



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

AGNALDO FRANCISCO DE FREITAS FILHO

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E TECNOLÓGICA DO ARENITO DA
FORMAÇÃO CABEÇAS (PEDRA MOURISCA) DE CASTELO DO PIAUÍ – PI**

FORTALEZA

2018

AGNALDO FRANCISCO DE FREITAS FILHO

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E TECNOLÓGICA DO ARENITO DA FORMAÇÃO
CABEÇAS (PEDRA MOURISCA) DE CASTELO DO PIAUÍ – PI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Orientador: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.

Co-Orientadora: Prof^a. Dra. Irani Clezar Mattos.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F936c Freitas Filho, Agnaldo Francisco de.
Caracterização Geológica e Tecnológica do Arenito da Formação Cabeças Pedra Mourisca de Castelo do Piauí-
Pi / Agnaldo Francisco de Freitas Filho. – 2018.
131 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.
Coorientação: Profª. Dra. Irani Clezar Mattos.
1. Castelo do Piauí. 2. Caracterização Tecnológica. 3. Formação Cabeças. I. Título.
- CDD 551
-

AGNALDO FRANCISCO DE FREITAS FILHO

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E TECNOLÓGICA DO ARENITO DA
FORMAÇÃO CABEÇAS (PEDRA MOURISCA) DE CASTELO DO PIAUÍ – PI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto (Orientador)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof^ª. Dra. Fernanda Maciel Canile
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof. Dr. Johnson Fernandes Nogueira
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

A minha mãe (*in memoriam*), meu Pai e meus irmãos. Ao meu Orientador e a Professora Irani. E a todos aqueles que, mesmo sem perceber apoiaram-me nesta jornada!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido força, paciência, sabedoria e determinação nas horas em que precisei. À Universidade Federal do Ceará – UFC, ao programa de pós-graduação da geologia.

A Capes pela concessão da bolsa no decorrer do meu mestrado.

A empresa ECB Rochas Ornamentais do Brasil, em nome do Administrador Ruben Silva que permitiu o apoio para a realização desse projeto.

Ao CETEM, em nome do coordenador do núcleo de rochas ornamentais em Cachoeiro de Itapemirim-Es, o estimado colega e amigo de trabalho o Dr. Francisco Wilson Hollanda Vidal que permitiu financeiramente e apoio para a realização dos ensaios tecnológicos desse projeto.

Ao NUTEC que permitiu o apoio para a realização de alguns ensaios tecnológicos.

As pessoas mais importantes da minha vida: minha família, meus irmãos (Ames, Dalmislan) pelo incentivo e apoio que me deram nessa jornada, e especialmente a meu pai Agnaldo e minha mãe Dilma (in memoriam), que considero dois guerreiros e batalhadores para manter uma família unida e determina num só objetivo. Pai: pelos seus ensinamentos educacionais e dedicação para me tornar um homem digno e com caráter. Mãe: que tinha um carinho e preocupação para que a família se mantenha unida, que dai de cima está olhando por nós. Vocês são à base dessa família!

Aos professores: Dr. José de Araújo Nogueira Neto (Zeca) pela oportunidade a mim dada para a realização desta dissertação, pelos conselhos (que não foram poucos) que irão contribuir muito na minha vida profissional, pela amizade que foi desenvolvida ao longo dos anos e principalmente pela confiança no meu trabalho e paciência comigo em certos momentos, a professora Tereza Falcão Neri pela dedicação, pela amizade, por ter me acolhido como um filho, pelos seus conselhos e por estar junto comigo até o final dando força! Vocês dois foram os pilares geológicos para mim. A minha co-orientadora professora Irani Clezar Mattos, pelos seus conselhos e paciência para enfrentar juntos comigo esse desafio.

Aos companheiros não fazendo parte da minha vida acadêmica, que mesmo distantes ou perto me apoiaram com força e paciência, aos amigos que encontrei nessa família geológica, valeu pelo companheirismo.

A todos os professores do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará – DEGEO, que contribuíram na minha formação acadêmica.

Aos funcionários de DEGEO que me ajudaram de alguma forma com o desenvolvimento de suas tarefas.

Ao pessoal da sala do Zeca, Cecílio (Brother), Joel e Diones, vocês foram muito importantes na construção não só dessa dissertação.

Por fim, OBRIGADO A TODOS!

“Mesmo a pedra que você tropeçar faz parte do seu destino” (Provérbio japonês).

RESUMO

O presente trabalho apresenta os arenitos da formação cabeça da bacia do Parnaíba-Pi, conhecidas comercialmente como Amarelo, Preto e Multicor são oriundas de uma mesma frente de lavra localizada no município de Castelo do Piauí/Pi. Com o intuito de avaliar suas qualidades para aplicação como rocha ornamental, foram efetuados ensaios petrofísicas, condutividade térmica, tecnológicos de índices físicos e físico-mecânicos, baseados em normas da ABNT, as rochas analisadas possuem composição mineralógica semelhante, sendo formadas essencialmente por quartzo, plagioclásio, muscovita. Petrograficamente corresponde a arenitos imatura mineral variando entre muito grossa a grossa, elevado grau de porosidade, alteração mineral variando de incipiente a moderada e contatos minerais predominantes do tipo côncavo-convexo. De forma geral, os resultados obtidos nos ensaios de caracterização tecnológica indicam que os três tipos de arenito estudados não atendem aos parâmetros sugeridos pelas normas vigentes. Os índices físicos apresentaram valores fora da média para rochas siliciclásticas brasileiras, quais sejam, massa específica aparente, porosidade e absorção d'água respectivamente com 2344 kg/m³, 3,38% e 7,93% da NBR 15.845-2(ABNT-2015). Os valores de resistência à compressão uniaxial só uma das amostras que conseguiu superar a média para rochas siliciclásticas brasileiras e também dentro dos limites da NBR 15.845-5(ABNT-2015). Com relação ao ensaio de flexão três pontos, a rocha exibiu valor, bem superior à média para rochas siliciclásticas brasileiras e NBR 15.845-6 (ABNT-2015). O comportamento das amostras quando submetidas ao desgaste AMSLER, forneceu um desempenho muito acima de desgaste para um percurso de 1000m, acima da média para rochas siliciclásticas brasileiras. A petrofísica da rocha em estudo, como porosidade, densidade e velocidade de propagação de ondas que têm importância particular no planejamento para rocha ornamental, baseiam-se, na sua maioria, nas seguintes propriedades: porosidade, densidade dos grãos, velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (VP e VS). Os ensaios para obtenção destes parâmetros são frequentemente realizados sobre amostras cilíndricas coletadas. Em função dos resultados obtidos nesta pesquisa, constata-se que os tipos areníticos Amarelo, Preto, Multicor podem ser utilizados como rocha ornamental e de revestimento, cabendo ressalvas que as normas usadas não especificam para o material.

Palavras-chave: Castelo do Piauí. Caracterização Tecnológica. Formação Cabeça.

ABSTRACT

The present work presents the sandstones of the head formation of the Parnaíba-Pi basin, known commercially as Yellow, Black and Multicor, come from the same mining front located in the municipality of Castelo do Piauí / Pi. In order to evaluate its qualities for application as ornamental rock, petrophysical tests, thermal conductivity, physical and physical-mechanical indexes based on ABNT norms were carried out, the rocks analyzed have a similar mineral composition, being formed essentially by quartz, plagioclase, muscovite. Petrographically corresponds to immature mineral sandstones varying from very thick to thick, high degree of porosity, mineral alteration ranging from incipient to moderate and predominant concave-convex mineral contacts. In general, the results obtained in the technological characterization tests indicate that the three types of sandstone studied do not meet the parameters suggested by the current norms. The physical indices presented values outside the average for Brazilian siliciclastic rocks, namely, apparent specific mass, porosity and water absorption, respectively, with 2344 kg / m³, 3.38% and 7.93% of NBR 15,845-2 (ABNT- 2015). The values of uniaxial compression strength were only one of the samples that managed to exceed the average for Brazilian siliciclastic rocks and also within the limits of NBR 15.845-5 (ABNT-2015). With respect to the three point flexural test, the rock exhibited value, well above the average for Brazilian siliciclastic rocks and NBR 15.845-6 (ABNT-2015). The behavior of the samples when subjected to AMSLER wear, provided a performance that was well above the wear for a 1000m course, above the average for Brazilian siliciclastic rocks. The rock petrophysics studied, such as porosity, density and wave propagation velocity, which are of particular importance in ornamental rock planning, are mostly based on the following properties: porosity, grain density, wave propagation velocity ultrasound (VP and VS). The tests to obtain these parameters are often performed on collected cylindrical samples. According to the results obtained in this research, it is verified that the sandstone types Yellow, Black, and Multicor can be used as ornamental and cladding rock, with caveats that the norms used do not specify for the material.

Keywords: Castle of Piauí. Technological Characterization. Head Formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização geográfica e geológica do município de Castelo do Piauí/Pi e área de pesquisa.....	24
Figura 2 –	Localização geográfica e principais feições estruturais herdadas do embasamento da Bacia do Parnaíba. Essas estruturas controlaram os principais eixos deposicionais durante a evolução tectonosedimentar da bacia.....	27
Figura 3 –	Evolução tectônica da Província Sedimentar do Meio Norte, de acordo com a classificação global de bacias.	28
Figura 4 –	Coluna estratigráfica da sequência deposicional devoniana-carbonífera da bacia do Paranaíba. Note a idade mais antiga da base da Formação Cabeças em direção à borda leste da bacia.....	31
Figura 5 –	Blocos rochosos a partir dos quais foram confeccionados todos os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios abordados neste trabalho.....	37
Figura 6 –	Coordenadas no sistema CIELAB L*, a*, b*.....	48
Figura 7 –	(A) São rochas, que apresentam uma estratificação horizontal bem marcada (B) mostrando uma estratificação horizontal bem marcada (C) Nas encostas suaves dos morros se instalam as frentes de lavras para exploração dos arenitos como pedra ornamental (D) verticalmente e lateralmente através de contato gradacional, inviabilizando uma padronização na obtenção de um único tipo.....	52
Figura 8 –	(A e B) são encontrados nódulos de pirita e presença de manganês no meio do arenito amarelo, possivelmente oriundos de matéria orgânica, fazendo com que a produção de rocha ornamental parasse nessa zona; (C) Mostrando Pirita nos arenitos e (D) Também foram observados nódulos de óxido de ferro com pirita no arenito Preto.....	53
Figura 9 –	Uma intercalação entre arenito amarelo com o arenito multicolor, para o arenito preto.....	54
Figura 10 –	As espessuras para cada cor do arenito são variáveis, acredita-se que com uns 18 metros é a diferença do amarelo para o preto.....	55
Figura 11 –	Coluna estratigráfica da área de pesquisa em Castelo do Piauí-Pi.....	57

Figura 12 – Amostra cuja coloração amarelada seja provavelmente resultante de processo de alteração mineral. Constituída em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm).....	59
Figura 13 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1964).....	61
Figura 14 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1968).....	61
Figura 15 – Amostra apresentando com coloração amarelada esbranquiçado constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm).....	63
Figura 16 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1964).....	65
Figura 17 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1968).....	65
Figura 18 – Amostra com coloração preta clara constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm).....	67
Figura 19 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1964).....	69
Figura 20 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1968).....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Correlação entre os valores da Densidade Aparente e Porosidade Aparente.....	74
Gráfico 2 – Correlação entre a Porosidade Aparente e as Porosidades Não-Preenchidas	75
Gráfico 3 – Resultados dos ensaios de Absorção de Água para os arenitos estudados.....	76
Gráfico 4 – Correlação entre os resultados dos Índices Físicos para os arenitos estudados.....	77
Gráfico 5 – Correlação entre a Compressão Uniaxial e a Porosidade Aparente para os arenitos estudados.....	79
Gráfico 6 – Correlação entre o ensaio de resistência à flexão e a absorção de água para os tipos areníticos estudados.....	80
Gráfico 7 – Desgaste por abrasão.....	82
Gráfico 8 – Correlação entre a Velocidade de Ondas Longitudinais e a Porosidade Aparente para os arenitos estudados.....	84
Gráfico 9 – Correlação entre a Velocidade de Ondas Longitudinais e a Compressão Uniaxial para os arenitos estudados.....	85
Gráfico 10 – Correlação entre a Velocidade de Ondas Longitudinais e a Resistência à Flexão para os arenitos estudados.....	86
Gráfico 11 – Relação densidade porosidade.....	88
Gráfico 12 – Relação entre porosidade e velocidade S1.....	89
Gráfico 13 – Relação entre porosidade e velocidade S2.....	90
Gráfico 14 – Relação entre a razão V_{s1}/V_{s2}	90
Gráfico 15 – Relação entre a velocidade de onda (P) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 40 Mpa.....	91
Gráfico 16 – Relação entre a densidade total (gm/cm^3) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 40 MPa	92

Gráfico 17 – Relação entre a densidade total (gm/cm ³) e a VS1.....	93
Gráfico 18 – Relação entre a densidade total (gm/cm ³) e a Vs2.....	93
Gráfico 19 – Relação entre a densidade total (gm/cm ³) e a VP.....	94
Gráfico 20 – Relação entre o Coeficiente de Poisson e a porosidade para pressão confinante efetiva de 40 MPa.....	95
Gráfico 21 – Relação entre módulos elásticos e a porosidade para pressão confinante efetiva de 40 MPa.....	96
Gráfico 22 – Resultado da Perda da Intensidade do Brilho antes e depois do ataque químico para os arenitos amarelos pesquisados.....	99
Gráfico 23 – Resultado da Perda da Intensidade do Brilho antes e depois do ataque químico para os arenitos pretos pesquisados.....	100
Gráfico 24 – Resultado da Perda da Intensidade do Brilho antes e depois do ataque químico para os arenitos pretos pesquisados.....	101
Gráfico 25 – Resultado das variações dos parâmetros cromáticos L*, a*, b*, antes e após o ataque químico para o arenito amarelo.....	103
Gráfico 26 – Resultado das variações dos parâmetros cromáticos L*, a* e b*, antes e após o ataque químico para o arenito preto.....	106
Gráfico 27 – Resultado das variações dos parâmetros cromáticos L*, a*, b*, antes e após o ataque químico para o arenito Mult.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores típicos de peso específico seco de algumas rochas.....	46
Tabela 2 –	Reagentes, concentrações, pH's, tempo de contato dos agentes químicos utilizados no ensaio de resistência ao ataque químico.....	47
Tabela 3 –	Síntese das características petrográficas das rochas estudadas.....	72
Tabela 4 –	Resultados dos Índices Físicos para os tipos areníticos estudados.....	73
Tabela 5 –	Resultados do ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial para os arenitos estudados.....	77
Tabela 6 –	Resultados para o ensaio de Resistência à Flexão (Três Pontos) para os arenitos estudados.....	79
Tabela 7 –	Resultados do ensaio de Desgaste Abrasivo Amsler para os arenitos estudados.....	81
Tabela 8 –	Resultados para o ensaio de Velocidade de Ondas Ultrassônicas Longitudinais para os arenitos estudados.....	83
Tabela 9 –	Classificação do coeficiente de Poisson por Gercek (2007).....	94
Tabela 10 –	Resultados para o ensaio de Resistência ao Ataque Químico para a Determinação da Perda da Intensidade do Brilho nos arenitos amarelos estudados.....	98
Tabela 11 –	Resultados para o ensaio de Resistência ao Ataque Químico para a Determinação da Perda da Intensidade do Brilho nos arenitos pretos estudados.....	98
Tabela 12 –	Resultados para o ensaio de Resistência ao Ataque Químico para a Determinação da Perda da Intensidade do Brilho nos arenitos Mult estudados.....	99
Tabela 13 –	Dados colorimétricos no Sistema CIELAB para as amostras do arenito Amarelo.....	102
Tabela 14 –	Dados colorimétricos no Sistema CIELAB para as amostras do arenito preto.....	105

Tabela 15 – Dados colorimétricos no Sistema CIELAB para as amostras do arenito

Mult..... 108

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

- Fotomicrografia 1 – (A) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos. (B) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos..... 62
- Fotomicrografia 2 – (A) A estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro, possível gohetita ou hematita (luz ortoscópica). (B) A estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro, possível gohetita ou hematita (luz natural polarizada). (C) Muscovita preenchendo as fraturas e nos contatos dos grãos e tendo um lineamento preferencial (luz ortoscópica). (D) Muscovita preenchendo as fraturas e nos contatos dos grãos e com lineamento preferencial (luz natural polarizada)..... 62
- Fotomicrografia 3 – (A) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos. (B) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos..... 66
- Fotomicrografia 4 – (A) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz ortoscópica). (B) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz natural polarizada). (C) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz ortoscópica). (D) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz natural polarizada)..... 66
- Fotomicrografia 5 – (A) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos. (B) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos..... 70
- Fotomicrografia 6 – (A) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz natural polarizada). (B) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz ortoscópica). (C) Estrutura do arenito,

mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz natural polarizada). (D) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz ortoscópica)..... 71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Objetivos.....	22
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos Gerais.....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>22</i>
1.2	Localização e vias de acesso.....	22
1.3	Organização do trabalho.....	25
2	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....	26
2.1	Arcabouço estratigráfico.....	28
2.2	Arcabouço estrutural e magmatismo.....	29
2.3	Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera.....	30
<i>2.3.1</i>	<i>Formação Itaim.....</i>	<i>31</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Formação Pimenteiras.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Formação Cabeças.....</i>	<i>33</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Depósitos glaciais da Formação Cabeças.....</i>	<i>34</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Formação Longá.....</i>	<i>34</i>
<i>2.3.6</i>	<i>Formação Poti.....</i>	<i>35</i>
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Materiais.....	36
3.2	Métodos.....	38
<i>3.2.1</i>	<i>Etapa Inicial.....</i>	<i>38</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Etapa de Campo.....</i>	<i>38</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Etapa Laboratorial.....</i>	<i>38</i>
<i>3.2.3.1</i>	<i>Análise Petrográfica.....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.3.2</i>	<i>Caracterização Tecnológica.....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.3.2.1</i>	<i>Índices Físicos.....</i>	<i>40</i>
<i>3.2.3.2.2</i>	<i>Índices Físico-Mecânicos.....</i>	<i>41</i>
<i>3.3.3.3</i>	<i>Petrofísica.....</i>	<i>43</i>
<i>3.4.3.4</i>	<i>Ataque Químico.....</i>	<i>46</i>
<i>3.5.3.5</i>	<i>Caracterização Química e Mineralógica.....</i>	<i>49</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Etapa Final.....</i>	<i>49</i>
4	CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL.....	51

4.1	Arenito da região de Castelo do Piauí.....	51
4.2	Enquadramento na Bacia do Parnaíba.....	52
4.3	Ambiente de deposição.....	55
4.4	Coluna Estratigráfica.....	55
5	PETROGRAFIA.....	58
5.1	Análise Petrográfica.....	58
5.1.1	<i>Amostra Amarelo.....</i>	58
5.1.1.1	<i>Descrição Macroscópica.....</i>	58
5.1.1.2	<i>Descrição Microscópica.....</i>	59
5.1.2	<i>Amostra Multicor.....</i>	63
5.1.2.1	<i>Descrição Macroscópica.....</i>	63
5.1.2.2	<i>Descrição Microscópica.....</i>	63
5.1.3	<i>Amostra Preto.....</i>	67
5.1.3.1	<i>Descrição Macroscópica.....</i>	67
5.1.3.2	<i>Descrição Microscópica.....</i>	67
6	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	73
6.1	Introdução.....	73
6.2	Índices Físicos.....	73
6.2.1	<i>Densidade Aparente.....</i>	73
6.2.2	<i>Porosidade Aparente.....</i>	74
6.2.3	<i>Absorção de Água.....</i>	75
6.3	Resistência à Compressão Uniaxial.....	77
6.4	Resistência à Flexão (Três Pontos) - Módulo de Ruptura.....	79
6.5	Desgaste Abrasivo Amsler.....	81
6.6	Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais.....	83
7	PETROFÍSICA.....	87
8	RESISTÊNCIA AO ATAQUE QUÍMICO.....	97
8.1	Introdução.....	97
8.2	Determinação da Perda de Intensidade do Brilho.....	97
8.3	Colorimetria.....	101
8.3.1	<i>Análise Colorimétrica – Arenito Amarelo.....</i>	101
8.3.2	<i>Análise Colorimétrica – Arenito Preto.....</i>	104
8.3.3	<i>Análise Colorimétrica – Arenito Multicor.....</i>	107

8.3.4	<i>Análise da Variação Total da Cor.....</i>	110
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
9.1	Conclusão.....	112
9.2	Recomendações.....	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS.....	121
	ANEXO A – MAPA GEOLÓGICO.....	132

1 INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais correspondem a materiais pétreos naturais, de origem ígnea, metamórfica ou sedimentar, submetidos a diferentes graus ou tipos de beneficiamento (aparelhada, apicoada, esculpida ou polida) para exercer uma função estética (Frasca, 2003).

As rochas para revestimento podem ser consideradas produtos do desmonte de materiais rochosos em blocos e de seu subsequente desdobramento em placas, cortadas em placas e posteriormente polidas. Atualmente, as rochas ornamentais têm sido bastante utilizadas na construção civil, constituindo os revestimentos verticais (paredes e fachadas) e horizontais (pisos) de exteriores e de interiores de edificações. Além do padrão estético, considera-se que o melhor aproveitamento da rocha está diretamente relacionado à sua petrofísica e a sua resistência mecânica.

O Brasil por possuir uma grande diversidade litológica com padrões cromáticos vistosos e cobiçados pelo mercado consumidor tornou-se destaque mundial no setor de rochas ornamentais e para revestimento. As exportações brasileiras do setor somaram US\$ 1.107.101,20 milhões e 2.358.107,30 toneladas no período de Janeiro a Dezembro de 2017, com variação negativa de respectivamente 1,41% e de 4,10% frente ao mesmo período de 2016 (Abirochas, 2017).

Os valores acima citados sugerem um desempenho tecnológico na área de processamento aquém do verdadeiro potencial brasileiro, frente aos principais concorrentes, deixando-se, portanto, o mercado internacional mais rentável, o setor de produtos beneficiados. A lacuna existente entre mero exportador de matéria bruta, e um participante ativo do mercado internacional de produtos processados, só poderá ser superada com a implementação de ações que resultem numa melhoria dos níveis dos produtos e geração de novos materiais. Logo, estudos direcionados a pesquisas científicas e tecnológicas focados na caracterização tecnológica para avaliação do material rochoso, fomentando seu beneficiamento, são extremamente necessários e pertinentes.

A extração do arenito da Formação Cabeças ocorre atualmente de forma artesanal e sua comercialização se dá com a rocha não beneficiada (estado bruto), constituindo o principal produto que movimenta a economia do município de Castelo do Piauí, situado na porção centro-norte do estado do Piauí. Neste contexto a caracterização tecnológica desta rocha voltada à melhoria do beneficiamento e lavra, e também, para as aplicações mais adequadas deste material.

A participação da região Nordeste no montante dos produtos beneficiados de rochas

do país corresponde a aproximadamente 26%, totalizando 2,4 milhões toneladas produzidas. Especificamente no estado do Piauí, o montante proveniente da produção do arenito denominado comercialmente de Pedra Mourisca foi de 100.000 toneladas em 2017 (Chiodi Filho, 2017).

Esta pesquisa contribui também com dados para suporte ao desenvolvimento de uma logística de beneficiamento da Pedra Mourisca, tentando evitar o desperdício, consequentemente reduzindo o impacto ambiental. Os ensaios tecnológicos de caracterização possibilitam uma aplicação e beneficiamento mais adequados do material como rocha ornamental. Foram realizadas correlações dos dados entre os diversos índices e parâmetros tecnológicos para o aperfeiçoamento no processo produtivo, assim como para o melhor aproveitamento destas rochas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

A pesquisa teve como objetivo desenvolver ensaios tecnológicos no que diz respeito às propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade, no arenito da Formação Cabeças (Pedra Mourisca). Identificando as melhores aplicações do litotipo como rocha ornamental e de revestimento, para a indústria da construção civil.

1.1.2 Objetivos Específicos

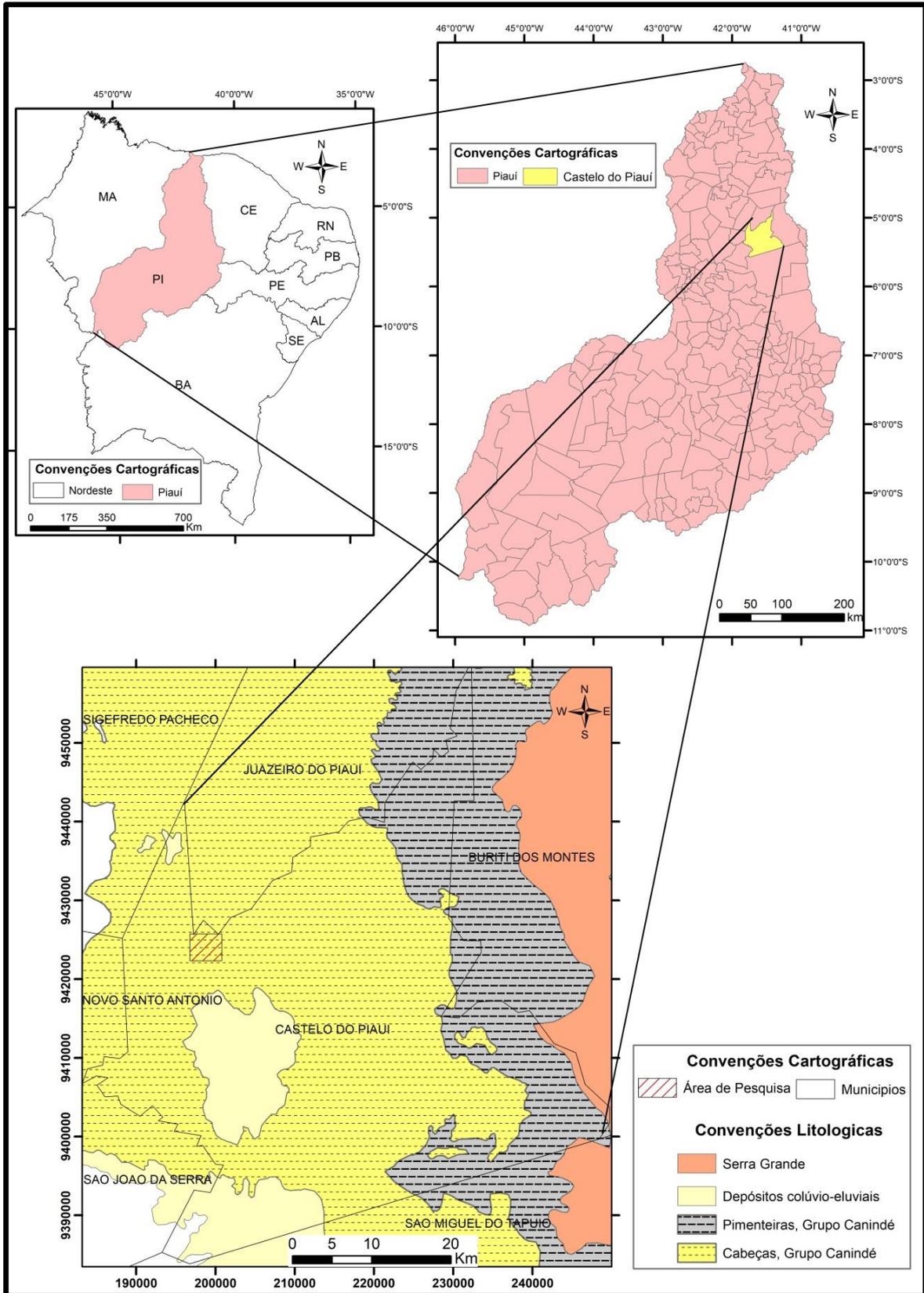
- a) Proceder à caracterização tecnológica do arenito e determinar suas propriedades físicas;
- b) Realizar ensaios de alterabilidade, brilho e cor buscando avaliar a sua resistência química;
- c) Executar ensaios petrofísicos visando averiguar seus parâmetros e propriedades petrofísicas;

1.2 Localização e vias de acesso

A área de pesquisa encontra-se nas pedreiras que estão situadas a cerca de 5 km da sede do município de Castelo do Piauí, que se localiza no Estado do Piauí, a 190 km de Teresina

e a 584 km de Fortaleza - CE. O município compreende uma área de 2.237,08 km², tendo como limites: ao norte, o município de Pedro II; a sul, São Miguel do Tapuio; a leste, área em litígio entre Piauí e Ceará; e a oeste, os municípios de Campo Maior, Alto Longá e São João da Serra (Figura 1).

Figura 1 – Localização geográfica e geológica do município de Castelo do Piauí/Pi e área de pesquisa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1.3 Organização do trabalho

Todas as informações, dados, resultados e interpretações relatadas e discutidas neste trabalho estão organizados sob a forma de capítulos os quais passam a ser resumidos a seguir, é importante ressaltar que neste trabalho apresentou e discutiu os resultados dentro de cada capítulo.

- Capítulo 2 - contém uma exposição do enquadramento geológico da bacia do Parnaíba que a área de estudo está inserida;
- Capítulo 3 - contém a metodologia usada no trabalho para todos os tipos de ensaios, proposto e encontrado na bibliografia;
- Capítulo 4 - enfoca os aspectos geológicos locais e estratigráficos das jazidas e alguns parâmetros importantes para exploração.
- Capítulo 5 – corresponde a descrições e interpretações das lâminas petrográficas dos arenitos, para posterior relacionar com a caracterização tecnológica;
- Capítulo 6 - abordam alguns aspectos da caracterização tecnológica, dos ensaios e os resultados e discussões dos dados obtidos sobre esta questão;
- Capítulo 7 - consistir em apresentar às propriedades físicas da rocha em estudo, os critérios mais utilizados de classificação dos minerais constituinte da rocha, com base nas propriedades petrofísicas;
- Capítulo 8 - apresenta a avaliação da resistência destas rochas mediante a ação do ataque químico, para a averiguação dos resultados e a apresentação e discussão dos dados obtidos;
- Capítulo 9 - apresenta as considerações gerais e as conclusões obtidas a partir dos capítulos 4, 5, 6,7 e 8 se alcançaram durante este estudo e;
- Contém a bibliografia indicada neste trabalho.
- A dissertação apresenta ainda os Anexos.

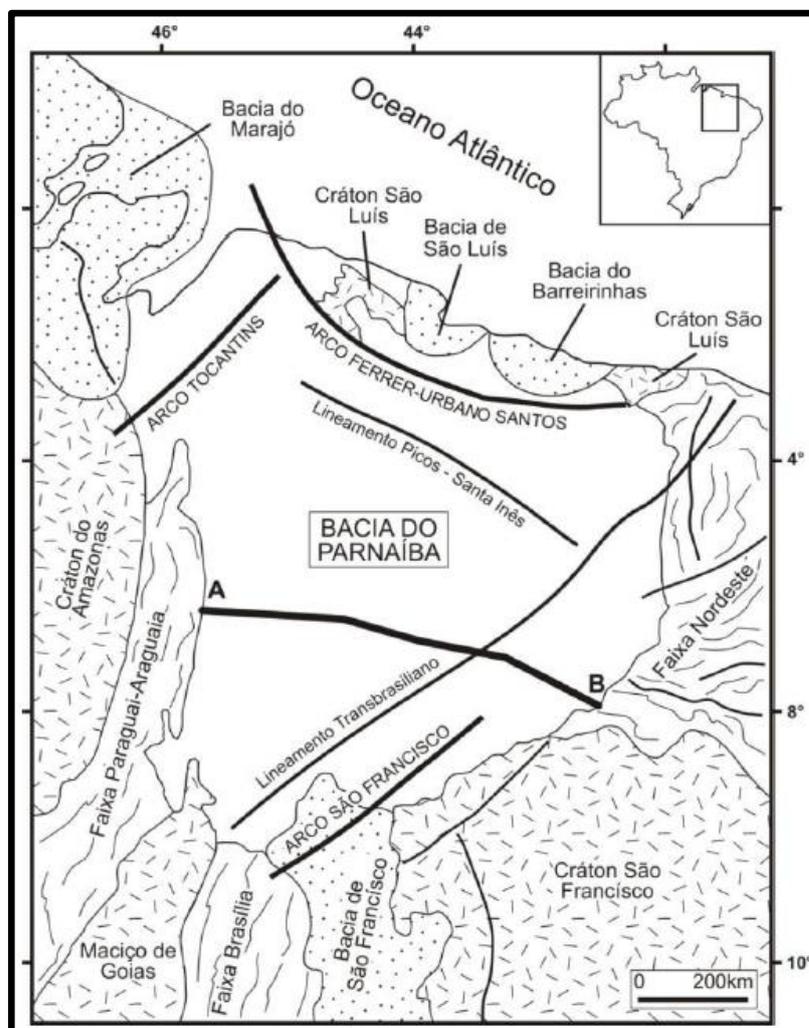
2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A Bacia do Parnaíba abrange uma área de aproximadamente 6000.00km² da porção noroeste do Nordeste do Brasil, a área de estudo está inserida dentro da bacia abrangendo uma área de 20 km². Compreende uma área sedimentar que engloba os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia. Trata-se de uma sinéclise paleozoica com geometria elíptica e eixo maior com direção NE-SW. Limita-se a noroeste com a Bacia de Marajó e Médio Amazonas mediante o Arco de Tocantins; a norte com bacias de São Luiz e Barreirinhas das quais está separada pelo Arco Ferrer-Urbano Santos; a oeste pela faixa Paraguai-Araguaia, e a sul e sudeste pela bacia Sanfranciscana por meio do Lineamento Senador Pompeu (Góes, 1995) (Figura 2).

A Bacia do Parnaíba é constituída por rochas sedimentares depositadas do Siluriano ao Cretáceo, e rochas intrusivas e extrusivas ligadas a eventos magmáticos de idades juro-triássica a eocretácia (Góes & Feijó 1994).

A Bacia do Parnaíba foi implantada sobre os riftes cambro-ordovicianos de Jaibaras, Jaguarapi, Cococi/Rio Jucá, São Julião e São Raimundo Nonato (Brito Neves, 1998) sendo, portanto, do tipo IF/IS, compreendendo-as supersequências Siluriano (Grupo Serra Grande), Devoniana (Grupo Canindé) e Carbonífero-Triássica (Grupo Balsas) de (Goés & Feijó 1994).

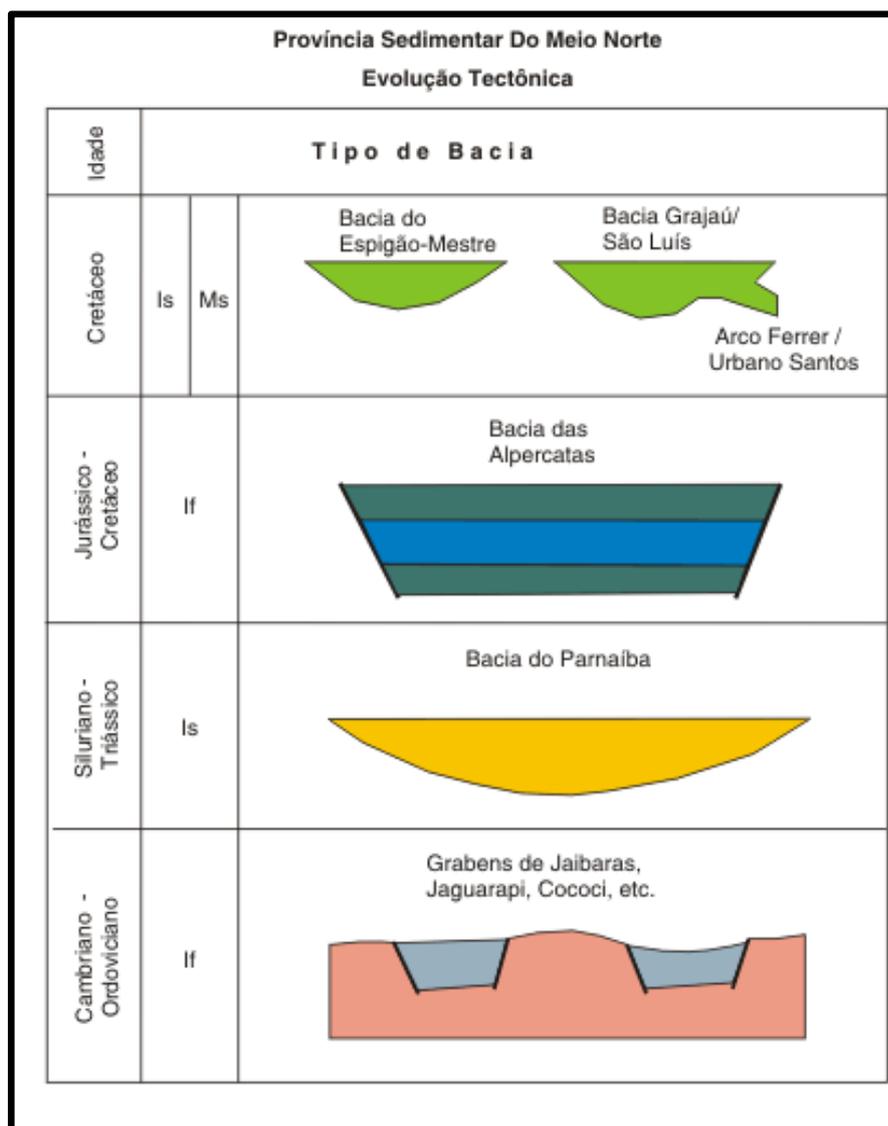
Figura 2 – Localização geográfica e principais feições estruturais herdadas do embasamento da Bacia do Parnaíba. Essas estruturas controlaram os principais eixos deposicionais durante a evolução tectonosedimentar da bacia.



Fonte: Cunha, 1986.

Segundo Góes & Feijó (1994) a Província Parnaíba consiste de quatro sítios deposicionais separados por discordâncias, as rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba: Bacia do Parnaíba propriamente dita, Bacia das Alpercatas, Bacia do Grajaú e Bacia do Espigão-Mestre (Góes, 1995): a primeira é do tipo IF/IS (Fratura Interior/ Depressão Interior), a segunda do tipo IF (Fratura Interior), a terceira do tipo MS (Depressão Marginal) e quarta do tipo IS (Depressão Interior). Sua evolução é mostrada esquematicamente na Figura 3.

Figura 3 – Evolução tectônica da Província Sedimentar do Meio Norte, de acordo com a classificação global de bacias.



Fonte: Kingston *et al.*, 1983.

2.1 Arcabouço estratigráfico

Os registros sedimentares que ocorrem na Bacia do Parnaíba foram agrupados, segundo Vaz *et al.* (2007). Em cinco superseqüências deposicionais foi realizada a partir da identificação de discordâncias regionais, evidenciadas através de dados sísmicos e bioestratigráficos (Della Fávera 1990; Góes *et al.*, 1994; Almeida & Carneiro, 2004; Vaz *et al.*, 2007).

De acordo com Figueiredo & Gabaglia (1986) e Rossetti (2001), a Bacia do Parnaíba é constituída apenas por rochas paleozóicas agrupadas em três super seqüências

transgressivas regressivas (siluriana, mesodevoniana-eocarbonífera e neocarbonífera-eotriássica). Essas rochas registram uma extensa sedimentação afro-brasileira associada ao contexto evolutivo do paleocontinente Gondwana.

Desta forma, a sedimentação e magmatismo pós-Neotriássico associado à ruptura do Gondwana e formação do Oceano Atlântico, devem ser analisados de forma distinta à Bacia do Parnaíba, embora as propostas de compartimentação da Bacia do Parnaíba defendida por alguns autores, foi adotada a carta estratigráfica segundo Vaz *et al.* (2007), pois é a mais utilizada por empresas de prospecção de hidrocarbonetos e por considerar a bacia como uma única província tectônica, simplificando a visualização de todos os eventos de possíveis sistemas petrolíferos, que com isso as delimitadas por discordâncias, a saber, sequências Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana- Eocarbonífera (Grupo Canindé), Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica (Formação Pastos Bons) e Cretácea (Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecurú).

2.2 Arcabouço estrutural e magmatismo

O Lineamento Transbrasiliano é, sem dúvida, a feição morfo-estrutural mais importante da Bacia do Parnaíba, onde é evidenciado por falhas de trend NE-SW, as quais cortam rochas paleozóicas e mesozóicas (Santos *et al.*, 2013). Esta estrutura estende-se por, aproximadamente, 2.700 km, desde o estado do Ceará ao Mato Grosso, no território brasileiro, alcançando ainda o Paraguai e a Argentina. No território africano é conhecido Zona de Cisalhamento de Hoggar-Kandi e se estende desde a costa do Togo até a região central da Argélia.

O Lineamento Transbrasiliano é considerado uma das principais suturas relacionadas à gênese do Gondwana, unindo dois amplos domínios geotectônicos: o Domínio Pré-Brasiliano e o Domínio Brasileiro, sendo o primeiro não afetado pelos eventos do Ciclo Brasileiro (Brito Neves & Cordani, 1991).

A principal fase de deformação ao longo das falhas que compõem o Lineamento Transbrasiliano possui cinemática transcorrente dextral (Delgado *et al.* 2003), igualmente ao que foi observado na Zona de Cisalhamento de Hoggar-Kandi, na África.

Entretanto, outros autores sugerem que como se trata de lineamentos da Província Borborema, essas estruturas possuem histórias complexas e evolução policíclicas dessa forma, devem ser abordadas de maneira mais complexa. No Jurássico e Cretáceo, o evento de abertura do Oceano Atlântico foi caracterizado por diversos episódios magmáticos. Neste período

instalaram-se, na Bacia do Parnaíba, rochas ígneas intrusivas e extrusivas de composição alcalina e básica.

A atividade tectônica reativou estruturas herdadas do embasamento que serviram como dutos para atividades magmáticas com idades médias de 178 Ma e 124 Ma (K-Ar e Ar-Ar) (Almeida & Carneiro, 2004; Arce *et al.* 2006).

As atividades magmáticas foram divididas em dois pulsos denominados formações Mosquito e Sardinha, estas ocorrem na forma de soleiras e diques predominantemente na sequência mesodevoniana-eocarbonífera, e em casos excepcionais, na sequência neocarbonífera-eotriássica (Vaz *et al.*, 2007).

A Formação Mosquito agrega corpos de basalto, pretos a roxos, situados entre as cidades de Fortaleza das Nogueiras e Barra da Corda, na porção central do estado do Maranhão (Aguiar, 1971), concentram-se na borda oeste da bacia na forma de grandes derrames e soleiras, formados por basalto com intercalação de arenito com seixo de sílex. Rochas sedimentares nesta formação foram interpretadas como produto de um sistema eólico (Caputo, 1984). Possui idade de aproximadamente 178 Ma (Eojurássico), e pode ser correlacionado ao Magmatismo Penatecaua das bacias do Solimões e Amazonas, relacionada ao início do processo de formação do Oceano Atlântico Sul. (Mizusaki & Thomas Filho 2004), a ocorrência dessa formação concentra-se na porção oeste da Bacia do Parnaíba.

Por sua vez, a Formação Sardinha (Aguiar, 1969), de idade eocretácea (124 Ma), é caracterizada por basaltos pretos e amigdaloidais, ocorrem na borda leste na forma de diques e pequenas soleiras de basaltos estão relacionadas ao processo da abertura do Oceano Atlântico Central, e é correlacionada ao magmatismo Serra Geral, da Bacia do Paraná (Mizusaki & Thomas Filho, 2004; Zalán, 2004), ocorrendo de forma mais efetiva na parte leste da Bacia do Parnaíba.

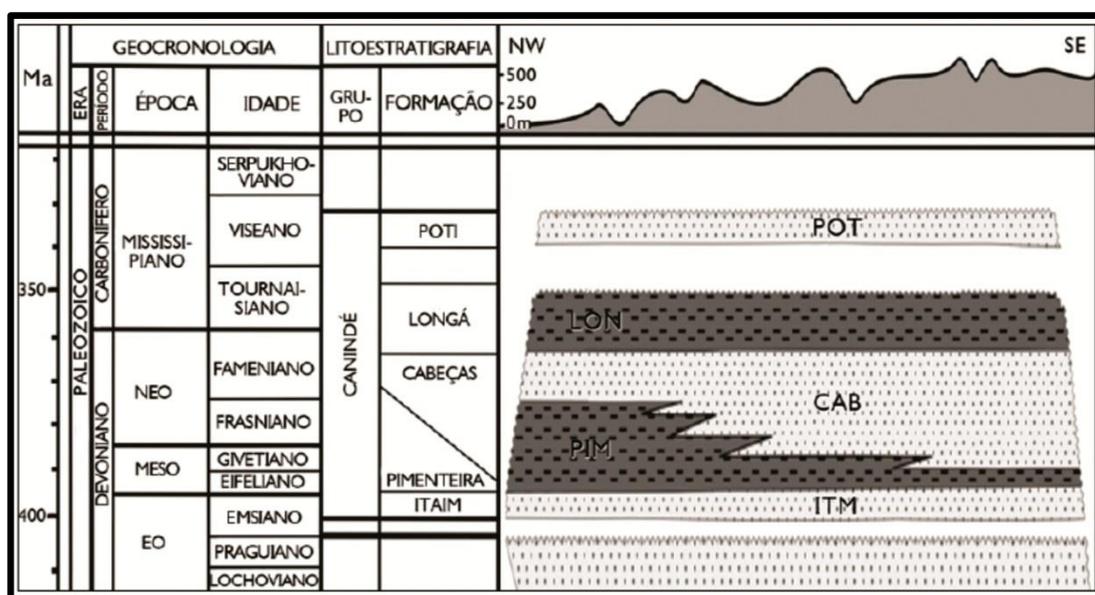
2.3 Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera

A Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera, tem uma retomada da sedimentação que ocorreu em resposta ao adelgaçamento litosférico e a uma tendência global de elevação no nível do mar. Esse somatório resultou na instalação de mares epicontinentais e deposição da sequência mesodevoniana-eocarbonífera, com fácies influenciadas por correntes de marés e tempestade. Esta sequência é representada pelo Grupo Canindé (Rodrigues, 1967) que apresenta rochas aflorando na porção leste e sudoeste da bacia, sendo o primeiro registro de tempestitos no Brasil (Della Fávera, 1990; Góes *et al.* 1990; Vaz *et al.* 2007).

A litoestratigrafia, correspondente ao Grupo Canindé, que se subdivide, de acordo com Caputo (1984), em cinco formações: Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. Depositou-se discordantemente sobre a Sequência Siluriana, tendo como limite inferior a Discordância Eodevoniana e, superior, a Discordância Eocarbonífera, conforme ilustrado na Carta Estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz *et al.*,2007). (Figura 4).

A Formação Poti, considerada por vários autores como pertencente ao Grupo Canindé e incluída na Carta Estratigráfica de Vaz *et al.* (2007) como unidade deste grupo, segundo Cruz (2015) foi entendida como uma unidade à parte em razão da Discordância Eocarbonífera que a separa da Formação Longá, com um hiato de mais de 10 Ma.

Figura 4 – Coluna estratigráfica da sequência deposicional devoniana-carbonífera da bacia do Parnaíba. Note a idade mais antiga da base da Formação Cabeças em direção à borda leste da bacia.



Fonte: modificado de Vaz *et al.*, 2007.

2.3.1 Formação Itaim

Primeira unidade litoestratigráfica do Grupo Canindé, a Formação Itaim foi proposta por (Kegel, 1953, *apud* Caputo, 1984), sedimentos depositados em ambiente deltaico a plataformal influenciado por maré e ondas (Góes & Feijó, 1994). Icnofósseis encontrados nos folhelhos, tais como *Spirophyton sp.* e *Amphigenia sp.*, possibilitaram atribuir idade eifeliana a essa unidade (Caputo 1984), ainda como membro da Formação Pimenteiras, para descrever arenitos micáceos arenitos finos a médios intercalados com folhelhos bioturbados e sílticos que

ocorrem na porção leste da Bacia do Parnaíba.

Mais tarde, Caputo (1984) a individualizou como formação pertencente ao Grupo Canindé, devido à sua maior associação às rochas deste grupo, é constituída por camadas de arenito e folhelho bioturbado, siltitos com intercalações de arenitos de granulação fina a média, sendo comum também a ocorrência de folhelhos sideríticos com camadas contendo siderita oolítica, hematita e clorita, interpretando então as fácies presentes na Formação Itaim como indicadores de deposição em sistemas deltaicos e de frente de leques deltaicos. Os folhelhos da base da unidade, em subsuperfície, foram interpretados como sedimentos de prodelta e os dois corpos de arenito regressivos do topo da seção, como depositados na frente deltaica.

2.3.2 Formação Pimenteiras

A designação Formação Pimenteiras foi introduzida por Small (1914 *apud* Caputo, 1984) para designar folhelhos com cerca de 20 m de espessura que ocorrem na localidade de Pimenteiras. Esta unidade é constituída por folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados, radioativos e ricos em matéria orgânica, ocorrendo também intercalações de siltitos e arenitos atribuídos ao ambiente de plataforma rasa dominada por tempestades (Vaz *et al.*, 2007).

Em subsuperfície, Caputo (1984) descreveu as rochas como folhelhos pretos, cinza-escuros e esverdeados, micáceos e geralmente sideríticos, folhelhos siltosos e camadas de siltito, podendo ocorrer também delgadas camadas de arenito fino, às vezes com fragmentos de folhelhos. Quanto ao sistema deposicional, a Formação Pimenteiras é entendida por Caputo (1984), Della Fávera (1990), Vaz *et al.* (2007), sendo de sistema plataformal sob ação de correntes de tempestade. Segundo Caputo (1984), ocorrem também, na região nordeste da bacia, folhelhos siltosos com espessura superior a 70 m e arenito fino a muito fino que caracterizam, respectivamente, depósitos de prodelta e de frente deltaica.

A Formação Pimenteira é um registro de transgressão marinha mundial durante o Devoniano, com oscilações do nível do mar. No estágio Frasniano, camadas de folhelho laminado radiativo indicam o máximo nível do mar. Seus estratos apresentam uma tendência granodecrescente ascendente cíclica, interpretados como a mais importante incursão marinha na bacia (Vaz *et al.*, 2007). O conteúdo paleontológico inclui alguns gêneros de trilobitas (*Metacryphaeus*) e braquiópodos (*Chonetes*) além de icnofósseis que permitiram inferir idade meso-neodevoniana (Della Fávera 1990; Agostinho *et al.* 2004; Scheffler *et al.* 2011).

2.3.3 Formação Cabeças

Foi dado por Plummer (1946) o nome Cabeças, que a considerava de idade Carbonífera, uma sequência de arenitos sigmoidal abaulada e localmente intercalações de diamictitos. Seu nome foi retirado da localidade homônima do Piauí. A Formação Cabeças foi proposta por Plummer (1948 *apud* Caputo, 1984) para designar uma seção devoniana composta por arenitos de granulação média a grossa. Trata-se de um pacote sedimentar principalmente arenítico que se depositou concomitantemente à Formação Pimenteiras, com a qual se observa contato com passagem tipicamente gradacional (Della Fávera, 1990).

Os litotipos predominantes na Formação Cabeças consistem em arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, às vezes avermelhados, médios e grosseiros, comumente conglomeráticos e com poucas argilas, tem 300 metros de espessura, intercalado delgadas de siltitos e folhelhos. Podem ocorrer eventualmente diamictitos na porção superior da unidade (Kegel, 1953; Caputo *et al.*, 2005; Vaz *et al.*, 2007).

Em subsuperfície, a formação cabeças é composta por corpos de arenito separados por camadas de folhelho e silito (rochas tipo varvito) e camadas de diamictito (Caputo, 1984). Suas composições espessas de arenitos resistentes alternam-se com outros de menor espessura e resistência. Apresenta aspectos maciços, com estratificações cruzadas e forma relevo em "cuesta" com outras formações, mergulhando para oeste.

Quanto aos sistemas deposicionais atuantes na deposição da Formação Cabeças, os tilitos, seixos e pavimentos rochosos estriados corroboram a ideia de uma deposição em ambiente glacial ou periglacial (Caputo, 1984). Della Fávera (1990) identificou a presença de tempestitos na transição desta formação para a Formação Pimenteiras. Já, Góes & Feijó (1994) interpretaram litotipos desta unidade como sendo principalmente de um sistema plataformal sob influência preponderante de correntes de marés, podendo ocorrer também fácies flúvio-estuarinas no entanto fácies flúvio-deltaicas também ocorrem (Ponciano & Della Fávera, 2009). Na borda sudoeste da bacia a presença de fácies de diamictitos no topo da unidade sugere influência glacial para esses depósitos (Oliveira 1997; Loboziack *et al.*, 2000; Caputo *et al.*, 2008). Invertebrados marinhos, trilobitas e braquiópodos são abundantes, indicando deposição meso-neodevoniana (Góes & Feijó, 1994).

A formação Cabeças é subdividida em dois membros, quais seja Passagem e Oeiras. Os principais litotipos correspondem principalmente a arenitos micáceos bem selecionados, de granulação muito fina a grossa e coloração esbranquiçada a arroxeadada, com intercalações de siltitos, arenitos conglomeráticos e raramente folhelhos, aflorantes nos flancos leste e oeste da

bacia. No seu topo, ocorrem tilitos e ritmitos, principalmente no flanco oeste, onde os corpos areníticos da Formação Cabeças são mais delgados, gradando lateralmente para os pelitos da Formação Pimenteira (Kegel, 1953; Caputo *et al.*, 2005).

2.3.4 Depósitos glaciais da Formação Cabeças

A primeira indicação sobre estratos de origem glacial na porção superior da Formação Cabeças foi realizada por Kegel (1953), que identificou diamictitos com seixos facetados e estriados de quartzo e de rochas cristalinas em testemunhos de sondagem.

Posteriormente, Carozzi (1980) e Caputo *et al.* (2008) constataram pavimentos estriados em arenitos na borda leste da Bacia do Parnaíba orientados N10°–80°E e sugeriram avanço da geleira em direção a sudoeste da bacia. Moore (1963) e Caputo (1985), ao analisarem exposições da Formação Cabeças na borda sudoeste da Bacia do Parnaíba, verificaram diamictitos foliados com seixos exóticos facetados e estriados entre camadas de arenitos predominantemente maciços e com estruturas de escape de água.

Além disso, afirmaram que as deformações foram originadas a partir de movimentação de geleiras, já que estaria restrita a Formação Cabeças e não afetaram as unidades sedimentares sobrepostas e sotopostas, respectivamente as formações Pimenteiras e Longá. Granhn *et al.* (2006) e Streel *et al.* (2013) ao analisarem esses diamictitos inferiram idade Famenniana Superior com base em miosporos da zona LE (*R.lepidophyta* – *H. explanatus*) e LN (*R.lepidophyta* – *V. nitidus*) estabelecidos na Europa ocidental.

2.3.5 Formação Longá

A Formação Longá é delimitada na base pelo contato com a Formação Cabeças e no topo pela Discordância Eocarbonífera. As fácies que compõem a Formação Longá são tipicamente folhelhos cinza-escuros a pretos, em parte arroxeados, maciços a laminados com ocorrência de bioturbação (Vaz *et al.*, 2007).

Segundo Lima & Leite (1978, apud Vaz *et al.*, 2007), comumente ocorrem em sua porção média pacotes de arenito laminado de coloração cinza-claro a branco. Quanto à sedimentação, Góes & Feijó (1994) interpretaram as fácies desta unidade como pertencentes ao sistema deposicional plataformal dominado por tempestades, como já havia interpretado Della Fávera (1990). Este mesmo autor associou os folhelhos da base da Formação Longá a um intervalo transgressivo, cujo ápice é também uma superfície de inundação da bacia, porém

resultante de uma transgressão de menor proporção, em comparação com a Formação Pimenteiras.

2.3.6 Formação Poti

A Formação Poti, unidade mais jovem desta sequência, é composta por arenitos brancos finos a médio, com lâminas de siltitos, associados à deltas e à planícies de maré (Small, 1914), além de eventuais níveis de carvão depositados em ambiente deltaico a planície de maré, sob influência de tempestade, durante o Viseniano (Lima & Leite, 1978; Góes & Feijó, 1994; Melo & Laboziak, 2003).

O final da deposição desta sequência é marcado por uma discordância erosiva associada aos efeitos da Orogenia Hernicana, também constatada na porção central da bacia por falhas normais e estruturas relacionadas a falhas reversas (Caputo 1984; Góes & Feijó 1994).

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Os materiais rochosos utilizados para fins ornamentais e de revestimento em obras de construção civil são submetidos as mais variadas solicitações: atrito, desgaste, impacto, tráfego de pessoas e/ou veículos, ação das intempéries, ataques por produtos de limpeza, líquidos agressivos, resíduos alimentícios, entre outros. Desta forma, a caracterização tecnológica torna-se fundamental para que sua aplicação/utilização ocorra de forma correta e seja viável do ponto de vista econômico.

Para a execução deste trabalho, foram coletados nove blocos rochosos, sendo três blocos de cada tipo arenítico, tendo cada um, cerca de 50 cm x 50 cm x 10 cm, a partir dos quais, foram confeccionados todos os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios abordados nesta pesquisa (Figura 5).

Figura 5 – Blocos rochosos a partir dos quais foram confeccionados todos os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios abordados neste trabalho.



Sendo: (A) mostrando a retirada do bloco do arenito preto, para a caracterização tecnológica; (B) mostrando a retirada do bloco do arenito multicolor, para a caracterização tecnológica; (C) mostrando a escolha do arenito amarelo para a retirada do bloco, para a caracterização tecnológica; (D) mostrando a verificação do tamanho do bloco do arenito amarelo para a retirada do bloco, para a caracterização tecnológica; (E) mostrando a retirada do bloco do arenito multicolor, para a caracterização tecnológica; (F) mostrando o local de onde retirou os blocos do arenito amarelo, para a caracterização tecnológica.

3.2 Métodos

A pesquisa foi focada na caracterização geológica e tecnológica do arenito (Pedra Mourisca). Inicialmente foram realizadas atividades de campo e mapeamento, seguidas de coleta de amostras e ensaios laboratoriais, finalizando com a elaboração de mapa geológico e definição dos melhores usos para o arenito estudado.

As etapas visando o alcance dos objetivos propostos foram:

3.2.1 Etapa Inicial

As pesquisas bibliográficas sobre a área e o tema estudado objetivaram abordar os principais conceitos referentes aos assuntos tratados neste trabalho: métodos e normas para a caracterização tecnológica de rochas ornamentais; dados científicos relacionados à condutividade térmica em rochas; artigos relacionados ao estudo da cor, do brilho e da resistência ao ataque químico em rochas ornamentais e, diversos trabalhos relacionados à petrografia de rochas areníticas.

3.2.2 Etapa de Campo

Nesta etapa foi realizado o reconhecimento geológico, em duas fases: a primeira, foi o reconhecimento da geologia regional e local com coleta de amostras; a segunda, foi realizar o mapeamento entorno da mina da empresa, procurando identificar as litologias e seu ambiente de deposição e definir as litologias aflorantes na área. Esta fase serviu para individualizar as relações de contato, mineralogia, texturas e estruturas das rochas. Ainda nessa etapa realizou seleção e coleta de blocos rochosos, sendo três blocos de cada tipo areníticos aqui denominados de Amarelo, Black e Multicor, a partir dos quais foram confeccionados todos os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios abordados nesta pesquisa.

3.2.3 Etapa Laboratorial

Foram realizados diversos procedimentos e ensaios laboratoriais, os quais tiveram início com a preparação de amostras específicas para cada ensaio. Os dados obtidos em laboratório são para entender as propriedades tecnológicas dos materiais selecionados para estudo: análise petrográfica; índices físicos (densidade, porosidade e absorção de água);

coeficiente de dilatação térmica linear; desgaste abrasivo Amsler; resistência à compressão uniaxial; resistência à flexão por carregamento em três pontos (módulo de ruptura), ao impacto de corpo-duro e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

Ainda estão incluídos nos procedimentos laboratoriais: determinação da perda de intensidade do brilho; avaliação das mudanças cromáticas, após o ataque químico, através do Sistema CIELAB. Também foram efetuados ensaios petrofísicos que determinaram em laboratório a influência no comportamento mecânico como porosidade, peso específico e velocidade de propagação das ondas elásticas e, por fim, a determinação da condutividade térmica, pré e pós ataque químico.

3.2.3.1 *Análise Petrográfica*

Baseou-se na observação de seis (6) lâminas petrográficas delgadas, estudadas ao microscópio óptico de luz transmitida, permitindo detalhar feições como: textura, estrutura, granulometria dos minerais, composição mineralógica, grau de alteração mineral e tipos de contatos minerais. Fornece informações básicas para o estabelecimento das correlações entre comportamento físico-mecânico, índices físicos, e alterabilidade. Para tanto foi seguida a norma NBR 15.845 – 1 (ABNT, 2015) e as recomendações apresentadas por Rodrigues *et al.* (1997), Navarro (1998) e Meyer (2003).

A petrografia envolveu a caracterização macro e microscópicas dos arenitos selecionadas. Segundo Rodrigues de Paula (1997) o grau de porosidade, o estado microfissural, o tamanho e a forma dos cristais, o estado de alteração, dentre outros fatores, são a porta de entrada de agentes que induzem ou facilitam o grau de alteração da rocha. O conhecimento destes parâmetros permite prever a durabilidade da rocha quando submetida ao contato com a água, a solicitações de atrito, esforços fletores e compressores.

Na realização da análise petrográfica foram confeccionadas seis lâminas nas dimensões de 4,5cm x 2,5cm e espessura da ordem de 0,03mm, sendo três lâminas de cada tipo arenítico, que foram analisadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica/LME da Universidade Federal do Ceará/UFC, utilizando microscópio petrográfico Nikon modelo Eclipse Ci-POL, equipado com mecanismo de captura de imagens.

3.2.3.2 *Caracterização Tecnológica*

A execução de ensaios tecnológicos é de grande importância para a qualificação das

rochas para fins ornamentais e de revestimento. As rochas em seu uso diário são submetidas a diversos fatores de desgaste: compressão, pressão, fricções, impacto, agentes intempéricos, agentes químicos, etc. Através da realização de ensaios tecnológicos específicos é possível conhecer suas propriedades tecnológicas, possibilitando efetuar uma previsão do comportamento destes materiais.

Sendo assim, a determinação das características tecnológicas, através de ensaios laboratoriais, torna-se de fundamental importância para demonstrar qual a melhor aplicação/utilização nas obras de construção civil, levando-se em consideração os aspectos relacionados a segurança, conforto térmico, estética e viabilidade econômica, de acordo com as resoluções da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

3.2.3.2.1 Índices Físicos

Os ensaios relativos aos índices físicos foram executados segundo a norma NBR 15.845 – 2 (ABNT, 2015) que compreendem a determinação da densidade ou massa específica aparente seca e saturada, porosidade aparente e absorção d'água.

Os valores obtidos durante os ensaios relativos aos índices físicos constituem importante parâmetro para indicar o grau de sanidade da rocha, está diretamente relacionada à durabilidade do material pétreo, uma vez que, os índices físicos (porosidade, absorção de água e densidade) refletem a tendência natural da rocha de sofrer ou não alterações ao longo do tempo, principalmente, pela percolação de líquidos através de poros e microfissuras. Foram necessários dez corpos de prova de cada amostra, com dimensões de 50 mm e com relação base/altura 1:1.

- *Densidade Aparente*

A densidade é uma propriedade específica de cada material (sólido, líquido ou gasoso), sendo definida pela razão existente entre a massa de determinado material e o volume ocupado por ele. No caso das rochas, a densidade depende essencialmente da composição mineralógica, da porosidade e do grau de microfissuramento.

Na caracterização de rochas ornamentais constitui-se fator fundamental para avaliação do grau de sanidade da rocha, pois, as que se apresentam alteradas possuem densidades menores.

- *Porosidade Aparente*

A porosidade aparente refere-se a um dos mais importantes parâmetros tecnológicos para as rochas ornamentais e de revestimento, devido a sua influência direta nas propriedades físicas, mecânicas e, até mesmo químicas, sendo um fator determinante na durabilidade e na qualidade do material pétreo.

A determinação dos valores de porosidade aparente objetiva diagnosticar a tendência natural de a rocha ser alterada ou degradada facilmente, o que influenciará diretamente no seu desempenho físico-mecânico. O baixo ou elevado grau de porosidade também está diretamente relacionado à manutenção do padrão estético/cromático e a conservação de sua qualidade quando estes materiais forem expostos à ação dos agentes intempéricos, principalmente, a água.

- *Absorção de Água*

O percentual de absorção de água é outro parâmetro importante para a caracterização tecnológica de materiais pétreos que serão aplicados em ambientes ou colocados sob a ação direta de agentes intempéricos, principalmente, se tiverem contato direto com água e/ou umidade do ar.

A água é um dos elementos de grande importância na alteração das rochas, pois ela participa da maioria dos processos de degradação química (dissolução, redução, oxidação etc.), física (pressão de cristalização de sais e do gelo) que afetam os materiais pétreos.

3.2.3.2.2 Índices Físico-Mecânicos

- *Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear*

Este ensaio foi executado de acordo com as diretrizes da norma NBR 15.845-3 (ABNT, 2015). São utilizados dois corpos-de-prova cilíndricos de 3,2 cm de diâmetro e 7 cm de comprimento. São aquecidos em água, numa temperatura variando na faixa de 0° a 50°C, com o registro resultando nas variações no comprimento do corpo-de-prova. Sabe-se que, para alguns sólidos são necessários pré-condicionamentos e uma programação de testes específicos, para uma correta avaliação do comportamento da expansão térmica. No caso das rochas, por exemplo, o efeito de histerese (microfraturamentos) é comum devido a dilatações diferenciadas entre os grãos minerais quando existe variação brusca de temperatura. No ensaio, evita-se a

histerese variando a temperatura numa taxa constante de 0,3°C/min.

Rochas porosas, permeáveis e microfraturadas têm coeficiente de dilatação térmica menor que rochas maciças e compactas, pois parte do aumento do volume durante o aquecimento é absorvido pelo fechamento dos poros e fissuras.

- *Resistência à Compressão Uniaxial*

No ensaio de resistência à compressão uniaxial obtém-se a tensão de ruptura da rocha quando esta é submetida a esforços de natureza compressiva, ou seja, é a determinação numérica da capacidade que o material rochoso tem de suportar forças de compressão. Os valores obtidos são importantes para a realização de cálculos relativos ao dimensionamento, principalmente, no que se refere a espessura das placas rochosas.

Este ensaio é requerido para avaliação das resistências dos materiais sobre os quais vão atuar, principalmente, forças verticais. Constitui um índice muito importante na determinação da qualidade das placas rochosas que serão utilizadas como rochas ornamentais e de revestimento, principalmente, em funções estruturais.

Este ensaio foi executado de acordo com as diretrizes da norma NBR 15.845 –5 (ABNT, 2015) e determina a tensão que provoca a ruptura da rocha, quando submetida a esforços compressivos.

Os ensaios foram realizado em 10 (dez) corpos-de-prova de forma cúbica (arestas de 70 mm x 70 mm x 70 mm), no estado seco, sendo 5 paralelo a foliação e 5 perpendicular a foliação, submetidos a esforços compressivos, com taxa de carregamento de 205,5 kN/min em uma prensa hidráulica com capacidade para 200 toneladas e precisão de 1%, modelo PC 150/200.

- *Resistência à Flexão – Método dos Três Pontos*

O ensaio de resistência à flexão com carregamento em três pontos segue a norma NBR 15.845 – 6 (ABNT, 2015).

Neste ensaio determina-se qual a tensão máxima de ruptura da rocha, quando submetida a esforços fletores (flexão e tração simultaneamente). Os resultados da resistência à flexão são importantes para qualificação e avaliação de materiais pétreos sujeitos a esforços flexivos e de tração destinados a ambientes como, por exemplo, fachadas, bancadas, pisos elevados, mesas para equipamentos de precisão, dentre outros.

Neste ensaio foram preparados 05 (cinco) corpos-de-prova, sendo 5 paralelo a foliação e 5 perpendicular a foliação, de forma retangular com dimensões aproximadas de 220mm x 100mm x 50mm, com taxa de carregamento de 4.450 N/min.

- *Determinação da Resistência ao Impacto*

A execução do ensaio segue a norma NBR 15.845-8 (ABNT, 2015). O ensaio tem como objetivo obter o valor de energia liberada pelo impacto de um corpo que provoque a ruptura de uma placa de dimensões 20cm x 20cm x 3cm, para subsidiar o seu dimensionamento num revestimento.

Devem ser utilizadas 5 placas que são fixadas individualmente sobre um colchão de areia, com 10cm de espessura, niveladas o mais perfeitamente possível com o auxílio de um nível de bolha.

Uma esfera com 1,0 kg é erguida a uma altura inicial de 20cm e abandonada em queda livre. A partir dessa altura inicial, o procedimento é repetido para intervalos de altura adicionais de 5cm, até que ocorram fissuras ou ruptura de placa.

- *Desgaste Amsler*

Para a realização deste ensaio foi utilizada a metodologia constante na norma NBR 12.042 (ABNT, 2012). Esse ensaio permite mensurar o comportamento de uma determinada rocha para ser utilizada em revestimento de pisos, submetido a constante tráfego.

Para a realização do ensaio foram confeccionados 12 (doze) corpos-de-prova, sendo 06 (seis) paralelos à foliação e 06 (seis) perpendiculares à foliação. O ensaio consiste na verificação da redução da altura em mm, nos corpos-de-prova das rochas em análise, com dimensões iniciais de 100 mm x 100 mm x 30 mm, e verificação de sua espessura após um percurso de 500 m e 1.000 m, em circuito circular. A abrasão ocorre pela ação da areia seca, de granulação fina quartzosa, que é colocada em funis de armazenamento, sendo liberada a uma vazão de cerca de 72 cm³.min⁻¹.

3.2.3.3 Petrofísica

- *Ensaio de Porosidade*

A porosidade é a relação entre o volume ocupado por vazios ou poros na rocha, VV,

e o volume total V (partículas sólidas + vazios):

$$\emptyset(\%) = 100 \times (V_v/V) \quad (1)$$

De acordo com esta definição, a porosidade de materiais porosos poderia ter qualquer valor, mas geralmente, as maiorias das rochas sedimentares apresentam porosidade inferior a 50% (Tiab; Donaldson, 2004). É uma das propriedades que mais afetam as características mecânicas, sendo inversamente proporcional a resistência e a densidade e, diretamente proporcionais a deformabilidade já que a existência de vazios pode gerar zonas de fraqueza.

Os poros, no caso de rochas cristalinas, ígneas ou metamórficas podem ser microfissuras ou juntas na matriz rochosa. A porosidade, em geral, decresce com a profundidade e com a idade das rochas. O valor de \emptyset pode variar entre 0% e 90%, com valores normais entre 15% e 30%. As rochas sedimentares carbonatadas bioclásticas e as rochas vulcânicas podem apresentar valores muito elevados de porosidade, tal como as rochas alteradas.

A porosidade absoluta é a relação entre o volume total de vazios de uma rocha e o volume total da mesma. Já a porosidade efetiva é a relação entre o volume de poros interconectados e o volume da amostra e pode ser obtida a partir dos pesos seco e saturado da amostra:

$$\emptyset_e = (W_{sat} - W_{sec}) / (\gamma_w V) \quad (2)$$

Onde:

W_{sat} = Peso da amostra saturada

W_{sec} = Peso da amostra seca

V = volume da amostra e γ_w = Peso específico da água.

Do ponto de vista da engenharia de reservatórios, a porosidade efetiva é o valor que se deseja quantificar, pois representa o espaço ocupado por fluídos que podem ser deslocados do meio poroso. Nas rochas é frequente que os poros não estejam interconectados, dessa forma, a porosidade real será maior que a efetiva (Vallejo *et al*, 2002).

A porosidade efetiva é afetada por uma série de fatores, incluindo o tipo litológico, conteúdo e hidratação das argilas presentes na rocha, à heterogeneidade dos tamanhos de grãos, o arranjo e cimentação dos grãos e qualquer intemperismo que pode ter afetado a rocha. Muitos dos poros podem ser “becos sem saída” com apenas uma entrada para o sistema de canal principal de poros.

- *Determinação da Velocidade de Propagação de Ondas Elásticas*

As velocidades de propagação das ondas elásticas ao atravessarem a rocha dependem da densidade e das propriedades elásticas do material, e sua medida aponta informações sobre algumas características como a porosidade (Vallejo *et al*, 2002).

Em particular, as velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais, VP (ondas de compressão), e das ondas transversais VS (ondas de cisalhamento) variam significativamente com a presença de descontinuidades.

O módulo de Young, E, define a relação linear elástica entre o esforço aplicado e a deformação produzida na direção da aplicação do esforço. O coeficiente de Poisson, ν , define a relação entre a deformação transversal e axial. Essas constantes são obtidas pelo ensaio de compressão simples e definem as características da deformação elástica estática da rocha. Os valores de E e ν podem também ser obtidos a partir das velocidades das ondas elásticas VP e VS, medidas no ensaio de velocidades elásticas no laboratório, correspondendo aos valores dinâmicos.

- *Peso Específico*

O peso específico ou peso unitário da rocha depende de seus componentes, e se define como o peso por unidade de volume. Suas unidades são as de força por volume. Em geral se considera o mesmo valor para o peso específico (γ) e para a densidade (ρ), onde $\rho = \text{massa/volume}$ (Vallejo *et al*, 2002). Atendendo à variabilidade da quantidade de água presente na rocha considera-se o peso específico seco (γ_d) da rocha, em geral como um parâmetro mais representativo, onde $\gamma_d = W_{sec}/V$. As rochas diferentemente dos solos apresentam uma grande variação dos valores de peso específico. A Tabela 1 abaixo apresenta alguns desses valores:

Tabela 1 – Valores típicos de peso específico seco de algumas rochas.

Rocha	γ_d (kN/m³)
Diorito	27,9
Micaxisto	27,6
Basalto	27,1
Mármore	27,0
Granito	26,0
Xisto Argiloso	25,7
Gesso	22,5
Argilito	22,1
Calcário denso	20,9
Sal-gema	20,6

Fonte: Vallejo *et al.*, 2002.

3.2.3.4 Ataque Químico

Em termos gerais, o ensaio de resistência ao ataque químico apresenta-se como mais uma ferramenta que permite avaliar a alterabilidade das rochas.

Consiste na aplicação de substâncias químicas na superfície polida e resinada da rocha simulando em velocidade acelerada os efeitos causados pelos produtos de limpeza ou contidos em substâncias orgânicas naturais.

O ensaio tem por objetivo simular os efeitos de substâncias químicas presentes nos produtos de limpeza doméstica (detergentes, sabões, água sanitária, desinfetantes, etc.), de sucos de frutas cítricas, produtos para tratamento de águas de piscinas, entre outros, que visam avaliar o tipo e o grau de alterações sofridas pelas rochas após o contato com estas substâncias em determinado período de tempo.

Destaca-se, entretanto, que não há norma específica estabelecendo procedimentos e critérios de avaliação deste tipo de ensaio voltada para aplicação em rochas ornamentais e de revestimento.

Desta forma, este ensaio é uma adaptação dos procedimentos contidos na norma NBR 13.818 (ABNT, 1997), originalmente utilizada em placas cerâmicas vidradas e consiste na aplicação de substâncias comumente encontradas em produtos de limpeza, como HCl, KOH, H₂C₂O₄, NH₄Cl e NaClO, em concentrações, pH's e períodos de tempo pré-determinados, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Reagentes, concentrações, pH's, tempo de contato dos agentes químicos utilizados no ensaio de resistência ao ataque químico.

Reagentes	Concentração	pH	Tempo de Contato	Principais Produtos
Hidróxido de Potássio (KOH)	100 g/l	14,0	96h	tratamento de água de piscina, água sanitária
Ácido Clorídrico (HCl)	3% v/v	1,0	96h	ácido muriático
Ácido Cítrico (C ₂ H ₈ O ₇)	100 g/l	1,2	24h	frutas cítricas, vinagre, refrigerantes.
Cloreto de Amônia (NH ₄ Cl)	100 g/l	5,0	24h	produtos químicos de uso doméstico (detergentes)
Hipoclorito de Sódio (NaClO)	20 mg/l	8,0	24h	sabões em geral

Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio de resistência ao ataque químico foi realizado no Laboratório de Preparação de Amostras da DIMAT – Divisão de Materiais do NUTEC – Fundação Núcleo de Tecnologia do Estado do Ceará/Fortaleza-CE.

Para a realização do ensaio de resistência ao ataque químico foram utilizadas 15 placas, sendo cinco de cada tipo arenítico, que foram cortadas nas dimensões: 20 cm x 10 cm x 2cm, e posicionadas de tal forma que a face retificada entre em contato direto com os reagentes químicos. Sobre cada um destes corpos-de-prova foram colados recipientes circulares confeccionados em PVC com 70 mm de diâmetro, dentro dos quais serão colocados os reagentes químicos, os quais permaneceram durante o tempo previsto para o ataque.

- *Determinação da Perda da Intensidade do Brilho*

Este ensaio quantifica a perda da intensidade do brilho quando uma rocha é submetida ao ataque químico com determinados produtos químicos ditos “agressivos”, que usualmente são utilizados em residências para limpeza.

Para a realização deste ensaio adotou-se o seguinte método em função da heterogeneidade do material estudado: demarcou-se na superfície de cada uma das 15 placas, sendo 5 de cada tipo arenítico, um círculo com diâmetro de 8,0 cm; realizando-se cinco leituras em cada amostra para mensurar a intensidade inicial do brilho, com o auxílio do aparelho medidor de brilho Zehntner Gloss, modelo 1020, com ângulo de leitura 60°.

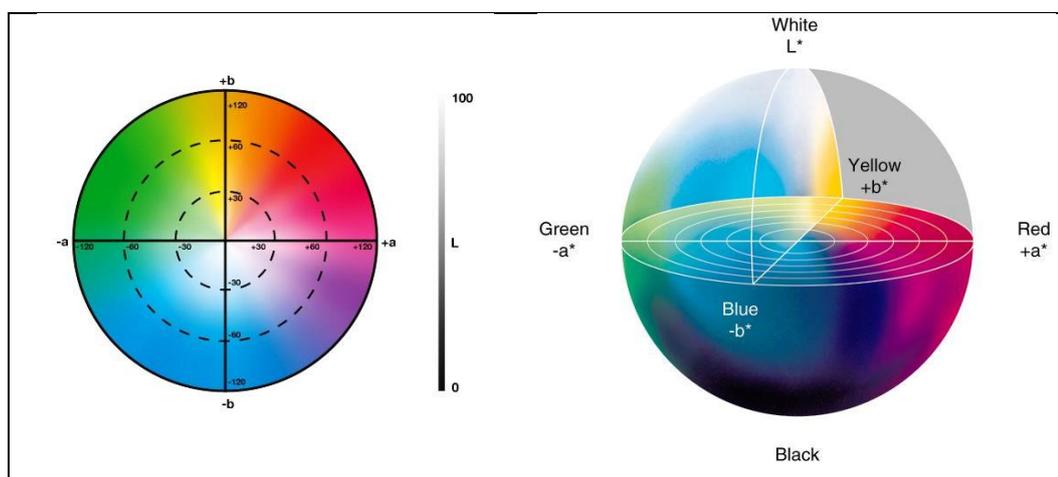
Após a realização do ataque químico, fez-se duas leituras nos mesmos locais onde

anteriormente foram realizadas as medidas pré-ataque químico. Em seguida, calcula-se a média aritmética das medidas pré e pós-ataque químico e determina-se, em valores percentuais, a perda da intensidade do brilho ocorrido em cada tipo arenítico estudado.

- *Avaliação Colorimétrica*

A Colorimetria é a ciência que estuda a medida das cores e que desenvolve métodos para a quantificação da cor, ou seja, para o desenvolvimento de valores numéricos da cor. A cor possui três características definidas: o tom; a saturação e a intensidade.

Figura 6 – Coordenadas no sistema CIELAB L^* , a^* , b^* .



Fonte: BY Gardner.

Para a realização das medições, é inicialmente realizada a calibragem do equipamento em dois pontos de referência, um preto e um branco. Em seguida, foram realizadas as medidas baseados nos parâmetros de reflectância e colorimétricos determinados pelo sistema CIE L^* , a^* e b^* (CIE, 1976) onde: o componente L^* indica valores que representam a luminosidade/claridade que pode variar entre os valores de zero (preto) e o cem (branco); os componentes a^* e b^* definem o diagrama de cromacidade que representam as variações de croma e tom, onde o parâmetro a^* refere-se aos componentes verde-vermelho, quando negativo tende para o verde (-60) e quando positivo tende para o vermelho ($+60$) e b^* refere-se aos componentes azul-amarelo, quando negativo tende para o azul (-60) e quando positivo tende para o amarelo ($+60$).

As medidas de cor foram realizadas em 15 placas polidas, sendo cinco de cada tipo arenítico estudado, com dimensões de 20 cm x 10cm x 2cm. As leituras de cor pré e pós-ataque

químico foram realizadas com o auxílio do espectrofotômetro X-Rite.

3.2.3.5 Caracterização Química e Mineralógica

- *Difração de Raios-X*

A técnica de difração de Raios-X (DRX) tem sido amplamente utilizada para a determinação de fases cristalinas em materiais cerâmicos. Essa técnica apresenta como vantagens a rapidez e a sua natureza não destrutiva. Um obstáculo para essa técnica é não poder ser aplicada a materiais não cristalinos, no entanto, no universo das matérias-primas para materiais cerâmicos, o número desses materiais é muito pouco significativo (Mello, 2006).

O fenômeno da difração de Raios-X é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos Raios-X.

Neste trabalho a técnica foi utilizada para determinar as fases presentes nos corpos de prova obtidos para estudo (Albers *et al.*, 2002).

- *Microscopia Eletrônica de Varredura*

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resultada interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é convertido em imagem através de um sistema de controle computadorizado, permitindo a observação. A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido, operando numa faixa de tensões de aceleração de 1 a 50 kV.

3.2.4 Etapa Final

De posse dos resultados de todos os ensaios acima descritos foram avaliadas as possibilidades e ambientes de aplicação mais adequados para o arenito (Pedra Mourisca),

visando à redução de patologias da rocha ornamental e conseqüentemente o desperdício no beneficiamento e na lavra.

Corroborando com o mapeamento da área de estudo e com os ensaios tecnológicos, foi possível determinar o melhor aproveitamento da rocha junto às frentes de lavra.

Os dados obtidos nesta pesquisa permitiu a elaboração da presente dissertação de Mestrado e a confecção de artigos científicos.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

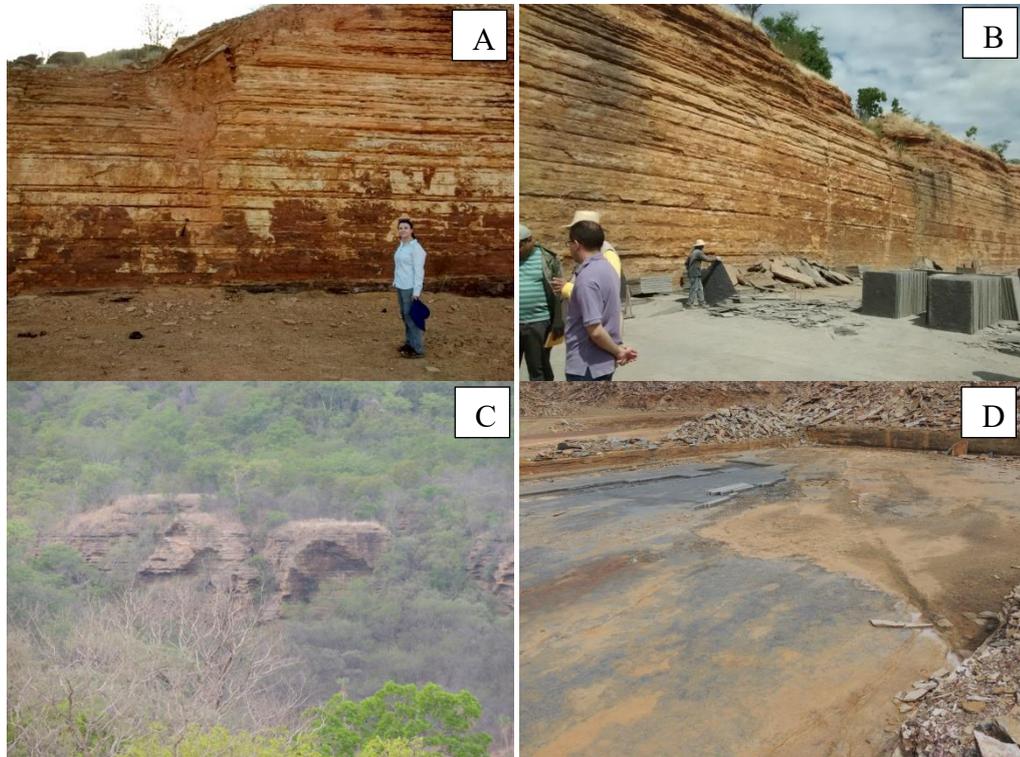
Será apresentada a principal unidade litoestratigráfica que compõem o arcabouço geológico da área pesquisada, tendo como base os dados coletados durante a etapa de campo, as análises petrográficas, além de referências bibliográficas já existentes.

Desta forma, a área pode ser comporta por uma unidade litoestratigráfica, distribuída e descrita no mapa geológico (ver em anexo), na ordem:

4.1 Arenito da região de Castelo do Piauí

No município de Castelo do Piauí (PI) afloram rochas areníticas que constituem várias camadas horizontais. Nas encostas suaves dos morros se instalam as frentes de lavras para exploração dos arenitos como pedra ornamental (Figura 7) Esses arenitos são de coloração predominantemente amarelada, amarelo a bege e preto. Macroscopicamente, apresentam três variedades (Amarelo, Multicor e Preto) que possuem características petrográficas semelhantes. São rochas, que apresentam uma estratificação horizontal bem marcada (Figura 7). A diversidade de coloração nessas rochas depende do nível que está sendo extraído o material. E está ocorre verticalmente e lateralmente através de contato gradacional, inviabilizando uma padronização na obtenção de um único tipo.

Figura 7 – (A) São rochas, que apresentam uma estratificação horizontal bem marcada; (B) mostrando uma estratificação horizontal bem marcada; (C) Nas encostas suaves dos morros se instalam as frentes de lavras para exploração dos arenitos como pedra ornamental; (D) verticalmente e lateralmente através de contato gradacional, inviabilizando uma padronização na obtenção de um único tipo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Enquadramento na Bacia do Parnaíba

O arenito estudado faz parte da Formação Cabeças, a qual se constitui uma subdivisão do Grupo Canindé que, litoestratigraficamente, corresponde à Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera. A Formação Cabeças trata-se de um pacote sedimentar, sobretudo arenítico que, inicialmente, foi proposta por Plummer (1948), designando uma seção devoniana constituída por arenitos de granulação média a grossa. Atualmente a Formação Cabeças é dividida nos membros Passagens e Oeiras. O arenito encontrado na região não possui características dos dois membros, com isso o autor sugere um novo membro para Formação Cabeças que se chamaria de “membro Castelo”.

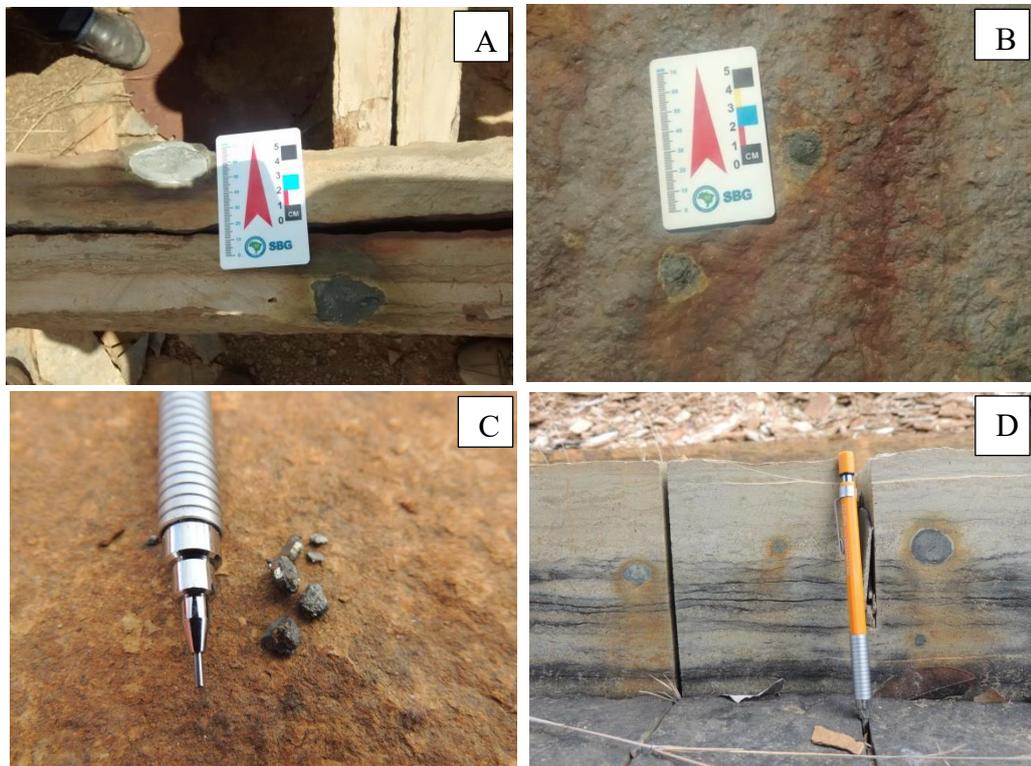
O contato dos arenitos que afloram da região é contato gradacional devido a uma mudança litológica, de arenitos fina a arenitos grossos.

Os arenitos em algumas partes estão divididos em pacotes que variam a espessura

de 02 até 12 cm e com uma altura média de 15m, porém estes pacotes em seu interior são subdivididos em pacotes menores com estratificação mais fina, por onde a água passou, lixiviou os sedimentos mais finos. Em uma região a NE da Mina são encontrados nódulos de pirita e presença de manganês no meio do arenito amarelo, possivelmente oriundos de madeira orgânica, fazendo com que a produção de rocha ornamental parasse nessa zona. (Figura 8).

São observadas, no arenito, presença de fratura com preenchimento de ‘ferro’ cortando as camadas, não ocorrendo entre as camadas. Também foram observados nódulos de oxido de ferro com pirita no arenito Preto. (Figura 8.)

Figura 8 – (A e B) são encontrados nódulos de pirita e presença de manganês no meio do arenito amarelo, possivelmente oriundos de madeira orgânica, fazendo com que a produção de rocha ornamental parasse nessa zona; (C) Mostrando Pirita nos arenitos e (D) Também foram observados nódulos de oxido de ferro com pirita no arenito Preto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já NW da Mina não foram encontrados nódulos com oxido de ferro e pirita que com isso a produção continua, com três tipos de arenitos estudados tendo uma fratura cortando todos eles com uma direção de 130° azimutes. O arenito Amarelo é encontrado a sudeste da mina com espessura de 2 a 3 cm de camada, tendo uma intercalação entre arenito amarelo com o arenito multicor, para o arenito preto (Figura 9).

Figura 9 – Uma intercalação entre arenito amarelo com o arenito multicolor, para o arenito preto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

São níveis de arenitos por toda a área da mina, não apresentou um nível para encontrar os tipos de arenitos, isso depende muito de qual região estão extraíndo, alguns lugares da mina tem uma espessura de 15 metros do arenito amarelo para o arenito preto, que tinha um nível regular para encontrar os arenitos, mas não é possível definir uma cota ou profundidade para ocorrer determinado tipo de “arenito”, As espessuras para cada cor do arenito são variáveis, acredita-se que com uns 18 metros é a diferença do amarelo para o preto (Figura 10).

Figura 101 – As espessuras para cada cor do arenito são variáveis, acredita-se que com uns 18 metros é a diferença do amarelo para o preto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Ambiente de deposição

Segundo Lima e Leite (1978) atribuíram para a Formação Cabeças um paleoambiente litorâneo a marinho raso, com contribuições deltaicas e influência de ondas. Vettorazzi (2012) salienta que esta origem marinha é atribuída ao baixo teor de boro encontrado nos sedimentos, indicativo de baixa salinidade nas águas. Estes autores também salientaram as fácies glaciais encontradas no topo desta formação, resultantes de depósitos de corrente de turbidez. Inicialmente Della Fávera (1980). Mais tarde, Della Fávera (1990), tentou dividir as sequências identificadas em tipos 1 e 2. As sequências tipo 1 seriam aquelas que apresentassem limite inferior de truncamento e exposição da plataforma, já as do tipo 2, seriam aquelas que não se separassem por discordâncias pronunciadas. Caputo (1984) atribuiu para a Formação Cabeças um ambiente de leques deltaicos e lobos glaciais.

Os dados de pesquisa atribuem à formação cabeças um ambiente marinho raso e estuário nessa região de Castelo do Piauí, como está acamadados os sedimentos e pelos sedimentos finos encontrados na região que pode ter indicio desses ambientes.

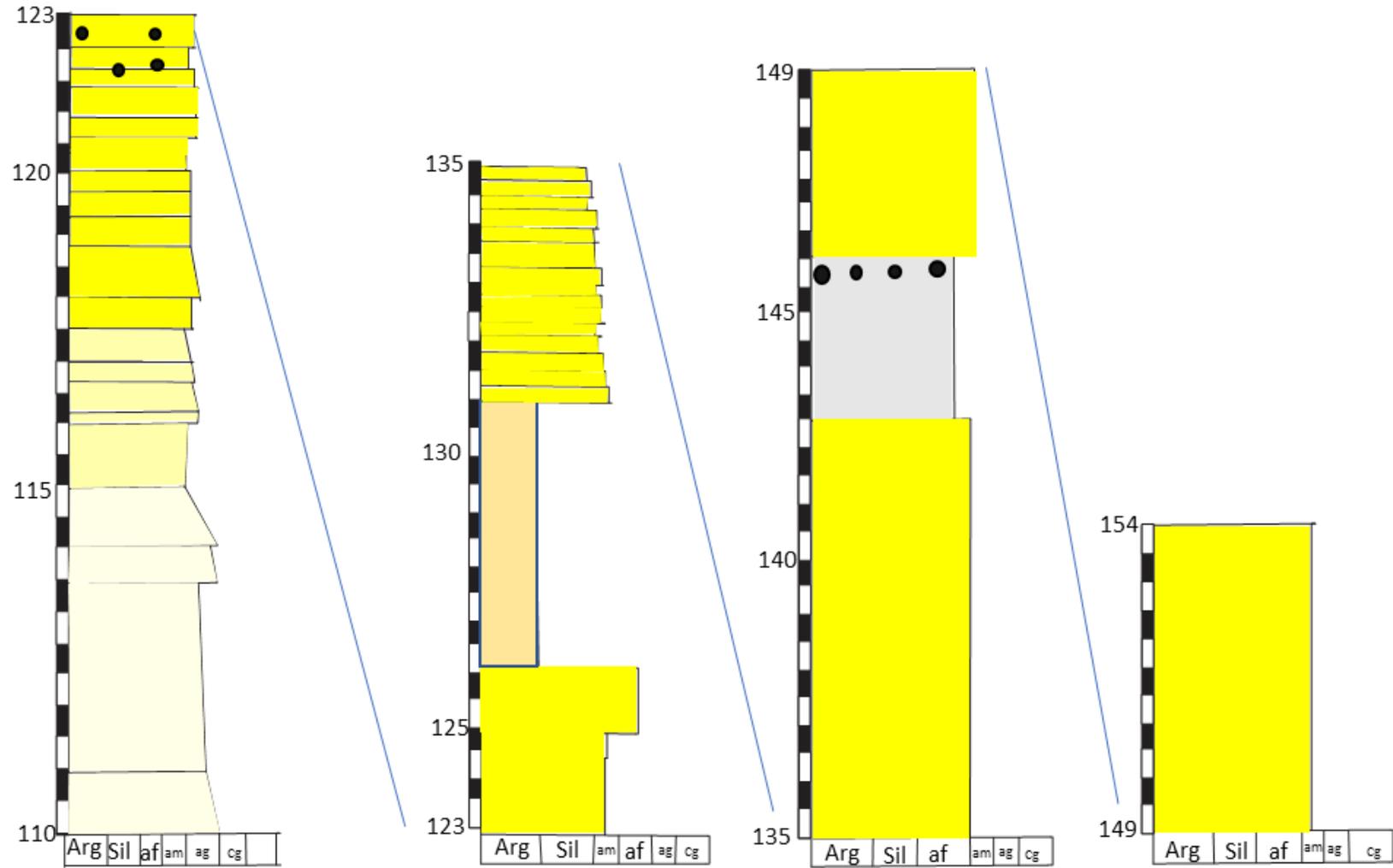
4.4 Coluna Estratigráfica

O levantamento da seção colunar na localidade de Castelo do Piauí na Bacia do Parnaíba, se iniciou justamente no leito do rio Poty nos arenitos com coloração branco a amarelado. Acima deste nível estratigráfico estão posicionados arenitos de granulação variando de média a fina e exibindo estratificações cruzadas plano paralelo (Sl) e horizontais (Sh) e com paleocorrente com atitude de $130^{\circ}/80$, continuando o nível estratigráfico voltam a ocorrer fácies de arenitos finos a médios, com as mesmas características dos arenitos da base, ou seja, arenitos com cruzadas acanaladas (St) e horizontais (Sh).

Ainda sobre estes arenitos, foi notada a presença de nódulos de óxido de ferro, bem como pequenos seixos de quartzo dispostos nos planos de limite dos sets ou nas camadas frontais dos estratos cruzados. Podem também ocorrer níveis com arenitos maciços (fácies Sm) com seixos disperso. Os arenitos maciços com sets variando de 10 a 20 cm, com grãos médio, coloração branco amarelada com níveis intra- sets contendo grãos de Quartzo (Qz), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) de 1-5cm. Continuando a exibir a estratigrafia de grão médio a fino, com coloração cinza e com níveis oxidados em fraturas e subsuperfície. Mas em cima da estratificação encontra-se arenito de coloração cinza esbranquiçado com horizontais (Sh) incipiente. Inicia com uma passagem gradual de arenito para argilito siltoso de coloração cinza, com níveis de coloração creme.

Ainda sobre estes arenitos da formação Cabeças, os arenitos com sets centímetros de coloração creme com granulação fina contendo nódulos de coloração escura, com presença de matéria orgânica, com uma mineralização em sulfeto (pirita). Este nível evidencia o final de um evento de redução da energia dos rios que depositavam os sedimentos desta unidade, caracterizando desta forma um ambiente confinado, em condições redutoras, causado pela baixa oxigenação das águas, propiciando a precipitação de sulfetos rico em cobre que facilmente se fixavam nos arenitos presentes nesta camada (Figura 11).

Figura 2 – Coluna estratigráfica da área de pesquisa em Castelo do Piauí-Pi.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 PETROGRAFIA

5.1 Análise Petrográfica

Este capítulo apresenta os resultados dos estudos petrográficos realizados. Em função das características físicas, químicas e mineralógicas das rochas estudadas, algumas propriedades podem ser capazes de explicar o comportamento tecnológico da rocha durante o uso em obras civis. As amostras coletadas durante a etapa de campo representam as principais unidades litoestratigráficas exploradas comercialmente que compõem o arcabouço geológico da área pesquisada.

A descrição petrográfica realizada em seis lâminas delgadas mostrou que as rochas analisadas são constituídas por arenitos imaturos, com arcabouço formado por grãos de quartzo e feldspato, e matriz que se apresenta como pequenos grãos de quartzo ou feldspato e um material muito fino e escuro, não identificado ao microscópio óptico. A diferença de cor entre os arenitos se dá em virtude de maior ou menor conteúdo dessa matriz fina escura.

Foram realizadas análises no MEV-EDS visando observar características óticas que ajudassem na identificação da matriz fina escura que gera a coloração dos arenitos foram então realizadas análises pontuais para identificação e quantificação de elementos químicos.

5.1.1 Amostra Amarelo

5.1.1.1 Descrição Macroscópica

A amostra analisada contém uma coloração amarelada, com um grau de alteração moderado a incipiente e com uma estrutura de sedimentos finos. Constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm), com gradação ligeiramente decrescente para o topo de cada sucessão, em intervalos de cores entre amarela claro e amarela (Figura 12). A coloração amarelada ocorre provavelmente pela alteração de alguns minerais na superfície da amostra, que podem percolar por meio de fraturas e poros alterando alguns cristais internos, principalmente os feldspatos. A amostra possui como minerais principais: Quartzo, Feldspatos e Mica.

Figura 123 – Amostra cuja coloração amarelada seja provavelmente resultante de processo de alteração mineral. Constituída em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm).



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.1.2 Descrição Microscópica

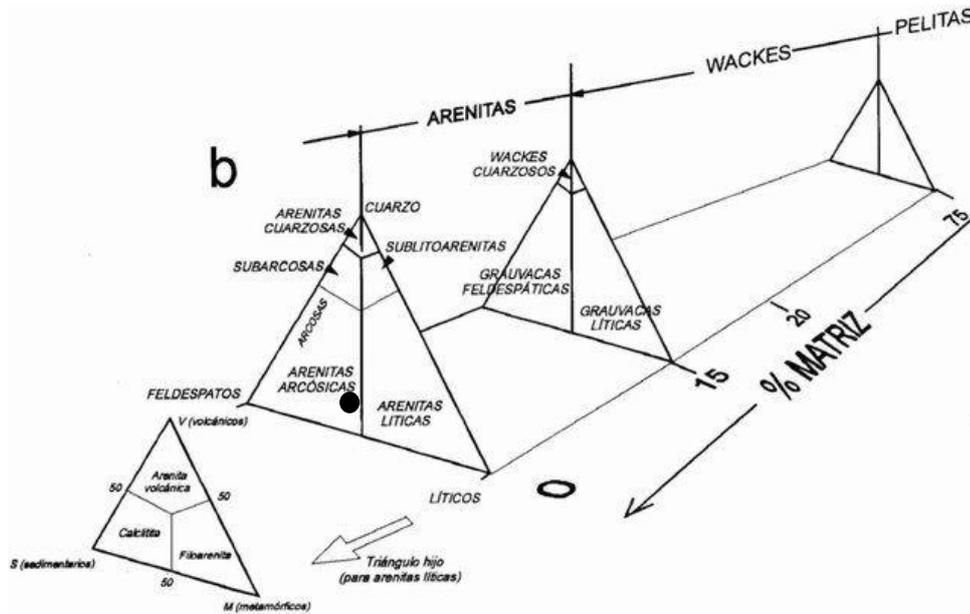
Na descrição microscópica apresenta 64% de arcabouço, 30% de matriz, 1% de cimento e 5% de porosidade secundária por dissolução. O arcabouço é constituído por grãos angulosos a subangulosos de feldspato (50%), quartzo (40%) e fragmentos líticos (mica grossa, 10%), a granulometria modal varia de areia muito fina a areia fina, possui boa seleção granulométrica, com desvio padrão em torno de 0,3. A amostra possui empacotamento fechado, com compactação mecânica moderada e compactação química forte. A matriz é do tipo protomatriz, formada por grãos de quartzo e feldspato (30%) e 70% de massa fina escura, provavelmente formada por material orgânico amorfo. Apresenta 1% de cimentação por óxido de ferro em forma de manchas intersticiais ou substituindo grãos. As características petrográficas mostram um arenito imaturo tanto na textura como na mineralogia.

O quartzo, representando 38% do arcabouço, mostrar-se no geral em grãos subangulosos e possui contato côncavo-convexo com os outros minerais. O feldspato sendo 50% do arcabouço, apresenta alguns grãos alterados, por vezes em processo de sericitização. A muscovita representa 10% do arcabouço em cristais prismáticos nas bordas e como acessórios há cerca de 2% de minerais opacos disseminados na lâmina. A petrotrama mostra segregação

granular por orientação, composição e tamanho, com uma imbricação dos grãos e arrumados num empacotamento fechado.

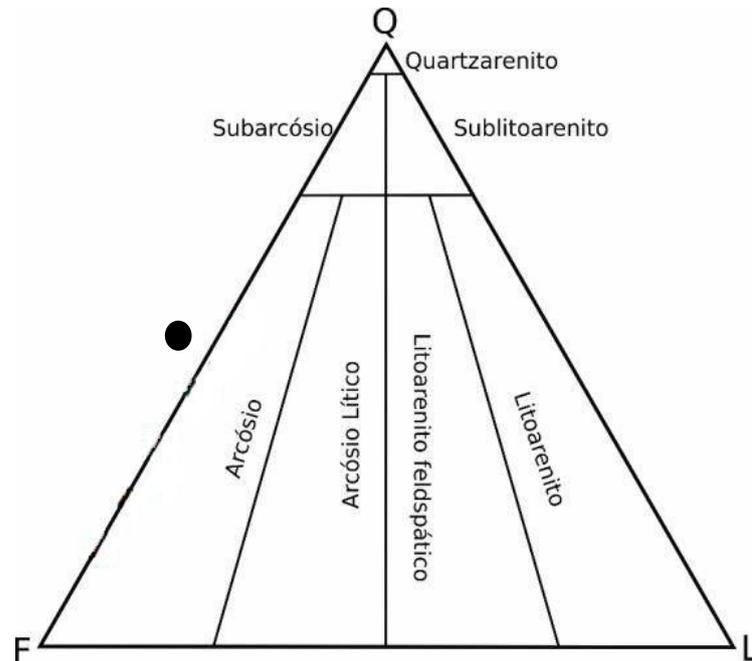
A textura do Arcabouço contém um granulometria modal bem classificado com um desvio padrão de 0,2, a sua esfericidade e o arredondamento dos grãos vão de angular a sub-angulares e baixa esfericidade. A matriz apresenta uma ortomatriz que tem textura reliquiar e mineralogia heterogênea, composta por quartzo, feldspato e filossilicatos, com textura muito fina. O quartzo exhibe recristalização entre os grãos, com grãos finos, os feldspatos encontram-se muito alterados, já modificando para filossilicatos. Já o componente diagenético, que é o cimento da amostra, exhibe uma mineralogia de filossilicato junto com óxido de ferro, não sendo possível verificar a proporção, pelo fato do cimento ser muito fino. Os óxidos de ferro, possivelmente sendo gohetita ou hematita. Os filossilicatos devido à diagênese estão cristalizando para uma muscovita secundária exibida na amostra e que está localizada nos contatos entre o arcabouço e o cimento (Fotomicrografia 2). O preenchimento do cimento é tardio, sua porosidade secundária, exhibe grãos fraturados, as compactações tanto mecânicas e químicas exibem contato côncavo-convexo, planar e suturado. Tendo uma compactação mecânica com um rearranjo por fraturamento uma redução da porosidade primária, já a compactação química teve uma redução do volume total e porosidade primária através da pressão no contato entre os grãos. A maturidade mineralógica segundo (PETTIJOHN,1987), possui uma classificação imatura, sendo classificada como Arenito Arcósio segundo Folk (1968) (Figura 14), e também pode ser classificada como Wacke Feldspático de acordo com Dott (1964) (Figura 13). Com o resultado da petrografia e com a contagem de tamanho dos grãos feito em 200 grãos de cada amostras, foi classificado com arenito muito fino (Fotomicrografia 1).

Figura 134 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1964).



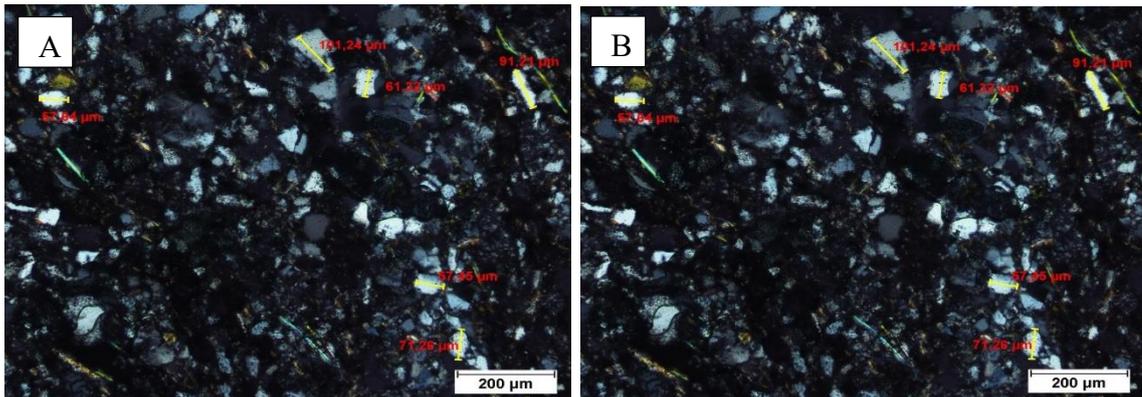
Fonte: Dott, 1964.

Figura 14 – Diagrama de arenito de acordo com Folk (1968).



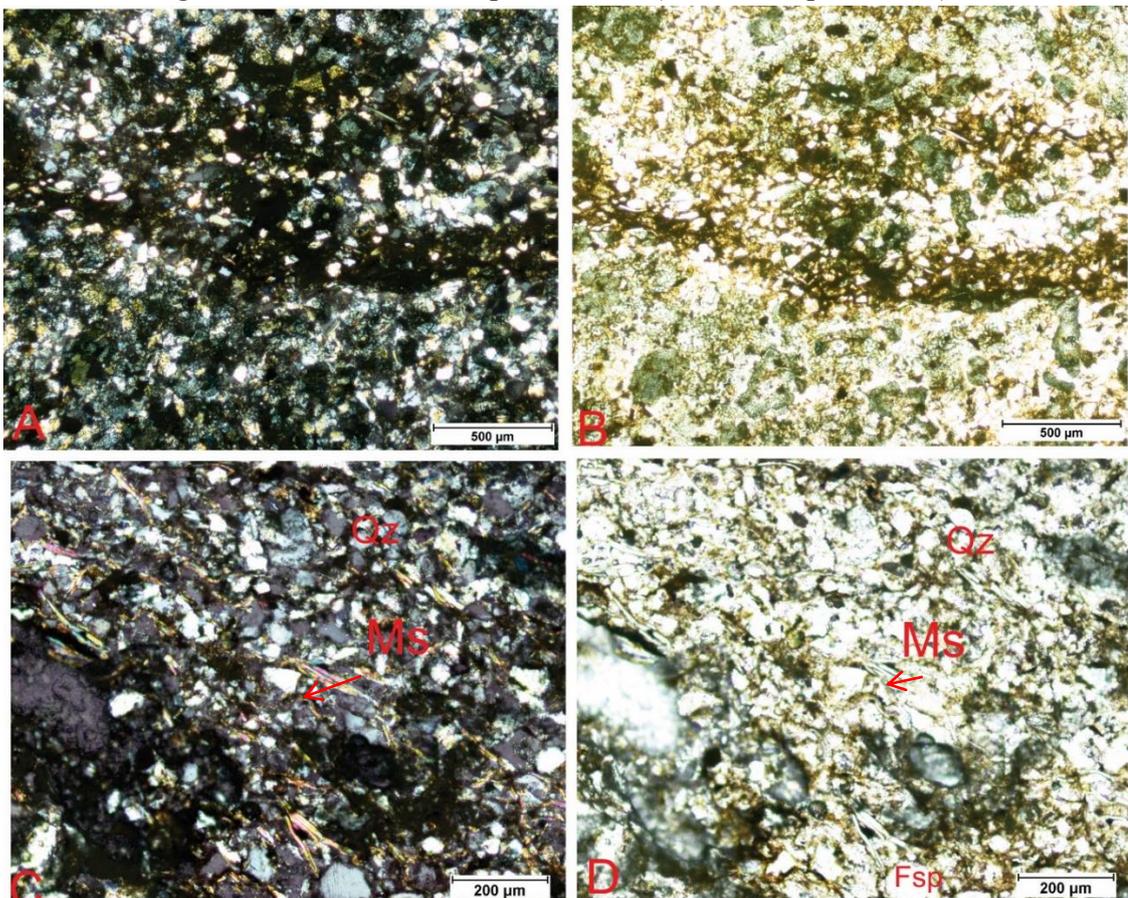
Fonte: Folk (1968).

Fotomicrografia 1 – (A) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos. (B) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fotomicrografia 2 – (A) A estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro, possível gohetita ou hematita (luz ortoscópica); (B) A estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro, possível gohetita ou hematita (luz natural polarizada); (C) Muscovita preenchendo as fraturas e nos contatos dos grãos e tendo um lineamento preferencial (luz ortoscópica); (D) Muscovita preenchendo as fraturas e nos contatos dos grãos e com lineamento preferencial (luz natural polarizada).



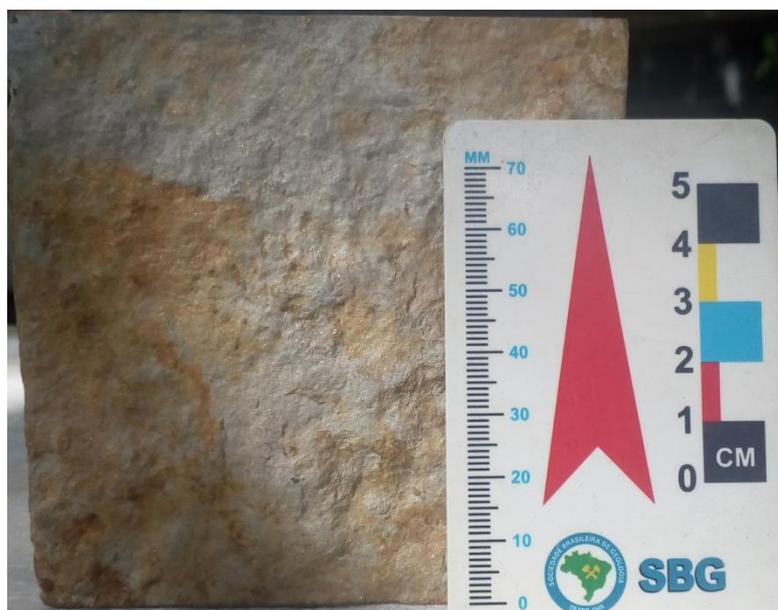
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2 Amostra Multicor

5.1.2.1 Descrição Macroscópica

A amostra analisada contém coloração amarelo esbranquiçada, com pouquíssimo grau de alteração e com uma estrutura de sedimentos finos. Constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm), com gradação ligeiramente decrescente para o topo de cada sucessão, em intervalos de cores amarela claro a bege. A coloração amarelada ocorre provavelmente pela alteração de alguns minerais na superfície da amostra, os quais podem percolar por meio de fraturas e poros alterando alguns minerais internos, principalmente o feldspato. Possui como componentes principais os seguintes minerais: Quartzo, Feldspato e Fragmentos Líticos (mica) (Figura 15).

Figura 155 – Amostra apresentando com coloração amarelada esbranquiçada constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm).



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2.2 Descrição Microscópica

Apresenta 47% de matriz, 45% de arcabouço, 3% de cimento e 5% de poros formados por dissolução secundária. A matriz é composta por protomatriz, sendo 80% de material fino escuro amorfo, possível matéria orgânica, e 20% de quartzo e feldspato. A cor

mais escura da amostra está relacionada com a quantidade maior de material orgânico. O arcabouço é constituído por grãos subangulosos de quartzo (50%), feldspato (45%) e fragmentos líticos (mica grossa, 5%). A granulometria modal é de areia muito fina a silte grosso, muito bem selecionada, com desvio padrão em torno de 0,2. Alguns grãos de mica apresentam orientação paralela entre si, o que deve refletir a estratificação original da amostra. Além disso, é possível observar segregação granular por composição entre a matriz e os grãos do arcabouço, o que define a coloração “multicolor” da amostra. O cimento é de óxido de ferro intersticial ou substituindo grãos.

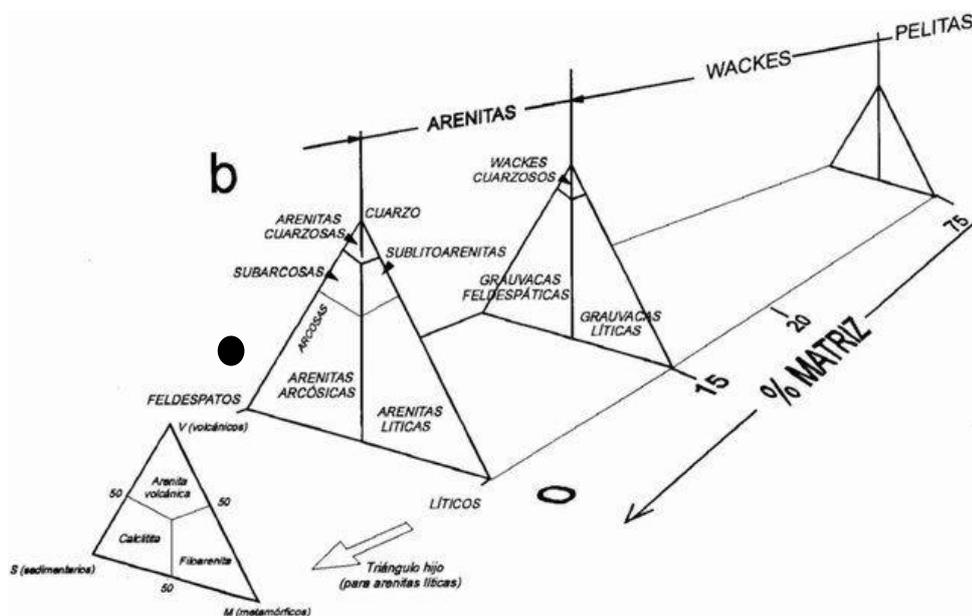
O quartzo mostrar-se grãos subanguloso de (250 a 30 μm) representando 50% do arcabouço, com contato côncavo-convexo com os outros minerais. O feldspato, 45% do arcabouço, mostra a grãos por vezes alterados em processo de sericitização. A muscovita, 4% do arcabouço, em cristais prismáticos alterados nas bordas e como acessórios, minerais opacos, 1% disseminados na lâmina. A petrografia mostra segregação granular por orientação, composição e tamanho, com uma imbricação dos grãos se sobrepondo uns aos outros e os grãos arrumados num empacotamento fechado. A textura do arcabouço contém um granulometria modal bem classificado com um desvio padrão de 0,2, a sua esfericidade e o arredondamento dos grãos variam de angular a sub-angular e baixa esfericidade. A matriz apresenta uma ortomatriz que tem uma textura reliquiar e uma mineralogia heterogênea, que pode ser representada por quartzo, feldspato e filossilicatos, com textura muito fina.

O quartzo exhibe recristalização entre os grãos, com grãos finos, o feldspato encontra-se muito alterado, já alterando para filossilicatos. Com relação aos componentes diagenéticos que são o cimento da amostra exhibe uma mineralogia de filossilicato junto com óxido de ferro, não sendo possível verificar a proporção, pois o cimento está muito fino. Os óxidos de ferro, possivelmente são gohetita ou hematita. Já os filossilicato devido à diagênese estão cristalizando para uma muscovita secundária que é exibida na amostra e está nos contatos com o arcabouço com o cimento. O preenchimento da textura do cimento é tardio, sua porosidade secundária, exhibe grãos fraturados, as compactações tanto mecânicas e químicas exhibem côncavo-convexo, planar e suturado.

Tendo uma compactação mecânica com um rearranjo por fraturamento uma redução da porosidade primária, já a compactação química teve uma redução do volume total e porosidade primária devido a pressão no contato entre os grãos. A amostra é submatura mineralogicamente e imatura texturalmente, sendo classificada como Arenito Arcósio segundo Folk (1968) (Figura 14) ou Wacke Feldspático segundo Dott (1964) (Figura 13). (Fotomicrografia 4). Com o resultado da petrografia e com a contagem de tamanho dos grãos

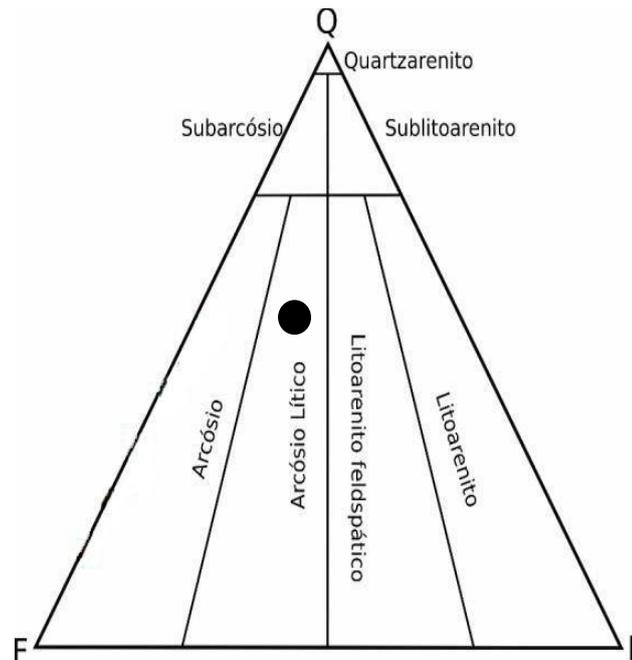
feito em 200 grãos de cada amostras, foi classificado com arenito muito fino (Fotomicrografia 3).

Figura 166 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1964).



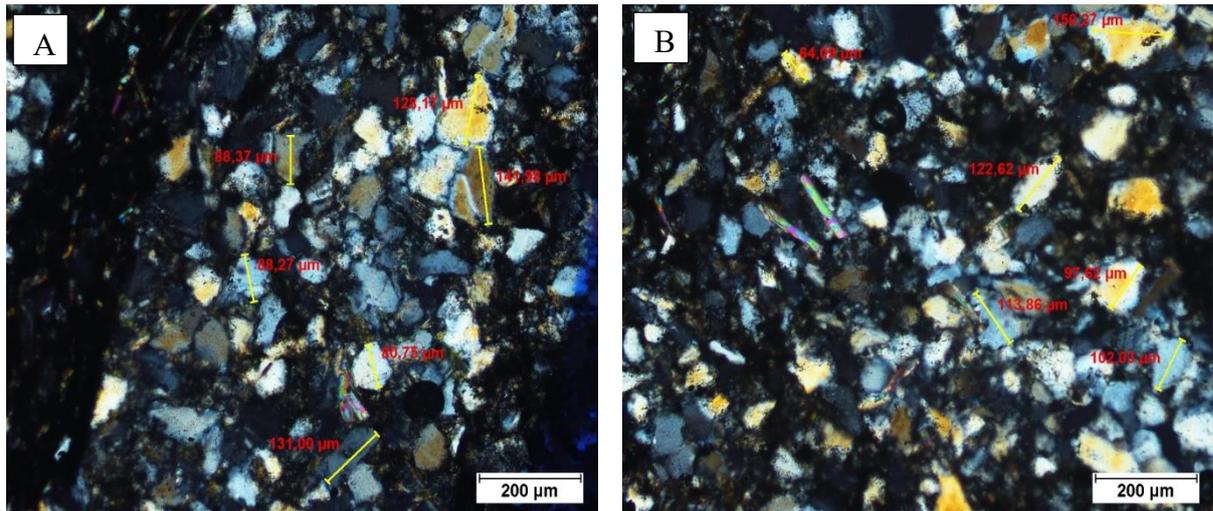
Fonte: Dott (1964).

Figura 177 – Diagrama de arenito de acordo com Folk (1968).



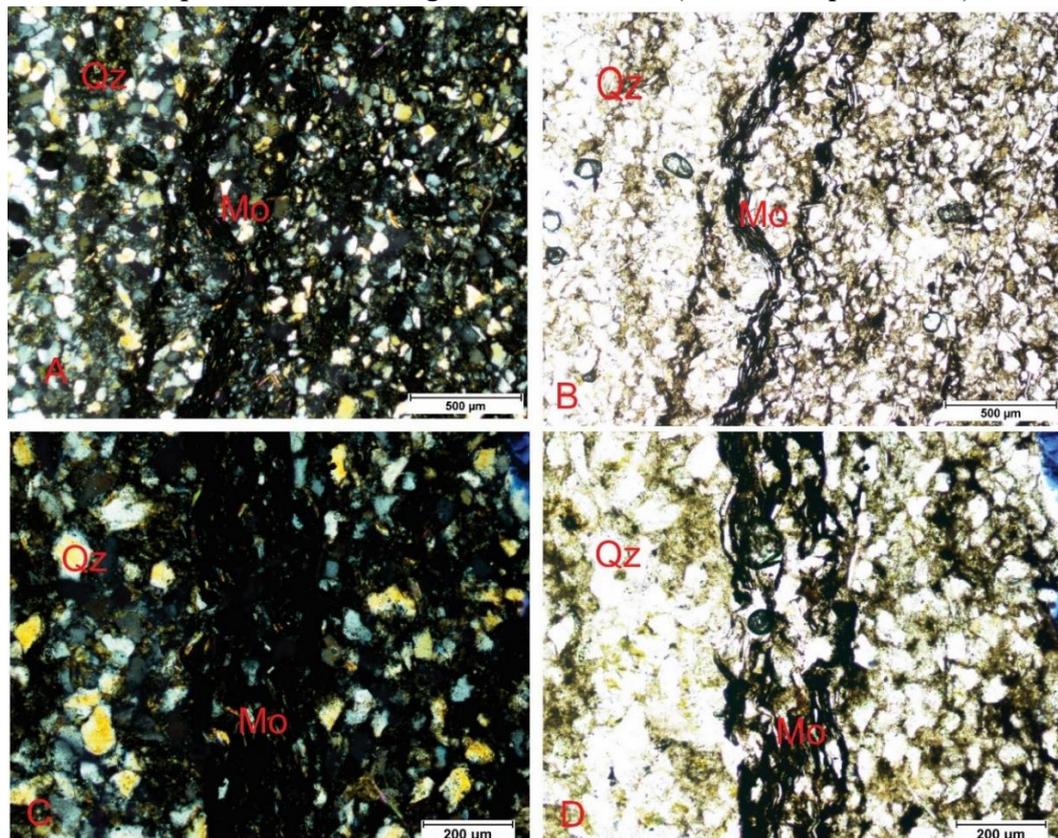
Fonte: Folk, 1968.

Fotomicrografia 3 – (A) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos. (B); Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fotomicrografia 4 – (A) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz ortoscópica); (B) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz natural polarizada); (C) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz ortoscópica); (D) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e possível matéria orgânica nas fraturas (luz natural polarizada).



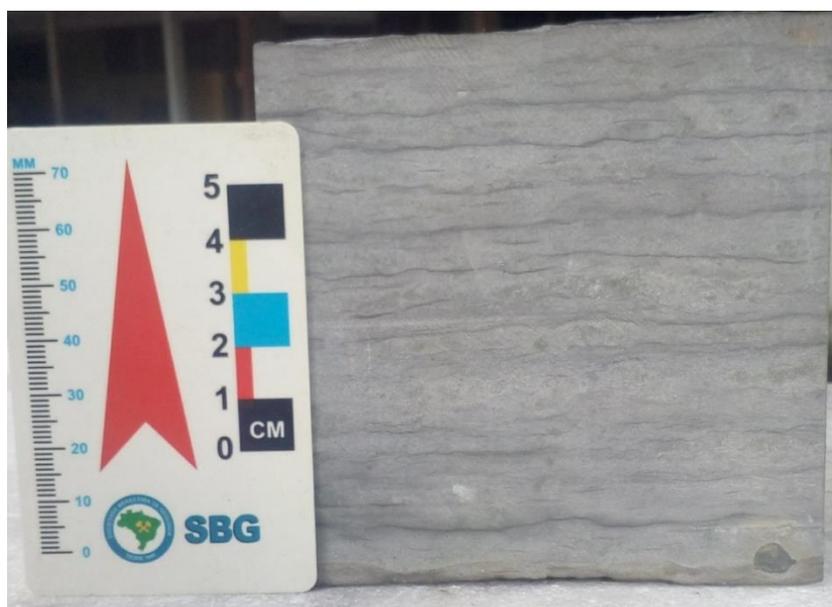
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3 Amostra Preto

5.1.3.1 Descrição Macroscópica

A amostra analisada contém uma coloração preta a preta clara, com um grau de alteração quase nenhum, com uma estrutura de sedimentos finos. Constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm), com gradação ligeiramente decrescente para o topo de cada sucessão, em intervalos de preto. A coloração amarelada ocorre provavelmente pela alteração de alguns minerais de alteração na superfície da amostra, que pode percolar por meio de fraturas e poros alterando alguns cristais internos, principalmente os feldspatos. Apresentando os principais minerais como: Quartzo, Feldspatos e Fragmentos Líticos (mica) (Figura 18).

Figura 188 – Amostra com coloração preta clara constitui-se em grãos terrígenos desde areia fina até silte grosso (250 a 30 μm).



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3.2 Descrição Microscópica

A rocha apresenta 65% de arcabouço, 25% de matriz e 10% de porosidade, a maioria do tipo secundária por dissolução. O arcabouço é constituído por 50% de grãos de feldspato subangulosos, 42% de grãos de quartzo angulosos a subangulosos e 5% de grãos de mica grossa (muscovita), a granulometria varia de areia muito fina a silte, sendo uma rocha

moderadamente selecionada, com desvio padrão em torno de 0,6, empacotamento normal e compactações mecânicas e química moderada. A matriz é constituída por pequenos grãos de quartzo e feldspato e, principalmente, por material muito fino e escuro não identificável no microscópio óptico, possivelmente uma mistura de matéria orgânica, sendo possivelmente uma epimatriz formada pela alteração de grãos de feldspato. Pelo percentual de matriz (25%), as características petrográficas mostram que se trata de um arenito imaturo texturalmente e submaturo mineralogicamente. A maior quantidade de matriz fina orgânica no denominado “Arenito Preto” reflete sua característica de ser uma rocha mais mole, que é cortada facilmente pelos equipamentos das pedreiras onde o material é explorado. Enquanto que os arenitos denominados “Amarelo” e “Multicor” são mais duros, se quebram na estratificação, que é evidenciada pela orientação preferencial das micas observada na petrografia, o que certamente facilita o corte manual.

O quartzo mostrar-se em grãos subangulosos de (250 a 30 μm) estando na lâmina toda com 44% do arcabouço, possui contato côncavo-convexo com os outros minerais. O feldspato tem 50% do arcabouço, com alguns grãos alterados outros não, apresentando um sericitização nos grãos alterados. A muscovita, 5% do arcabouço, em cristais prismáticos alterados nas bordas e como acessórios, minerais opacos com 1% disseminados na lâmina.

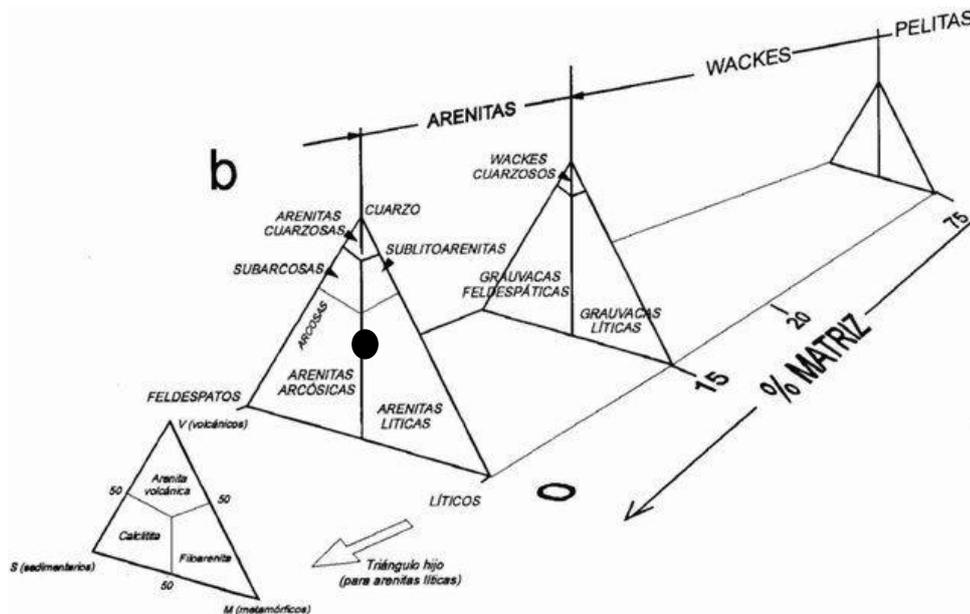
A petrotrama mostra segregação granular por orientação, composição e tamanho, com uma imbricação dos grãos se sobreponham uns aos outros e os grãos arrumados num empacotamento fechado. A textura do Arcabouço contém uma granulometria modal bem classificada com um desvio padrão de 0,6. A esfericidade e o arredondamento dos grãos variam de angular a sub-angular e baixa esfericidade. A ortomatriz possui uma textura reliquiar e uma mineralogia heterogênea, representada por quartzo, feldspato e filossilicatos, com uma textura muito fina.

O quartzo exhibe uma recristalização entre os grãos, com grãos finos, os feldspatos encontram-se muito alterados, já alterando para filossilicatos. O componente diagenético que é o cimento da amostra exhibe uma mineralogia de filossilicato junto com óxido de ferro, não sendo possível verificar a proporção, pois o cimento está muito fino. Os óxidos de ferro, são, possivelmente gohetita ou hematita. Os filossilicatos, devido à diagênese, estão cristalizando para uma muscovita secundária que é exibida na amostra e está nos contatos com o arcabouço com o cimento.

O preenchimento da textura do cimento é tardio, sua porosidade secundária, exhibe grãos fraturados, as compactações tanto mecânicas e químicas exibem côncavo-convexo, planar e suturado. Tendo uma compactação mecânica com um rearranjo por fraturamento uma redução

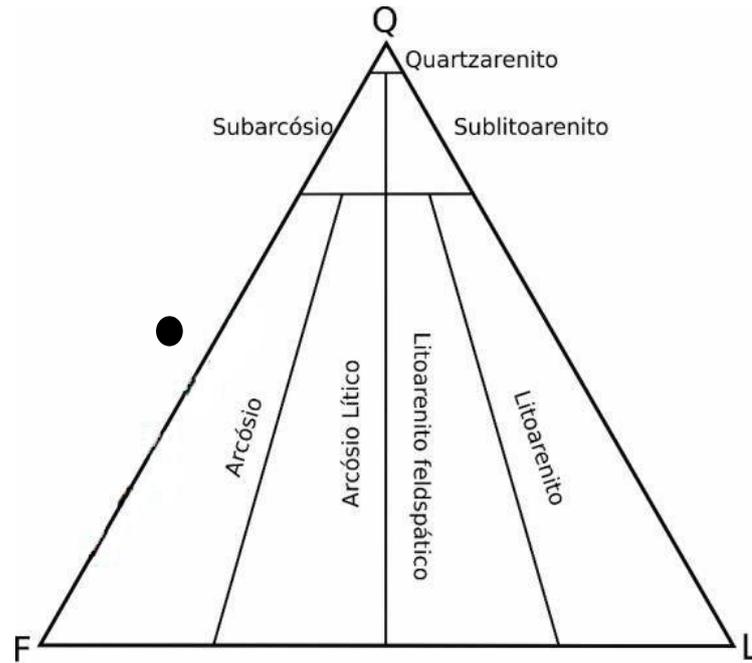
da porosidade primária, já a compactação química teve uma redução do volume total e porosidade primária através da pressão no contato entre os grãos. (Fotomicrografias 5 e 6) A amostra é submatura mineralogicamente e imatura texturalmente, sendo classificada como Arenito Arcócio segundo Folk (1968) (Figura 20) ou Wacke Feldspático segundo Dott (1964) (Figura 19). Com o resultado da petrografia e com a contagem de tamanho dos grãos feito em 200 grãos de cada amostras, foi classificada com arenito muito fino (Fotomicrografia 5).

Figura 19 – Diagrama de arenito de acordo com Dott (1964).



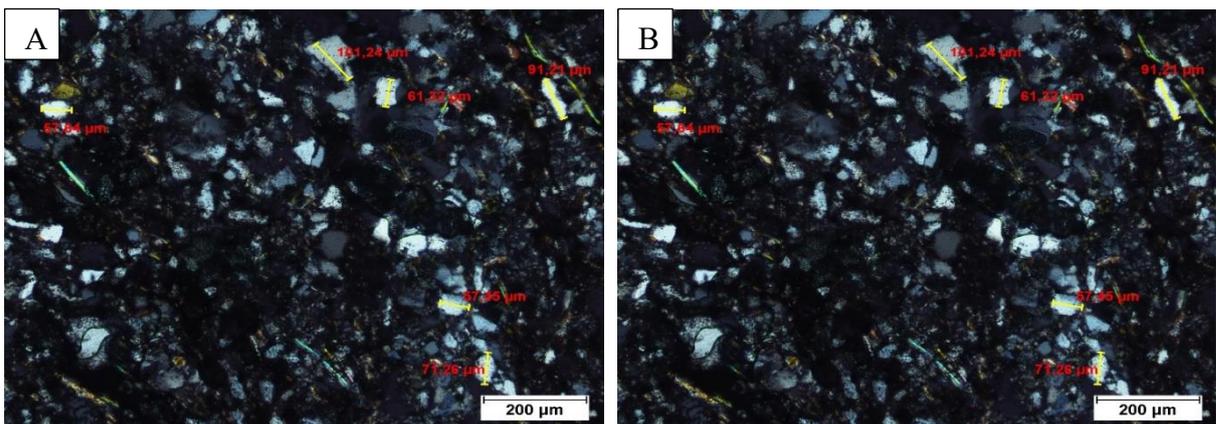
Fonte: Dott, 1964.

Figura 209 – Diagrama de arenito de acordo com Folk (1968).



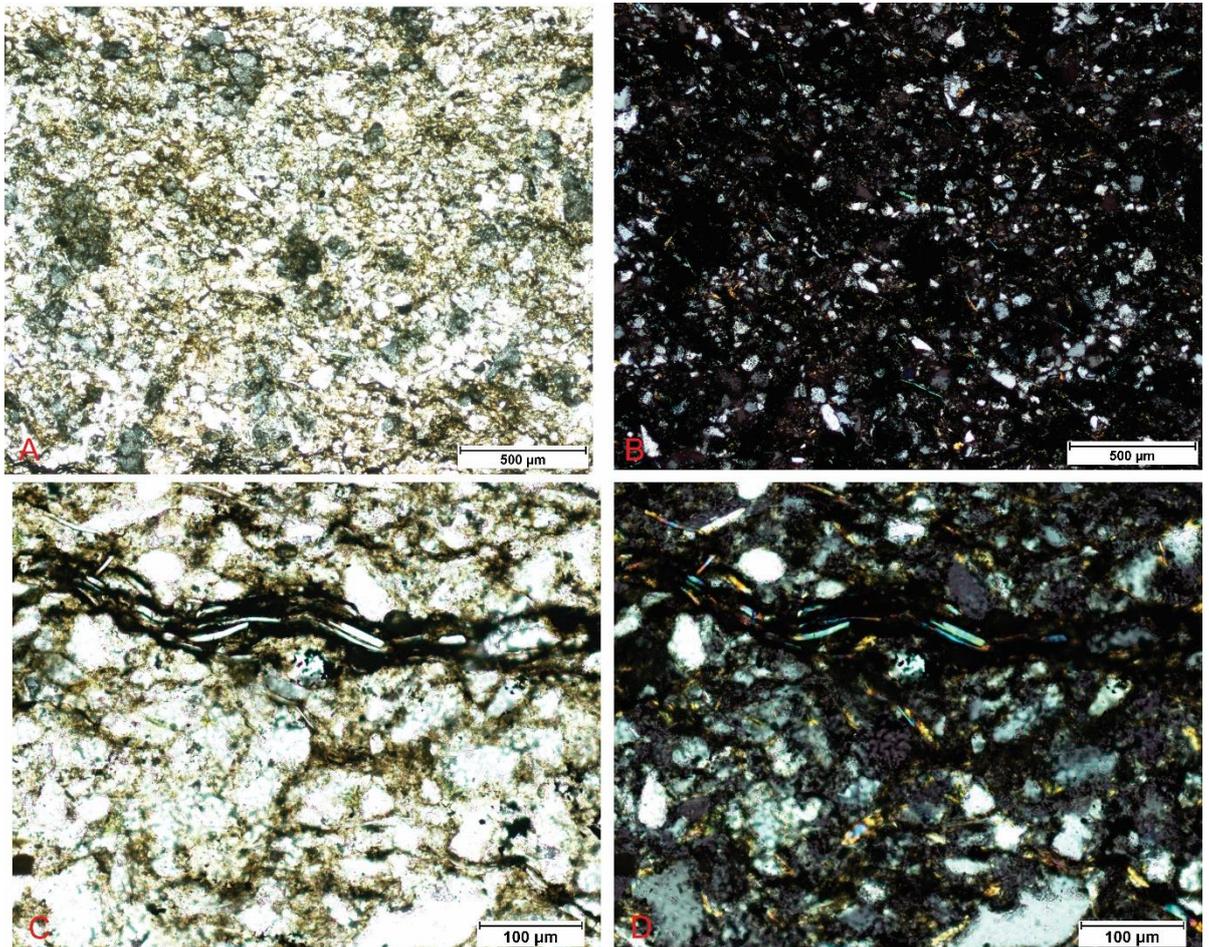
Fonte: Folk, 1968.

Fotomicrografia 5 – (A) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos; (B) Estrutura mineralógica do arenito (luz ortoscópica) com tamanho dos grãos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fotomicrografia 6 – (A) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz natural polarizada); (B) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz ortoscópica); (C) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz natural polarizada); (D) Estrutura do arenito, mostrando o cimento com óxido de ferro e grãos muito compactos e com matéria orgânica (luz ortoscópica).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 3 mostra a síntese das principais informações composicionais, texturais e estruturais de cada uma das amostras estudadas. Estes dados irão servir de suporte para as correlações com os resultados dos ensaios tecnológicos.

Tabela 3 – Síntese das características petrográficas das rochas estudadas.

Características Petrográficas			Rochas Estudadas		
			Amarelo	Preto	Multicolor
Mineralogia (%)	Quartzo		40	44	50
	Feldspato		50	50	45
	Muscovita		10	6	5
Coloração			Amarela	Preta	Amarela bege
Estrutura			isotrópica	isotrópica	isotrópica
Textura			imatura	Imatura	imatura
Granulação			Areia fina a silte grosso	Areia fina a silte grosso	Areia fina a silte grosso
			250 a 30 µm	250 a 30 µm	250 a 30 µm
Tamanho Relativo dos Grãos			inequigranular	inequigranular	inequigranular
Grau de porosidade			Alto	Alto	Alto
Tipos de Porosidades	Porosidades Não Preenchidas	%	79,49	69,08	72,69
		mm ²	0,63	1,11	1,06
	Tamanho Médio dos poros	mm	2,6	1,4	2,1
Alteração Mineral	Feldspato		moderada	moderada	moderada
	Muscovita		moderada	moderada	moderada
Tipos de Contato	Planos	%	21,77	11,78	27,90
		mm ²	0,91	0,91	2,51
	Côncavos-convexos	%	78,23	88,22	72,10
		mm ²	2,06	2,97	3,2
Classificação Petrográfica			Arenito Fino		

Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização dos ensaios físico-mecânicos dos arenitos estudados, objetivando avaliar seu comportamento tecnológico, quando de sua utilização como material ornamental e de revestimento em obras de construção civil.

Os resultados obtidos para os três arenitos estudados foram sempre comparados aos parâmetros das normas utilizadas para rochas graníticas e pela norma, pois como não existe norma específica para arenitos adequamos a norma NBR 15.845 (ABNT, 2015) que sugere as características físico-mecânicas dos granitos destinados ao revestimento de edificações.

6.2 Índices Físicos

Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos para os índices físicos dos três tipos areníticos analisados e para comparação os parâmetros estabelecidos na norma NBR 15.845-2 (ABNT, 2015) e 616 (ASTM, 1999).

Tabela 4 – Resultados dos Índices Físicos para os tipos areníticos estudados.

Ensaio Tecnológico	Amarelo	Preto	Mult	Norma 616 (ASTM, ano??)	NBR 15.845-2 (ABNT, 2015)
Densidade Aparente	2.329	2.359	2.344	mín. 2.000 kg/m ³	mín. 2.550 kg/m ³
Porosidade Aparente	7,10	8,17	8,52	-	máx. 1,0%
Absorção d'Água	3,05	3,47	3,64	máx. 8%	máx. 0,4%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2.1 Densidade Aparente

Nos arenitos estudados, o material que apresentou maior densidade aparente foi o arenito Preto (2.359 kg/m³), porém, isto por si só, não quer dizer que existe uma coesão mineral, pois poderá haver conectividade entre os poros, entretanto, essas conectividades poderão estar preenchidas por matéria orgânica.

Em contrapartida, o material que apresentou menor densidade aparente foi o arenito Amarelo com valor de 2.329 kg/m³, basicamente, em função de sua baixa porosidade (7,10%).

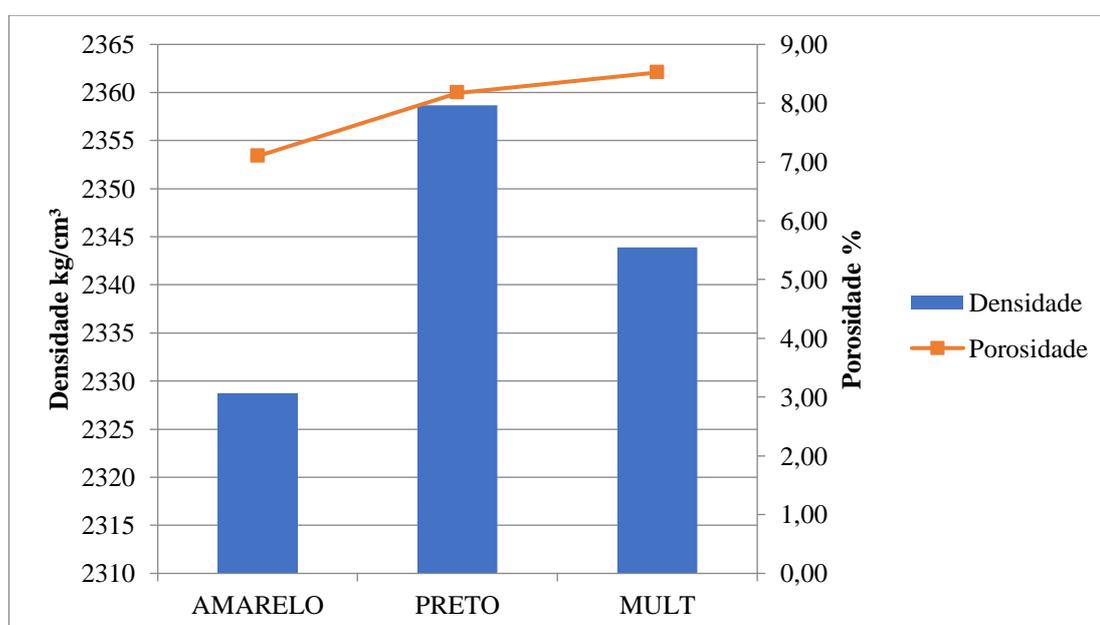
O arenito que apresentou densidade aparente intermediária foi o Mult com 2.344

kg/m³, com porosidade de 8,54%, a mais elevada dentre os materiais estudados.

De forma geral, os valores obtidos para as densidades aparentes demonstram que para os três materiais rochosos estudados os valores encontrados estão abaixo do limite de 2.550 kg/m³ estabelecido pela norma NBR 15.845-2 (ABNT, 2015), entretanto, pela norma 616 (ASTM, 1999), os arenitos estudados atendem ao limite sugerido pela norma que é de 2.000 kg/m³.

O Gráfico 1 demonstra os resultados obtidos nos ensaios de densidade aparente e suas correlações com a porosidade aparente dos tipos areníticos estudados, a partir dos valores exibidos mostrados na Tabela 4.

Gráfico 1 – Correlação entre os valores da Densidade Aparente e Porosidade Aparente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Porosidade Aparente

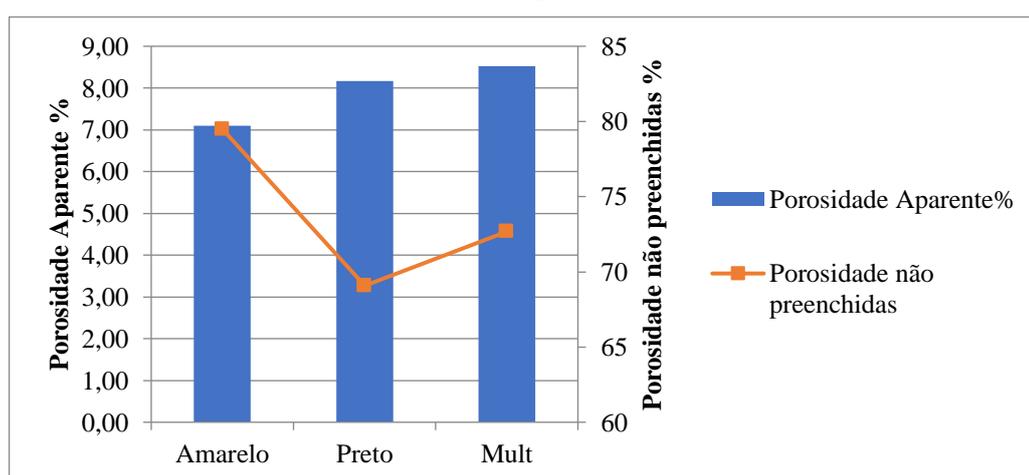
Das amostras estudadas a que apresentou maior porosidade aparente foi o arenito Multi com 8,52%, conforme observado na Tabela 4. Este valor ultrapassa consideravelmente o valor de referência estabelecido pela norma NBR 18.845-2 (ABNT, 2015) que é de 1,0% mostrando claramente que este material é mais propício à percolação e ao acúmulo de água, inviabilizando sua utilização em ambientes úmidos, tais como: banheiros, lavabos e pias. Este comportamento, certamente, é reflexo de suas características petrográficas, principalmente, no que se refere ao elevado percentual de poros.

As amostras de arenito Preto e Amarelo, por sua vez, também apresentaram porosidades fora dos limites sugeridos pelas normas vigentes.

O arenito Amarelo apresenta a menor porosidade dentre os tipos rochosos pesquisados, em função de suas propriedades petrográficas e mineralógicas: contatos minerais predominantemente côncavo-convexos (78,23%), alteração mineral incipiente no feldspato.

O Gráfico 2 mostra a correlação existente entre a Porosidade Aparente e as Porosidades Não-Preenchidas para os tipos areníticos estudados.

Gráfico 2 – Correlação entre a Porosidade Aparente e as Porosidades Não-Preenchidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.3 Absorção de Água

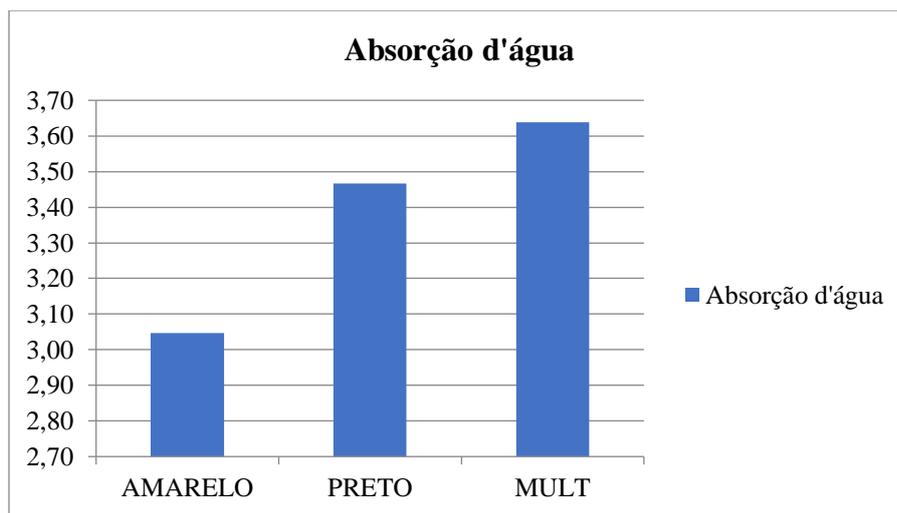
De acordo com o Gráfico 3 e a Tabela 4, verificamos que nenhum dos três materiais pesquisados apresentou valores de absorção de água dentro dos valores de referência sugeridos pela norma 15.845-2 (ABNT, 2015) que é de 0,40%.

Por outro lado, pelo fato de estarmos lidando com rochas sedimentares norma 616 (ASTM, 1999) onde para arenitos os valores de referência sugeridos são de 8%, no máximo.

O arenito Amarelo apresentou a menor absorção de água 3,05%, o que pode ser explicado também por sua menor porosidade em relação aos tipos areníticos Preto e Mult.

Em face dos dados obtidos estes materiais são considerados inapropriados para uso em ambientes úmidos e/ou externos, onde haja contato direto com fluídos aquosos.

Gráfico 3 – Resultados dos ensaios de Absorção de Água para os arenitos estudados.



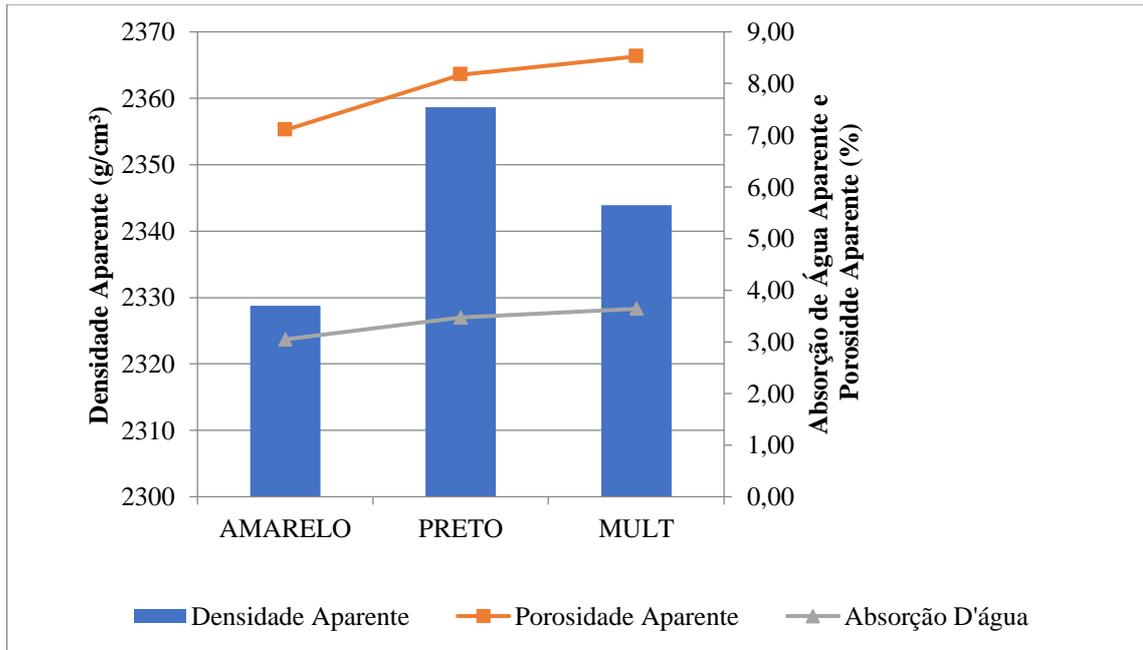
Fonte: Elaborado pelo autor.

As respostas obtidas dos materiais areníticos pesquisados nos ensaios de índices físicos demonstram haver um comportamento coerente e que refletem a influência direta das suas características petrográficas, texturais e mineralógicas.

A coerência entre os valores de porosidade aparente e os dados de absorção de água tornam-se evidente no Gráfico 4 pela própria geometria de suas linhas, demonstrando a estreita relação entre os parâmetros tecnológicos, onde seus resultados são diretamente condicionados pelas características petrográficas (composição mineralógica, grau de alteração mineral, intensidade de microfissuramentos, etc.).

O Gráfico 4 exibe os resultados dos ensaios tecnológicos referentes aos índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para uma melhor visualização, tendo como base os valores obtidos na Tabela 4.

Gráfico 4 – Correlação entre os resultados dos Índices Físicos para os arenitos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 Resistência à Compressão Uniaxial

Este ensaio foi executado de acordo com as normas NBR 15.845-5 (ABNT, 2015) e 616 (ASTM, 1999). Na Tabela 5 encontram-se os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial obtidos para as rochas areníticas ensaiadas.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial para os arenitos estudados.

Ensaio Tecnológico		Arenitos			NBR 15.845-5 (ABNT, 2015)	Norma 616 (ASTM, 1999)
		Amarelo	Preto	Mult	Valores Límitrofes	Valores Límitrofes
Resistência à Compressão Uniaxial (Paralelo)	MPa	85,99	108,67	88,47	min. 100 MPa	min. 28 MPa
	Desvio Padrão	15,67	16,02	7,67	-	-
Resistência à Compressão Uniaxial (perpendicular)	MPa	88,15	106,24	94,79	min. 100 MPa	min. 28 MPa
	Desvio Padrão	28,44	12,08	18,19	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

O arenito Preto apresentou valores de ruptura: 108,67 MPa e 106,24 MPa, no eixo paralelo ao acamamento e no eixo perpendicular ao acamamento, respectivamente, (Tabela 5), desta forma este arenito atende a norma vigente, sendo reflexo de seu elevado nível de compactação, pois seus índices de porosidade e absorção d'água são intermediários, retratando a influência marcante de suas propriedades petrográficas e mineralógicas que contribuem consideravelmente para a obtenção desses elevados valores de resistência à compressão uniaxial.

De acordo com a Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses - International Society of Rock Mechanics – ISRM (1979), o arenito Preto é classificado como “Muito Resistente”, pois os valores de suas resistências situam-se entre 100 e 250 MPa (Tabela 5).

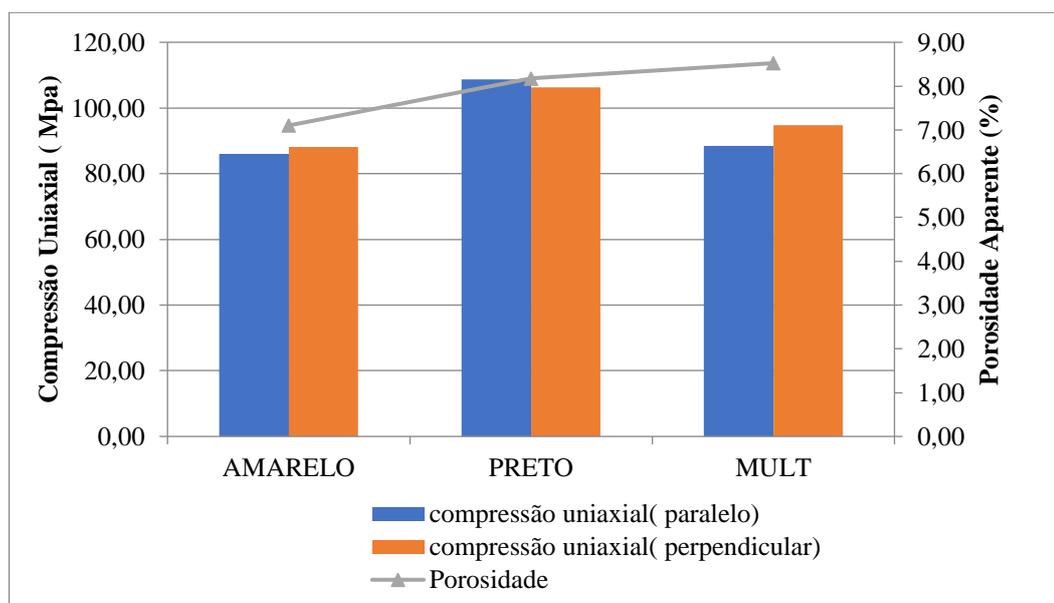
Os arenitos Amarelo Mult, exibem valores tanto no eixo paralelo quanto no eixo perpendicular ao acamamento, valores consideravelmente inferiores ao limite de referência sugerido pela norma NBR 15.845-5 (ABNT, 2015) que é de suportar, pelo menos, 100 MPa antes da ruptura do material pétreo. Entretanto, usando-se a norma 616 (ASTM, 1999) os referidos arenitos atendem aos padrões normativos, uma vez, que a força mínima de ruptura sugerida é de 28MPa.

O arenito Amarelo exibiu valores de 85,99 MPa (no eixo paralelo) e 88,15 MPa (no eixo perpendicular) (Tabela 5), sugerindo que os grãos de seu arcabouço possuem angulosidade e que este material não está muito compactado.

O arenito Mult apresentou valores inferiores a 100MPa, certamente em função de os problemas causados por seus elevados índices de porosidade e de absorção d'água. Em função dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial para as rochas areníticas estudadas, conclui-se que os arenitos Amarelo e Multi não atendem a normatização brasileira, mas, atendem a norma americana requerendo estudos mais aprofundados para seu uso como elemento estrutural em obras de construção civil.

Conforme observado no Gráfico 5 e nas Tabelas de compressão uniaxial e de porosidade, a relação quando maior porosidade maior a resistência a compressão, como pode ver no arenito Preto, onde o valor da porosidade aparente é bastante elevada e o índice de compressão uniaxial do Preto é mais alto.

Gráfico 5 – Correlação entre a Compressão Uniaxial e a Porosidade Aparente para os arenitos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Resistência à Flexão (Três Pontos) - Módulo de Ruptura

A norma 15.845-6 (ABNT, 2015) determina como valor de referência para o ensaio de resistência à flexão (método dos três pontos) para rochas ornamentais e de revestimento, um valor igual ou superior a 10 MPa e a norma 616 (ASTM, 1999) para rochas areníticas sugere um índice igual ou maior que 2,4 MPa.

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à flexão para os arenitos estudados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados para o ensaio de Resistência à Flexão (Três Pontos) para os arenitos estudados.

Ensaio Tecnológico			Rochas Estudadas			NBR 15.845-6 (ABNT, 2015)	Norma 616 (ASTM, 1999)
			Amarelo	Preto	Mult	Valores Limítrofes	Valores Limítrofes
Resistência à Flexão (Três Pontos)	Paralelo	MPa	16,04	20,28	20,75	Mínimo 10MPa	Mínimo 2,4 MPa
		DP	2,33	2,46	2,62	-	-
	Perpendicular	MPa	14,00	18,22	16,48	Mínimo 10MPa	Mínimo 2,4 MPa
		DP	4,05	2,08	1,48	-	-

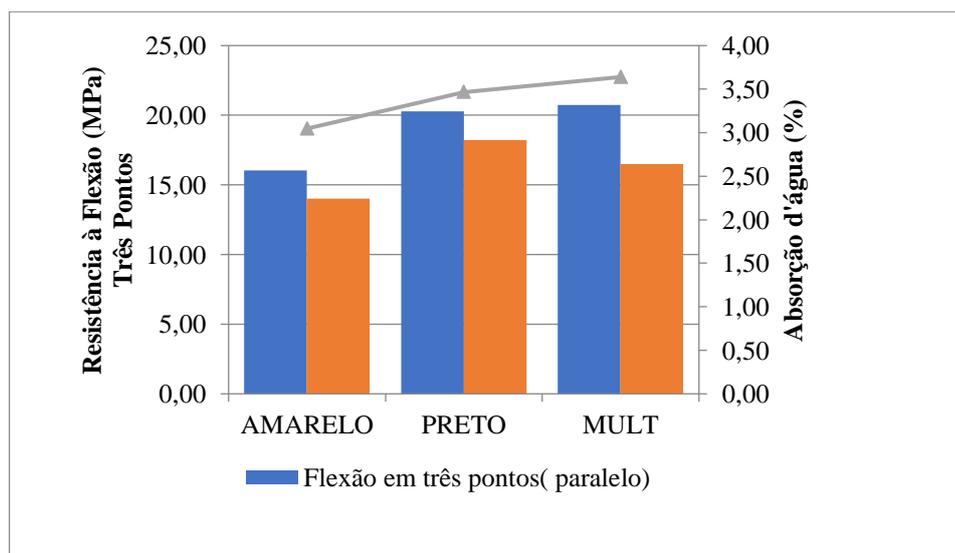
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à flexão (três pontos), sob condições dos esforços tanto no eixo paralelo ao acamamento quanto no eixo perpendicular ao acamamento apresentado pelo arenito Amarelo foi de 16,04 MPa e de 14,00 MPa, respectivamente, situando-se, portanto, dentro do valor de referência estabelecido pelas normas vigentes.

O arenito Preto com valor de 20,28 Mpa no eixo paralelo e de 18,22 MPa no eixo perpendicular também se encontra dentro do valor de referência sugerido pelas normas vigentes.

O arenito Mult forneceu os seguintes valores para o ensaio de resistência à flexão: 20,75 MPa no sentido paralelo ao acamamento e de 16,48 Mpa, no sentido perpendicular ao acamamento, estando, portanto, de acordo com as normas vigentes. Estes dados mostram-se compatíveis em relação aos valores obtidos para os índices físicos e para o ensaio de resistência à flexão, demonstrando a importância das características petrográficas que condicionam fortemente os resultados deste ensaio tecnológico.

Gráfico 6 – Correlação entre o ensaio de resistência à flexão e a absorção de água para os tipos areníticos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 6 elaborado a partir das Tabelas 6 e 4, podemos observar que há uma correlação diretamente proporcional entre a resistência à flexão e a absorção de água para os três tipos areníticos estudados no sentido paralelo ao acamamento.

Esta relação torna-se evidente, por exemplo, quando verificamos os resultados

referentes ao Mult, onde o valor da absorção de água é elevada (3,64%) e o índice de resistência à flexão é considerável elevado (20,75 MPa).

Logo, mais uma vez, concluímos que as características petrográficas, estruturais e a porosidade da rocha sedimentar influenciam de forma direta nos resultados dos ensaios físico-mecânicos.

6.5 Desgaste Abrasivo Amsler

O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da norma NBR 15.845 (ABNT, 2015) que determina o máximo de 1,0mm de redução na espessura dos corpos-de-prova e a norma 616 (ASTM, 1999) que determina o mínimo de 2,0 mm de redução para rochas areníticas.

Os resultados obtidos neste ensaio laboratorial são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de Desgaste Abrasivo Amsler para os arenitos estudados.

Ensaio Tecnológico			Rochas Estudadas						NBR 15.845 (ABNT, 2015)	616 (ASTM, 1999)
			Amarelo		Preto		Mult		Valores Limítrofes	Valores Limítrofes
Desgaste Abrasivo Amsler	Ciclo de 500m paralelo	Mm	1,30		2,01		1,76		-	-
	Ciclo de 1000m Paralelo	Mm	2,33		3,99		3,38		Máx. 1,0mm	Min. 2,0mm
	Ciclo de 500m perpendicular	Mm	1,26		1,62		1,59		-	-
	Ciclo de 1000m perpendicular	Mm	2,54		3,10		2,95		Máx. 1,0mm	Min. 2,0mm
ASTM E 384-17 – Micro dureza			201	287,5	152	147,6	176,5	138,6		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme observado na Tabela 7, os valores de desgaste das rochas pesquisadas encontram-se em desconformidade com os valores sugeridos pela norma NBR 15.845 (ABNT, 2015), mas atende aos parâmetros sugeridos pela norma americana 616 (ASTM, 1999).

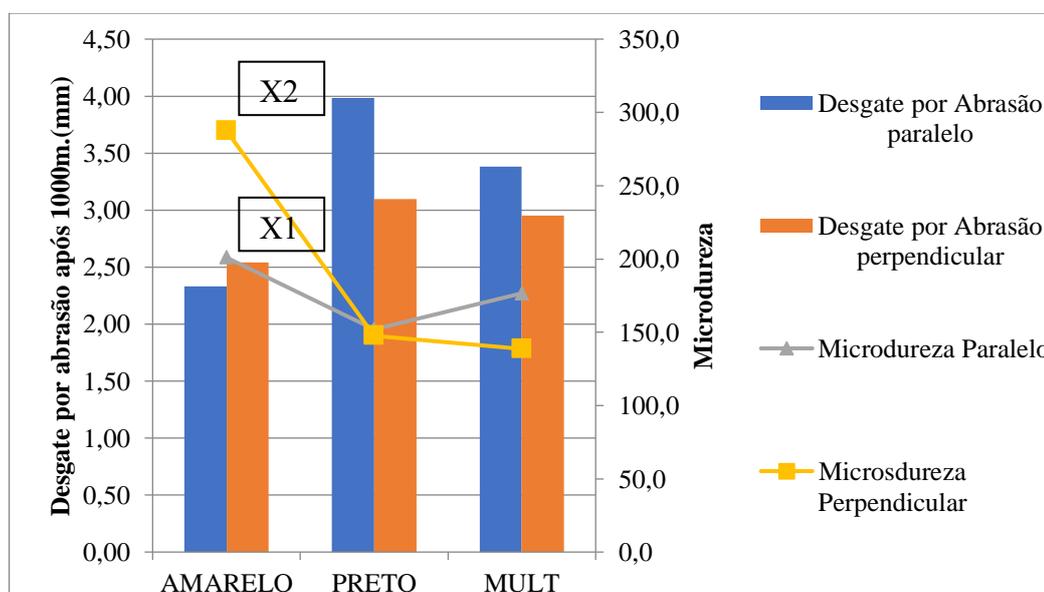
O arenito Amarelo apresentou a menor redução de espessura com 2,33mm no sentido paralelo ao acamamento e de 2,54 mm no sentido perpendicular ao acamamento, aproximando-se bastante do limite normativo; o arenito Preto demonstrou a maior redução de espessura: 3,99mm no eixo paralelo e 3,10mm no eixo perpendicular e, por fim, o arenito Mult

exibiu redução de 3,38mm no sentido paralelo e 2,95mm no sentido perpendicular ao acamamento, portanto, demonstrando comportamento intermediário entre o arenito Amarelo e o Preto.

Considerando que os três tipos areníticos estudados, estes responderam de forma satisfatória ao ensaio realizado, sendo sua aplicação como piso em áreas com grande fluxo de pessoas recomendado sem maiores ressalvas.

Estes dados revelam que há uma relação intrínseca entre a composição mineralógica, especialmente, no que se refere aos valores de microdureza e os resultados do Desgaste Abrasivo Amsler, conforme visualizado no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Desgaste por abrasão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o Gráfico 7, observamos que o arenito Amarelo apresentou o menor desgaste Amsler dentre os tipos areníticos estudados, com valor de 2,33mm no plano paralelo a estratificação e 2,54 mm no plano perpendicular a estratificação. Com relação aos resultados de microdureza constatamos que os valores variam entre X1 (microdureza paralela ao acamamento) e X2 (microdureza perpendicular ao acamamento). Esses resultados indicam que o arenito em questão possui baixa resistência à abrasão, certamente, em função do seu menor teor de sílica (40%).

O arenito Preto demonstrou o pior resultado para este ensaio, uma vez que se constatou uma grande redução na espessura da ordem de 3,99mm do corpo de prova no sentido paralelo ao acamamento e de 3,10mm no sentido perpendicular ao acamamento. O arenito Mult

mostra comportamento intermediário com redução de espessura de 3,38mm no plano paralelo a estratificação e de 2,95mm no plano perpendicular a estratificação. Os teores mais elevados de quartzo, em torno de 50%, elevam sua resistência à abrasão, colocando-o dentro do valor de referência e sugerido pela norma 616 (ASTM, 1999). Diante da análise dos resultados obtidos podemos afirmar que a composição mineralógica e a microdureza constitui fator importante na determinação dos valores de resistência abrasiva das rochas areníticas estudadas.

6.6 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais

A realização deste ensaio seguiu a norma 2.845 D (ASTM, 2010) sendo utilizados 10 corpos-de-prova cúbicos com aproximadamente 75mm de aresta, onde foram determinadas as velocidades ultrassônicas longitudinais nas rochas nos planos paralelo e perpendicular ao acamamento.

A Tabela 8 contém os resultados dos ensaios experimentais obtidos para as rochas areníticas em estudo.

Tabela 8 – Resultados para o ensaio de Velocidade de Ondas Ultrassônicas Longitudinais para os arenitos estudados.

Ensaio Tecnológico			Rochas Estudadas		
			Amarelo	Preto	Mult
Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas	Paralelo	m/s	4297	4393	4346
		DP	109,7	78,7	658,9
	Perpendicular	m/s	4349	4433	4472
		DP	73,9	116,3	739,1

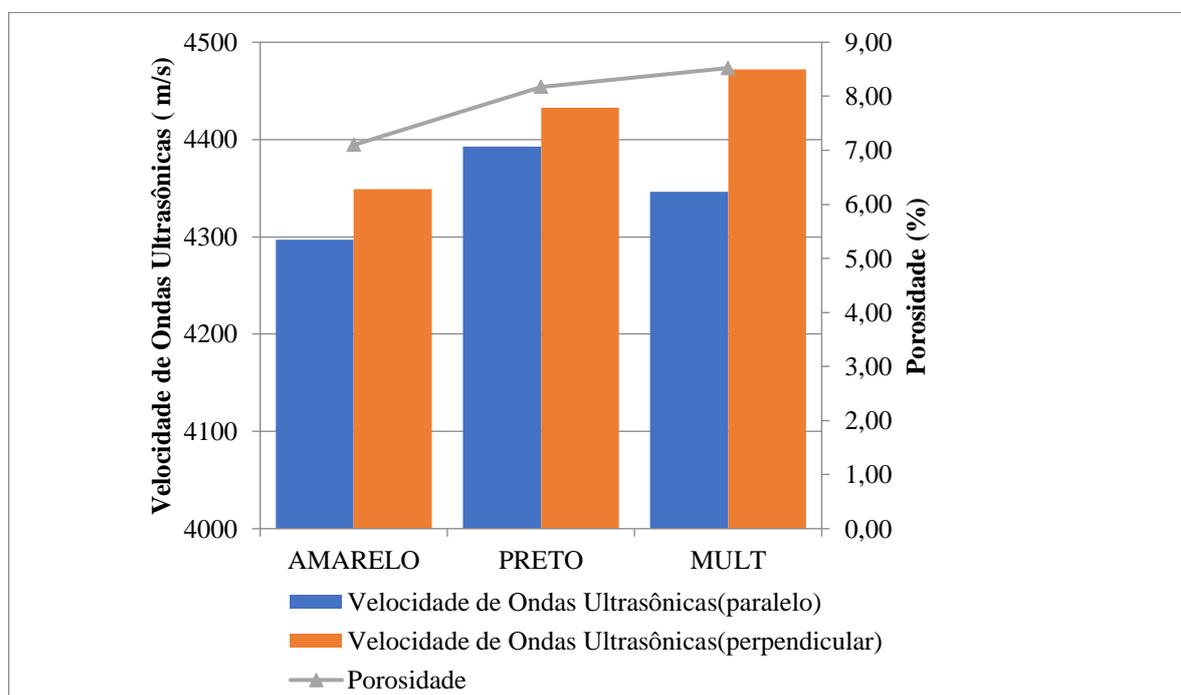
Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os resultados da Tabela 8, verifica-se que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nas rochas areníticas estudadas ao longo do plano perpendicular ao acamamento é maior, quando comparadas as velocidades obtidas no plano paralelo ao acamamento, comportamento concordante com os dados teóricos conhecidos sobre a influência da água na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais.

A relação entre os valores obtidos para a velocidade de propagação de ondas (Tabela 8) e a porosidade aparente (Tabela 4) das rochas areníticas estudadas pode ser visualizada no Gráfico 1, onde se observa uma relação crescente, ou seja, na medida em que se verifica aumento na porosidade das rochas, ocorre o aumento na velocidade de propagação das ondas

longitudinais ultrassônicas, tanto no paralelo quanto no perpendicular.

Gráfico 8 – Correlação entre a Velocidade de Ondas Longitudinais e a Porosidade Aparente para os arenitos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

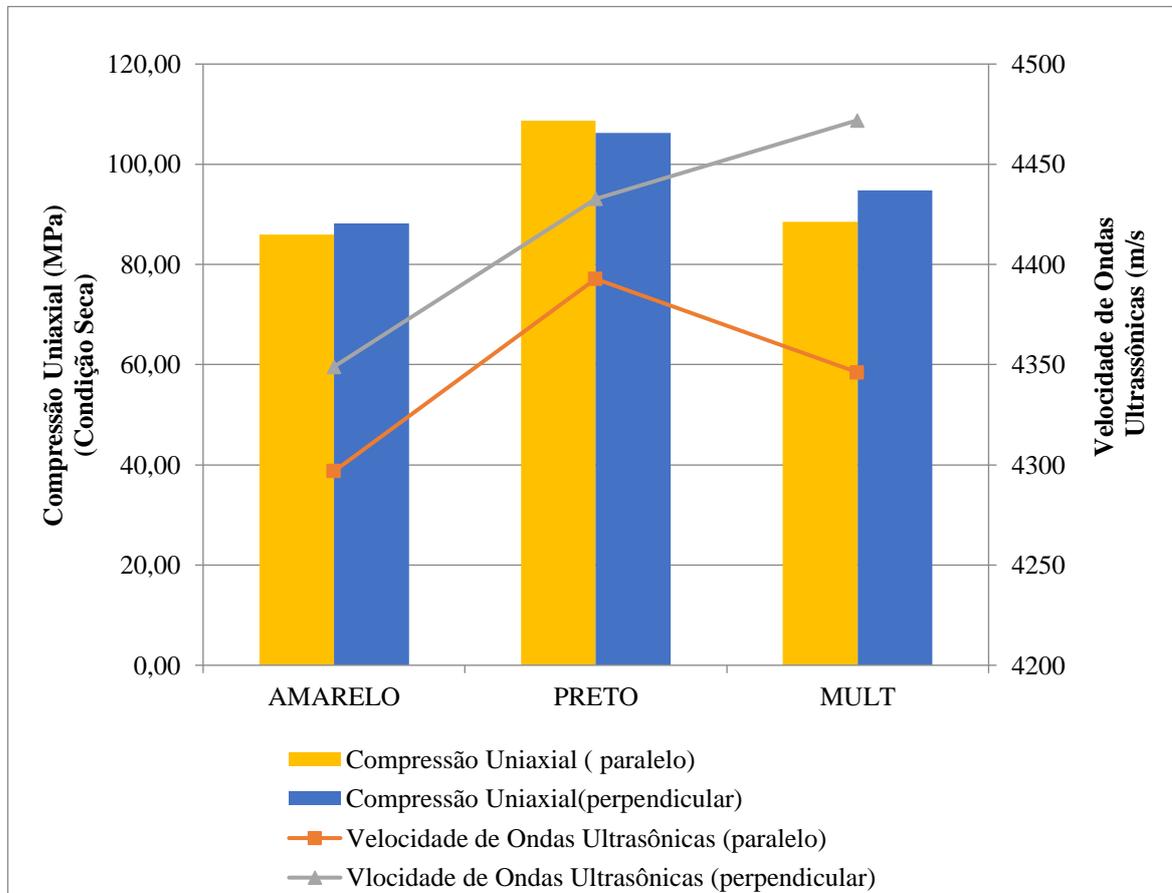
Averiguando os resultados expressos no Gráfico 8, verificamos que as menores velocidades de propagação de ondas pertencem ao arenito amarelo (4.297m/s, no paralelo e 4.349 m/s, no perpendicular). As maiores velocidades de propagação de ondas pertencem o arenito preto (4.393m/s, no paralelo e 4.433 m/s, no perpendicular) devido as suas características petrográficas (contatos minerais côncavo-convexos-convexos (88,22%), alteração mineral incipiente nos minerais de feldspatos e muscovita), e um índices de porosidade e absorção de água intermediária (Tabela 4). O arenito Mult exibe os valores intermediários para as velocidades de propagação de ondas (4.346m/s, no paralelo e 4.472 m/s, no perpendicular), respectivamente.

Estes dados mostram que fatores como características petrográficas texturais e estruturais, densidade, porosidade, absorção de água, tipo de porosidade, etc. exercem influência direta sobre o comportamento da velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassônicas em materiais areníticas.

Analisando o Gráfico 9, constatamos que há uma relação direta entre a compressão uniaxial (Tabela 5) e a velocidade de ondas ultrassônicas longitudinais (Tabela 8), tanto no

paralelo quanto perpendicular, uma vez que, quanto maior é a resistência à compressão uniaxial, maior será a velocidade de propagação das ondas longitudinais ultrassônicas.

Gráfico 9 – Correlação entre a Velocidade de Ondas Longitudinais e a Compressão Uniaxial para os arenitos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A menor velocidade de propagação (4.297m/s, no paralelo e 4.349 m/s, no perpendicular) das ondas ultrassônicas para o arenito amarelo está relacionada a sua baixa porosidade (7,10%) em relação as outras amostras e baixa absorção de água (3,05%), além, de apresentar moderada alteração nos minerais de feldspatos, ocasionando uma redução na velocidade do pulso ultrassônico.

O fato da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no arenito preto ser a mais elevada dentre as rochas estudadas, está diretamente relacionada às suas características petrográficas e tecnológicas que contribuem fortemente para o aumento da velocidade do pulso ultrassônico, tais como: uma porosidade intermediária (8,17%) e absorção aparente de água (3,47%) intermediário, alteração mineral predominante do tipo incipiente, menor tamanho de suas porosidades, contatos minerais predominantes do tipo côncavo-convexo, resultando numa

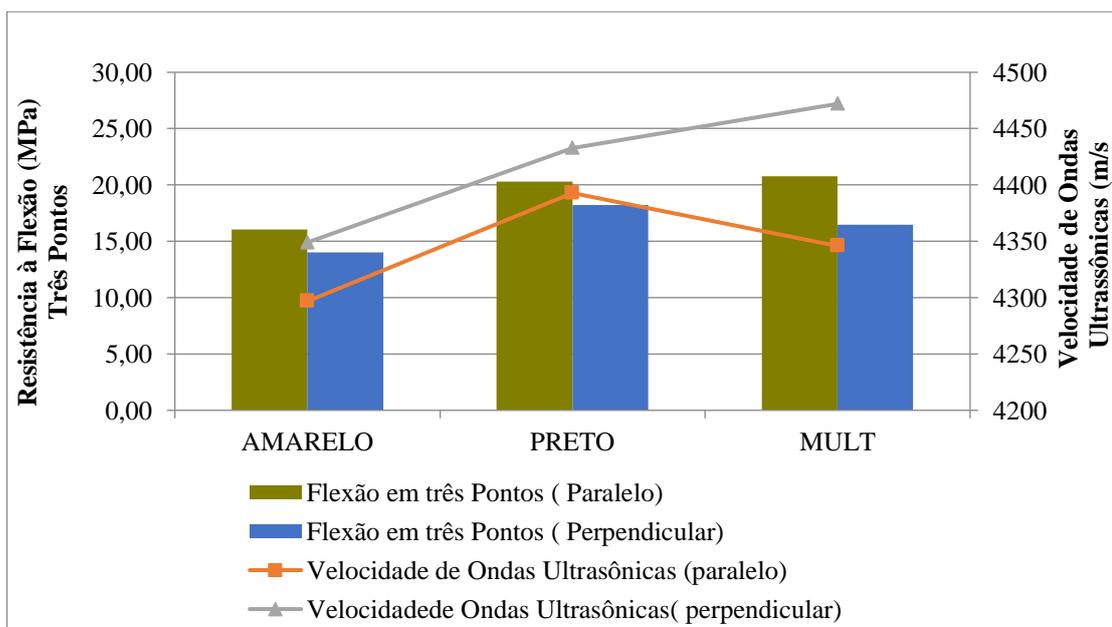
rocha com boa sanidade e firmeza em seus arranjos minerais, atingindo o valor 108,67 MPa no paralelo e 106,24 Mpa no perpendicular para sua resistência à compressão uniaxial.

O arenito Mult apresenta comportamento intermediário com velocidade de (4.346m/s, no paralelo e 4.472 m/s, no perpendicular), moderada alteração nos minerais de feldspato e muscovita, e contatos minerais predominantes do tipo côncavo-convexo.

A velocidade de propagação de ondas nas amostras analisadas reflete um padrão de comportamento compatível e coerente com valores obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial para os três tipos arenitos estudados, mostrando uma correlação direta entre estes dois parâmetros, tanto em condições no paralelo como no perpendicular.

No Gráfico 10, observa-se uma relação diretamente proporcional entre os parâmetros de resistência à flexão (três pontos) e a velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassônicas, tanto no paralelo como no perpendicular, ou seja, quanto maior é o valor da resistência à flexão, maior será a velocidade de propagação das ondas longitudinais ultrassônicas.

Gráfico 101 – Correlação entre a Velocidade de Ondas Longitudinais e a Resistência à Flexão para os arenitos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 PETROFÍSICA

Este capítulo consisti em apresentar às propriedades físicas da rocha em estudo. Os critérios mais utilizados de classificação dos minerais constituintes da rocha, com base nas propriedades petrofísicas, baseiam-se, na sua maioria, nas seguintes propriedades: porosidade, densidade dos grãos e velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (VP e VS). Os ensaios para obtenção destes parâmetros são frequentemente realizados sobre corpos cilíndricos extraídos de amostras coletadas.

A petrofísica é definida por Tiab & Donaldson (2004) “como sendo o estudo das propriedades físicas das rochas e suas interações com os fluidos, sejam eles gases, óleo, ou soluções aquosas”.

Após a seleção de 12 amostras do arenito em estudo, para a preparação e realização das medidas de atributos petrofísicos. Foram confeccionados 12 corpos de paralelos ao acamamento e 12 perpendiculares, totalizando 24 corpos de provas, com comprimento de 5 centímetros e largura de 3 cm, dimensão padrão utilizada nos ensaios, sendo posteriormente retificados, objetivando deixar as faces dos corpos de provas de forma plana e paralela, requisito básico para que as medidas sejam realizadas com precisão.

Após esta fase de preparação, os corpos de provas foram submetidos à secagem por 24 horas, sob temperatura constante de 80°C em uma estufa. Em seguida, foram pesados em uma balança eletrônica de precisão e realizadas as medições de suas dimensões, referentes a comprimento e diâmetro, com o auxílio de um paquímetro digital. Estes corpos de provas foram destinados à realização dos ensaios de porosidade e velocidade de ondas. O preparo dos corpos de provas e a medição da porosidade e propriedades de ondas foram realizados no Laboratório de Petrofísica da UFCG sob a supervisão do prof. Dr. José Agnelo Soares e do técnico de Laboratório. Para medição da porosidade utilizou-se o equipamento UltraPoroPerm 500®, fabricado pela Corelab, por meio do método da porosimetria por expansão gasosa (Tiab & Donaldson, 2004). O volume de grãos (VG) é medido pela expansão do nitrogênio contido em uma câmara no interior do permoporosímetro.

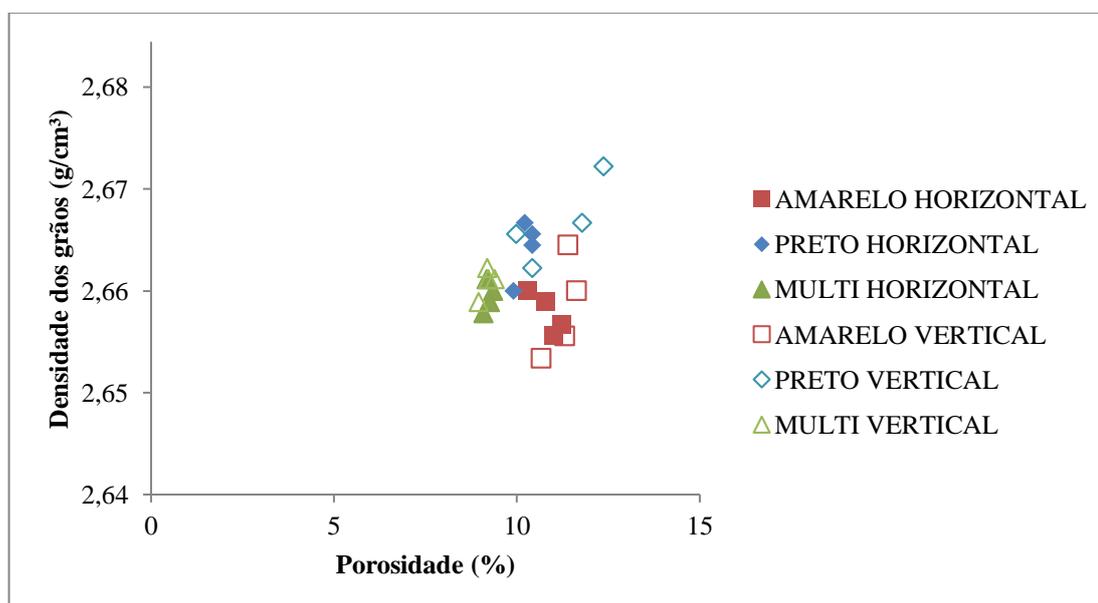
Nesta câmara, de volume conhecido V1, mede-se a pressão P1 na qual o gás se encontra comprimido. Em seguida permite-se que o gás se expanda através de uma conexão ao copo matriz, de volume V2 também conhecido, o qual contém o corpo de prova. Após a estabilização da expansão do gás, mede-se a pressão P2. A queda de pressão dada pela diferença P1-P2 é proporcional ao volume V ocupado pelo gás: $V = V1 + V2 - VG$, onde VG é o volume de grãos do corpo de provas. Aplicando a Lei de Boyle e considerando que VG é a única

incógnita, este parâmetro pode ser determinado de forma direta. A diferença entre o volume de grãos e o volume total do corpo de provas, consiste no seu volume de vazios. Para calcular a porosidade basta determinar a razão entre o volume de vazios e o volume total.

Para a medição das velocidades ondas elásticas foi utilizado o sistema AutoLab 500®, marca New EnglandResearch, o qual permite registrar simultaneamente três forma de onda: a onda P, que se propaga e possui polarização na direção axial do corpo de provas, e duas ondas S com direções de polarização mutuamente ortogonais e perpendiculares ao eixo do corpo de provas: S1 e S2. A partir das velocidades de propagação das ondas P e S e da densidade total dos corpos de provas, pode-se calcular os módulos elásticos: módulo de Young (E) e razão de Poisson (ν).

A caracterização petrofísica foi obtida nos 24 corpos-de-prova sistemáticos para realização dos ensaios em laboratório. O gráfico 11 apresenta a relação da densidade de grão com a porosidade das amostras.

Gráfico 11 – Relação densidade e porosidade.



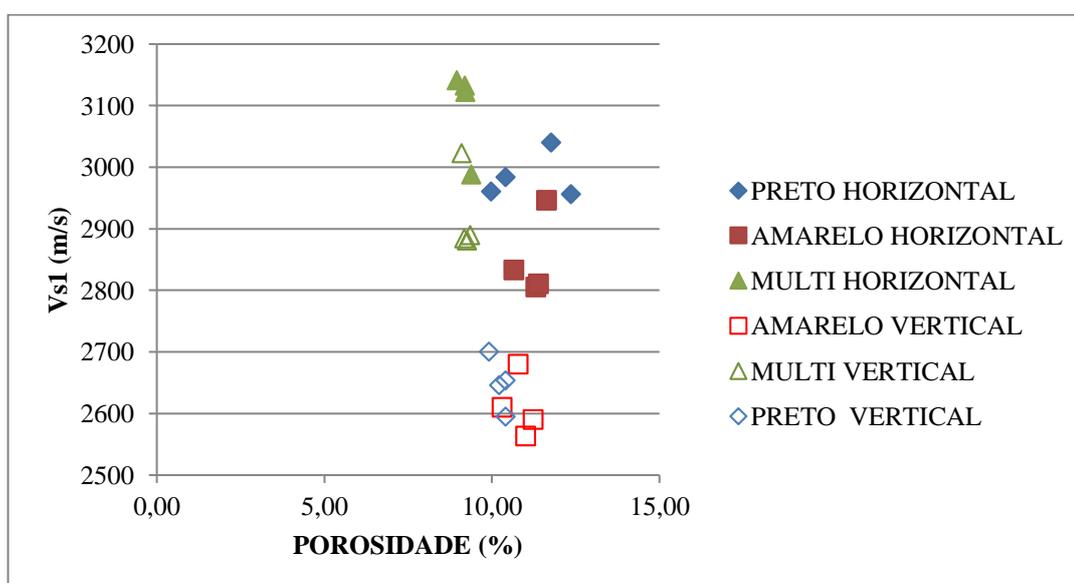
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que os três grupos de amostras não apresentam comportamento homogêneo devido a variação entre 9% a 12 % na porosidade, podendo ser atribuída a ocorrência de matéria orgânica durante o processo de sedimentação. O Multicor apresenta uma variação de porosidade menor que 1% enquanto o Preto varia de 1% a 3%. A densidade de grãos varia de 2,65 a 2,67 g/cm³. Estes valores são atribuídos a composição mineralógica que em sua maioria é composta por grãos de quartzo.

Os valores de porosidade encontrados são atribuídos a variação dos teores de matéria orgânica, a ocorrência ou não de poros interconectados. O arenito Multicor possui comportamento mais homogêneo enquanto que o arenito Preto apresenta-se mais disperso, ou seja, para maiores valores de porosidade ocorrem menores valores da densidade total. O gráfico 11 correlaciona a densidade de grão com a porosidade de 24 amostras. Neste gráfico observa-se que os valores são iguais aos esperados para amostras areníticas, cuja densidade de grão está em torno de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

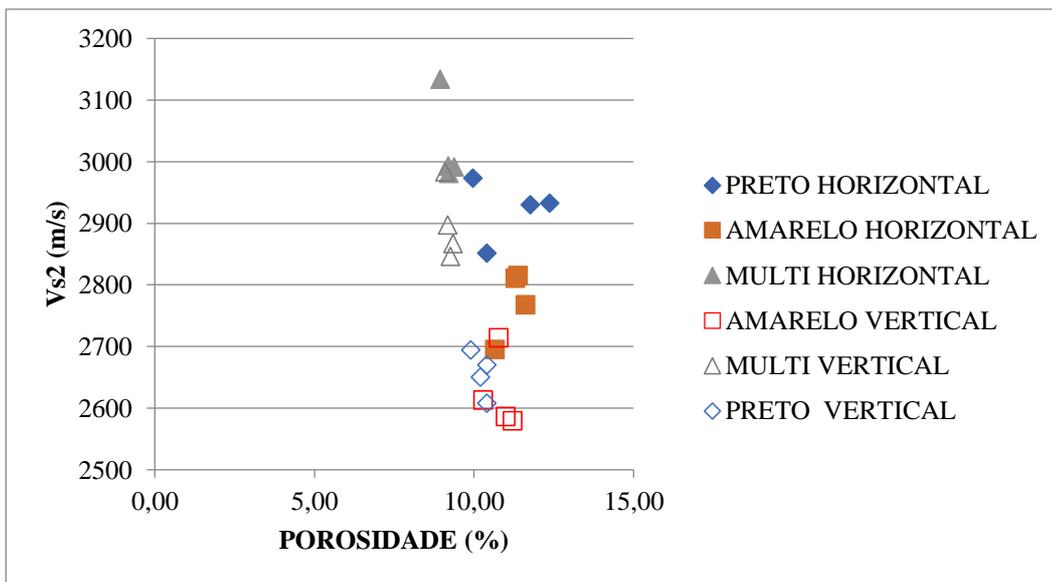
Os gráficos 12 e 13 apresentam resultados similares para as velocidades das ondas S_1 e S_2 em relação à porosidade. A partir do gráfico é possível observar que houve uma relação de aumento entre as velocidades e a porosidade. É possível identificar, que as velocidades de propagação são maiores nas medidas horizontais que nas medidas verticais. Isso ocorre devido ao menor volume de descontinuidades que interceptam as ondas, de forma geral, a medida que a porosidade aumenta as velocidades decrescem. No entanto, as relações entre velocidades e porosidade apresentam um elevado grau de dispersão, ou seja, para um dado valor de porosidade, podem ocorrer diversos valores de velocidade em um determinado tipo de onda. Isto acontece porque as velocidades são muito influenciadas por outras variáveis além da porosidade, como por exemplo, tamanho, arranjo e contato dos grãos.

Gráfico 12 – Relação entre porosidade e velocidade S_1 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

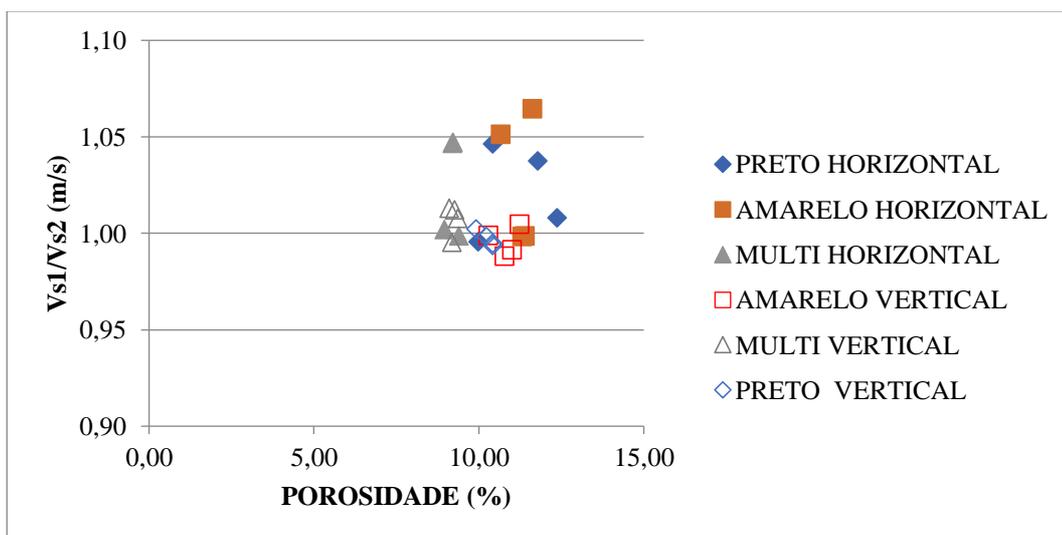
Gráfico 132 – Relação entre porosidade e velocidade S2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

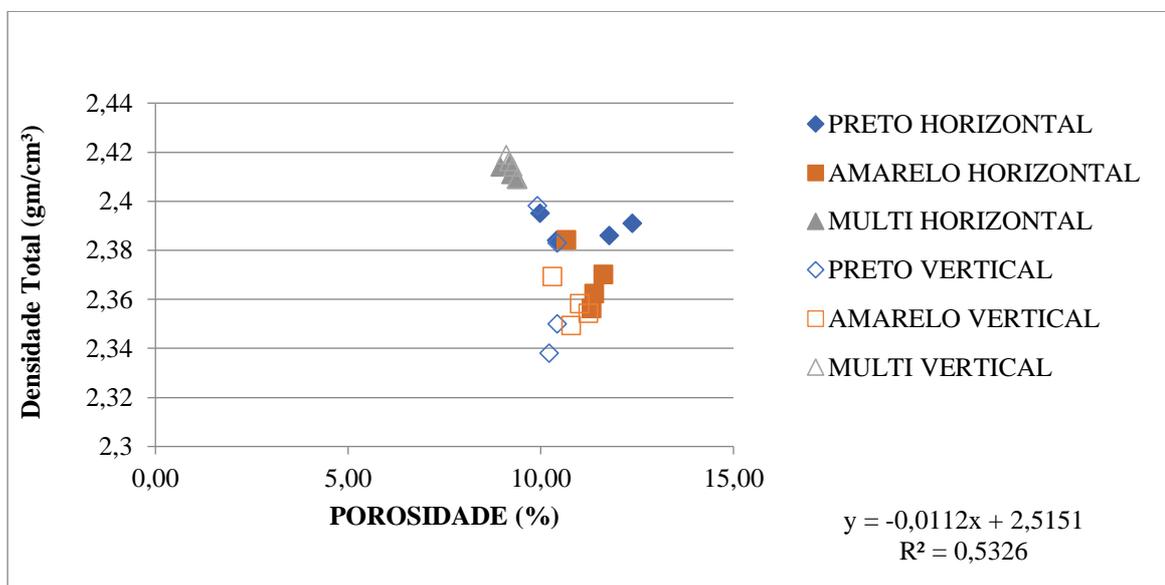
O gráfico 14 apresenta a relação entre a razão V_{s1}/V_{s2} e a porosidade que indica uma medida da anisotropia das amostras. A anisotropia é a característica de um meio, ou de um material, em que certas propriedades físicas serão diferentes conforme as diferentes direções. Sabendo que uma amostra é dita isotrópica quando apresenta esta razão igual a um, observa-se que o grau de anisotropia é muito alto, possivelmente ocasionado pela porosidade. O percentual de amostras com alto grau de anisotropia chega a 20,8%.

Gráfico 14 – Relação entre a razão V_{s1}/V_{s2} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

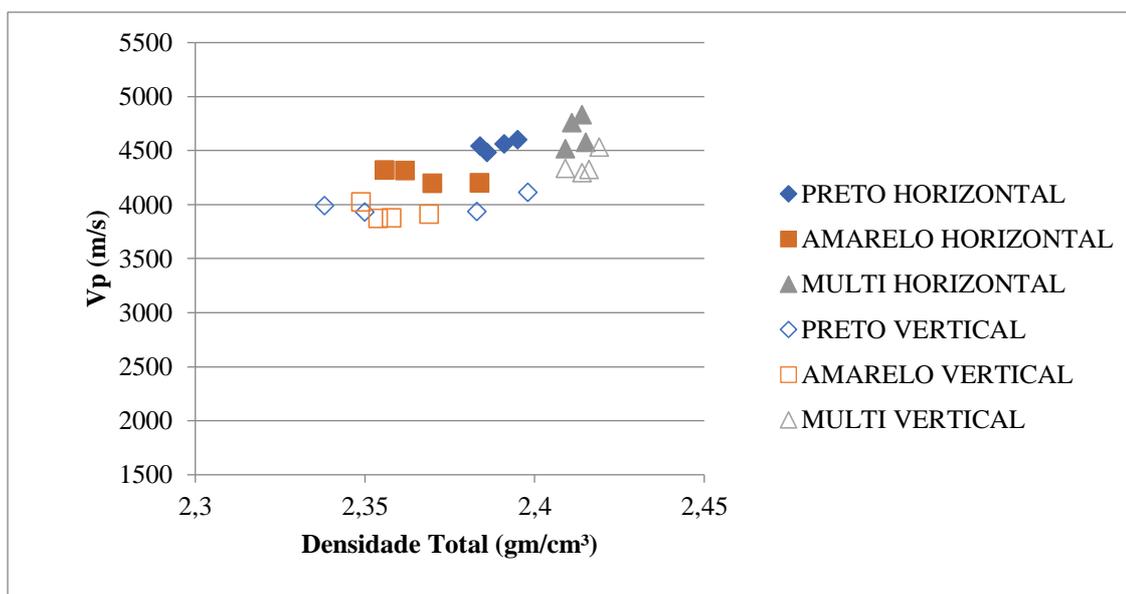
Gráfico 164 – Relação entre a densidade total (gm/cm^3) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 40 MPa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os gráficos 17, 18 e 19 apresentam a relação entre velocidade de onda S1 e a densidade total, onde a velocidade das ondas é diretamente proporcional ao aumento da densidade total, como esperado a partir deste gráfico pode-se observar que a amostra Multicor apresenta comportamento diferente em relação ao preto e amarelo, possuindo velocidades de onda não constantes do que a outra amostra ensaiada.

É possível ainda observar que a influência da densidade sobre a velocidade S1 dentro da mesma amostra, quando comparadas as amostras verticais e horizontais podemos observar que nas amostras verticais a V_{s1} e V_{p1} é menor que nas amostras horizontais possivelmente em virtude de diferenças composicionais durante o processo de sedimentação e diagênese.

Gráfico 197 – Relação entre a densidade total (gm/cm^3) e a VP.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O coeficiente de Poisson segundo Vallejo et al.(2002), varia entre 0,1- 0,4. Segundo a norma EN 14580 (IPQ, 2007), o ensaio consiste na medição das deformações longitudinais de um corpo de prova submetido a tensões compressivas uniaxiais na sua base e topo. A Tabela 9 apresenta a classificação dos valores do coeficiente de Poisson proposto por Gercek (2007).

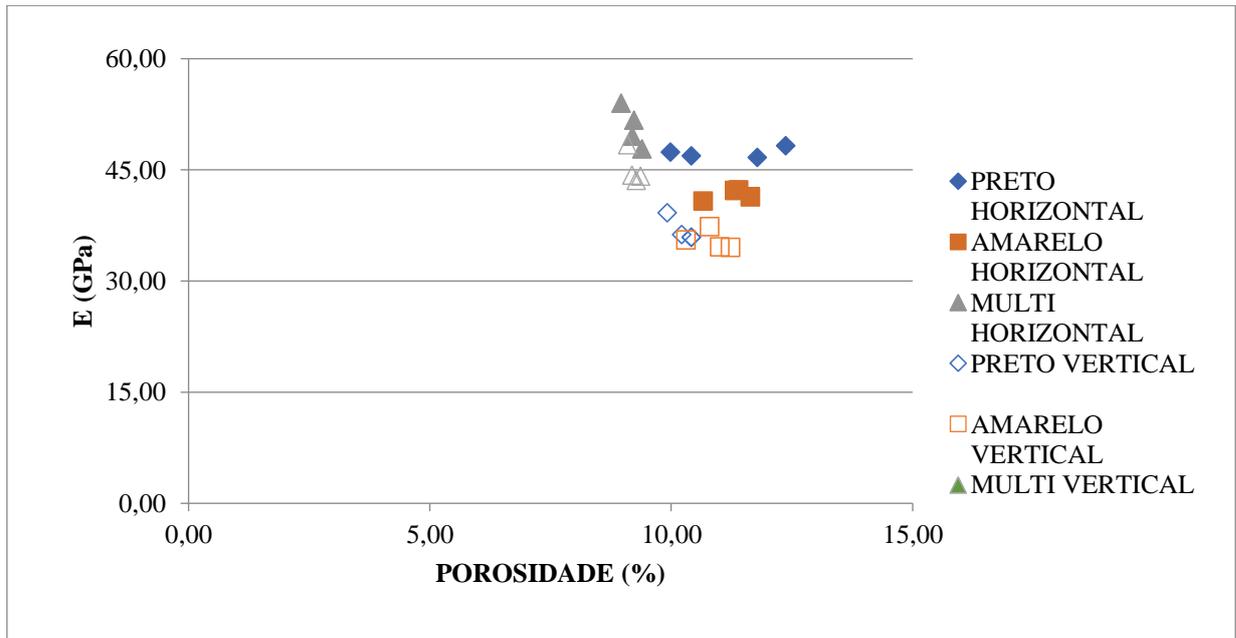
Tabela 9 – Classificação do coeficiente de Poisson por Gercek (2007).

Categoria	Coef. Poisson
Muito Baixo	$0 \leq \nu < 0,1$
Baixo	$0,1 \leq \nu < 0,2$
Médio	$0,2 \leq \nu < 0,3$
Elevado	$0,3 \leq \nu < 0,4$
Muito Elevado	$0,4 \leq \nu < 0,5$

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico 20 apresenta o comportamento da razão de Poisson em função da porosidade, apresenta uma diminuição diminui com o aumento do grau de saturação e apresenta-se mais elevado com o aumento da dimensão granulométrica dos arenitos. Observa-se uma suave tendência de redução do valor de ν (Razão de Poisson) com o aumento de porosidade. O Coeficiente de Poisson dos arenitos de granulometria muito fina classifica-se como sendo fino e para a granulometria fina como muito baixo, de acordo por Gercek (2007) e como se pode verificar na Tabela 9.

Gráfico 219 – Relação entre módulos elásticos e a porosidade para pressão confinante efetiva de 40 MPa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

8 RESISTÊNCIA AO ATAQUE QUÍMICO

8.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização do ensaio de resistência ao ataque químico nas rochas areníticas pesquisadas, objetivando realizar dois procedimentos: primeiro, determinou que em vez de perda da intensidade do brilho (ou lustro do polimento) dos materiais pétreos estudados após o ataque com substâncias químicas em diferentes concentrações e por períodos de tempo pré-determinados, teve foi ganho de intensidade de brilho; e, segundo, avaliar as alterações colorimétricas sofridas devido à ação destes mesmos agentes químicos nas rochas investigadas. Os ensaios de alterabilidade química objetivaram a avaliação da resistência da superfície das placas de arenitos ao ataque químico sob efeito de reagentes agressivos e foram realizados no Laboratório do Núcleo de Tecnologia do Ceará (NUTEC).

Meyer et al. (2003) explicam que a ação de agentes agressivos sobre os materiais rochosos usados como revestimento, é muitas vezes, resultado da incidência de chuvas ácidas, especialmente em áreas urbanas e industrializadas, às quais são cada vez mais afetadas por diversas fontes de poluição ambiental, mas também, é resultado da utilização de produtos químicos domésticos (produtos de limpeza, químicos para tratamento de águas de piscina, manuseio de frutas cítricas, vinagres, refrigerantes gasosos, isotônicos, ácido muriático, etc.).

8.2 Determinação da Perda de Intensidade do Brilho

O brilho é uma das características físicas que imprimem qualidade à rocha ornamental e sua redução ou ausência, em função de sua utilização, é um reflexo e/ou indicativo de patologia. A redução do brilho durante a vida útil da rocha ornamental pode ser provocada por processos físicos ou químicos (Torquato, 2004).

Entre as causas físicas mais comuns está o desgaste mecânico provocado em pisos polidos por tráfego intenso de pedestres ou o desgaste abrasivo de partículas transportadas por ação eólica que se chocam com os revestimentos de paredes. Dentre as causas químicas, destaca-se a degradação das rochas pelo uso indevido de produtos de limpeza ou pela ação de poluentes e atmosferas agressivas, que se depositam nas superfícies rochosas provocando inchamento, escamação e deslocamento de minerais.

Como este ensaio não é destrutivo, os corpos-de-prova utilizados para a

determinação da intensidade do brilho ao natural (antes do ataque químico) são expostos aos reagentes químicos e reutilizados para as medidas de brilho pós-ataque para verificação e comparação da perda, em termos percentuais.

Nas Tabelas 10, 11 e 12 encontram-se os resultados da determinação da intensidade do brilho para as rochas areníticas estudadas, antes e depois da realização do ensaio de resistência ao ataque químico, bem como, os valores percentuais das perdas de brilho.

Tabela 102 – Resultados para o ensaio de Resistência ao Ataque Químico para a Determinação da Perda da Intensidade do Brilho nos arenitos amarelos estudados.

		AMARELO												
		Medida de Brilho												
Amostra		Brilho (%)										Média	Δbrilho (%)	
Reagentes	C ₆ H ₈ O ₇	Antes	3,7	2,9	4,7	2,9	4,3	4,4	3,3	3,1	2,7	3,4	3,54	-0,14
		Depois	4,9	3,6	2,8	3,4	2,8	4,3	4,3	3,6	2,9	4,2	3,68	
	NH ₄ Cl	Antes	31,4	17,5	15,2	11,1	22	27,8	22,9	31,2	34,8	31,3	24,52	-0,12
		Depois	29,2	33,1	17	13,3	28,4	31,7	14,7	23,8	29,6	25,6	24,64	
	NaClO	Antes	9,4	5,5	5,5	5,8	5,4	6,1	6,3	5,2	8,5	8,5	6,62	-0,06
		Depois	6,4	7,6	6,1	5,5	5,3	9,1	6,7	8,9	5,7	5,5	6,68	
	KOH	Antes	6,6	6,9	6,2	5,3	8,5	8,6	6,2	7,3	7,2	6,6	6,94	-0,05
		Depois	7,1	6,9	6,2	5,3	8,5	8,6	6,2	7,3	7,2	6,6	6,99	
	HCl	Antes	20	25,2	18,9	24,8	24,2	25,8	21	16,1	25,9	17,4	21,93	-1,22
		Depois	22,1	23,7	26,5	26,3	23,9	21,8	18,5	20,2	24,4	24,1	23,15	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 113 – Resultados para o ensaio de Resistência ao Ataque Químico para a Determinação da Perda da Intensidade do Brilho nos arenitos pretos estudados.

		PRETO												
		Medida de Brilho												
Amostra		Brilho (%)										Média	Δbrilho (%)	
Reagentes	C ₆ H ₈ O ₇	Antes	30	29	23	26	25,1	27,8	28,3	28,8	28,6	29,7	27,63	1,86
		Depois	26	24,7	25,9	24,5	26,2	25,3	27	25,8	25,3	27	25,77	
	NH ₄ Cl	Antes	23,4	23	26,2	25,3	28,4	27,6	31,4	29,4	15,5	30,9	26,11	-1,2
		Depois	31,7	23,5	24,2	25,4	27,2	32,3	28,4	29,9	20,1	30,4	27,31	
	NaClO	Antes	25,3	27,2	25,2	26,05	24,3	27,2	26,3	25,5	28,1	27	26,21	-0,465
		Depois	25,9	25,8	26,9	25,3	27,6	26,5	27	28,3	26,3	27,2	26,68	
	KOH	Antes	35,1	31,5	41,1	41,3	34,6	38,9	30,6	37,4	37,9	35,3	36,37	3,52
		Depois	34,3	36,5	24,1	31,3	31,3	31,3	34,9	36,2	34,1	34,5	32,85	
	HCl	Antes	19	19,1	20,1	20,6	21,5	24,4	19,4	21,3	18,4	17,2	20,1	-0,81
		Depois	20,1	20,4	20,4	21,7	22,5	22,3	22,4	18,1	21,3	19,9	20,91	

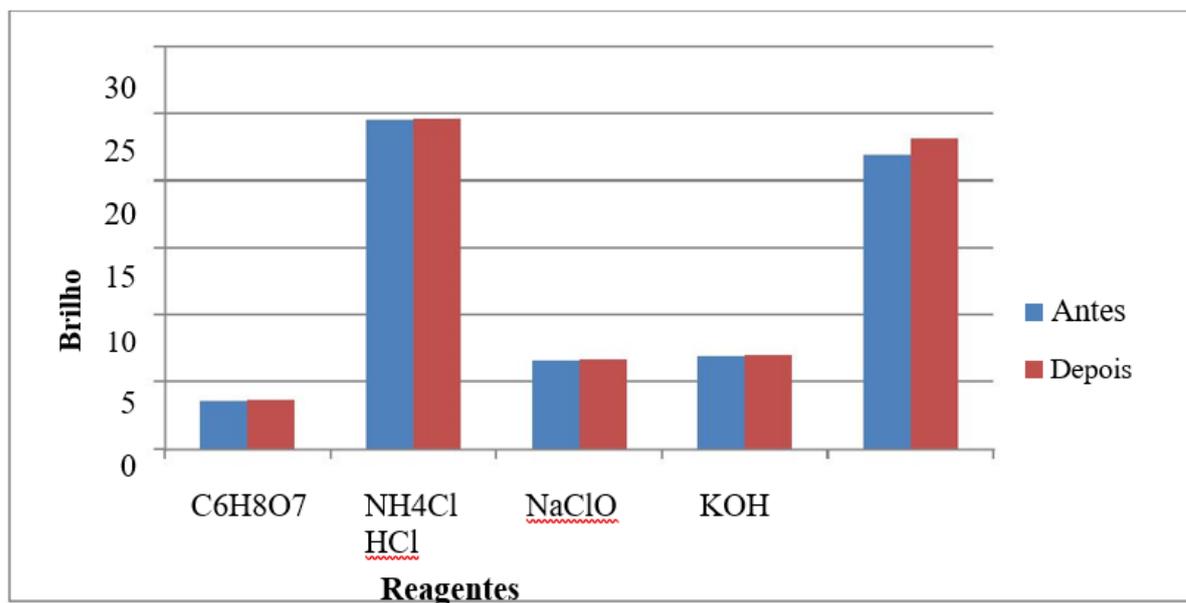
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 124 – Resultados para o ensaio de Resistência ao Ataque Químico para a Determinação da Perda da Intensidade do Brilho nos arenitos Mult estudados.

Amostra		MULTICOR												Média	Δbrilho (%)
		Medida de Brilho													
		Brilho (%)													
Reagentes	C ₆ H ₈ O ₇	Antes	27,8	27,8	21,7	26	24,1	25,8	27,3	27,9	26,7	28,7	26,38	0,01	
		Depois	27	25,7	26,9	25,5	27,2	26,3	28	26,8	24,3	26	26,37		
	NH ₄ Cl	Antes	22,4	22	25,2	24,3	27,4	26,6	30,4	28,4	14,5	29,9	25,11	-1,22	
		Depois	30,7	22,5	23,2	24,4	26,2	31,3	27,6	28,9	19,1	29,4	26,33		
	NaClO	Antes	24,3	26,2	24,2	25,5	23,3	26,2	25,3	24,4	27,1	26	25,25	-0,43	
		Depois	24,9	24,8	25,9	24,3	26,6	25,5	26	27,3	25,3	26,2	25,68		
	KOH	Antes	34,1	30,5	40,1	40,3	33,6	37,9	29,6	36,4	36,9	34,3	35,37	3,5	
		Depois	33,3	35,5	23,1	30,2	30,4	30,3	33,9	35,2	33,4	33,4	31,87		
	HCl	Antes	17,7	19,1	19,1	19,6	20,5	23,3	19,4	20,3	17,4	16,2	19,26	-0,74	
		Depois	19,1	20,4	19,4	20,7	21,5	21,3	21,4	17,1	20,3	18,8	20		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 22 – Resultado da Perda da Intensidade do Brilho antes e depois do ataque químico para os arenitos amarelos pesquisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

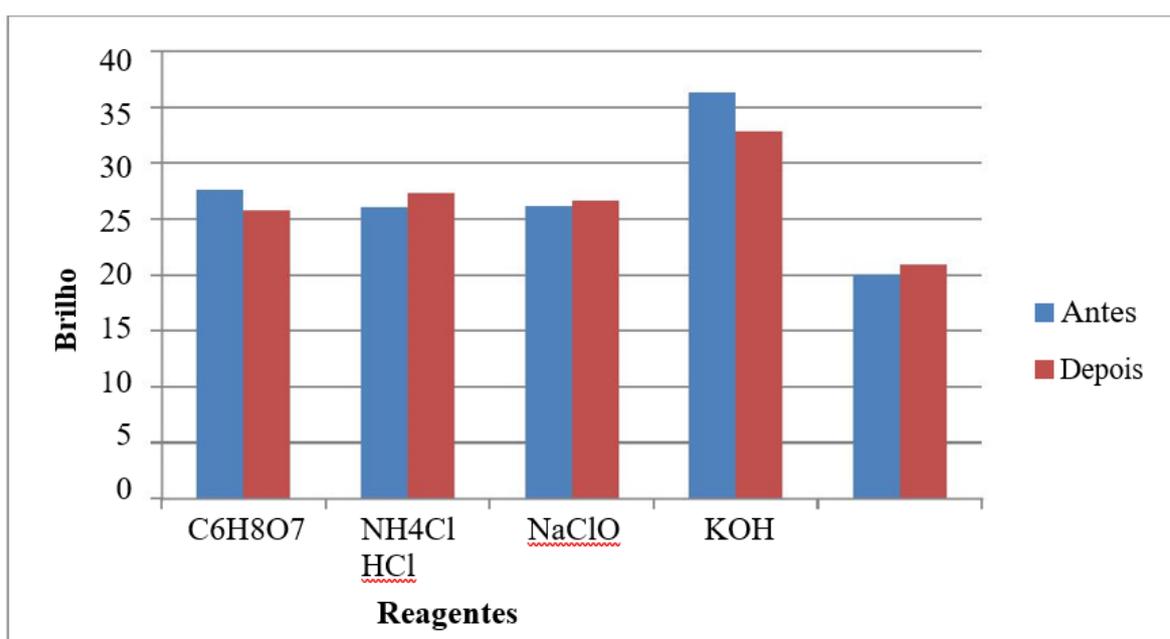
Averiguando o Gráfico 22, elaborado a partir dos dados obtidos das Tabelas 12, podemos observar, de forma geral, que todas as substâncias utilizadas no ensaio de resistência ao ataque químico, afetaram em pequenas proporções a intensidade inicial do brilho das rochas areníticas investigadas.

As soluções químicas que apresentaram um resultado esperado diferente, pois em vez de perder o brilho a amostra ganhou brilho, como podemos ver o ganho de brilho com o

reagente HCl que teve um certo aumento de brilho, já as outras soluções não sofreram mudança segundo o gráfico.

No Gráfico 23 mostra que o reagente o hidróxido de potássico teve maior agressividade no arenito preto com uma perda de brilho com 3,52% e também o ácido cítrico com uma perda de 1,82%, já os outros reagentes teve foi um pequeno ganho de brilho, pode ter acontecido uma retida da matéria orgânica dos grãos.

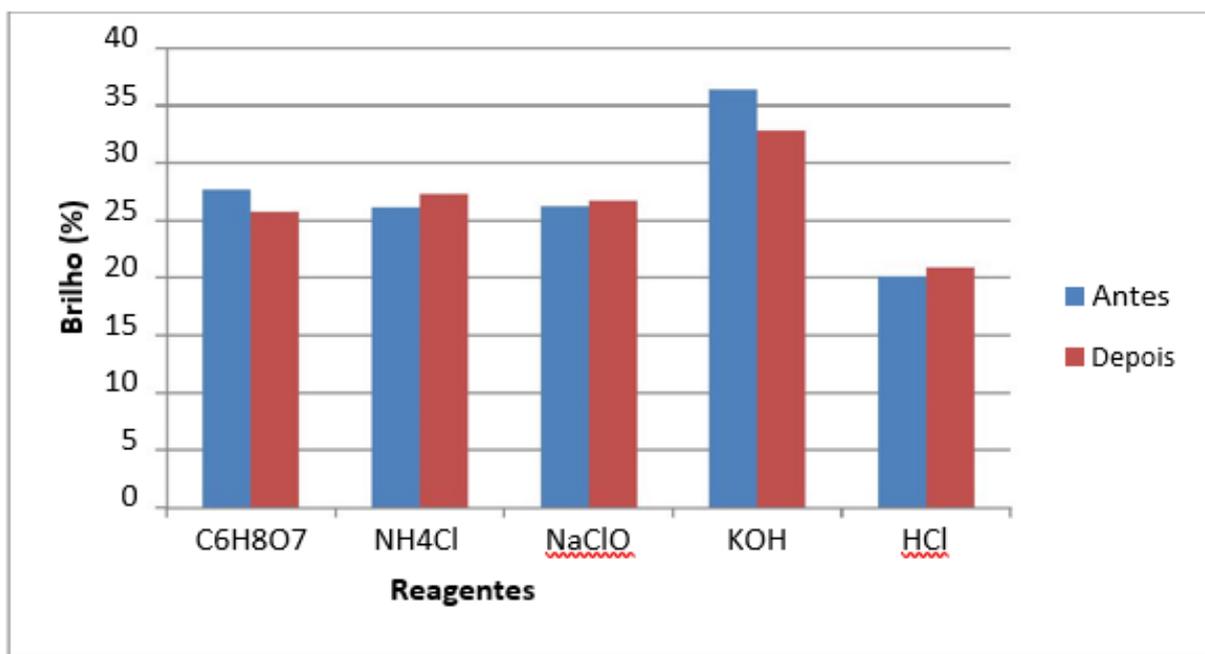
Gráfico 2310 – Resultado da Perda da Intensidade do Brilho antes e depois do ataque químico para os arenitos pretos pesquisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Examinando o Gráfico 24, juntamente com os dados obtidos na Tabela 7.3, podemos observar, de forma geral, as substâncias utilizadas no ensaio de resistência ao ataque químico, afetaram em diferentes proporções a intensidade inicial do brilho das rochas areníticas investigadas, o reagente o hidróxido de potássico teve maior agressividade no arenito preto com uma perda de brilho com 3,5% e também o ácido cítrico com uma perda de 0,01%, já os outros reagentes teve foi um pequeno ganho de brilho, pode ter acontecido uma retida da matéria orgânica dos grãos.

Gráfico 24 – Resultado da Perda da Intensidade do Brilho antes e depois do ataque químico para os arenitos pretos pesquisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

8.3 Colorimetria

Para avaliar o efeito que os reagentes químicos provocaram na variação cromática das amostras, foram considerados como valores padrões iniciais de L^* , a^* e b^* aqueles obtidos nas amostras antes do ataque químico e os valores finais dos parâmetros L^* , a^* e b^* aqueles obtidos após o ataque químico. Este sistema de cor é baseado em três dimensões: o tom que corresponde à tonalidade da cor (vermelha, azul e verde) e relaciona-se com a longitude da onda de luz; o croma, pureza ou saturação, que corresponde ao grau de intensidade da cor e a claridade ou luminosidade, que corresponde à cor e relaciona-se com a intensidade luminosa e a refletância da luz (ESBERT et al. 1997, IÑIGO et al. 1997).

8.3.1 Análise Colorimétrica – Arenito Amarelo

Os resultados dos ensaios colorimétricos realizados para o arenito amarelo estão expressos na Tabela 13.

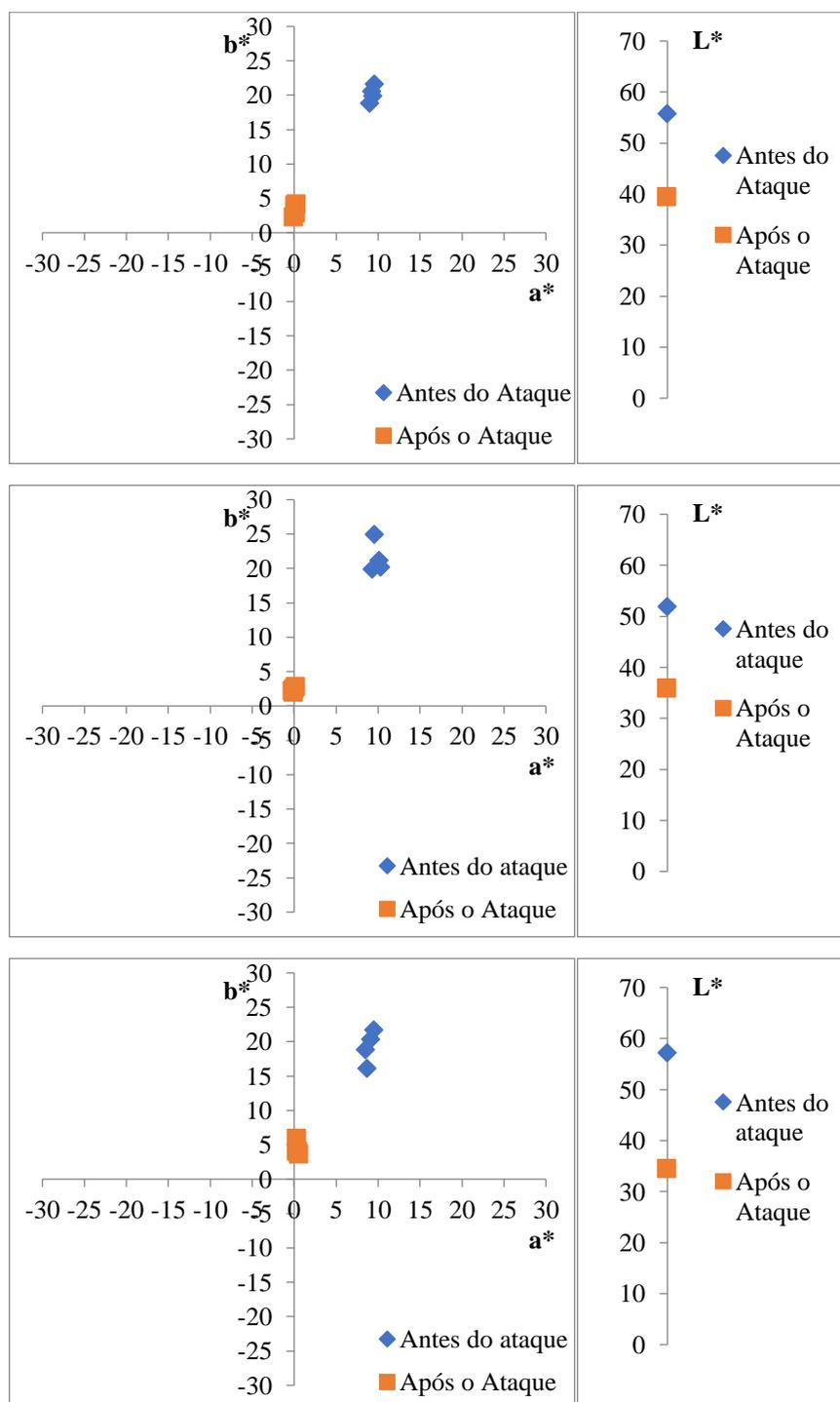
Tabela 5 – Dados colorimétricos no Sistema CIELAB para as amostras do arenito Amarelo.

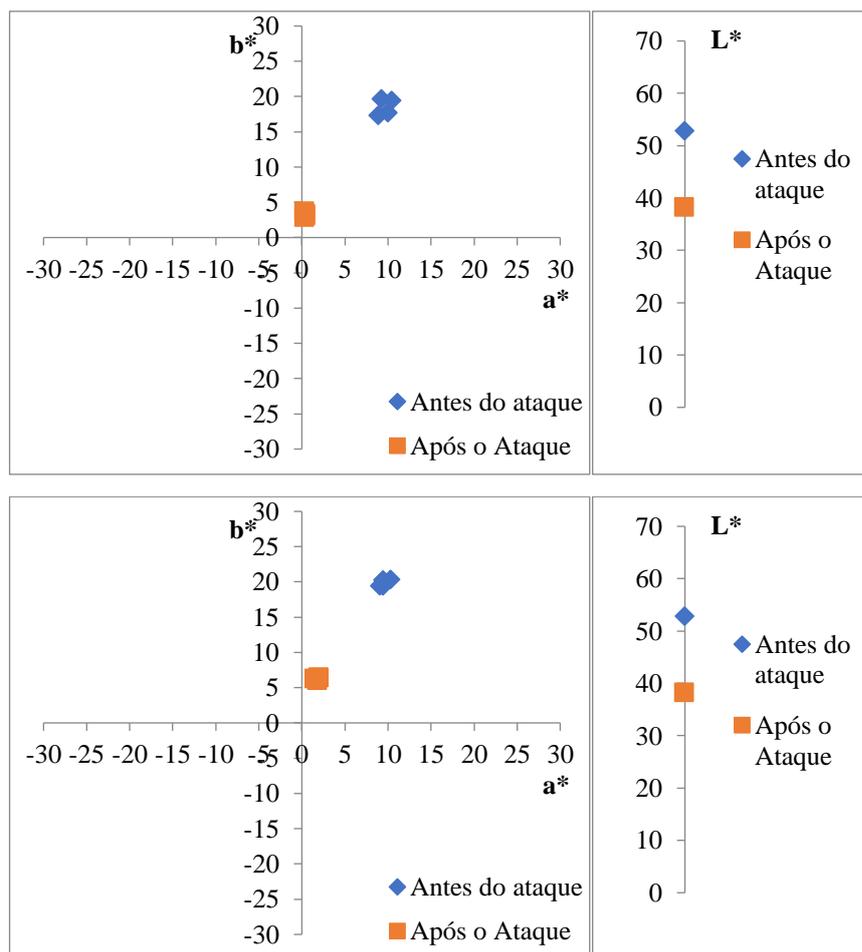
Amostra 1 (Ácido Cítrico)											
	Antes do Ataque				Após o Ataque						
	L*	a*	b*		L*	a*	b*	ΔL	Δa	Δb	ΔE
A01.1	55,78	9,38	19,93	POS-A1.1	39,44	0,25	4,15	-16,34	-9,13	-15,78	24,48
A01.2	58,02	9,57	21,63	POS-A1.2	40,78	0,11	3,89	-17,24	-9,46	-17,74	26,48
A01.3	57,60	9,23	20,60	POS-A1.3	36,07	0,17	2,84	-21,53	-9,06	-17,76	29,34
A01.4	58,26	8,96	18,84	POS-A1.4	34,12	-0,08	2,25	-24,14	-9,04	-16,59	30,65
Amostra 2 (Cloreto de Amônia)											
	Antes do ataque				Após o Ataque						
	L*	a*	b*		L*	a*	b*	ΔL	Δa	Δb	ΔE
A02.1	51,9	10,13	21,21	POS-A2.1	35,9	0,04	2,49	-16,00	-10,09	-18,72	26,61
A02.2	55,97	9,3	19,93	POS-A2.2	34,01	-0,05	1,93	-21,96	-9,35	-18,00	29,89
A02.3	51,55	10,31	20,25	POS-A2.3	35,07	-0,19	2,17	-16,48	-10,50	-18,08	26,62
A02.4	56,69	9,53	24,98	POS-A2.4	36,74	0,22	2,75	-19,95	-9,31	-22,23	31,29
Amostra 3 (Hipoclorito de Sódio)											
	Antes do ataque				Após o Ataque						
	L*	a*	b*		L*	a*	b*	ΔL	Δa	Δb	ΔE
A03.1	57,23	9,08	20,39	POS-A3.1	34,44	0,48	3,97	-22,79	-8,60	-16,42	29,38
A03.2	56,28	8,69	16,14	POS-A3.2	32,84	0,32	4,04	-23,44	-8,37	-12,10	27,67
A03.3	58,66	9,46	21,71	POS-A3.3	36,54	0,32	5,84	-22,12	-9,14	-15,87	28,72
A03.4	57,8	8,46	18,86	POS-A3.4	34,12	0,56	3,58	-23,68	-7,90	-15,28	29,27
Amostra 4 (Hidróxido de Potássio)											
	Antes do ataque				Após o Ataque						
	L*	a*	b*		L*	a*	b*	ΔL	Δa	Δb	ΔE
A04.1	52,87	10,38	19,44	POS-A4.1	38,22	0,48	3,1	-14,65	-9,90	-16,34	24,08
A04.2	55,3	8,83	17,35	POS-A4.2	39,13	0,42	3,31	-16,17	-8,41	-14,04	23,01
A04.3	57,61	9,21	19,68	POS-A4.3	38,63	0,35	3,66	-18,98	-8,86	-16,02	26,37
A04.4	51,64	9,98	17,72	POS-A4.4	35,76	0,31	2,84	-15,88	-9,67	-14,88	23,81
Amostra 5 (Ácido Clorídrico)											
	Antes do ataque				Após o Ataque						
	L*	a*	b*		L*	a*	b*	ΔL	Δa	Δb	ΔE
A05.1	50,55	10,27	20,37	POS-A5.1	35,48	1,95	6,41	-15,07	-8,32	-13,96	22,16
A05.2	55,3	9,44	20,26	POS-A5.2	34,4	1,53	6,26	-20,90	-7,91	-14,00	26,37
A05.3	55,84	9,06	19,49	POS-A5.3	35,95	1,79	6,05	-19,89	-7,27	-13,44	25,08
A05.4	52,41	9,43	19,44	POS-A5.4	34,97	2,02	6,42	-17,44	-7,41	-13,02	22,99

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o arenito amarelo, os valores obtidos para os parâmetros ΔL^* indicam que houve uma forte tendência para o escurecimento da amostra, com consideráveis contribuições dos reagentes químicos, o hidróxido de potássio com índice de -14,65 obteve a menor intensidade de escurecimento em partida, a interação do hipoclorito de sódio com índice -22,79 provocou um alto escurecimento.

Gráfico 25 – Resultado das variações dos parâmetros cromáticos L^* , a^* , b^* , antes e após o ataque químico para o arenito amarelo.





Fonte: Elaborado pelo autor.

8.3.2 Análise Colorimétrica – Arenito Preto

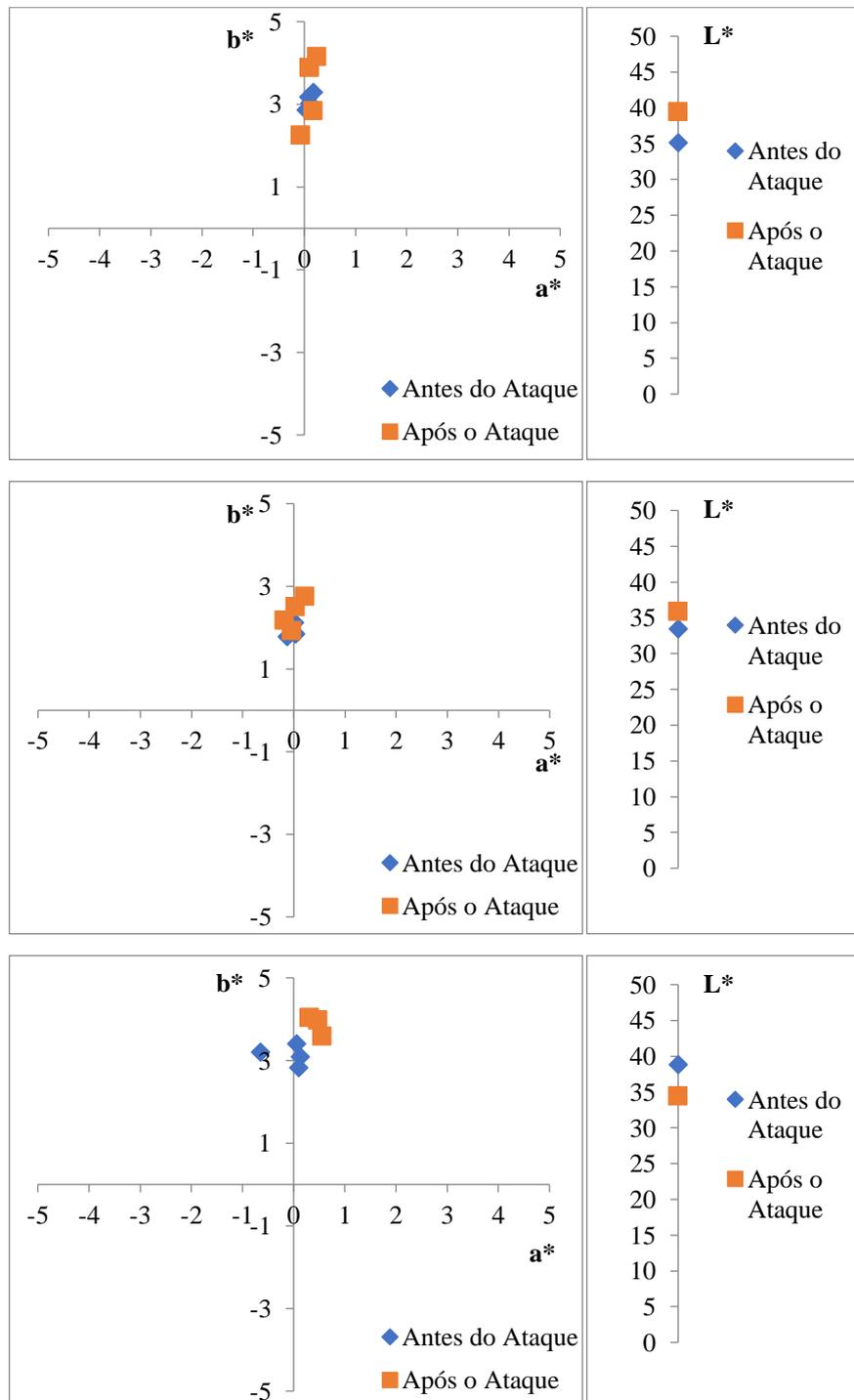
Os resultados dos ensaios colorimétricos realizados para o arenito preto estão expressos na Tabela 14 e no gráfico 26. Para o Arenito Preto, os valores obtidos para os parâmetros ΔL^* indicam que houve uma tendência ao embranquecimento da amostra analisada. Este fenômeno pode estar associado a interação dos reagentes com a matéria orgânica contida na amostra.

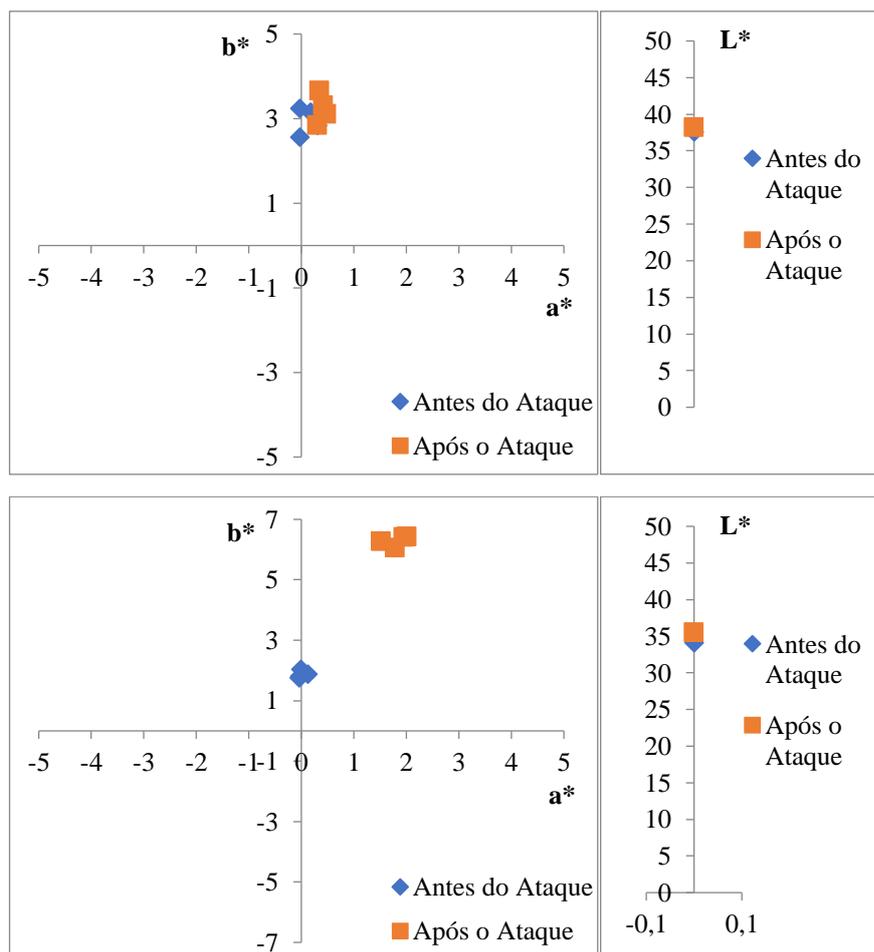
Tabela 146 – Dados colorimétricos no Sistema CIELAB para as amostras do arenito preto.

Amostra 1 (Cloreto de Amônia)											
	Antes do Ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
AP 1.1	35,14	0,04	2,87	PósP 1.1	39,45	0,25	4,15	-4,31	0,21	1,28	4,50
AP 1.2	36,43	0,18	3,3	PósP 1.2	40,77	0,11	3,88	-4,34	-0,07	0,58	4,38
AP 1.3	36,64	0,09	3,18	PósP 1.3	36,07	0,18	2,84	0,57	0,09	-0,34	0,67
AP 1.4	35,48	0,11	3,03	PósP 1.4	34,12	-0,07	2,25	1,36	-0,18	-0,78	1,58
Amostra 2 (Hipoclorito de Sódio)											
	Antes do Ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
AP 2.1	33,44	-0,13	1,79	PósP 2.1	35,90	0,04	2,50	-2,46	0,17	0,71	2,57
AP 2.2	33,72	0,02	1,87	PósP 2.2	34,02	-0,04	1,92	-0,30	-0,06	0,05	0,31
AP 2.3	34,01	0,04	1,85	PósP 2.3	35,08	-0,18	2,17	-1,07	-0,22	0,32	1,14
AP 2.4	35,26	0,02	2,13	PósP 2.4	36,74	0,22	2,75	-1,48	0,20	0,62	1,62
Amostra 3 (Ácido Cítrico)											
	Antes do Ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
AP 3.1	38,84	0,06	3,41	PósP 3.1	34,45	0,48	3,97	4,39	0,42	0,56	4,45
AP 3.2	38,72	0,13	3,09	PósP 3.2	32,84	0,32	4,04	5,88	0,19	0,95	5,96
AP 3.3	37	-0,65	3,21	PósP 3.3	36,53	0,32	5,84	0,47	0,97	2,63	2,84
AP 3.4	37,61	0,1	2,83	PósP 3.4	34,12	0,56	3,58	3,49	0,46	0,75	3,60
Amostra 4 (Hidróxido de Potássio)											
	Antes do Ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
AP 4.1	37,58	-0,03	2,57	PósP 4.1	38,21	0,48	3,10	-0,63	0,51	0,53	0,97
AP 4.2	39,91	-0,03	3,24	PósP 4.2	39,13	0,42	3,31	0,78	0,45	0,07	0,90
AP 4.3	40,77	0,18	3,16	PósP 4.3	38,63	0,35	3,66	2,14	0,17	0,50	2,20
AP 4.4	35,76	0,31	2,84	PósP 4.4	35,76	0,31	2,84	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra 5 (Ácido Clorídrico)											
	Antes do Ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
AP 5.1	34,09	-0,04	1,76	PósP 5.1	35,47	1,95	6,41	-1,38	1,99	4,65	5,24
AP 5.2	33,79	-0,01	2,04	PósP 5.2	34,40	1,53	6,26	-0,61	1,54	4,22	4,53
AP 5.3	32,75	-0,03	1,82	PósP 5.3	35,96	1,79	6,05	-3,21	1,82	4,23	5,61
AP 5.4	35,15	0,13	1,88	PósP 5.4	34,96	2,02	6,42	0,19	1,89	4,54	4,92

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 26 – Resultado das variações dos parâmetros cromáticos L^* , a^* e b^* , antes e após o ataque químico para o arenito preto.





Fonte: Elaborado pelo autor.

8.3.3 Análise Colorimétrica – Arenito Mult

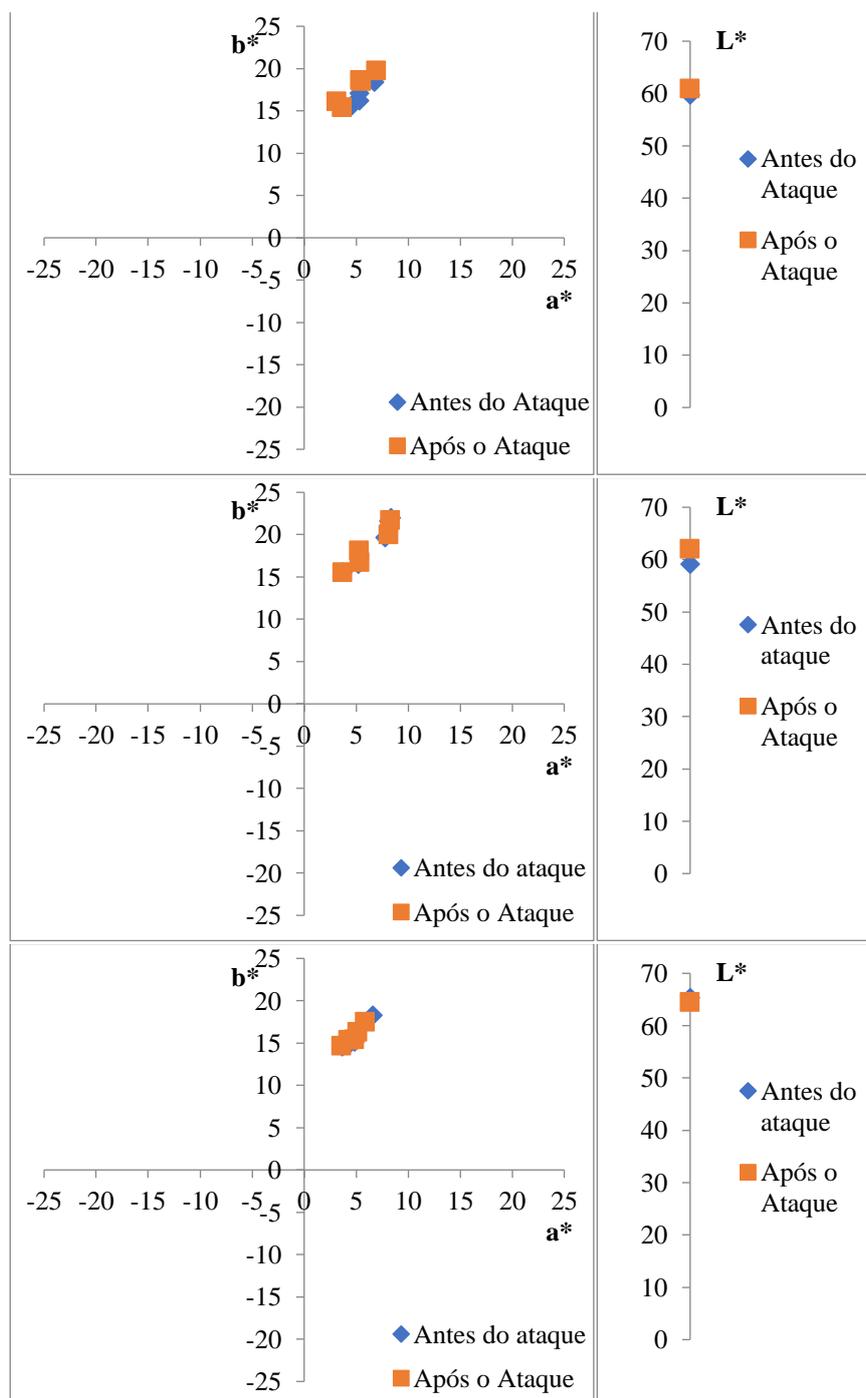
Os dados da Tabela 15 e o gráfico 27 mostram os resultados dos ensaios colorimétricos realizados para o arenito Mult. Observa-se uma pequena variação nos parâmetros a^* e b^* , porém com uma tendência ao aumento de intensidade da cor. O parâmetro L também possui uma variação mínima, embranquecendo ou escurecendo dependendo do reagente usado.

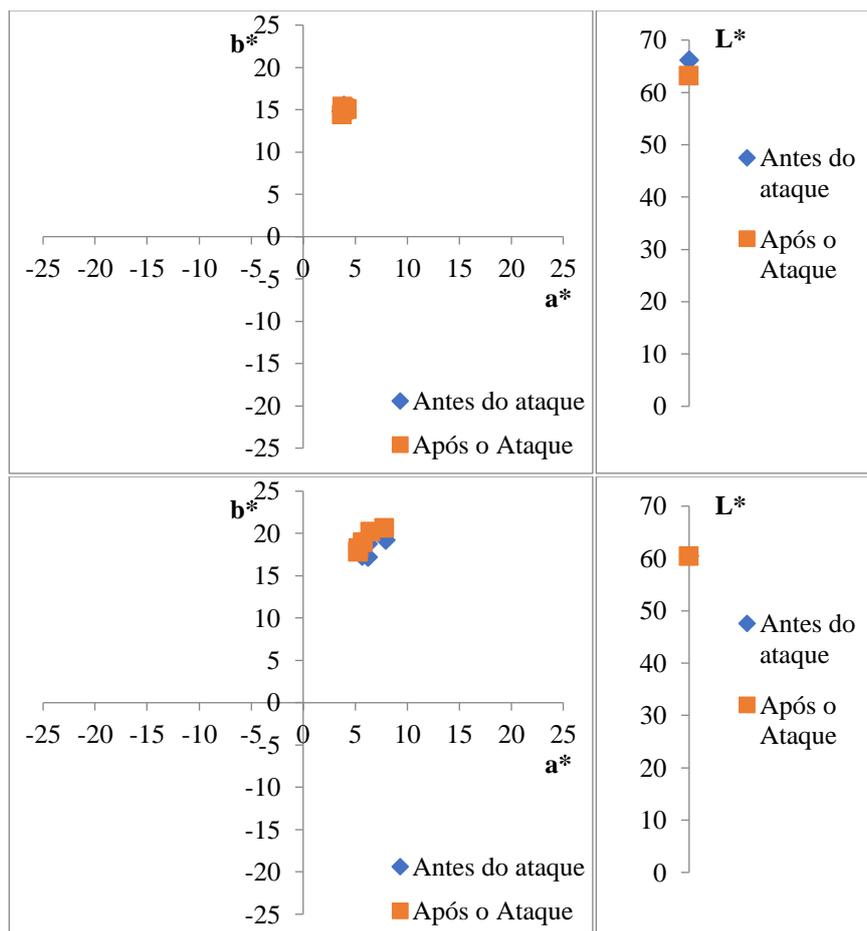
Tabela 15 – Dados colorimétricos no Sistema CIELAB para as amostras do arenito Mult.

Amostra 2 (Cloreto de Amônia)											
	Antes do ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
M02-1	59,18	8,37	22,01	POS-M2-1	61,98	5,31	18,14	-2,80	-3,06	-3,87	5,67
M02-2	55,77	7,78	19,67	POS-M2-2	65,36	3,71	15,54	-9,59	-4,07	-4,13	11,21
M02-3	59,5	8,14	21,64	POS-M2-3	61,96	5,35	16,73	-2,46	-2,79	-4,91	6,16
M02-4	65,43	3,73	15,57	POS-M2-4	54,79	8,15	20	10,64	4,42	4,43	12,34
M02-5	62,47	5,21	16,51	POS-M2-5	58,24	8,32	21,67	4,23	3,11	5,16	7,36
Amostra 3 (Hipoclorito de Sódio)											
	Antes do ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
M03-1	65,32	3,68	14,55	POS-M3-1	64,46	3,63	14,62	0,86	-0,05	0,07	0,86
M03-2	64,29	5	16,11	POS-M3-2	61,46	5,85	17,47	2,83	0,85	1,36	3,25
M03-3	62,84	4,32	14,9	POS-M3-3	62,59	4,82	15,39	0,25	0,50	0,49	0,74
M03-4	61,19	6,58	18,29	POS-M3-4	63,01	5,15	16,28	-1,82	-1,43	-2,01	3,07
M03-5	62,61	4,84	15,11	POS-M3-5	63,8	4,3	15,33	-1,19	-0,54	0,22	1,33
Amostra 4 (Hidróxido de Potássio)											
	Antes do ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
M04-1	66,09	3,89	15,46	POS-M4-1	63,05	4,02	15,08	3,04	0,13	-0,38	3,07
M04-2	66,7	3,68	14,8	POS-M4-2	63,58	3,95	14,89	3,12	0,27	0,09	3,13
M04-3	65,3	3,74	14,59	POS-M4-3	62,78	4,22	14,99	2,52	0,48	0,40	2,60
M04-4	65,23	3,86	15,3	POS-M4-4	64,85	3,81	15,31	0,38	-0,05	0,01	0,38
M04-5	64,72	4,1	14,74	POS-M4-5	63,74	3,78	14,34	0,98	-0,32	-0,40	1,11
Amostra 5 (Ácido Clorídrico)											
	Antes do ataque				Após o Ataque			ΔL	Δa	Δb	ΔE
	L*	a*	b*		L*	a*	b*				
M05-1	60,51	6,25	18,8	POS-M5-1	60,4	6,49	20,2	0,11	0,24	1,40	1,42
M05-2	59,09	6,24	17,26	POS-M5-2	62,13	5,77	18,96	-3,04	-0,47	1,70	3,51
M05-3	61,58	5,67	17,34	POS-M5-3	57,15	7,85	20,65	4,43	2,18	3,31	5,94
M05-4	61,79	5,61	17,62	POS-M5-4	60,63	5,31	17,79	1,16	-0,30	0,17	1,21
M05-5	55,31	7,95	19,24	POS-M5-5	62,25	5,37	18,26	-6,94	-2,58	-0,98	7,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2711 – Resultado das variações dos parâmetros cromáticos L^* , a^* , b^* , antes e após o ataque químico para o arenito Mult.





Fonte: Elaborado pelo autor.

8.3.4 Análise da Variação Total da Cor

Segundo explicam Boutin & Leroux (2000) somente as variações de cor total ΔE^* , superiores a 3, são detectadas pela visão humana.

Nas três rochas areníticas estudadas, os valores obtidos para a variação total da cor são, em sua maioria, perceptíveis à vista desarmada visto que os resultados encontrados para o parâmetro ΔE^* algumas são superiores a 3 e outras não.

Analisando-se as alterações cromáticas ocorridas no parâmetro ΔE^* - Variação Total de Cor, observadas nas rochas pesquisadas constatamos que as interações ocorridas entre os reagentes químicos utilizados no ensaio e as características petrográficas, especialmente, a composição mineralógica, são elementos condicionantes que explicam as alterações colorimétricas detectadas nos materiais pétreos investigados.

As alterações cromáticas são causadas devido a interação entre os reagentes químicos e os minerais presentes nas rochas. Os minerais são atacados primeiramente em suas zonas de fraqueza, tais como: planos de clivagem, poros, fraturas, microfissuras outras aberturas

acessíveis às soluções, sendo por meio destas que se processam as reações que levam à degradação mineral e à dissolução de seus elementos constituintes.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1 Conclusões

01. As rochas analisadas possuem composição mineralógica bastante semelhante, sendo formados essencialmente por quartzo variando de 40% a 50%, feldspato variando de 45% a 50% e muscovita variando de 5% a 10%.

02. Petrograficamente, as rochas estudadas classificam-se como arenitos e possuem como características principais: estrutura isotrópica; granulação mineral variando entre silte grosso a areia fina; alteração mineral, contatos minerais predominantes dos tipos côncavo-convexo e planos.

03. Esses arenitos são de coloração predominantemente amarelada, amarelo a bege e preto. Macroscopicamente, apresentam três variedades (Amarelo, Multicor e Preto) que possuem características petrográficas semelhantes. São rochas, que apresentam uma estratificação horizontal bem marcada. E está ocorre verticalmente e lateralmente através de contato gradacional, inviabilizando uma padronização na obtenção de um único tipo. São observadas, no arenito, presença de fratura com preenchimento de ‘ferro’ cortando as camadas, não ocorrendo entre as camadas. Também foram observados nódulos de oxido de ferro com pirita no arenito Preto.

04. Atribuem à formação cabeças um ambiente marinho raso e estuário nessa região de Castelo do Piauí, como está acamadados os sedimentos e pelos sedimentos finos encontrados na região que pode ter indicio desses ambientes.

05. Os resultados obtidos nos ensaios de Índices Físicos demostram que todas as rochas estudadas apresentam valores de densidade aparente, superiores à média das rochas areníticas requeridas pela norma ASTM 616(1999) $\geq 2,000 \text{ g/cm}^3$ e fora dos padrões da NBR 15.844 (ABNT, 2015), ou seja, $\geq 2,550 \text{ g/cm}^3$. Com porosidade aparente de 7,10% e absorção de água de 3,05% o arenito Amarelo não atende aos limites normativos sugeridos, para as normas brasileira, já para normas ASTM atende os limites normativos. Com porosidade aparente de 8,17% e absorção de água de 3,47% o arenito Preto não atende aos limites normativos sugeridos, para as normas brasileira, já para normas ASTM atende os limites normativos. Com porosidade aparente de 8,52% e absorção de água de 3,64% o arenito Mult não atende aos limites normativos sugeridos, para as normas brasileira, já para normas ASTM atende os limites normativos. Estes resultados estão diretamente relacionados às características petrográficas e mineralógicas da rocha, tais como: textura, estrutura, tipos de contatos minerais, nível de alteração mineral, além de outros fatores intrínsecos de cada tipo arenito pesquisado.

06. Os resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial demonstram com os comparativos com a norma brasileira só um atendem aos limites normativos o arenito Preto (108,67 Mpa), já com a normas internacionais todos os arenitos atendem a ASTM 616(1999), ou seja, $\geq 28,0$ MPa.

07. De acordo com a Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses - International Society of Rock Mechanics – ISRM (1979) o arenito Preto é classificado como “Muito Resistente”, pois os valores de suas resistências situam-se entre 100 e 250 Mpa.

08. A norma NBR 15.845 (ABNT, 2015) determina que o valor mínimo para o ensaio de Resistência à Flexão (Três Pontos) deve ser ≥ 10 Mpa e a norma 616 (ASTM, 1999) para rochas areníticas sugere um índice igual ou maior que 2,4 MPa. Sob condições dos esforços tanto no eixo paralelo ao acamamento quanto no eixo perpendicular ao acamamento apresentado pelo arenito Amarelo foi de 16,04 MPa e de 14,00 MPa, o arenito Preto com valor de 20,28 Mpa no eixo paralelo e de 18,22 MPa no eixo perpendicular, o arenito Mult forneceu os seguintes valores para o ensaio de resistência à flexão: 20,75 MPa no sentido paralelo ao acamamento e de 16,48 Mpa, no sentido perpendicular ao acamamento exibiram valores considerados dentro do limite estabelecido pela normativa em vigor, demonstrando a importância das características petrográficas que condicionam fortemente os resultados deste ensaio tecnológico.

09. Em relação ao Desgaste Abrasivo Amsler, os valores encontrados para todas as rochas pesquisadas encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 15.844 (ABNT, 2015) e a norma 616 (ASTM, 1999) que determina o mínimo de 2,0 mm de redução para rochas areníticas. O arenito Amarelo apresentou a menor redução de espessura com 2,33mm no sentido paralelo ao acamamento e de 2,54mm no sentido perpendicular ao acamamento, aproximando-se bastante do limite normativo; o arenito Preto demonstrou a maior redução de espessura: 3,99mm no eixo paralelo e 3,10mm no eixo perpendicular e, por fim, o arenito Mult exibiu redução de 3,38mm no sentido paralelo e 2,95mm no sentido perpendicular ao acamamento, portanto, demonstrando comportamento intermediário entre o arenito Amarelo e o Preto e os resultados revelados pelo desgaste Amsler.

10. Os resultados obtidos para o ensaio de Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais mostram que as maiores velocidades de ondas pertencem ao arenito amarelo (4.297m/s, no paralelo e 4.349 m/s, na perpendicular). As maiores velocidades de propagação de ondas pertencem o arenito preto (4.393m/s, no paralelo e 4.433 m/s, na perpendicular) devido as suas características petrográficas (contatos minerais côncavo-

convexos-convexos (88,22%), alteração mineral incipiente nos minerais de feldspatos e muscovita), e um índices de porosidade e absorção de água intermediária. O arenito Mult exibe os valores intermediários para as velocidades de propagação de ondas (4.346m/s, no paralelo e 4.472 m/s, no perpendicular), Estes dados apontam que fatores como densidade, porosidade, absorção de água, etc., têm influência direta sobre a velocidade de propagação de ondas nos materiais rochosos investigados.

11. Os três grupos de amostras não apresentam comportamento homogêneo devido a variação entre 9% a 12 % na porosidade, podendo ser atribuída a ocorrência de matéria orgânica durante o processo de sedimentação. O Multicor apresenta uma variação de porosidade menor que 1% enquanto o Preto varia de 1% a 3%. A densidade de grãos varia de 2,65 a 2,67 g/cm³. Estes valores são atribuídos a composição mineralógica que em sua maioria é composta por grãos de quartzo. O percentual de amostras com alto grau de anisotropia chega a 20,8%. É possível identificar, que as velocidades de propagação são maiores nas medidas horizontais que nas medidas verticais. Isso ocorre devido ao menor volume de descontinuidades que interceptam as ondas, de forma geral, a medida que a porosidade aumenta as velocidades decrescem.

12. A partir deste gráfico pode-se observar que as amostras de arenito Amarelo e arenito Multicor apresentam comportamentos diferentes em relação ao arenito Preto, possuindo velocidades de onda não constantes do que a outra amostra ensaiada.

13. De acordo com a ISRM (1981,1999), a utilizar na determinação das deformações longitudinais deve ser posicionado entre 25% e 75% de altura dos corpos de prova e numa posição diametralmente oposta. O coeficiente de Poisson das amostras ensaiadas, de granulometria muito fina, é classificado como muito baixa, de acordo com a classificação proposta por Gercek (2007), mostra que o módulo de elasticidade das amostras apresenta uma forte correlação inversa com a porosidade. Isto é esperado, pois o aumento de porosidade provoca uma redução na resistência uniaxial da amostra.

14. Nas três rochas areníticas estudadas, os valores obtidos para a variação total da cor são, em sua maioria, perceptíveis à vista desarmada visto que os resultados encontrados para o parâmetro ΔE^* algumas são superiores a 3 e outras não. As alterações cromáticas são causadas devido a interação entre os reagentes químicos e os minerais presentes nas rochas. Os minerais são atacados primeiramente em suas zonas de fraqueza, tais como: planos de clivagem, poros, fraturas, microfissuras outras aberturas acessíveis às soluções, sendo por meio destas que se processam as reações que levam à degradação mineral e à dissolução de seus elementos constituintes.

9.2 Recomendações

01. Em função dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização tecnológica e na análise petrográfica, constata-se que os arenitos podem ser utilizados como rocha ornamental e de revestimento, cabendo ressalvas, pois são os primeiros estudos com arenitos para rocha ornamental.

02. A constatação de que os reagentes químicos utilizados no ataque químico atuaram na limpeza dos grãos de quartzos, pois tirou a matéria orgânica encrustado.

03. O arenito encontrado na região não possui características dos dois membros, com isso o autor sugere um novo membro para Formação Cabeças que se chamaria de “**membro Castelo**”.

04. Precisa de mais estudo em relação dos arenitos para rocha ornamental e uma norma que possa se adequar com o material estudado.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento no 12º Semestre de 2017**. Informe 010/2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas para Revestimento - Análise Petrográfica. Norma NBR 15.845/1**. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas para Revestimento - Determinação da Densidade Aparente, da Porosidade Aparente e da Absorção de Água. Norma NBR 15.845/2**. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas para Revestimento - Determinação da Resistência ao Congelamento e Degelo. Norma NBR 15.845/4**. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas para Revestimento - Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial. Norma NBR 15.845/5**. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas para Revestimento - Determinação do Módulo de Ruptura (flexão por carregamento em três pontos). Norma NBR 15.845/6**. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas Cerâmicas para Revestimento - Especificação e Métodos de Ensaio. Norma NBR 13.818**. Rio de Janeiro. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rocha pra Revestimento - Desgaste Abrasivo Amsler**. Norma NBR 12.042. Rio de Janeiro. 20
- ABRANTES JÚNIOR F.R. & NOGUEIRA A.C.R. Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do Maranhão, Brasil. **Geol.USP, Série Científica [online]**, 2013; 13(3):p.65-82.
- AGUIAR, G.A. de. 1969. **Bacia do Maranhão: geologia e possibilidades de Petróleo**. Belém: Petrobras, p.55. (Petrobras, Relatório Interno, 371).
- AGUIAR, G.A., 1971. Revisão geológica da Bacia Paleozóica do Maranhão. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 25º, São Paulo. Anais Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, 3: p.113-122.*
- ALMEIDA, F.F.M., CARNEIRO, C.D.R. 2004. **Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados**. *In: V. Mantesso-Neto et al. (org.). Geologia da Plataforma Sul-Americana: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 43-58.

ARCE, A.; RIGOTI, C.; MOURA, D.H.; CAMPELO, F.; SCHUAB, F. 2006. **Bacia do Parnaíba: Uma revisão estratigráfica, tectônica, estrutural e sistemas petrolíferos.** Trabalho de Final de Curso. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 78p.

BRITO NEVES BB & CORDANI UG. 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *In: STERN RJ & VAN SCHMUS WR (Ed.). Crustal Evolution in the Late Proterozoic. Precambrian Research*, 53: 23-40.

CABAÑAS, F. N. Granitos Ornamentais: **Análise Petrográfica como Técnica para Previsão do Comportamento Físico- Mecânico de “Granitos” Ornamentais.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 88p. 2002.

CAPUTO M.V. & LIMA E.C. 1984. **Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande – Bacia do Parnaíba.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, Anais, v. 2, p. 740-753.

CAPUTO, M.V.; MELO, J.H.G.; STREEL, M.; ISBELL, J.L. 2008. Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. **The Geological Society of America.** Special Paper, 441: 1-13.

CAROZZI A.V. 1975. Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão. Rio de Janeiro, PETROBRAS. **Série Ciência-Técnica-Petróleo**, n. 7.

CAROZZI, A.V. 1980. Tectonic control and petroleum geology of the Paleozoic clastics of the Maranhão Basin, Brazil. **Journal of Petroleum Geology**, 2(4): 55-74.

CHIODI FILHO (2013) CHIODI FILHO,C., CHIOD, K.D., 2014 Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento no 1º Semestre de 2014. Informe **ABIROCHAS N. 02/2017.**

CIELAB - Commission International de Eclairage (CIE). **Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication 15.** Colorimetry Bureau Central de la CIE. Paris. 1976.

COSTA, A. P. L. **Alterabilidade e caracterização tecnológica dos gnaisses enderbíticos da porção norte do estado do Ceará com aplicação no setor de rochas ornamentais.** Tese de Doutorado– Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. UNESP. Rio Claro. 133p. 2007

CRUZ, E.M.A. **ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DA SEQUÊNCIA SILURIANA DA BACIA DO PARNAÍBA, NORDESTE DO BRASIL.** Dissertação de mestrado– Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação Universidade Federal do Rio Grande do Norte.63P.2015

DELGADO ML, *et al.* (2003) Starvation and temperature upshift cause an increase in the enzymatically active cell wall-associated glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase protein in yeast. **FEMS Yeast Res** 4(3):297-303

DELLA FÁVERA J.C. 1990. **Tempestitos na Bacia do Parnaíba**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 560 p.

DOTT R, 1964, Wacke, graywacke and matrix-what approach to immature sandstone classification? **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 34, n. 3, pp. 625-632.

FIGUEIREDO, A.M.E & RAJA GABAGLIA G.P. 1986. Sistema classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileiras. **Rev.Bras. de Geoc.**, 16: 350-369.

FIGUEIREDO, E. R. H. **Condutividade térmica de rochas: uma aplicação para granitos ornamentais**. Dissertação de mestrado– Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 91p. Natal. 2006.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**, tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2003

GERCEK, K. (2007) - Poissons ratio value for rocks. **International Journal of rock mechanics and mining sciences**, 44(1), pp.1- 13.

GÓES, A.M.O.; SOUZA, J.M.P.; TEIXEIRA, L.B. 1990. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 4(1): 55-64.

GÓES, A.M. 1995. **A Formação Poti (Carbonífero Superior) da Bacia do Parnaíba**. Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado, 171 p.

GÓES, A.M., FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 8(1):57-67

GRAHN, Y; MELO, J.H.G.; LOBOZIAK, S. 2006. Integrated middle and late Devonian miospore and chitinozoan zonation of the Parnaíba Basin, Brazil: an update. **Revista Brasileira Paleontologia**, 9(3): 283-294.

IÑIGO, A. C.; VICENTE-TAVERA, S.; RIVES, V.; VICENTE, M. A. Color changes in the surface of granitic materials by consolidated and/or water repellent treatments. **Color Research and Application**. 22- 2: p. 133-141. 1997.

KEGEL W. 1953. **Contribuição para o estudo do Devoniano da Bacia do Parnaíba**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, 48 p.

KINGSTON, D.R., DISHROON, C.P., WILLIAMS, P.A. 1983. **Global basin classification system**. *AAPG Bulletin*, 67:2175-2193.

KLEIN, C. & HURLBUT JR. C. 1993. **Manual of mineralogy. (after James D. Dana), 21.ed.**Jonh Wiley & Sons, Inc. N.Y. 681p.

LIMA, E. A. M. & LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba integração geológica-metalogenética: relatório final da etapa III**. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1978. 212 p.

LOBOZIAK, S.; CAPUTO, M.V.; MELO, J.H.G. 2000. Middle Devonian – Tournaisian miospore biostratigraphy in the southwestern outcrop belt of the Parnaíba Basin, north-central Brazil. **Rév. Micropaléont.**, 43(4): 301-318.

MEYER, A. P. A., 2003 **influência da petrografia no comportamento tecnológico de rochas ornamentais do Complexo Socorro (SP) e Maciço Pedra Branca (MG).**

MELLO, R. M. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha.** 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado) – IPEM-USP, São Paulo, 2006.

MELO, J.H.G.; LOBOZIAK, S. 2003. Devonian - Early Carboniferous miospore biostratigraphy of the Amazon Basin, northern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 124 (3-4): 131-202.

MIZUSAKI, A. M. P, THOMAZ FILHO, A. **“O Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil”.** In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito Neves, B. B. (eds). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* 1 ed. capítulo 17, São Paulo, Beca, 2004.

MOORE, B. 1963. **Geological Reconnaissance of the Southwest corner of the Maranhão Basin.** Petróleo Brasileiro S. A., Região de Exploração do Norte, Belém, Brasil. Relatório Interno nº. 210, 74p.

NAVARRO, F.C., 1998; **Granitos Ornamentais: Análise Petrográfica na Previsão do Comportamento Físico-Mecânico.** In: Congresso Uruguayo De Geologia, 2, 1998, Punta del Este. Actas... Punta del Este: Sociedad Uruguaya De Geología, p.103-107.

PETTIJOHN F, 1975, **Sedimentary rocks**, New York, Tercera edición.

PONCIANO, L.C.M.O. & DELLA FÁVERA, J.C. 2009. Flood-dominated fluvio-deltaic system: a new depositional model for the Devonian Cabeças Formation, Parnaíba Basin, Piauí, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 81(4): p.769-780.

PLUMMER, F. B; PRINCE, L. I.; GOMES, F. A. **Estados do Maranhão e Piauí. In: Relatório Do Conselho Nacional do Petróleo. Rio de Janeiro: Conselho Nacional do Petróleo, 1946, P.87-134.**

REZENDE N.G.A.M. 2002. **A Zona Zeolítica da Formação Corda, Bacia do Parnaíba.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 142 p.

RODRIGUES, E. P. **Importância da petrografia microscópica para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais.** Revista Rochas de Qualidade, p. 78-86. São Paulo. 1997.

RODRIGUES, E.P.; CHIODI FILHO, C.; COUTINHO, J.J.M., 1997; **Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais.** Lisboa: Rochas e Equipamentos, v. 47, 2 p.

ROSSETTI, D.F. 1997. Internal architecture of mixed tide-and-storm-influenced deposits: an example from the Alcântara Formation, northern Brazil. **Sedimentary Geology**, 114: p.163-188.

SALES, F. A. C. B. **Estudo comparativo dos parâmetros de caracterização tecnológica em rochas ornamentais e de revestimentos resinadas e não resinadas**. Tese de Doutorado. UFC. Fortaleza, 2012. 132p.

SANTOS, R. D.; CASTRO, D. L. de; BEZERRA, F. H. R.; VIDOTTI, R. M.; FUCK, R. A.; DANTAS, E. L.; LIMA, T. P. C. de. **Influência do Lineamento Transbrasiliano na formação do arcabouço estrutural da Bacia Parnaíba**. In: 13º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2013, Rio de Janeiro, Brasil.

SCHEFFLER, Sandro Marcelo. **Crinoides e Blastoides do Devoniano brasileiro**. 2011. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.

SMALL, H.L. 1914. **Geologia e suprimento d'água subterrânea no Piauí e parte do Ceará**. Rio de Janeiro: Inspetoria Federal de Obras Contra a Seca, 146 p.

STREEL, M.; CAPUTO, M.V.; MELO, J.H.G.; PEREZ-LEYTON, M. 2013. **What do latest Famennian and Mississippian miospores from South American diamictites tell us? Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments**, 93: p.299-316.

TIAB, D.; DONALDSON, E. C. **Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties**. 2ª Ed. Oxford: Elsevier, 2004. p.889 .

VALLEJO, L. I.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. **Ingeniería Geológica**. 1ª Ed. Madrid: Pearson Educación, 2002. p.744p.

VAZ, P.T.; REZENDE, N.G.A.M.; WANDERLEY FILHO, J.R. & TRAVASSOS, W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 15(2):p.253-263.

VIDAL, F.W.H. **Estudo dos elementos abrasivos de fio diamantado para a lavra de granitos do Ceará**. 1999. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. USP, 1999. 173p. São Paulo.

ZALÁN, P. V. **Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras**. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; NEVES, B. B.B. (Org.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 595-612.

APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS

ABNT NBR 15.845-2:2015 - DENSIDADE APARENTE, DA POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO D'ÁGUA			
ARENITO AMARELO			
Corpos-de-prova	Densidade Aparente (kg/m ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	2302	7,21	3,13
2	2296	6,23	2,71
3	2370	7,16	3,02
4	2044	6,11	2,99
5	2273	6,68	2,94
6	2414	7,62	3,16
7	2375	8,67	3,65
8	2406	7,09	2,95
9	2400	7,06	2,94
10	2407	7,17	2,98
Média	2329	7,10	3,05
Desvio Padrão	113	0,72	0,24
Coefficiente de Variação (%)	4,8	10,1	8,0
ARENITO PRETO			
Corpos-de-prova	Densidade Aparente (kg/m ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	2321	8,14	3,51
2	2329	8,38	3,60
3	2348	8,28	3,53
4	2386	8,04	3,37
5	2364	8,04	3,40
6	2386	8,15	3,41
7	2334	8,29	3,55
8	2378	7,93	3,33
9	2389	8,01	3,35
10	2352	8,48	3,61
Média	2359	8,17	3,47
Desvio Padrão	26	0,18	0,10
Coefficiente de Variação (%)	1,1	2,2	3,0
ARENITO MULTICOR			
Corpos-de-prova	Densidade Aparente (kg/m ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	2266	8,47	3,74
2	2356	8,78	3,73
3	2329	8,70	3,74

4	2378	8,65	3,64
5	2404	7,48	3,11
6	2363	8,97	3,80
7	2379	8,49	3,57
8	2347	8,39	3,58
9	2245	8,55	3,81
10	2372	8,74	3,68
Média	2344	8,52	3,64
Desvio Padrão	51	0,40	0,20
Coefficiente de Variação (%)	2,2	4,7	5,6

**ASTM E 384-17 - STANDARD TEST METHOD FOR MICROINDENTATION
HARDNESS OF MATERIALS**

ARENITO AMARELO					
Amostra	HK25 (MPa)	HK50 (MPa)	HK75 (MPa)	HKmédio (MPa)	HK75/HK25 (MPa)
Paralela	103,6	182,0	251,5	201,0	2,4
Perpendicular	124,1	200,3	398,2	287,5	3,2

ARENITO PRETO					
Amostra	HK25 (MPa)	HK50 (MPa)	HK75 (MPa)	HKmédio (MPa)	HK75/HK25 (MPa)
Paralela	107,3	140,2	170,2	152,0	1,6
Perpendicular	97,4	125,2	168,3	147,6	1,7

ARENITO MULTICOR					
Amostra	HK25 (MPa)	HK50 (MPa)	HK75 (MPa)	HKmédio (MPa)	HK75/HK25 (MPa)
Paralela	116,3	133,3	215,9	176,5	1,9
Perpendicular	95,4	126,8	161,9	138,6	1,7

ASTM D 2845:2008 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASÔNICAS

ARENITO AMARELO					
PARALELO			PERPENDICULAR		
Corpo de Prova	Distância (μs)	Velocidade (m/s)	Corpo de Prova	Distância (μs)	Velocidade (m/s)
1	16,9	4142	6	16,4	4268
2	15,9	4403	7	15,9	4403
3	16,4	4268	8	15,9	4403
4	16,4	4268	9	15,9	4403
5	15,9	4403	10	16,4	4268
Média	16,3	4296,8	Média	16,1	4349
Desvio Padrão	0,4	109,7	Desvio Padrão	0,3	73,9
Coef. Variação (%)	2,6	2,6	Coef. Variação (%)	1,7	1,7
Anisotropia		5,9	Anisotropia		3,1

ARENITO PRETO					
PARALELO			PERPENDICULAR		
Corpo de Prova	Distância (μs)	Velocidade (m/s)	Corpo de Prova	Distância (μs)	Velocidade (m/s)
1	15,9	4403	6	15,9	4403
2	15,9	4403	7	15,4	4545
3	15,9	4403	8	15,9	4403
4	16,4	4268	9	16,4	4268
5	15,6	4487	10	15,4	4545
Média	15,94	4392,8	Média	15,8	4432,8
Desvio Padrão	0,3	78,7	Desvio Padrão	0,4	116,3
Coef. Variação (%)	1,8	1,8	Coef. Variação (%)	2,6	2,6
Anisotropia		4,9	Anisotropia		6,1

ARENITO MULTICOR					
PARALELO			PERPENDICULAR		
Corpo de Prova	Distância (μs)	Velocidade (m/s)	Corpo de Prova	Distância (μs)	Velocidade (m/s)
1	16,9	4142	6	16,4	4268
2	17,9	3911	7	16,9	4142
3	17,4	4023	8	17,4	4023
4	16,9	4142	9	12,1	5785
5	12,7	5512	10	16,9	4142
Média	16,36	4346	Média	15,94	4472
Desvio Padrão	2,1	658,9	Desvio Padrão	2,2	739,1
Coef. Variação (%)	12,8	15,2	Coef. Variação (%)	13,6	16,5
Anisotropia		29,0	Anisotropia		30,5

ABNT NBR 15.845-8:2015 - IMPACTO DE CORPO DURO

ARENITO AMARELO		
Corpo de Prova	Altura de Ruptura (m)	Energia de Ruptura (J)
1	0,65	6,37
2	0,70	6,86
3	0,55	5,39
4	0,70	6,86
5	0,60	5,88
6	0,53	5,15
7	0,70	6,86
8	0,75	7,35
9	0,60	5,88
10	0,65	6,37
Média	0,64	6,30
Desvio Padrão	0,07	0,71
Coeficiente de Variação (%)	11,31	11,31

ARENITO PRETO		
Corp de Prova	Altura de Ruptura (m)	Energia de Ruptura (J)
1	0,80	7,84
2	0,65	6,37
3	0,90	8,83
4	0,90	8,83
5	0,80	7,84
6	0,70	6,86
7	0,75	7,35
8	0,85	8,34
9	0,80	7,84
10	0,80	7,84
Média	0,80	7,80
Desvio Padrão	0,08	0,78
Coeficiente de Variação (%)	10,03	10,03

ARENITO MULTICOR		
Corpo de Prova	Altura de Ruptura (m)	Energia de Ruptura (J)
1	0,70	6,86
2	0,75	7,35
3	0,70	6,86
4	0,80	7,84
5	0,75	7,35
6	0,75	7,35
7	0,60	5,88
8	0,85	8,34

9	0,80	7,84
10	0,80	7,84
Média	0,75	7,35
Desvio Padrão	0,07	0,69
Coefficiente de Variação (%)	9,43	9,43

ABNT NBR 15845-6:2015 - FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM TRÊS PONTOS

ARENITO AMARELO							
PARALELA				PERPENDICULAR			
Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão (MPa)
1	102,07	49,14	13,61	6	101,42	53,24	12,99
2	100,53	48,44	16,92	7	101,91	53,20	8,74
3	101,38	51,49	16,14	8	102,28	53,34	17,79
4	101,65	48,19	14,13	9	101,83	53,36	16,47
5	101,54	49,45	19,41				
Média			16,04	Média			14,00
Desvio Padrão			2,33	Desvio Padrão			4,05
Coefficiente de Variação (%)			14,51	Coefficiente de Variação (%)			28,93

ARENITO PRETO							
PARALELA				PERPENDICULAR			
Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão (MPa)
1	101,86	50,72	19,41	6	101,23	50,41	16,97
2	101,90	50,16	16,49	7	99,85	50,35	17,77
3	102,07	50,48	20,80	8	99,67	50,24	17,68
4	101,68	50,63	21,92	9	101,63	50,17	21,87
5	102,03	49,68	22,76	10	100,21	50,44	16,81
Média			20,28	Média			18,22
Desvio Padrão			2,46	Desvio Padrão			2,08
Coefficiente de Variação (%)			12,13	Coefficiente de Variação (%)			11,44

ARENITO MULTICOR	
PARALELA	PERPENDICULAR

Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão (MPa)
1	101,61	50,30	21,77	6	111,17	51,95	15,67
2	101,89	48,90	23,45	7	111,44	51,47	18,63
3	101,93	49,62	22,39	8	113,00	50,23	15,29
4	102,21	51,48	19,08	9	111,71	51,35	15,40
5	100,60	48,78	17,05	10	111,55	50,44	17,42
Média			20,75	Média			16,48
Desvio Padrão			2,62	Desvio Padrão			1,48
Coefficiente de Variação (%)			12,63	Coefficiente de Variação (%)			8,97

ABNT NBR 12042:2012 - DESGASTE POR ABRASÃO

ARENITO AMARELO

PARALELA			PERPENDICULAR		
Corpo de prova	d500 (mm)	d1000 (mm)	Corpo de prova	d500 (mm)	d1000 (mm)
1	1,24	1,97	3	1,50	2,61
2	1,37	2,70	4	1,02	2,47
Média	1,30	2,33	Média	1,26	2,54

ARENITO PRETO

PARALELA			PERPENDICULAR		
Corpo de prova	d500 (mm)	d1000 (mm)	Corpo de prova	d500 (mm)	d1000 (mm)
1	1,77	3,34	3	1,65	2,95
2	2,24	4,64	4	1,59	3,25
Média	2,01	3,99	Média	1,62	3,10

ARENITO MULTICOR

PARALELA			PERPENDICULAR		
Corpo de prova	d500 (mm)	d1000 (mm)	Corpo de prova	d500 (mm)	d1000 (mm)
1	1,72	3,18	3	1,74	2,86
2	1,80	3,59	4	1,44	3,04
Média	1,76	3,38	Média	1,59	2,95

ABNT NBR 15.845-5:2015 - COMPRESSÃO UNIAXIAL

ARENITO AMARELO							
PARALELA				PERPENDICULAR			
Corpo de prova	Força (kN)	Área (m ²)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Força (kN)	Área (m ²)	Tensão (MPa)
1	493,20	0,005	97,59	6	575,80	0,005	115,77
2	339,60	0,005	67,77	7	387,50	0,005	76,72
3	353,60	0,005	70,19	8	613,70	0,005	121,52
4	474,90	0,005	94,46	9	316,40	0,005	63,30
5	506,90	0,005	99,95	10	315,00	0,005	63,44
Média			85,99	Média			88,15
Desvio Padrão			15,67	Desvio Padrão			28,44
Coeficiente de Variação (%)			18,23	Coeficiente de Variação (%)			32,26
ARENITO PRETO							
PARALELA				PERPENDICULAR			
Corpo de prova	Força (kN)	Área (m ²)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Força (kN)	Área (m ²)	Tensão (MPa)
1	443,80	0,005	91,47	6	559,80	0,005	116,02
2	592,70	0,005	121,28	7	487,90	0,005	101,11
3	462,30	0,005	95,44	8	424,00	0,005	87,36
4	517,60	0,005	106,70	9	543,80	0,005	114,87
5	633,20	0,005	128,47	10	533,00	0,005	111,86
Média			108,67	Média			106,24
Desvio Padrão			16,02	Desvio Padrão			12,08
Coeficiente de Variação (%)			14,74	Coeficiente de Variação (%)			11,37
ARENITO MULTICOR							
PARALELA				PERPENDICULAR			
Corpo de prova	Força (kN)	Área (m ²)	Tensão (MPa)	Corpo de prova	Força (kN)	Área (m ²)	Tensão (MPa)
1	400,80	0,005	81,66	6	374,50	0,005	76,56
2	387,40	0,005	80,79	7	439,10	0,005	91,24
3	479,40	0,005	98,92	8	566,80	0,005	116,79
4	428,60	0,005	88,02	9	390,20	0,005	78,94
5	451,90	0,005	92,98	10	539,00	0,005	110,42
Média			88,47	Média			94,79
Desvio Padrão			7,67	Desvio Padrão			18,19
Coeficiente de Variação (%)			8,67	Coeficiente de Variação (%)			19,19
P-01-H-I		A-01-H-I		M-01-H-I			

V (1)	V (2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V (1)	V (2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V (1)	V (2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
3114	3018	1,03	4614	49,55	0,11	2897	2903	1,00	4486	45,22	0,14	3200	3042	1,05	4683	51,77	0,10
3097	2990	1,04	4542	48,29	0,09	2882	2888	1,00	4448	44,59	0,14	3191	3034	1,05	4663	51,39	0,10
3088	2971	1,04	4536	48,06	0,10	2860	2866	1,00	4426	44,04	0,14	3169	3025	1,05	4643	50,92	0,10
3070	2960	1,04	4517	47,64	0,10	2845	2843	1,00	4371	43,18	0,13	3154	3011	1,05	4604	50,20	0,10
3047	2915	1,05	4485	46,83	0,10	2805	2820	0,99	4313	42,12	0,13	3135	3000	1,05	4584	49,74	0,10
3013	2888	1,04	4466	46,23	0,11	2770	2793	0,99	4281	41,37	0,14	3112	2978	1,04	4540	48,87	0,09
2974	2870	1,04	4393	44,95	0,10	2726	2702	1,01	4186	39,48	0,14	3065	2949	1,04	4490	47,75	0,09
2917	2830	1,03	4328	43,57	0,11	2652	2669	0,99	4041	37,27	0,12	3034	2907	1,04	4405	46,16	0,08
3040	2930	1,04	4485	46,89	0,10	2805	2811	1,00	4319	42,16	0,13	3133	2993	1,05	4577	49,60	0,10
P-01-H-II					A-01-H-II					M-01-H-II							
V (1)	V (2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V (1)	V (2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V (1)	V (2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
3013	3029	0,99	4718	50,38	0,15	2894	2905	1,00	4458	45,01	0,13	3046	3046	1,00	4678	50,60	0,13
2998	3013	1,00	4712	50,06	0,16	2873	2894	0,99	4432	44,50	0,13	3034	3028	1,00	4643	49,96	0,13
2989	3003	1,00	4676	49,52	0,15	2862	2867	1,00	4416	44,06	0,14	3028	3014	1,00	4609	49,40	0,12
2972	2990	0,99	4641	48,90	0,15	2841	2849	1,00	4366	43,25	0,13	3014	2999	1,01	4528	48,16	0,11
2960	2971	1,00	4584	48,03	0,14	2821	2801	1,01	4330	42,39	0,14	2996	2987	1,00	4482	47,36	0,10
2941	2958	0,99	4533	47,21	0,13	2774	2760	1,01	4253	40,98	0,13	2964	2973	1,00	4462	46,83	0,10
2920	2927	1,00	4500	46,46	0,14	2728	2736	1,00	4145	39,35	0,12	2928	2962	0,99	4424	46,05	0,10
2888	2896	1,00	4446	45,40	0,13	2684	2705	0,99	4085	38,24	0,12	2890	2925	0,99	4325	44,30	0,09
2960	2973	1,00	4601	48,25	0,14	2810	2815	1,00	4311	42,22	0,13	2988	2992	1,00	4519	47,83	0,11
P-01-V-I					A-01-V-I					M-01-V-I							
V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
2710	2718	1,00	4072	38,09	0,10	2677	2665	1,00	4053	37,49	0,12	2946	2961	0,99	4464	46,82	0,11

27 01	27 13	1,0 0	40 22	37,40	0,09	26 53	264 6	1,0 0	40 14	36,82	0,11	292 6	29 48	0,99	44 42	46,33	0,11
26 87	27 02	0,9 9	39 91	36,89	0,08	26 42	262 3	1,0 1	39 68	36,12	0,11	291 4	29 31	0,99	44 03	45,65	0,11
26 76	26 82	1,0 0	39 48	36,20	0,07	26 11	261 2	1,0 0	39 50	35,70	0,11	290 5	29 14	1,00	43 60	44,94	0,10
26 63	26 72	1,0 0	39 19	35,73	0,07	25 86	259 4	1,0 0	38 84	34,73	0,10	288 1	29 02	0,99	43 12	44,09	0,09
26 28	26 57	0,9 9	39 01	35,31	0,08	25 71	257 2	1,0 0	38 10	33,67	0,08	286 2	28 79	0,99	42 55	43,09	0,08
26 02	26 41	0,9 9	38 61	34,64	0,07	25 27	248 3	1,0 2	37 17	32,02	0,08	284 6	28 42	1,00	42 00	42,08	0,08
25 63	25 82	0,9 9	37 60	32,97	0,06	24 52	243 6	1,0 1	35 53	29,55	0,05	279 5	28 06	1,00	41 75	41,35	0,09
26 54	26 71	0,9 9	39 34	35,90	0,08	25 90	257 9	1,0 0	38 69	34,51	0,10	288 4	28 98	1,00	43 26	44,29	0,10
P-01-V-II					A-01-V-II					M-01-V-II							
V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
27 57	27 54	1,0 0	42 35	41,26	0,13	26 51	267 2	0,9 9	40 65	37,58	0,13	294 6	29 34	1,00	44 65	46,53	0,12
27 43	27 40	1,0 0	42 08	40,78	0,13	26 39	265 3	0,9 9	40 14	36,84	0,12	293 6	29 20	1,01	44 37	46,03	0,11
27 34	27 29	1,0 0	41 69	40,22	0,12	26 13	263 0	0,9 9	39 79	36,19	0,12	292 7	28 94	1,01	44 21	45,61	0,12
27 15	27 12	1,0 0	41 49	39,77	0,13	25 89	261 5	0,9 9	39 14	35,25	0,10	291 0	28 84	1,01	43 88	45,03	0,11
27 01	26 96	1,0 0	41 30	39,38	0,13	25 64	258 8	0,9 9	38 73	34,53	0,10	288 7	28 73	1,00	43 40	44,22	0,11
26 82	26 72	1,0 0	40 74	38,50	0,12	25 24	255 5	0,9 9	38 09	33,45	0,10	286 6	28 38	1,01	42 78	43,11	0,10
26 53	26 45	1,0 0	40 31	37,69	0,12	24 84	252 7	0,9 8	37 28	32,21	0,09	283 8	28 14	1,01	42 17	42,03	0,09
26 17	26 09	1,0 0	39 30	36,15	0,10	24 39	244 5	1,0 0	36 03	30,24	0,08	280 7	27 83	1,01	41 48	40,81	0,08
27 00	26 95	1,0 0	41 16	39,22	0,12	25 63	258 6	0,9 9	38 73	34,54	0,10	289 0	28 68	1,01	43 37	44,17	0,11
P-02-H-I					A-02-H-I					M-02-H-I							
V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa	GPa	m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
30 54	29 46	1,0 4	46 49	49,06	0,14	29 35	277 6	1,0 6	43 55	43,66	0,12	316 7	30 23	1,05	48 47	53,39	0,16
30 48	29 37	1,0 4	46 34	48,78	0,14	29 22	275 7	1,0 6	43 31	43,17	0,12	316 2	30 18	1,05	48 33	53,15	0,15
30 29	29 19	1,0 4	46 19	48,33	0,15	29 00	274 0	1,0 6	42 89	42,44	0,12	315 0	30 10	1,05	48 07	52,69	0,15
30 13	28 88	1,0 4	45 83	47,57	0,15	28 72	272 3	1,0 5	42 58	41,80	0,12	313 6	30 00	1,05	47 87	52,26	0,15
29 82	28 26	1,0 6	45 61	46,61	0,16	28 38	270 4	1,0 5	41 87	40,65	0,11	312 8	29 87	1,05	47 74	51,94	0,15

29 61	27 86	1,0 6	44 98			27 87	268 4	1,0 4	41 34	39,62	0,11	311 4	29 67	1,05	47 55	51,45	0,15
29 11	27 65	1,0 5	44 43	45,48	0,16	27 39	264 2	1,0 4	40 77	38,46	0,11	307 1	29 37	1,05	46 73	49,95	0,15
28 68	27 49	1,0 4	43 64	43,12	0,15	26 64	253 2	1,0 5	39 45	35,95	0,12	304 4	29 08	1,05	46 23	48,95	0,15
29 83	28 52	1,0 5	45 44	46,67	0,15	28 32	269 5	1,0 5	41 97	40,72	0,12	312 2	29 81	1,05	47 62	51,72	0,15
P-02-H-II					A-02-H-II					M-02-H-II							
V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
30 01	29 88	1,0 0	46 67	49,32	0,15	30 44	283 3	1,0 7	43 77	44,60	0,09	318 5	31 89	1,00	49 51	56,21	0,15
29 85	29 80	1,0 0	46 35	48,78	0,15	30 30	281 6	1,0 8	43 61	44,23	0,09	317 6	31 74	1,00	49 30	55,76	0,15
29 77	29 51	1,0 1	46 03	48,14	0,15	30 13	280 7	1,0 7	43 14	43,45	0,08	316 8	31 63	1,00	48 95	55,18	0,14
29 67	29 38	1,0 1	45 77	47,67	0,14	29 90	279 4	1,0 7	42 45	42,30	0,07	315 6	31 51	1,00	48 48	54,41	0,13
29 56	29 28	1,0 1	45 65	47,38	0,15	29 51	276 3	1,0 7	41 92	41,26	0,07	314 5	31 36	1,00	48 09	53,72	0,13
29 40	29 12	1,0 1	45 34	46,80	0,14	29 08	273 9	1,0 6	41 34	40,16	0,06	312 8	31 25	1,00	47 82	53,17	0,13
29 27	28 95	1,0 1	44 79	45,97	0,13	28 51	271 8	1,0 5	40 43	38,55	0,05	310 1	30 89	1,00	47 57	52,40	0,13
28 94	28 72	1,0 1	44 31	45,03	0,13	27 76	267 0	1,0 4	38 85	35,75	0,02	306 6	30 49	1,01	47 18	51,36	0,14
29 56	29 33	1,0 1	45 61	47,39	0,14	29 45	276 8	1,0 6	41 94	41,29	0,07	314 1	31 35	1,00	48 36	54,03	0,14
P-02-V-I					A-02-V-I					M-02-V-I							
V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
26 47	26 58	1,0 0	40 75	37,97	0,13	27 08	271 5	1,0 0	40 75	38,41	0,10	293 4	29 04	1,01	44 13	45,71	0,11
26 38	26 50	1,0 0	40 25	37,33	0,12	26 94	268 4	1,0 0	40 60	38,00	0,11	292 6	28 86	1,01	43 95	45,32	0,11
26 24	26 30	1,0 0	39 91	36,76	0,12	26 76	267 7	1,0 0	40 22	37,42	0,10	290 2	28 69	1,01	43 77	44,85	0,12
26 13	26 21	1,0 0	39 63	36,34	0,11	26 52	266 2	1,0 0	39 70	36,60	0,09	288 9	28 55	1,01	43 53	44,39	0,12
26 01	26 13	1,0 0	39 25	35,80	0,11	26 13	261 8	1,0 0	39 12	35,52	0,10	287 9	28 35	1,02	43 11	43,68	0,11
25 75	25 91	0,9 9	38 93	35,19	0,11	25 71	258 3	1,0 0	38 42	34,33	0,09	286 3	28 22	1,01	42 48	42,70	0,10
25 59	25 62	1,0 0	38 43	34,40	0,10	25 21	251 7	1,0 0	37 75	33,03	0,10	284 5	28 15	1,01	41 92	41,81	0,08
24 99	25 43	0,9 8	38 03	33,56	0,11	24 40	244 8	1,0 0	36 28	30,69	0,09	281 0	27 89	1,01	41 11	40,40	0,07
25 95	26 09	0,9 9	39 40	35,92	0,11	26 09	261 3	1,0 0	39 11	35,50	0,10	288 1	28 47	1,01	43 00	43,61	0,10

P-02-V-II						A-02-V-II						M-02-V-II					
V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio	V(1)	V(2)	V1/V2	Vp	Young's Modulus	Poisson's Ratio
m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa		m/s	m/s		m/s	GPa	
2699	2716	0,99	4143	38,64	0,13	2751	2795	0,98	4160	39,74	0,10	3066	3034	1,01	4629	50,24	0,12
2688	2699	1,00	4118	38,20	0,13	2739	2788	0,98	4153	39,56	0,10	3050	3024	1,01	4611	49,84	0,12
2677	2684	1,00	4088	37,73	0,12	2727	2778	0,98	4103	38,83	0,09	3044	3008	1,01	4581	49,30	0,11
2663	2667	1,00	4059	37,23	0,12	2705	2752	0,98	4055	37,99	0,09	3034	2995	1,01	4557	48,84	0,11
2650	2648	1,00	4025	36,68	0,12	2683	2731	0,98	4028	37,46	0,09	3021	2978	1,01	4539	48,42	0,11
2629	2626	1,00	3922	35,28	0,09	2651	2692	0,98	3968	36,39	0,09	2998	2970	1,01	4522	48,00	0,11
2607	2594	1,01	3868	34,39	0,09	2613	2624	1,00	3917	35,31	0,10	2980	2945	1,01	4470	47,06	0,11
2554	2572	0,99	3727	32,30	0,05	2567	2549	1,01	3788	33,23	0,08	2986	2916	1,02	4381	45,70	0,09
2646	2651	1,00	3994	36,31	0,11	2680	2714	0,99	4022	37,31	0,09	3022	2984	1,01	4536	48,43	0,11

