vezes sensíveis aos ruídos.

### 2.2.2.1.2. Floodfill

O *Floodfill* é um algoritmo de crescimento de regiões que considera a similaridade ou conectividade da imagem dentro de um limiar. A função dessa segmentação é eliminar voxels não conectados da limiarização.

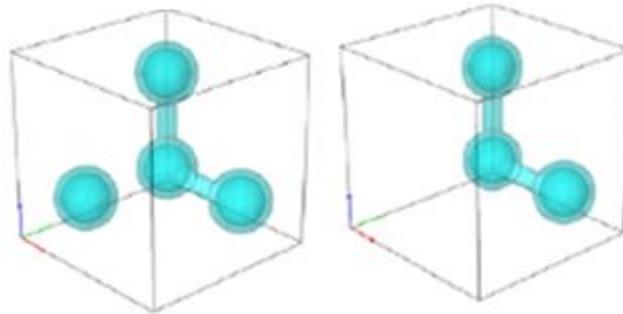


Figura 2.21 Floodfill.

### 2.2.3. Extração de Atributos

Extração de Atributos é a etapa da sequência padrão onde se inicia a análise da imagem. Nela são realizadas medidas sobre a imagem segmentada e/ou sobre a imagem em tons de cinza, extraindo-se atributos característicos.

Existem basicamente duas classes de medidas, as medidas de campo e as medidas de região.

As medidas de campo se referem ao campo como um todo, são elas: número de objetos, área total dos objetos, volume total dos objetos, fração dos objetos e etc. As medidas de região se referem a objetos independentes e podem ser muito sofisticadas, permitindo uma nova separação em classes de similaridade em função dos parâmetros medidos. Conforme sugere Russ (2002) podemos dividir esses parâmetros em quatro grupos (tamanho, forma, posição e intensidade).

A **contagem de objetos** em uma imagem é provavelmente a medida mais comum em análise de imagem. Apesar de ser uma tarefa simples, esta pode não ser uma medida muito fácil de ser feita manualmente, especialmente se o número de objetos for grande. No entanto, digitalmente, é uma das medidas mais fáceis de ser realizada. A partir da imagem segmentada, as regiões de pixels contíguos com a mesma tonalidade, que correspondem aos objetos, são contadas. Os analisadores de imagem geralmente oferecem duas opções de contiguidade,

também chamada conectividade, denotadas por quatro e oito. Conectividade oito significa que todos os oito pixels adjacentes (em aresta e canto) são considerados contíguos, já conectividade quatro leva em conta somente os quatro pixels adjacentes vertical e lateralmente (adjacentes por aresta), não considerando os quatro pixels diagonalmente adjacentes.

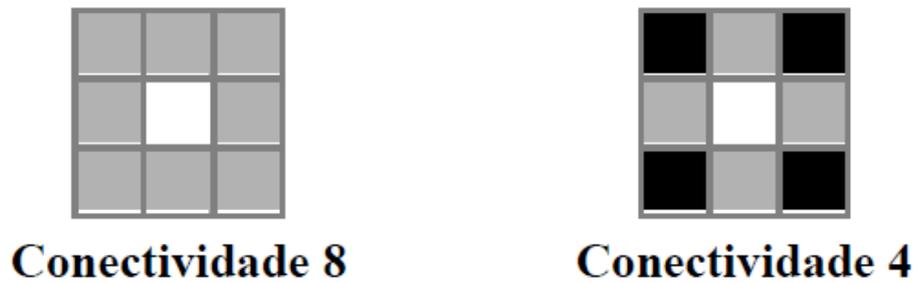


Figura 2.22 Conectividade (imagens 2D).

A **área** ocupada por objetos é uma medida fácil e rápida para o computador, ela é obtida pela simples contagem dos pixels brancos na imagem binária. Assim como o **volume** em uma imagem 3D pode ser obtido pela contagem de voxels brancos da imagem binária. Medidas como a porosidade são derivadas das medidas de volume.

Dentre as medidas de região então as medidas de área ou volume de um objeto, assim como o perímetro do mesmo. Outras medidas comuns são os aspectos, também chamados calibres, *Feret diameters*. Eles equivalem às projeções ou sombras do objeto em diferentes direções, e, assim, caracterizam suas dimensões externas. Os principais *ferets* são o *feret* mínimo.



Figura 2.23 Ferets a) Ferets mínimo b) Ferets máximo.

### 2.3. Métodos dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. Consiste, basicamente, na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos nos quais se define os espaços de funções de solução e teste para o ajuste do equacionamento diferencial da natureza do problema. Entre os elementos enforça-se somente a continuidade do espaço de funções solução. Mantendo as mesmas propriedades do meio original. O método é muito útil em problemas aplicados às áreas de mecânica estrutural, transferência de calor, escoamento de fluidos, eletromagnetismo, entre outras que pretendem analisar deslocamentos, cargas ou tensões. Maiores informações sobre os fundamentos da teoria e o método numérico podem ser encontrados em Bathe (1982).

A primeira etapa no processo de modelagem numérica de um fenômeno físico consiste na identificação dos fatores que influenciam de forma relevante o problema. Isto implica na escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o problema, resultando em um modelo matemático constituído por um conjunto de equações diferenciais. A segunda etapa do problema consiste em obter a solução do modelo matemático, tarefa esta atribuída aos métodos numéricos, como o MEF. Para evitar a solução das equações diferenciais, adota-se um modelo numérico aproximado dito modelo discreto, cujas equações são algébricas e as incógnitas são determinadas em um número finito de pontos.

O problema físico geralmente envolve a estrutura real ou componente dela sujeita a um carregamento. A idealização do problema físico por um modelo matemático requer algumas suposições, que conduzem às equações diferenciais governantes do modelo matemático. O MEF resolverá apenas o modelo matemático selecionado e todas as suposições feitas no modelo serão refletidas na solução. Logo, é importante a escolha do modelo matemático apropriado. Após a resolução do problema matemático e avaliações dos resultados, deve-se definir sobre a aceitação ou refinamento do modelo utilizado em função da solução do

problema físico. Caso necessário, devem-se refinar os parâmetros da solução até que a precisão da solução seja alcançada.

Adicionalmente, o problema físico pode ser alterado e isto acarretará em modelos matemáticos e soluções em elementos finitos adicionais. A figura 2.24 resume o processo da análise de elementos finitos.

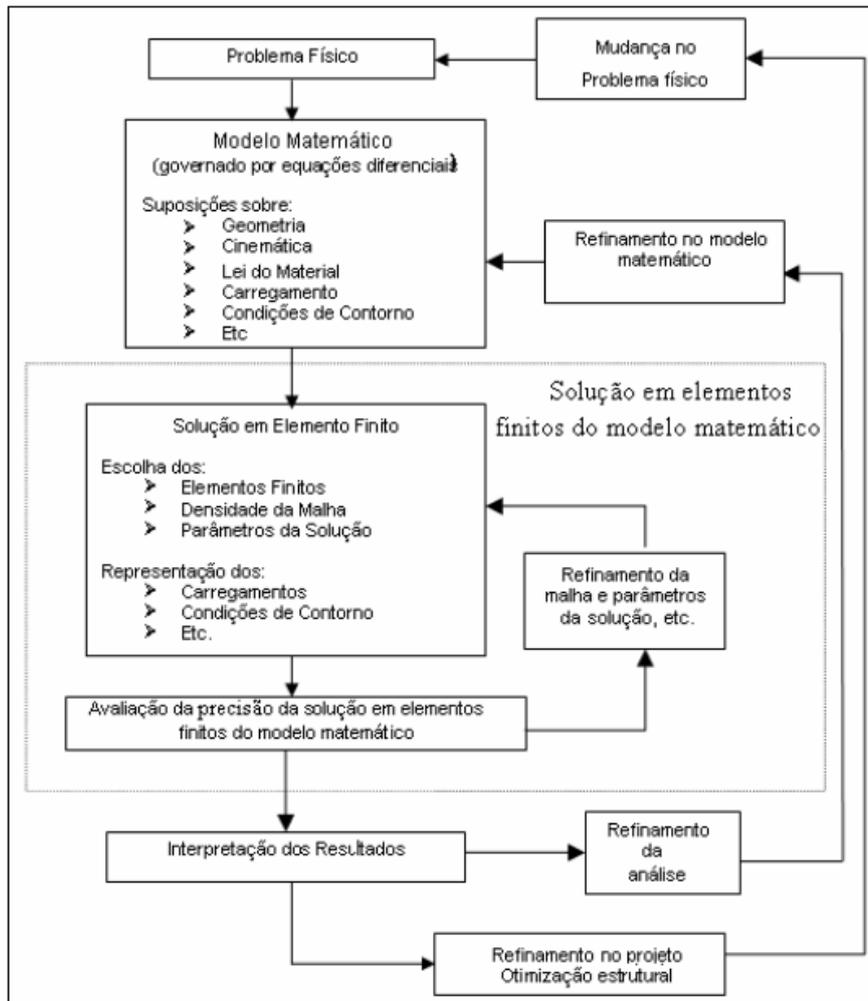


Figura 2.24 Contexto de um problema de MEF adaptado de Bathe, 1982.

Na solução de problemas pelo MEF algumas suposições são feitas, genericamente:

- O meio contínuo é subdividido em pequenos elementos interconectados (elementos finitos);
- Cada elemento tem uma função de aproximação de deslocamentos a ele associada;

- Cada elemento é conectado aos demais através de interfaces, que podem ser nós, linhas e/ou superfícies;
- É conhecida a relação deslocamento x deformação (equações de compatibilidade);
- É conhecida a relação tensão x deformação (modelos constitutivos).

As suposições gerais do método, acima resumidas, permitem definir algumas etapas de análise:

- Discretização do meio contínuo;
- Formulação das propriedades de cada elemento;
- Montagem dos elementos para se obter o modelo discretizado do contínuo;
- Imposição das condições de contorno do problema;
- Solução do sistema de equações algébricas resultante, para cálculo dos graus de liberdade desconhecidos;
- Cálculo das quantidades secundárias.

### **2.3.1. Geração de malhas tridimensionais**

As condições de convergência e exatidão das soluções do MEF dependem não só da formulação dos elementos, mas também da malha gerada para analisar um determinado problema. Ou seja, é preciso que a discretização feita para o domínio do problema em questão também seja adequada, ou o método pode não convergir e a simulação não fornecer o resultado correto.

A geração de malhas de elementos finitos consiste em dividir um determinado domínio de interesse em subdomínios. Domínios tridimensionais podem ser divididos em tetraedros, pentaedros (cunha e pirâmide de base quadrada) ou hexaedros. Essa divisão é feita com a aplicação de um método de geração de malhas. Diversos algoritmos de geração foram desenvolvidos, e ainda são desenvolvidos, para atender a diversas finalidades.

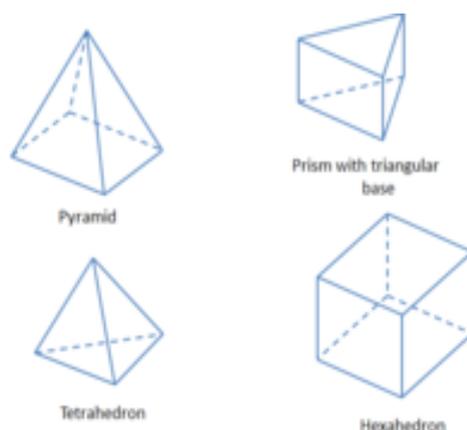


Figura 2.25 Tetraedros e hexaedros.

A maioria dos métodos de geração de malhas foram desenvolvidos para problemas de engenharia modelados no sistema CAD, e são baseados em pontos, curvas e superfícies. O avanço em hardware, especialmente memórias mais baratas e maiores, trouxe a atenção para a técnica dos chamados gráficos de volume, onde a menor unidade é o voxel, que são obtidos de medições de imagens em tomografia, ressonância magnética e sísmica.

Em malha de volume, os elementos 3D gerados costumam preencher todo o interior do volume. A qualidade dessa malha é medida justamente pelo total preenchimento, sem sobreposição de elementos e sem deixar buracos (holes) na região interna, bem como pela distribuição homogênea dos elementos, isto quer dizer que os elementos devem ser poliedros convexos o mais regular possível, como por exemplo, tetraedros regulares, hexaedros regulares, e assim por diante, dependendo do tipo de malha, e terem dimensões mais próximas quanto possíveis uns dos outros.

Segundo Young (2008), os métodos de geração de malhas baseados em grade são um significativo avanço porque esses processos podem ser mais robustos e bastante simplificados. Os métodos baseados em grade são abordados por uma aproximação por voxel e por uma adaptação do *marching cubes*.

A representação de objetos geométricos baseados em voxels tem como principal vantagem à capacidade de representar geometrias complexas, principalmente no interior do objeto. A aproximação voxel foi proposta por Keyak et al (1990) consiste em exportar os voxels diretamente como hexaedros.

A adaptação do *marching cubes* adapta a geração de malhas tetraédricas completa do volume de hexaedros através de tabelas pré-calculadas ao invés de determinar triangulações de superfície. Essa técnica supera o problema de superfícies de redes escalonadas da aproximação voxel, porém herda algumas desvantagens do *marching cubes*.

### 2.3.2. Análise de elementos finitos

No modelo discretizado obtém-se um sistema de equações para cada elemento. Estas equações relacionam os deslocamentos e forças (em problemas de tensão) nodais através da matriz de rigidez do elemento. A equação 2.3 mostra esta relação.

$$\mathbb{[K]}_e \{\delta_e\} = \{F_e\} \quad (2.3)$$

Onde:  $\mathbb{[K]}_e$  é a matriz de rigidez do elemento;

$\{\delta_e\}$  é o vetor de deslocamentos nodais do elemento;

$\{F_e\}$  é o vetor carregamento do elemento.

A matriz de rigidez é composta pelos coeficientes das equações de equilíbrio determinados a partir da geometria, propriedade e leis constitutivas adotadas em cada elemento.

Escrevendo a equação de equilíbrio de cada elemento, de modo que a matriz de rigidez dos elementos fique associada a todos os graus de liberdade do problema, obtém-se a matriz de rigidez global. A equação 2.4 mostra a relação global.

$$\mathbb{[K]}_g \{\delta_g\} = \{F_g\} \quad (2.4)$$

Onde:  $\mathbb{[K]}_g$  é a matriz de rigidez do problema;

$\{\delta_g\}$  é o vetor de deslocamentos nodais do problema;

$\{F_g\}$  é o vetor carregamento do problema.

O sistema de equações é resolvido para cálculo dos graus de liberdade desconhecidos (por exemplo, deslocamentos). A partir dos campos de deslocamentos obtêm-se as deformações em cada elemento, que juntamente com as deformações iniciais e as leis constitutivas dos materiais definem os estados de tensões.

As relações para cálculo das quantidades secundárias (tensões e deformações) são mostradas nas equações 2.5, 2.6, 2.7.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\} \quad (2.5)$$

$$\{\varepsilon\} = [C]\{\sigma\} \quad (2.6)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.7)$$

Onde:  $\{\varepsilon\}$  é o vetor de deformações;

$\{\delta\}$  é o vetor de deslocamentos;

$[B]$  é a matriz deformação-deslocamento;

$\{\sigma\}$  é o vetor de tensões;

$[C] = [D]^{-1}$  é a matriz tensão-deformação (matriz constitutiva).

## 2.4. Modelo Elástico

Pela definição, em um material elástico, vigora o princípio da conservação de energia. Tensões e deformações são biunivocamente interrelacionados e o estado final de tensões ou deformações independe da trajetória de carregamento.

A relação entre componentes de tensão e deformação é dada pelas propriedades dos materiais em consideração. As equações que definem esta relação, entre tensão e deformação, são chamadas de equações constitutivas. No caso da elasticidade linear em três dimensões, a lei constitutiva é denominada de Lei de Hooke generalizada.

Quando o material é isotrópico as propriedades relativas ao seu comportamento são iguais em todas as direções para um mesmo ponto. Materiais elásticos e isotrópicos são representados por duas constantes elásticas

independentes: módulo de elasticidade ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Para um material elástico e isotrópico, as relações tensões-deformações se escrevem da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] & \frac{1}{2G}\tau_{xy} & \frac{1}{2G}\tau_{xz} \\ \frac{1}{2G}\tau_{yx} & \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] & \frac{1}{2G}\tau_{yz} \\ \frac{1}{2G}\tau_{zx} & \frac{1}{2G}\tau_{zy} & \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Onde:  $G$  é o módulo cisalhante ou módulo de elasticidade transversal e é definido pela equação 2.9.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.9)$$

A análise de projetos em rochas seria bastante simplificada caso essas matérias fossem realmente homogêneas, contínuas, elásticas, lineares e isotrópicas. Porém, o comportamento das rochas se afasta deste modelo ideal devido à própria natureza e gênese.

As rochas raramente são contínuas. A presença de poros e microfissuras (microestruturas) separam grãos e cristais e são responsáveis pelo comportamento não linear a baixas tensões e pela reduzida resistência a tração das rochas. A presença de macroestruturas (*vuggys*) confere caráter descontínuo a massa rochosa. Um único poro grande é capaz de reduzir a resistência ao cisalhamento.

## 2.5. Ensaio de compressão simples ou uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial, em função da sua facilidade de execução, simplicidade do equipamento e classificação imediata da rocha, é o ensaio mais utilizado para a determinação da resistência e deformabilidade das rochas. A maioria das classificações de material rochoso intacto é baseada na resistência à compressão uniaxial.

Os mecanismos de propagação de fratura e ruptura das rochas, determinados experimentalmente por este ensaio, dependem tanto das propriedades do material

quanto dos fatores experimentais envolvidos no ensaio, representados principalmente por (NUNES, 1989):

- Tamanho e forma da amostra;
- Teor de umidade da amostra;
- Distribuição uniforme ou não do carregamento;
- Temperatura e umidade ambientes;
- Condições de extremidades das amostras;
- Atrito nos contatos amostra/pratos distribuidores do carregamento;
- Rigidez da máquina de ensaio.

Com o objetivo de se minimizar, controlar ou padronizar os efeitos destes fatores, existem procedimentos padrões para a preparação das amostras e ensaios recomendados pela ISRM (1981).

### **2.5.1. Preparação dos corpos de prova**

Os corpos de prova dos ensaios mecânicos de compressão uniaxial, triaxial e fluência apresentam geralmente a forma cilíndrica, com uma relação altura/diâmetro que varia entre 2 e 3, conforme as especificações sugeridas pela ISRM (1981) e NUNES (1989).

Cuidados especiais devem ser tomados na preparação da superfície dos corpos de prova. As extremidades devem ser polidas, uma vez que a rugosidade superficial pode gerar concentrações de tensões e induzir pequenas fraturas por tração, na região da amostra em contato com os pratos de aço distribuidores do carregamento. As extremidades devem ser paralelas entre si e perpendiculares ao eixo do cilindro da amostra, a fim de garantir a uniformidade de distribuição do carregamento axial.

A limpeza completa dos corpos de prova (entenda-se remoção dos fluidos e sais do espaço poroso) pode durar meses, fato que, em muitos casos, inviabiliza este procedimento, quando o objetivo final são ensaios mecânicos. Frequentemente, necessita-se das propriedades mecânicas rapidamente, a fim de apoiar decisões para os problemas apresentados.

### 2.5.2. Ensaio

O ensaio uniaxial é de execução simples, consistindo na aplicação de uma carga axial em corpos de prova de relação altura/diâmetro entre 2 e 3. Considerando um corpo de prova submetido à ação de compressão normal  $\sigma_z$  uniformemente distribuída sobre uma das faces da amostra, como se pode observar na figura 2.27 deformações axiais e radiais (laterais ou circunferenciais) acontecem.

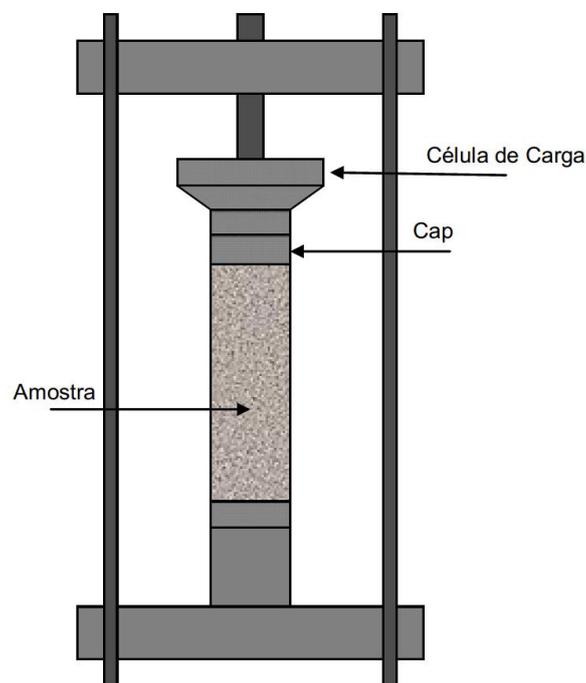


Figura 2.26 Ensaio uniaxial.

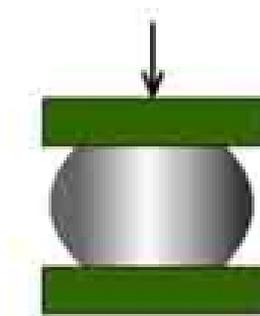


Figura 2.27 Corpo de prova no ensaio.

Assim a deformação axial  $\varepsilon_{ax}$  pode ser descrita como a relação entre a variação do comprimento ( $\Delta L$ ), longitude inicial e final e a longitude inicial ( $L$ ), assim:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.10)$$

E a deformação lateral ou radial,  $\varepsilon_r$ , como:

$$\varepsilon_r = \frac{\frac{\Delta D}{2} + \frac{\Delta D}{2}}{D} \quad (2.11)$$

A deformação induzida sobre o corpo pode ser elástica ou plástica. Na deformação elástica o corpo recupera a forma e volume inicial uma vez a tensão aplicada cessa, por outro lado, na deformação plástica o corpo sofre deformações permanentes. As deformações dependem significativamente tanto da temperatura, da velocidade ou taxa de deformação como da estrutura do material. Assim, por exemplo, a temperatura constante, os materiais geralmente se comportam como elásticos quando pequenas tensões são aplicadas. Tornam-se plásticos quando essas tensões superam certo limite, nomeado limite de proporcionalidade. A partir desse limite, fenômenos internos irreversíveis iniciam tais como propagação de fissuras, ocorrência maior de compressão de grãos e dos poros, entre outros.

Durante o início do carregamento, onde o corpo de prova esteja no regime elástico, pode-se admitir que exista uma proporcionalidade, entre as tensões e as deformações, considera-se o material em regime elástico linear. Este comportamento constitui a lei de Hooke.

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga e tem limites matemáticos entre -1 e 0.5, muito embora fisicamente se observe apenas variações entre 0 e 0.5.

Os dados obtidos em ensaios de compressão ou tração são plotados em diagramas tensão ( $\sigma$ ) – deformação ( $\varepsilon$ ) como pode ser observado na figura 2.28.

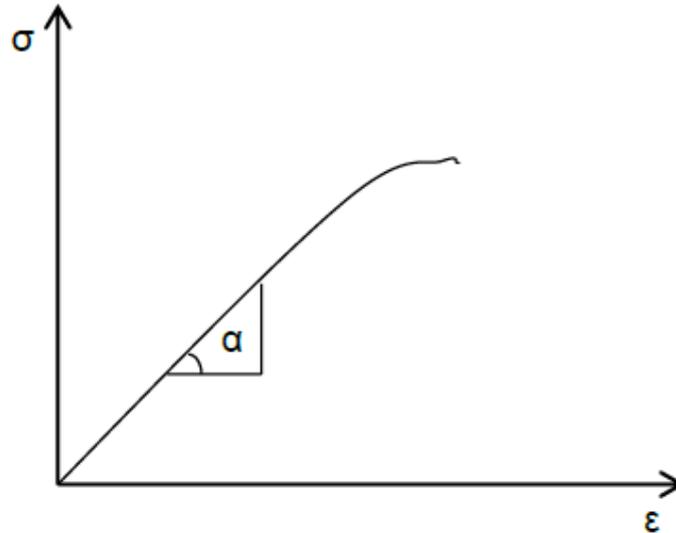


Figura 2.28 Diagrama tensão ( $\sigma$ ) – deformação ( $\epsilon$ ).

No trecho linear no qual o material se comporta segundo a lei de Hooke é possível definir o módulo de elasticidade ( $E$ ). O módulo de Young corresponde ao coeficiente angular da parte linear do diagrama tensão-deformação obtido, no ensaio. Assim:

$$\sigma_x = E * \epsilon_x \quad (2.12)$$

e

$$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} \quad (2.13)$$

## 2.6. Efeito de escala

Segundo Hoek & Brown (1980) a resistência da rocha é afetada pelo do tamanho da amostra ensaiada. As rochas são compostas de várias feições, tais como cristais, grãos, microfaturas e fissuras que condicionam o comportamento mecânico. Amostras de tamanho reduzido podem não ser representativas do maciço rochoso por não representar correta e completamente todos estes elementos. Desta forma, há uma tendência geral de aumento da resistência com a diminuição do tamanho da amostra de rocha, uma vez que, fissuras e outros planos de fraquezas podem não estar presentes na amostra.

A figura 2.29 apresenta o decréscimo de resistência à compressão uniaxial de vários tipos de tocha. Os resultados correspondem aos dados de ensaios normalizados através da divisão de resistência individual de cada amostra pela resistência individual de cada amostra de diâmetro igual a 50 mm (diâmetro usual para ensaio de laboratório).

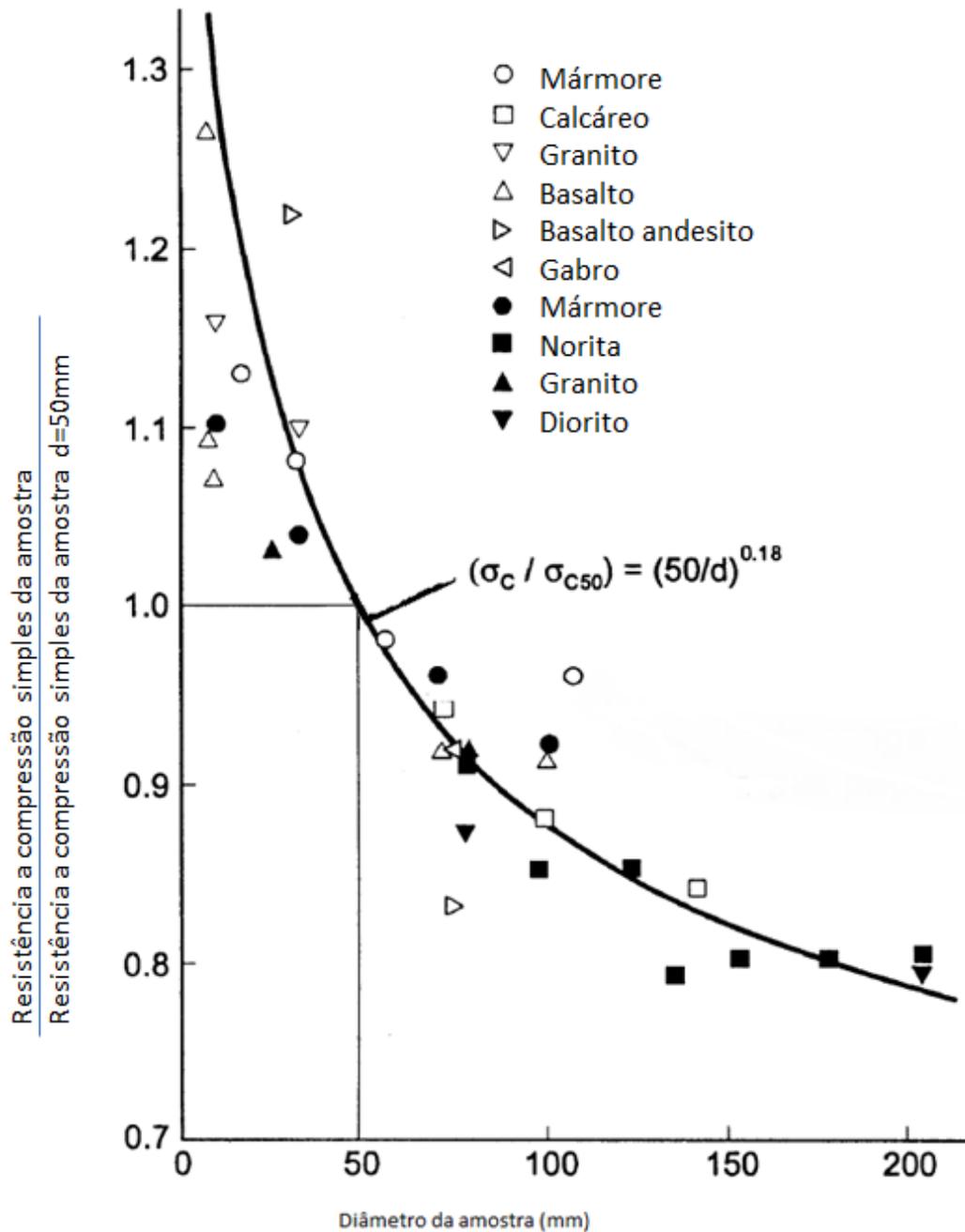


Figura 2.29 Efeito escala Adaptado de Hoek & Brown (1980).