

Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências

**ANÁLISE GEOLÓGICO GEOTÉCNICA DE SEDIMENTOS  
CALCÁRIOS MARINHOS**

Igor Haruiti Hirayama

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marinho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2017/24)

SÃO PAULO

2017

Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências

**ANÁLISE GEOLÓGICO GEOTÉCNICA DE SEDIMENTOS  
CALCÁRIOS MARINHOS**

---

Igor Haruiti Hirayama

---

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marinho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2017/24)

SÃO PAULO

2017

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho, fruto não apenas da graduação, mas de toda a experiência vivida até agora, não poderia ser finalizado sem que todas as peças estivessem no tabuleiro. Cada peça permitiu que eu pudesse terminar essa partida, exercendo sua devida função. Dando mérito as peças, agradeço ao rei e a rainha, Jorge e Walkíria, por toda a estrutura, ensinamento direto ou indireto, para que eu pudesse chegar até aqui; aos meus bispos, Caval, Renan, Maick e Cello por me acompanharem lado a lado no dia a dia da escola até os dias de hoje; aos meus cavaleiros Osmir, Rui, Guizon, Guizinho e Danone, por cavalgarem comigo nos momentos fora de estudo, desbravando cada experiência da infância e adolescência; As minhas torres, Jonathan e irmãos caninos e felinos, por estarem sempre lá para me apoiar emocionalmente. Por mais difícil que cada situação parecesse, um Roque era sempre possível com eles; aos meus peões, que são tão importantes quanto às outras peças, Xoelman, Kra, Grega, Walter, Judeu, Intrudida, Tati, Fusketa e tantos outros, que fizeram a linha de frente comigo, permitindo que eu avançasse até o objetivo.

Agradeço aos meus parceiros de intercâmbio, Karl, Camille e Karine, que permitiram uma experiência única e uma evolução pessoal indescritível em tão pouco tempo.

Agradeço também ao meu orientador Fernando Marinho, que me guiou durante todo este projeto; ao Paulo Gianinni e Rafael Casati, que me orientaram em outros aspectos; aos amigos que me apoiaram e me carregaram durante o ano, Pinga, Mila, Maria, Bagô e Francy.

Agradeço a Aline, Bett, Antônio, Rodrigo e Shadiyah que me ajudaram de várias maneiras ao longo do ano, tanto no trabalho quanto fora dele...

Espero que todos possam estar presentes para quando o tabuleiro estiver pronto e outra partida for começar. Caso contrário... Deem-me dinheiro.

*Ohne euch wäre ich nicht.*

*“Só vale a pena ser imortal se cada segundo for eterno”*

*- Igor*

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
RESUMO .....	10
ABSTRACT .....	11
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. METAS E OBJETIVOS .....	9
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
3.1 Sedimentos carbonáticos modernos.....	10
3.1.1 Carbonatos marinhos de água rasa.....	10
3.1.2 Carbonatos marinhos de água profunda.....	10
3.1.3 Carbonatos de bacias evaporíticas.....	11
3.1.4 Carbonatos de água doce, de lagos e fontes.....	11
3.1.5 Carbonatos eólicos.....	11
3.2 Composição mineralógica dos carbonatos .....	12
3.2.1 Minerais carbonáticos.....	12
3.2.2 Minerais terrígenos e outros componentes raros .....	12
3.2 Principais propriedades físicas .....	13
3.2.2 Angularidade .....	13
5.2.2 Friabilidade .....	15
5.2.3 Cimentação .....	17
5.3 Comportamento mecânico de areias carbonáticas .....	17
5.3.1 Compressibilidade .....	17
5.3.2 Comportamento de cisalhamento .....	19
4 Materiais e Métodos .....	20
4.2 Caracterização do material .....	20
4.2.2 Teor de umidade e densidade dos grãos .....	21
4.2.3 Análise Óptica .....	21
4.2.4 Análise de Carbonato por HCl .....	22
4.3 Análise geotécnica .....	24
4.3.2 Análise granulométrica .....	24
4.3.3 Ensaio de Adensamento.....	25
4.3.4 Ensaio de Cisalhamento Direto .....	27
5 Resultados.....	29
5.2 Caracterização inicial do material .....	29
5.3 Análise óptica .....	29
5.4 Teor de carbonato.....	31
5.5 Análise granulométrica .....	31
5.6 Adensamento .....	34
5.7 Cisalhamento direto.....	35
8 Interpretação e Discussão dos Resultados .....	37
8.1 Discussão da análise óptica e teor de carbonato.....	37

8.2	Discussão granulometria .....	40
8.3	Discussão adensamento.....	44
8.4	Discussão cisalhamento direto .....	44
9	Conclusões .....	45
10	Referências Bibliográficas .....	47

## ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Gradação de Russel e Taylor (1937) e Pettijohn (1949)</i> .....	14
<i>Tabela 2 - Tabela de gradação de Powers (1953)</i> .....	14
<i>Tabela 4: Valores dos diâmetros de grãos usados para a separação de cada fração granulométrica</i> .....	22
<i>Tabela 5 - Tabela de esforços utilizados para cada amostra no ensaio de adensamento (* o ensaio completo vai até 2355 kPa; ** reutilização da amostra 6)</i> .....	26
<i>Tabela 6 - Tabela valores de tensão e número de idas realizadas para o ensaio de cisalhamento direto</i> .....	28
<i>Tabela 7 - Resultado de umidade do material mantida no laboratório</i> .....	29
<i>Tabela 8 - Porcentagem de componentes da fração de maior que 2 mm da areia</i> .....	30
<i>Tabela 9 - Resultado do ensaio de ataque de HCl na areia, dando o valor médio do teor de carbonato</i> .....	31
<i>Tabela 10 - Valores em porcentagem de peso passado por cada peneira</i> .....	31
<i>Tabela 11 - Tabela alterada de Scholle (2003) com a mineralogia composicional dos esqueletos de organismos. X significa comum e O significa raro</i> .....	39
<i>Tabela 12 - Tabela com os valores de quebra total (Bt) e quebra relativa (Br) para cisalhamento direto. A quebra potencial (Bp) é a área do gráfico da curva base, que tem valor de 0,89</i> .....	43
<i>Tabela 13 - Comparação do ângulo de atrito neste estudo com o de outros autores, mostrando a diferença entre os valores do parâmetro</i> .....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1- Escala de arredondamento e esfericidade de Power (1953).</i>	15
<i>Figura 2 - Exemplo de gráfico de curva granulométrica onde se pode medir a quebra potencial. A unidade definida para a medição do gráfico é um ciclo de log na base dez igual a um.</i>	16
<i>Figura 3 – Nova curva granulométrica após o esforço junto com a curva granulométrica original. A área entre as duas é a quebra total do material para o devido esforço utilizado.</i>	16
<i>Figura 4 - Gráficos de Compressão Isotrópica (Coop e Airey, 2003), comparando (a) areias carbonáticas de Dogs Bay e (b) areias quartzosas de Ham River. A inclinação de NCL é mais acentuada em (a), indicando maior compressibilidade.</i>	18
<i>Figura 5 - Gráfico representando dois testes em uma mesma amostra (Coop e Airey, 2003). O gradiente no segundo carregamento é menor devido a maior concentração de finos e menor proporção de vazios causadas pelo esmagamento de grãos.</i>	19
<i>Figura 6 - Influência da mudança volumétrica (Coop e Airey, 2003). A, B, C e D mostram diferentes estados volumétricos para areias carbonáticas.</i>	20
<i>Figura 7: Lupa estereoscópica utilizada pertencente ao Laboratório de Petrologia Sedimentar – IGC</i>	22
<i>Figura 8 – (A) Alíquotas separadas em dois béqueres na placa aquecida (B) de 60° a 70° C e sendo atacadas por ácido HCl.</i>	24
<i>Figura 9 - Mesa vibrante e pesagem do material durante granulometria.</i>	25
<i>Figura 10 - Prensa de adensamento utilizadas (Laboratório de Mecânica dos Solos da Engenharia Civil - Poli - USP)</i>	27
<i>Figura 11 - Da esquerda para a direita: (A) material na caixa de cisalhamento, (B) máquina de cisalhamento e (C) material retirado da máquina de cisalhamento. Ensaio realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – USP.</i>	28
<i>Figura 12 - Componentes da areia em cada fração granulométrica</i>	29
<i>Figura 13 - Gráfico com as curvas granulométricas de cada ensaio sobrepostas entre si para comparação.</i>	32
<i>Figura 14 - Gráficos de granulometria de adensamento de 20 kPa até ensaio completo 2.</i>	33
<i>Figura 15 - Gráficos de granulometria de cisalhamento direto de 50 kPa e 500 kPa</i>	34
<i>Figura 16 - Curva de adensamento do ensaio completo (linha vermelha) e ensaio completo 2 (linha preta).</i>	35
<i>Figura 17 - Gráficos de cisalhamento direto da 1ª Ida e Residual, com seus respectivos gráficos de deslocamento vertical por deslocamento horizontal (em mm).</i>	36
<i>Figura 18 - Envoltórias de resistência para tensão cisalhante 1ª Ida (preto) e residual (azul)</i>	36



<i>Figura 19 - Diferentes tipos de bioclastos. A e B são bivalves e halimedes, com formas mais arredondada e pastilhada e C e D com formas mais prismáticas e angulosas, respectivamente de equinodermos e aglutinantes. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 20 - Areia calcária antes (à esquerda) e depois (à direita) do ataque de ácido clorídrico. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21 - Comparação granulométrica entre as curvas relacionadas ao adensamento e a curva base. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 22 - Comparação granulométrica entre as curvas relacionadas ao cisalhamento direto e a curva base. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 23 - Gráfico com as curvas granulométricas geradas de uma mesma amostra, ensaiada duas vezes por completo no adensamento (2355 kPa). ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24 - Mudança no valor de quebra relativa para a mesma tensão, mudando apenas o estado do material. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 25 - Gráfico de Quebra Relativa por Tensão Cisalhante, mostrando que não há relação direta clara entre os dois parâmetros. ....</i>	<i>43</i>

## RESUMO

O trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros geológicos geotécnicos de areia calcária proveniente da Praia do Paiva, Pernambuco - Brasil, utilizando informações literárias e ensaios de laboratório. O principal parâmetro analisado foi a friabilidade do material, que é o parâmetro considerado como mais importante por diversos autores. O índice utilizado para analisar a friabilidade e relaciona-la com os esforços usados nos ensaios foi a quebra relativa (Br) definido por Hardin (1985). Os ensaios de laboratório escolhidos para análise foram granulometria, adensamento edométrico e cisalhamento direto. Em paralelo, foram feitas análises ópticas em lupa estereoscópica, para identificar os principais grãos terrígenos e biogênicos, e ataque de ácido clorídrico para a medição do teor de carbonato e classificar a areia com os critérios de Clark e Walker (1977). A quebra relativa foi medida nos ensaios de adensamento e cisalhamento direto. Para o adensamento direto foi possível ver uma relação entre o esforço e a Br, diferente do que ocorre com o cisalhamento direto, não apresentando clara relação entre os dois. A compressibilidade do material é alta devido ao alto índice de vazios (1,06 a 0,79) e o ângulo de atrito é condizente quando comparado ao encontrado na literatura (35°). A areia foi classificada como calcária, com teor de 34,2% de  $\text{CaCO}_3$  e apresenta grande diversidade de táxons, com os principais representantes sendo algas verdes (halimeda), bivalves, gastrópodes, corais, artrópodes, entre outros.

**Palavras-chave:** areia calcária, índice de friabilidade, análise geológico geotécnica.

## **ABSTRACT**

The scope of this study is to analyse the geological geotechnical parameters of calcareous sand from Praia do Paiva, Pernambuco - Brazil, using literary information and laboratory tests. The main parameter analyzed was the crushability, which is considered as the most important by many authors. The index utilized to analyse the crushability and relate it to the stresses used during the laboratory tests was the relative breakage (Hardin, 1985). The chosen laboratory tests for the analysis were granulometry, edometric compression and direct shear. Besides these, optical analyses using stereoscopic magnifier were made to identify the main biogenic and terrigenous components and also analysis of carbonate content using hydrochloric acid to classify the sand using Clark and Walker (1977) criteria. The Relative Breakage was measured in the edometric compression and direct shear. For the edometric compression, it was possible to observe a relation between the stresses and Br, which differs for the direct shear, that doesn't show any correlation between these two. The compressibility of the sand is high due to the high void ratios (1,06 to 0,79) and the angle of friction is consistent to other data in other studies (35°). The sand was classified as calcareous (34,2% of CaCO<sub>3</sub>) and shows high diversity of taxons within its content, with the main representatives being green algae (Halimeda), bivalves, gastropods, corals, arthropods, among others.

**Keywords:** calcareous sand, crushability index, geological geotechnical analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sedimentos calcários marinhos cobrem cerca de 40% do oceano, principalmente nas áreas subtropicais (Holmes, 1978), sendo a melhor alternativa para a utilização em obras locais, mesmo sendo material com características geotécnicas diferentes do material usual. A principal diferença deste material dos sedimentos silicáticos está relacionada às características físicas e químicas como facilidade de quebra de grãos (friabilidade), angularidade e cimentação, além de características mecânicas como o comportamento relacionado à compressibilidade e resistência ao cisalhamento, que podem gerar problemas de deformações elevadas, rastejo e suscetibilidade a liquefação. Desses parâmetros, talvez o mais importante seja a friabilidade, pois a facilidade de quebra de grãos já altera o comportamento mecânico, causando grande diferença geotécnica entre o material *in situ* e o material lançado na obra. Contudo, Hoff & Kolff (2012) mostram que este material tem sido utilizado com sucesso, principalmente no Oriente Médio. A utilização de sedimentos carbonáticos exige um projeto que considere suas características, exigindo uma boa avaliação e gerenciamento dos parâmetros que influenciam no comportamento mecânico dos sedimentos carbonáticos para que não haja problemas na obra. No Brasil, o litoral nordestino é rico nesse material. Tendo essa ocorrência em território brasileiro, é interessante para o país saber como se comporta do ponto de vista geotécnico este material, evitando problemas durante as obras.

## 2. METAS E OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- Avaliar as características geológicas e geotécnicas de sedimento calcário marinho da Praia do Paiva, Pernambuco – BR.
- Avaliar experimentalmente os aspectos mais importantes a serem considerados em projetos que utilizarão esse tipo de sedimento.
- Comparar os dados obtidos com parâmetros encontrados na literatura existente sobre o tema.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Sedimentos carbonáticos modernos

As rochas sedimentares carbonáticas representam de 25% a 35% das seções estratigráficas e dos diversos ambientes deposicionais modernos há cinco tipos principais com correspondentes no registro geológico pretérito (Suguio, 2003): carbonatos marinhos de água rasa; marinhos de água profunda; de bacias evaporíticas; de água doce, de lagos e fontes; eólicos. A maioria dos sedimentos é pertencente à primeira categoria (marinho de água rasa) e os distribuídos mais amplamente são os marinhos de água profunda. Os sedimentos das outras categorias têm menor importância em questão de volume no registro geológico.

##### 3.1.1 *Carbonatos marinhos de água rasa*

Apesar de terem maior representatividade geológica no registro geológico, hoje ocorrem em locais restritos da Terra. Como exemplo desse ambiente tem o Grande Banco das Bahamas na Flórida (EUA). Esse local é recoberto por uma lâmina de menos de dez metros de profundidade e a maior parte dos sedimentos são formados por areias calcárias (esqueletos de organismos e oólitos), com uma menor proporção de lama calcária e rochas recifais. Outros exemplos desse ambiente estão na costa oeste da Austrália, em Queensland e no litoral brasileiro na costa da Bahia, composta por recifes de corais da região de Abrolhos (Leão, 1999) e sua história holocênica (7000-1500 anos A.P.) foi influenciada por níveis marinhos superiores ao encontrado atualmente.

##### 3.1.2 *Carbonatos marinhos de água profunda*

As duas formas principais desses carbonatos são turbiditos e depósitos pelágicos. Os turbiditos são menos extensos atualmente apesar de terem maior expressão no registro geológico pretérito. Os depósitos pelágicos se estendem por cerca de 1/3 do mar atual, com vasas com mais de 30% de  $\text{CaCO}_3$ , apesar de serem mais raros no passado.

Essas vasas podem ser formadas por pterópodes (gastrópodes), que ocorrem a 3600 metros de profundidade, e por globigerina (foraminíferos), distribuídos a 2000 metros de profundidade, em regiões de baixa latitude, as quais as águas têm salinidade e temperatura mais alta.

Em profundidades maiores que 4000 metros, o carbonato sofre mais dissolução do que sedimenta e/ou acumula. Portanto, as vasas nessa profundidade são mais pobres em

$\text{CaCO}_3$ . Esse limite de dissolução/sedimentação é chamado de Profundidade de Compensação da Calcita (PCC) e tem o valor médio de 4500 metros (Suguio, 1998). Apesar de ser uma média e a profundidade podendo variar de 3000 até 5500, sabe-se que o conteúdo de carbonato a cerca de 6000 metros é praticamente nulo.

### *3.1.3 Carbonatos de bacias evaporíticas*

Acumulações carbonáticas em áreas restritas, como regiões de climas semiáridos e áridos, são processadas em depósitos chamados de caliches e calcretes. Caliches são típicos de desertos e são solos endurecidos pela cristalização de calcita e outros minerais nos interstícios, onde o sentido de movimento da umidade dos solos seja ascendente devido a capilaridade e a evaporação excessiva. Já o termo calcrete refere-se à cimentação predominante de carbonato. Os calcretes são análogos aos ferricretes, silcretes, alcretes, entre outros (Woolnough, 1927). Ambos são compostos por calcita impura e são indicadores paleoclimáticos (Suguio & Barcelos, 1983).

### *3.1.4 Carbonatos de água doce, de lagos e fontes*

Em lagos e lagoas de água doce há a precipitação de carbonatos friáveis e terrosos do tipo marga. As margas são flocos de  $\text{CaCO}_3$  sobre algas do gênero *Chara* pelo próprio metabolismo do organismo. Outros tipos de carbonatos desse ambiente são tufo calcário, formado por calcário poroso e esponjoso precipitado quimicamente; e travertino, referente a um depósito bandado e denso comum em cavernas. Em geral, todos esses carbonatos são precipitados pela combinação de atividades orgânicas e inorgânicas.

### *3.1.5 Carbonatos eólicos*

Sedimentos carbonáticos depositados em praias podem ser retrabalhados pela energia eólica, formando dunas e sendo cimentados e consolidados. Um exemplo brasileiro desse ambiente é a ilha principal do arquipélago de Fernando de Noronha, onde as dunas são compostas por grãos calcários marinhos vindos das praias do Leão, Sueste e Atalaia (Almeida, 1955).

## **3.2 Composição mineralógica dos carbonatos**

### **3.2.1 *Minerais carbonáticos***

Os principais minerais carbonáticos, que compõe metade do volume total dos carbonatos existentes na natureza, são calcita e aragonita, e ocorrem em diferentes formas (vasa microcristalina, cristais xenomorfos, mosaicos cristalinos, revestimentos fibrosos, veios e cimentos). Ambas possuem fórmula química  $\text{CaCO}_3$ , se diferenciando no sistema de cristalização e com índices de refração diferentes. A calcita é a mais comum entre os dois, por ser mais estável, fazendo com que a aragonita ao longo do tempo se transforme em calcita. Chaudron (1952) e Brown et AL (1962) dizem que o tempo necessário para uma reação a seco para essa transformação levaria cerca de dezenas de milhões de anos a uma temperatura de  $100^\circ \text{C}$ . A temperatura necessária para rápida conversão a 1 atm de pressão é de  $400^\circ \text{C}$ , o que leva a conclusão que sem intervenção de um solvente como a água ou ampla deformação, a diagênese seria improvável. Urdininea (1977) afirma que a precipitação de aragonita pode ocorrer em baixa salinidade e sua preservação por longos períodos favorece a formação de dolomita. A calcita por sua vez pode ser gerada como componentes primários de fragmentos de conchas, produtos de recristalização da aragonita e cimentos precipitados.

A dolomita pode ocorrer como vasa de precipitação direta em cristais de 2 a 20 microns ou até mesmo como cristais grossos idiomórficos ou xenomórficos, substituindo a calcita e por vezes como preenchimento de veios ou cimentação em arenitos. A dolomita é associada mais como produto secundário, substituindo a calcita, fazendo com que ambos minerais estejam comumente associados. A precipitação primária da dolomita é controversa, pois suas condições físico-químicas do processo de formação não são bem conhecidas (Illing et AL, 1965). Evidências de campo sugerem que a formação da dolomita primária é favorecida pela alta temperatura, pH baixo e salinidade seis a oito vezes superior à normal da água marinha, portanto, nenhuma concha é originalmente dolomítica, tendo sua alteração mineralógica pós deposição. Assim como a dolomita, ankerita e siderita são formadas principalmente por substituição em vasas de precipitação direta ou concreções.

### **3.2.2 *Minerais terrígenos e outros componentes raros***

Os sedimentos carbonáticos não são compostos exclusivamente por carbonatos, mas também por outros minerais. Um mineral presente é a sílica em formas variadas. A forma mais comum da sílica é a calcedônia (Suguiú, 2013), ocorrendo disseminada ou segregada

em nódulos nos calcários e dolomitos, também sendo encontrada como esferulitos com estruturas fibrorradiadas. Quando os cristais de quartzo são euédricos e cortam as estruturas primárias, a origem indicada é autigênica, assim como o feldspato euédrico, também comum nessas rochas. Os argilominerais são parte dos componentes insolúveis dos carbonatos, tendo como principal representante os argilominerais do grupo da illita. Por fim, há a presença de outros minerais na composição de forma mais rara, como glauconita, colofana, pirita, marcassita, gipsita e anidrita.

## **3.2 Principais propriedades físicas**

Areias carbonáticas são areias compostas principalmente por carbonato de cálcio. As areias calcárias, em particular, possuem entre 10% a 50% de concentração de minerais carbonáticos, como calcita, dolomita e aragonita (Clark e Walker, 1977, e Meigh, 1987). Sendo assim, sua dureza na escala de Moh's é em média três, o que significa que suas ligações intermoleculares são fracas se comparado com areias quartzosas (dureza sete). Além disso, seus grãos têm formatos variados. Os de origem bioclástica podem ser curvos, escamosos, ocos, placóides, angulosos, enquanto os oólitos, de origem química, costumam ser maciços e arredondados. Essa variedade resulta em alto grau de angularidade, má-seleção de grãos e grande porosidade intrapartícula. A soma desses fatores faz com que a índice de vazios e a densidade seca mínima e máxima deste material sejam relativamente maiores que a das areias quartzosas (Hoff & Kolff, 2012).

### **3.2.2 Angularidade**

A angularidade é um parâmetro importante e difícil de ser medido. Um método proposto para essa quantificação foi proposto por Powers (1953). É um método visual comparativo, utilizando uma escala de arredondamento e esfericidade (Figura 1) para medição. Apesar dessa dificuldade, é necessário seu estudo, pois altos níveis de angularidade, quando submetidos a grandes níveis de estresse, levam a quebra de grãos. Isso é devido a grande concentração de tensão nas extremidades dos grãos, o que nos leva a outro parâmetro, a friabilidade, que será tratada logo após esse tópico.

A angularidade (ou redondeza) é um atributo de todo sedimento, independente de sua forma. Ela é caracterizada pela agudeza das bordas e cantos de cada grão. Apesar de já existirem métodos de quantificação desse parâmetro, desenvolvidos por Wadell (1935), Russel e Taylor (1937) e Pettijohn (1949), Power (1953) considerou esses métodos insuficientes para uma descrição mais precisa desse atributo. A escala desses autores dividia a angularidade em cinco intervalos com valores adquiridos por meio de métodos



geométricos (Tabela 1). Logo, Power (1953) baseando-se nas escalas criadas pelos autores anteriores, criou sua própria escala (Tabela 2), adicionando uma gradação a mais, a qual diferencia melhor os intervalos menores. Em seu método, para valores abaixo de 0,12, não há diferenciação entre a angularidade de grãos, com exceção de cristais.

Termo de Gradação	Russel e Taylor		Pettijohn	
	Limite de Classe	Ponto Médio Aritimético	Limite de Classe	Ponto Médio Geométrico
Angular	0 a 0,15	0,075	0 a 0,15	0,125
Subangular	0,15 a 0,3	0,225	0,15 a 0,25	0,2
Subarredondado	0,3 a 0,5	0,4	0,25 a 0,40	0,315
Arredondado	0,5 a 0,7	0,6	0,40 a 0,60	0,5
Bem arredondado	0,7 a 1,0	0,85	0,60 a 1,00	0,8

*Tabela 1 - Gradação de Russel e Taylor (1937) e Pettijohn (1949)*

Termo de Gradação	Russel e Taylor	
	Limite de Classe	Média geométrica
Muito anguloso	0 a 0,12	0,14
Angular	0,17 a 0,25	0,21
Subangular	0,25 a 0,35	0,3
Subarredondado	0,35 a 0,49	0,41
Arredondado	0,49 a 0,7	0,59
Bem arredondado	0,7 a 1,0	0,84

*Tabela 2 - Tabela de gradação de Powers (1953)*

	Bem arredondado	Arredondado	Sub-arredondado	Sub-anguloso	Anguloso	Muito anguloso
Baixa esfericidade						
Alta esfericidade						

Figura 1- Escala de arredondamento e esfericidade de Power (1953).

### 5.2.2 Friabilidade

A friabilidade é a tendência de o material quebrar quando submetido a uma tensão. Como os sedimentos calcários marinhos têm como principal característica a alta friabilidade é necessário cuidado especial para o tratamento desse sedimento em várias etapas do projeto. Por exemplo, nas etapas de dragagem ou transporte hidráulico, a quebra dos grãos gera uma quantidade maior de finos, que pode alterar seu comportamento mecânico, criando uma diferença substancial nos resultados dos ensaios realizados com material virgem e material manipulado (Hoff & Kollf, 2012). Por ser aparentemente o parâmetro mais importante para a avaliação de sedimentos calcários, é interessante quantificá-lo de alguma forma. Apesar de existirem vários métodos propostos, o mais interessante para essa medição é o de Hardin (1985), que será detalhado a seguir.

#### 5.2.2.1 Hardin e a Quebra Relativa

O método de Hardin (1985), conhecido como Quebra Relativa (*Relative Breakage*), é a razão entre a quebra total ( $B_t$ ) dos grãos expostos a uma tensão pela quebra potencial ( $B_p$ ). Ambos os termos serão detalhados a seguir.

$B_p$  é o potencial do material ser quebrado até o tamanho de silte. Assim, quanto maior a fração acima de silte, maior o potencial de quebra do material. Para se medir  $B_p$ , pode-se utilizar gráficos de curvas granulométricas (Figura 2), definindo-se um dos limites do intervalo como sendo uma partícula de silte, 0,074 mm e o outro a própria curva granulométrica do material. O limite de Silte é definido, pois o esforço necessário para se quebrar uma partícula de silte é muito maior do que partículas maiores e a fração silte em

um solo são menos importantes que as frações maiores para o comportamento do solo (Hoff & Kolff, 2012).

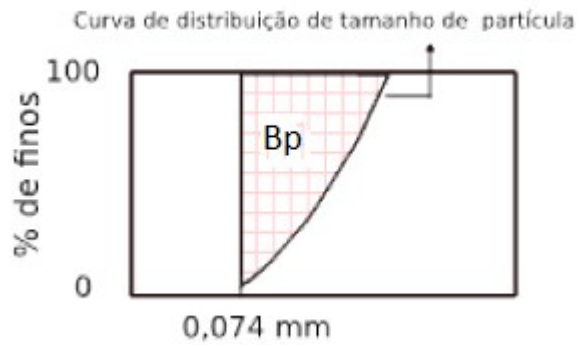


Figura 2 - Exemplo de gráfico de curva granulométrica onde se pode medir a quebra potencial. A unidade definida para a medição do gráfico é um ciclo de log na base dez igual a um.

Quando se submete o material a um esforço, tem-se uma nova curva granulométrica (Figura 3) e pode-se a partir da diferença entre as duas curvas medir a quebra total do material para o esforço aplicado.

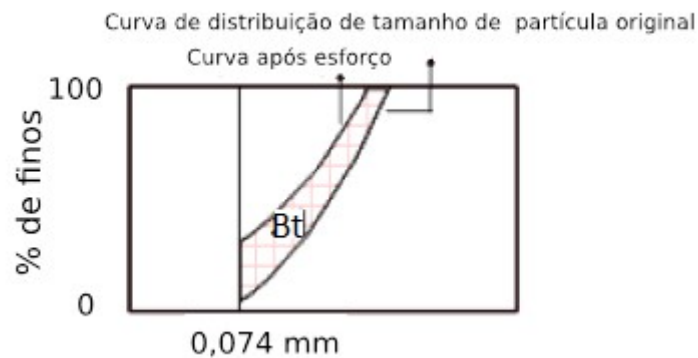


Figura 3 – Nova curva granulométrica após o esforço junto com a curva granulométrica original. A área entre as duas é a quebra total do material para o devido esforço utilizado.

A quebra relativa é definida por Hardin (1985), então, como sendo:

$$Br = \frac{Bt}{Bp} \quad (1)$$

### 5.2.3 Cimentação

Sedimentos carbonáticos são, muitas vezes, naturalmente cimentados pela precipitação de carbonatos (calcita, dolomita e aragonita) e outros sais provenientes de águas de poros saturados. Esse processo ocorre normalmente durante a deposição, porém não é exclusivo a ela. Segundo Fookes (1988), a cimentação pode se desenvolver também durante o transporte e após o lançamento do material na área de deposição. Essa cimentação depende da porosidade, permeabilidade, textura e composição do material de preenchimento, temperatura, pressão e composição química da água dos poros.

As ligações químicas da cimentação podem variar, sendo tanto fortes quanto extremamente fracas. Mesmo fracas, a cimentação ainda é um parâmetro de alta importância e deve ser avaliado. A cimentação pode afetar desfavoravelmente a dragagem na área de empréstimo, podendo ocasionar no aumento de rigidez e resistência de cisalhamento.

É difícil identificar a cimentação em campo quando esta é composta por ligações fracas, já que tendem a se quebrar durante a amostragem, necessitando de métodos mais sofisticados como análises químicas e microscopia. Outro método é a análise em tempos diferentes do mesmo local após a deposição dos sedimentos, da resistência à penetração em cone (CPT), permitindo assim a observação do desenvolvimento de cimentação.

## 5.3 Comportamento mecânico de areias carbonáticas

O conhecimento do comportamento mecânico de areias carbonáticas ainda é muito limitado, tendo poucos estudos e artigos a respeito. Trabalhos específicos sobre o tema, como os de Coop (1990) e Coop e Airey (2003) afirmam que o comportamento mecânico desse material não é essencialmente diferente dos sedimentos mais comuns utilizados em obras, apenas possuem valores de parâmetros diferentes. Para parâmetros como compressibilidade, comportamento de cisalhamento, rastejo e suscetibilidade a liquefação, os autores utilizam uma metodologia de análise similar a utilizada para solos argilosos, usando conceitos como, por exemplo, linha normal de compressão (NCL) e linha de estado crítico (CSL).

### 5.3.1 Compressibilidade

No trabalho de Coop (1990), testes de compressão isotrópica em areias carbonáticas resultaram em uma NCL reta e única, como se esperaria de areias quartzosas. A diferença essencial entre essas areias nesse tipo de experimento (Figura 4) é o gradiente da relação

entre a tensão efetiva média e o volume específico ( $\lambda$ ), sendo maior para areias carbonáticas. Isso significa maior compressibilidade nesse tipo de sedimento, o que se deve a características e parâmetros discutidos anteriormente, como maior número de vazios e alta friabilidade.

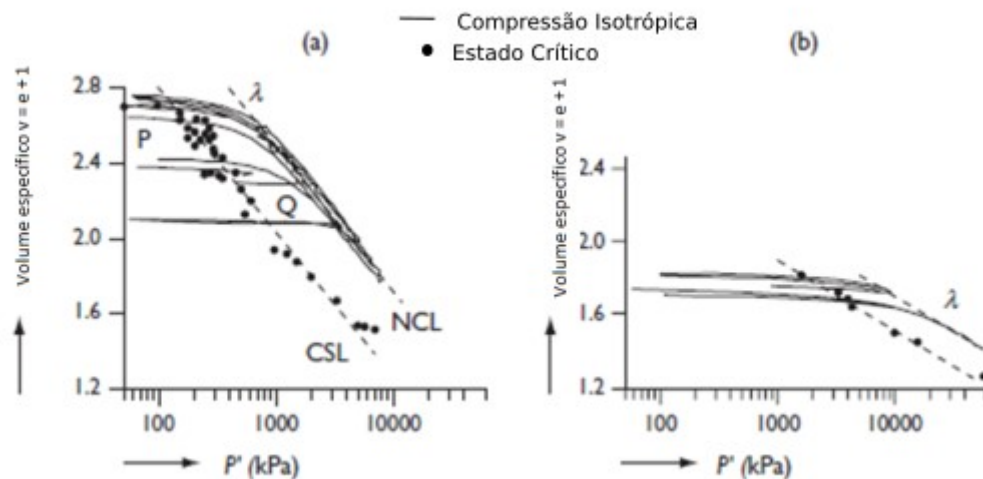


Figura 4 - Gráficos de Compressão Isotrópica (Coop e Airey, 2003), comparando (a) areias carbonáticas de Dogs Bay e (b) areias quartzosas de Ham River. A inclinação de NCL é mais acentuada em (a), indicando maior compressibilidade.

Na Figura 4, pode-se observar que até o ponto de 500 kPa a 700 kPa ser atingido, as areias carbonáticas apresentam comportamento rígido. A partir daí, maiores tensões quebram as partículas, e aumentam a compressibilidade até atingir um valor constante na NCL. Coop e Airey (2003) concluem que a compressibilidade não pode ser descrita como um módulo único, mas também se deve considerar o nível de tensão, a razão de vazio inicial e o histórico de carregamento dos sedimentos. Se houve mais de um episódio de tensão submetida ao sedimento, este pode ter sofrido esmagamento, já alterando o grau de compressibilidade original, dando falsos valores para o material encontrado na área de empréstimo ou até mesmo na área de deposição, já preenchida pelo material. Na Figura 5, exemplifica-se o que pode ocorrer quando se testa duas vezes a mesma amostra. O primeiro teste submete a amostra a tensões acima do limite de cedência e um novo teste indica a alteração do material.

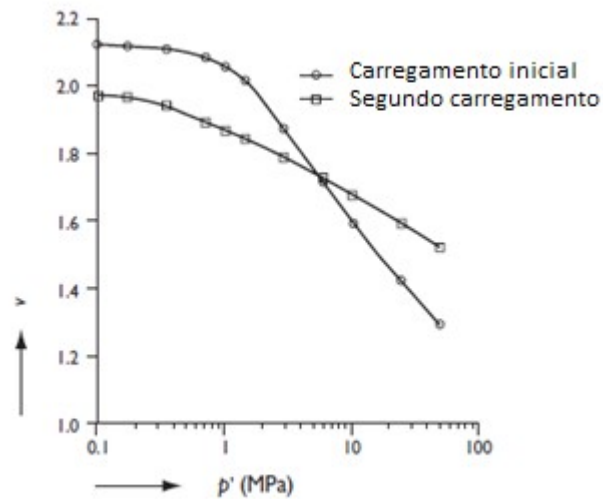


Figura 5 - Gráfico representando dois testes em uma mesma amostra (Coop e Airey, 2003). O gradiente no segundo carregamento é menor devido a maior concentração de finos e menor proporção de vazios causadas pelo esmagamento de grãos

### 5.3.2 Comportamento de cisalhamento

Diferentes trabalhos mostram uma grande variação de valores dos picos de ângulo de atrito. Essa disparidade deve ser atribuída a grande diferença de angularidade dos sedimentos de diferentes lugares. Um consenso, porém, é que esses picos de ângulo de atrito são geralmente maiores do que os medidos em areias quartzosas (Brandes, 2011), provavelmente devido à natureza mais angular deste material.

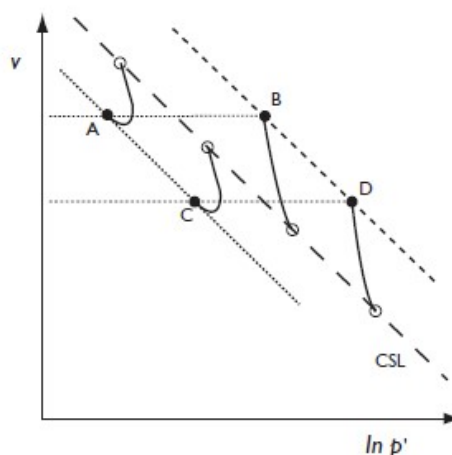


Figura 6 - Influência da mudança volumétrica (Coop e Airey, 2003). A, B, C e D mostram diferentes estados volumétricos para areias carbonáticas.

Coop e Airey (2003) mostram que o ângulo de atrito do sedimento se deve ao estado atual deste e de sua posição relativa à NCL e CSL (Figura 6). Pontos a esquerda de CSL, ou seja, A e C, são estados onde não haverá dilatação durante cisalhamento, enquanto à direita, como B e D, resultarão em compressão sem dilatação. A magnitude do ângulo de atrito dependerá da distância do ponto plotado ao CSL. É importante observar que apesar de A e B terem a mesma densidade relativa, estes pontos apresentarão comportamento diferente em relação ao cisalhamento, o que mostra que apenas a densidade relativa não é suficiente para indicar o comportamento geotécnico em relação ao cisalhamento, necessitando de outra variável, neste caso, o nível de tensão.

## 4 Materiais e Métodos

### 4.2 Caracterização do material

O material utilizado nesse projeto tem procedência da praia do Paiva, localizada no município de Cabo de Santo Agostinho – PE, de coordenadas UTM 285780, 9086402. A praia do Paiva localiza-se aproximadamente a 45 km de Recife. O material foi retirado da zona de surfe, onde a energia da onda é transferida para a geração de ondas transversais e longitudinais a praia. O material foi mantido fechado em uma caixa, protegida de sol e temperaturas mais altas, para evitar uma mudança drástica de sua umidade. Para a análise do material, foi determinado o teor de umidade, densidade dos grãos, teor de carbonato e a identificação dos componentes mineralógicos e biogênicos principais.

#### 4.2.2 *Teor de umidade e densidade dos grãos*

Para a caracterização do material foram realizados ensaios para se determinar o teor de umidade e a densidade dos grãos. Para a determinação de umidade, o procedimento é o seguinte:

- a) Colocar material em cada cápsula de alumínio, somar o peso da tara + peso do material úmido em um valor entre 40 a 80 gramas.
- b) Colocar as duas cápsulas na estufa por 24h, retirar ambas para nova pesagem (peso da tara + peso do material seca).
- c) Calcular diferença entre os pesos para determinação da umidade média

Para se determinar a densidade dos grãos, o procedimento é o seguinte:

- a) Colocar material em cada cápsula de alumínio, somar o peso da tara + peso do material úmido em um valor entre 40 a 80 gramas.
- b) Colocar os dois picnômetros com água destilada até 1/3 da altura total na bomba de vácuo para a retirada do ar entre os grãos por quinze minutos. Aumentar a quantidade de água destilada até quase chegar ao bico do picnômetro e deixar mais quinze minutos na bomba de vácuo. Por último, colocar água destilada até a marca de um litro.
- c) Deixar os picnômetros em repouso por 24h e medir as massas e calcular as densidades dos grãos.

#### 4.2.3 *Análise Óptica*

Como o material é composto principalmente por sedimentos acima de 250 micrômetros ( $>0,25$  mm) é recomendado usar a lupa estereoscópica (Figura 7) para o estudo. Assim, fez-se uma identificação dos bioclastos e materiais terrígenos. A identificação dos bioclastos permite uma estimativa da composição mineralógica, já que cada grupo de organismos apresenta uma mineralogia predominante. A identificação foi feita com auxílio bibliográfico de Adams & Mackenzie (1998), Scholle (2003), Thomé (2004), Tucker (2009) e Flügel (2012). A análise foi feita no Laboratório de Petrografia Sedimentar do Instituto de Geociências (IGC).

O material foi dividido em seis frações granulométricas para facilitar a observação e para que fossem feitas estimativas semiquantitativa e qualitativa dos componentes. As frações utilizadas estão indicadas na Tabela 4:



#	Diâmetro (mm)
10	2,00
18	1,00
35	0,500
60	0,250
120	0,125
230	0,062

*Tabela 3: Valores dos diâmetros de grãos usados para a separação de cada fração granulométrica*

O material seco foi colocado em um jogo de peneiras e colocado sobre um agitador mecânico por quinze minutos. O material retido em cada peneira foi separado e colocado sobre uma placa de Petri para a observação na lupa.



*Figura 7: Lupa estereoscópica utilizada pertencente ao Laboratório de Petrologia Sedimentar – IGC*

#### **4.2.4 Análise de Carbonato por HCl**

Para quantificar o teor de carbonato na areia de modo a classifica-la como carbonática (>90%), silico-carbonática (entre 90% e 50%) ou calcária (entre 50% e 10%), classificação

feita por Clark e Walker (1977) e Meigh (1987), realizou-se um ensaio de remoção de carbonato de cálcio em sedimentos. Este método consiste na dosagem por ataque de ácido clorídrico (HCl) 10%, sendo um procedimento relativamente rápido de ser feito. O ensaio foi realizado no Laboratório de Sedimentologia do IGC, de acordo com o seguinte procedimento:

- a) Separar duas alíquotas de aproximadamente 10 gramas de material seco, através de quarteamento (para garantir homogeneização da amostra) e medir o peso inicial (P1).
- b) Colocar as amostras em béqueres de 100 ml e cobri-las com ácido clorídrico 10%, colocar os béqueres sobre placa aquecida a 60-70 °C, mantendo agitação manual ou com “peixinho” magnético até que a reação de efervescência cesse. Todo o procedimento deve ser realizado em capela com sistema de exaustão.
- c) Filtrar e lavar a amostra com água destilada, utilizando kitassato e papel filtro.
- d) Secar o material filtrado em estufa a 50°C, por 12h.
- e) Pesar o material seco (P2) e calcular o teor de carbonato (Tc) em porcentagem através da diferença de pesos, usando a equação 3.

$$Tc = \frac{P1-P2}{P2} * 100 \quad (3)$$

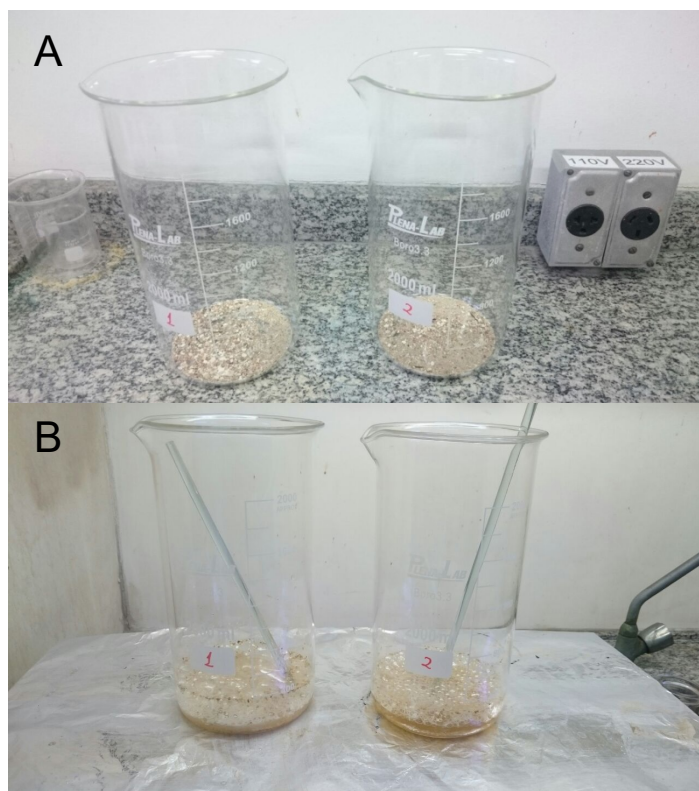


Figura 8 – (A) Aliquotas separadas em dois béqueres na placa aquecida (B) de 60° a 70° C e sendo atacadas por ácido HCl.

### 4.3 Análise geotécnica

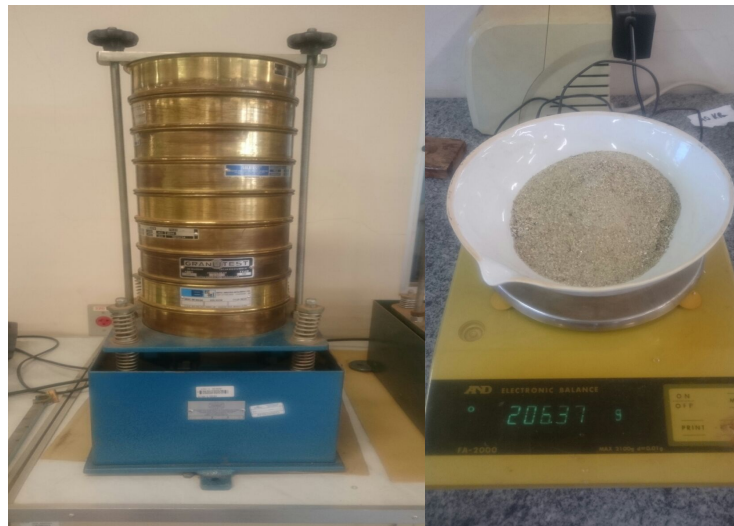
Para a análise geotécnica do material, decidiu-se analisar o parâmetro considerado como mais importante do material, a friabilidade, para sua utilização em projetos de obras. Para tal, os ensaios escolhidos para essa análise foram os ensaios de granulometria, adensamento e cisalhamento direto.

#### 4.3.2 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria tem como objetivo principal definir uma curva granulométrica e avaliar a eventual quebra de grãos por meio de um procedimento simples. O processo foi feito cinco vezes iniciado com o material virgem e a partir disso se construiu cinco curvas granulométricas.

O jogo de peneiras usado foi montado com diâmetro máximo de 4,8 mm (peneira N° 4) até o diâmetro mínimo de 0,075 mm (#200), de acordo com o tamanho máximo dos grãos e conchas presentes no material. Após se colocar o material no topo do jogo de peneiras,

colocou-se o jogo sobre uma mesa vibrante (Figura 9) por quinze minutos. Após esse período de tempo, fez-se a pesagem e o preenchimento dos dados em uma tabela para a formulação de gráficos de curva granulométrica. Repetiu-se o processo cinco vezes, totalizando 75 minutos de ensaio.



*Figura 9 - Mesa vibrante e pesagem do material durante granulometria*

#### **4.3.3 Ensaio de Adensamento**

O objetivo do adensamento feito neste trabalho (ensaio de compressibilidade edométrica) é comparar o comportamento antes e depois do material ser exposto uma tensão vertical e relacionar esse fenômeno a friabilidade. Para tal, foram realizados sete ensaios de adensamento. Os cinco primeiros ensaios tiveram como objetivo verificar se há quebra significativa de grãos com as tensões escolhidas conforme a Tabela 5. Para isso, compara-se a curva granulométrica gerada após cada ensaio com a curva granulométrica gerada com o material virgem. Os dois últimos ensaios, chamados de ensaios completos, foram até a tensão de 2355 kPa e seus resultados foram comparados entre si para verificar a diferença do comportamento do material virgem e o material ensaiado.

Amostra	Tensão (kPa)	Tipo de amostra
1	Até 20	Virgem
2	Até 40	Virgem
3	Até 80	Virgem
4	Até 320	Virgem
5	Até 640	Virgem
6	Ensaio completo*	Virgem
6**	Ensaio completo	Ensaiado

Tabela 4 - Tabela de esforços utilizados para cada amostra no ensaio de adensamento (\* o ensaio completo vai até 2355 kPa; \*\* reutilização da amostra 6)

Para o ensaio de adensamento, o procedimento é o seguinte:

- a) Colocar em um anel de adensamento de volume igual a  $240,36 \text{ cm}^3$  material suficiente para ocupar o espaço sem ser esmagado. A massa utilizada no caso foi de 373,14 gramas, sendo, portanto, a densidade igual a  $1,28 \text{ g/cm}^3$ . Colocar o anel na célula de adensamento com pedras porosas no topo e base para que seja realizada a drenagem de água e por último colocar a célula na prensa de adensamento (Figura 10).
- b) Na prensa, preparar o deflectômetro para a altura de 10 mm, onde será feita uma compactação estática do material e será medida a variação da altura deste na célula de adensamento.
- c) Colocar as cargas em etapas, começando por 10 kPa e aumentar gradativamente até o valor desejado. Para aumentar a carga é necessário primeiro esperar que o deflectômetro estabilize.



*Figura 10 - Prensas de adensamento utilizadas (Laboratório de Mecânica dos Solos da Engenharia Civil - Poli - USP)*

A duração do ensaio varia dependendo do material e da carga. Os ensaios completos (até 2355 kPa) levaram cerca de vinte e três dias, enquanto cargas pequenas levaram cerca de 24 a 72h (de 20 kPa, 40 kPa e 80 kPa) e as cargas intermediárias de 320 kPa e 640 kPa levaram cerca de uma a duas semanas.

#### *4.3.4 Ensaio de Cisalhamento Direto*

O ensaio de cisalhamento direto como objetivo, assim como o ensaio de adensamento, comparar o comportamento do material antes e após o material ser exposto a um esforço. Como o cisalhamento ocorre em um plano, não se espera que haja quebra de grãos significativa durante os ensaios, porém ainda assim foram feitas curvas granulométricas para a comparação com a curva granulométrica do material virgem.

Foram realizados quatro ensaios e de cada um desses se obteve o resultado da primeira ida e o resultado do residual. O residual só foi feito após fazer manualmente dez idas e voltas, para que a diferença entre o material virgem e o ensaiado fosse mais significativa. A velocidade do ensaio escolhida foi de 10 mm em trinta minutos. A Tabela 6 mostra a organização dos ensaios:

Tensão (kPa)	1º Ida	Residual
50	Material virgem	Após dez idas e voltas
100	Material virgem	Após dez idas e voltas
200	Material virgem	Após dez idas e voltas
500	Material virgem	Após dez idas e voltas

*Tabela 5 - Tabela valores de tensão e número de idas realizadas para o ensaio de cisalhamento direto*

O procedimento é o seguinte:

- Colocar a massa desejada na caixa de cisalhamento. A massa escolhida foi a que ficasse com a mesma densidade que foi utilizada para o ensaio de adensamento, 1,28 g/cm<sup>3</sup>.
- Usar a carga necessária para a tensão escolhida e deixar o material adensar até estabilizar.
- Configurar a máquina de cisalhamento para a velocidade escolhida e cisalhar. Após a primeira ida, cisalhar manualmente dez vezes e depois repetir o procedimento uma última vez para medir a resistência residual.



*Figura 11 - Da esquerda para a direita: (A) material na caixa de cisalhamento, (B) máquina de cisalhamento e (C) material retirado da máquina de cisalhamento. Ensaio realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – USP.*



## 5 Resultados

### 5.2 Caracterização inicial do material

O teor de umidade do material, no momento em que chegou ao laboratório, resultou em 21,08%. A Tabela 7 demonstra o resultado do ensaio.

	Cápsula 36	Cápsula 38
Peso Tara+Areia úmida	57,92 g	52,93 g
Peso Tara+Areia seca	52,47 g	48,15 g
Peso Tara	27,02 g	25,13 g
Umidade	21,41%	20,75%
Umidade média	21,08%	

Tabela 6 - Resultado de umidade do material mantida no laboratório.

O ensaio de densidade dos grãos teve como resultado o valor de 2,638 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.3 Análise óptica

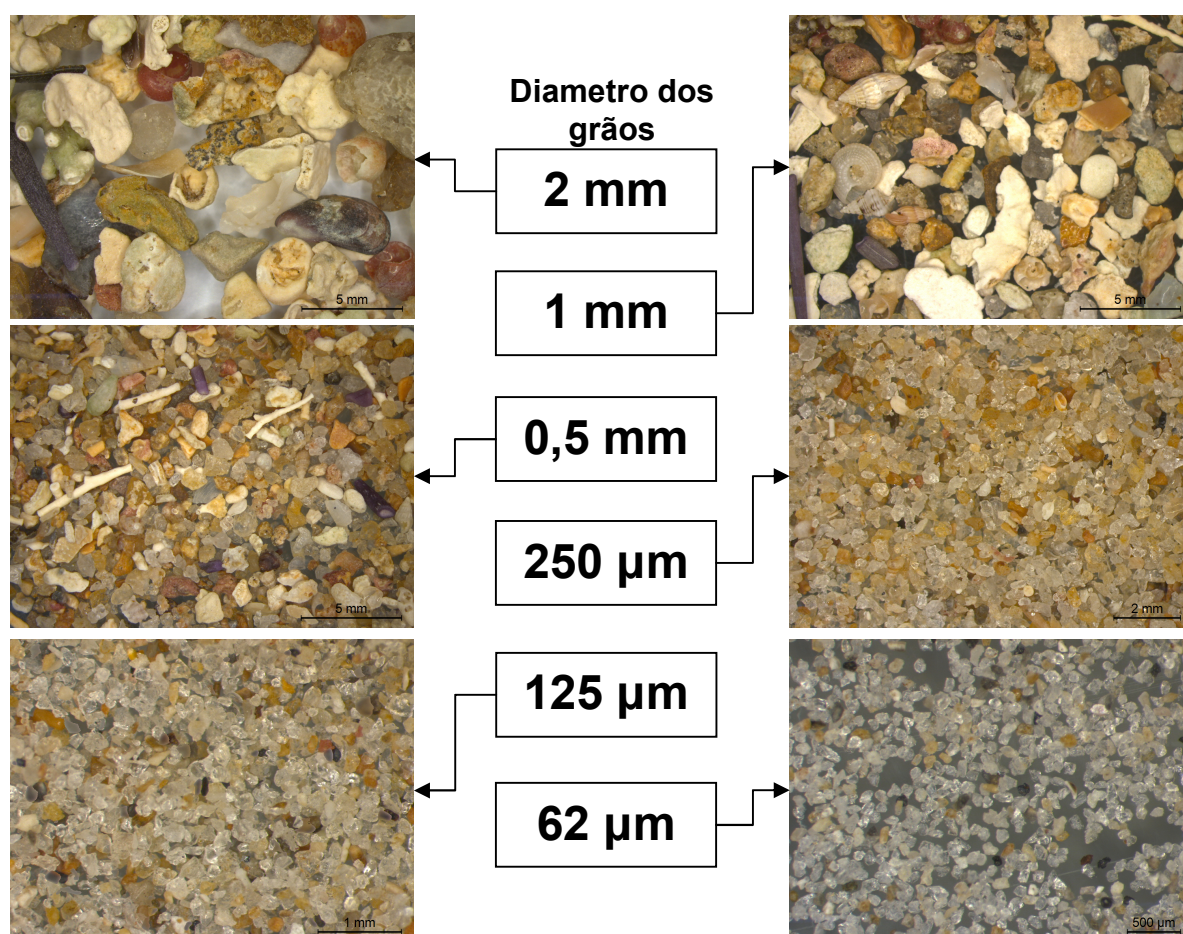


Figura 12 - Componentes da areia em cada fração granulométrica



Após a separação dos grãos em diferentes frações granulométricas conforme indicado na Figura 12, foi possível identificar os principais componentes mineralógicos e biogênicos de cada uma delas. Na fração maior, foi feita uma análise semiquantitativa (Tabela 8), para se ter uma noção modal estatística de quanto há de cada tipo de bioclasto ou mineral na fração mais suscetível a friabilidade.

Componentes (2 mm)	Número de grãos	%
Quartzo	8	5,1
<i>Halimeda</i> sp (alga)	77	49,4
Coral	10	6,4
Equinodermo	9	5,8
Gastrópode	22	14,1
Bivalve	23	14,7
Poliqueta/Vermítídeo/Foraminífero	7	4,5
Total	156	100

Tabela 7 - Porcentagem de componentes da fração de maior que 2 mm da areia.

O principal componente nas frações maiores (2 mm até 0,5 mm) é a halimeda, alga verde de carbonato de cálcio. Há grande diversificação de filos (moluscos, equinodermos, protozoários, artrópodes, etc.) e classes dentro destes. Embora os artrópodes não sejam encontrados na fração maior, eles se encontram presente nas frações menores (apenas fragmentos). A partir da fração 125  $\mu$ m já quase não se vê mais halimeda, mas há o que parece ser alga vermelha ou microfóssil.

A quantidade de quartzo aumenta consideravelmente quanto menor a fração analisada. Na fração de 2 mm há cerca de 5% de quartzo e nas frações 1 mm, 0,5 mm, 250  $\mu$ m, 125  $\mu$ m e 63  $\mu$ m há por volta de 15%, 35%, 70%, 80% e 95%, respectivamente. Os grãos são bem angulosos e com baixa esfericidade e os tipos de quartzo são variados, tendo grãos leitosos e hialinos. Nessas frações menores, além da predominância de quartzo, há também a presença de microfósseis e algas vermelhas, além de minerais opacos, por exemplo, ilmenitas leucoxenizadas.

#### 5.4 Teor de carbonato

Foram feitos dois ensaios com alíquotas quarteadas para medir o teor de carbonato da areia e classifica-la utilizando a classificação de Clark e Walker (1977). Os resultados estão na Tabela 9 e a areia foi classificada como calcária, pois possui 34,21% de teor de carbonato.

	Alíquota 1	Alíquota 2
Peso antes (g)	10,63	11,92
Peso depois (g)	7,05	7,78
Teor de Carbonato (%)	33,68	34,73
Teor médio (%)	34,21%	

Tabela 8 - Resultado do ensaio de ataque de HCl na areia, dando o valor médio do teor de carbonato

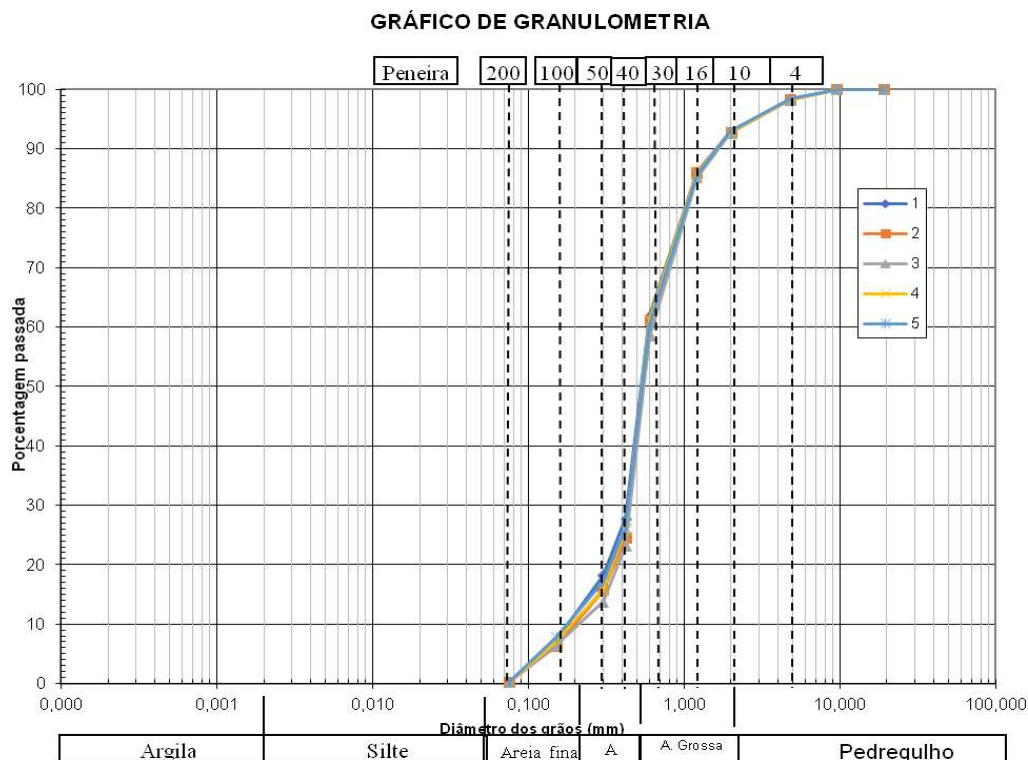
#### 5.5 Análise granulométrica

Após cada ensaio, preencheu-se uma tabela com o valor do peso da amostra seca retida em cada peneira para que a partir dela se gerassem curvas granulométricas. Na tabela 10 está o resultado de cada passagem, mostrando a porcentagem de peso passado por cada peneira em determinado diâmetro.

Diâmetro (mm)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
9,5	100	100	100	100	100
4,8	98,47	98,34	98,24	98,34	98,37
2	92,85	92,8	92,66	92,84	92,86
1,2	86,2	86,09	85,14	84,95	85,64
0,6	62,3	61,12	58,54	61,32	60,48
0,42	27,74	24,51	23,13	25,82	26,16
0,3	18,22	15,73	13,75	15,79	17,22
0,15	7,29	6,32	6,46	7,14	7,83
0,075	0,24	0,2	0,22	0,24	0,21

Tabela 9 - Valores em porcentagem de peso passado por cada peneira

Com esses valores, foram feitas as curvas granulométricas. As curvas foram colocadas em um mesmo gráfico para facilitar a comparação e análise de cada ensaio.



*Figura 13 - Gráfico com as curvas granulométricas de cada ensaio sobrepostas entre si para comparação*

A partir das amostras utilizadas nos ensaios de adensamento de 20 kPa até 640 kPa, foram feitas curvas granulométricas, conforme apresentados na Figura 14, para verificar se até essas tensões há quebra significativa de grãos, da mesma forma que os ensaios completos também tiveram suas curvas granulométricas geradas para comparação.

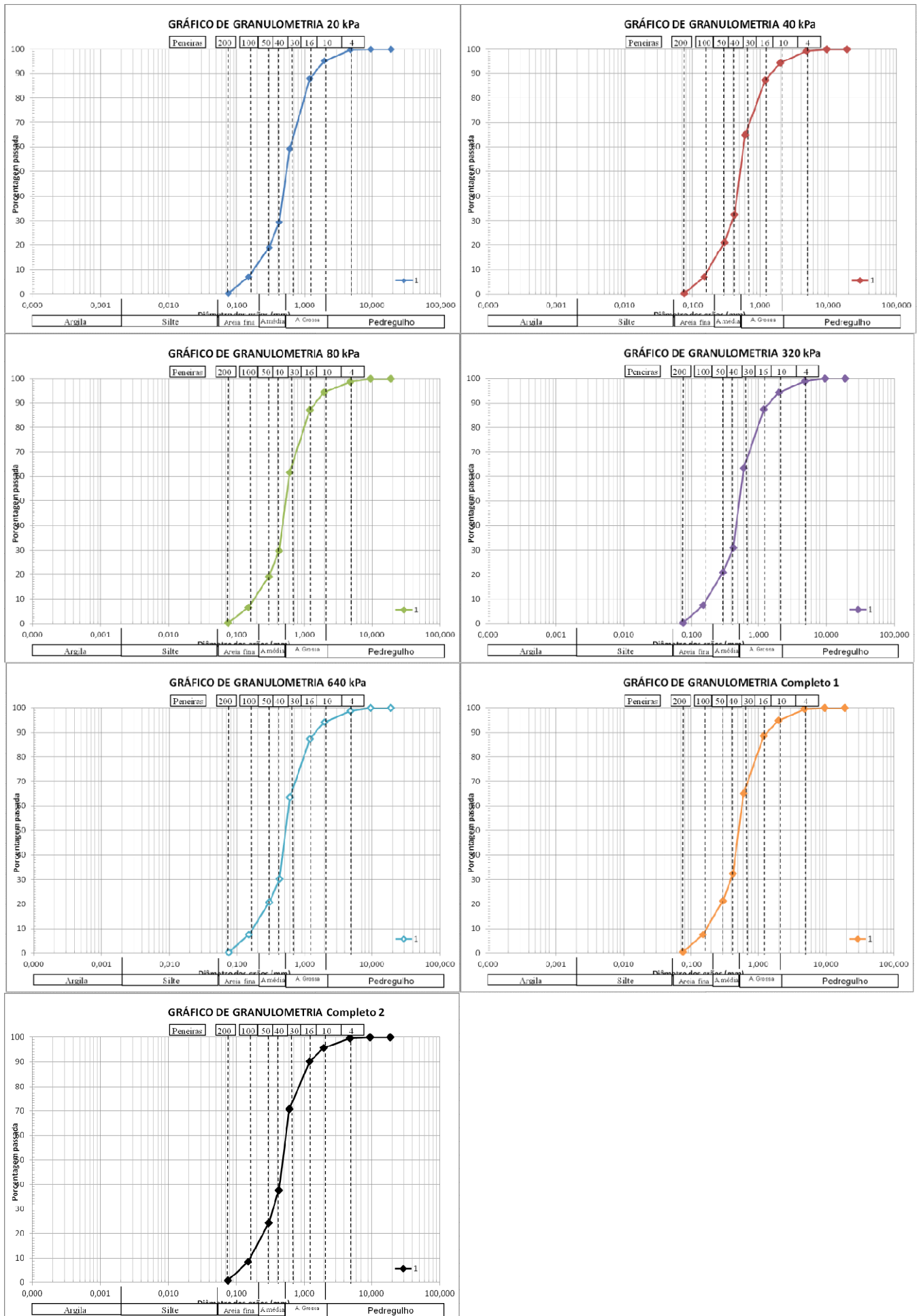


Figura 14 - Gráficos de granulometria de adensamento de 20 kPa até ensaio completo 2.

Assim como feito para o adensamento completo, também foram geradas curvas granulométricas dos ensaios de cisalhamento direto de 50 kPa a 500 kPa (Figura 15). Porém, como o cisalhamento ocorre em um plano de quebra, não se espera que seja clara a diferença granulométrica entre o material virgem e o material ensaiado.

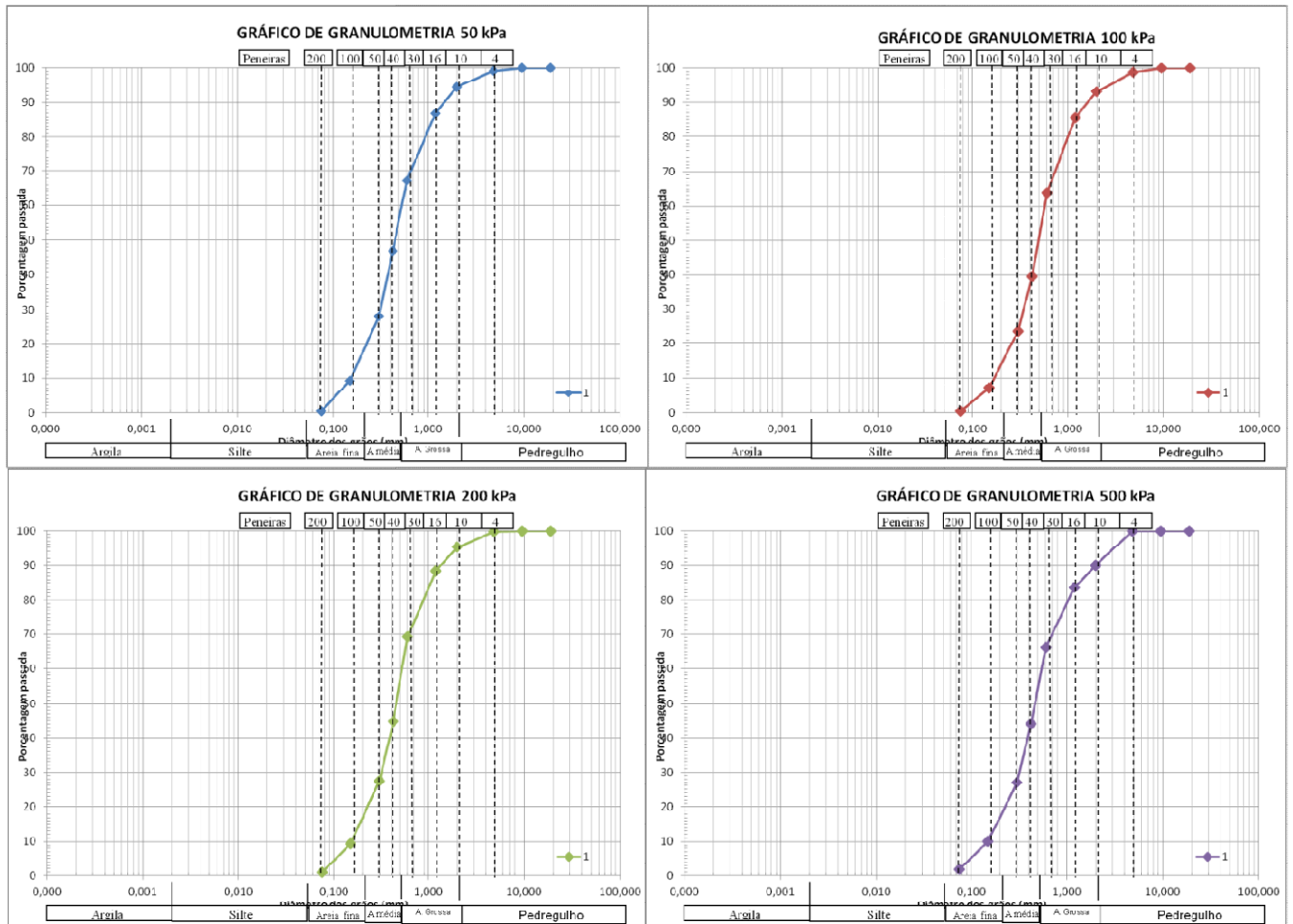


Figura 15 - Gráficos de granulometria de cisalhamento direto de 50 kPa e 500 kPa

A areia é uma areia grossa (~ 48%) com pouco pedregulho (~7%) e areia fina (~12).

## 5.6 Adensamento

Os gráficos de adensamento (Figura 16) foram feitos a partir dos ensaios completos, para que se possam comparar as diferenças entre o material exposto à tensão máxima escolhida pela primeira vez e o material exposto à mesma tensão pela segunda vez.

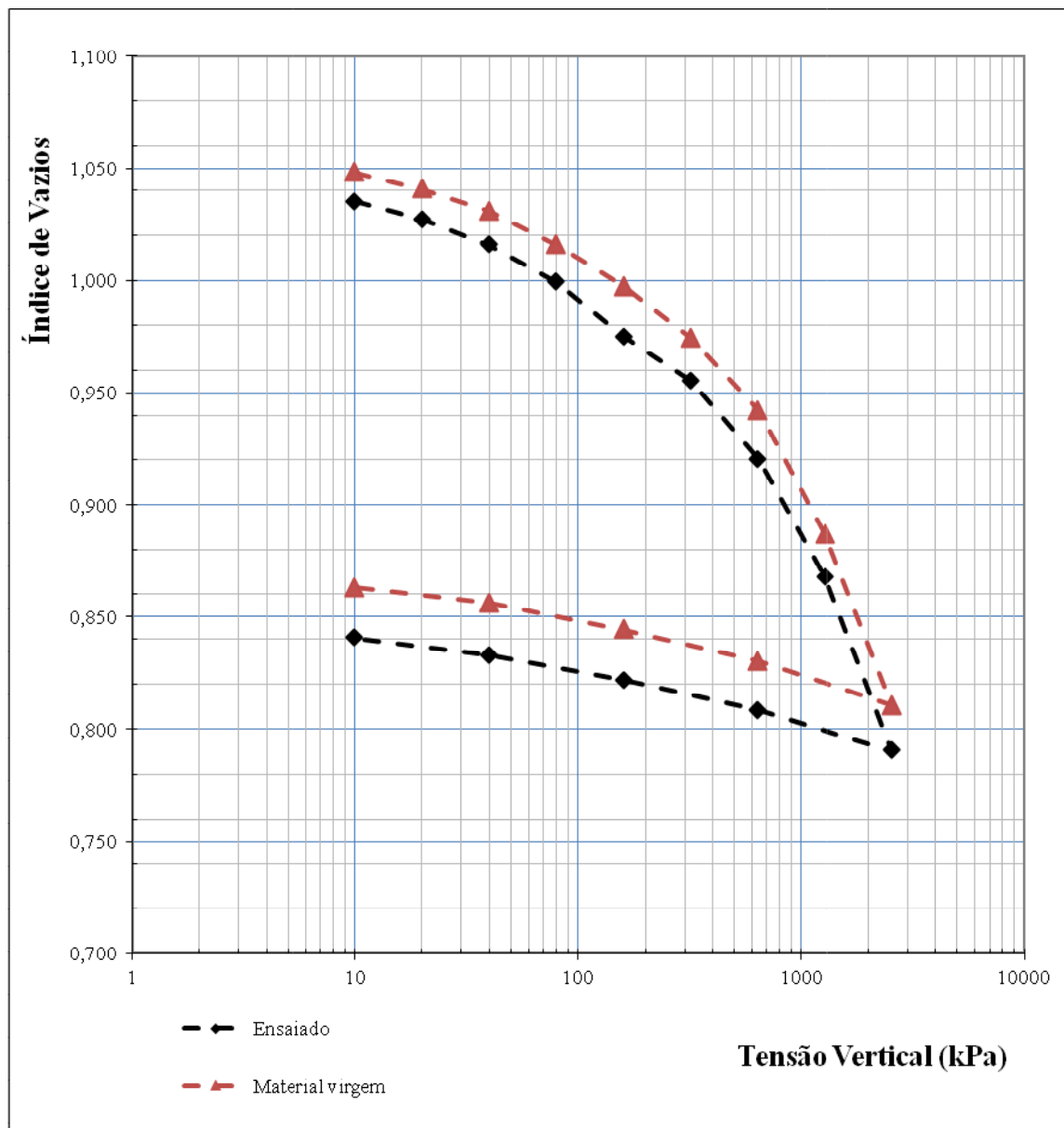


Figura 16 - Curva de adensamento do ensaio completo (linha vermelha) e ensaio completo 2 (linha preta).

O material possui elevado índice de vazios. Como as duas curvas tem comportamento parecidos, os índices de recompressão ( $C_r$ ), de compressão ( $C_c$ ) e de expansão ( $C_e$ ) são os mesmos (Figura 17). Os índices tem valores de  $C_r = 0,08$  ;  $C_c = 2,4$  ;  $C_e = 0,03$ .

## 5.7 Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto gerou dois gráficos. O primeiro gráfico (Figura 18) representa os esforços relacionados a 1º Ida e o segundo representa a resistência residual após dez idas e voltas manuais.

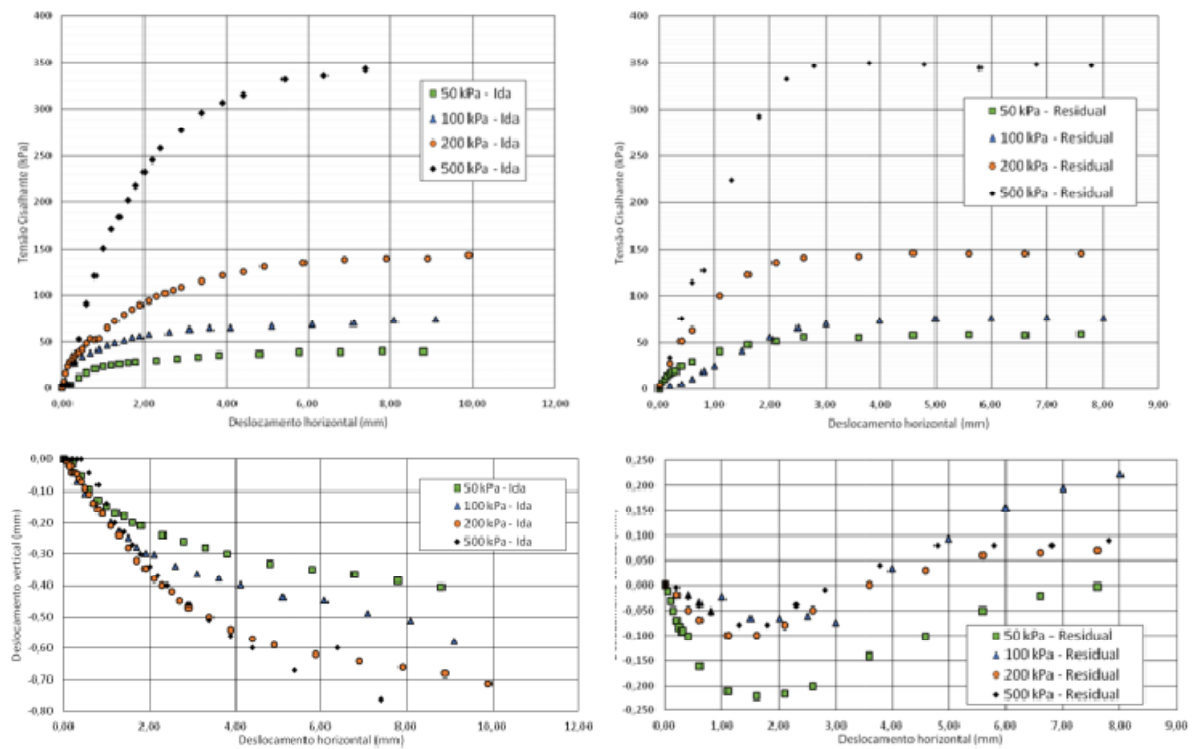


Figura 17 - Gráficos de cisalhamento direto da 1ª Ida e Residual, com seus respectivos gráficos de deslocamento vertical por deslocamento horizontal (em mm).

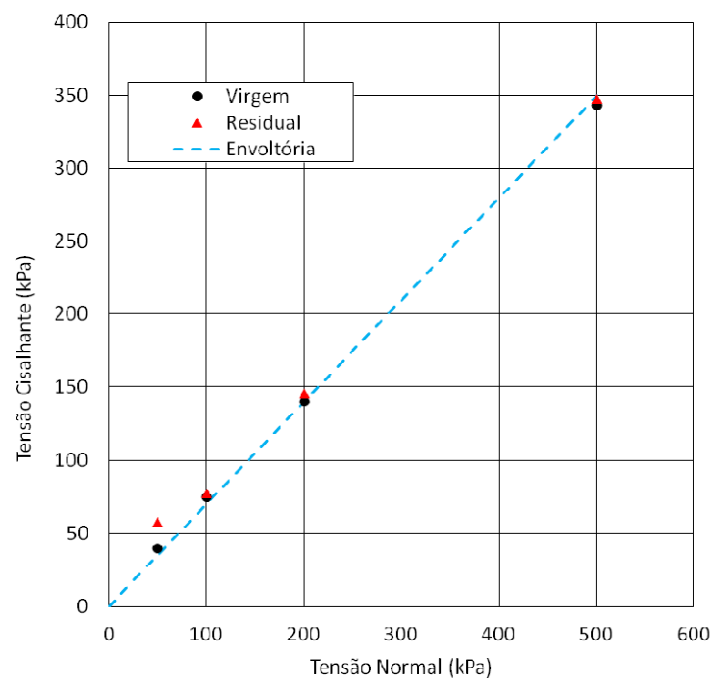


Figura 18 - Envoltórias de resistência para tensão cisalhante 1ª Ida (preto) e residual (azul)

Como fica claro pelas envoltórias, o ângulo de atrito  $\phi$  é o mesmo para a 1ª Ida e para o residual, onde  $\phi = 35^\circ$ .

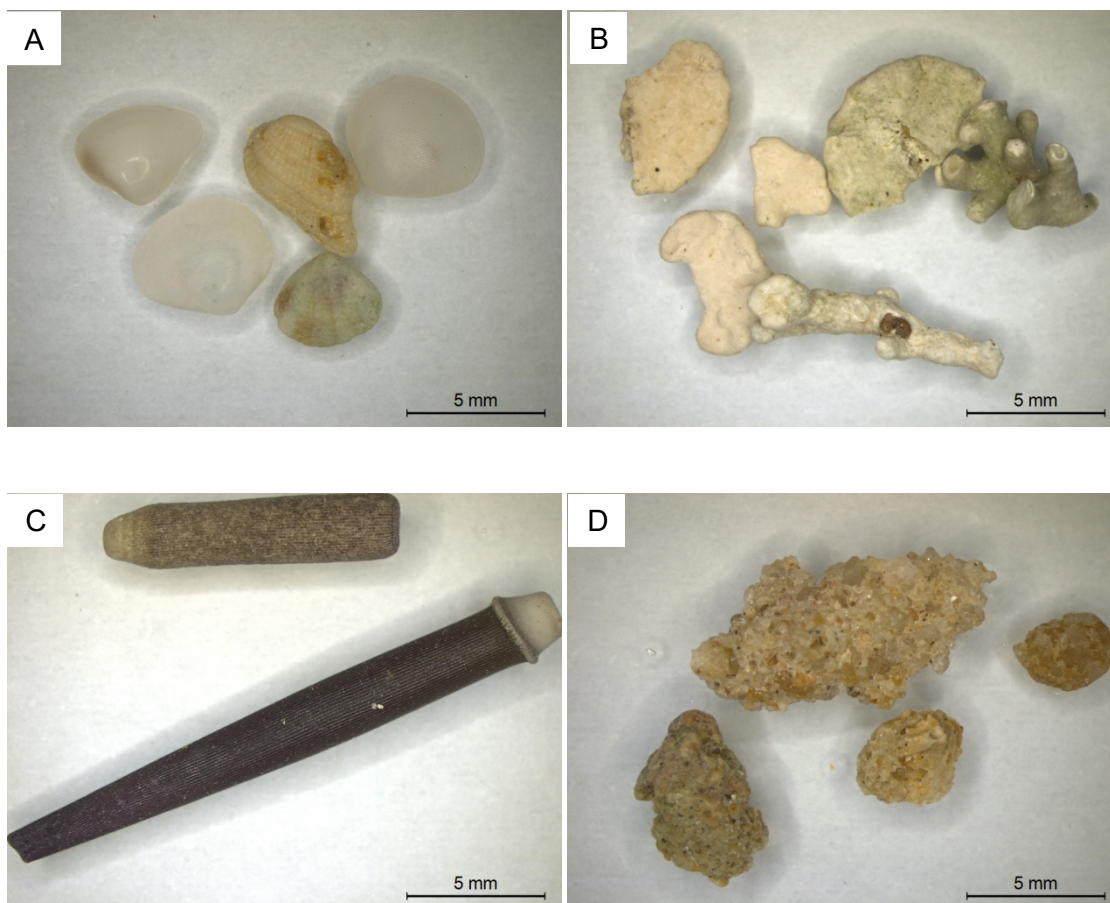
## **8 Interpretação e Discussão dos Resultados**

### **8.1 Discussão da análise óptica e teor de carbonato**

Os bioclastos, como evidenciado na análise óptica, são os principais componentes das frações mais grossas. Consequentemente, os bioclastos também representam maior porcentagem volumétrica do material e também são os que possuem maior área de contato. Sendo assim, ao utilizar essa areia como fundação de alguma obra, a resistência apresentada pelos carbonatos, que são em princípio os componentes que caracterizam a alta friabilidade do material, podem causar a mudança no comportamento geotécnico assim que os bioclastos quebrarem, sendo fragmentados e reduzidos de tamanho.

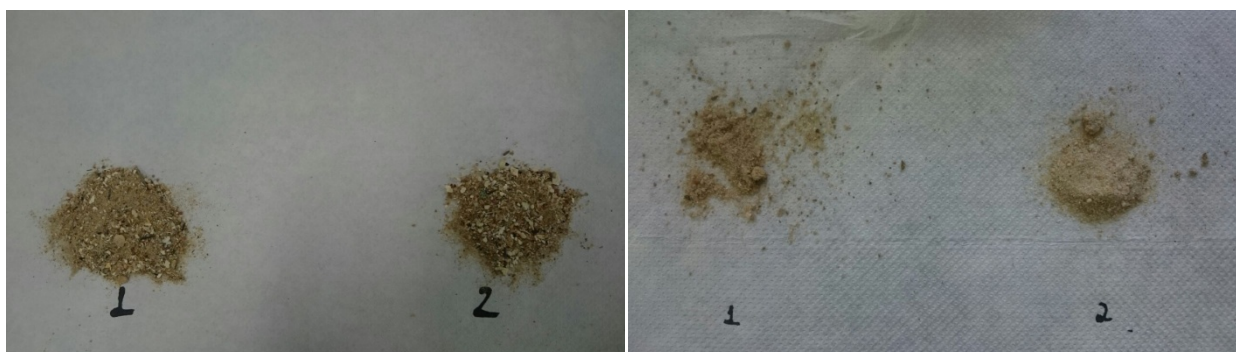
A forma dos grãos também possui grande influência na resistência. Como visto na lupa, há uma grande diversidade de filos e classes nessa areia, cada um com uma forma diferente, apesar de a composição ser principalmente de calcita. Os gastrópodes possuem concha mais espiralada, enquanto os bivalves tem uma esfericidade maior (Figura 20 A). Os equinodermos podem ter formas tanto de pastilhas como formas prismáticas, como espinhos de ouriço do mar (Figura 20 C). Os corais e as algas também variam de forma dependendo do fragmento preservado na areia. Se for a parte de sustentação, a tendência é ter forma mais prismática (“tronco” da alga e coral), se for o apêndice, a forma é geralmente pastilhada (Figura 20 B). Dependendo da forma do clasto, o material apresenta maior ou menor resistência. Grãos em formas de placas são mais difíceis de quebrar do que os alongados como espinhos e os grãos mais angulosos têm mais atrito que os lisos.





*Figura 19 - Diferentes tipos de bioclastos. A e B são bivalves e halimedas, com formas mais arredondada e pastilhada e C e D com formas mais prismáticas e angulosas, respectivamente de equinodermos e aglutinantes.*

O teor de carbonato medido (34,21%) indica a classificação calcária do material (entre 10% e 50%) (Clark e Walker, 1977) e o ensaio confirma a análise óptica de que as frações mais grossas tem predominância dos bioclastos. No início do ensaio, é perceptível a grande quantidade de bioclastos. Após o ensaio, só resta à fração granulométrica fina com grande quantidade de quartzo e outros componentes não biogênicos ou sem carbonato (Figura 21).



*Figura 20 - Areia calcária antes (à esquerda) e depois (à direita) do ataque de ácido clorídrico.*

A alternativa para dar um valor ao teor de carbonato na areia utilizada seria a identificação dos táxons presentes e utilizar a tabela de composição dos esqueletos de Scholle (2003). O problema é que é apenas uma estimativa e a composição dos esqueletos não é fixa, podendo ter variação de minerais de calcita, aragonita e dolomita. A título de curiosidade, foi feita uma estimativa através dessa tabela para comparação de resultado com o ataque de ácido clorídrico.

Táxon	Aragonita	Calcita 0-35% Mg	Aragonita e Calcita
<b>Algas calcárias</b>			
Vermelha		10-30	
Verde	X		
Cocolitófero		0	
<b>Celenterata</b>			
Escleractíneos	X		
<b>Foraminífero</b>			
Bentônito	O	0-25	
Planctónico		3-6	
<b>Briozoários</b>	O	0-10	
<b>Braquiópodes</b>		0-7	
<b>Moluscos</b>			
Gastrópodes	X	0-5	X
Bivalves	X	0-5	X
<b>Anelídios</b>	X	3-10	X
<b>Artrópodes</b>		0-10	
<b>Equinodermos</b>		5-20	

*Tabela 10 - Tabela alterada de Scholle (2003) com a mineralogia composicional dos esqueletos de organismos. X significa comum e O significa raro.*

Utilizando a estimativa semiquantitativa, apenas por curiosidade já que uma análise estatística mais séria não pode ser realizada apenas com essa quantidade de grãos e ignorando as outras frações, feita na fração de 2 mm na Tabela 8, vemos que a halimeda, alga calcária verde, compõe 49,4% da amostragem, o que indicaria, segundo a Tabela 11, que 49,4% da mineralogia dessa fração é aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ). Os corais (escleractíneos), assim como a halimeda, também são compostos por aragonita e são 6,4% da amostragem. Os equinodermos já são compostos por calcita e dolomita, com teor de Mg de 5% a 20% e representam mineralogicamente 5,8%. Os anelídeos, gastrópodes e bivalves são mesclas de calcita, dolomita e aragonita, representando respectivamente 4,5%, 14,1% e 14,7% da fração. Porém é importante ressaltar que é comum a substituição de aragonita por calcita ao longo do tempo.

## 8.2 Discussão granulometria

Neste tópico serão discutidas todas as curvas granulométricas feitas no trabalho, ou seja, incluirá também as curvas geradas nos ensaios de adensamento e cisalhamento direto. Como visto no item 7.4, os cinco ensaios de granulometria geraram curvas similares, com pequenas diferenças provavelmente devidas a grãos ficarem retidos ou não em algum diâmetro de peneira por causa de sua forma. Um espinho de ouriço do mar, por exemplo, se agitado e deixado na posição vertical, passará facilmente pelo diâmetro hipotético de 1 mm, porém se na posição horizontal, ele não passará nem pelo diâmetro de 2 mm de peneira. Logo, a curva do primeiro ensaio de granulometria será chamada doravante de curva base e servirá como padrão de comparação entre as curvas granulométricas geradas pelos outros ensaios.

As Figuras 21 e 22 mostram os gráficos com as comparações entre as curvas granulométricas de adensamento e cisalhamento direto, respectivamente.

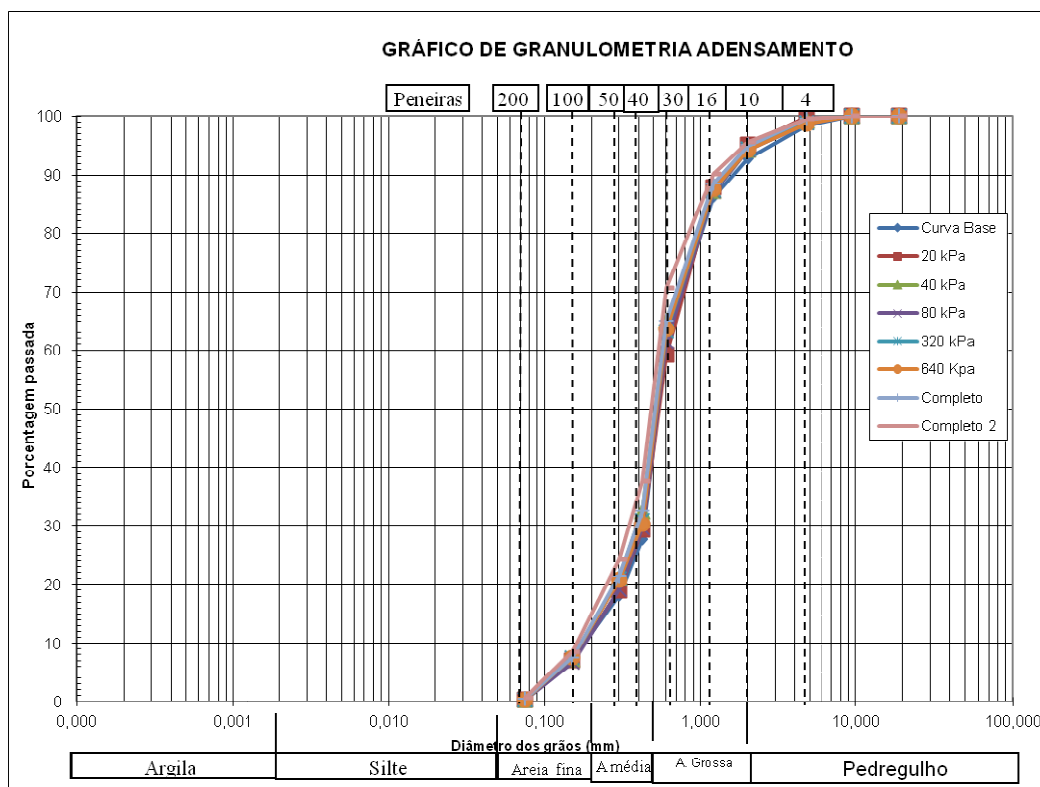


Figura 21 - Comparação granulométrica entre as curvas relacionadas ao adensamento e a curva base.

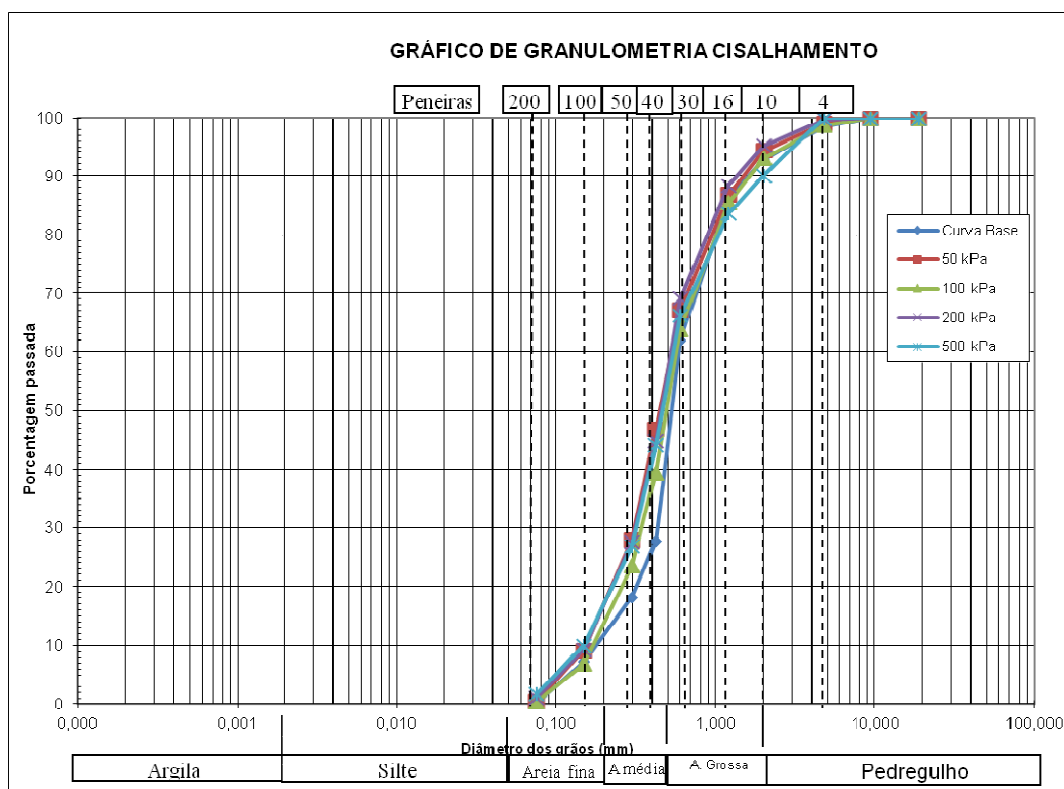


Figura 22 - Comparação granulométrica entre as curvas relacionadas ao cisalhamento direto e a curva base.

As diferenças entre as curvas são bem sutis, tanto no adensamento quanto no cisalhamento direto. Para uma melhor interpretação da influência da friabilidade, calculou-se o índice de quebra relativa (Br) de Hardin (1985) utilizando esses gráficos e utilizando a equação (1).

Para o adensamento, há um comportamento interessante na comparação das curvas, apesar de ser bem sutil. Na Figura 25, temos as curvas granulométricas da mesma amostra utilizada duas vezes para o ensaio completo (2355 kPa). A amostra, quando virgem, apresenta uma curva granulométrica, porém ao ser reensaiada, tem-se uma nova curva granulométrica, o que não deveria acontecer se não houvesse quebra de grãos. Ao se calcular Br para as duas curvas, percebe-se que ao reensaiar a mesma amostra em estados diferentes (virgem e já exposta a esforços) há um aumento na quebra relativa (Figura 26), ou seja, há uma maior quebra de grãos ao se repetir o ensaio, com a mesma tensão.

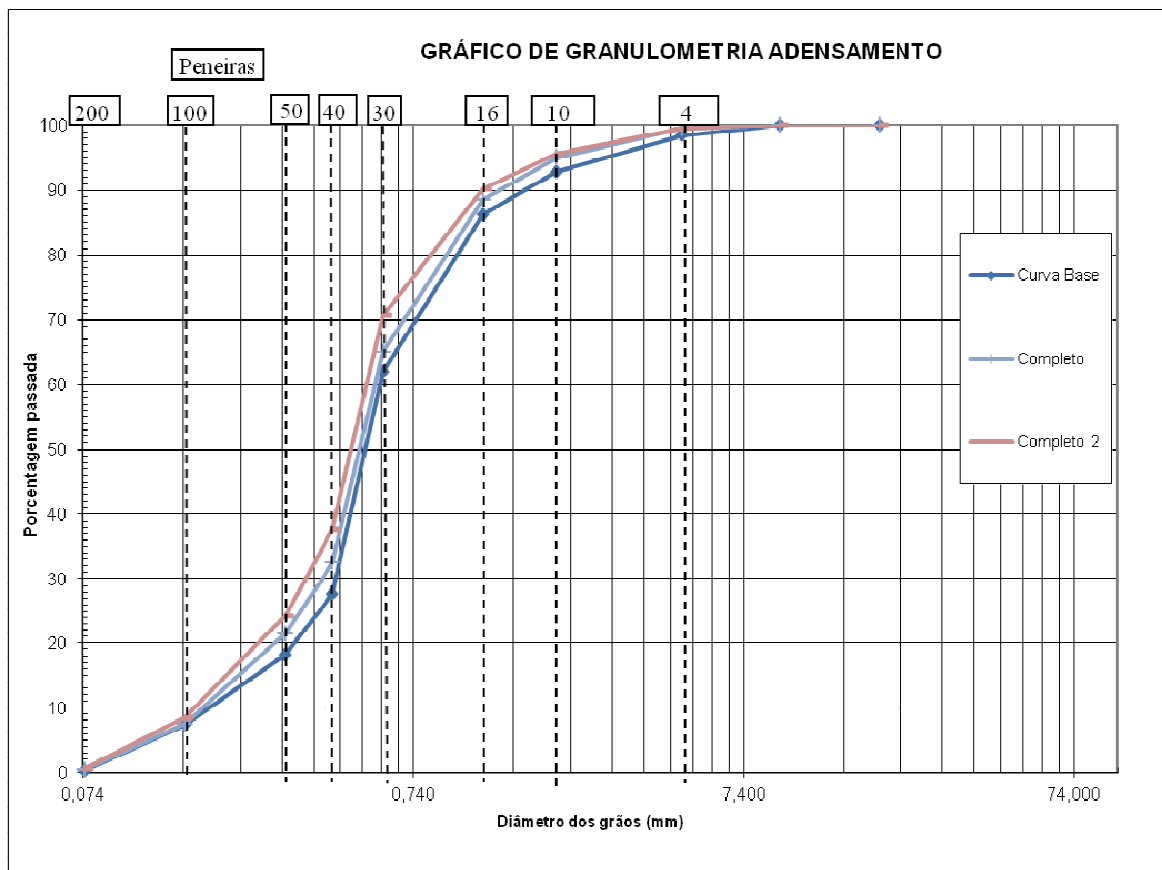


Figura 23 - Gráfico com as curvas granulométricas geradas de uma mesma amostra, ensaiada duas vezes por completo no adensamento (2355 kPa).

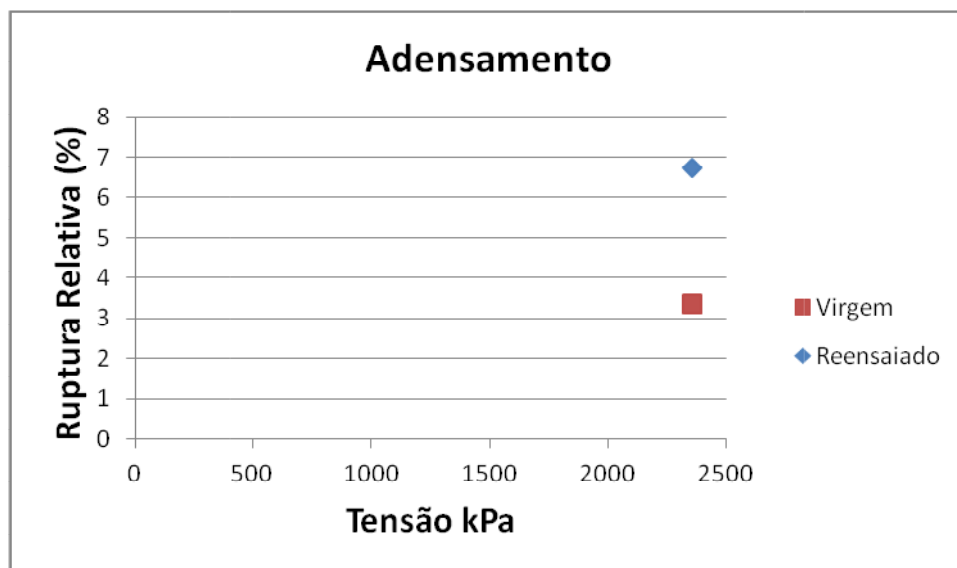


Figura 24 - Mudança no valor de quebra relativa para a mesma tensão, mudando apenas o estado do material.

No cisalhamento direto há uma mudança na fração de areia média a areia fina, porém sem nenhuma relação clara entre as tensões aplicadas, o que pode significar que essa variação é mais dependente da heterogeneidade do material. Como dito anteriormente, o cisalhamento ocorre em um plano, então a quebra de grãos, caso ocorresse, seria apenas

neste local. Sendo assim, essa diferença granulométrica deve ser produto do acaso do posicionamento dos grãos durante o ensaio.

Tensão (kPa)	Bt	Br (%)
50	0,07	7,87
100	0,05	5,62
200	0,13	14,61
500	0,1	11,24

Tabela 11 - Tabela com os valores de quebra total (Bt) e quebra relativa (Br) para cisalhamento direto. A quebra potencial (Bp) é a área do gráfico entre o limite de silte e a curva base, que tem valor de 0,89.

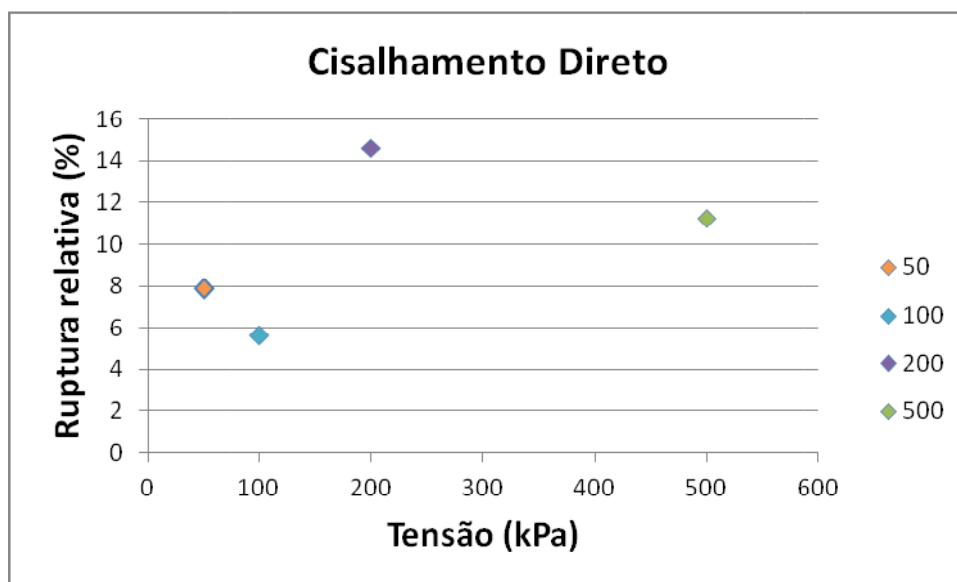


Figura 25 - Gráfico de Quebra Relativa por Tensão Cisalhante, mostrando que não há relação direta clara entre os dois parâmetros.

Plotando esses valores em um gráfico de tensão por Br, vemos que realmente não há uma relação direta clara entre esses dois parâmetros. Logo, entende-se que a friabilidade não é um fator decisivo, como já se esperava, para as tensões cisalhantes utilizadas nesse trabalho.

### 8.3 Discussão adensamento

Observando os resultados do adensamento, carregar o material virgem e carregar o material já ensaiado até a tensão de 2355 kPa não causa mudanças significativas no comportamento geotécnico. Os índices de compressão  $C_c$ , recompressão  $C_r$  e expansão  $C_e$  são os mesmos para ambas as curvas. Assim como Coop (1990), neste trabalho também não houve um comportamento diferenciado dos solos mais comuns a serem usados em obras. Apesar do comportamento não ser diferente, o material ainda pode ser considerado ruim para ser utilizado. O problema está principalmente no alto índice de vazios apresentado pela areia. Pinto (2016) diz que um mesmo carregamento causará deformação ou recalque específico proporcional a espessura da camada com as mesmas características de solo. Assim, do ensaio edométrico, podemos ver o recalque de maneira simplificada que ocorre ao se aplicar uma tensão de 100 kPa a um aterro hipotético de altura  $H$  igual a 10 metros feito com esse material. Para essa tensão, temos uma variação no índice de vazios  $\Delta e$  igual a 0,05. Usando a equação (4) e com  $e_0$  igual a 1,06, chega-se ao resultado de recalque de 24 centímetros. Esse valor pode ser considerado significativo para determinados projetos e deve ser levado em consideração de maneira adequada.

$$\rho = \frac{H}{1+e_0} \times \Delta e \quad (4)$$

### 8.4 Discussão cisalhamento direto

Assim como o adensamento, o cisalhamento direto não apresentou mudança de comportamento após reutilizar o material, dando o mesmo valor de ângulo de atrito para a 1ª Ida e o Residual. A provável causa disso deve ser a densidade escolhida para o material durante a realização do ensaio. A densidade do material nesse ensaio foi a mesma utilizada durante o ensaio de adensamento. Supõe-se que com essa densidade o material esteja fofo e mesmo com os dez ciclos de idas e voltas, o material continuou fofo, não alterando o ângulo de atrito da 1ª Ida e Residual. O ângulo de atrito  $\phi$  apresenta-se condizente com o encontrado na literatura, com o valor de 35°, como mostrado na Tabela 13. Um dos argumentos para justificar os altos ângulos de atrito é a predominância de formas angulosas de fragmentos de conchas e outros bioclastos.

Autor	Ângulo de atrito	Material	Região
Brandes (2011)	34,6°	Areia calcária	Duna Maui
Coop (1990)	40,3°	Areia calcária	Dogs Bay
Neste estudo	35°	Areia calcária	Praia do Paiva – PE
Spagnolli (2015)	34°/38,8°	Areia carbonática / Areia silicosa	Dogs Bay
Spagnolli, Doherty, Murphy e Attari (2015)	39,6°/40,1°	Areia carbonática fraturada / Areia silicosa	Dogs Bay
Yeung (2006)	48,1°/43,5°	Areia carbonática / Areia silicosa	Australia

*Tabela 12 - Comparação do ângulo de atrito neste estudo com o de outros autores, mostrando a diferença entre os valores do parâmetro.*

## 9 Conclusões

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a friabilidade e as características geotécnicas da areia da Praia do Paiva – PE.

- Friabilidade do material

A friabilidade do material não modificou o comportamento geotécnico do material nos ensaios realizados como era esperado. Contudo, conclui-se assim como Coop (1990 e 2004) que as areias calcárias não têm comportamento diferente de outros solos mais comuns. A quebra relativa de Hardin (1985) foi medida para o ensaio de adensamento e cisalhamento direto. Para o adensamento, houve um aumento da quebra relativa ao se reexpor o material utilizado no primeiro ensaio completo (até 2355 kPa). No cisalhamento, a quebra relativa não apresentou relação direta da friabilidade com o aumento de tensão, o que já era esperado devido ao cisalhamento ocorrer em um plano. Apesar de não ter sido possível correlacionar à quebra relativa com o aumento de tensão nesse ensaio, isso não significa que a quebra de grãos não seja importante nesse caso, porém para se analisar a quebra, seria preciso desenvolver uma forma de amostrar a região do plano onde o cisalhamento ocorre, para aplicar o conceito de Hardin (1985) de maneira adequada.



- Características geotécnicas

Do ensaio de adensamento, pode-se concluir que o material possui alto índice de vazios, o que faz com que a areia seja muito compressível e tenha um recalque considerável para esforços aplicados sobre ela. Essa característica é intrínseca ao material, que devido a seus componentes principalmente biogênicos, torna esse material heterogêneo em forma. Os diferentes táxons presentes misturam formas pastilhadas, alongadas, angulosas e arredondadas, criando um volume de vazios alto entre cada partícula, permitindo essa mudança na estrutura do conjunto.

Em relação ao cisalhamento direto, a envoltória foi à mesma tanto para a 1ª Ida e o Residual. Isso ocorreu devido ao material estar fofo durante ambos os procedimentos, mostrando que a densidade utilizada não foi ideal. O ângulo de atrito, porém, teve valor condizente com o encontrado na literatura, de 35°.

## 10 Referências Bibliográficas

- Adams, A., & MacKenzie, I. R. (1998). *Carbonate Sediments and Rocks Under the Microscope: A Colour Atlas*. CRC Press.
- Aguiar Neto, A. B., Marques, W. S., & Freire, G. S. S. (2016). Distribuição espacial de minerais pesados nos sedimentos superficiais da Plataforma Continental Oeste do Ceará, Nordeste do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 43 (1): 69-8.
- Al-Hussaini, M. M., "Investigation of Plane Strain Shear Testing. Report 2. Drained Plane Strain and Triaxial Compression Tests on Crushed Napa Basalt," Report S-71-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, June, 1971, 120 pp.
- Brandes, H. G. (2011). Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(1), 113-126.
- Brown, W. H., Fyfe, W. S., & Turner, F. J. (1962). Aragonite in California glaucophane schists, and the kinetics of the aragonite—calcite transformation. *Journal of Petrology*, 3(3), 566-582.
- Clark, A. R., & Walker, B. F. (1977). A proposed scheme for the classification and nomenclature for use in the engineering description on Middle Eastern sedimentary rocks. *Geotechnique*, 27(1), 93-99.
- Collongues, R., & Chaudron, G. (1952). Sur les modes de decomposition de la phase protoxyde de fer. *COMPTES RENDUS HEBDOMADAIRES DES SEANCES DE L ACADEMIE DES SCIENCES*, 234(7), 728-729.
- Cohen, M. W., & Leslie, D. D. (1975). *Shear Strength of Rockfill, Physical Properties. Engineering Study Number 526*. CORPS OF ENGINEERS SAUSALITO CALIF SOUTH PACIFIC DIV LAB.
- Coop, M. R. (1990). The mechanics of uncemented carbonate sands. *Geotechnique*, 40(4), 607-626.

Coop, M. R., & Airey, D. W. (2003). Carbonate sands. *Characterization and engineering properties of natural soils*, 1049-1086.

Datta, M., Gulhati, S. K., & Rao, G. V. (1979). *Crushing of calcareous sands during shear*. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.

de Almeida, F. F. M. (1955). *Geologia e petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha*. Serviço Grafico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Fookes, P. G. (1988, March). The geology of carbonate soils and rocks and their engineering characterisation and description. In *Proc., Int. Conf. on Calcareous Sediments* (Vol. 2, pp. 787-806). Perth, Australia: Balkema.

Flügel, E. (2012). *Microfacies analysis of limestones*. Springer Science & Business Media.

Hardin B. O (1985). Crushing of Soil Particles. *Journal of Geotechnical Engineering* 110(11). 1177-1192.

Hoff, J., & Kolff, A. N. (Eds.). (2012). *Hydraulic Fill Manual: For Dredging and Reclamation Works* (Vol. 244). CRC press.

Holmes, F. R. S. A (1978). Life as a Rock Builder – Marine Deposits. In: *Principles of Physical Geology*, 313-315. London: Thomas Nelson and Sons LTD

Kwag, J. M., Ochiai, H., & Yasufuku, N. (1999). Yielding stress characteristics of carbonate sand in relation to individual particle fragmentation strength. *Engineering for calcareous sediments. Edited by KA Al-Shafei. AA Balkema, Rotterdam, the Netherlands*, 79-87.

Leão, Z. M. A. N. (1999). Abrolhos: O complexo recifal mais extenso do Oceano Atlântico Sul. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. SIGEP*, 345-359.

Mabessone, J. M.; Coutinho, P. N (1970). *Litoral and Shallow Marine Geology of Northern and Northeastern Brasil*. Trabalhos Oceanográficos da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, v. 12, 214 p 1970.

Marachi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B., & Duncan, J. M., "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials," *Report No. TE-69-5*, University of California, Berkeley, Sept., 1969, 139 pp.

- Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A. F., Kato, Y., & Murata, H. (2001). Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression. *Soils and foundations*, 41(1), 69-82.
- Olgun, C. G., Martin, J. R., & La Vielle, T. H. (2009). Liquefaction susceptibility of calcareous sediments along the coastal plains of Puerto Rico. *Department of Environmental Engineering, Virginia Polytechnique Institute and State University, Virginia, USA*.
- Powers, M. C. (1953). A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2), 117-119.
- Ramsdell, R. C., Miedema, S. A., & Talmon, A. M. (2010). Hydraulic transport of sand/shell mixtures. *WODCON XIX, Beijing China*.
- Roberts, J. E., & De Souza, J. M. (1958). *The compressibility of sands*. Massachusetts Institute of Technology.
- Sandoval E. A., Pando M. A (2012). Experimental Assessment of the Liquefaction Resistance of Calcareous Biogenous Sands. *Earth Sciences Research Journal*, 16(1), 55-63.
- Scholle, P. A., & Ulmer-Scholle, D. S. (2003). *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis, AAPG Memoir 77 (Vol. 77)*. AAPG.
- Spagnoli, G., Doherty, P., Wu, D., & Doherty, M. (2015). Some mineralogical and geotechnical properties of carbonate and silica sand in relation to a novel offshore mixed-in-place pile. In *Proc., Offshore Mediterranean Conf.*
- Suguio, K. (1998). Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins. Brasil
- Suguio, K., & Barcelos, J. H. (1983). Significado paleoambiental de estrutura "boudinóide" e outras feições presentes na seção-tipo da formação Santo Anastácio do grupo Bauru, estado de São Paulo. *Boletim IG*, 14, 49-54.
- Thomé, J. W., Bergonci, P. E. A., & Gil, G. M. (2004). As Conchas das nossas praias: guia ilustrado. USEB.
- Tucker, M. E., & Wright, V. P. (2009). *Carbonate sedimentology*. John Wiley & Sons.

Urdinínea, J. A. (1977). *Aspectos Geoquímicos e ambientais dos calcários da Formação Pirabas* (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul).