

## **2**

### **Revisão Bibliográfica**

#### **2.1.**

##### **Importância das rochas carbonáticas**

O 60% do petróleo remanescente do mundo está armazenado neste tipo de rocha (Ahr. et al, 2005 e Schlumberger, 2008).

Os reservatórios carbonáticos são descritos por Ahr, (2008) como rochas porosas e permeáveis que contém hidrocarbonetos. Estes reservatórios apresentam características petrofísicas e geológicas complexas e heterogêneas. Muitas vezes, são naturalmente fraturados e exibem complexos sistemas de poros e características de molhabilidade, que influenciam drasticamente suas propriedades de fluxo multifásico.

Segundo o descrito na revista digital Unicamp Inovação, (2009), os principais desafios para a exploração e produção do Pré-sal são tanto a profundidade de perfuração como o tipo de rocha reservatório, carbonatos. Essas rochas são extremamente heterogêneas, com canais e poros pequenos onde o maior volume de óleo fica armazenado. Ao redor, a rocha é muito consolidada apresentando dificuldade para perfurar. A taxa de perfuração é baixa resultando em elevado custo de construção de poços.

Com o intuito de melhorar as taxas de perfuração, surge à necessidade de obter interpretações petrofísicas confiáveis para predição de propriedades elásticas, mecânicas, de transporte e produtividade dos carbonatos, o que exige grandes esforços em pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

#### **2.2.**

##### **Definição de rochas carbonáticas**

Segundo Ahr, (2008) carbonatos são complexos aniônicos de  $(CO_3)^{2-}$  e cátions metálicos bivalentes, tais como Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Ba, Sr e Cu, juntamente com alguns outros menos comuns. A ligação entre o cátion metálico e o cátion e o grupo carbonato não é tão forte como as ligações internas na estrutura  $CO_3$ , que por sua vez, não são tão fortes como a ligação covalente em dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

Podem considerar-se como rochas carbonáticas as rochas sedimentares formadas principalmente de minerais carbonáticos. Em função de sua origem são divididas em dois grandes grupos: rochas carbonáticas detríticas e rochas carbonáticas orgânicas. Sendo as orgânicas subdivididas em alquímicas e ortoquímicas.

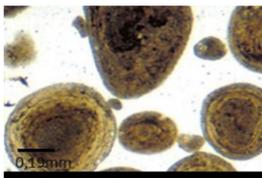
### 2.2.1. Rochas carbonáticas detríticas

Constituídas por fragmentos procedentes da erosão de rochas carbonáticas pré-existentes. Uma das principais características são seus grãos de natureza carbonática.

Estas rochas são compostas por arcabouço de cimento e matriz. O arcabouço pode ser formado por grãos aloquímicos e por componentes de origem não carbonático além dos diferentes tipos de material nos poros de uma rocha: espaço vazio pode ser preservado com o fluido saturante original ou ocupado pelos fluidos (água, óleo e gás); pode ser preenchido por matriz que é um sedimento mais fino que o material do arcabouço (matriz argilosa, lamosa ou síltica); ou pode ser reduzido ou obliterado por minerais quimicamente precipitados da água (agente cimentante).

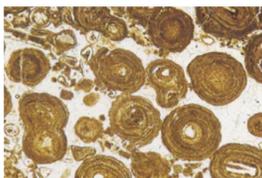
Os principais grãos aloquímicos constituintes das rochas carbonáticas são: Oólitos, oncólitos, oóides, micrita, espato, intraclastos, extraclastos, bioclastos, pellets, e peloides, ver na Figura 2-1.

Os componentes não carbonáticos são constituídos de calcedônia (em forma de esferulito), quartzo e feldspato (cristais euédricos), glauconita (grânulos) e pirita (grãos e esferulitos). Segundo Suguio, (1980) *apud* Pilotto, (2011).



#### **Oólitos:**

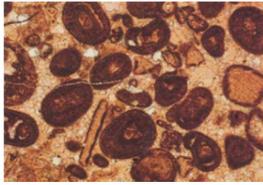
Partículas esféricas ou ovais de estrutura concêntrica principalmente de carbonato de cálcio, (<2 mm). Forma-se em águas ricas em carbonato de cálcio, por precipitação inorgânica em águas marinhas tropicais.



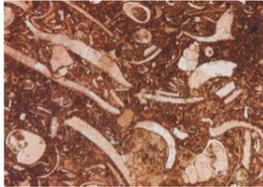
#### **Oncólitos:**

Partículas formadas por lâminas micríticas concêntricas geradas por algas azuis que formam crostas descontínuas em águas agitadas e calmas.

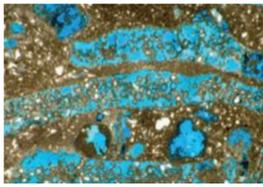
Tamanho variável até centímetros e com seleção pobre.

**Espato:**

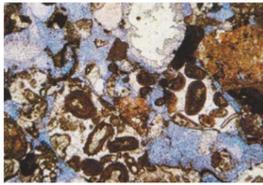
Cimento carbonático precipitado quimicamente.  
Agregado de cristais de carbonato (>4micras), precipitado nos espaços entre grãos de um sedimento carbonático ou nos espaços internos dessas partículas.

**Micrita:**

Equivale a matriz e é formado por calcita microcristalina (<4 micras).  
Normalmente de cor parda.  
Material de origem primário na formação da rocha.

**Bioclastos:**

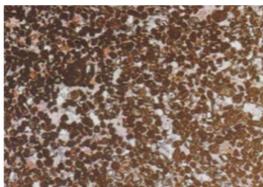
Esqueletos e pedaços de esqueletos de organismos de carapaça calcária.

**Extraclastos:**

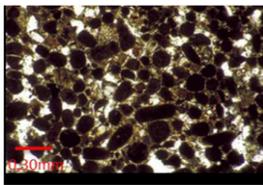
Fragmentos arredondados ou angulosos procedentes da erosão das rochas carbonáticas e fora da bacia.  
Estrutura interna sofreu processos diagenéticos.  
Evidência de cimentação bem desenvolvida e bordas.

**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 2-1. Principais grãos aloquímicos das rochas carbonáticas. (Adaptado de: Pilotto, 2011; Alonso, et al., 2011).

## 2.2.2. Rochas carbonáticas orgânicas

Constituídas por componentes carbonáticos originados por processos químicos ou bioquímicos nos ambientes de sedimentação, tais como continental ou marinho. Originam-se em depósitos “in situ”, mas sofreram pouco ou nenhum transporte dentro desse mesmo depósito.

Um dos processos que intervêm na formação das rochas carbonáticas orgânicas é a biomineralização dada por grupos como as algas calcárias planctônicas, moluscos, foraminíferos, corais, esponjas, etc.

Exemplos das rochas carbonáticas orgânicas são os travertinos formados por processos de deposição conduzidos por precipitação química e bioquímica direta de carbonatos em ambientes de água doce e as coquinas de origem principalmente bioquímica, ver Figura 2-2.



Figura 2-2. Rochas carbonáticas orgânicas. (Adaptado de: Pilotto, 2011; MyFlorida.com, 2010; Wikimedia, 2012; Sandatlas.org, 2012).

Os travertinos, segundo Eming (1917), (Viles e Goudie, 1990), o ‘travertino é derivado do Italiano travertine, uma alteração do latim tiburtin, lapis tiburtinus, a rocha de Tibur’, ‘Tibur, agora conhecido como Tivoli, é o lugar de depósitos extensos de carbonato de cálcio associado com fontes termais os quais têm sido nomeados travertinos’. De acordo com Chaffetz e Folk (1984) apud Eming (1917), “travertino é uma forma do “carbonato” de água doce depositado por processos inorgânicos e orgânicos de fontes de águas”. Julia (1983) define o travertino mais amplamente, dizendo que: Os travertinos são acumulações de cálcio em fontes (cársticas, hidrotermal), pequenos rios e pântanos, formados

principalmente por incrustação (precipitação de cimento e/ou precipitação bioquímica) (Eming, 1917).

Pentecost, (2005), define o travertino como um calcário precipitado quimicamente formado em torno a infiltrações, nascentes e ao longo de córregos e rios, e ocasionalmente em lagos, constituído de calcita ou aragonita, de baixa a moderada porosidade intercrystalina e muitas vezes alta porosidade de tipo moldica ou porosidade estrutural, dentro de ambiente vadoso ou, ocasionalmente freático raso. A precipitação resulta principalmente por meio de transferência (evasão ou invasão) de dióxido de carbono ou a uma fonte de águas subterrâneas que conduz a supersaturação de carbonato de cálcio, com nucleação e crescimento de cristal que ocorre sobre uma superfície submersa. Esta definição pretende acentuar processo de compostos inorgânicos, nomeadamente reações envolvendo anidridos de carbono e uma solução de bicarbonato de cálcio que leva à precipitação de carbonato de cálcio num ambiente não marinho.

A deposição de travertino frequentemente ocorre em encostas íngremes e camadas dentro do depósito. Os travertinos formados *in situ* são raramente camadas horizontais. Laminações em escala de centímetro para milímetro são comuns e muitas vezes como resultado de ritmos de crescimento diários.

As características principais do travertino são a falta da camada horizontal e a formação através da precipitação química. Originam-se, com ajuda da atividade microbiana e bacteriana, briófitas e palhetas que ajudam a precipitação do carbonato de cálcio.

Os travertinos são classificados de acordo com uma série de critérios. Pentecost, et al., (1994), identificam quatro características importantes: processo de precipitação, geoquímica de dióxido de carbono, sua estrutura e sua morfologia. Sendo os processos de precipitação química responsáveis por quase toda a formação de travertinos em terra.

### **2.3.**

#### **Processos de formação: Sedimentação e diagênese**

Segundo (Ahr, 2008) em rochas carbonáticas, porosidade e permeabilidade podem ser formadas por diversos processos. As rochas carbonáticas caracterizam-se por apresentar estruturas e distribuição espacial complexa, uma grande variedade de tipos de poros e alta heterogeneidade. Isto em função da rápida instabilidade de seus componentes com o soterramento, do

tipo de organismos presentes, dos processos de sedimentação e diagênese sofridos por elas.

Os processos de sedimentação são controlados por fatores físico-químicos e ambientes geotectônicos. Os carbonatos podem formar-se em diferentes tipos de ambientes sedimentares tais como marinhos e continentais.

Após a sedimentação os grãos 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 a água que satura os poros intersticiais, reagem procurando um equilíbrio geoquímico e textural com o ambiente. Isto gera mudanças mineralógicas, geoquímicas, texturais e estruturais. Assim, os mecanismos de diagênese podem ser mecânicos, biológicos, químicos ou a combinação desses mecanismos (Ahr, 2008).

A diagênese pode ocorrer a condições de temperaturas relativamente baixas dependendo da reatividade do material, baixas pressões e um ambiente que evolui com uma grande abundância de soluções aquosas com salinidades que variam desde água da chuva até salmouras muito concentradas. A Figura 2-3, apresenta o campo de ação da diagênese em função dos parâmetros anteriormente descritos e da profundidade.

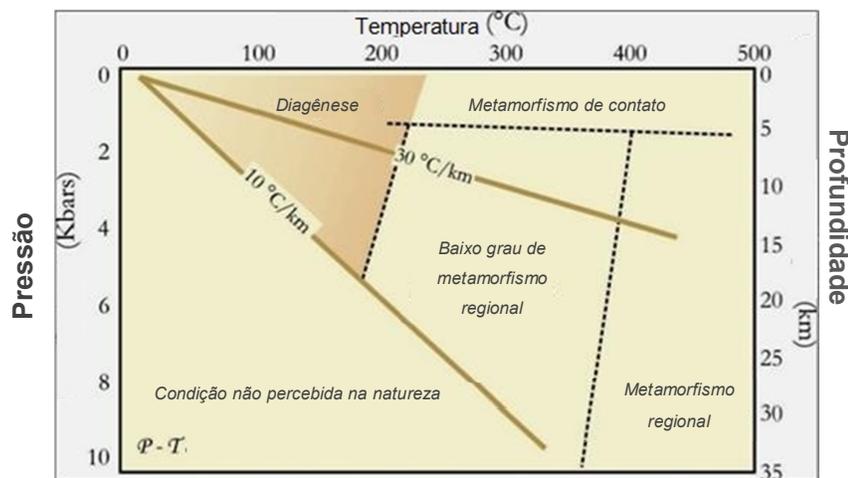


Figura 2-3. Diagrama de pressão-temperatura e regimes de diagênese. (Adaptado de: Worden, et al., 2003).

Segundo Akbar, et al., (1995), a diagênese no carbonato pode modificar significativamente a permeabilidade e o espaço entre os poros.

Processos como a compactação, cimentação, dissolução, recristalização e dolomitização são os principais processos diagenéticos sofridos pelas rochas.

**a) Compactação**

O processo abrange a reorganização das partículas pelo aumento de pressão de carga, gerando uma redução da porosidade pela variação de volume (Universidad de Chile, 2005).

A compactação pode ser de dois tipos, mecânica e química. A compactação mecânica começa ao final da sedimentação. Nesta compactação inicial os bioclastos alargados ou detritos carbonáticos tendem a orientar-se paralelamente a estratificação e pode posteriormente produzir-se fraturas e deformação dos grãos e dos cimentos mais fracos. A compactação química é 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.

**b) Cimentação**

Processo de crescimento de cristais em espaços intraparticulares ou intraparticulares pré-existentes pela precipitação de soluções saturadas. No caso das rochas carbonáticas, as fases de cimento mais frequente são as calcitas, as aragonitas e alguns dolomitos. Este processo causa litificação dos sedimentos carbonáticos e seu resultado depende principalmente do ambiente de diagêneses e do ambiente de cimentação (Universidad de Chile, 2005).

**c) Dissolução**

Processo de interação da composição da água dos poros e a mineralogia de partículas. Este processo é responsável pela porosidade secundária dos carbonatos (vugular, caverna, etc.), conforme (Alonso, Martín e Martín, 2010). Os grãos podem ser dissolvidos para formar um espaço de poros novo e a dissolução ao longo de fraturas e planos de estratificação pode produzir grandes cavidades (Akbar, et al., 1995).

A pressão hidrostática influencia os processos de dissolução dos carbonatos. Um aumento de pressão hidrostática favorece a dissolução dos sedimentos. A partir dos 100 m até os 4000 m de soterramento se gera um ligeiro aumento da dissolução. Abaixo dos 4000 m a dissolução de carbonatos é incrementada até um ponto de inflexão (Pinto, 2009).

**d) Recristalização**

Folk, (1965) define a recristalização como um processo que compreende transformações de minerais e texturas dando como resultado cristais novos de morfologia e tamanhos diferentes. Ahr, (2008) explica a recristalização como o processo pelo qual a morfologia do cristal é alterada sem grandes alterações na composição mineral e, segundo Zimbres, (2012), a recristalização é um dos

principais fenômenos do metamorfismo e pode ser dividida em três tipos: (i) modificação da forma e/ou do tamanho de um mineral, que passa por um rearranjo mantendo a mesma estrutura cristalina; (ii) rearranjo da estrutura cristalina do mineral originando outra espécie mineral polimorfa, que acontece na transformação de aragonita em calcita no metamorfismo inicial dos calcários, e da transformação do quartzo para polimorfos de alta pressão no metamorfismo de impacto; e (iii) a reação entre os minerais ou entre estes e a fase fluida, para darem origem a espécies minerais novas e adaptadas ao novo ambiente termodinâmico, às novas condições de P-T. Nos três tipos de recristalização, os minerais também sofrem modificação em seu arranjo, originando textura orientada.

#### **e) Dolomitização**

A diagênese de carbonatos geralmente envolve substituir a calcita original e aragonita por dolomita mineral. Este processo é chamado dolomitização, que podem melhorar as características produtoras de petróleo como afirma (Akbar, et al., 1995).

O Zimbres, (2012), define a dolomitização como um processo geoquímico em que íons magnésio substituem íons cálcios ( $\text{Ca}^{2+}$ ) de calcitas, originando dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). A responsável pelo processo de dolomitização é a circulação de águas carregadas de sais magnesianas, ou mesmo até a água do mar. 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. Ela se torna cavernosa o suficiente para perder os traços de estratificação primitiva e, em certos casos, os fósseis.

A dolomitização pode ocorrer tanto em ambiente de sedimentação raso em condições de clima árido como devido à diagênese em ambiente de alta profundidade de soterramento.

## **2.4. Reservatórios carbonáticos**

Reservatórios são geralmente definidos como recipientes de armazenamento. Para um geocientista de petróleo, reservatórios são corpos de rochas porosas e permeáveis que contêm jazidas comerciais de hidrocarbonetos. Reservatórios devem sua porosidade e permeabilidade a

processos de deposição, diagênese, ou fratura individualmente ou em combinação. Reservatórios são corpos tridimensionais compostos de matriz e redes de poros interconectados. Se a geometria tridimensional (tamanho e forma) de um sistema de poros ligados é conhecida, é possível (i) determinar locais de perfuração de exploração ou perspectivas de desenvolvimento, (ii) estimar o volume de recurso no reservatório ou aquífero, (iii) atingir os recursos, (iv) determinar a praticabilidade de perfuração de poços adicionais para atingir o espaçamento ótimo entre poços de campo durante o desenvolvimento, e (v) prever o caminho que será tomado por fluidos injetados uma vez que “varrem” hidrocarbonetos restantes durante a recuperação secundária e melhorada. Em sentido amplo, os estudos de reservatórios incluem geologia do reservatório, caracterização de reservatórios, e engenharia de reservatórios (Ahr, 2008).

Carbonatos detêm cerca de metade do petróleo e gás do mundo, grande parte de sua água subterrânea e extensos depósitos de minérios metálicos (Ahr, 2008). No entanto, é escassa a literatura sobre informação geológica de reservatórios carbonáticos. As principais razões para estudar reservatórios e aquíferos de carbonáticos são para aprender mais sobre: como encontrar, extrair e gerenciar o petróleo, gás, água utilizável, ou outros recursos que eles contêm.

A maioria dos dados utilizados para o estudo deles vem de núcleos sobre perfuração, cascalhos de perfuração, registros de poço, dados de produção, e as medições de geofísica. Os estudos modernos do reservatório são mais que descrições geológicas de rochas reservatório, que incluem a investigação detalhada sobre a origem e distribuição espacial da porosidade efetiva, como é interconectado através gargantas dos poros, e como rochas e propriedades hidromecânicas e poro- elásticas influenciam armazenagem e transmissão de fluidos. Prospectar, descobrir e desenvolver reservatório de carbonato requerem análise crítica e interpretação de dados geológicos essenciais (Ahr, 2008).

Segundo Akbar, et al., (1995), reservatórios carbonáticos apresentam um quadro de extremos. Os depósitos podem ser colossais, mas os poros podem ser microscópicos. A permeabilidade da matriz pode ser extremamente baixa, ao passo que o fluxo de fluidos é como rios através das fraturas. As técnicas de avaliação que são bem sucedidas em reservatórios areníticos às vezes falham em reservatórios carbonáticos.

Porosidade intergranular também está presente nos carbonatos. Porosidade intragranular pode ser comum em grãos como o tipo de poro principal de carbonato, ou pode desenvolver-se quando os grãos, tais como fragmentos de conchas são parcialmente dissolvidos. Porosidade moldica

"moldic porosity" retém a forma dos fragmentos de conchas ou outros componentes dissolvidos. Tipicamente, os carbonatos tem uma maior variedade de formas de grãos e poros que os siliciclásticos. É evidente que, num reservatório de carbonato podem coexistir vários tipos de porosidade, desde o nível microscópico até o tamanho de uma cavidade, o que faz com que a estimativa de porosidade e permeabilidade, e as reservas sejam extremamente difíceis de calcular. Outra característica dos carbonatos é a sua susceptibilidade à dissolução (Akbar, et al., 1995).

#### **2.4.1. Formação de reservatórios carbonáticos**

O surgimento de novos reservatórios abaixo das camadas de rochas salinas a profundidades que variam entre 4 e 7 quilômetros abaixo da superfície da água do mar, denominados reservatórios de Pré-sal, se deu como todas as bacias da costa leste brasileira.

Segundo Christante, (2009) por volta de 130 milhões de anos atrás, quando o Atlântico Sul ainda não existia, América do Sul e a África eram um só continente, mega-contidente denominado pelos geólogos como Gondwana, junto com a Antártida, a Austrália e a Índia. Grandes transformações na terra ocorreram quando as placas tectônicas do continente entraram em movimento, fraturando o supercontinente, gerando gradualmente a separação das placas de Sul América e a África.

Segundo Bacoccoli, (2008), 120 milhões de anos de movimentos acompanhados por intensos vulcanismos, na chamada fase de "*riftle*", deram lugar à criação de cadeias montanhosas e grandes lagos. Lagos nos quais fitoplânctons encontraram condições ideais para viver e reproduziam-se de forma extraordinária, para gerar uma enorme acumulação de matéria orgânica morta, misturada a argila, no fundo dos lagos (Christante, 2009).

Acompanhando o ritmo do contínuo afastamento das placas, os lagos tornara-se mais profundos e maiores. Em algum momento desse afastamento, águas oceânicas invadiram a região dando condições favoráveis à aparição de cianobactérias que residiram no local. Como resultado de seu metabolismo, carbonatos de cálcio e magnésio excretados em grandes quantidades foram precipitados formando as rochas carbonáticas microbianas.

Pela pouca circulação de água, devido provavelmente ao clima árido nesse momento, uma grande quantidade de sal se depositou sobre essas rochas

carbonáticas por processos de evaporação, formando-se dessa forma uma espessa camada de sal, que atua como uma camada de rocha selante.

De acordo com Christante, (2009), paralelamente ao processo de formação completa do Atlântico Sul, ocorreria deposição de sedimentos acima da camada de sal. As rochas carbonáticas ficaram expostas a modificações diagenéticas e em condições perfeitas para formação de reservatórios de petróleo, conhecidos hoje como reservatórios do pré-sal. As camadas de sal sofreram deformações, o que posteriormente permitiu a passagem de óleo para os reservatórios acima dessa camada, no pós-sal.

Na Figura 2-4, apresenta-se um resumo esquemático do processo de formação e na Figura 2-5, apresenta-se o mapa de reconstrução das bacias sedimentares de América do sul e a África.

Segundo Duarte, (2010), embora sejam encontradas em diversas partes do globo, tanto no mar como em terra, a costa brasileira é o único lugar, pelo menos até agora, em que esse tipo de rocha guarda hidrocarbonetos.

Segundo Duarte, (2010), com as descobertas de óleo no campo Uruguá na Bacia de Santos a 300 km da costa, em lâmina de água de 1322 metros, novas fronteiras exploratórias são alcançadas no ano 2005. Sendo nesse ano perfurado um dois poços mais profundos pela Petrobras, 6.915 metros, alcançando pela primeira vez a camada de rochas carbonáticas situada abaixo da camada de sal.

Segundo o autor supracitado, dados da ANP, no Pré-sal existem cerca de 10 blocos exploratórios, situados em uma lâmina d'água de 2.200 metros somados 2.000 metros de sedimentos pós-sal e mais 2.000 metros da camada salina, o que faz que os reservatórios estejam situados a uma profundidade total de 5.000 a 7.000 metros de profundidade.

Estima-se que existam campos situados no Pré-sal em uma faixa de 800 km de extensão por 200 km de largura, com o sal recobrindo-o com uma espessura média de 2.000 metros em uma área de 1.000 km<sup>2</sup>.

De acordo com dados da Petrobras o volume de óleo recuperável está entre 30 e 50 bilhões de barris de óleo, fazendo com que o Brasil tenha reservas de petróleo semelhantes às da Rússia.

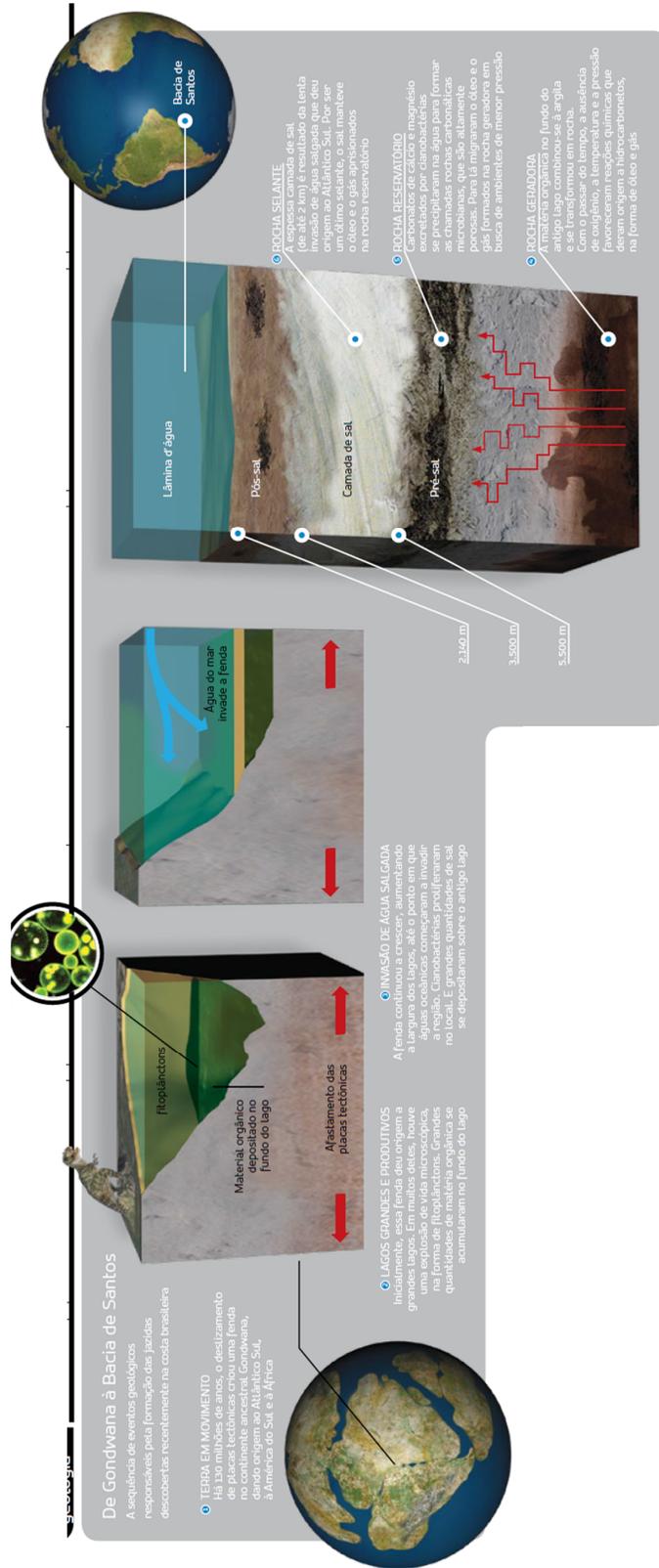


Figura 2-4. Origem dos reservatórios carbonáticos. (Fonte: Christante, 2009).

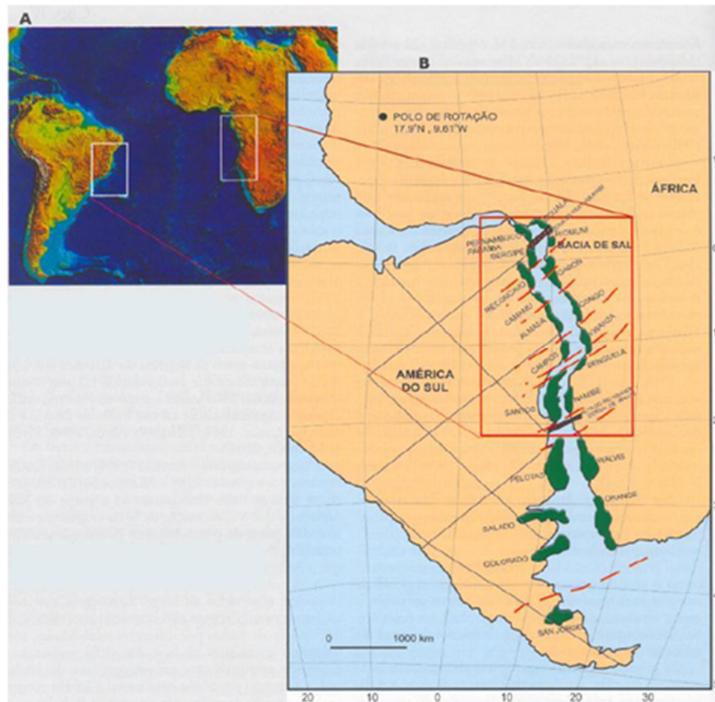


Figura 2-5. Fase inicial da formação do Atlântico Sul. (Fonte: Duarte, 2010)

Na Figura 2-6 apresenta-se a distribuição mundial dos carbonatos.

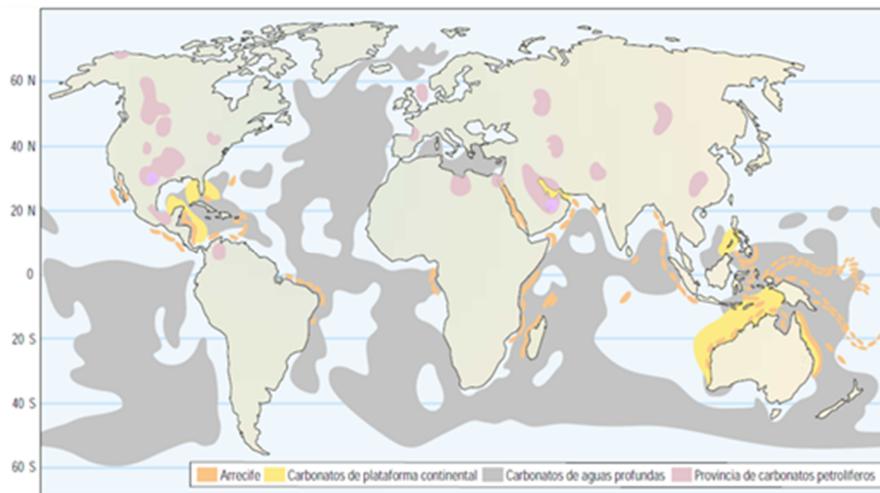


Figura 2-6. Distribuição de rochas carbonáticas. (Adaptado de: Akbar, et al., 1995).

## 2.5. Classificação das rochas carbonáticas

Segundo Dürrast, et al., (1999), diversas classificações têm sido desenvolvidas como resultado das heterogeneidades presentes 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); Mazullo et al., (1992). Folk, (1959), Folk, (1962) e Dunham, (1962) apresentam classificações com base nas quantidades relativas de quatro texturas e componentes diagenéticos (partículas, matriz de lama de limo, cimentos e poros) além das características partículas “versus” matriz. Füchtbauer, (1959) baseou-se na composição química. Com o estudo do comportamento das rochas de hidrocarbonetos foram desenvolvidos mais sistemas de classificação usando a relação entre o espaço poroso com a porosidade e a permeabilidade como os propostos por Archie, (1952), Choquete e Pray, (1970) que apresentam o conceito de estrutura seletivo. Lucia (1983, 1995, 1999) propõe um enfoque mais petrofísico na classificação dos espaços porosos: A distribuição do tamanho dos poros controla a porosidade, a permeabilidade e a saturação.

Akbar, et al., (1995), afirma que os sistemas de classificação das rochas carbonáticas são completamente diferentes das rochas clásticas. O autor afirma que a classificação Dunham publicada em 1962 é amplamente utilizada para caracterizar as rochas carbonáticas em função da quantidade e textura dos grãos. Além da descrição dos tipos de poros que refina ainda mais a descrição de rochas o que faz com que o sistema de classificação de Lucia (1983, 1995, 1999) seja amplamente aceito hoje.

Um estudo com maior informação acerca da classificação de carbonatos e travertinos é feito por Pilotto, (2011).

## **2.6. Principais características das rochas carbonáticas**

Ham and Pray (1962) apud (Ahr, 2008), reconheceram alguns dos principais atributos destas rochas, descritos a seguir:

Estas rochas não devem sua composição mineralógica ao transporte em córregos e rios. Elas são formadas por processos detríticos, químicos e biológicos dentro da bacia e dependem principalmente da atividade biológica.

Carbonatos são principalmente compostos por restos esqueléticos e outros constituintes biológicos e químicos.

Grãos clásticos nas rochas carbonáticas são intraclásticos (de sedimentos litificados) ou litoclastos (rochas mais velhas retrabalhadas).

As rochas carbonáticas são compostas principalmente de constituintes biogênicos, portanto seus grãos, formas e estratificação podem ter sofrido extensas mudanças pela escavação e presença de organismos.

Rochas carbonáticas são ainda mais complicadas pela diagênese significativa que ocorre através de dissolução química, reprecipitação, dolomitização, fratura, recristalização e substituição a condições ambientes na maioria de ambientes digênicos. Por estas razões, o tamanho e forma de uma rede porosa, são esperados para ser muito heterôgenos e apresentam dimensões de poros que variam de sub-micron até metros. Carbonatos nem sempre exibem porosidade interparticular, exibem uma grande variedade de tamanhos de poro, forma e origem. Excluindo fraturas, três cooperadores qualitativamente diferentes a porosidade podem ser identificados: porosidade vugular ( $r \geq 100 \mu\text{m}$ ), intergranular ( $r \geq 5 \text{ mm}$ ) e intragranular ( $r < 5 \text{ mm}$ ).

Essas características distinguem as propriedades petrofísicas e produtividade dos campos de carbonato de outras rochas sedimentares, incluindo arenitos e folhelhos (Ams, et al., 2005.).

### **2.6.1. Características geológicas e petrofísicas**

Segundo Ahr, (2008) propriedades fundamentais da rocha incluem textura, tipo de grãos, composição mineralógica e estrutura sedimentar.

#### **a) Textura**

A textura é definida como o tamanho, forma, arranjo dos grãos em uma rocha sedimentar Pettijohn, (1975). No entanto, nas rochas carbonáticas o termo pode ser usado no contexto de textura deposicional.

Folk, (1959) apud Ahr, (2008), alguns trabalhos classificam toda a lama de carbonato como micrita, apesar do seu tamanho e composição mineralógica ser inconsistente com a definição original.

A maioria das alterações sofridas pelos tamanhos de grãos e as gargantas são consequência dos processos diagenéticos, os quais podem ser identificados em lâminas delgadas. A seleção ou agrupamento de grãos por tamanhos semelhantes é um atributo que pode ser usado no estudo de rochas carbonáticas porque influencia a porosidade deposicional e a permeabilidade. A classificação refere-se à uniformidade do tamanho de grão em um sedimento ou rocha sedimentar. A Figura 2-7 apresenta as relações entre o tamanho do grão, seleção e porosidade em areias não consolidadas com base em dados de Beard

e Weyl (1973) apud Ahr, (2008). Note-se que a porosidade não varia com o tamanho de grãos, mas realmente varia com a seleção. A permeabilidade varia tanto com tamanho de grão como a seleção (Ahr, 2008).

A porosidade é independente do tamanho de grão onde os grãos são esféricos, mas a permeabilidade varia com o tamanho de partícula porque grãos pequenos têm porosidade intergranular com poros pequenos. Estimativas dos tamanhos de grãos são feitas a partir de lâminas delgadas dos carbonatos.

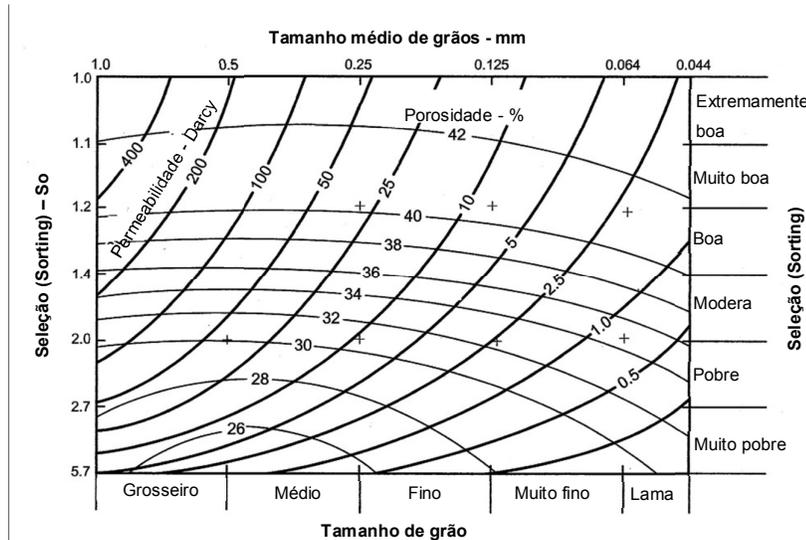


Figura 2-7. Relação: tamanho do grão, seleção e porosidade em areias não consolidadas. (Fonte: Ahr, 2008).

## b) Estrutura

Em carbonatos é referido à forma de crescimento (macroescala) e a microestrutura esquelética (microescala) de organismos do recife. A estrutura está relacionada a propriedades de reservatório, especialmente com a permeabilidade já que os tipos de estrutura influenciam a geometria das gargantas dos poros.

Processos de deposição, diagenéticos ou biogênicos criam as estruturas das rochas carbonáticas. (Ahr, 2008).

Na Figura 2-8 apresentam-se exemplos dos três tipos de estrutura descritos a seguir:

1. A estrutura de deposição que é a orientação espacial e alinhamento de grãos numa rocha detrítica.
2. A estrutura diagenética compreendem padrões de crescimento de cristais formados durante processos diagenéticos como a cimentação,

substituição, recristalização de sedimentos de carbonato e tecidos formados por dissolução.

3. A estrutura biogenética descrita em ligação com o acúmulo de carbonato, ou recifes, e com a microestrutura interna dos grãos do esqueleto. Embry e Klovan (1971) apud Ahr, 2008 descreveram três elementos da estrutura biogenética: fragmentos esqueléticos, elementos esqueléticos e estruturas intimamente ligados gerados por organismos incrustantes.

A orientação dos grãos e o alinhamento são produzidos por correntes no momento da deposição. Os grãos maiores na parte superior da Figura 2-8(a) estão imbricados e aqueles na parte inferior da figura estão simplesmente orientados com eixos longos paralelos à direção do fluxo. Permeabilidade é maior na direção de alinhamento dos grãos. (b) Estrutura de diagênese. A substituição completa de calcário por dolomita cria uma estrutura diagenética totalmente não relacionado como as propriedades de deposição da rocha. Neste caso, a dolomita romboédrica ocorre como numa estrutura "aberta", com uma grande quantidade de porosidade intercristalina. (c). Estrutura (crescimento esquelético) biogênica. A grande variedade de estruturas de crescimento interno criado por organismos do recife cria estrutura de deposição dramaticamente diferente daquelas em (partículas) rochas detríticas. A foto ilustra um recife do Pleistoceno de Windley Key, na Flórida. Porosidade e permeabilidade no coral são influenciadas por estruturas biologicamente construídas, estruturas esqueléticas, não por estruturas granulares ou cristalinas. Como é descrito por Ahr, (2008).

### **c) Estrutura sedimentar**

Usada para interpretar os paleoambientes deposicionais. Estas estruturas podem afetar as características dos reservatórios porque a estrutura interna é geralmente orientada e pode causar mudanças no tamanho de grão.

Propriedades como a porosidade, permeabilidade, densidade volumétrica são propriedades dependentes das propriedades fundamentais descritas anteriormente, afirma Ahr, (2008).

Os processos que podem influenciar a porosidade são a diagênese, (que preenche os poros com cimento), compactação (que fecha poros), dissolução (que abre poros) e a recristalização ou a substituição (que cria novos poros).

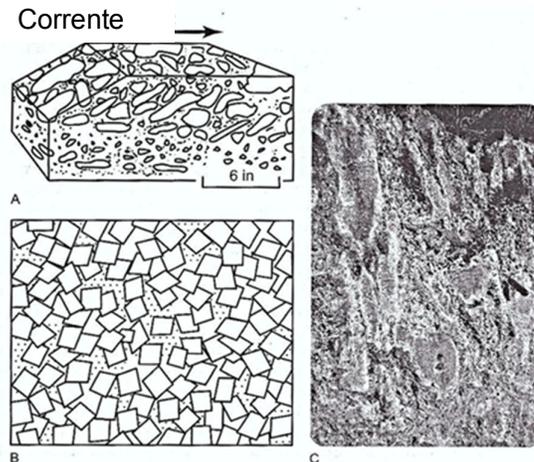


Figura 2-8. Estrutura de deposição em rochas detríticas. (Adaptado de: Ahr, 2008).

Na Figura 2-9, são apresentadas as propriedades fundamentais que influenciam a porosidade dos reservatórios de rochas carbonáticas.

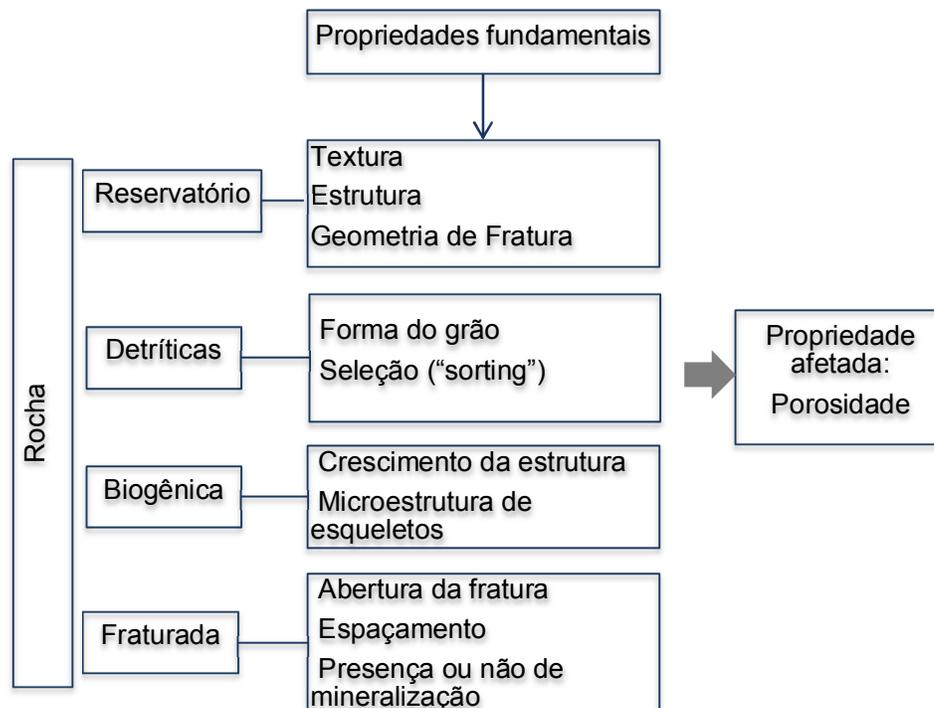


Figura 2-9. Influência das propriedades fundamentais sobre a porosidade.

No sistema de grãos esféricos do mesmo tamanho, a porosidade não depende do diâmetro do grão, mas depende do arranjo e da seleção.

## 2.6.2. Características mecânicas

Como todas as rochas, as rochas carbonáticas devem ser consideradas como material descontínuo. Não é um material sintético, mas um material que foi submetido frequentemente a ações mecânicas, térmicas e químicas ao longo de milhões de anos.

Segundo Knackstedt, et al., (2009), propriedades petrofísicas tais como velocidade acústica, permeabilidade e resistividade estão diretamente correlacionadas com a quantidade e tipo de porosidade, o tamanho da característica dominante, e a interligação de diferentes tipos de porosidade. Com o qual também concorda (Jouini, et al., 2011).

Alguns trabalhos e autores como Arns, et al., (2005), Ahr, (2008), Knackstedt, et al., (2009) e Jouini, et al., (2011) se focarão no estudo de propriedades elásticas e sua relação com os sistemas porosos, enfocando-se principalmente na permeabilidade e caracterização de reservatórios.

Grande parte das informações de caracterização mecânica de rochas análogas, aos reservatórios carbonáticos, rochas travertinos, são encontradas em estudos enfocados a avaliação e caracterização para fins ornamentais e de construção. Por tanto, serão aqui comentados alguns desses trabalhos para obter uma sensibilidade da ordem de grandeza de propriedades das rochas em questão.

Martínez Martínez, (2008), apresenta um estudo bastante completo para rochas carbonáticas, dolomitas e mármore. O autor aborda parâmetros elásticos e mecânicos e a relação com diferentes aspectos das rochas tais como tamanho do cristal, textura, mineralogia, porosidade, entre outras, em escalas desde macro até micro. Na Figura 2-10 é possível apreciar um exemplo da influência da porosidade nos módulos de Young na escala meso.

Yagiz, (2009) previu parâmetros como a resistência à compressão uniaxial variando na faixa compreendido entre 20 a 137 MPa, módulos de elasticidade entre 16 e 65 GPa e índice de propriedades das rochas usando o martelo Schmidt para quatro tipos de travertinos coletados perto da cidade de Denizli e Antalya na Turquia, com porosidades variando entre 0,05 e 12,83 %.

Benavente, et al., (2009), estudaram a influência nas propriedades mecânicas da direção de lamina no travertino turco clássico (laminações paralelas e perpendiculares). Valores de velocidades de propagação de ondas ( $v_p$ ) e ( $v_s$ ), o módulo de Young dinâmico, ( $E_{din}$ ); coeficiente de Poisson dinâmico,

( $U_{din}$ ); resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ); módulo de Young médio, ( $E_{med}$ ), foram calculados para amostras com bandas paralelas e perpendiculares.

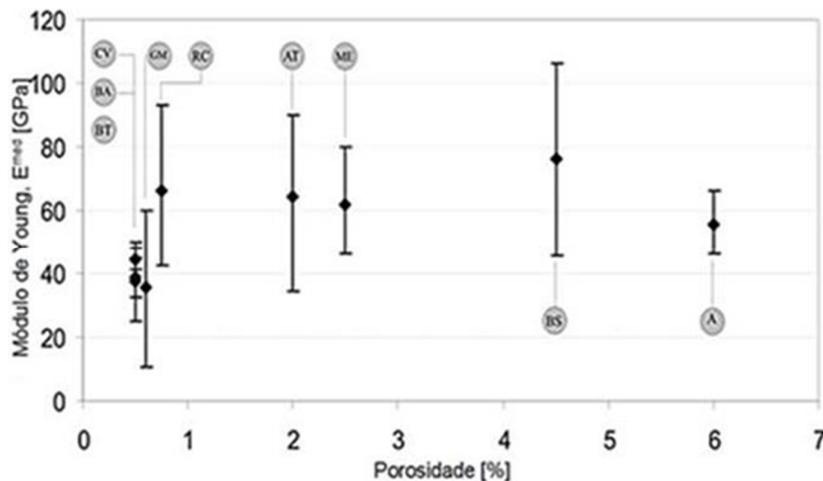


Figura 2-10. Módulo de Young frente à porosidade. (Fonte: Martinez, Martinez, 2008).

Os autores concluíram que a velocidade de propagação de ondas não é tão afetada por a laminação dos travertinos, mas se pela porosidade intercrystalina, enquanto a caracterização de propriedades mecânicas estáticas refletiu que a resistência à compressão de amostras com fácies maciça (com porosidades de  $5,89 \pm 0,96$  %) é maior que a apresentada por amostras laminadas (com porosidade  $7,16 \pm 1,05$  %).

Para as amostras laminadas, a resistência à compressão (49,62 GPa e 53,15 GPa) é mais dependente da porosidade fenestral (porosidade que contribui ao bandeamento), que incide em sua diminuição, do que da direção de carga no que diz respeito à laminação. Em quanto ao comportamento elástico, módulo de Young médio, (45,9 e 22,82 GPa), foi observado que as amostras eram menos elásticas quando a direção de carga é perpendicular à laminação.

Os autores Török, et al., (2010), fizeram um estudo de travertinos Húngaros com o intuito de avaliar a durabilidade para obras de reconstrução. As análises incluíram a determinação da densidade, da velocidade da onda de ultrassom, a porosidade efetiva e a resistência à compressão uniaxial de dos tipos de mostras, secas e saturadas, encontrando uma correlação linear entre densidade e velocidade do pulso ultrassônico de ambas as amostras. De acordo com a análise de resistência à compressão uniaxial e velocidade do pulso ultrassônico; a porosidade efetiva e velocidade do pulso ultrassom estão exponencialmente relacionadas. A estrutura e a porosidade têm a maior influência sobre a resistência e durabilidade de travertino. Os testes desse

trabalho demonstraram que travertinos com baixa massa e porosidade com microestrutura relativamente homogênea tem maior resistência e velocidade de impulsos de ultrassom que aqueles menos homogêneos.

Os principais componentes mineralógicos encontrados nestes travertinos são a calcita (98 a 99,5 %), minerais acessórios representados principalmente por quartzo (0 a 1,5 %) e argila em pequenas proporções. O cimento está dominado por calcita e micrita microesparítica. Os poros encontrados são principalmente de tipo intergranular com conectividade limitada. Estes travertinos se caracterizam por serem rochas carbonáticas com ambiente de deposição original e estruturas laminada e maciça.

A resistência à compressão simples (UCS) para os travertinos estudados variou desde 30,3 até 124,3 Mpa para as amostras secas e entre 23,45 a 111,86 MPa. Embora os valores de resistência tenham decrescido com a saturação de água para os dois tipos de microestrutura, é importante nomear que os maiores valores de UCS não foram medidos em amostras com as menores porosidades. Os valores de velocidades de onda foram maiores na estrutura maciça tanto nas amostras secas como nas saturadas, sendo os valores, como se espera, maiores nas amostras saturadas.

Os autores concluíram que a porosidade não reflete necessariamente na resistência do travertino, mas foi encontrada uma boa correlação exponencial entre a densidade e UCS; velocidade da onda ultrassônica e UCS, tanto para condições secas e saturadas.

Segundo Basha, et al., (2011), o travertino romano de baixa porosidade estudado por Jackson et al., (2005) apresenta valores de porosidade de valores 0,8% e resistência de 105 Mpa. Travertinos estudados por Yagiz com porosidades de aproximadamente 4%, apresentam uma resistência de aproximadamente 70 MPa. Török, et al., (2010) relata travertinos húngaros com porosidades entre 2,11% e 13,13%. Os valores de resistência registrados nesses dois extremos estão 103,17 e 30,29 MPa, respectivamente. (Martínez Martínez, 2008) encontrou que os dados anteriores coincidem com os valores obtidos em seu estudo e confirmam a tendência observada por ele. Uma mudança de inclinação do gráfico resistência-porosidade (com o ponto de inflexão em porosidade = 13%) devido a uma mudança nas características do sistema poroso. Rochas com uma porosidade inferior a 13% intercrystalina presente e poros interparticulares e intergranular (micro). Os maiores valores de porosidade (> 13%) estão associados com a presença de macroporos vulgares.

No estudo de (García Del Cura, et al., 2012), foram feitos tanto ensaios destrutivos (compressão uniaxial) como não destrutivos (ultrassom) para a caracterização mecânica de travertinos bandeados e tufas. Foi concluindo que os macroporos vugulares grandes têm pouca influência sobre parâmetros como a absorção de água capilar e o módulo de elasticidade ou propagação de ondas de ultra-som, enquanto que a microporosidade (<100 µm) é um fator muito mais determinante.

Segundo o exposto nesse estudo, os valores efetivos de porosidade de travertinos (principalmente calcita) estão entre (5,18-24,99%), a densidade de travertinos varia entre 2,02 e 2,52 g / cm<sup>3</sup>, resistência encontrada variando entre a 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 compressão (Vs) entre 2,2 até 3,06 Km/s.

Os autores nomeados acima chegaram à mesma conclusão de autores como (Jackson, et al., 2005), (Yagiz, 2006), (Demirdağ, 2009), (Martínez Martínez, 2008), (Török e Vásárhelyi, 2010), (Martínez-Martínez, et al., 2011); a resistência e a rigidez dos travertinos dependem da porosidade da rocha. Mostrando a relação entre a resistência e a porosidade, uma tendência exponencial. Isso significa que pequenas mudanças em baixas porcentagens de porosidade envolvem grandes mudanças resistência. As propriedades mecânicas dos travertinos são mais sensíveis à microporosidade como microporos ou falhas entre os elementos estruturais (cristais). Eles podem ser considerados como bidimensionais, com um raio de curvatura pequeno nas suas extremidades. Conseqüentemente, a concentração da tensão nestas falhas é elevada (de acordo com a teoria de Griffith) (García Del Cura, et al., 2012). Por outro lado, os macroporos vugulares com tamanhos entre mm a cm, geralmente, têm uma geometria redonda, devido à sua origem (bolhas revestidas, moldes de plantas, etc.). A influência de poros vugulares separados na rocha é uma redução da superfície da secção de amostra carregada, mas, como o seu raio de curvatura é muito elevado a concentração de tensão nas suas extremidades é baixa.

Segundo García Del Cura, et al., (2012), as propriedades mecânicas de travertinos laminados dependem da orientação relativa destas bandas em relação à direção de carga. Não sempre os dados mais elevados de resistência e rigidez são registrados em amostras com orientação de laminas perpendicular à direção de carga como é proposto e geralmente aceito para rochas

anisotrópicas, mas o comportamento mecânico varia de acordo com as fácies rochosas predominantes. No estudo, os autores, confirmam o anteriormente dito com dois tipos de travertinos, os travertinos laminados de fácies de baixa porosidade, e os travertinos laminados de fácies de poros. Os travertinos laminados de fácies de poros (Quadrados verdes na Figura 2-11) apresentam maior resistência e rigidez quando são carregados paralelamente às laminas, e os travertinos laminados com fácies de menor porosidade e mais homogêneos (Quadrados vermelhos, azul e marrom, na Figura 2-11), apresentam maior resistência e rigidez quando são carregadas perpendicularmente as laminas como pode ser apreciado na Figura 2-12, onde as barras verticais mostram os valores máximos e mínimos registrados.

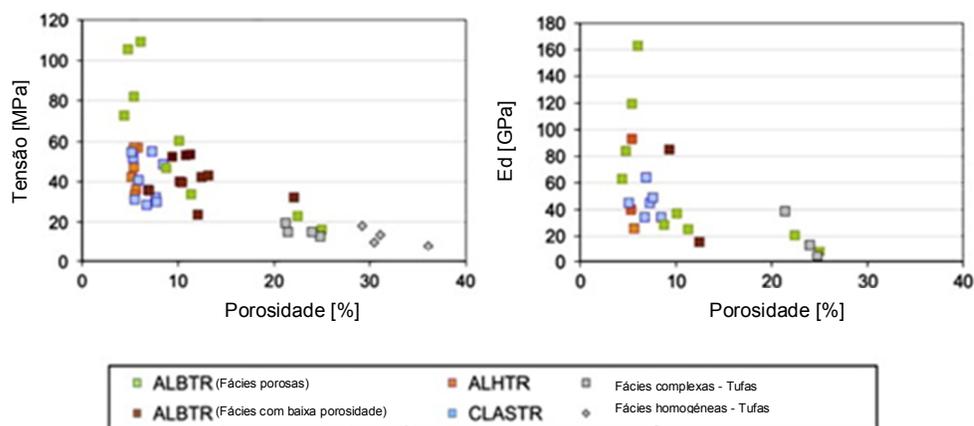


Figura 2-11. Propriedades mecânicas e ultrassons com porosidade para os travertinos. (Fonte: García Del Cura, et al., 2012).

Em relação ao comportamento tensão-deformação, os travertinos, que têm uma percentagem de porosidade mais baixa, fornecem um comportamento mais rígido. No entanto, é importante notar a diferença entre as respostas quando o travertino é carregado e testado em paralelo ou perpendicular, bandas / laminações. A Figura 2-13 apresenta o comportamento tensão-deformação dos travertinos para os casos mencionados que foram estudados por (García Del Cura, et al., 2012).

Pilotto, (2011), estudou três tipos de travertinos (Travertinos de Itaboraí, Travertino Romano e Travertino turco) análogos às rochas carbonáticas reservatórios. Este estudo será apresentado no capítulo 3.

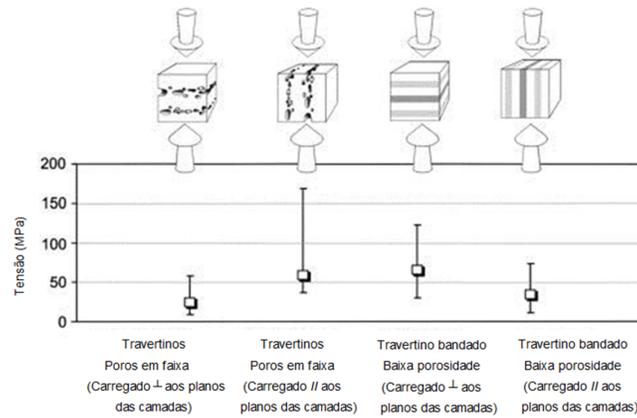


Figura 2-12. Resistência para travertinos bandeados, direção de bandas paralelas e perpendiculares à direção da carga. (Fonte: García Del Cura, et al., 2012).

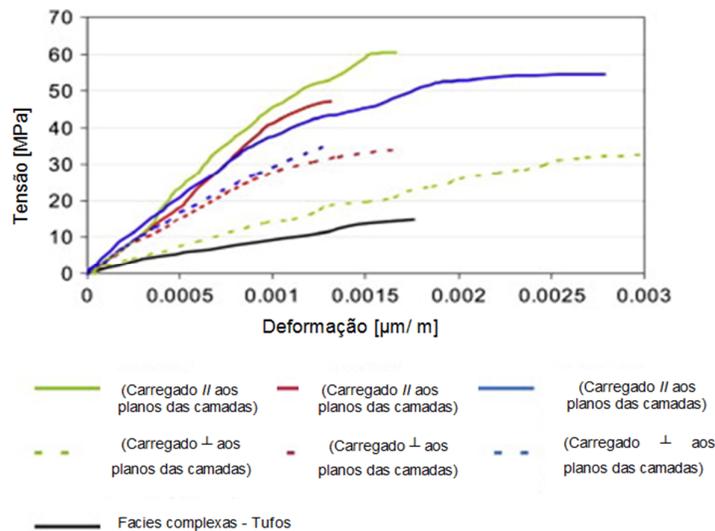


Figura 2-13. Curvas tensão-deformação registrado para travertinos (ALHTR, CLASTR e ALBTR) e tufo (GODTUF). (Fonte: García Del Cura, et al., 2012).

### 2.6.3. Microestrutura, propriedades elásticas e mecânicas.

Segundo Brandon, et al., (1999), a microestrutura do material é o resultado de sua composição química, sua mineralogia e sua história de processamento ou formação e por sua vez determina as propriedades químicas, físicas e mecânicas do material estudado, ver a Figura 2-14.

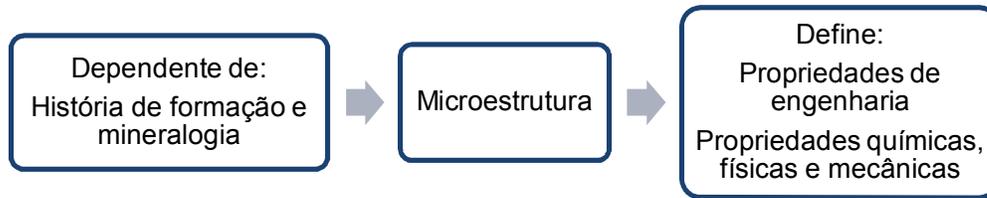


Figura 2-14. Microestrutura, dependência e influência do material. (Adaptado de: Brandon, et al., 1999).

A microestrutura se refere a uma escala de fenômenos ou propriedades estruturais, arranjo de elementos geométricos e mineralógicos, tamanhos de grãos, partículas, microporos, fração volumétrica dentro de uma rocha ou qualquer material, que ocorrem à pequena escala. Estes são de preocupação para os cientistas e engenheiros, segundo explica (Brandon, et al., 1999).

Reservatórios de rochas carbonáticas são muito heterogêneos, em contraste com os reservatórios clássicos. Estas dependem principalmente do ambiente de deposição em várias fácies e dos processos diagenéticos e tectônicos sofridos pela rocha (Murray and Pray, 1965).

Segundo Dürrast, et al., (1999), as heterogeneidades são causadas pela estrutura da rocha. No caso de reservatórios carbonáticos os principais tipos de estrutura são: maiores constituintes (fossilizes, oóides, peloides e cristais), espaço poroso, fraturas estilólitos.

A distribuição e orientação das várias microestruturas em dolomitas influenciam propriedades físicas tais como a condutividade elétrica, velocidades sísmicas, e curvas de compressão e cisalhantes, assim como propriedades de transporte porosidade, permeabilidade e saturação.

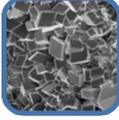
A Figura 2-15 apresenta de forma esquemática os parâmetros físicos e litológicos que controlam as propriedades físicas das rochas em condições in situ.

Segundo (Roberts e Garboczi, 2000), as propriedades elásticas de duas fases (poros e sólido) no material poroso dependem da geometria natural do espaço poroso e da fase sólida assim como do valor da porosidade.

### Propriedades físicas das rochas reservatórios:

Elásticas, magnéticas, de transporte, mecânicas, elétricas, térmicas, densidade, etc.

### Parâmetros litológicos (intrínsecos):



Propriedades do cristal; Composição do mineral; Estrutura da rocha: Componentes: (Tipo, tamanho, forma, arranjo, camadas e orientação), Espaço poroso:

(Tipo, tamanho, forma, arranjo, grau e tipo de saturação), estiolitos: (Tipo e composição e estrutura)



### Parâmetros físicos (Extrínsecos):

Pressão: Pressão efetiva (pressão litostática, tensão diferencial, pressão de fluidos dos poros) e temperatura

Figura 2-15. Fatores que controlam as propriedades físicas das rochas carbonáticas reservatórios. (Adaptado de: Dürrast, et al., 1999).

(Martínez Martínez, 2008), chegou à mesma conclusão e agrega que o módulo de Young não depende da mineralogia, e no caso de materiais com valores de porosidade igual, será mais rígido aquele que tenha uma relação de abertura/comprimento maior em seus poros. A Figura 2-16 apresenta esta relação em microcompressão.

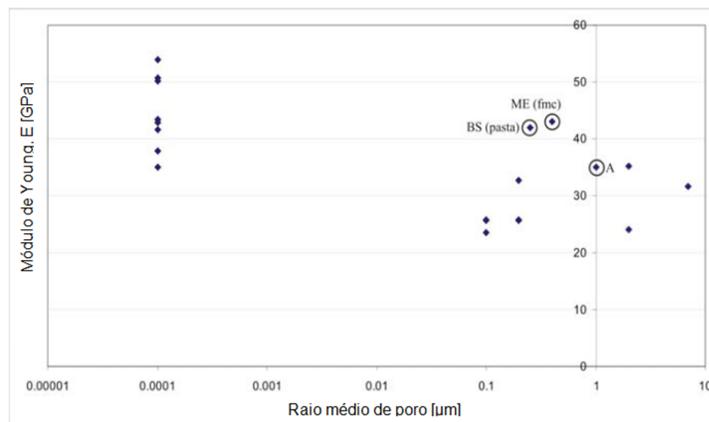


Figura 2-16. Módulo de Young medio frente ao algoritmo de raio medio de poro. (Adaptado de: Martínez Martínez, 2008)

Fatores como a dissolução e o tamanho do grão influencia nas propriedades, segundo Martínez Martínez, (2008), nas rochas carbonáticas a dissolução é mais intensa em cristais de pequeno tamanho frente aos de maior tamanho. Além disso, o autor percebe que os materiais com predomínio de texturas calcíicas sofrem modificações do sistema poroso a diferença dos

materiais maioritariamente dolomíticos durante processos de dissolução e essa variação se pode perceber pelo incremento dos poros de menor raio médio, porosidade intercrystalina, ou aparição de nova população de poros de raio menor que os espaços intercrystalinos criados pela dissolução. No entanto, as calcitas são mais susceptíveis a aparição de microfissuras por choques térmicos que as dolomitas independentes do tamanho e forma do cristal. A ausência de fissuras durante os choques térmicos se traduz num comportamento totalmente elástico da dolomita, ao aumentar ou diminuir a temperatura e as texturas calcíticas apresentam frequentemente microfissuras no contorno de seus cristais traduzindo-se em uma deformação plástica, ver Figura 2-17.

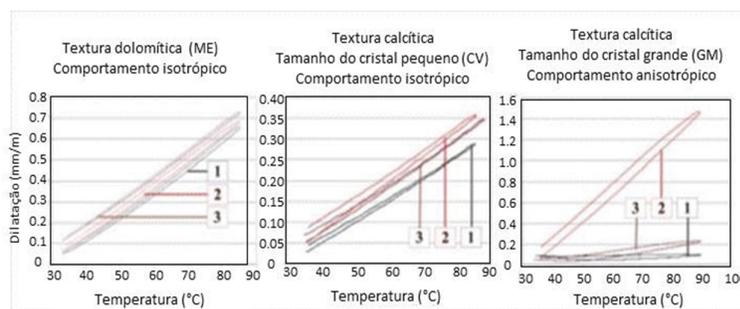


Figura 2-17. Comportamento elástico - plástico de rochas carbonáticas em função de a dissolução e da temperatura. (Adaptado de: Martinez, 2009).

Além, o tamanho, forma e distribuição de grãos e dos espaços porosos são fatores dominantes para determinar o efeito nas propriedades.

Segundo (Martínez Martínez, 2008) a relação entre o tamanho de cristal do um material e a propagação de ondas tem sido abordada por diferentes autores, como Thomson et al., (2007); Benson et al., (2005), etc. Segundo o autor supracitado, os autores coincidem nas vantagens da propagação de ondas para avaliar aspectos dos materiais como porosidade, tamanho do cristal, etc. e também determinar qualidade mecânica dos materiais.

No entanto, em rochas a propagação de ondas tem alguns inconvenientes em especial em rochas com estrutura muito heterogêneas que geram uma dispersão de onda elevada e dificulta a leitura das ondas recebidas.

Nas Figura 2-18 e 2.19, pode se apreciar a dispersão que existe entre as equações de resistência mecânica baseadas na velocidade de propagação de ondas. As equações estão desenvolvidas para diferentes tipos de litologia, no entanto nas figuras pode-se apreciar a dispersão produto da heterogeneidade para curvas definidas para um mesmo tipo de rocha, como é justificado por Winkler, (1997) apud (Martínez Martínez, 2008).

As descontinuidades levam a respostas diferentes na velocidade de propagação de ondas e também na resistência pelo qual as correlações obtidas em um grupo de rochas não podem ser aplicadas em rochas com graus de heterogeneidade diferentes.

Segundo (Martínez Martínez, 2008), com as correlações existentes até o momento na bibliografia, a rocha carbonática conta com uma velocidade de propagação de onda (ondas  $V_p$ ) de 5.5 km/s e é estimada uma resistência á compressão simples que oscila entre 20 a 160 MPa.

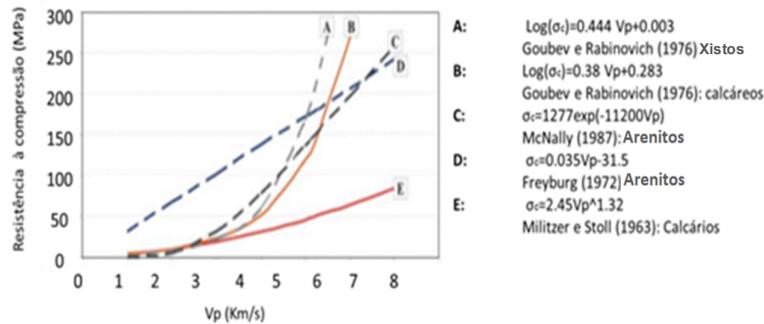


Figura 2-18. Curvas de UCS em função de  $V_p$ . Curvas B e E definidas para calcários. (Adaptado de: Martínez Martínez, 2008).

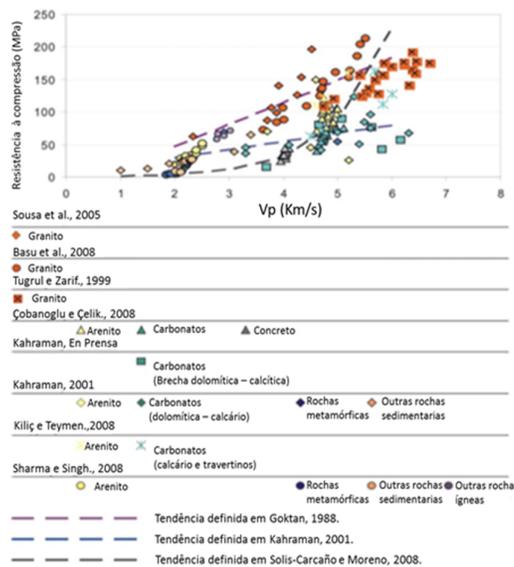


Figura 2-19. Curvas de UCS em função de  $V_p$ , diversas litologias e correlações para um mesmo tipo de rocha. (Adaptado de: Martínez Martínez, 2008).

## 2.7. Técnicas de estudo das rochas carbonáticas

Segundo (Weber, 1986) apud Dürrast, et al., (1999), as heterogeneidades das rochas são muito dependentes da escala e muito importantes na hora da caracterização. Numa escala de 10 m a 10 km as heterogeneidades representam importantes fronteiras litoestratigráficas, grandes falhas e fraturas extensas. Numa escala menor (milímetros a metros) as heterogeneidades são causadas pela estruturada rocha.

A estrutura de um material pode se abordar em diferentes escalas, conhecidas como escalas microestruturais. O termo escala microestrutural é usualmente utilizado para cobrir uma série de atributos estruturais que não podem ser vistos a olho nu ou não detectáveis por métodos comuns de avaliação como no caso da macro e mesoestrutura (Martínez Martínez, 2008) e (Brandon, D.; Kaplan, W. D., 1999).

Akbar, et al., (1995), Brandon, et al., (1999), Arns, Knackstedt, et al., (2002), Arns, et al., (2005), Ahr, (2008), Bashah, et al., (2011) entre outros autores, coincidem em que as propriedades microestruturas das rochas porosas são muito importantes e influenciam de maneira relevante as propriedades macro nas rochas carbonáticas.

A complexidade estrutural destas rochas envolve características e atributos únicos que segundo (Arns, et al., 2005.) as distinguem das rochas siliclásticas, por tanto requerem diferentes métodos de estudo e análises a escalas micro e nano.

Os elementos microestruturais das rochas carbonáticas podem ser analisados de forma qualitativa ou quantitativa mediante análises de dados digitais fornecidos por técnicas de dispersão de sinal como a microscopia, a microtomografia e a difração de raios-x. Estas técnicas permitem a descrição dos elementos da microestrutura e sua visualização mediante imagens 1D, 2D e 3D.

Segundo (Arns, et al., 2002), as técnicas para proporcionar uma descrição 3D da estrutura dos poros foram inicialmente limitadas a conjuntos de secções seriadas 2 D combinadas para formar uma imagem 3D (Lin e Cohen, 1982). No entanto, este método é extremamente tedioso e demorado. Assim, anos depois foi possível a medição direta de uma estrutura 3D a partir de microtomografia computadorizada de raios-X, (Flannery et al., 1987,. Dunsmuir et al., 1991; Spanne et al, 1994).

Com este enfoque, atualmente é possível a elaboração de abordagens alternativas para estudar propriedades mecânicas das rochas a partir de modelos digitalizados da microestrutura.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo de algumas das técnicas e ferramentas utilizadas para obter atributos e características estruturais nas diferentes escalas.

Tabela 2.1. Escalas e técnicas no estudo estrutural. (Adaptado de: Brandon, et al., 1999).

Escalas		Técnicas	Características
Macro	*1	Inspeção Visual Inspeção Ultrassônica	Defeitos grossos
			Porosidade
			Fissuras
			Inclusões
Meso	*10 <sup>2</sup>	Microscopia Ótica Microscopia Eletrônica (Raios-X (EDS))	Tamanho de grão e de partícula
			Fração volumétrica
			Fissuras na interfase ou na matriz
			Fase morfológica
			Anisotropia
Micro	*10 <sup>4</sup>	Microscopia de transmissão (Raios-X (EDS)) Microscopia de força atômica Microtomografia	Tamanhos de grãos e partículas
			Microfissuras
			Microporosidade
			Deslocamento subestrutura
			Contornos de grão e fase
			Fenômenos de precipitação
Nano	*10 <sup>6</sup>	Difração Microscopia de tunelamento. De alta resolução Microscopia eletrônica de transmissão (Raios-X (EDS))	Dimensões e contornos de grãos e interfaces
			Cristalografia e interfase estrutural
			Pontos de defeitos
			Defeitos pontuais

### 2.7.1. Microtomografia

A microtomografia é uma técnica não destrutiva que segundo (Shulakova, et al., 2013) consiste num conjunto de números correspondentes a densidades de raios-X D (x, y, z) atribuídos a cada “voxel” (x, y, z) do volume estudado.

Dessa forma a tomografia fornece um conjunto de dados, que dá uma representação tridimensional da estrutura e da variação da composição dentro de uma amostra.

O fluxograma apresentado na Figura 2-20, define um passo a passo geral do processo.

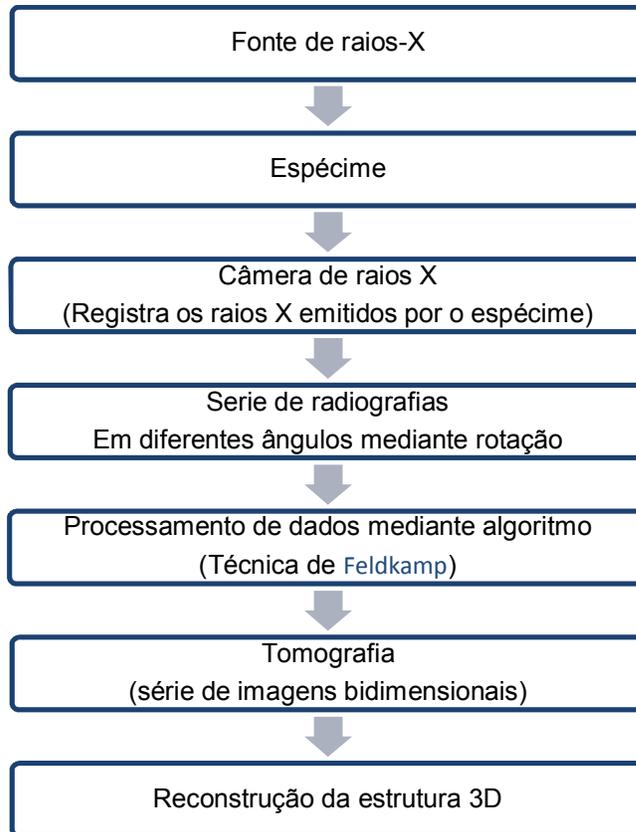


Figura 2-20. Fluxograma do processo de microtomografia de raios-X.

A microtomografia tem como fundamento a utilização de raios-X. A absorção ou deflexão dos raios depende das densidades de cada componente do espécime. Uma série de radiografias das amostras é adquirida em diferentes ângulos. Este conjunto de radiografias, dados de projeção, é processado computacionalmente utilizando algoritmos de reconstrução gerando a tomografia, imagens bidimensionais, que permitem a reconstrução digital da estrutura tridimensional da amostra partindo de pixel (2D) para voxel (3D).

Segundo descrito por (Arns, et al., 2005.), a resolução e a maximização do campo de observação são otimizadas tanto pela manipulação da fonte de raios-X como pelo detector e é limitada pela energia da fonte e a voltagem de operação. Assim, uma ampla gama de energias de raios-X será perfeita para aperfeiçoar o contraste entre as diferentes fases do espécime e uma ampla faixa dinâmica da câmera dos raios-X melhorará a discriminação de traços finos em materiais densos.

### 2.7.2.

#### Processamento de imagens e análise digital de imagens (PADI)

Gomes, (2001), descreve processamento e análise digital de imagens (PADI) como uma técnica que utiliza operações matemáticas para alterar os valores dos pixels de uma imagem digital, modificando-a, para facilitar sua visualização, ou para preparar a imagem para ser analisada computacionalmente (Análise Digital de Imagens).

A análise Digital de Imagens (ADI) consiste na extração e tratamento de dados quantitativos de imagens digitais. Podem-se realizar medições mais rápidas e precisas, possibilitando a realização de medidas impossíveis de se executar manualmente.

Os programas computacionais desenvolvidos para executar rotinas de PADI em imagens digitais podem ser estudados e entendidos a partir da sequência básica exposta na Figura 2-21, que segundo, (Gomes, 2001) não é inalterável e seu grau de flexibilidade é função do problema envolvido.

A sequência de PADI consta de três blocos gerais:

- I. **O bloco Aquisição:** formação da imagem e sua digitalização.
- II. **O bloco (PDI):** recebe a imagem e fornece mediante a manipulação uma imagem processada.
- III. **O bloco (ADI):** recebe a imagem processada e fornece dados numéricos.

O bloco Aquisição que tem como entrada, uma amostra adequadamente preparada. Este bloco compreende a formação da imagem e sua digitalização.

Nas fases de formação da imagem e digitalização é importante ter presente que a imagem é uma representação de aspecto e aparência de uma determinada estrutura ou estruturas por meio de pixels. O pixel é abreviação de "Picture element", é a unidade básica da imagem digital. Esta imagem digital é um arquivo de computador constituído por um cabeçalho, com diversas informações, e uma matriz de números; cada número identifica a cor ou intensidade do pixel de posição correspondente na imagem. Assim, esta matriz é um mapa que reproduz a imagem pixel a pixel.

O número e tamanho dos pixels da imagem digital representam a resolução espacial ou o tamanho real da imagem e a resolução espectral, profundidade ou níveis ou tons de cinzas que consiste no número máximo de níveis de intensidade que a imagem pode apresentar. Um baixo e alto contraste

são pequenas ou altas variações de tons de cinza nos pixels de uma imagem respectivamente.

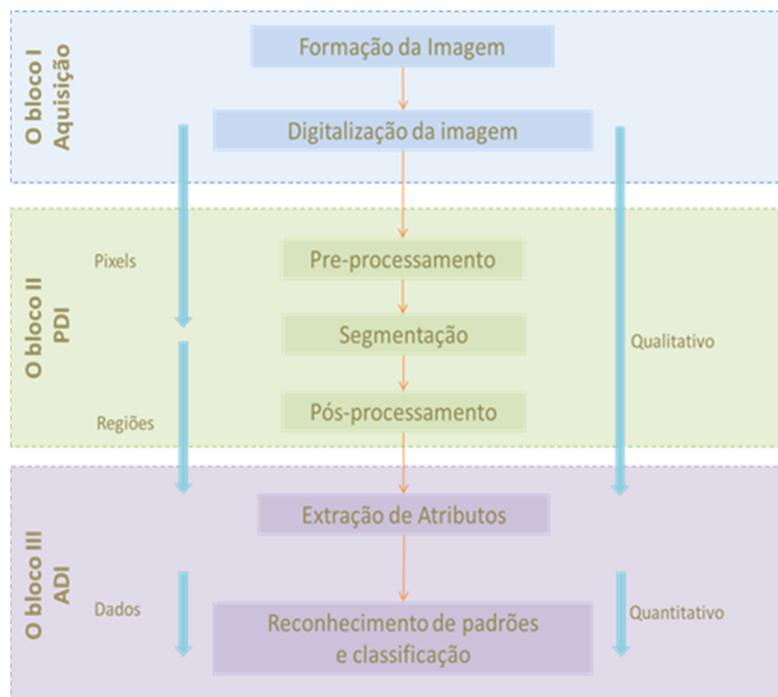


Figura 2-21. Sequência padrão do processamento e análises de imagens. (Adaptado de: Gomes, 2001).

A resolução espectral pode ser analisada, mediante o histograma. 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, segundo o referido por (Gomes, 2001).

O bloco de processamento da imagem digital (PDI) recebe a imagem original e fornece mediante a manipulação uma imagem processada. O processo de manipulação é geralmente executado em três etapas:

#### a) O pré-processamento

Segundo (Gomes, 2001), o pré-processamento é a etapa que visa melhorar a imagem, corrigindo defeitos gerados durante sua aquisição e/ou realçando detalhes de interesse específico.

Alguns procedimentos normalmente utilizados são a manipulação do brilho; a expansão do contraste; a redução de ruído e o realce de bordas e a correção de iluminação irregular. Segundo o autor supracitado, estes procedimentos podem ser abordados mediante procedimentos de pré-

processamento no domínio da frequência de Fourier e mediante procedimentos de pré-processamento no domínio do espaço real.

Os procedimentos no domínio do espaço real são comumente mais utilizados por ser computacionalmente mais baratos. Estes procedimentos são realizados mediante operações matemáticas que atuam diretamente sobre pixels das imagens. Ver Figura 2-22.

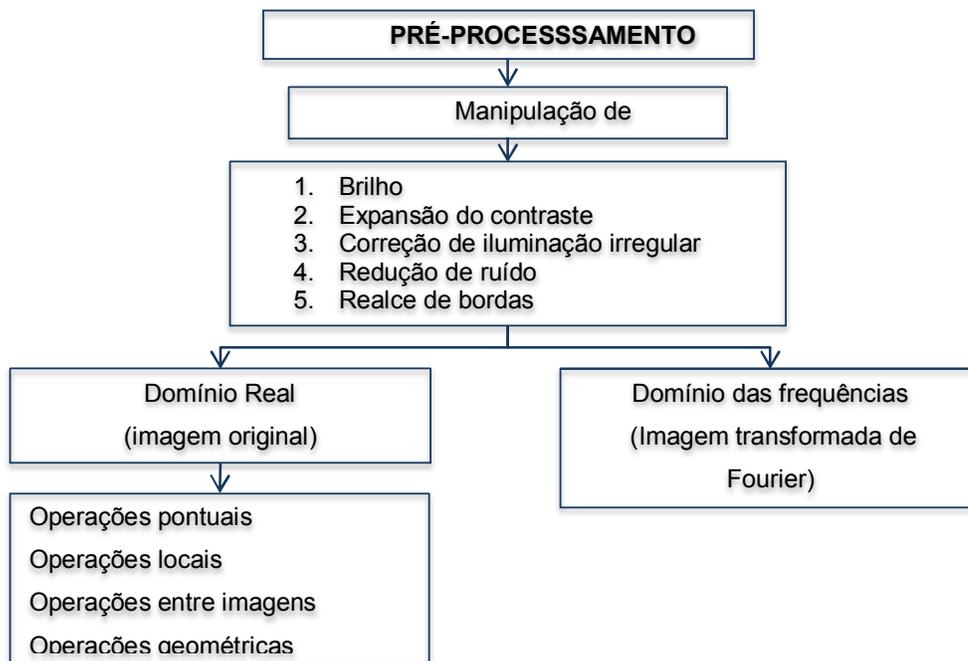


Figura 2-22. Procedimentos de pré-processamento no domínio do espaço real.

Dentro das operações no domínio real, as mais utilizadas são as operações pontuais e as locais.

Nas operações pontuais, cada pixel com um determinado tom de cinza de entrada numa coordenada  $(x, y)$  recebe um tom de cinza modificado, em função da operação matemática estabelecida, na imagem de saída em a mesma coordenada  $(x, y)$  obtendo assim uma imagem de saída melhorada. A Figura 2-23 representa graficamente a operação.

Segundo (Gomes, 2001), as operações locais são menos intuitivas à primeira vista. Estas operações também conhecidas como operações de vizinhança ou filtros espaciais, 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, utilizando uma média ponderada dos pixels da vizinhança e de uma matriz

chamada Kernel que atribui um peso a cada pixel. A Figura 2-24 representa esquematicamente as operações explicadas neste parágrafo.

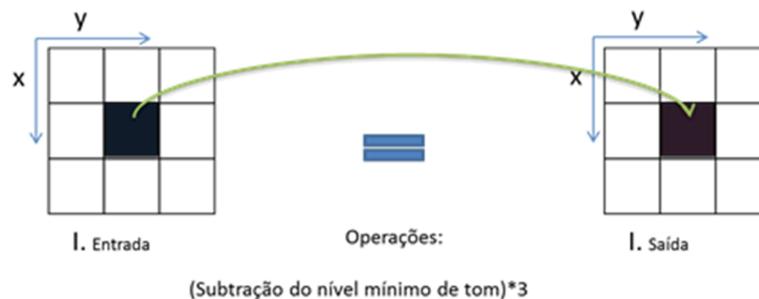


Figura 2-23. Operações pontuais. (Adaptado de: Gomes, 2001).

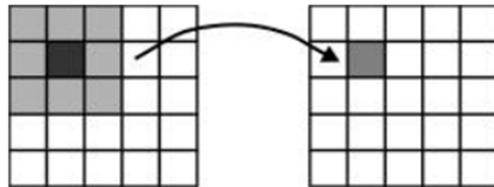


Figura 2-24. Operações Locais. (Fonte: Gomes, 2001).

Alguns tipos de filtros usualmente utilizados nas operações locais são os filtros passa baixa que reduzem detalhes e ruídos e corrigem iluminação irregular, reduzindo os pixels com intensidades muito altas. O filtro Gaussiana e o filtro mediana são exemplos deste tipo de filtro.

O filtro mediana é utilizado na redução de ruído, ordena em ordem crescente os valores dos pixels das vizinhanças e o valor que está no meio da sequência, é atribuído ao pixel filtrado na imagem de saída.

Os filtros passa alta são utilizados para aguçamento de detalhes, estes ressaltam as frequências altas, como as bordas dos objetos nas imagens.

O filtro sigma analisa os pixels das vizinhanças antes de fazer as operações matemáticas. Este filtro é capaz de detectar as bordas e não as altera, só altera as zonas a lado e lado das bordas de objetos fazendo uma ponderação dos pixels.

### **b) Segmentação**

Segundo a definição dada por (Gomes, 2001) nesta etapa se reconhecem regiões de uma imagem como objetos. Esta etapa divide a imagem em regiões e distingue essas regiões como objetos independentes uns dos outros e do fundo.

Esta etapa é considerada crítica e importante na sequência do processamento e análises de imagens porque é aqui onde são identificados os objetos de interesse sobre os quais serão feitas as análises.

Existem várias técnicas de segmentação, a limiarização e a segmentação por contornos são algumas das técnicas mais simples e comumente utilizadas.

A segmentação por faixa tonal, também chamada limiarização ou “thresholding”, 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 (Gomes, 2001).

A discriminação de duas fases na imagem (fundo e objetos) a partir de um único tom de corte pode ser realizada por uma limiarização bimodal. No caso de varias fase, técnicas de limiarização multimodal são mais convenientes.

O passo mais delicado da técnica de limiarização é a escolha dos tons de corte. Esta escolha é feita a partir de observação, por um operador humano, do histograma da imagem onde se podem apreciar os tons de cinza que determinam as fronteiras entre as fases. No entanto, esta escolha intuitiva não é acurada.

Os métodos automáticos para realizar esta tarefa, são uma alternativa, como é o caso da limiarização adaptativa, mas o método é muito sensível a ruídos. O método subdivide a imagem e faz-se a limiarização automática em cada subdivisão, obtendo-se um tom de corte para cada porção na imagem que se interpolam visando obter um tom de corte específico para cada pixel da imagem. Esta técnica é mais sensível às variações locais de intensidade e menos sensíveis a irregularidades de fundo.

A segmentação por contornos detecta as bordas dos objetos, a partir das quais, constrói seus contornos, considerando como objeto a região dentro de um contorno. Esta técnica é mais custosa que a limiarização.

Na pratica, a precisão de qualquer modelo resultante é em grande parte depende da precisão da segmentação inicial e isso vai ser uma função não apenas da resolução de imagem, mas de uma série de fatores, incluindo a falta de contraste entre estruturas e artefatos de movimento, o ruído, assim como, de abordagens semiautomáticas e manuais, interoperador e de diferenças decorrentes da interpretação de imagens.

### **c) Pós-processamento**

Quando o resultado da segmentação não é apropriado, devem-se corrigir as imagens binárias segmentadas com a aplicação de procedimentos de pós-processamento. Esses procedimentos podem ser efetuados através de operações lógicas e operações morfológicas.

As operações lógicas são definidas por (Gomes, 2001) como operações pontuais entre imagens binárias, realizadas por operadores lógicos que varrem as imagens de entrada, gerando uma imagem melhorada de saída.

As operações morfológicas são definidas a partir de duas operações morfológicas: a erosão e a dilatação. As operações morfológicas de erosão que atenuam detalhes ou pequenas partículas, os objetos diminuem de tamanho enquanto os poros são aumentados. As operações morfológicas de dilatação que faz os objetos crescer em área implicando diminuição ou desaparecimento de alguns poros.

A erosão e a dilatação são operações de propagação opostas e sua aplicação deve ser profundamente analisada e/ou estudada em imagens de sistemas complexos como é o caso das rochas carbonáticas, já que estas operações podem emascarar drasticamente dados importantes como a micro porosidade.

Como passo final da sequência de PADI, o bloco ADI recebe a imagem processada e fornece dados numéricos. O DAI é a fase quantitativa do processo.

A análise da imagem se inicia com a extração de atributos. Nela são realizadas medidas sobre a imagem segmentada e/ou sobre a imagem em tons de cinza, extraindo-se atributos característicos. (Martins, 2001).

As medidas podem ser divididas em dois grandes grupos, medidas de campo, sobre a imagem como um todo e as medidas de região que são medidas realizadas sobre os objetos segmentados na imagem visando caracterizá-los individualmente. Na Figura 2-25 apresenta-se os parâmetros que podem ser extraídos em cada grupo.



Figura 2-25. Pós-processamento: Extração de atributos.

### **2.7.3. Geração de malhas a partir de volumes tridimensionais**

Modelagem computacional oferece a perspectiva de fornecer uma melhor visão sobre uma série de problemas. Inicialmente devido às limitações computacionais os estudos de elementos finitos a partir de imagens digitais se desenvolveram utilizando modelagem bidimensional ou assimétrica, mas a fidelidade era relativamente pobre. Com o avanço da tecnologia, grande atenção tem sido focada na geração de modelos de alta fidelidade construídos a partir de imagens digitais.

O processo para gerar malhas de elementos finitos a partir dos volumes 3D de amostras microtomografadas não é um trabalho trivial. O campo de simulação de física tridimensional com base em dados de imagens digitais ainda é relativamente novo e encontra-se na interface entre certo número de áreas. Embora a maioria das técnicas de imagens em três dimensões se desenvolveu inicialmente para serem utilizados como ferramentas de diagnóstico médico, nesta última década companhias comerciais especialistas no tema, como Simpleware Ltd 2000, Ingrain Inc. 2007 e VSG - Visualization Sciences Group 2013, entre outras, adaptaram seus pacotes para aplicações nos campos de pesquisa como as ciências naturais, engenharias, materiais e geologia. Assim o estudo de materiais para a caracterização qualitativa e quantitativa do comportamento microestrutural de uma variedade de materiais naturais e artificiais tem ganhado terreno sendo possível encontrar pesquisas que utilizam este tipo de pacotes. (Yeo, et al., 2008), (Notarberardino, et al., 2008), (Hu, et al., 2009), (Dvorkin, 2009), (Shulakova, et al., 2013) são alguns trabalhos que mostram o anteriormente dito.

As técnicas de geração de malhas em volumes tridimensionais, a partir de imagens digitais, desenvolvidas principalmente desde a matemática e a análise computacional podem ser estudadas em dois grandes grupos, as abordagens tradicionais e as abordagens que serão nomeadas neste capítulo como abordagens recentes.

A geração de modelos tridimensionais é constituída a partir de uma grade cartesiana de dados em escala de cinza que representam a intensidade relativa do sinal digitalizado em todo o volume da imagem.

Após da segmentação, as abordagens tradicionais tem envolvido um passo intermediário de reconstrução da superfície que é seguido pelo uso de projeto assistido por computador (CAD). Frequentemente é necessário o

reposicionamento manual de apenas uma porcentagem pequena de todos os nós da superfície da malha, requerendo interação do usuário significativa. Esse reposicionamento, apesar de ser tratável com modelos pequenos, rapidamente torna-se difícil, demorado e pouco robusto para complexas topologias e geometrias com grandes malhas tridimensionais particularmente em modelos com cavidades internas ou várias peças.

Para solucionar os inconvenientes supracitados, as abordagens recentes partem dos mesmos princípios básicos das abordagens tradicionais em procura de automatizar os processos intermediários após da segmentação, para que a geração e qualidade da malha de elementos finitos sejam menos dependentes do usuário.

Na Figura 2-26 apresenta-se esquematicamente as etapas gerais seguidas para a construção de malhas tridimensionais nas abordagens comentadas acima. Os algoritmos de geração de superfícies e malhas são só alguns dos mais conhecidos.

<b>Malhas Tridimensionais a partir de dados de imagens</b>	
Abordagens tradicionais	Abordagens recentes
<b>Segmentação da imagem</b>	
<b>Reconstrução da superfície</b> (volume 3D) Iteração manual:	
Extração de contornos, Marching Cubes	
<b>Geração de malhas de elementos finitos Tetraédricas/hexaédricas</b>	
Avance Frontal AF	Método voxel
Malhas Delaunay	Algoritmo Marching Cubes

Figura 2-26. Etapas gerais de geração de malhas tridimensionais a partir de dados de imagens.

A primeira etapa para a geração de modelos tridimensionais é a segmentação da imagem como foi discutido nas seções anteriores, no qual se definem os volumes de interesse (VOI).

A segunda etapa do processo é a reconstrução de uma superfície suavizada adequada. Nesta etapa várias técnicas têm sido desenvolvidas. Segundo (Young, et al., 2008), uma dessas técnicas consiste em extrair os contornos de diferentes cortes e gerar uma superfície através destes contornos. Esta técnica é apresentada e descrita por (Meyers, et al., 1992), o leitor interessado pode dirigir-se á referência supracitada para mais detalhe. No entanto, cabe anotar que esta técnica tem embutidas desvantagens consideráveis em especial a perda significativa de detalhes da superfície e não é

muito viável em imagens com topologias complexas. Outra abordagem, frequentemente usada em especial para dados de imagens de alta resolução como as obtidas hoje em dia, é a baseada no algoritmo Marching Cubes desenvolvido por (Lorensen e Cline, 1987). O princípio básico deste algoritmo é subdividir o espaço em uma série de pequenos cubos. O algoritmo instrui a 'marchar' por cada um dos cubos testando os pontos de cada canto avaliando se pertence ou não ao VOI supondo que os vértices devem ser posicionados a aproximadamente ao meio caminho entre um canto interno e qualquer canto externo formando em alguns casos isosuperfícies. Assim, substitui-se o cubo por um conjunto adequado de polígonos que somados geram uma superfície que se aproxima a um conjunto de dados fornecidos. Cada cubo tem oito cantos e, portanto, um potencial de 256 possíveis combinações de "status" de canto. No entanto, o algoritmo pode reduzir a complexidade, tendo em conta as condições de simetria de modo que as combinações são predefinidas no caso dos autores nomeados acima para 15 como pode ser apreciado na Figura 2-27. As esferas ressaltadas pretas indicam os cantos testados

O algoritmo é extremamente robusto e fiel ao VOI segmentado. Além disso, pode, para alguns casos, obter melhoras de suavização na superfície por métodos de interpolação.

Para uma compreensão mais profunda desta técnica, leitor pode dirigir-se a os trabalhos de (Lorensen, et al., 1987 e Young, et al., 2008).

(Young, et al., 2008), afirma que uma das principais desvantagens do algoritmo Marching Cubes é a impossibilidade de tratar casos com mais de dois VOIs. Menciona também, que Young e Beresford, adequaram o algoritmo para lidar com o inconveniente.

Finalmente a superfície resultante extraída é utilizada como o ponto de partida para a geração de malhas tridimensionais não estruturadas utilizando diferentes técnicas e recursos computacionais.

Técnicas de geração de malhas tridimensionais não estruturadas podem ser divididas em dois grandes grupos: a geração de malhas de elementos tetraédricos e a geração de malhas de elementos hexaédricos.

Duas abordagens frequentemente usadas para a geração de malhas tetraédricas são a abordagem de aproximação de avance frontal (AF) e a tetraedrização de Delaunay, (Golias e Dutton, 1997).

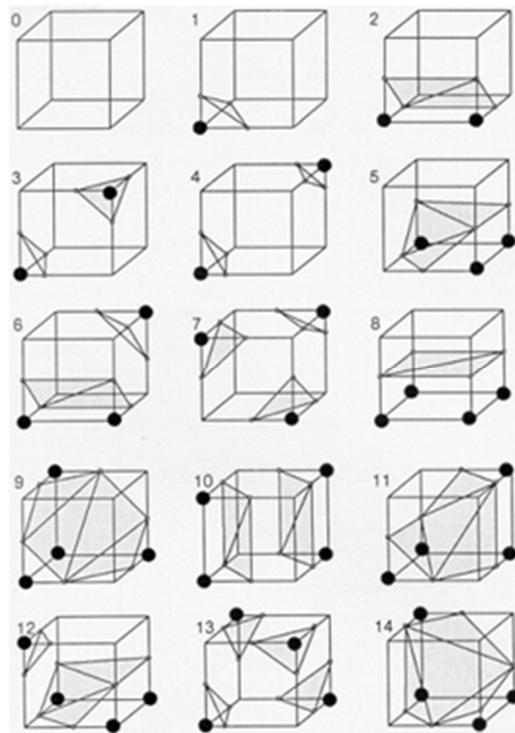


Figura 2-27. Cubos de triangulação. (Fonte: Lorensen e Cline, 1987).

A abordagem AF consiste em adicionar nós à superfície discretizada dentro do domínio gerando uma primeira camada de tetraedros que é seguida por outro conjunto de nós formando uma segunda camada de elementos sobre a primeira e o processo é repetido até avançar por toda a superfície, verificando sempre que a frente de avanço esta unida ao anterior e a qualidade de elementos para evitar colisão. O algoritmo pode ser usado tanto para geração de malhas totais ou para apenas refinar a malha numa região local. Segundo (Young, et al., 2008) umas das principais desvantagens do método é que o sucesso da técnica de geração de malhas com baixa distorção é dependente de uma superfície triangular de alta qualidade inicial com distribuição de tamanho adequado de elementos da superfície.

A abordagem de geração de malhas de Delaunay, segundo (Cabendish et al 1985. ; Shenton & Cendes, 1995) apud (Young, et al., 2008) definem este abordagem como uma técnica que inicia a partir de uma distribuição de pontos dentro de um casco convexo. Um mosaico de Dirichlet do domínio é gerado e constituído por células poliédricas que envolvem cada ponto distribuído e cada uma destas células tem a propriedade de qualquer ponto dentro do poliedro mais próximo do seu ponto de geração do que para o ponto de geração de qualquer outro poliedro. Ligar os pontos gerados através das fronteiras poliédricas resulta

numa Tesselização de Delaunay do volume. Nestas malhas o refinamento pode ser realizado mediante a redistribuição e densidade de pontos. No entanto, uma desvantagem do método deve ser tida em conta que é preciso recuperar a superfície original com precisão já que a qualidade dos elementos pode ser comprometida.

Para uma revisão e referências destas abordagens é recomendado o artigo de (Young, et al., 2008).

O autor supracitado agrega que foram desenvolvidas recentemente técnicas inovadoras de geração de superfícies e malhas que convertem dados de imagem digital em três dimensões, diretamente em malhas adequadas para uso em simulação. Estas técnicas têm várias vantagens importantes, incluindo a capacidade de gerar malhas robustas para topologias de complexidade arbitrária e com qualquer número de materiais constituintes (modelagem multi-parte), proporcionando malhas em que a precisão geométrica de domínios é só depende da precisão de imagem e a capacidade para determinados problemas para modelar heterogeneidade de material, atribuindo às propriedades com base na intensidade do sinal de imagem. Técnicas recentes são abordadas brevemente neste texto.

Os métodos de geração de malhas baseados em grade (Grid) são um significativo avanço porque nestes os processos de geração de malhas podem ser significativamente mais robustos e bastante simplificados, ignorando inclusive o estágio de geração de superfície ou adaptando a geração de malhas para o método de geração de superfície original usando uma teoria de colapso entre o volume e o método de geração de superfície num único processo conforme explicado por (Young, et al., 2008).

Os métodos de geração de malhas baseados em grade são abordados por uma aproximação de “voxel” e por uma adaptação do “marching cubes”.

A aproximação voxel foi proposta por (Keyak, et al., 1990) num trabalho para aplicações médicas e consiste em exportar diretamente os “voxels” que foram devidamente classificados e separados em diferentes máscaras na etapa de segmentação como elementos finitos hexagonais. No entanto, este método tem vantagens e desvantagens, dentro das desvantagens é importante frisar que os modelos gerados têm uma aparência pouco realista e a área da superfície é significativamente superestimada o que pode prejudicar seriamente resultados de simulações baseadas em física.

Em relação à aproximação Marching Cubes, adaptada por (Müller e Rügsegger, 1995) para geração de malhas tendo para cada caso, uma geração

de malha tetraédrica completa do volume de hexahedros é pré-calculada e estabelecida numa tabela, ao invés de determinar triangulações de superfícies só. Esta técnica supera o problema de superfícies de redes escalonadas da aproximação de “voxels”. No entanto, herdar alguns inconvenientes do algoritmo Marching cubes.

Algumas modificações, adaptações, extensões das abordagens são dadas com maior profundidade para o leitor no artigo de (Young, et al., 2008).

#### **2.7.4. Análise de elementos finitos**

O método dos elementos finitos (FEM) originou-se da necessidade de resolver problemas complexos principalmente de elasticidade e análise estrutural em engenharia aeronáutica e civil.

Segundo Donisete, (2005) o método dos elementos finitos foi criado inicialmente por Walter Ritz em 1909, para determinar a solução aproximada de problemas de mecânica dos sólidos deformáveis, a través de funções conhecidas.

Richard Courant em 1943 melhorou o método do Ritz, com a introdução de funções lineares especiais, definidas sobre regiões triangulares com a possibilidade de resolver problemas envolvendo esforços de torção (Doniseta, 2005).

Depois em 1956, Ray William Clough Jr, e colaboradores ampliaram o conceito com muitas semelhanças ao método elaborado por Ritz e melhorado por Courant. Foi Clough, que introduziu pela primeira vez o termo, elemento finito segundo (Donisete, 2005). Os autores se concentraram na rigidez e deformação de estruturas complexas, no qual foi proposta uma discretização da estrutura em elementos lineais tipo barra dos que se conhece a rigidez. Assim, foi criado um sistema de equações baseada nas equações de equilíbrio. O sistema é resumido assim:

$$f = K.u \quad (2.1)$$

Sendo:

u: um vetor de deslocamento que é incógnita

f: vetor de forças

K: matriz de rigidez

Sendo conhecidos os deslocamentos é possível obter as forças nos elementos.

Então, pode-se definir o método de elementos finitos como uma técnica numérica para encontrar soluções aproximadas, num espaço de funções predeterminado, as diferenciais parciais (PDE) e seus sistemas, estabelecidos para relacionar variáveis de campo fundamentais dentro de um domínio determinado e que caracterizem o comportamento físico do problema considerado. Essas equações devem satisfazer condições de restrição das variáveis fundamentais e suas derivadas nas fronteiras do domínio.

A técnica converte um problema definido em termos de equações diferenciais em um problema em forma matricial com um sistema de equações proporcionando um resultado correto para um número de pontos e interpola a solução ao resto do domínio do problema. Segundo (Gattas e Martha, 1992), a formulação matricial do Método dos Deslocamentos de estruturas particionadas equivale ao MEF na sua formulação em deslocamento, sendo o objetivo obter o campo de deslocamentos no domínio de interesse que satisfaça às condições de equilíbrio de tensões e deformações.

A técnica divide o problema em um número elevado de subdomínios associados à definição de espaços de interpolação contínuos nos subdomínios elementares, denominados <Elementos finitos>. Este processo de divisão do domínio é conhecido como discretização. Cada elemento consta de pontos representativos denominados <nós> que podem ser adjacentes caso pertençam ao mesmo elemento ou pertençam a vários elementos se é um nó de fronteira. O conjunto de elementos considerando suas relações é denominado <malha> sob a que são realizados os cálculos. Segundo (Gattas e Martha, 1992), os problemas analisados podem variar desde quadros planos, distribuição de tensões em meios bidimensionais como chapas, sólidos com simetria axial, placas, cascas, até sólidos tridimensionais. No entanto estes tipos de análises se diferem quanto à natureza da geometria do modelo estrutural (modelo matemático) adotado.

A geração da malha é realizada usualmente em programas computacionais em uma etapa nomeada Pré-processo. Em cada nó da malha é definido um conjunto de variáveis incógnitas conhecidas como graus de liberdade.

Geralmente a análise de elementos finitos é programada computacionalmente para calcular o campo de deslocamentos e através de relações cinemáticas e constitutivas de deformação e tensão quando se trata de

problemas de mecânica de meios contínuos e adaptável a problemas de transmissão de calor, mecânica de fluidos ou campo eletromagnético. O método permite cálculos complexos em duas ou três dimensões e tem a propriedade de convergência, isto é, se são consideradas partições de elementos finitos sucessivamente mais finas ou ordens polinomiais de interpolação mais elevadas a solução numérica converge mais rapidamente para a solução exata do sistema de equações.

Para resolver um problema definido por equações diferenciais mediante elementos finitos e as condições de contorno é requerido converter o problema de cálculo diferencial em um problema de álgebra linear mediante o processo geral:

- I. A reformulação do problema em forma variacional.
- II. A discretização do domínio, que de maneira geral é a divisão mediante partição do domínio de variáveis independentes em subdomínios, nomeados elementos finitos, Para sistematicidade, são definidas formas geométricas básicas regulares para a discretização do domínio, chamadas de elementos mestre, que podem ser mapeadas para formas irregulares de forma a modelar todo o domínio. Em análise 2D como elemento mestre toma-se um triângulo retângulo ou como um quadrado, no entanto, nos análises 3D o subdomínio de referência é tipicamente um tetraedro ou um hexaedro. Junto com a divisão se constrói um espaço vectorial de dimensão finita, nomeado espaço de elementos finitos e é definido sobre cada elemento no espaço funcional de dimensão finita, formado por polinômios de grau baixo, sendo a solução numérica uma combinação linear neste espaço vectorial. Segundo (Gattas e Martha, 1992), estes polinômios podem ser escritos em função de valores do espaço funcional nos vértices (nós) destes elementos e os valores (incógnitas do problema discreto) são determinados através da minimização de um funcional associado à equação diferencial.
- III. A obtenção de um sistema de equações finitas. É obtida uma projeção do problema variacional original no espaço de elementos finitos obtidos na discretização, dando lugar a um sistema de equações finitas com um número elevado de incógnitas que podem geralmente ser resolvidas mediante métodos de álgebra linear.

- IV. O cálculo numérico da solução do sistema. A discretização de elementos finitos ajuda a construção de algoritmos simples, conseguindo além que a solução pelo método seja geralmente exata no conjunto de pontos. Quanto mais fina seja e o espaço funcional finito sobre cada elemento esteja bem escolhido a solução numérica obtida aproximara melhor á solução original. Destacando que a solução por FEM coincide com a solução exata só em um número finito de pontos, nos nós. Nas regiões que não são nós a solução aproximada é obtida recorrendo á interpolação a partir dos resultados dos nós.

Para converter o problema de cálculo diferencial em um problema de álgebra linear é possível também à utilização dos métodos variacionais.

Na formulação variacional busca-se uma solução aproximada de uma equação diferencial em um espaço de funções apropriado de dimensão finita. A solução aproximada é uma projeção da solução exata nesse subespaço e pode ser representada como uma combinação linear de um número finito de funções conhecidas, que formam a base deste subespaço. As incógnitas do sistema de equações algébricas resultante do processo de discretização são os coeficientes desta expansão linear. O que faz o FEM especialmente atrativo é o fato de essas funções base serem diferentes de zero em apenas uma pequena parte do domínio mais precisamente em cada elemento ou subdomínio elementar, e descrever sem dificuldades adicionais a solução aproximada em geometrias variadas.

Desde o ponto de vista computacional as etapas para realizar os cálculos mediante o FEM são:

1. Pré-processamento
2. Processo ou cálculo
3. Pós-processamento

Na etapa de pré-processamento é definida a geometria, geração da malha, condições de contorno, atribuição de propriedades dos materiais e definição de condições iniciais. Aos nós é atribuída uma densidade do material dependendo do nível de tensão ou outra propriedade. Atendendo uma densidade de malha maior nos pontos de interesse, inflexões, fraturas, singularidades, e áreas com detalhes complexos.

Esta etapa cumpre basicamente com tarefas como:

1. Discretizar o contínuo em linhas imaginárias ou superfícies em um número de elementos finitos mediante algoritmos de geração de malhas.
2. Supor que os elementos estão unidos por nós e o deslocamento dos nós são incógnitas fundamentais do problema.
3. Tomar um conjunto de funções que definam o campo de deslocamentos em cada elemento, que sejam função exclusiva dos deslocamentos nodais desse elemento.
4. As funções de deslocamento definiram o estado de deformação do elemento em função dos deslocamentos nodais.
5. As deformações junto com a modelagem constitutiva do material definem o estado de tensões do elemento e seus contornos.
6. É determinado um sistema de forças nos nós que cumpra com as condições de equilíbrio de tensões, resultando uma relação entre força e deslocamento,
7. Na etapa de processo o cálculo do resultado do pré-processo gera um conjunto de  $N$  equações e  $N$  incógnitas tratadas com diferentes tipos de algoritmos de resolução de sistemas de equações em função do tipo de problema. Esta etapa proporciona valores no conjunto de nós da malha.

Os tipos de problemas tratados são abordados em dois grandes grupos, quase estáticos e evolutivos. Os problemas quase estáticos ou simples, não dependem do tempo, sendo um problema linear, diferente dos problemas evolutivos ou não lineares nos quais as magnitudes variam ao longo do tempo. Para este último, métodos implícitos e métodos explícitos são utilizados para discretizar o tempo, nos quais só se considera uma solução para certo número de instantes. A diferença entre um instante em que se procura a solução e o seguinte é denominado passo do tempo.

Na etapa de pós-processo são calculadas as magnitudes derivadas dos dados obtidos nos nós e é determinado o erro de aproximação.

Algumas vantagens da realização do método por computador são a possibilidade de fazer análises em grandes estruturas que envolvam um grande número de operações para sua resolução em um tempo curto e que seriam inabordáveis manualmente e a diminuição dos riscos de erros operativos.

Uma das principais limitações do método por meio computacional é que o método calcula soluções numéricas concretas adaptadas a dados particulares de

entrada e não é possível fazer uma análise de sensibilidade para avaliar a variabilidade da solução se os parâmetros de entrada variam.

### **2.7.5.**

#### **Rochas carbonáticas sob o ponto de vista de simulação**

No caso da indústria do petróleo, os esforços de caracterização de reservatórios carbonáticos enfocam principalmente nas propriedades do reservatório tais como permeabilidade, difusividade, porosidade, pressão capilar, entre outras. Não é surpresa encontrar na literatura um número importante de pesquisas sobre o tema que utilizam a simulação numérica, trabalhos como os propostos por autores como (Arns, et al., 2005), são um exemplo. No entanto, com o crescimento recente da importância destas rochas, conforme mencionado ao longo da dissertação, as dificuldades para perfurar encontradas, e pouco conhecimento sobre as mesmas, tem levado os pesquisadores a estudar parâmetros igualmente relevantes como são as propriedades elásticas e mecânicas.

Descobrir relações precisas entre estrutura de poros e propriedades elásticas de rochas porosas é um problema de longa data em geofísica afirma Arns, et al., (2002). Além disso, caracterizar as propriedades elásticas dos meios porosos é crítico na indústria do petróleo, agrega Jouini, et al., (2011, 2012) e no caso das rochas carbonáticas os modelos comumente utilizados para prever propriedades mecânicas têm um poder limitado.

Uns dos pioneiros em analisar as dependências entre as propriedades mecânicas e estruturais foram Biot, (1962) e Berryman, (1992), apresentaram uma teoria analisando o impacto da porosidade total nas propriedades elásticas efetivas. No entanto, o desenvolvimento desta teoria foi fundamentado para rochas com distribuição homogênea dos espaços porosos, porém desconsidera sua morfologia. As técnicas de descrição de meios porosos a partir de imagens foi inicialmente desenvolvida em conjuntos de seções de imagens 2D seriadas combinadas por métodos que demandavam muito esforço e tempo para construir a imagem 3D. A final dos 80 e princípios dos 90 sistemas de aquisição de imagens em 3D começaram a tomar uma maior dinâmica partindo desde a medicina para alguns outros ramos da ciência. A caracterização da estrutura e também da microestrutura da rocha teve avanços importantes com o desenvolvimento da microtomografia computadorizada (CT), Flannery et al., (1987) produziram representações 3D da microestrutura da rocha. Segundo

(Jouini e Vega, 2011), (Garboczi e Day, 1995) introduziram a metodologia para prever propriedades elásticas baseados em imagens digitais representando um material com um número de diferentes fases, sem qualquer restrição na morfologia do espaço poroso. Com o desenvolvimento dos métodos computacionais (Roberts e Garboczi, 2000), resolveram as equações de elasticidade computacionalmente diretamente em modelos digitalizados da microestrutura. Assim, com as simulações numéricas foi possível prever as propriedades elásticas usando as propriedades geométricas da fase sólida e da fase porosa, identificadas a partir de imagens da rocha obtidas de tomografias computadorizadas de raios-X. Com os avanços de tecnologia computacional e das velocidades de processamento tornou-se possível lidar com inúmeros cálculos em modelos 3D e obter resultados cada vez mais úteis e realistas.

Arns, et al., (2002), propôs o uso da metodologia de (Garboczi e Day, 1995) para prever propriedades elásticas de amostras cúbicas de arenitos em condições secas e saturadas baseado em microestruturas digitalizadas de altas resoluções adquiridas através da tomografia computadorizada de raios-X. Nesse trabalho os resultados obtidos das simulações revelaram que as propriedades elásticas efetivas simuladas estão em boa concordância com as medições experimentais e com dados analíticos calculados com as equações de Gásmann para arenitos com uma distribuição relativamente homogênea do espaço poros. Nesse mesmo trabalho é importante destacar a abordagem da escolha do volume digital representativo. Os autores tomando como referência a Auzeais et al., (1996), quem descobriu que os cubos de tamanho muito maior do que  $1 \text{ mm}^3$  foram necessárias para estimar a permeabilidade de fluido com uma precisão aceitável, encontraram uma boa concordância entre as propriedades geométricas de um volume de  $3,09 \text{ mm}^3$  com o núcleo total de 7 vezes esse volume.

Knackstedt, et al., (2009) estudou dois tipos de carbonatos a partir da geração e análise de imagens em 3D, caracterizando a estrutura dos poros, encontrando que as análises da porosidade são consistentes com os dados experimentais. Dados de velocidade acústica, a conectividade dos poros, relações de permeabilidade e porosidade são derivadas diretamente sobre os dados de imagem através de simulação numérica e comparados com os dados medidos na mesma rocha encontrando boa correspondência.

Jouini et al., (2011), estimam propriedades elásticas (módulo volumétrico (k) e módulo cisalhante (G)) para rochas carbonáticas usando imagens de microtomografia de raios-X e métodos estáticos de simulação no método de

elementos finitos (FEM) diferenciado a equação elasticidade e resolvendo numericamente depois de gerar nós e elementos sobre a microestrutura discretizada obtida da segmentação. O método de simulação estática consistiu na aplicação de deslocamentos uniformes sobre a imagem da estrutura, o que gera tensões locais após da atribuição de módulos volumétricos e de corte para cada elemento sólido ou fluido.

As amostras compostas principalmente de calcita e com porosidades variando entre 2,4 e 34,5 % foram estudadas pelos autores. A Figura 2-28, apresenta a comparação de resultados de propriedades elásticas tais como o módulo volumétrico (K) e o módulo cisalhante (G), obtidos por simulação e medidos em testes de laboratório em três condições de saturação, para dois das quatro amostras. Os resultados apresentam boa concordância devido à homogeneidade das amostras de carbonatos.

Os mesmos autores, (Jouini e Vega, 2012), além do uso do método de elementos finitos (FEM), propõem pela primeira vez o uso de métodos de elementos discretos (DEM) usando dois modelos de contatos, Hetzian e Hookean para estimar propriedades elásticas a partir de imagens de microtomografia de raios-x de amostras de um reservatório carbonático do Oriente Médio. O modelo DEM simula um conjunto de esferas que interagem de acordo com um modelo constitutivo de contato. Leis específicas de contato podem ser aplicadas para simular os vínculos entre essas esferas. O comportamento global das propriedades da rocha pode ser avaliado através das contribuições dessas partículas sob os processos de carga ou descarga revelando, movimento, deslocamento, atrito e rotação entre elementos. O método de elementos discretos pode ser prático e realista para alguns meios porosos como os arenitos, mas não é realista em carbonatos, uma vez que não leva em conta a elevada complexidade de grãos e das geometrias do espaço poroso. Portanto os autores apresentaram um desenvolvimento de um algoritmo de pré-processamento, a fim de melhorar a estimativa da forma dos grãos para simular posteriormente com ajuda do software LAMPS que propõe os dois modelos de interação ou contato entre partículas, nomeados acima.

Os resultados foram comparados com dados experimentais apresentando uma relativa concordância em amostras com distribuição do espaço poroso homogêneo (S1 e S2) e erro maior em amostras heterogêneas (S3 e S4). Além os autores encontraram que o modelo Hetzian é mais apropriado para as rochas carbonáticas que o modelo Hookean.

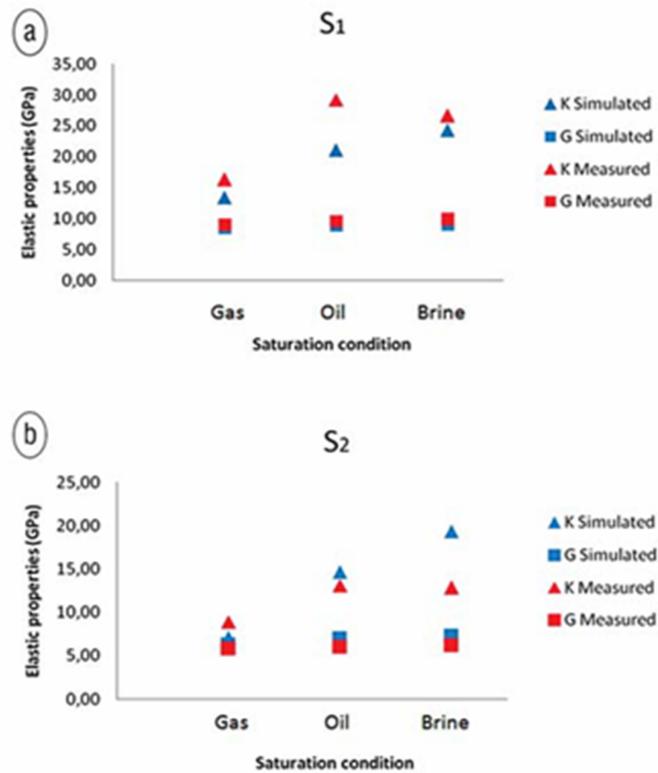


Figura 2-28. Resultados de propriedades elásticas para carbonatos homogêneos sob três condições de saturação. (Adaptado de: Jouini, et al., 2011).

Os resultados do estudo são expostos na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3. Resultados aplicando tanto o modelo de Hetzian como o modelo de Hookean respectivamente e na Figura 2-29 apresentam-se à comparação entre dados experimentais e simulados (FEM e DEM) dos módulos volumétrico e cisalhante. A cor vermelha denota medições de laboratório, a cor azul denota propriedades simuladas com base no modelo Hetzian para o DEM e a cor púrpura denota as propriedades simuladas baseados em MEF.

Tabela 2.2. Comparação de módulos simulados e medidos. Usando o modelo Hetzian. (Adaptado de: Jouini, et al., 2012).

	Módulo Volumétrico (GPa)		Módulo Cisalhante (GPa)	
	Medidas Lab.	Simulação usando DEM	Medidas Lab.	Simulação usando DEM
S1	13,36	16,82	8,55	5,17
S2	7,06	3,42	6,23	2,02
S3	11,7	0,68	8,4	0,1
S4	11,13	1,34	7,77	0,08

Tabela 2.3. Comparação de módulos simulados e medidos. Usando o modelo Hookean. (Adaptado de: Jouini, et al., 2012).

	Módulo Volumétrico (GPa)		Módulo Cisalhante (GPa)	
	Medidas Lab.	Simulação usando DEM	Medidas Lab.	Simulação usando DEM
S1	13,36	17,33	8,55	5,43
S2	7,06	1,51	6,23	0,02
S3	11,7	0,63	8,4	0,37
S4	11,13	0,01	7,77	0,12

No entanto, e concordando com o dito por (Shulakova, et al., 2013) apesar dos avanços em tecnologia de aquisição e manipulação de imagens e algoritmos numéricos, são escassas as publicações de simulação numérica das propriedades elásticas a partir de microtomografia computadorizada para rocha e mais ainda para rochas carbonáticas, e raramente os detalhes técnicos são fornecidos. Além disso, até agora não foram reportadas previsões precisas das propriedades dos carbonatos a partir de microtomografia. Segundo (Shulakova, et al., 2013) normalmente, os módulos elásticos numericamente simulados de microtomografia superestimam as medidas. Razões aparentes para esta discrepância entre módulos medidos e os simulados são uma mineralogia complexa que implica a fase sólida da rocha e compressibilidade dos contatos (cimento) grão-a-grão ou cristal a cristal que por enquanto não conseguem ser diferenciados no microtomógrafo. No entanto, se o problema pudesse ser resolvido e pudesse ser identificada a zona de contatos, esta tem características a escalas nano específicas que ainda não é tida em conta nas abordagens numéricas baseadas na teoria elástico-linear.

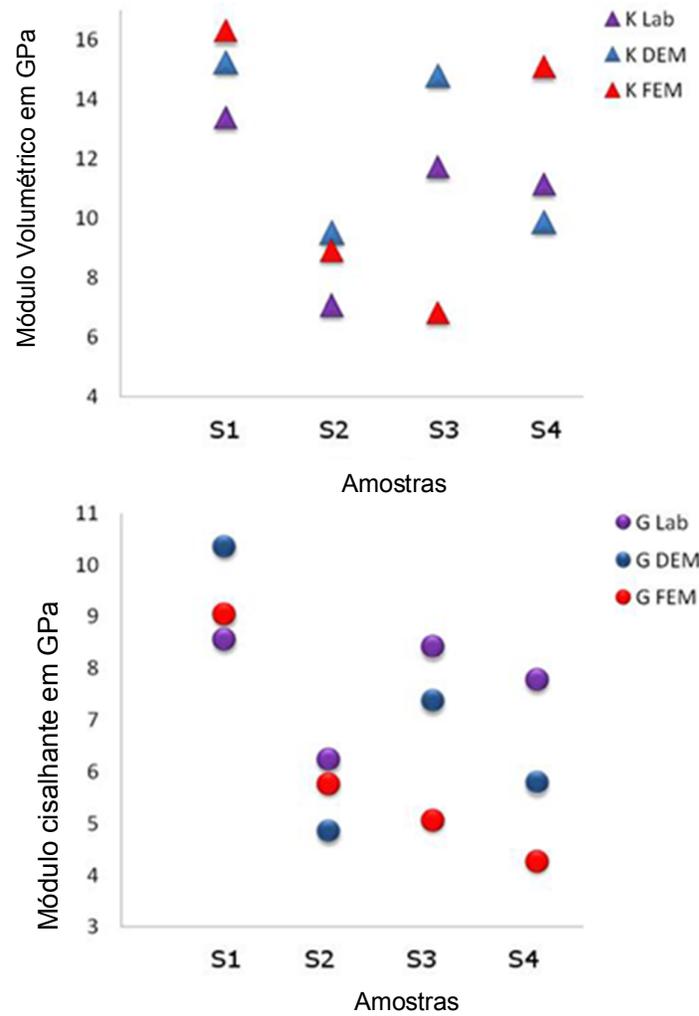


Figura 2-29. Comparação entre módulos volumétrico e cisalhante experimental e simulado (FEM e DEM). (Adaptado de: Jouini, et al., 2012).