



**Processos e Padrões Diagenéticos em Arenitos  
Cretácicos de Bacias da Margem Equatorial Ocidental  
Brasileira**

Porto Alegre, 2013

**Argos Belmonte Silveira Schrank**

**Processos e Padrões Diagenéticos em Arenitos  
Cretácicos de Bacias da Margem Equatorial Ocidental  
Brasileira**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito para a obtenção de grau de Bacharel em Geologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

Porto Alegre, 2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Schrank, Argos Belmonte Silveira

Processos e Padrões Diagenéticos em Arenitos Cretácicos de Bacias da Margem Equatorial Ocidental Brasileira . / Argos Belmonte Silveira Schrank. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2013.  
[97 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul.Graduação em Geologia.Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR,2013.

Orientador:Luiz Fernando De Ros

1.Diagênese.2.Arenitos.3.Porosidade.4.Margem Equatorial Brasileira.I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**PROCESSOS E PADRÕES DIAGENÉTICOS EM ARENITOS CRETÁICOS DE BACIAS DA MARGEM EQUATORIAL OCIDENTAL BRASILEIRA**” elaborado por Argos Belmonte Silveira Schrank, como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**



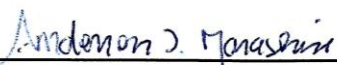
---

**Prof. Dra. Karin Goldberg**



---

**Prof. Dr. Juliano Kuchle**



---

**Dr. Anderson José Maraschin**



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros pela orientação neste trabalho e pelo conhecimento adquirido.

À Prof. Dra. Karin Goldberg pelo apoio.

À Geol. Amanda Goulart Rodrigues pela ajuda em diversas partes deste trabalho.

À minha colega Sabrina Danni Altenhofen pelo apoio mútuo e conversas.

À Geol. Awilsa Carvalho pelas discussões em diagênese e diagramas.

Ao Geol. Garibaldi Armelenti pelo auxílio com a petrografia.

Ao programa PRH-12 pelo auxílio financeiro e bolsa.

À todos os amigos, colegas e familiares que de alguma forma me ajudaram durante o desenvolvimento desta dissertação.

*“Alea iacta est.”*  
(Gaius Julius Caesar)

## RESUMO

Processos diagenéticos promovem a redução, geração e redistribuição da porosidade em arenitos e influenciam na qualidade de reservatórios de hidrocarbonetos. Atualmente, existe um grande interesse exploratório nas bacias da Margem Equatorial Brasileira. Entretanto, poucos estudos sobre a diagênese dos arenitos dessas bacias foram publicados. Um estudo petrográfico foi desenvolvido para reconhecer os processos e padrões diagenéticos nos arenitos das bacias do Pará-Maranhão, de São Luís, de Bragança-Viseu e de Barreirinhas. Os arenitos da Bacia do Pará-Maranhão tem composição detrítica original correspondente a arcósios, e seus principais processos diagenéticos foram: a formação de cutículas de argila autigênica e infiltrada, a expansão e substituição de micas por vermiculita e caulinita, a precipitação de caulinita, crescimentos de quartzo e albita, a albitização de feldspatos, a cimentação e substituição por calcita, dolomita, siderita, pirita e minerais de titânio, a autigênese de clorita substituindo micas, cutículas, argilas expansivas e livrinhos de caulinita e como franjas sobre as cutículas de argila. Os principais processos de redução da porosidade foram a compactação e a cimentação por quartzo e calcita. Os principais processos diagenéticos nos arcósios líticos e subarcósios da Bacia de Barreirinhas foram: a formação de cutículas de argila infiltrada e autigênica, a expansão de micas por caulinita lamelar, a substituição de feldspatos e preenchimento de porosidade intergranular por caulinita, a precipitação de crescimentos externos e internos de quartzo e albita, a albitização de feldspatos, a compactação de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau a pseudomatriz, a cimentação e substituição por calcita, dolomita e pirita, a substituição de minerais pesados por óxidos de titânio, e a precipitação de franjas de clorita e substituição de cutículas de argila e micas por clorita. Os principais processos de impacto na porosidade foram a cimentação por calcita nos arcósios líticos, e a compactação e cimentação por quartzo nos subarcósios. Quartzarenitos desta bacia foram rápida e pervasivamente cimentados por dolomita levemente ferrosa, perdendo toda porosidade. Os principais processos diagenéticos nos arcósios e raros arcósios líticos das bacias de São Luís e Bragança-Viseu foram: a formação de cutículas de argila autigênica e infiltrada, a substituição e expansão de micas por caulinita e vermiculita, a precipitação de crescimentos internos e externos de quartzo e de albita, a albitização de feldspatos, a compactação de intraclastos lamosos a pseudomatriz, a precipitação de franjas de illita, a cimentação e substituição por calcita, dolomita, caulinita, esmectita, hematita, óxidos de titânio e pirita, e a precipitação de clorita substituindo micas e cutículas de argila e como franjas. Os principais processos impactantes na porosidade foram a compactação de intraclastos e a dissolução de feldspatos e minerais pesados. A presença abundante de epidotos detríticos em todas as bacias é indicativa da ação de processos hidrotermais nas áreas-fonte. Os resultados deste trabalho devem contribuir para o entendimento dos processos diagenéticos de impacto sobre a porosidade, e de seus padrões de distribuição espacial e temporal nos arenitos destas bacias.

**Palavras-Chave:** Bacias, Margem Equatorial Brasileira, Pará-Maranhão, Barreirinhas, São Luís, Bragança-Viseu, diagênese, arenitos, porosidade.

## ABSTRACT

Diagenetic processes promote porosity reduction, generation and redistribution in sandstones and influence their hydrocarbon reservoir quality. Currently, there is a great interest in the exploration of Brazilian Equatorial Margin basins. However, very few studies about the diagenesis of the sandstones of these basins were published. A petrographic study was developed in order to recognize the diagenetic processes and patterns in the sandstones of the Pará-Maranhão, São Luís, Bragança-Viseu and Barreirinhas basins. Pará-Maranhão Basin sandstones have an arkose original detrital composition, and their main diagenetic processes were: authigenic and infiltrated clay coatings formation, kaolinite and vermiculite expansion and replacement of micas, kaolinite precipitation, quartz and albite overgrowths, feldspar albitization, calcite, dolomite, siderite, pyrite and titanium minerals as grain-replacing and pore-filling cement, chlorite replacement of micas, grain coats, expansive clays and kaolinite booklets and precipitation as fringes over grain coating clays. The main porosity-reducing processes were compaction, and quartz and calcite cementation. The main diagenetic processes in the Barreirinhas Basin lithic arkoses and subarkoses were: infiltration and neoformation of clay coatings, micas expansion by lamellar kaolinite, feldspar-replacing and intergranular pore-filling kaolinite, quartz and albite cementation, feldspar albitization, compaction of low degree metamorphic rock fragments into pseudomatrix, precipitation of calcite, dolomite and pyrite as grain-replacing and pore-filling cement, replacing of heavy minerals by titanium oxides, and chlorite fringes precipitation and clay coatings and mica replacement. The main porosity-reducing processes were calcite cementation in the subarkoses, and compaction and quartz cementation in lithic arkoses. Quartzarenites in this basin were rapidly and pervasively cemented by slightly ferroan dolomite, losing all porosity. The main diagenetic processes in the arkose and rare lithic arkose sandstones of the São Luís and Bragança-Viseu basins were: neoformation and infiltration of clay coatings, expansion and replacement of mica by kaolinite and vermiculite, precipitation of kaolinite, quartz and albite cementation, feldspar albitization, compaction of mud intraclasts into pseudomatrix, precipitation of illite rims, precipitation of calcite, dolomite, kaolinite, smectite, hematite, titanium oxides and pyrite as pore-filling cements and replacing grains, chlorite formation as mica and clay coating replacement and fringes. The main porosity modification processes were the compaction of mud intraclasts and the dissolution of feldspars and heavy minerals. Abundant detrital epidotes in all basins indicate hydrothermal alteration in the source-rocks. The results obtained in this dissertation shall contribute to the understanding of the impacts of diagenetic processes on porosity, and their spatial and temporal distribution in sandstones of these basins.

**Key-words:** Basins, Brazilian Equatorial Margin, Pará-Maranhão, Barreirinhas, São Luís, Bragança-Viseu, diagenesis, sandstones, porosity.

## LISTA DE ABREVIATURAS

W	Oeste.
N	Norte.
S	Sul.
km	Quilômetros.
m	Metros.
°C	Graus centígrados.
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura.
BSE	Elétrons Retroespalhados ( <i>Backscatter Electrons</i> ).
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> .
XP	Polarizadores cruzados.
//P	Polarizadores descruzados.
pH	Medida de acidez e alcalinidade em uma solução aquosa.
Fe	Ferro.
Mg	Magnésio.
Al <sup>3+</sup>	Íon de alumínio.
Na <sup>+</sup>	Íon de sódio.
Ca <sup>2+</sup>	Íon de cálcio.
Fe <sup>2+</sup>	Íon de ferro divalente.
Mg <sup>2+</sup>	Íon de magnésio.
K <sup>+</sup>	Íon de potássio.
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Íon de bicarbonato.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono.
SiO <sub>2</sub>	Sílica.
C	Clorita.
S	Esmectita.
I	Ilita.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de localização mostrando as bacias da Margem Equatorial brasileira, com as principais feições estruturais. Os limites entre as bacias correspondem às linhas vermelhas (Mohriak, 2003).....19
- Figura 2: Carta crono-estratigráfica da Bacia do Pará-Maranhão, apresentando o preenchimento da bacia e informações diversas sobre suas principais fases evolutivas (Soares *et al.*, 2007). Em vermelho, a seção enfocada neste trabalho.....21
- Figura 3: Carta crono-estratigráfica da Bacia de Barreirinhas, apresentando o preenchimento da bacia e informações diversas sobre suas principais fases evolutivas (Trosdorf Jr. *et al.*, 2007). Em vermelho, está destacada a seção enfocada neste trabalho. ....23
- Figura 4: Carta crono-estratigráfica das Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova, apresentando o preenchimento das bacias e informações diversas sobre suas principais fases evolutivas (Zalán, 2007). Em vermelho, está destacada a seção enfocada neste trabalho. ....25
- Figura 5: Diagrama demonstrando a relação entre os estágios diagenéticos (Rodrigues, 2012, modificado de Worden & Burley, 2003).....27
- Figura 6: Diagrama de pressão e temperatura mostrando o limite entre a diagênese, em cinza, e o metamorfismo. As linhas desenhadas representam os gradientes geotérmicos de 10°C e 30°C e são característicos de ambientes de cráton estável e rifte, respectivamente (Rodrigues, 2012, modificado de Worden & Burley, 2003). ....28
- Figura 7: Diagrama ilustrando o método Gazzi-Dickinson de separação dos constituintes primários (Rodrigues, 2012, modificado de Zuffa, 1985). ....31
- Figura 8: Aspectos texturais e estruturais dos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Arenito fino com estrutura maciça e orientação sub-paralela dos grãos (polarizadores descruzados //P); B) Laminação plano-paralela formada pela concentração de micas (//P); C) Laminação cruzada acanalada marcada por nível de concentração de pirita (//P); D) Bioturbação (seta vermelha, //P); E) Arenito de estrutura maciça, grosso e mal selecionado (//P); F) Arenito médio micáceo com estrutura maciça e orientação sub-paralela dos grãos (//P). ....36
- Figura 9: Composição detrítica original e atual dos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão plotadas em diagramas Folk (1968). Observar o

deslocamento para composições mais quartzosas no diagrama Atual pela albitização e substituição por caulinita e carbonatos.....38

Figura 10: Principais aspectos de composição detrítica nos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Grãos de plagioclásios maclados (setas vermelhas) e microclínio (seta amarela, polarizadores cruzados XP); B) Fragmento de rocha metamórfica com epidoto, albita e sericita (XP); C) Lamelas de biotita (setas vermelhas, XP); D) Intraclasto lamoso (XP); E) Pelóide fosfático (polarizadores descruzados //P); F) Fragmento carbonoso (//P).....39

Figura 11: Principais feições diagenéticas nos arenitos estudados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Finas cutículas autigênicas substituídas por clorita (polarizadores descruzados //P); B) Cutículas de argila infiltrada cobrindo grãos e descoladas (setas vermelhas), substituídas por clorita e cobertas por franjas de clorita (setas amarelas, polarizadores cruzados XP); C) Cutícula de argila infiltrada cloritizada descolada (seta vermelha) com franjas de clorita cobrindo a cutícula (setas amarelas) e calcita preenchendo porosidade cobrindo franjas de clorita (cinza mais claro, elétrons retro-espalhados - BSE); D) Vermiculita substituindo e expandindo biotita (XP); E) Agregados de caulinita (seta azul) cobrindo crescimentos de albita (setas vermelhas, BSE); F) Agregados de caulinita (seta azul) substituindo feldspato parcialmente albitizado (seta amarela) com crescimentos internos de albita (seta vermelha, XP). .....42

Figura 12: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Caulinita substituindo e expandindo muscovita (seta vermelha) e clorita substituindo caulinita (seta amarela, elétrons retro-espalhados - BSE); B) Clorita substituindo pseudomorficamente lamelas de caulinita expansiva (polarizadores cruzados XP); C) Crescimentos contínuos de quartzo marcados pela presença de inclusões fluídas (setas vermelhas, XP); D) Grão de plagioclásio substituído por albita microcristalina (XP); E) Substituição de feldspato por K-feldspato autigênico (cinza mais claro, BSE); F) Crescimento de albita sobre grão de plagioclásio (seta vermelha, XP).....44

Figura 13: Feições diagenéticas de menor ocorrência nos arenitos da Bacia do Pará-Maranhão. A) Calcita poiquilotópica preenchendo porosidade intergranular e substituindo feldspato (seta vermelha, polarizadores cruzados XP); B) Siderita macrocristalina (oxidada, seta amarela) e dolomita blocosa (seta vermelha) preenchendo poros intergranulares e substituindo feldspatos (XP); C) Dolomita zonada (seta vermelha) e siderita-magnesita (seta azul) preenchendo poros intergranulares e substituindo albita (seta amarela, elétrons retroespalhados - BSE);

D) Agregado de pirita microcristalina substituindo grãos (polarizadores descruzados //P); E) Óxidos de titânio microcristalinos substituindo grãos de minerais pesados (//P); F) Óleo preenchendo poros intergranulares (setas vermelhas), cobrindo cutículas e franjas de clorita (setas amarelas) e impregnando caulinita em livrinhos (seta azul, //P). .....46

Figura 14: Principais feições de porosidade e empacotamento da Bacia do Pará-Maranhão. A) Arenito com abundante infiltração de argila (polarizadores descruzados //P); B) Porosidade intergranular (seta vermelha) extremamente reduzida por compactação, cimentação por projeção prismática de quartzo (seta amarela) e franjas de clorita (seta azul, //P); C) Porosidade de dissolução de feldspato com crescimentos internos e externos de albita preservados (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); D) Dissolução de granada (setas vermelhas, //P). .....48

Figura 15: Aspectos texturais e estruturais dos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Arenito fino maciço, bem selecionado, com orientação sub-paralela dos grãos (polarizadores descruzados //P); B) Laminação irregular formada pela concentração de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau deformados pela compactação (//P); C) Arenito médio maciço com orientação caótica dos grãos (//P); D) Arenito médio mal selecionado (//P). .....49

Figura 16: Composição detrítica original e atual dos arenitos analisados da Bacia do Barreirinhas plotadas em diagramas Folk (1968). Observar a grande variação composicional destes arenitos, assim como a modificação dos arcósios líticos para litoarenitos feldspáticos pela intensa albitização de feldspatos.....51

Figura 17: Principais aspectos de composição detrítica nos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Fragmento de filito (polarizadores cruzados XP); B) Fragmento de ardósia (XP); C) Clorita detrítica (XP); D) Grãos de titanita (setas vermelhas) e epidoto (setas amarelas, XP); E) Fragmento de silcrete formada por calcedônia fibro-radiada (XP); F) Bioclasto de foraminífero bentônico (polarizadores descruzados //P). .....52

Figura 18: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Cutículas de argila autigênica (setas vermelhas) esmagadas entre os grãos pela compactação intensa (polarizadores cruzados XP); B) Cutículas de argila infiltrada (seta vermelha, polarizadores descruzados //P); C) Muscovita parcialmente substituída e expandida por caulinita (XP); D) Agregados de livrinhos de caulinita preenchendo poro intergranular (XP); E) Crescimentos externos de quartzo (setas vermelhas), identificáveis pela presença de franjas de clorita entre os



grãos e os crescimentos (seta amarela) e pelos seus contatos geométricos (XP); F) Plagioclásio fraturado e albitizado (XP). .....55

Figura 19: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Pseudomatriz lítica formada pela compactação de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau (setas vermelhas; polarizadores cruzados XP); B) Calcita poiquilotópica preenchendo porosidade intergranular (XP); C) Dolomita blocosa levemente ferrosa preenchendo poros intergranulares (polarizadores descruzados //P); D) Zonação da dolomita com núcleo empobrecido em ferro (cinza mais escuro), fase final rica em ferro (cinza mais claro) fase intermediária com intercalação de membros finais (elétrons retroespalhados - BSE); E) Pirita microcristalina engolfada por dolomita zonada (setas vermelhas, BSE); F) Concreção de pirita corrosiva preenchendo porosidade intergranular e substituindo dolomita (azulada, //P). .....58

Figura 20: Outras feições diagenéticas nos arenitos estudados da Bacia de Barreirinhas. A) Óxidos de titânio (seta amarela) substituindo mineral pesado (seta vermelha, XP+placa  $\frac{1}{4} \lambda$ ); B) Cutículas e franjas de clorita (setas vermelhas) cobertas por crescimentos externos de quartzo (setas amarelas, XP+placa  $\frac{1}{4} \lambda$ ); C) Betume (preto) cobrindo franjas de clorita (setas vermelhas, polarizadores descruzados //P); D) Vermiculita expandindo biotita (seta vermelha, polarizadores cruzados, XP). .....59

Figura 21: Principais feições de porosidade e empacotamento dos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Porosidade intergranular original preservada (polarizadores cruzados XP); B) Porosidade de dissolução da calcita (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); C) Porosidade de dissolução de granada (setas vermelhas, //P); D) Fragmento de ardósia deformada pela compactação (seta vermelha, XP). .....60

Figura 22: Aspectos texturais e estruturais nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Arenito fino de estrutura maciça (polarizadores descruzados, //P); B) Estratificação paralela marcada pela intercalação de areia e silte (//P); C) Laminação irregular marcada por níveis de concentração de intraclastos lamosos (//P); D) Matriz de fluidização (//P); E) Nível de cataclase, com formação de pseudomatriz síltica (cataclástica, //P); F) Arenito grosso, maciço, com orientação caótica dos grãos (//P). .....62

Figura 23: Composição detrítica original e atual dos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu plotadas em diagramas Folk (1968).

Observar o deslocamento para composições mais quartzosas e líticas no diagrama Atual pela albitização e dissolução de feldspatos e substituição por carbonatos. ...64

Figura 24: Principais aspectos de composição detrítica nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Grãos de plagioclásio (seta vermelha, polarizadores cruzados XP); B) Epidoto em fragmento de rocha (seta vermelha, XP); C) Lamela de biotita expandida por calcita (XP); D) Grão de turmalina detrítica (polarizadores descruzados, //P); E) Intraclasto lamoso (//P); F) Pelóide argiloso indiferenciado (//P).....65

Figura 25: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Cutículas de argila infiltrada, parcialmente substituídas por hematita (setas vermelhas, polarizadores descruzados //P); B) Argila infiltrada como agregados de orientação caótica preenchendo porosidade intergranular (polarizadores cruzados XP); C) Lamelas de biotita substituídas e expandidas por vermiculita (//P), D) Caulinita Preenchendo porosidade intergranular (polarizadores cruzados XP); E) Albita microcristalina substituindo feldspato (aspecto “vacuolizado”) parcialmente dissolvido (XP); F) Crescimentos de feldspato potássico sobre grão de microclínio (setas vermelhas, XP). .....68

Figura 26: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Pseudomatriz formada pela compactação de intraclastos lamosos (seta vermelha, polarizadores descruzados //P); B) Franjas de illita fibrosa cobrindo cutículas de argila autigênica (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); C) Calcita poiquilotópica preenchendo poros intergranulares (XP); D) Calcita ferrosa preenchendo parcialmente porosidade intergranular (//P); E) Dolomita poiquilotópica preenchendo porosidade intergranular e substituindo grãos (XP); F) Pirita microcristalina substituindo constituintes primários indiferenciados (setas vermelhas, //P).....71

Figura 27: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Franjas de esmectita cobrindo cutícula de esmectita autigênica (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); B) Hematita microcristalina substituindo cutículas de argila infiltrada e grão de feldspato indiferenciado (setas vermelhas, polarizadores descruzados //P); C) Óxidos de titânio (seta amarela) substituindo mineral pesado (seta vermelha) parcialmente dissolvido (//P); D) Franjas de clorita cobrindo cutículas de argila autigênica (setas vermelhas, //P); E) Siderita microcristalina substituindo e expandindo biotita (//P); F) Cristal poiquilotópico de analcima (“mancha”) preenchendo poros intergranulares (//P).....72

Figura 28: Principais aspectos de porosidade nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Porosidade intergranular primária preservada (polarizadores descruzados //P); B) Porosidade de dissolução de plagioclásio (polarizadores cruzados, XP); C) Porosidade de dissolução de epidoto (amarelo esverdeado) e feldspato em fragmento de rocha plutônica (//P); D) Porosidade de contração de intraclasto lamoso (//P). .....74

Figura 29: Diagramas Dickinson (1985), onde Qm representa a quantidade de quartzo monocristalino, Lt a soma de litoclastos metamórficos, sedimentares, vulcânicos e quartzo policristalino e F os feldspatos totais. As Bacias apresentam uma distribuição relativamente homogênea entre os vértices Qm e F. ....76

Figura 30: Fluxograma dos principais processos diagenéticos e seus resultados na qualidade dos reservatórios dos arenitos da Bacia do Pará-Maranhão. Os principais processos impactantes na porosidade encontram-se ressaltados. ....81

Figura 31: Diagrama de Ehrenberg (1989), mostrando os efeitos da compactação e cimentação sobre a porosidade original nos arenitos de cada Bacia. ....82

Figura 32: Fluxograma dos principais processos diagenéticos e seus resultados na qualidade dos reservatórios dos arenitos da Bacia de Barreirinhas. Os principais processos impactantes na porosidade encontram-se ressaltados. ....86

Figura 33: Fluxograma dos principais processos diagenéticos e seus resultados na qualidade dos reservatórios das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. Os principais processos impactantes na porosidade encontram-se ressaltados. ....89

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Geologia e localização da área .....	17
1.1.1	Bacia do Pará-Maranhão .....	19
1.1.2	Bacia de Barreirinhas.....	22
1.1.3	Bacias de São Luís e Bragança-Viseu.....	24
1.2	Diagênese Clástica: Estado da Arte.....	26
1.3	Objetivos.....	29
2	Metodologia .....	30
2.1	Petrografia Quantitativa .....	30
2.2	Fotomicrografias .....	31
2.3	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	32
2.4	Integração dos dados.....	33
3	Resultados .....	34
3.1	Bacia do Pará-Maranhão .....	34
3.1.1	Estrutura, textura e fábrica .....	34
3.1.2	Composição detrítica .....	37
3.1.3	Diagênese.....	40
3.1.4	Compactação.....	47
3.1.5	Porosidade.....	47
3.2	Bacia de Barreirinhas.....	48
3.2.1	Estruturas, texturas e fábrica .....	48
3.2.2	Composição detrítica .....	49
3.2.3	Diagênese.....	53
3.2.4	Compactação.....	59
3.2.5	Porosidade.....	60
3.3	Bacias de São Luís e Bragança-Viseu .....	61
3.3.1	Estruturas, texturas e fábrica .....	61
3.3.2	Composição detrítica .....	63
3.3.3	Diagênese.....	66
3.3.4	Compactação.....	73
3.3.5	Porosidade.....	73
4	Discussão .....	75
4.1	Proveniência .....	75
4.2	Processos e padrões diagenéticos.....	77
4.2.1	Bacia do Pará-Maranhão .....	77

4.2.2	Bacia de Barreirinhas.....	83
4.2.3	Bacias de São Luís e Bragança-Viseu.....	87
5	Conclusões .....	90
6	Referências Bibliográficas.....	92
7	Anexos (CD) .....	97

## **1 INTRODUÇÃO**

Processos diagenéticos promovem a redução, geração e redistribuição da porosidade e permeabilidade dos arenitos, influenciando diretamente sua qualidade como reservatórios de hidrocarbonetos. As bacias da Margem Equatorial Brasileira concentram atualmente grande interesse para a exploração de hidrocarbonetos. Contudo, são muito raros os estudos sobre a diagênese dos arenitos dessas bacias, sendo praticamente o único trabalho publicado especificamente nesta área o de Rossetti e Truckenbrodt (1992) sobre a Formação Barro Duro da Bacia de Barreirinhas. A compreensão dos processos diagenéticos atuantes nos arenitos cretácicos da Margem Equatorial Brasileira e de seus padrões de distribuição temporal, geográfica e estratigráfica deverá contribuir para a diminuição dos riscos de exploração desta extensa área e para a caracterização e predição da qualidade dos reservatórios de hidrocarbonetos.

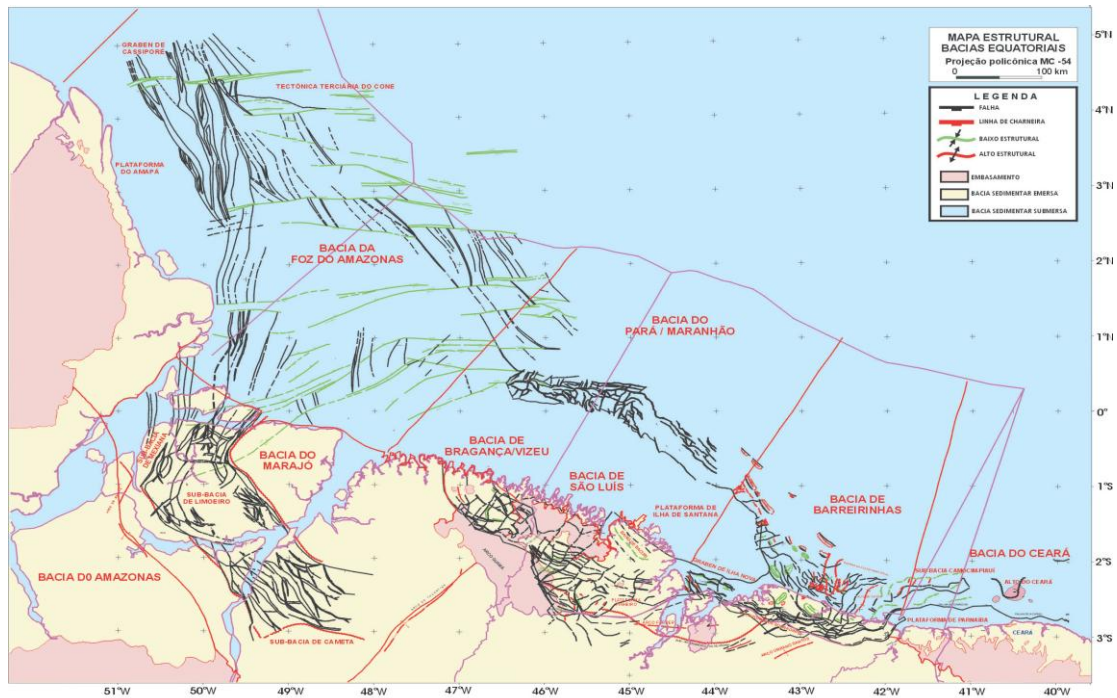
### **1.1 Geologia e localização da área**

A Margem Equatorial Brasileira contempla a região costeira e a plataforma continental dos estados do Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, e contempla as Bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Marajó, Bragança-Viseu, São Luís, Ilha Nova, Ceará e Potiguar. A Figura 1 apresenta um mapa de localização das bacias citadas. As unidades de enfoque no presente trabalho são o Grupo Canárias na Bacia do Pará-Maranhão, as formações Barro Duro e Bom Gosto na Bacia de Barreirinhas, e as formações Bragança e Grajaú nas Bacias de São Luís e Bragança-Viseu, representativas do intervalo entre o Barremiano e o Albiano, do Cretácio inferior.

As bacias da Margem Equatorial Brasileira apresentam padrões estruturais e dinâmica de rifteamento diferentes de bacias rifte convencionais devido ao seu

regime tectônico transcorrente (Milani & Thomaz F°, 2000). Estilos estruturais característicos de um rifteamento transtensivo resultaram em sub-bacias apresentando fluxos térmicos, subsidência e distribuição de fácies, magmatismo, eventos de soerguimento e episódios de deformação contrastantes entre si. Algumas bacias apresentam subsidência contínua, enquanto outras sofreram importantes eventos de soerguimento e inversão, causando significativas lacunas em seu registro estratigráfico (Milani *et al.*, 2000).

De maneira geral, a evolução do Oceano Atlântico Equatorial se desenvolveu em três episódios distensivos separados (Soares Jr. *et al.*, 2008): o primeiro ocorreu no Triássico, vinculado à formação do Atlântico Central e resultou na formação do Gráben Calçone da Bacia da Foz do Amazonas; o segundo evento é relacionado com os processos distensivos da formação do Atlântico Equatorial, com sentido de rifteamento NW para SE, e formou o Gráben Cassiporé da Bacia da Foz do Amazonas e as Bacias de Marajó, Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova; por fim, o terceiro evento é vinculado com a evolução do processo de abertura do Oceano Atlântico Equatorial, com sentido de SE para NW, a partir do extremo leste da Placa Sul-Americana formando as Bacias de Potiguar, Ceará, Barreirinhas e Pará-Maranhão (Soares Jr. *et al.*, 2008).



**Figura 1: Mapa de localização mostrando as bacias da Margem Equatorial brasileira, com as principais feições estruturais. Os limites entre as bacias correspondem às linhas vermelhas (Mohriak, 2003).**

### 1.1.1 Bacia do Pará-Maranhão

A Bacia do Pará-Maranhão é uma bacia exclusivamente marinha, localizada entre os meridianos 47° W e 44° W e os paralelos 1° N e 1° S, localizada na margem dos estados de mesmo nome (Soares *et al*, 2007). A bacia encontra-se limitada a sudeste pela Bacia de Barreirinhas, a noroeste pela Bacia da Foz do Amazonas e a oeste pela Plataforma de Ilha de Santana. Os dois primeiros limites são arbitrários, uma vez que não existem feições tectônicas significativas para sua separação, e o último constitui uma barreira de embasamento raso a partir da qual a bacia se estende, com uma área aproximada de 48.000 km<sup>2</sup>, atingindo a cota batimétrica de 3.000 m. A Zona de Fratura São Paulo se encontra aproximadamente no limite norte da bacia, projetando-se para o interior do continente, através de dois ramos bem definidos (Soares *et al.*, 2007).

O preenchimento da bacia é dividido em duas supersequências. A supersêquência rifte (Soares *et al*, 2007, Soares Jr. *et al*, 2008) corresponde aos dois eventos de rifteamento que ocorreram no Albiano e no Aptiano, respectivamente, e é caracterizada pela sedimentação flúvio/deltaica/lacustre do Grupo Canárias, com depósitos carbonáticos do Grupo Caju subordinados (Milani &



Thomaz Filho, 2000). Entre as duas sequências rifte, encontram-se depósitos de calcilutitos e folhelhos lagunares, depositados em uma bacia do tipo sag pertencentes ao Grupo Codó (Soares *et al.*, 2007). A supersequência drifte pode ser subdividida em dois intervalos estratigráficos: um predominantemente transgressivo, caracterizado pelos calcarenitos bioclásticos/oncolíticos, calcilutitos, margas, folhelhos e clásticos do Grupo Caju, seguido pelas sequências siliciclásticas compostas pelos arenitos quartzosos da Formação Areinhas e os folhelhos e siltitos da Formação Travosas (Grupo Humberto dos Campos), iniciado no Barremiano e finalizado no Neo-Albiano; a partir do Maastrichtiano, inicia-se uma extensa plataforma carbonática caracterizada pelos calcirruditos, calcarenitos e calcilutitos da Formação Ilha de Santana, de tendência regressiva a agradacional, marcando o segundo intervalo estratigráfico (Soares *et al.*, 2007). A carta cronoestratigráfica da bacia encontra-se representada na Figura 2. A arquitetura da bacia é complexa, devido a eventos ligados à tectônica gravitacional, ocorridos durante a fase drifte e manifestados por fluxos de massa em depósitos distais da margem continental. Zalán (2001) chamou este estilo de deformação de *gravitational fold-and-thrust belts* (cinturão gravitacional de dobras e empurrões).

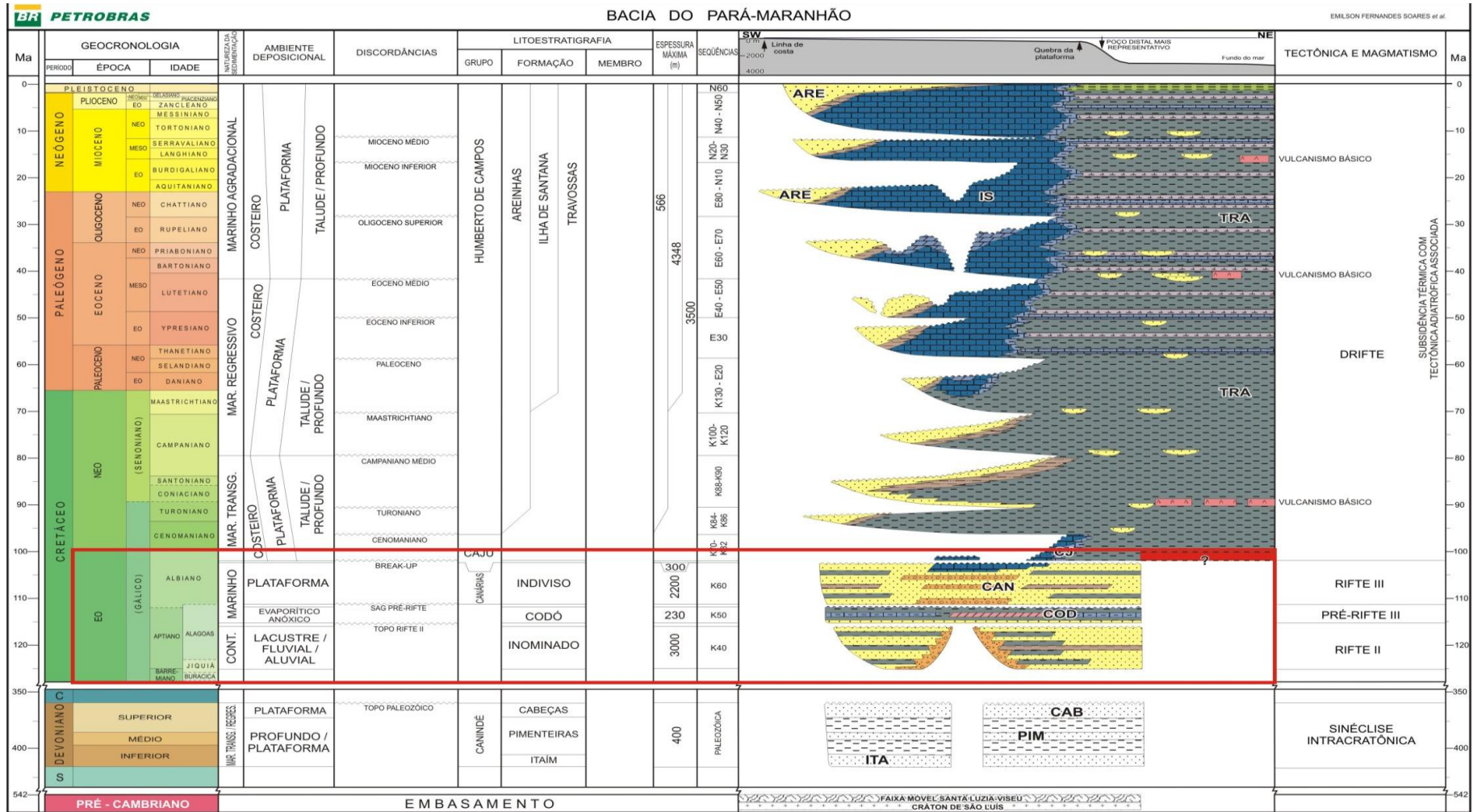


Figura 2: Carta crono-estratigráfica da Bacia do Pará-Maranhão, apresentando o preenchimento da bacia e informações diversas sobre suas principais fases evolutivas (Soares et al., 2007). Em vermelho, a seção enfocada neste trabalho.

### 1.1.2 Bacia de Barreirinhas

A Bacia de Barreirinhas encontra-se entre os meridianos 44° W e 42° W e os paralelos 0° e 3° S na costa do estado do Maranhão. A bacia tem uma área aproximada de 46.000 km<sup>2</sup>, sendo 8.500 km<sup>2</sup> emersos, atingindo a cota batimétrica de 3.000 m. A leste, a bacia é separada da sub-bacia de Piauí-Camocim (Bacia do Ceará) pelo Alto de Tutóia e o seu limite com a bacia do Pará-Maranhão a noroeste é arbitrário, sem feições tectônicas que justifiquem tal separação. A bacia encontra-se limitada por falhas de borda ao sul, separando-a da Plataforma do Sobradinho, e a oeste a Plataforma Ilha de Santana constitui uma barreira, a partir da qual a bacia se estende para águas mais profundas (Trosdorf Jr. *et al.*, 2007).

A bacia é dividida por Mohriak (2003) em três supersequências: pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte. A primeira engloba as rochas ígneas e sedimentares da Bacia do Parnaíba (Paleozóico), as rochas sedimentares da Formação Pastos Bons e da Formação Corda (Neo-Jurássico e Eo-Cretáceo) e as rochas ígneas da Formação Sardinha (Neocomiano). A supersequência rifte engloba dois processos de rifteamento de idade Albiana e Aptiana caracterizados pelos depósitos de leques deltaicos do Grupo Canárias, depositados em ambiente marinho, e os carbonatos neríticos do Grupo Caju. O Grupo Canárias é composto pelos arenitos médios e grossos das Formações Barro Duro e Bom Gosto, respectivamente, e os folhelhos das Formações Arpoador e Tutóia. O Grupo Caju é dividido entre os carbonatos bioclásticos e oncolíticos da Formação Bonfim e os calcilititos da Formação Preguiça. Entre os dois estágios de rifteamento, encontra-se registrada uma bacia do tipo sag, representada pela Formação Codó.

Feijó (1994) divide a supersequência drifte em três estágios: o primeiro com sedimentação predominantemente carbonática representada pelo Grupo Caju, durou do Neo-Albiano ao Cenomaniano; o segundo apresenta sedimentação predominantemente siliciclástica em bacia de margem passiva típica, sendo representada pelo Grupo Humberto dos Campos e durando do Turoniano ao Oligoceno; o terceiro e último estágio encontra-se associado com a transgressão marinha do mar de Pirabas no Mioceno e é caracterizado pela volta da sedimentação carbonática com a Formação Pirabas. Após o último evento de afogamento representado pelo terceiro estágio da supersequência drifte, inicia-se uma fase progradante, com a deposição dos sedimentos da Formação Barreiras (Rossetti, 2001). A Figura 3 apresenta a carta crono-estratigráfica da Bacia de Barreirinhas.



### 1.1.3 Bacias de São Luís e Bragança-Viseu

A Bacia de São Luís encontra-se no extremo NW do estado do Maranhão e é limitada ao norte pela Plataforma de Ilha de Santana e pelo Cráton São Luís/Cinturão Orogênico Gurupi, ao sul pelo arco Ferrer-Urbano Santos, que a separa da Bacia de Grajaú, a leste pelo Alto de Curupu, separando-a da Bacia de Ilha Nova. A Bacia de Bragança-Viseu encontra-se no NE do estado do Pará e é limitada a norte pela Plataforma da Ilha de Santana, a sudeste pelo Arco Gurupi, separando-a da Bacia de São Luís, a sul pelo Cráton de São Luís/Cinturão Orogênico Gurupi e Zona de Cisalhamento Tentugal, e a oeste pela Região de Marajó Setentrional (Soares Jr., 2002).

As Bacias de São Luís e Bragança-Viseu são bacias transtensionais desprovidas de sedimentação pós-rifte, devido à ausência de uma fase de subsidência termica. O preenchimento destas bacias é dividido em uma fase pré-rifte e uma rifte. O pré-rifte é caracterizado pelos arenitos e siltitos aluviais da Formação Bragança, os arenitos fluviais da Formação Grajaú e os folhelhos betuminosos da Formação Codó. O preenchimento da fase rifte é caracterizado pelos arenitos, conglomerados, siltitos e folhelhos fluviais intercalados com arenitos de ambiente marinho dominado por ondas da Formação Itapecuru (Zalán, 2007). Devido a sua proximidade geográfica e evolução tectono-estratigráfica semelhantes, estas Bacias encontram-se descritas de maneira conjunta. Os principais estágios de preenchimento das bacias encontram-se representados na Figura 4.

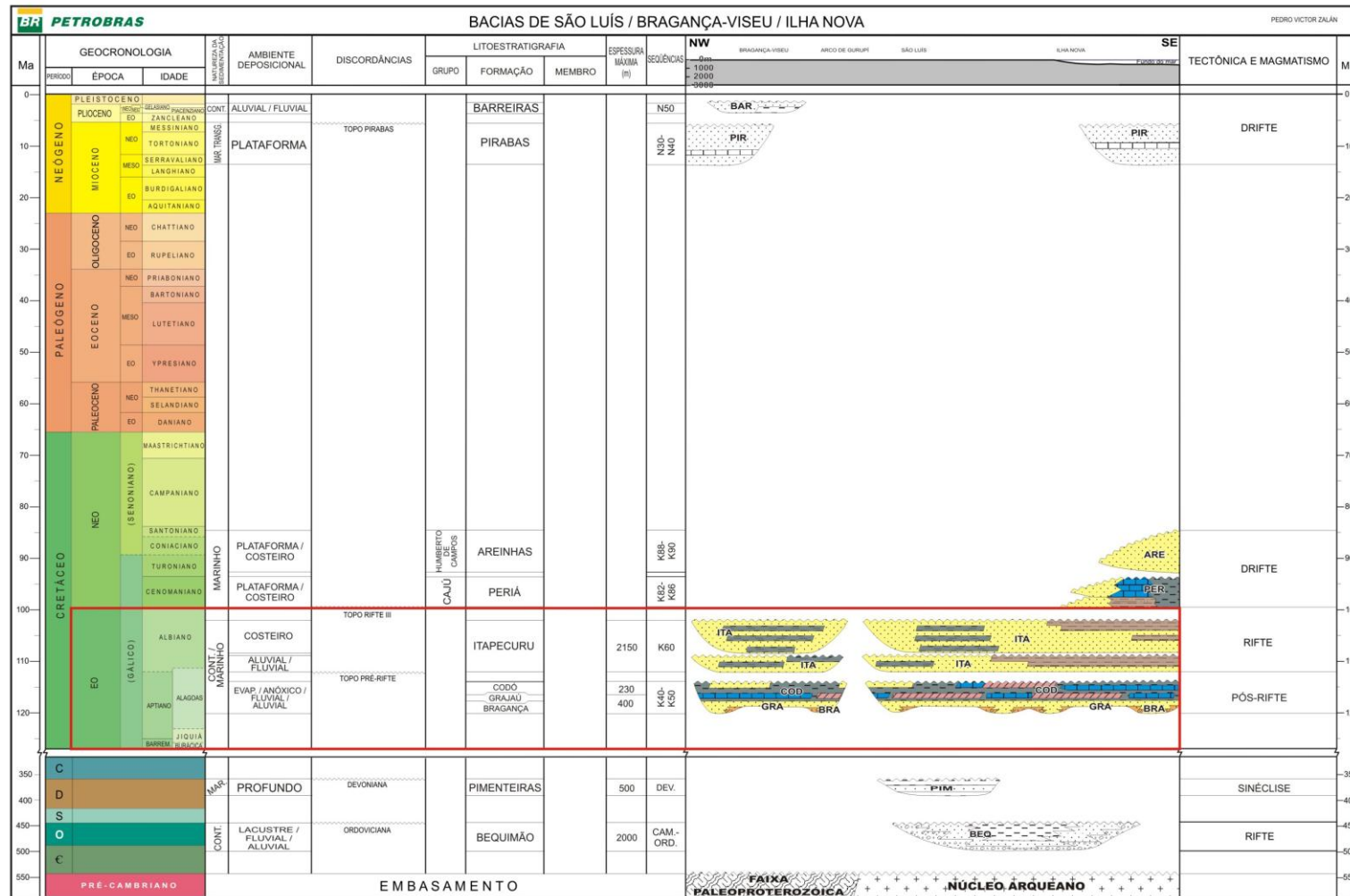


Figura 4: Carta crono-estratigráfica das Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova, apresentando o preenchimento das bacias e informações diversas sobre suas principais fases evolutivas (Zalán, 2007). Em vermelho, está destacada a seção enfocada neste trabalho.



## 1.2 Diagênese Clástica: Estado da Arte

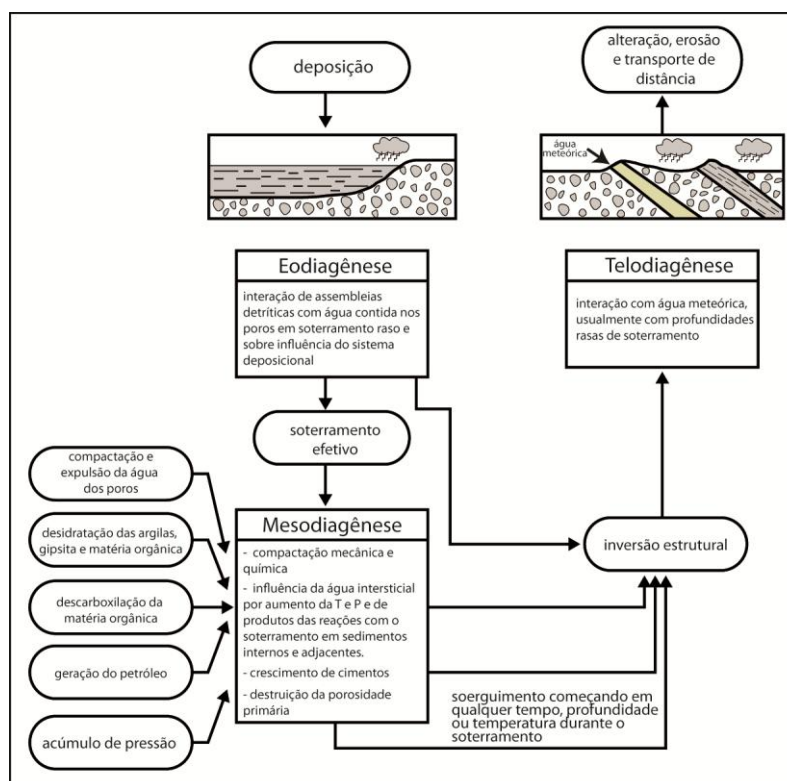
A diagênese compreende diversos processos físicos, químicos e biológicos que afetam os sedimentos após sua deposição, envolvendo reações entre os sedimentos e as águas intersticiais. Durante a história evolutiva dos sedimentos, a diagênese evolui conforme o ambiente superficial e variações de temperatura, pressão e composição química dos fluidos durante o soterramento, promovendo, portanto, um amplo espectro de modificações pós-deposicionais nos sedimentos. A distribuição espacial e temporal destas modificações é de particular interesse, uma vez que elas exercem um forte controle sobre a qualidade dos reservatórios de petróleo.

As alterações diagenéticas podem ocorrer em 3 estágios: eodiagênese, mesodiagênese e telodiagênese (Figura 5). Essa divisão foi sugerida por Choquette & Pray (1970) para a diagênese de rochas carbonáticas, mas é aplicável a sedimentos clásticos, uma vez que os mesmos processos fundamentais vigoram em ambos.

A eodiagênese engloba todos os processos que ocorram na superfície ou próximo a ela, onde a química das águas intersticiais é controlada, principalmente, pelo ambiente deposicional, sob baixas pressões e temperaturas. Em alguns casos, este regime tem sua química controlada por águas meteóricas, mas também pode ser promovido por águas marinhas (Worden & Burley, 2003). As alterações diagenéticas são, portanto, dependentes das águas intersticiais deposicionais, sendo muitas das reações promovidas ou mediadas por bactérias.

A mesodiagênese corresponde a processos que não estão mais sob influência de fluidos superficiais, mas de fluidos modificados pelas reações com os minerais, e pelas pressões e temperaturas crescentes, durante o soterramento crescente. O limite entre estes os estágios eodiagenético e mesodiagenético pode ser difícil de se estabelecer segundo a definição de Choquette & Pray (1970), que o posiciona como correspondente a um “soterramento efetivo”, ou seja, ao efetivo isolamento com respeito aos fluidos superficiais. Por isso, Morad *et al.* (2000) propõe um limite a 2 km de profundidade, correspondente a cerca de 70°C, enquanto Worden & Burley (2003) sugerem um limite de soterramento a 1-2 km de profundidade (30 e 70°C, respectivamente) (Figura 6). O limite da mesodiagênese com os estágios iniciais do metamorfismo de baixo grau ocorre a profundidades equivalentes a 200-250°C.

A telodiagênese ocorre em rochas que foram submetidas à mesodiagênese antes de terem sido novamente expostas à influência de águas superficiais, seja através do soerguimento e exposição, caracteristicamente com erosão de parte da seção sedimentar e formação de discordâncias, seja pela penetração profunda de águas meteóricas através de grandes falhas e zonas de fraturas. Estas águas são capazes de causar mudanças geoquímicas significativas, desestabilizando minerais formados durante a mesodiagênese e formando novos constituintes estáveis nas novas condições.

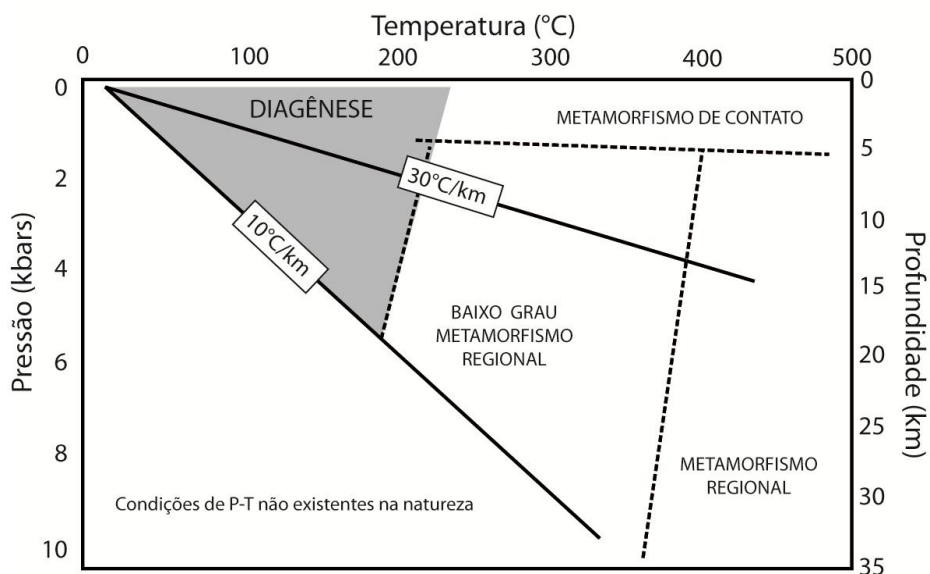


**Figura 5: Diagrama demonstrando a relação entre os estágios diagenéticos (Rodrigues, 2012, modificado de Worden & Burley, 2003)**

Segundo De Ros (1996), os fatores mais importantes de controle sobre a diagênese clástica, além da composição das águas intersticiais, são: a composição primária dos sedimentos, a composição dos componentes diagenéticos precoces, a temperatura, a pressão, o fluxo dos fluidos e o tempo. A alteração química dos constituintes primários é impactante sobre os processos diagenéticos posteriores, uma vez que disponibilizam, através da decomposição dos grãos originais, íons para a formação dos constituintes diagenéticos e fornece núcleos para sua precipitação. A composição dos fluidos é controlada inicialmente pelo ambiente



deposicional, mas é posteriormente modificada por reações da matéria orgânica e argilominerais e pela interação com os materiais primários com o avanço do soterramento.



**Figura 6: Diagrama de pressão e temperatura mostrando o limite entre a diagênese, em cinza, e o metamorfismo. As linhas desenhadas representam os gradientes geotérmicos de 10°C e 30°C e são características de ambientes de cráton estável e rifte, respectivamente (Rodrigues, 2012, modificado de Worden & Burley, 2003).**

A história de soterramento da bacia determina as condições de temperatura às quais são submetidos os sedimentos, sendo a profundidade, o fluxo de calor e a condutividade térmica os principais parâmetros desta evolução (De Ros, 1996). A evolução da pressão com o aumento da profundidade e com o tectonismo é outra importante variável para a porosidade e permeabilidade dos reservatórios. Conforme há o aumento da pressão, a compactação mecânica e química tornam-se progressivamente mais intensas, promovendo a redução da porosidade das potenciais rochas-reservatório.

Todos os processos citados acima são influenciados pela história de soterramento da bacia, que determina o tempo em que a rocha passou pelas condições específicas de pressão, temperatura, e química dos fluidos. Portanto, a previsão da qualidade dos reservatórios clásticos depende de uma complexa rede de fatores inter-relacionados que influenciam na distribuição e volume dos constituintes diagenéticos e da compactação, impactantes na porosidade e permeabilidade das rochas.

Artigos sobre o impacto da diagênese na qualidade de reservatórios das bacias da Margem Equatorial são extremamente escassos. O trabalho de Rossetti & Truckenbrodt (1992) caracteriza a diagênese e as fácies sedimentares da Formação Barro Duro. A Formação representa uma sequência de 2000 m de espessura na bacia de Barreirinhas, constituída por arenitos e subordinadamente por lutitos, e é interpretada como depósitos fluvio/deltaicos e marinhos. Diversos produtos diagenéticos foram observados e uma ordem paragenética foi desenvolvida com base nas observações em lâminas petrográficas. Os valores de porosidade variam entre 1% até 41%, sendo os valores mais elevados relacionados à formação de porosidade secundária, principalmente pela dissolução de cimento carbonático na mesodiagênese. Segundo Rossetti & Truckenbrodt (1992), a precipitação de cimento eodiagenético teria sido de grande importância, mantendo o arcabouço frouxo para a posterior dissolução e formação de considerável porosidade secundária.

### 1.3 Objetivos

Objetivo geral:

Determinar os padrões diagenéticos de arenitos cretácicos das Bacias do Pará-Maranhão, Barreirinhas, São Luís e Bragança-Viseu, da Margem Equatorial Brasileira, através da análise de lâminas delgadas de poços previamente selecionados. Através dos dados coletados, estabelecer modelos genéticos das ocorrências e distribuição dos constituintes diagenéticos e seu impacto sobre a qualidade dos arenitos como reservatórios de hidrocarbonetos.

Objetivos específicos:

- Análise petrográfica sistemática das texturas e fábricas deposicionais, composição detrítica, constituintes diagenéticos e tipos de poros de arenitos cretácicos testemunhados nas bacias-alvo, compreendendo:
  - Análise petrográfica quantitativa pela microscopia óptica de luz polarizada.
  - Análise petrográfica por microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Construção de modelos conceituais da diagênese e da qualidade dos potenciais reservatórios para os casos estudados utilizando-se dos dados obtidos.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Petrografia Quantitativa

A descrição das 31 lâminas petrográficas foi executada no Laboratório de Petrologia Sedimentar no Departamento de Mineralogia e Petrologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com uso de microscópios de luz polarizada e do *software* PETROLEDGE<sup>®</sup> (De Ros, *et al.*, 2007). A análise visa à caracterização sistemática dos aspectos texturais, dos hábitos, teores, localizações, distribuições e relações entre constituintes primários e diagenéticos, e tipos de poros. As lâminas foram impregnadas com resina *epoxy*, de modo a facilitar a preparação, e a observação dos constituintes e poros. Tingimento com solução de alizarina e ferricianeto de potássio foi aplicado, a fim de diferenciar os carbonatos.

A quantificação das amostras foi realizada por análise modal, através da contagem de 300 pontos por lâmina, dispostos em transversas equidistantes perpendiculares à laminação ou orientação dos grãos. A contagem de pontos foi feita com o uso de *charriot* acoplado ao microscópio para espaça-los em intervalos constantes, determinados de acordo com a granulometria das amostras, para evitar a quantificação do mesmo constituinte mais de uma vez.

A quantificação dos constituintes primários foi realizada com base no método Gazzi-Dickinson (Zuffa, 1985), onde cristais ou grãos constituintes de fragmentos de rocha que possuem tamanho maior que 0,0625 mm são registrados quanto ao constituinte mineralógico e quanto ao tipo de fragmento no qual se encontram (Figura 7). Fragmentos de rocha com textura fina como, por exemplo, fragmentos de rochas vulcânicas afaníticas ou metamórficas de baixo grau são registrados diretamente como tal. Este método permite identificar a composição mineralógica-litológica da área fonte, independente da granulometria.

A descrição realizada com o *software* PETROLEDGE® segue uma ordem sistemática, compreendendo inicialmente a identificação da amostra quanto a sua localização (poço, profundidade, unidade, bacia, estado, país) e um resumo das principais feições encontradas na lâmina. Segue-se a análise das feições estruturais, texturais e de fábrica da lâmina, como as estruturas deposicionais e pós-deposicionais (laminação, estilolitos, etc.), granulometria, grau de arredondamento, esfericidade e seleção assim como caracterização da fábrica quanto à sustentação e empacotamento. Finalmente, são descritos e quantificados os constituintes primários, diagenéticos e poros, com respeito a seus tipos, hábitos, localização e relações paragenéticas.

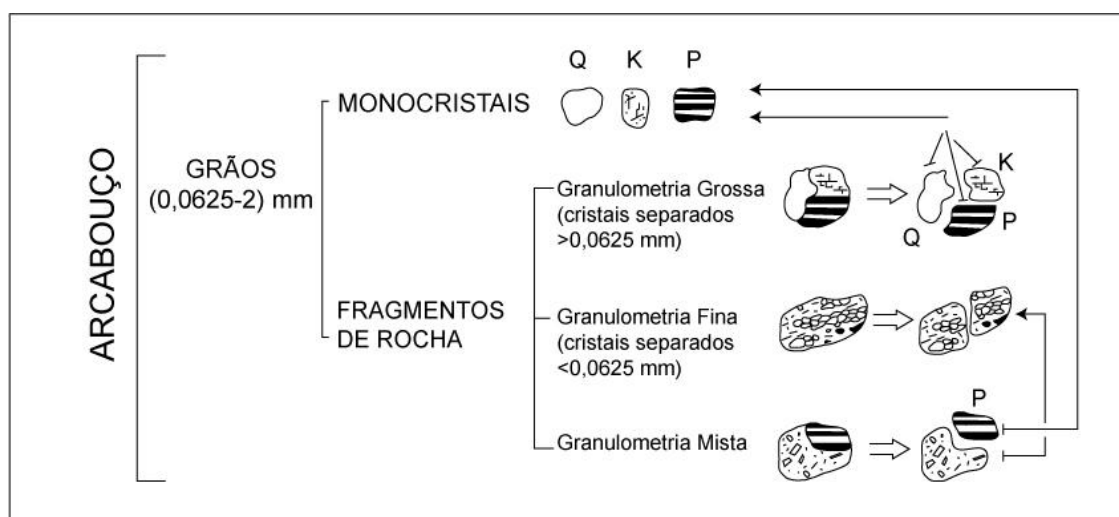


Figura 7: Diagrama ilustrando o método Gazzi-Dickinson de separação dos constituintes primários (Rodrigues, 2012, modificado de Zuffa, 1985).

## 2.2 Fotomicrografias

Foram tiradas fotos das principais feições composicionais primárias e diagenéticas, texturais, estruturais e de macroporosidade de cada lâmina analisada, confeccionando um documento contendo as fotos e suas legendas. A compilação destes documentos objetiva por criar um banco de dados ilustrativos das diversas lâminas do projeto. As fotografias foram tiradas com o Microscópio Zeiss AXIO Imager A2 com câmera Zeiss AXIO cam. MRc acoplada. As fotos foram tiradas com o programa ZEN 2011™ da Zeiss já com as escalas de acordo com o aumento da lente do microscópio utilizada.

### 2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) serviu para a observação de hábitos, relações paragenéticas, variações composicionais entre outras informações não identificáveis na microscopia ótica convencional. Este método tem grande importância e utilidade para estudos detalhados de constituintes diagenéticos, principalmente devido a sua alta resolução (20 a 50 Å), devendo ser sempre aliado à microscopia ótica. Esta análise foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul no Microscópio Eletrônico da marca JEOL JSM-6610LV com EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) Bruker acoplado, sendo 5 lâminas referentes às Bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas analisadas.

A amostra a ser analisada no MEV precisa ser coberta com material condutivo como ouro, paládio/ouro, carbono na forma de grafite, entre outros de modo a possibilitar a condução de elétrons pela superfície. A amostra é então posta em uma câmara de alto ou baixo vácuo para a análise. O microscópio eletrônico de varredura funciona através do aquecimento de um filamento de tungstênio que emite elétrons, acelerados dentro da coluna por voltagens entre 5 a 30 KeV e focados por lentes eletromagnéticas que condensam o fluxo de elétrons a um feixe de diâmetro de 100 angstroms que bombardeia a amostra. A interação dos elétrons com a amostra resulta em diversos sinais emitidos como os elétrons secundários, elétrons retroespalhados, elétrons *auger*, raios X característicos e raios X de *background*, utilizados para diferentes análises.

Elétrons de baixa energia (<50 eV) do feixe incidente interagem inelasticamente com a superfície da amostra e são refletidos desta, sendo altamente dependentes do relevo. Estes são denominados de elétrons secundários e, devido a sua baixa penetração resultam em imagens de alta resolução, permitindo a montagem de uma imagem pontual aparentemente tridimensional da superfície dos constituintes. Elétrons que interagem elasticamente e inelasticamente com a amostra com energias entre 50 eV e a energia do feixe de elétrons primários são denominados retroespalhados (BSE) e retratam as variações de número atômico dos materiais observados, normalmente em amostras polidas. Elementos com número atômico maior produzem elétrons de maior energia, representado com tons de cinza mais claro, enquanto elementos de número atômico menor são representados por tons de cinza mais escuros. Esta análise apresenta um mapa do número atômico médio dos constituintes analisados.

Outra aplicação de grande utilidade da microscopia eletrônica reside na geração de raios X específicos dos elementos excitados pelo feixe eletrônico. Elétrons excitados migram para camadas mais externas ou são arrancados, criando um vácuo preenchido por elétrons de camadas mais externas. Essa migração causa a liberação de energia na forma de raios X específicos, o que permite a identificação dos elementos constituintes e sua concentração nos constituintes da amostra, através de espectrometria da energia dispersada (EDS) por detectores acoplados ao MEV.

## **2.4 Integração dos dados**

Esta etapa consistiu na compilação dos dados obtidos pela petrografia e microscopia eletrônica de varredura e no seu processamento gráfico e estatístico. A partir da integração de todos estes dados, foi possível a compreensão dos principais controles nos padrões e na distribuição dos processos diagenéticos dos arenitos cretácicos das Bacias estudadas da Margem Equatorial Brasileira.

### **3 RESULTADOS**

Neste trabalho foram analisadas 31 lâminas referentes a diferentes bacias da Margem Equatorial brasileira, sendo 10 originárias da Bacia do Pará-Maranhão, 5 lâminas da Bacia de Barreirinhas, 5 da Bacia de Bragança-Viseu e 16 da Bacia de São Luís. Os resultados obtidos referem-se ao Grupo Canárias (Bacia do Pará-Maranhão), às formações Bom Gosto e Barro Duro (Bacia de Barreirinhas) e às formações Bragança e Grajaú (bacias de São Luís e Bragança-Viseu). A descrição petrográfica quantitativa das lâminas encontra-se como anexo deste trabalho, juntamente com as fotos das principais feições texturais e composicionais de cada uma. A seguir, encontra-se a descrição condensada dos principais resultados petrográficos obtidos, separados pelas diferentes Bacias onde foram observados.

#### **3.1 Bacia do Pará-Maranhão**

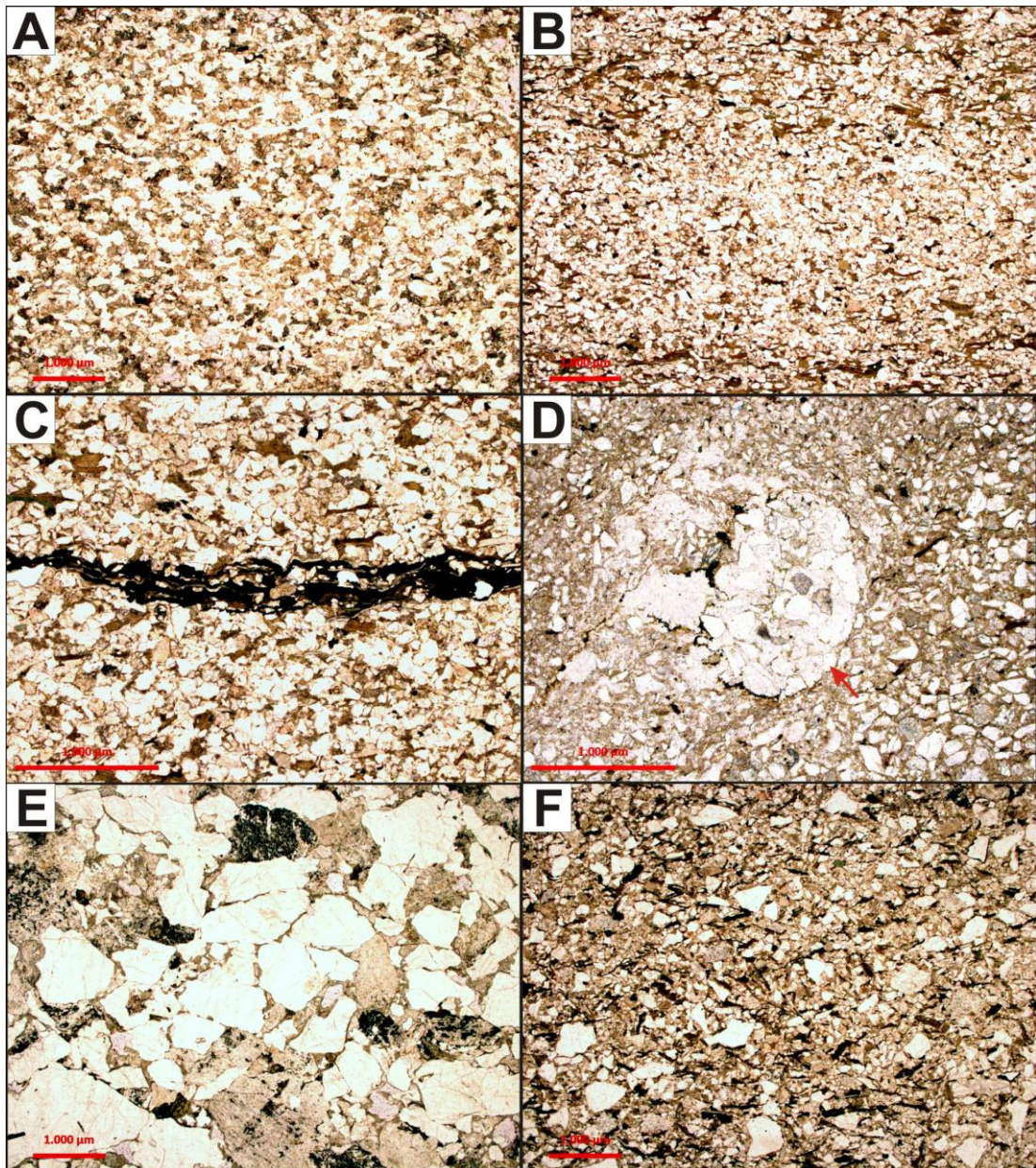
##### **3.1.1 Estrutura, textura e fábrica**

As estruturas dos arenitos desta Bacia são maciça, laminação irregular, cruzada acanalada e plano paralela e estratificação irregular. Amostras de estrutura maciça apresentam orientação caótica ou sub-paralela dos grãos (Figura 8A, E e F). A laminação plano-paralela é marcada pela orientação de micas, principalmente biotita, sendo ressaltada durante a diagênese pela expansão destas por vermiculita (Figura 8B). A laminação cruzada acanalada é marcada por um nível de concentração de biotitas com substituição intensa por pirita (Figura 8C). A laminação irregular é marcada pela intercalação de cimentação por calcita e crescimentos de quartzo ou pela variação na concentração de argilas infiltradas. A estratificação irregular é marcada por variação granulométrica. Estruturas

deformacionais como fluidização e bioturbação (Figura 8D) também foram observadas, localmente.

A granulometria é bastante heterogênea, com predominância de arenitos médios e finos e ocorrências raras de arenitos grossos, (Figura 8A, E e F) levemente conglomeráticos e conglomeráticos. O grau de seleção das amostras varia de moderadamente selecionados a predominantemente mal selecionados (cf. Compton, R.R., 1982). Os grãos apresentam grau de arredondamento que varia de sub-angular a sub-arredondado e esfericidade média. Os principais processos de modificação da forma original dos grãos foram os crescimentos de quartzo, a dissolução por pressão e subordinadamente a compactação de intraclastos macios.





**Figura 8: Aspectos texturais e estruturais dos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Arenito fino com estrutura maciça e orientação sub-paralela dos grãos (polarizadores descruzados //P); B) Laminação plano-paralela formada pela concentração de micas (//P); C) Laminação cruzada acanalada marcada por nível de concentração de pirita (//P); D) Bioturbação (seta vermelha, //P); E) Arenito de estrutura maciça, grosso e mal selecionado (//P); F) Arenito médio micáceo com estrutura maciça e orientação sub-paralela dos grãos (//P).**

### 3.1.2 Composição detrítica

A composição detrítica original dos arenitos analisados é homogênea, todos sendo classificados como arcóseos (méd.=  $Q_{41}F_{57}L_2$ ) *sensu* Folk (1968) (Figura 9). Os processos diagenéticos não modificaram substancialmente a composição primária das amostras, sendo a albitização e a dissolução de feldspatos, e a substituição por caulinita e calcita os principais processos responsáveis pelo deslocamento para composições atuais relativamente mais quartzosas (méd.=  $Q_{60}F_{37}L_3$ ) (Figura 9). Algumas amostras apresentam grande teor de micas (Figura 8F).

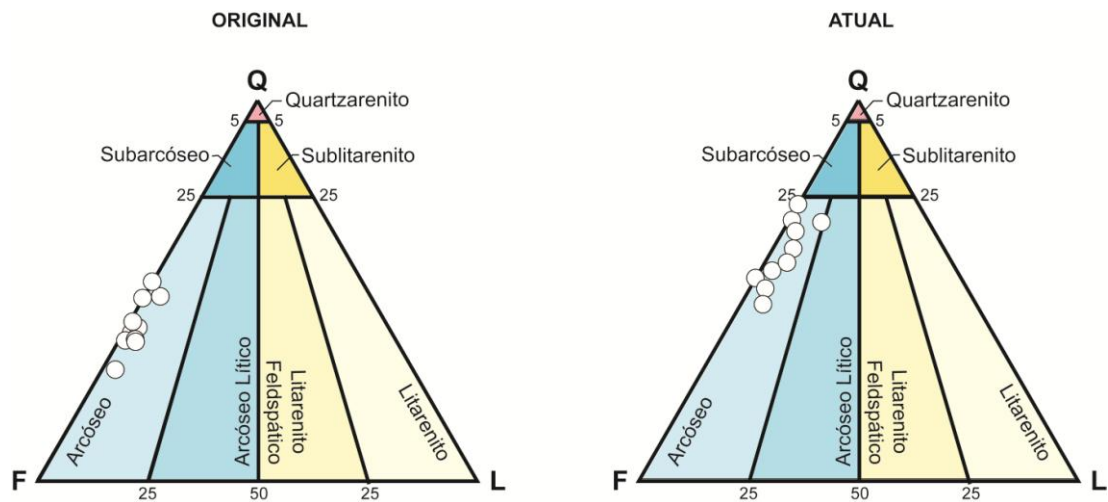
Os grãos de quartzo são predominantemente monocristalinos (méd.= 28,6%; máx.= 38,3%), com ocorrência subordinada de grãos policristalinos (méd.= 2,3%; máx.= 4,3%). O principal feldspato presente é o plagioclásio em grãos maclados ou não maclados (méd.= 16,3%; máx.= 22,3% do volume original da rocha). O microclínio (méd.= 6,7%; máx.= 12,7%) (Figura 10A) e o ortoclásio (méd.= 4,8%; máx.= 7,3%) apresentam uma ocorrência mais restrita. Todos os feldspatos encontram-se extensamente albitizados.

Os fragmentos líticos são comumente granítico-gnáissicos (méd.= 9,40%; máx.= 15,7%) com comum ocorrência de fragmentos com clorita, sericita, albita e epidotos como a pistacita, indicando processos hidrotermais ou retro-metamórficos atuantes nas rochas-fonte (méd.= 2,2%; máx.= 19%) (Figura 10B). Fragmentos metamórficos de baixo grau, como meta-arenitos e meta-siltitos e xistos também são observados, porém mais raros (méd. <1% e máx.= 2,7%). Fragmentos não foliados compostos por feixes de clorita sugerem uma origem hidrotermal (méd. e máx. <1%). Fragmentos vulcânicos de textura hemicristalina e afírica também apresentam ocorrência restrita nos arenitos (méd. e máx. <1%).

Lamelas individuais de micas são comuns, sendo a biotita (méd.= 3,5%; máx.= 15,7%) predominante sobre a muscovita (méd.= 1,3%; máx.= 4%) (Figura 10C). As biotitas encontram-se comumente substituídas e expandidas por caulinita, vermiculita e, menos comumente, por calcita. Tanto as biotitas quanto as muscovitas apresentam substituição por clorita. Lamelas individuais de clorita detrítica também podem ser observadas (méd. e máx. <1%).

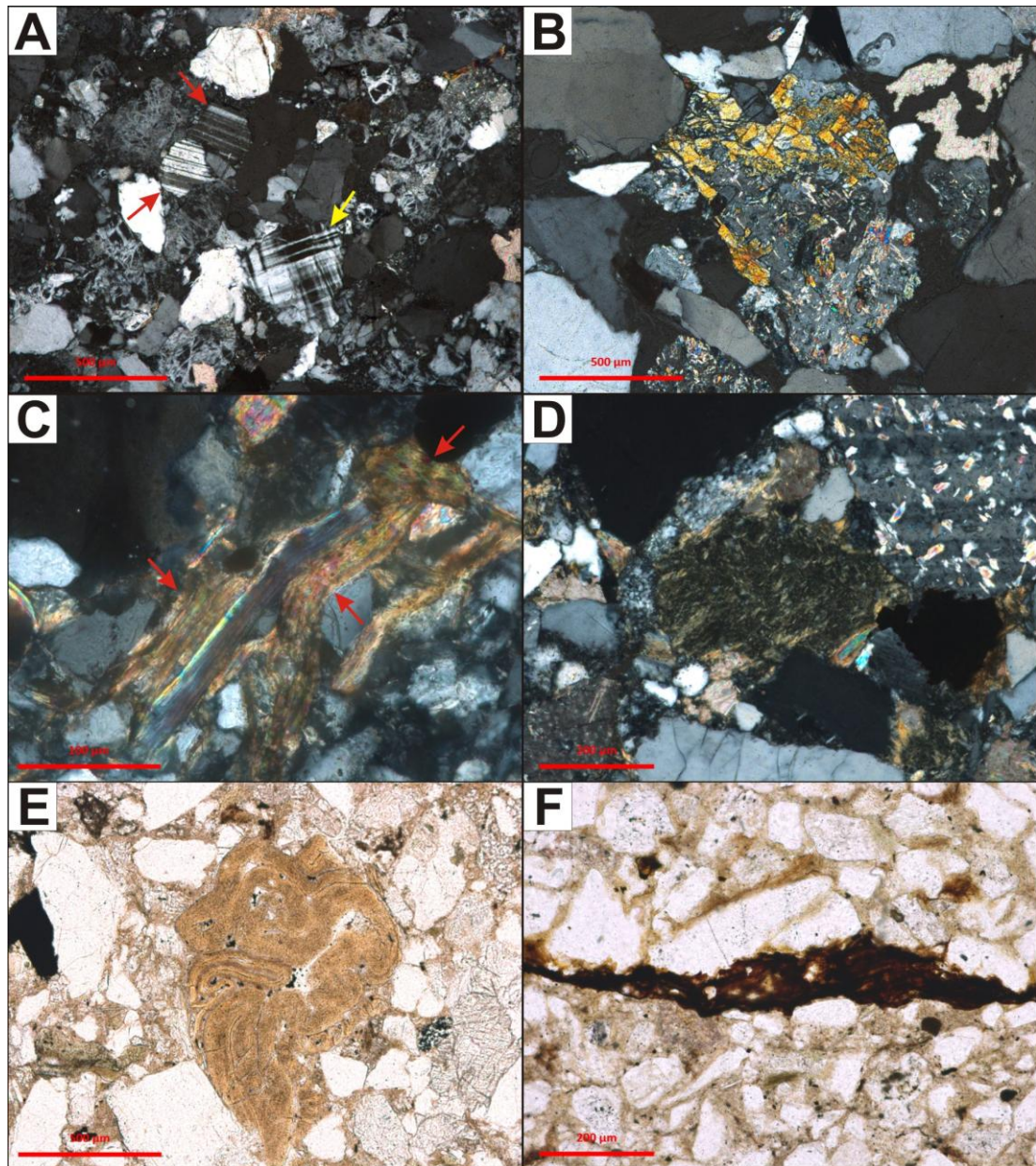
Os minerais pesados mais comuns são os epidotos (méd.= 2,4%; máx.= 10,3%) com ocorrência subordinada de turmalina, granada, titanita e zircão (méd. e máx. <1%). Alguns destes grãos podem apresentar dissolução e substituição por óxidos de titânio microcristalino.

Os principais grãos intrabaciais são os intraclastos lamosos (méd. <1%; máx.= 3,3%) (Figura 10D), em geral compactados a pseudomatriz. Intraclastos arenosos, de solo e fosfáticos, pelóides fosfáticos (Figura 10E) e argilosos e fragmentos carbonosos (Figura 10F) também ocorrem, porém de maneira mais restrita (méd. e máx. <1%).



**Figura 9: Composição detrítica original e atual dos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão plotadas em diagramas Folk (1968). Observar o deslocamento para composições mais quartzosas no diagrama Atual pela albitização e substituição por caulinita e carbonatos.**





**Figura 10:** Principais aspectos de composição detrítica nos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Grãos de plagioclásios maclados (setas vermelhas) e microclínio (seta amarela, polarizadores cruzados XP); B) Fragmento de rocha metamórfica com epidoto, albita e sericita (XP); C) Lamelas de biotita (setas vermelhas, XP); D) Intraclasto lamoso (XP); E) Pelóide fosfático (polarizadores descruzados //P); F) Fragmento carbonoso (//P).

### 3.1.3 Diagênese

Os principais processos diagenéticos que ocorreram nos arenitos estudados na Bacia do Pará-Maranhão são: formação de cutículas de argila autigênica e de argila infiltrada; expansão de micas por vermiculita e caulinita, precipitação de caulinita, crescimentos de quartzo e albita, albitização de feldspatos, cimentação e substituição por calcita, dolomita, siderita, pirita e minerais de titânio, cloritização de micas, argilas expansivas e livrinhos de caulinita e precipitação de franjas de clorita sobre cutículas de argila. A compactação mecânica foi um processo importante na redução da porosidade dos arenitos desta Bacia, particularmente para as litologias com intraclastos lamosos, que apresentaram formação de pseudomatriz pela sua compactação. Abaixo, encontram-se descritos os principais processos diagenéticos observados nos arenitos analisados.

#### Cutículas de argila

Foram reconhecidas duas origens distintas para as cutículas de argila que recobrem os grãos: precipitação *in situ* de esmectitas autigênicas (méd.= 2,9%; máx.= 9%) e infiltração mecânica (méd.= 3,3%; máx.= 11,3%). As cutículas de argila autigênica são tipicamente finas e descontínuas, sendo difícil sua identificação devido à sua cloritização e à intensa compactação (Figura 11A). Cutículas autigênicas também ocorrem preenchendo fraturas em grãos. As cutículas de argila infiltrada são mais espessas e mais fáceis de serem identificadas (Figura 11B e C). As argilas infiltradas ocorrem em uma das amostras como agregados maciços com orientação caótica, preenchendo os poros. Cutículas de argilas mecanicamente infiltradas em geral apresentam espessura muito variável, formas irregulares e impurezas como óxidos e materiais orgânicos. Outra característica tipicamente relacionada a argilas infiltradas, mas não exclusiva, é a sua contração com a evolução da diagênese, causando seu descolamento e muitas vezes sua fragmentação (Figura 11A). As cutículas infiltradas, assim como as autigênicas, apresentam extensa substituição por clorita.

#### Vermiculita

A vermiculita ocorre substituindo e expandindo lamelas de biotita (méd.= 1%; máx.= 3,7%) (Figura 11D). Normalmente, as caulinitas e as vermiculitas expansivas não ocorrem juntas nas amostras, mas quando ocorrem a vermiculita

pode ser diferenciada pela sua coloração amarelada e sua birrefringência de ordem mais alta que a das caulinitas.

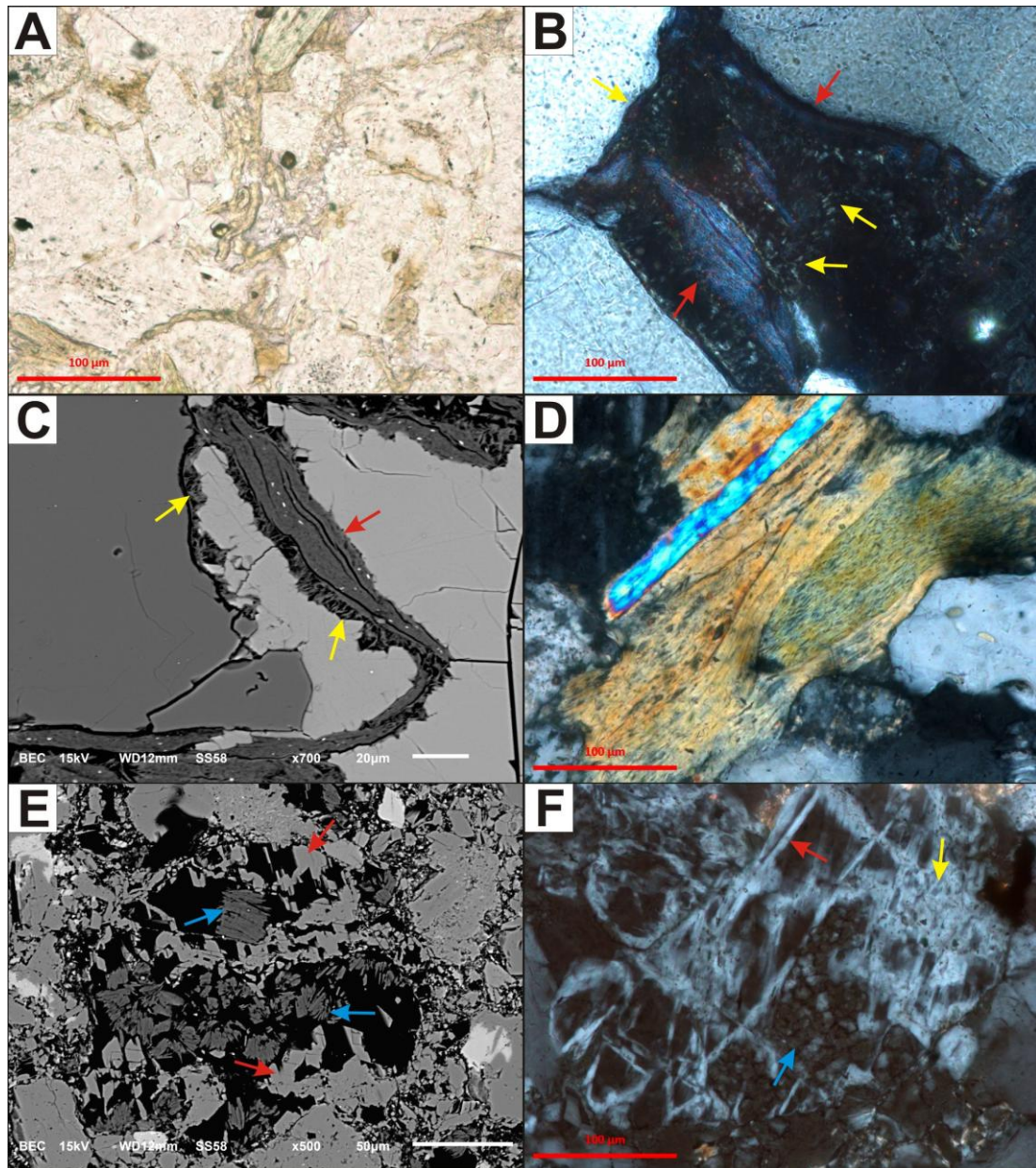
### **Caulinita**

A caulinita é um dos principais constituintes diagenéticos nas lâminas analisadas, ocorrendo em agregados em livrinhos, vermiculares e lamelares. As caulinitas em livrinhos e vermiculares substituem grãos de plagioclásio, microclínio e ortoclásio (méd.= 1,7%; máx.= 5,3%) (Figura 11E e F) e preenchem poros intergranulares (méd.= 1,1%; máx.= 4,7%). Os grãos de muscovita muitas vezes apresentam substituição e expansão por caulinita lamelar, o que indicando a precipitação precoce e rasa da caulinita (Figura 12A). A caulinita é substituída por calcita, dolomita e pseudomorficamente por clorita (Figura 12B), identificável por seu pleocroísmo verde e relevo mais alto.

### **Quartzo**

O quartzo ocorre como crescimentos externos contínuos e descontínuos (méd.= 4,1%; máx.= 22,3%) (Figura 12C), projeções prismáticas (méd. e máx. <1%) e como crescimentos internos preenchendo fraturas (méd.= 1,8%; máx.= 3,3%). Os crescimentos apresentam mesma orientação ótica dos grãos detríticos (sintaxiais), e em alguns casos não são diferenciados dos grãos por linhas de inclusões, sendo sua ocorrência identificada através dos contatos geométricos entre crescimentos. Por estes motivos, a percentagem do quartzo na forma de crescimentos encontra-se provavelmente subestimada. Em alguns casos, os crescimentos externos podem ser diferenciados pela ocorrência de finas cutículas de argila autigênica entre a superfície dos grãos e os crescimentos. Áreas que apresentam crescimentos de quartzo contínuos apresentam empacotamento localmente mais frouxo, resultado de rochas heterogeneamente compactadas. As caulinitas, em alguns casos, encontram-se engolfadas por crescimentos de quartzo.





**Figura 11:** Principais feições diagenéticas nos arenitos estudados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Finas cutículas autigênicas substituídas por clorita (polarizadores descruzados //P); B) Cutículas de argila infiltrada cobrindo grãos e descoladas (setas vermelhas), substituídas por clorita e cobertas por franjas de clorita (setas amarelas, polarizadores cruzados XP); C) Cutícula de argila infiltrada cloritizada descolada (seta vermelha) com franjas de clorita cobrindo a cutícula (setas amarelas) e calcita preenchendo porosidade cobrindo franjas de clorita (cinza mais claro, elétrons retro-espalhados - BSE); D) Vermiculita substituindo e expandindo biotita (XP); E) Agregados de caulinita (seta azul) cobrindo crescimentos de albita (setas vermelhas, BSE); F) Agregados de caulinita (seta azul) substituindo feldspato parcialmente albitizado (seta amarela) com crescimentos internos de albita (seta vermelha, XP).

## Feldspatos

A grande parte dos feldspatos detríticos nas amostras encontra-se intensamente substituído por albita de hábito microcristalino (Figura 12D) e prismático, sendo o plagioclásio o principal afetado (méd.= 9,1%; máx.= 19,7%), seguido pelo microclínio (méd.= 4%; máx.= 7,7%) e o ortoclásio (méd.= 1,5%; máx.= 2,7%). Alguns feldspatos contendo sericita e epidotos foram provavelmente albitizados nas rochas-fonte. Plagioclásios também encontram-se parcialmente substituídos por feldspato potássico autigênico, porém, sua diferenciação de albita diagenética em feldspatos extensamente dissolvidos é muito difícil, sendo sua concentração nos arenitos altamente subestimada (méd. e máx <1%) (Figura 12E). Crescimentos internos de albita ocorrem preenchendo fraturas nos feldspatos (méd.= 1,5%; máx.= 4,3%), sendo comumente preservados após sua dissolução (Figura 11E e F). Os crescimentos externos de albita (Figura 12F) e feldspato potássico, formados sobre grãos de plagioclásio e microclínio, são descontínuos e extremamente raros (méd. e máx. <1%).

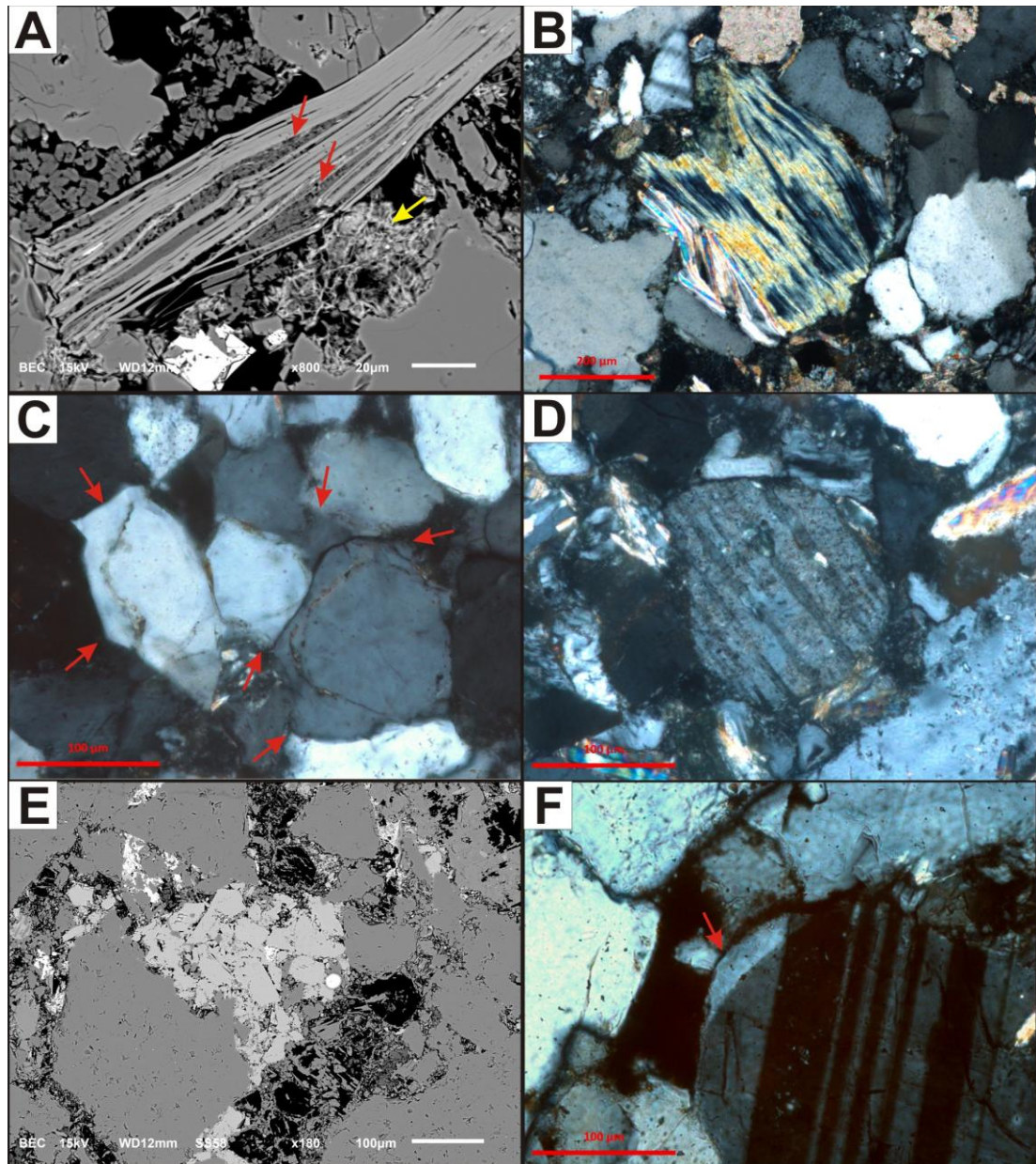
## Calcita

A calcita ocorre substituindo constituintes primários (méd.= 2,7%; máx.= 8,7%) e constituintes diagenéticos como caulinita, vermiculita e clorita (méd.= <1%; máx.= 3%), preenchendo porosidade intergranular (méd.= <1%; máx.= 3,7%) e mais raramente expandindo lamelas de biotita, preenchendo fratura em grão e substituindo pseudomatriz (méd. e máx. <1%). A calcita apresenta hábito poiquilotópico (méd.= 1,2%; máx.= 6%) (Figura 13A) e predominantemente macrocristalino (méd.= 3,3%; máx.= 12,7%).

## Dolomita

A dolomita ocorre nos hábitos poiquilotópico, em sela, e mais comumente blocoso (Figura 13B e C). A dolomita foi observada substituindo constituintes primários (méd.= 1%; máx.= 6%), preenchendo porosidade intergranular (méd.< 1%; máx.= 1%), substituindo caulinita e clorita e expandindo lamelas de biotita (méd. e máx. <1%). A dolomita apresenta zonação com núcleo empobrecido em Fe e fase final enriquecida em Fe, com uma zona transicional com a intercalação de bandas dos membros terminais (Figura 13C).





**Figura 12: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados da Bacia do Pará-Maranhão. A) Caulinita substituindo e expandindo muscovita (seta vermelha) e clorita substituindo caulinita (seta amarela, elétrons retro-espalhados - BSE); B) Clorita substituindo pseudomorficamente lamelas de caulinita expansiva (polarizadores cruzados XP); C) Crescimentos contínuos de quartzo marcados pela presença de inclusões fluídas (setas vermelhas, XP); D) Grão de plagioclásio substituído por albita microcristalina (XP); E) Substituição de feldspato por K-feldspato autigênico (cinza mais claro, BSE); F) Crescimento de albita sobre grão de plagioclásio (seta vermelha, XP).**

### **Siderita**

A siderita ocorre como cristais de hábito macrocristalino, comumente associada à dolomita. Este constituinte substitui grãos, preenche poros intergranulares e expande biotita (méd.< 1%; máx.= 1,6%) (Figura 13B e C). Sideritas ricas em Mg apresentam zonação com núcleos ricos em  $Mg^{2+}$ , membros intermediários e fase final mais rica em  $Fe^{2+}$  e encontram-se parcialmente substituindo dolomita e caulinita.

### **Pirita**

A pirita ocorre em hábito microcristalino (Figura 13D), framboidal e blocoso, substitui constituintes primários (méd.< 1%; máx.= 1,7%), caulinita, clorita e argila infiltrada (méd. e máx.< 1%), e preenche poros intergranulares e de fratura (méd. e máx.< 1%). A pirita pode substituir completamente os grãos, tornando impossível sua identificação, e encontra-se raramente engolfada por cristais de calcita e dolomita.

### **Óxidos de titânio**

Os óxidos diagenético de titânio (méd. e máx.< 1%) apresentam hábito microcristalino (Figura 13E) e criptocristalino, e ocorrem principalmente substituindo minerais pesados, mas também podem substituir outros grãos detríticos e preencher poros intergranulares. Raramente, encontram-se engolfados por calcita e crescimentos de quartzo.

### **Clorita**

A clorita é um dos principais constituintes diagenéticos nos arenitos observados, ocorrendo, principalmente, como substituição pseudomórfica de cutículas de argila autigênica e infiltrada (méd.= 3,4%; máx.= 10%), de caulinita em livrinhos e lamelar (méd. <1%; máx= 3,3%) (Figura 12A e B) e de lamelas de biotita e muscovita (méd.< 1%; máx.= 2,7%). Além disso, a clorita foi precipitada na forma de franjas (méd.= 1,4%; máx.= 5,3%), geralmente cobrindo cutículas de argila (Figura 11A, B e C), mas também preenchendo poros e fraturas em grãos.

### **Outros constituintes**

Óleo preenche poros intergranulares, cobrindo cutículas e franjas de clorita, e caulinita em livrinhos (méd. <1%; máx.= 6%) (Figura 13F). A pseudomatriz lamosa foi localmente formada pela compactação mecânica de intraclastos lamosos (méd. <1%; máx= 2,7%).



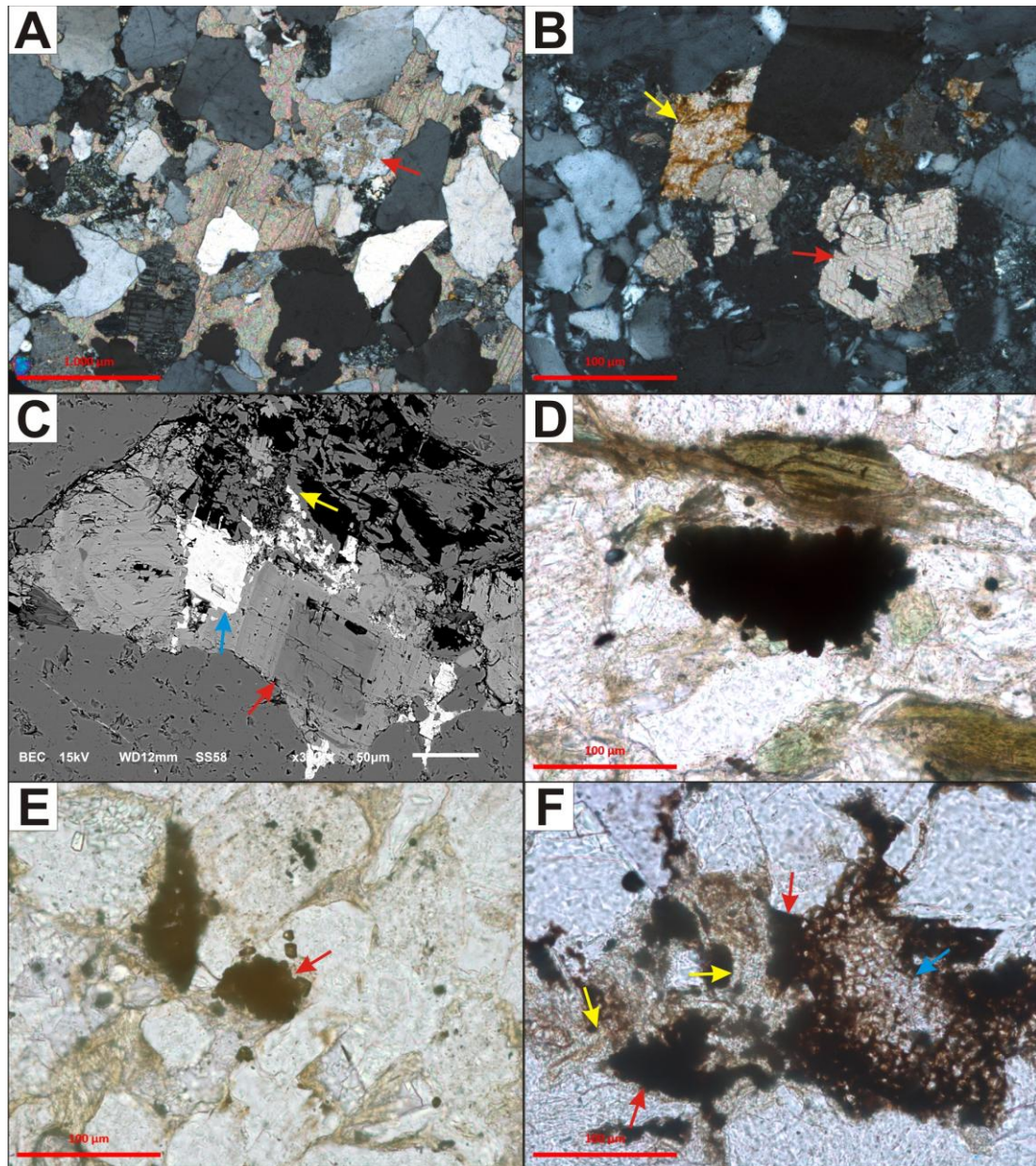


Figura 13: Feições diagenéticas de menor ocorrência nos arenitos da Bacia do Pará-Maranhão. A) Calcita poiquilotópica preenchendo porosidade intergranular e substituindo feldspato (seta vermelha, polarizadores cruzados XP); B) Siderita macrocristalina (oxidada, seta amarela) e dolomita blocosa (seta vermelha) preenchendo poros intergranulares e substituindo feldspatos (XP); C) Dolomita zonada (seta vermelha) e siderita-magnesita (seta azul) preenchendo poros intergranulares e substituindo albite (seta amarela, elétrons retroespalhados - BSE); D) Agregado de pirita microcristalina substituindo grãos (polarizadores descruzados //P); E) Óxidos de titânio microcristalinos substituindo grãos de minerais pesados (//P); F) Óleo preenchendo poros intergranulares (setas vermelhas), cobrindo cutículas e franjas de clorita (setas amarelas) e impregnando caulinita em livrinhos (seta azul, //P).

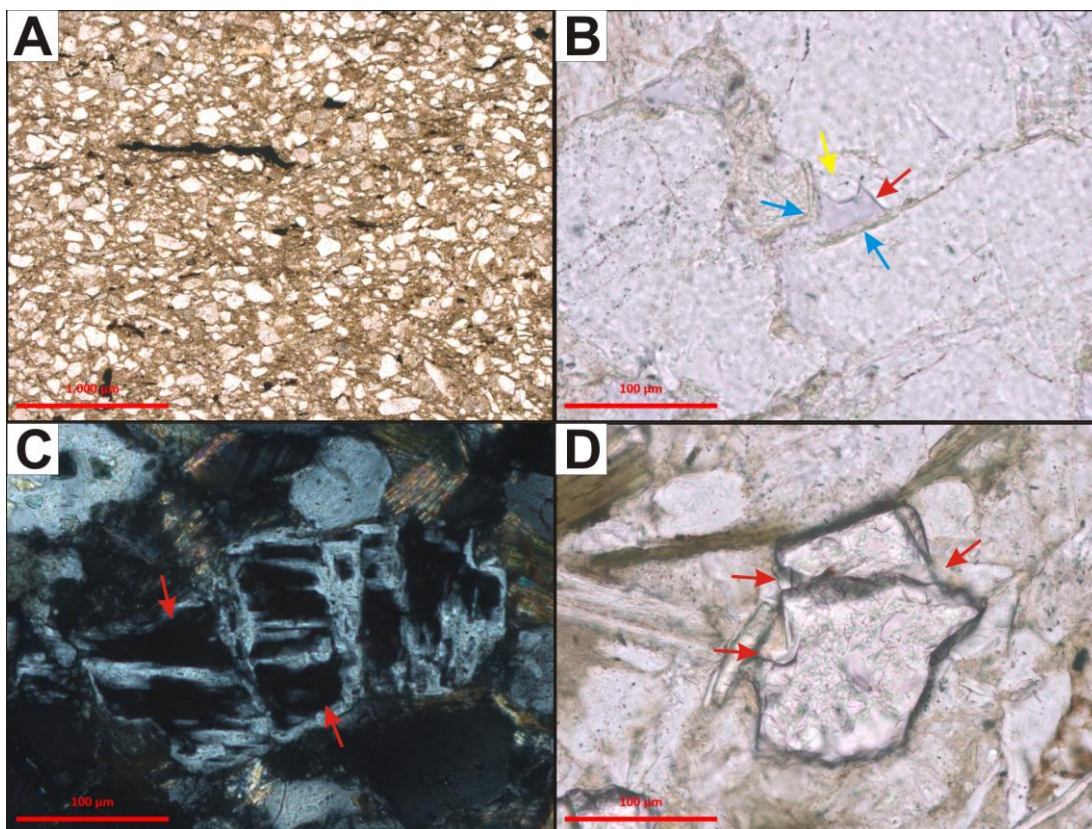
### 3.1.4 Compactação

O empacotamento destes arenitos é predominantemente apertado, com uma lâmina apresentando empacotamento normal. Algumas amostras apresentam empacotamento heterogêneo devido à presença de crescimentos precoces de quartzo que inibiram a compactação, ou de extensa infiltração de argilas na forma de agregados maciços e cutículas (Figura 14A). A compactação mecânica é evidenciada pela formação de pseudomatriz lamosa a partir de intraclastos lamosos, pela deformação das micas, e pelo fraturamento de grãos.

### 3.1.5 Porosidade

Os arenitos estudados apresentam valores de porosidade intergranular extremamente baixos (méd. <1%; máx= 2,7%) devidos, principalmente, ao seu alto grau de compactação (Figura 14B). A porosidade remanescente após a compactação foi ainda mais reduzida pela cimentação por crescimentos de quartzo, calcita e dolomita e pela precipitação de agregados em livrinhos e vermiculares de caulinita e franjas de clorita. Poros de fratura de grãos foram raramente preservados (méd. e máx <1%), tendo sido cicatrizados por crescimentos internos de quartzo e albita, ou preenchidos por franjas e cutículas de clorita. A dissolução de feldspatos (méd.= 1,3%; máx.= 6,7%) corresponde ao principal tipo de macroporosidade observado (Figura 14C), sendo a dissolução de minerais pesados subordinada (Figura 14D). A porosidade de contração de intraclastos lamosos e cutículas de argila encontram-se normalmente preenchida por franjas de clorita.





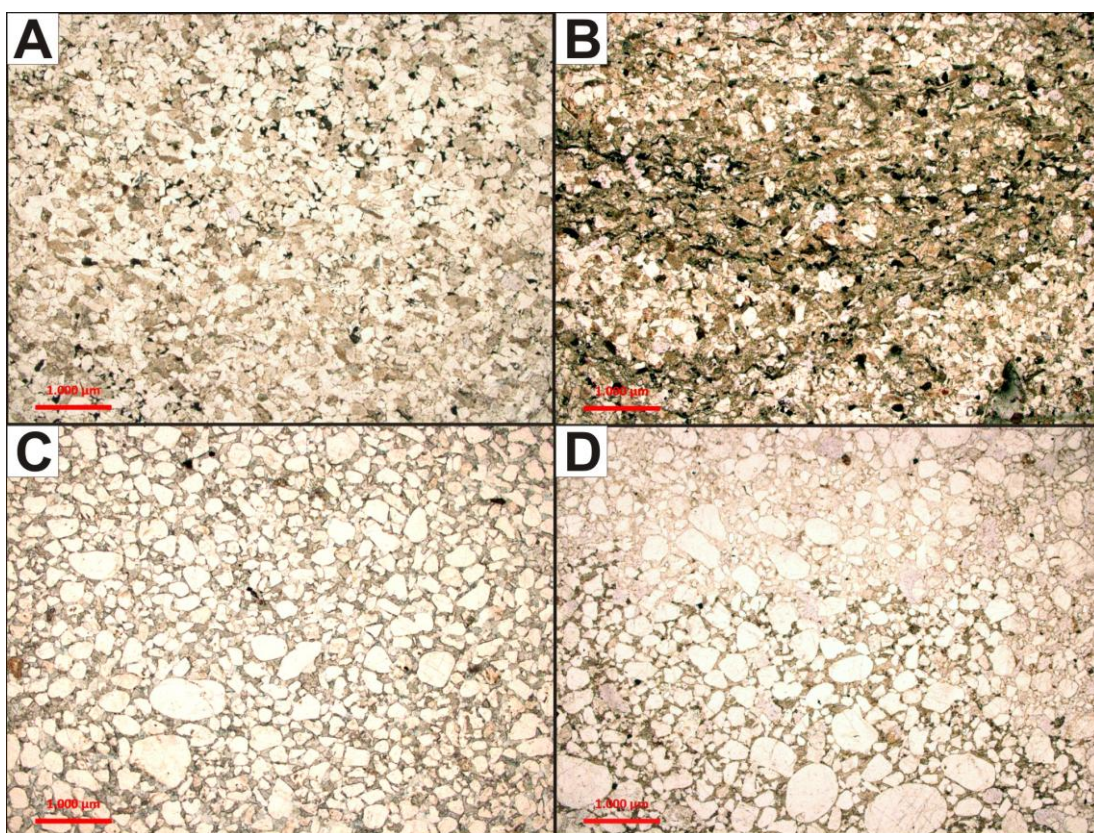
**Figura 14:** Principais feições de porosidade e empacotamento da Bacia do Pará-Maranhão. A) Arenito com abundante infiltração de argila (polarizadores descruzados //P); B) Porosidade intergranular (seta vermelha) extremamente reduzida por compactação, cimentação por projeção prismática de quartzo (seta amarela) e franjas de clorita (seta azul, //P); C) Porosidade de dissolução de feldspato com crescimentos internos e externos de albita preservados (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); D) Dissolução de granada (setas vermelhas, //P).

## 3.2 Bacia de Barreirinhas

### 3.2.1 Estruturas, texturas e fábrica

Os arenitos de Barreirinhas estudados mostram estrutura maciça, mais raramente laminação irregular ou estratificação cruzada. Arenitos de estrutura maciça apresentam orientação caótica ou mais comumente sub-paralela dos grãos (Figura 15A). A laminação irregular é marcada por níveis de concentração de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau, deformados pelo alto grau de compactação (Figura 15B). A estratificação cruzada é marcada pela variação granulométrica.

Os arenitos são predominantemente finos, subordinadamente médios (Figura 15C) e raramente conglomeráticos. O grau de seleção varia de mal selecionado (Figura 15D) a mais comumente bem selecionado (Figura 15A) (cf. Compton, 1982). Os grãos variam de angulosos a arredondados, mais comumente sub-arredondados e sub-angulosos. Crescimentos de quartzo, deformação por compactação de clastos macios, como fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau, e dissolução por pressão são os principais modificadores da forma original dos grãos.



**Figura 15: Aspectos texturais e estruturais dos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Arenito fino maciço, bem selecionado, com orientação sub-paralela dos grãos (polarizadores descruzados //P); B) Laminação irregular formada pela concentração de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau deformados pela compactação (//P); C) Arenito médio maciço com orientação caótica dos grãos (//P); D) Arenito médio mal selecionado (//P).**

### 3.2.2 Composição detrítica

A composição detrítica original dos arenitos desta Bacia é bastante heterogênea, apresentando amostras classificadas como arcósios líticos (méd.=



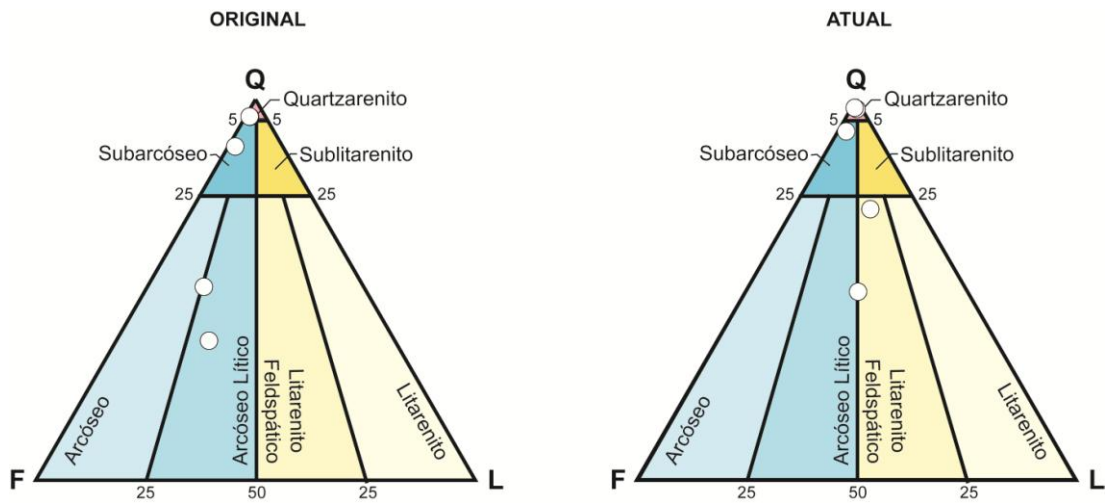
$Q_{44}F_{39}L_{17}$ ), sub-arcósios (méd.=  $Q_{88}F_{11}L_1$ ) e quartzarenitos (méd.=  $Q_{95}F_4L_1$ ) *sensu* Folk (1968). A albitização dos feldspatos foi o principal processo modificador da composição original das rochas, com a substituição por calcita e dolomita agindo de forma subordinada. A alteração dos arcósios líticos foi localizada em seus feldspatos, preservando os fragmentos líticos e alterando sua composição para litarenitos feldspáticos (méd.=  $Q_{60}F_{18}L_{22}$ ). Os quartzarenitos e sub-arcósios apresentam alteração tanto dos feldspatos quanto dos litoclastos, tornando-se mais quartzosos, mas mantendo sua classificação original (méd.=  $Q_{98}F_1L_1$  e  $Q_{92}F_7L_2$ ) (Figura 16).

Os grãos de quartzo são predominantemente monocristalinos (méd.= 49,4%; máx.= 66,3%) e subordinadamente policristalinos (méd.= 1,6%; máx.= 2,3%). Entre os feldspatos, predomina o plagioclásio, maclado ou não (méd.= 9,3%; máx.= 22%), sobre o microclínio e o ortoclásio (méd.= 2%; máx.= 4,7%) e todos se encontram intensamente substituídos por albita.

Os principais fragmentos de rocha são de tipos metamórficos de baixo grau como meta-arenitos, meta-siltitos, ardósias, filitos e xistos (méd.= 4,4%; máx.= 15%) (Figura 17A e B) e plutônicos (méd.= 2,6%; máx.= 5,3%). Litoclastos de ocorrência menor incluem fragmentos de rochas sedimentares, como arenitos e cherts (méd. <1%; máx.= 1,3%), e de rochas vulcânicas de textura afírica e hemicristalina (méd. <1%; máx. 1,7%). Os fragmentos de rochas metamórficas encontram-se, por vezes, deformados pela compactação mecânica gerando pseudomatriz lítica e tornando difícil sua identificação.

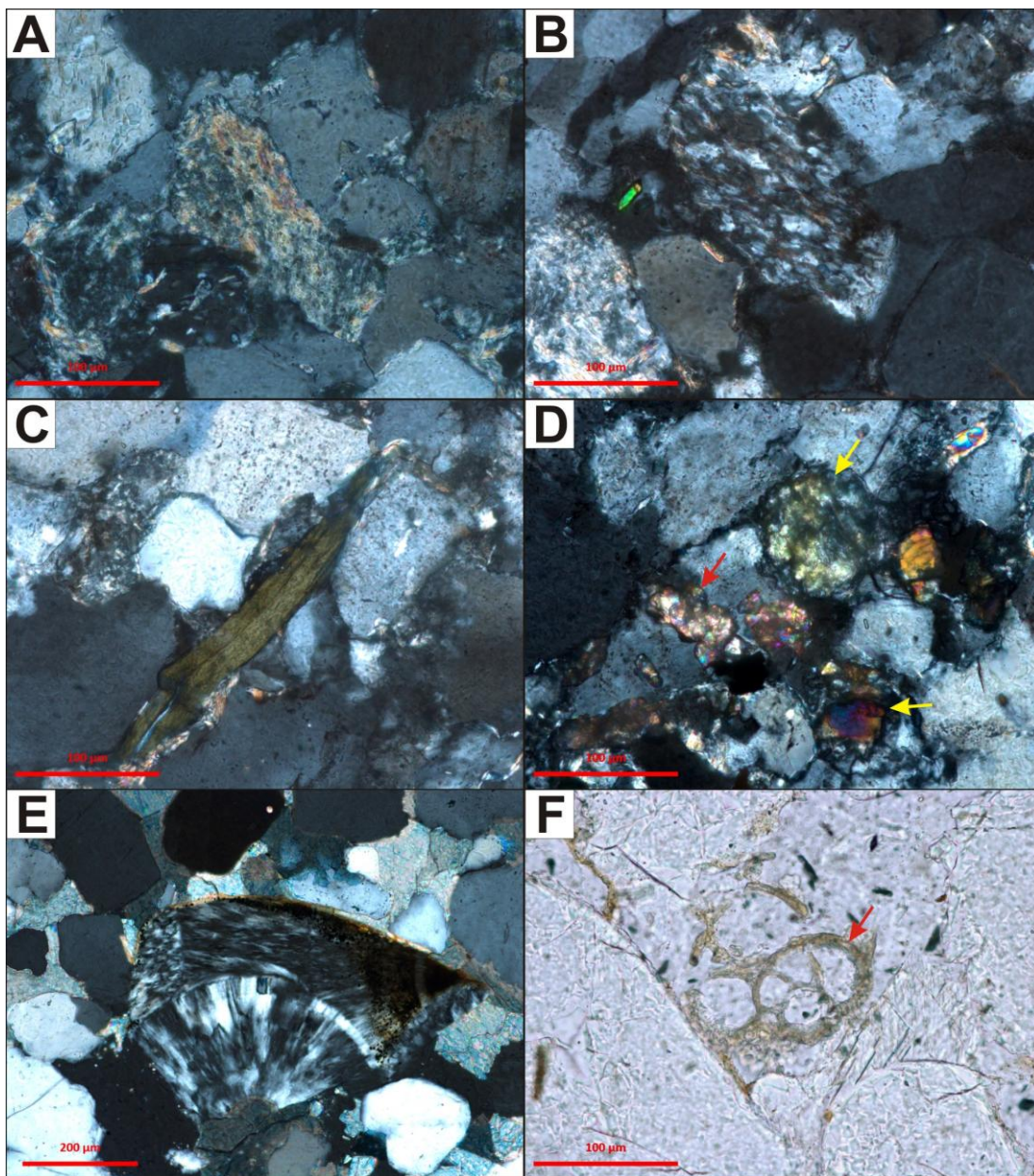
Os minerais acessórios incluem lamelas monocristalinas de muscovita, biotita e clorita (méd.= 1%; máx.= 3,3%) (Figura 17C) e minerais pesados como epidoto, granada, titanita, turmalina e zircão (méd.= 1%; máx.= 3%) (Figura 17D e E). As micas podem apresentar substituição e expansão por caulinita, pirita e dolomita e os minerais pesados podem apresentar dissolução e substituição por óxidos de titânio.

Constituintes intrabaciais ocorrem de maneira restrita nestes arenitos e incluem grãos fosfáticos, fragmentos de calcedônia, intraclastos de silcrete (Figura 17E), e outros grãos silicosos, intraclastos lamosos, pelóides argilosos e bioclastos de foraminíferos bentônicos (Figura 17F), todos em teores <1%. Os constituintes silicosos podem apresentar substituição por dolomita, calcita e pirita e os foraminíferos bentônicos ocorrem juntamente com argila infiltrada, indicando exposição de depósitos marinhos rasos.



**Figura 16: Composição detrítica original e atual dos arenitos analisados da Bacia do Barreirinhas plotadas em diagramas Folk (1968). Observar a grande variação composicional destes arenitos, assim como a modificação dos arcósios líticos para litoarenitos feldspáticos pela intensa albitização de feldspatos**





**Figura 17:** Principais aspectos de composição detrítica nos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Fragmento de filito (polarizadores cruzados XP); B) Fragmento de ardósia (XP); C) Clorita detrítica (XP); D) Grãos de titanita (setas vermelhas) e epidoto (setas amarelas, XP); E) Fragmento de silcrete formada por calcedônia fibro-radiada (XP); F) Bioclasto de foraminífero bentônico (polarizadores descruzados //P).

### 3.2.3 Diagênese

Os principais processos diagenéticos da Bacia de Barreirinhas são a formação de cutículas de argila infiltrada e autigênica, a expansão de micas por caulinita lamelar, a substituição de feldspatos e o preenchimento de porosidade intergranular por caulinita em livrinhos e vermicular, a precipitação de crescimentos externos e internos de quartzo e albita a albitização de feldspatos, a formação de pseudomatriz lítica pela compactação de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau, a cimentação e substituição por calcita, dolomita e pirita a substituição de minerais pesados por óxidos de titânio, a precipitação de franjas de clorita e a substituição de cutículas autigênicas de argila e micas por clorita. Novamente, a compactação mecânica foi o principal processo responsável pela destruição da porosidade original.

#### **Cutículas de argila**

As argilas ocorrem como cobertura, em geral descontínua dos grãos detríticos e podem ser autigênicas (méd.= 2%; máx.= 6,3%) ou infiltradas (méd.= 1,3%; máx.= 6,7%). As cutículas autigênicas são finas e descontínuas (Figura 18A). As cutículas infiltradas apresentam espessura variável, forma irregular e inclusões de óxidos e matéria orgânica (Figura 18B) e podem ocorrer como agregados pendulares.

#### **Caulinita**

A caulinita ocorre com hábito lamelar expandindo micas (Figura 18C) e como agregados em livrinhos ou vermiculares substituindo feldspatos e preenchendo porosidade intergranular. A sua ocorrência é bastante limitada nos arenitos (méd. e máx. <1%) e as caulinitas em livrinhos e vermicular apresentam substituição por clorita pseudomórfica e calcita poiquilotópica (Figura 18D).

#### **Quartzo**

O quartzo é um dos principais constituinte diagenéticos nos arenitos desta Bacia, ocorrendo como crescimentos externos sintaxiais contínuos e descontínuos (méd.= 4%; máx.= 7%) e como crescimentos internos preenchendo fraturas (méd. <1%; máx.= 1,3%). Os crescimentos externos por vezes encontram-se marcados pela presença de cutículas e franjas de argilas autigênicas. Quando não apresentam esta delimitação, são identificáveis pelo contato geométrico entre crescimentos (Figura 18E). Os limites dos crescimentos internos e externos podem

ser reconhecidos pela presença de pequenas inclusões fluídas, capturadas durante sua precipitação.

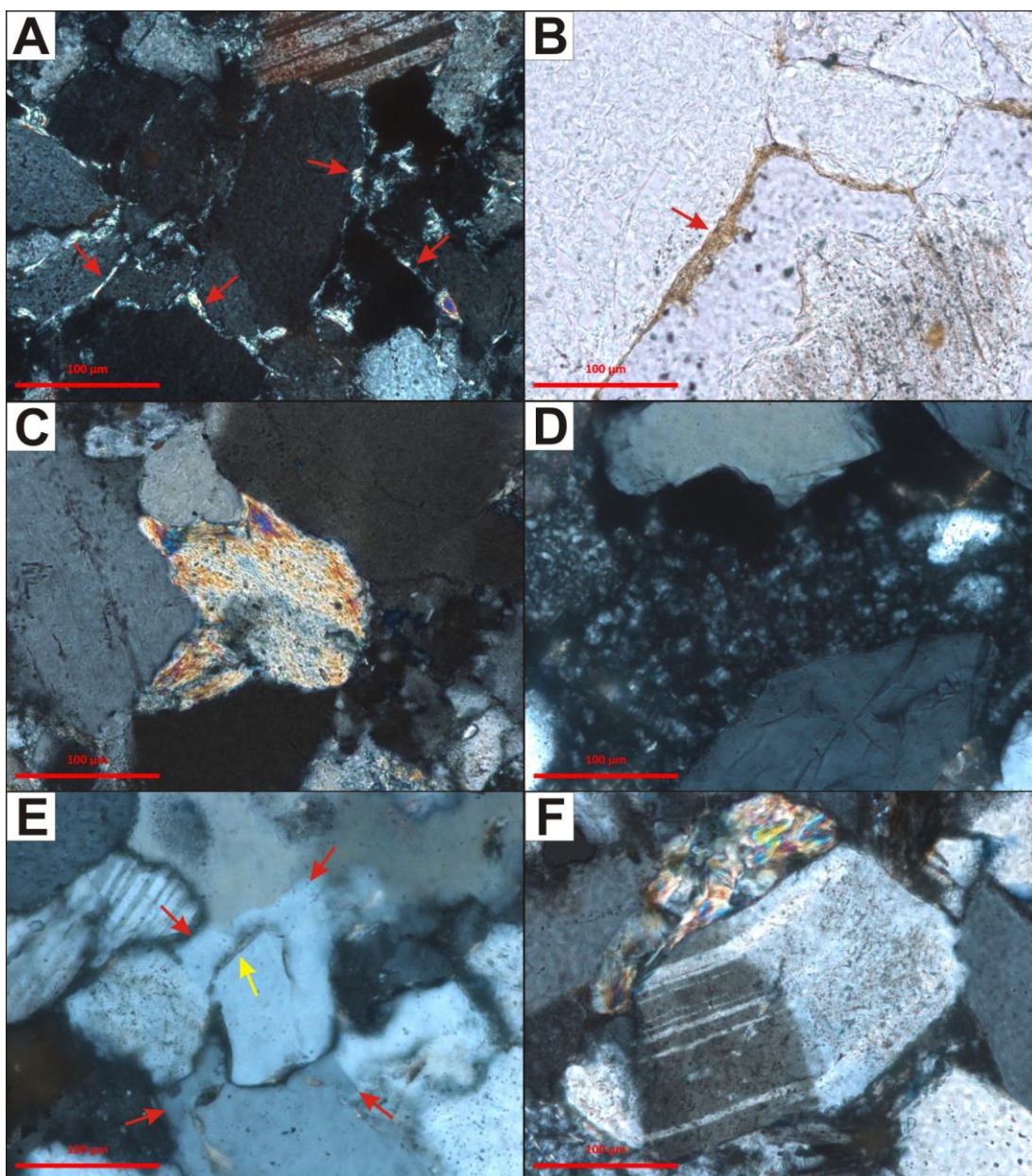
### **Feldspatos**

A substituição de feldspatos por albita microcristalina (Figura 18F) e prismática é um dos principais processos modificadores da composição primária nos arenitos, sendo os plagioclásios mais afetados (méd.= 6%; máx.= 16,7%) e subordinadamente os feldspatos potássicos (méd.= 1,7%; máx.= 4,3%). Crescimentos externos e internos de albita em plagioclásios (Figura 18F) são bastante raros (méd. e máx. <1%).

### **Pseudomatriz lítica**

A compactação mecânica nos arenitos líticos foi o principal processo de redução de porosidade e gerou pseudomatriz lítica (méd. <1%; máx.= 1,7%) (Figura 19A) pela deformação de litoclastos macios, como fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau (ardósias, filitos, xistos, meta-arenitos e meta-siltitos).





**Figura 18:** Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Cutículas de argila autigênica (setas vermelhas) esmagadas entre os grãos pela compactação intensa (polarizadores cruzados XP); B) Cutículas de argila infiltrada (seta vermelha, polarizadores descruzados //P); C) Muscovita parcialmente substituída e expandida por caulinita (XP); D) Agregados de livrinhos de caulinita preenchendo poro intergranular (XP); E) Crescimentos externos de quartzo (setas vermelhas), identificáveis pela presença de franjas de clorita entre os grãos e os crescimentos (seta amarela) e pelos seus contatos geométricos (XP); F) Plagioclásio fraturado e albitizado (XP).

### **Calcita**

A calcita ocorre nos hábitos macrocristalino e mais comumente poiquilotópico (méd.= 2,5%; máx.= 12,7%) (Figura 19B). A calcita ocorre substituindo grãos (méd. <1%; máx.= 3%), livrinhos de caulinita intergranular e cutículas de argila infiltrada (méd. <1%; máx.= 1,3%), e preenchendo porosidade intergranular (méd.= 1,6%; máx.= 8%), encontrando-se parcialmente dissolvida.

### **Dolomita**

A dolomita foi responsável pela obliteração da porosidade nos quartzarenitos, ocorrendo como cristais blocosos preenchendo a porosidade intergranular (méd.= 8,8%; máx.= 24,7%) e substituindo feldspatos e grãos indiferenciados (méd.= 1,8%; máx.= 5%). Sua composição é levemente ferrosa, indicada pela sua coloração azulada após tingimento com Alizarina e Ferricianeto de potássio (Figura 19C). A dolomita apresenta uma zonação composicional constituída de uma fase inicial menos ferrosa (cinza mais escuro), uma fase transicional (bandas alternadas de cinza) e um fase final mais ferrosa (cinza mais claro) (Figura 19D). A dolomita ocorre também substituindo bioclasto como cristais menores que os adjacentes.

### **Pirita**

A pirita ocorre nos hábitos microcristalino, blocoso e framboidal substituindo feldspatos, fragmentos de rocha, intraclastos lamosos e grãos silicosos (méd.= 1%; máx.= 2%) e preenchendo porosidade intergranular (méd. e máx. <1%). A pirita pode, ainda, substituir cutículas de argila infiltrada e dolomita blocosa (Figura 19E e F) (méd. e máx. <1%).

### **Óxidos de titânio**

Os óxidos de titânio (méd. <1%; máx.= 2,7%) ocorrem com hábitos microcristalino e criptocristalino, principalmente substituindo minerais pesados (Figura 20A), mas também podem substituir fragmentos vulcânicos e metamórficos. Foram também observadas raras ocorrências de rutilo acicular substitutivo e crescimentos de titanita sobre grãos detríticos de titanita.

### **Clorita**

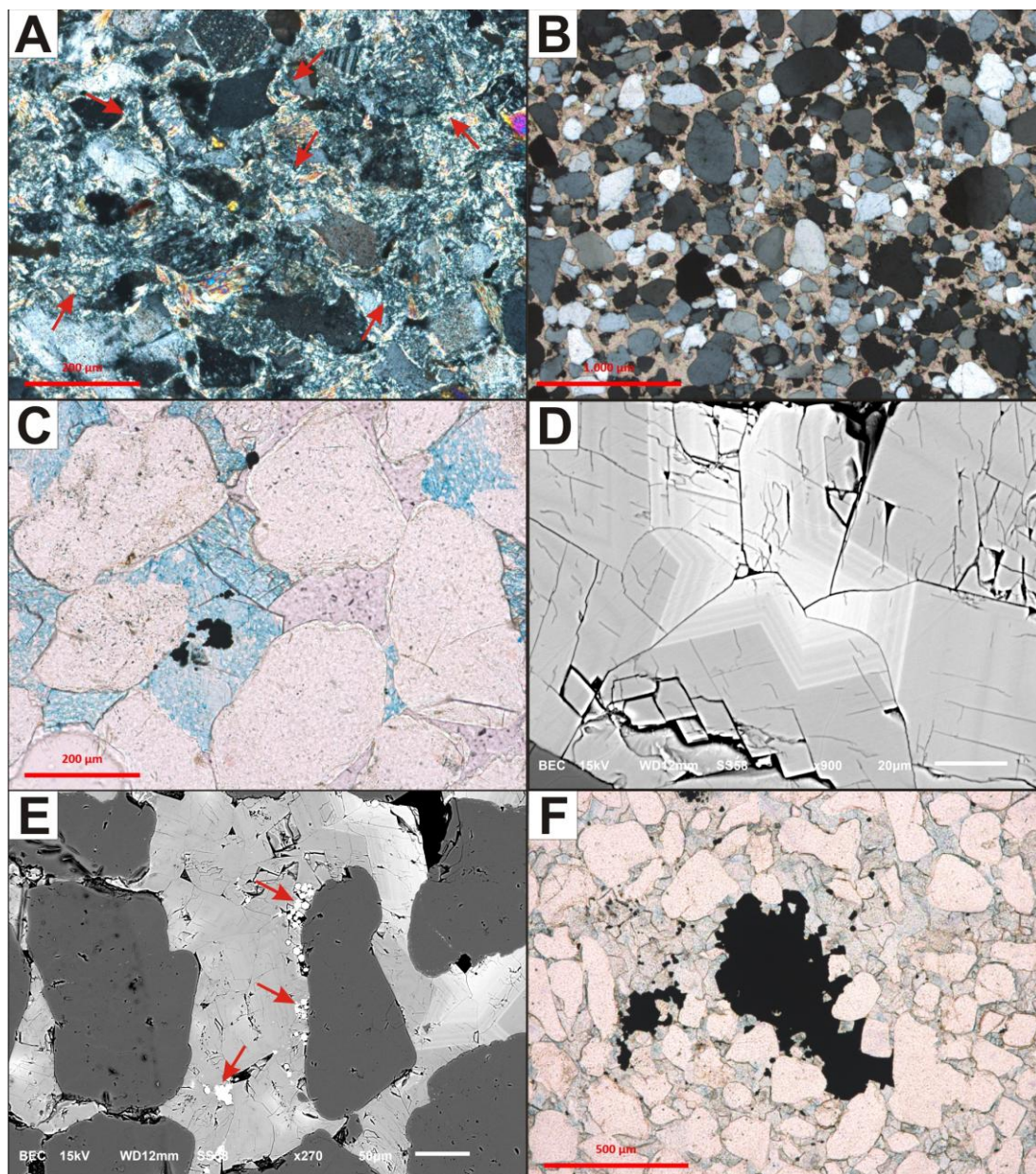
A clorita ocorre principalmente como lamelas substituindo micas (méd. <1%; máx.= 1,3%), como substituição pseudomórfica de cutículas de argila autigênica e como franjas cobrindo estas cutículas (Figura 20B) (méd.= 1,2%; máx.= 4%). A

clorita ocorre subordinadamente como substituição pseudomórfica de agregados de caulinita em livrinhos e vermiculares (méd. e máx. <1%) e como franjas e feixes substituindo grãos (méd. <1%; máx.= 1%).

### **Outros constituintes**

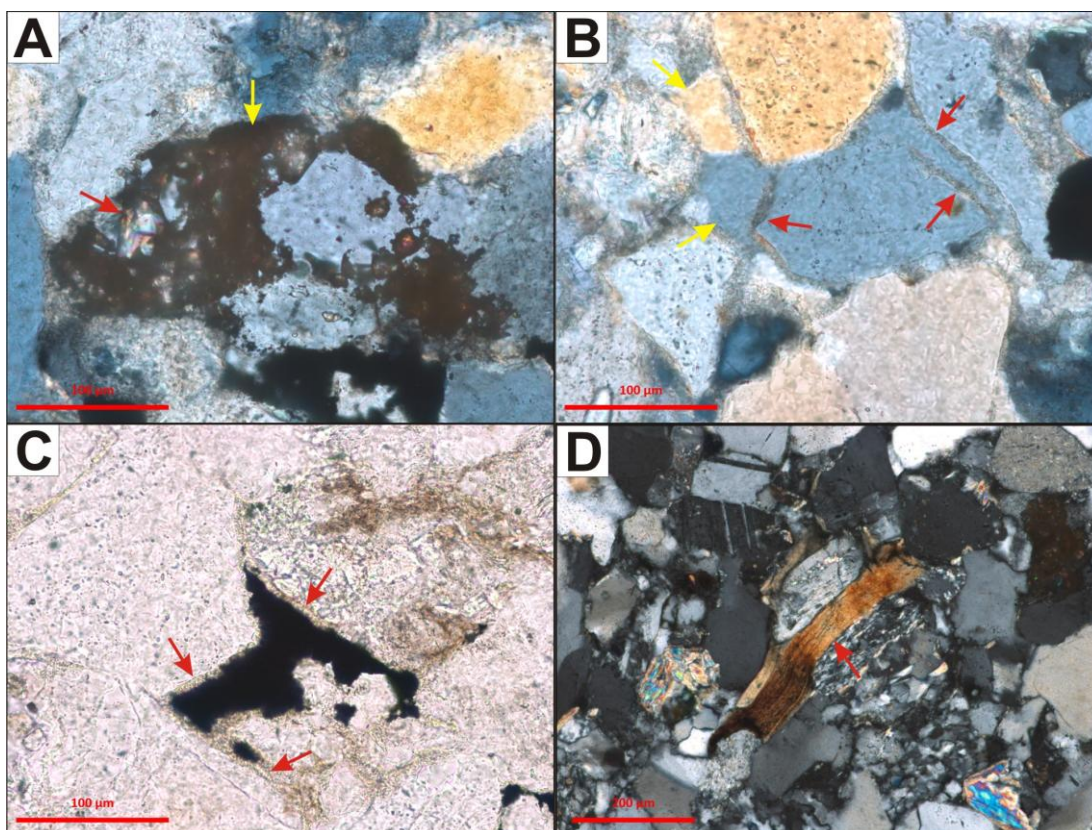
Vermiculita ocorre como lamelas expandindo biotita (méd. e máx. <1%) (Figura 20C). Betume ocorre como preenchimento de porosidade intergranular, comumente cobrindo franjas de clorita (méd. <1%; máx.= 2,7%) (Figura 20D).





**Figura 19: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Pseudomatriz lítica formada pela compactação de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau (setas vermelhas; polarizadores cruzados XP); B) Calcita poiquilotópica preenchendo porosidade intergranular (XP); C) Dolomita blocosa levemente ferrosa preenchendo poros intergranulares (polarizadores descruzados //P); D) Zonação da dolomita com núcleo empobrecido em ferro (cinza mais escuro), fase final rica em ferro (cinza mais claro) fase intermediária com intercalação de membros finais (elétrons retroespalhados - BSE); E) Pirita microcristalina engolfada por dolomita zonada (setas vermelhas, BSE); F) Concreção de pirita corrosiva preenchendo porosidade intergranular e substituindo dolomita (azulada, //P).**





**Figura 20:** Outras feições diagenéticas nos arenitos estudados da Bacia de Barreirinhas. A) Óxidos de titânio (seta amarela) substituindo mineral pesado (seta vermelha, XP+placa  $\frac{1}{4} \lambda$ ); B) Cutículas e franjas de clorita (setas vermelhas) cobertas por crescimentos externos de quartzo (setas amarelas, XP+placa  $\frac{1}{4} \lambda$ ); C) Betume (preto) cobrindo franjas de clorita (setas vermelhas, polarizadores descruzados //P); D) Vermiculita expandindo biotita (seta vermelha, polarizadores cruzados, XP).

### 3.2.4 Compactação

O empacotamento nestes arenitos é variável, sendo que as amostras cimentadas por dolomita blocosa (quartzarenitos) e calcita poiquilotópica (sub-arcósio) sofreram pouco efeito da compactação, mantendo seu empacotamento frouxo. Os arcósios líticos, por sua vez, apresentam empacotamento apertado, com geração de pseudomatriz lítica a partir da compactação de fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau.



### 3.2.5 Porosidade

A porosidade intergranular original nestes arenitos encontra-se extremamente reduzida por compactação mecânica e cimentação de dolomita ou calcita (méd.= 1,5%; máx.= 5%) (Figura 21A). A porosidade intergranular gerada pela dissolução de calcita (Figura 21B) contribui relativamente pouco para a porosidade total no sub-arcósio (méd. <1%; máx.= 1,3%), assim como a dissolução de feldspatos e de minerais pesados (Figura 21C) nos arcósios líticos (méd. <1%; máx.= 2%). Os quartzarenitos, por sua vez, apresentam porosidade intergranular obliterada pela cimentação de dolomita blocosa. A deformação dos fragmentos de rochas metamórficas dos arenitos líticos gerou pseudomatriz que ocupou grande parte da porosidade intergranular (Figura 21D).

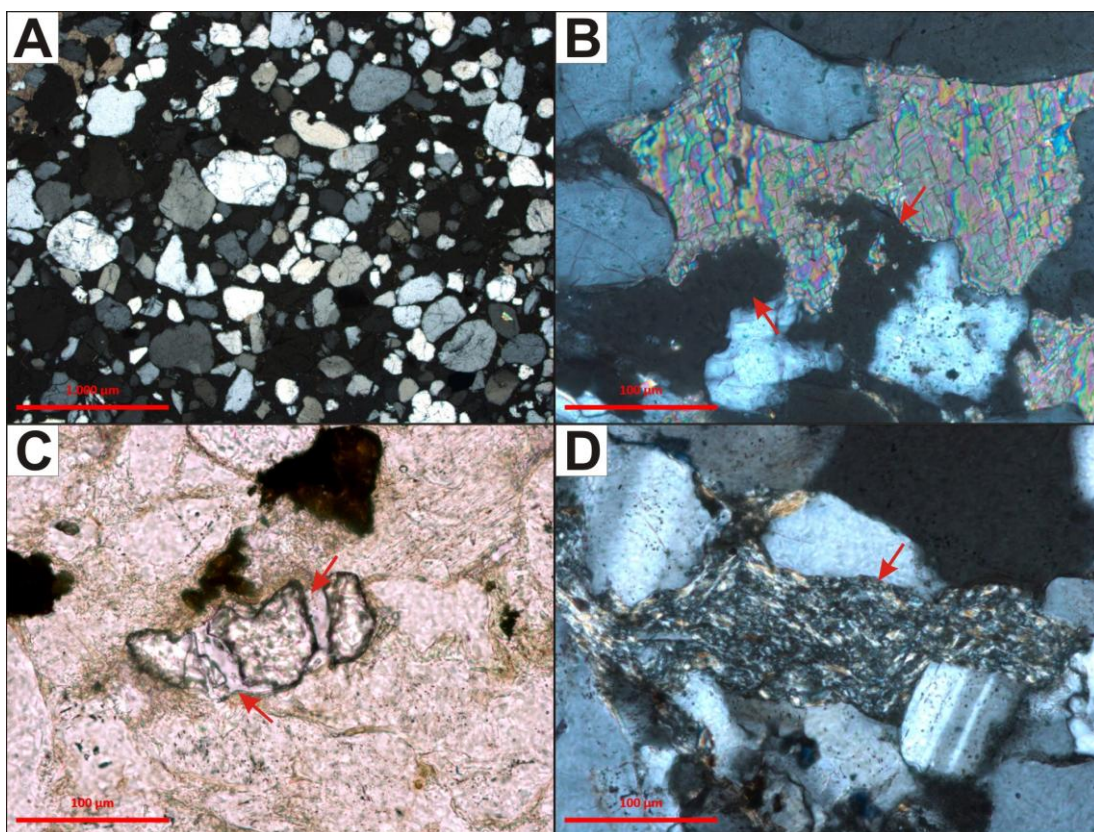


Figura 21: Principais feições de porosidade e empacotamento dos arenitos analisados da Bacia de Barreirinhas. A) Porosidade intergranular original preservada (polarizadores cruzados XP); B) Porosidade de dissolução da calcita (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); C) Porosidade de dissolução de granada (setas vermelhas, //P); D) Fragmento de ardósia deformada pela compactação (seta vermelha, XP).

### **3.3 Bacias de São Luís e Bragança-Viseu**

#### **3.3.1 Estruturas, texturas e fábrica**

Os arenitos analisados destas Bacias mostram estrutura maciça, estratificação paralela, laminação plano-paralela, e laminação irregular. Os arenitos de estrutura maciça podem apresentar orientação caótica ou sub-paralela dos grãos (Figura 22A). A estratificação paralela é formada pela variação granulométrica (Figura 22B). A laminação plano-paralela é formada pela diferença no grau de substituição e cimentação por calcita poiquilotópica, enquanto a laminação irregular é formada pela concentração de intraclastos lamosos (Figura 22C). Deformação da laminação por fluidização ocorre localmente (Figura 22D). Algumas amostras exibem intenso fraturamento dos grãos (Figura 22E), formando uma matriz cataclástica (quantificada como pseudomatriz síltica).

Os arenitos destas bacias são predominantemente finos, com arenitos muito finos, médios e grossos (Figura 22F) subordinados, com raros arenitos bimodais (areia fina/argila e areia grossa/grânulos). As ocorrências de arenitos lamosos e arenitos conglomeráticos são raras, sendo os arenitos levemente conglomeráticos relativamente mais comuns. O grau de seleção das amostras varia de bem selecionado a predominantemente mal selecionado (cf. Compton, 1982). Os grãos são sub-angulares a sub-arredondados, e mais comumente de esfericidade média. Os principais processos de modificação da forma original são a deformação de intraclastos, a corrosão por carbonatos, a dissolução por pressão e o fraturamento de grãos.



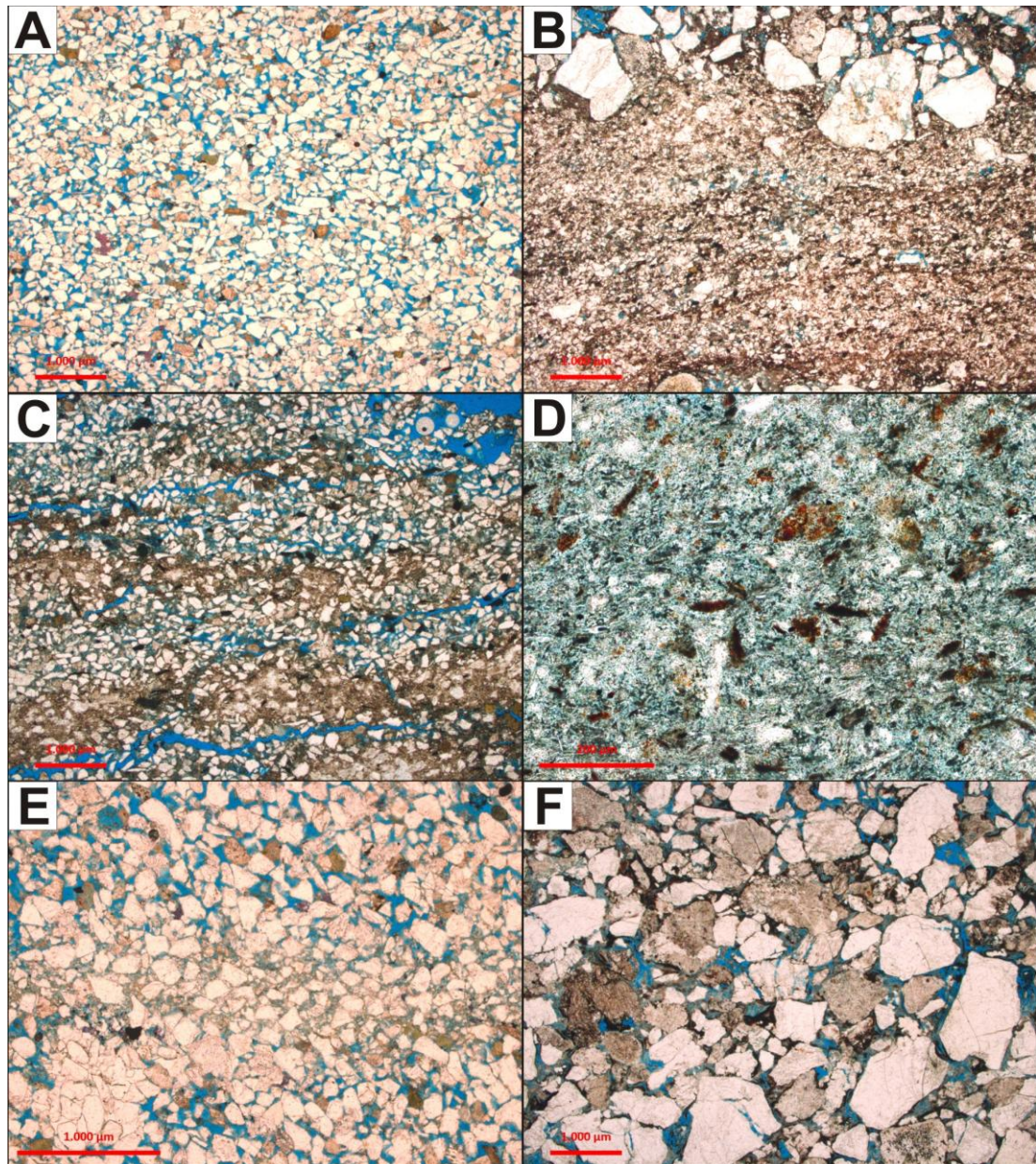


Figura 22: Aspectos texturais e estruturais nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Arenito fino de estrutura maciça (polarizadores descruzados, //P); B) Estratificação paralela marcada pela intercalação de areia e silte (//P); C) Laminação irregular marcada por níveis de concentração de intraclastos lamosos (//P); D) Matriz de fluidização (//P); E) Nível de cataclase, com formação de pseudomatriz síltica (cataclástica, //P); F) Arenito grosso, maciço, com orientação caótica dos grãos (//P).

### 3.3.2 Composição detrítica

A composição detrítica original dos arenitos destas Bacias é relativamente homogênea, sendo os arenitos classificados como arcósios (méd.=  $Q_{55}F_{42}L_{-3}$ ) com duas ocorrências de arcósios líticos (méd.=  $Q_{45}F_{34}L_{-21}$ ) (Fig. 23). A albitização dos feldspatos e a substituição de grãos por calcita são os principais processos modificadores da composição primária nestes arenitos, resultando na passagem de alguns arcósios para sub-arcósios ( $Q_{72}F_{24}L_{-3}$ ) e de um dos arcósios líticos em litoarenitos feldspáticos ( $Q_{55}F_{22}L_{-22}$ ).

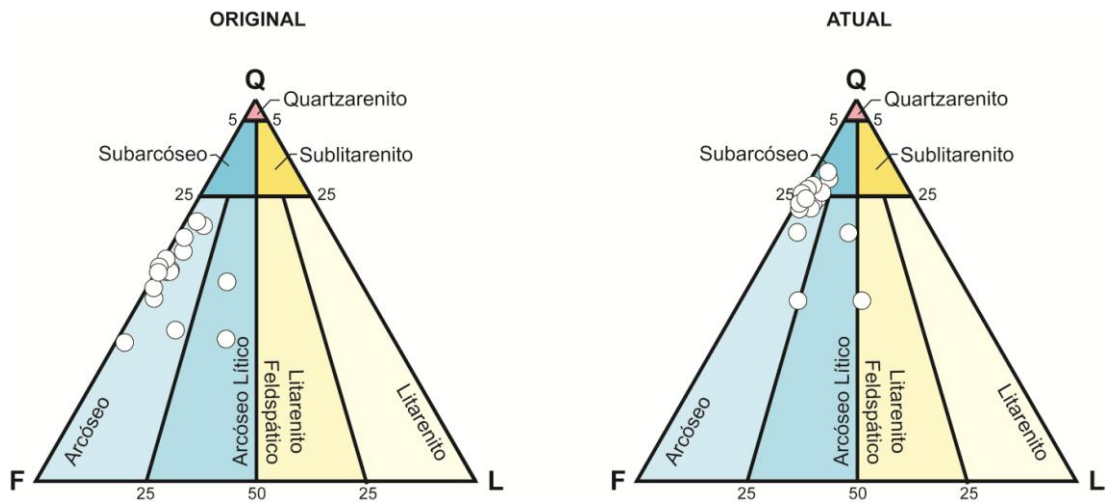
Os grãos de quartzo são predominantemente monocristalinos (méd.= 32,7%; máx. 48%) com ocorrência subordinada de grãos policristalinos (méd.= 3,5%; máx.= 8,3%). Os feldspatos são predominantemente plagioclásio, com ou sem macla (méd.= 16,2%; máx.= 24,3%) (Figura 24A), com microclínio (méd.= 2%; máx.= 5,3%) e ortoclásio (méd.= 2,4%; máx.= 8,3%) subordinados, sendo todos extensamente substituídos por albita e calcita.

Os litoclastos mais abundantes são os fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau como meta-siltitos, meta-arenitos, ardósias, filitos e xistos (méd.= 2,8%; máx.= 18,7%) e fragmentos de rochas plutônicas (méd.= 6,2%; máx.= 16,3%). Litoclastos de ocorrência subordinada incluem fragmentos de rochas sedimentares como arenitos, siltitos e cherts (méd. e máx. <1%) e os fragmentos de rochas vulcânicas de textura afírica e hemicristalina (méd. <1%; máx.= 1,3%). Fragmentos compostos por muscovitas não foliadas e fragmentos com albita sericita e epidoto (Figura 24B) indicam ação hidrotermal ou retro-metamórfica nas rochas-fonte.

Os minerais acessórios principais incluem lamelas individuais de muscovita, biotita (Figura 24C) e clorita (méd.= 3,7%; máx.= 16%), e minerais pesados como titanita, estaurolita, granada, epidoto, turmalina (Figura 24D), zircão e grãos opacos (méd.= 1,6%; máx.= 4,3%). As micas podem apresentar substituição e expansão por caulinita, vermiculita e calcita, e substituição de biotita por clorita e dos minerais pesados por óxidos de titânio diagenético.

Os principais constituintes intrabaciais incluem intraclastos lamosos (méd.= 2,9%; máx.= 17,3%) (Figura 24E), pelóides argilosos (méd. <1%; máx.= 2,3%) (Figura 24F) e matriz siliciclástica de fluidização (méd.= 1,7%; máx.= 26,7%) (Figura 22D). Outros constituintes de ocorrência subordinada são os intraclastos arenosos e de solo, fragmentos carbonosos e os bioclastos fosfáticos (méd. <1%; máx.= 1,3%). Os intraclastos lamosos e pelóides argilosos sofreram compactação,

gerando pseudomatrix lamosa, e podem apresentar substituição por caulinita e clorita. Os grãos intrabaciais podem apresentar dissolução parcial e substituição por pirita, hematita, caulinita e clorita.



**Figura 23: Composição detrítica original e atual dos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu plotadas em diagramas Folk (1968). Observar o deslocamento para composições mais quartzosas e líticas no diagrama Atual pela albitização e dissolução de feldspatos e substituição por carbonatos.**



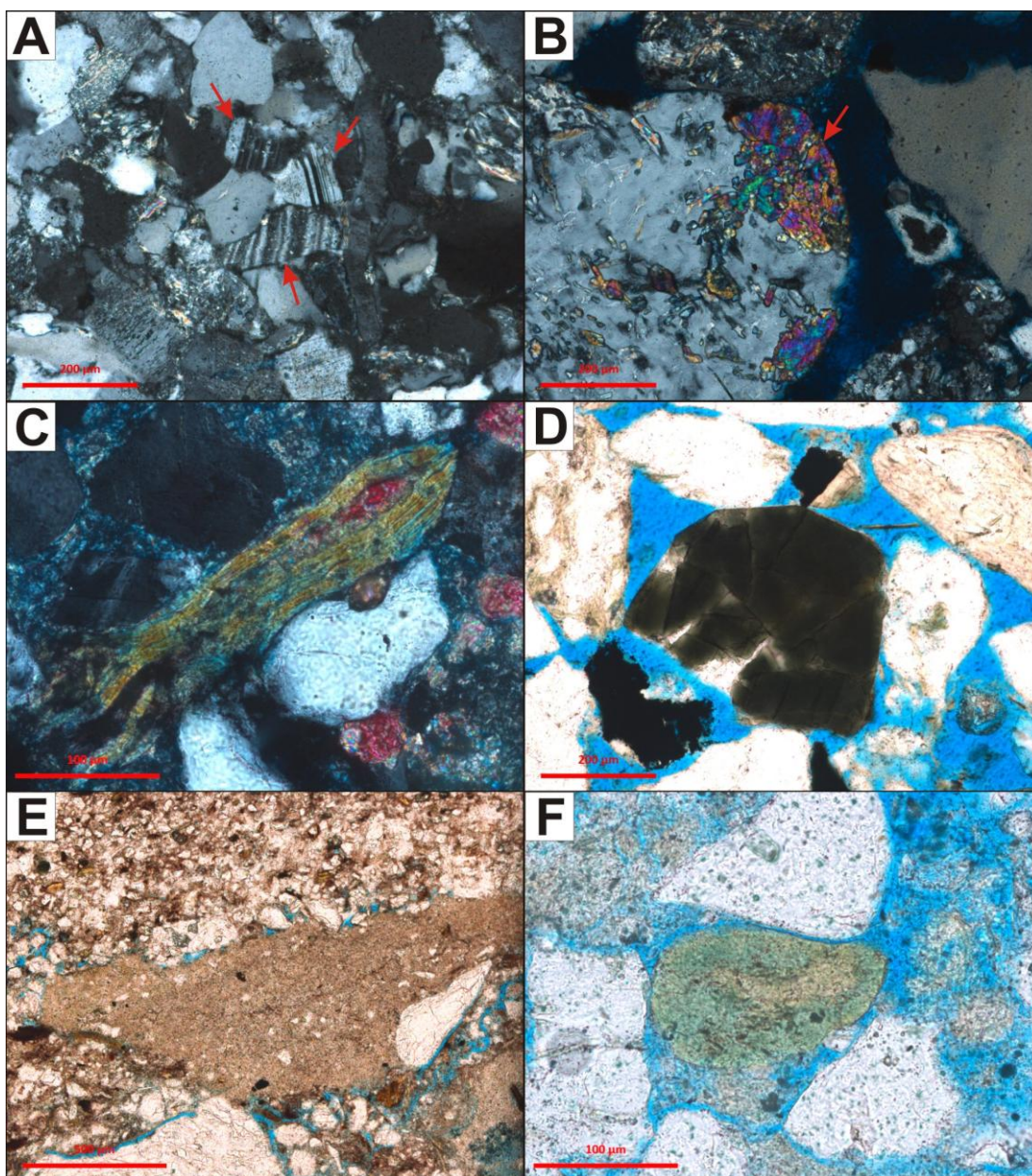


Figura 24: Principais aspectos de composição detrítica nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Grãos de plagioclásio (seta vermelha, polarizadores cruzados XP); B) Epidoto em fragmento de rocha (seta vermelha, XP); C) Lamela de biotita expandida por calcita (XP); D) Grão de turmalina detrítica (polarizadores descruzados, //P); E) Intraclasto lamoso (//P); F) Pelóide argiloso indiferenciado (//P).

### 3.3.3 Diagênese

Os principais processos diagenéticos observados nos arenitos analisados destas Bacias são a formação de cutículas de argila autigênica e infiltrada, a substituição e expansão de micas por caulinita e vermiculita lamelar, a substituição de grãos e preenchimento de poros por caulinita em livrinhos, a precipitação de crescimentos internos e externos de quartzo, e de albita, a albitização de feldspatos, compactação de intraclastos a pseudomatriz, a precipitação de franjas de illita, a cimentação e substituição por calcita, dolomita e pirita, a substituição por esmectita, hematita e óxidos de titânio, e a substituição de micas e cutículas de argila por clorita e precipitação de franjas de clorita. Abaixo, estão descritos os principais processos diagenéticos observados.

#### **Cutículas de argila**

As cutículas de argila apresentam duas origens distintas: formação *in situ* e infiltração. As cutículas de argila autigênica (méd. <1%; máx.= 4,3%) são finas e descontínuas e podem ocorrer preenchendo fraturas em grãos. As de argilas infiltradas (méd.= 3,3%; máx.= 19,7%) ocorrem como cutículas de espessura variável, forma irregular e inclusões de óxidos e matéria orgânica, e como agregados de orientação caótica preenchendo poros (Figura 25A e B). A argila infiltrada apresenta substituição heterogênea por hematita. Os dois tipos de cutículas podem apresentar substituição por clorita. As argilas podem se encontrar fragmentadas e descoladas das superfícies dos grãos.

#### **Vermiculita**

A vermiculita ocorre como lamelas substituindo e expandindo biotitas (méd. e máx. <1%) (Figura 25B) e pode ser encontrada parcialmente substituída por siderita microcristalina. A vermiculita pode ser diferenciada da caulinita pelo seu pleocroísmo e birrefringência mais alta amarelos.

#### **Caulinita**

A caulinita apresenta hábito de lamelas e em livrinhos. As lamelas de caulinita substituem e expandem micas (méd. <1%; máx.= 5,3%) e de maneira subordinada substituindo intraclastos e pseudomatriz lamosos (méd. e máx. <1%) e os livrinhos de caulinita ocorrem preenchendo porosidade intergranular (méd. e máx. <1%) (Figura 25C). A clorita pode substituir pseudomorficamente as lamelas de caulinita.

### **Quartzo**

O quartzo ocorre como crescimentos externos sintaxiais descontínuos cobrindo grãos (méd. <1%; máx.= 2,3%) e internos preenchendo fraturas (méd. e máx. <1%) em grãos de quartzo monocristalino, marcados por linhas de inclusões fluídas. Na ausência destas inclusões, os crescimentos externos de quartzo podem ser identificados pelos seus contatos geométricos entre crescimentos.

### **Feldspatos**

A albitização de feldspatos é um dos principais processos de modificação da composição primária nos arenitos estudados, sendo os principais afetados os plagioclásios (méd.= 8,5%; máx.= 24,7%) e, subordinadamente, os feldspatos potássicos (méd.= 2,5%; máx.= 6%) (Figura 25E). Crescimentos de albite externos cobrindo grãos e internos preenchendo fraturas (méd. <1%; máx.= 4,3%) são observados em plagioclásios. Crescimentos de feldspato potássico sobre grãos de microclínio são raros (Figura 25F) (méd. e máx. <1%).

### **Pseudomatriz lamosa**

A pseudomatriz lamosa é formada pela compactação de intraclastos lamosos e pelóides argilosos (méd.= 2%; máx.= 11,7%) (Figura 26A) e é um dos principais processos de redução da porosidade intergranular. A pseudomatriz pode apresentar substituição por caulinita, clorita, hematita e pirita.



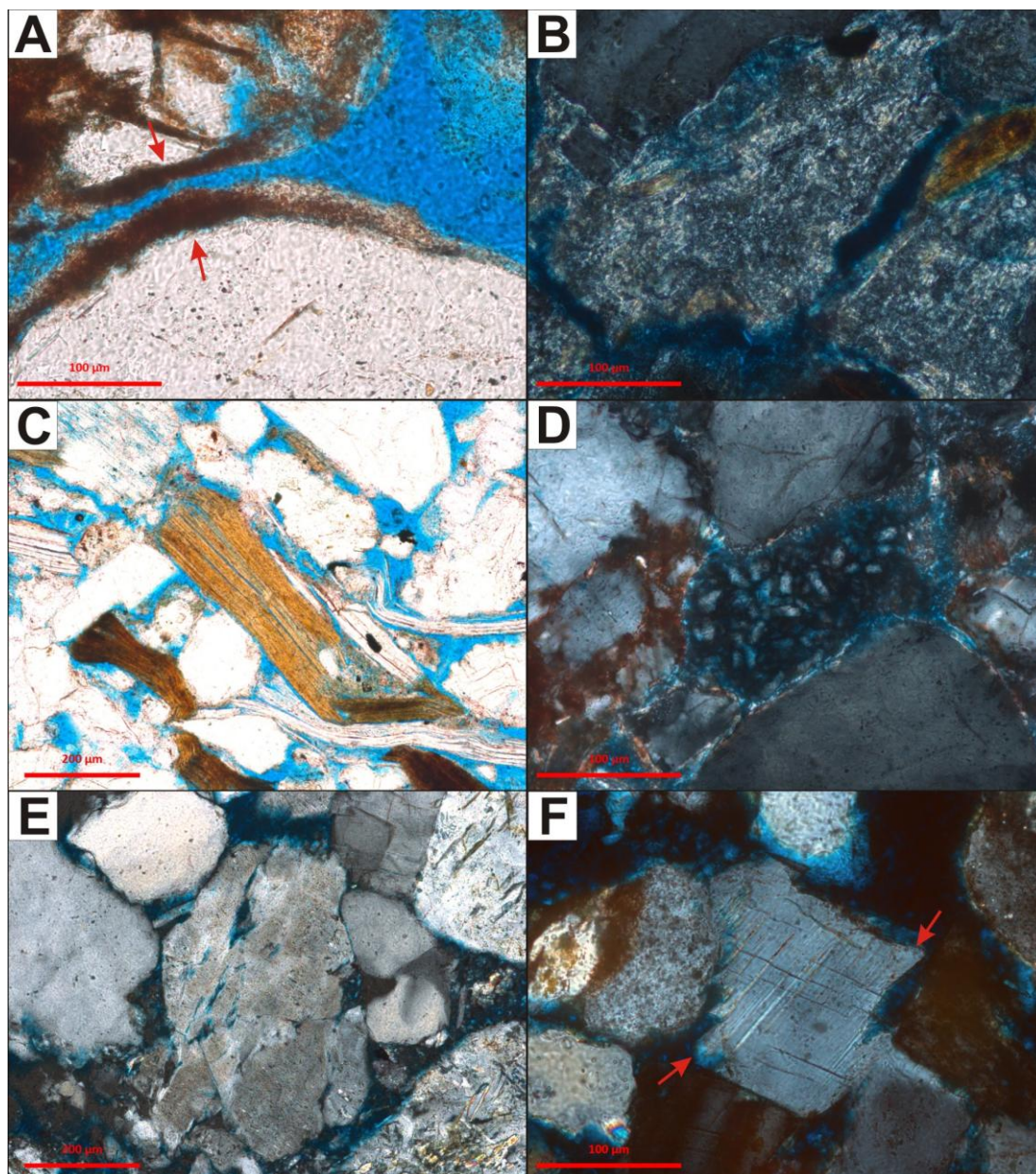


Figura 25: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Cutículas de argila infiltrada, parcialmente substituídas por hematita (setas vermelhas, polarizadores descruzados //P); B) Argila infiltrada como agregados de orientação caótica preenchendo porosidade intergranular (polarizadores cruzados XP); C) Lamelas de biotita substituídas e expandidas por vermiculita (//P), D) Caulinita Preenchendo porosidade intergranular (polarizadores cruzados XP); E) Albita microcristalina substituindo feldspato (aspecto “vacuolizado”) parcialmente dissolvido (XP); F) Crescimentos de feldspato potássico sobre grão de microclínio (setas vermelhas, XP).

### **Ilita**

A ilita ocorre como franjas fibrosas cobrindo cutículas de argila autigênica (méd. <1%; máx.= 8%) (Figura 26B) nas amostras sem franjas de clorita.

### **Calcita**

A calcita ocorre nos hábitos macrocristalino e poiquilotópico (Figura 26C), ocorrendo como calcita ferrosa ou não ferrosa, separadas pela coloração violeta da calcita ferrosa e rosa da calcita não ferrosa em resposta a solução de Alizarina e Ferricianeto de potássio (Figura 26D). A calcita substitui feldspatos, fragmentos de rochas, grão intrabaciais (méd. <1%; máx.= 8,3%) e preenche porosidade intergranular (méd. <1%; máx.= 7,3%). A calcita também substitui cutículas de argila infiltrada, pseudomatriz lamosa e matriz de fluidização e expande biotita (méd. e máx. <1%).

### **Dolomita**

A dolomita ocorre nos hábitos poiquilotópico e em sela (Figura 26E). Este constituinte substitui feldspatos (méd. <1%; máx.= 2%) e preenche poros intergranulares (méd. e máx. <1%).

### **Pirita**

A pirita apresenta hábito microcristalino, blocoso e framboidal e ocorre principalmente substituindo feldspatos, fragmentos de rocha, grãos intrabaciais e matriz de fluidização (méd.= 1%; máx.= 3,7%) (Figura 26F). A pirita pode ainda preencher porosidade intergranular, expandir biotitas e substituir pseudomatriz lamosa (méd. e máx. <1%).

### **Esmectita**

A esmectita ocorre como cutículas, como franjas cobrindo as cutículas (Figura 27A) (méd. <1%; máx.= 5%) e como agregados microcristalinos substituindo grãos (méd. <1%; máx.= 4,7%).

### **Hematita**

A hematita apresenta hábito microcristalino e ocorre, principalmente, substituindo feldspatos, fragmentos de rocha, grãos intrabaciais (méd. e máx. <1%) e cutículas de argila infiltrada (méd.= 1,1%; máx.= 9,3%) (Figura 27B). A hematita substitui de maneira subordinada cristais de siderita e pseudomatriz lamosa (Figura 27E) (méd. e máx. <1%). Este constituinte geralmente ocorre relacionado com litologias mais finas, intercaladas com os arenitos.

### **Óxidos de titânio**

Os óxidos de titânio ocorrem como agregados microcristalinos e criptocristalinos. Substituem, principalmente, minerais pesados (Figura 27C), mas também feldspatos, fragmentos de rocha e cutículas de argila infiltrada (méd. e máx. <1%).

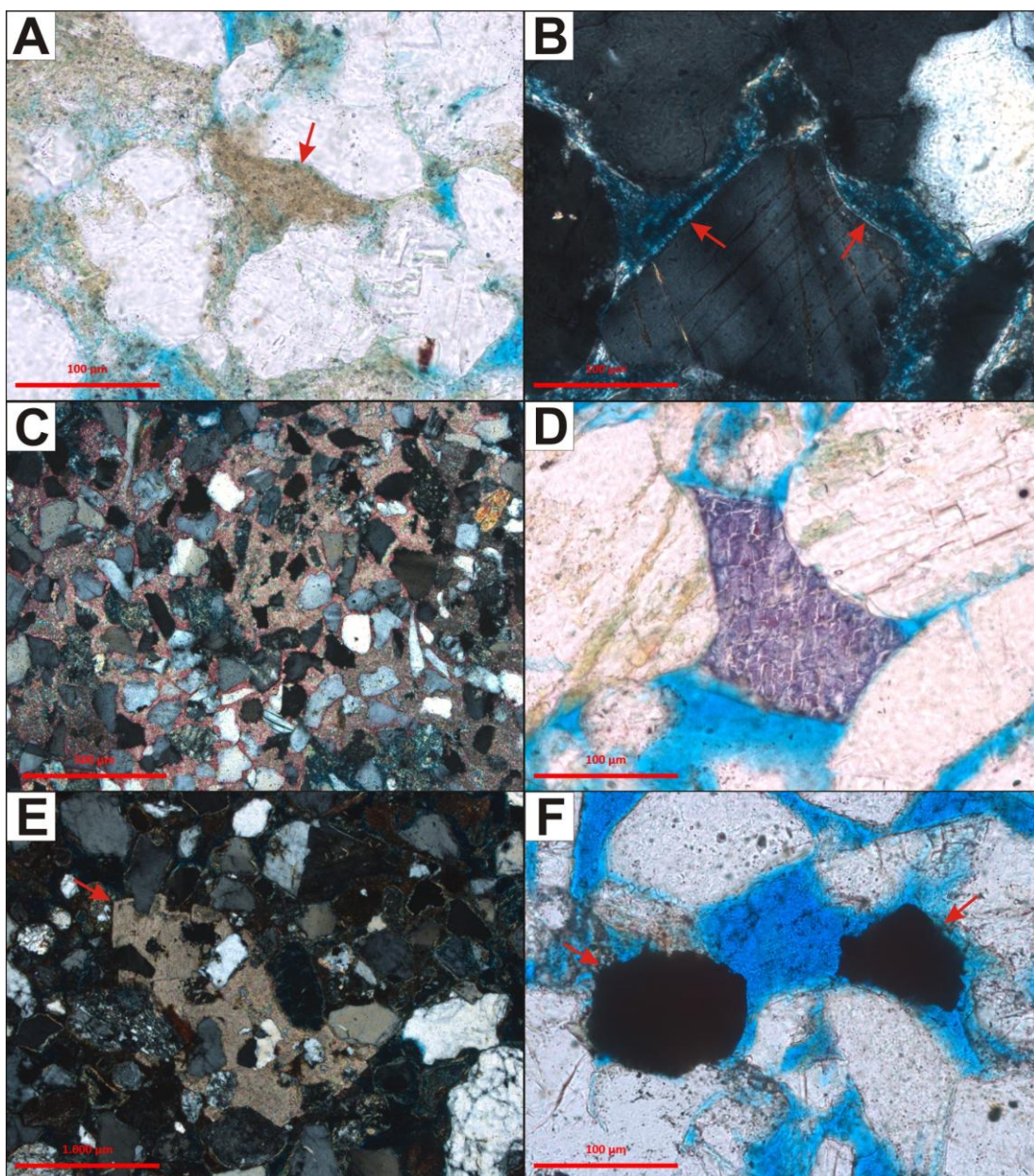
### **Clorita**

A clorita ocorre, principalmente, como lamelas substituindo micas, pseudomatriz lamosa e intraclastos lamosos (méd. <1%; máx. 3,7%). Também ocorre substituindo pseudomorficamente cutículas de argila autigênica e infiltrada e lamelas de caulinita expansiva e como rosetas e franjas cobrindo cutículas de argila (Figura 27D) (méd. e máx. <1%).

### **Outros constituintes**

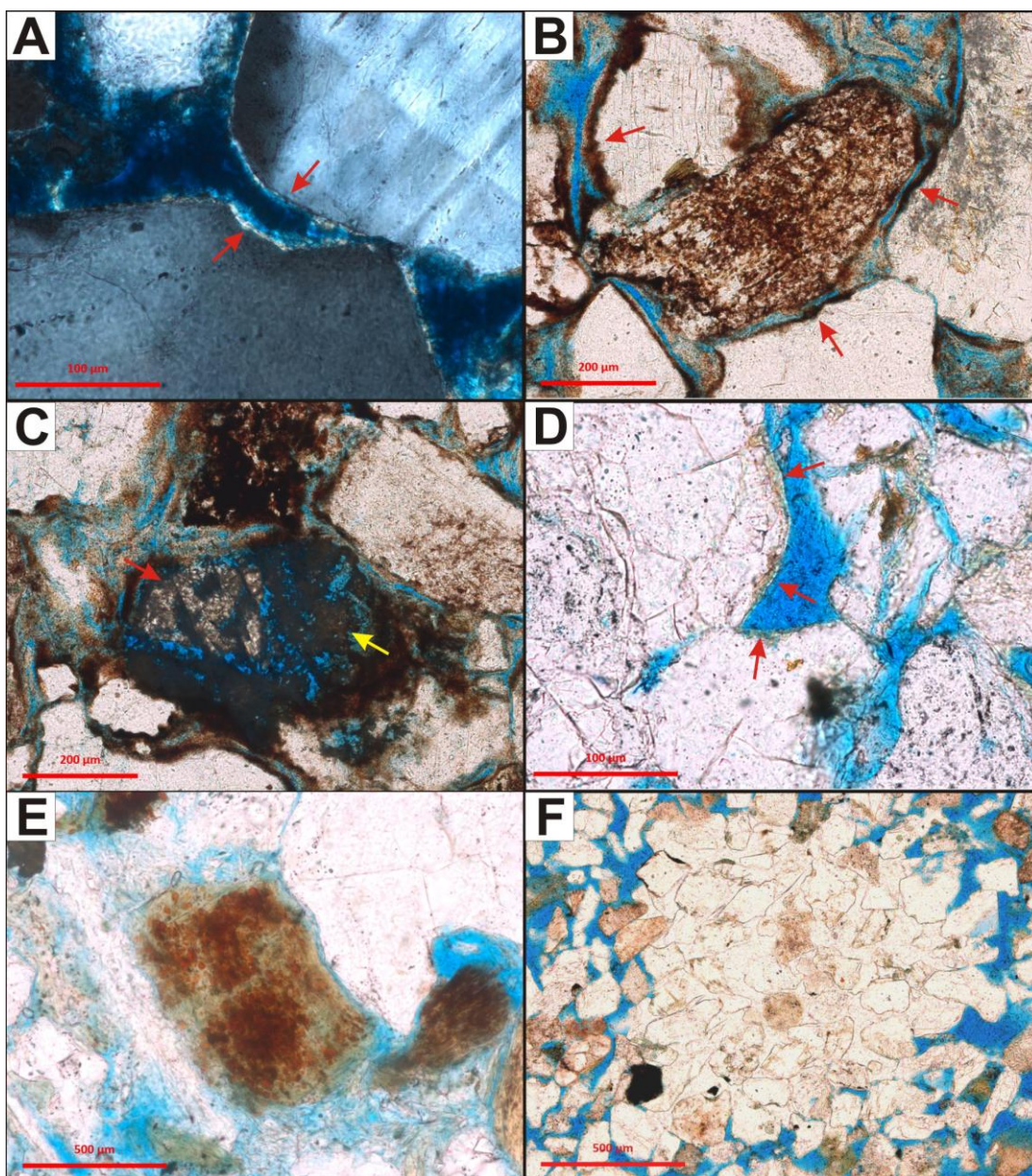
A siderita ocorre nos hábito microcristalino substituindo e expandindo biotita (méd. e máx. <1%) (Figura 27E). Analcima ocorre como cristais poiquilótópicos zonados levemente anisotrópicos preenchendo poros intergranulares (méd. e máx. <1%) (Figura 27F). Pseudomatriz cataclástica formada pelo intenso fraturamento de grãos detríticos (méd. <1%; máx.= 5,7%) e pseudomatriz lítica da compactação de fragmentos de rocha dúcteis (méd. e máx. <1%) também são observadas.





**Figura 26: Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Pseudomatriz formada pela compactação de intraclastos lamosos (seta vermelha, polarizadores descruzados //P); B) Franjas de ilita fibrosa cobrindo cutículas de argila autigênica (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); C) Calcita poiquilotópica preenchendo poros intergranulares (XP); D) Calcita ferrosa preenchendo parcialmente porosidade intergranular (//P); E) Dolomita poiquilotópica preenchendo porosidade intergranular e substituindo grãos (XP); F) Pirita microcristalina substituindo constituintes primários indiferenciados (setas vermelhas, //P).**





**Figura 27:** Principais feições diagenéticas nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Franjas de esmectita cobrindo cutícula de esmectita autigênica (setas vermelhas, polarizadores cruzados XP); B) Hematita microcristalina substituindo cutículas de argila infiltrada e grão de feldspato indiferenciado (setas vermelhas, polarizadores descruzados //P); C) Óxidos de titânio (seta amarela) substituindo mineral pesado (seta vermelha) parcialmente dissolvido (//P); D) Franjas de clorita cobrindo cutículas de argila autigênica (setas vermelhas, //P); E) Siderita microcristalina substituindo e expandindo biotita (//P); F) Cristal poiquilotópico de analcima (“mancha”) preenchendo poros intergranulares (//P).

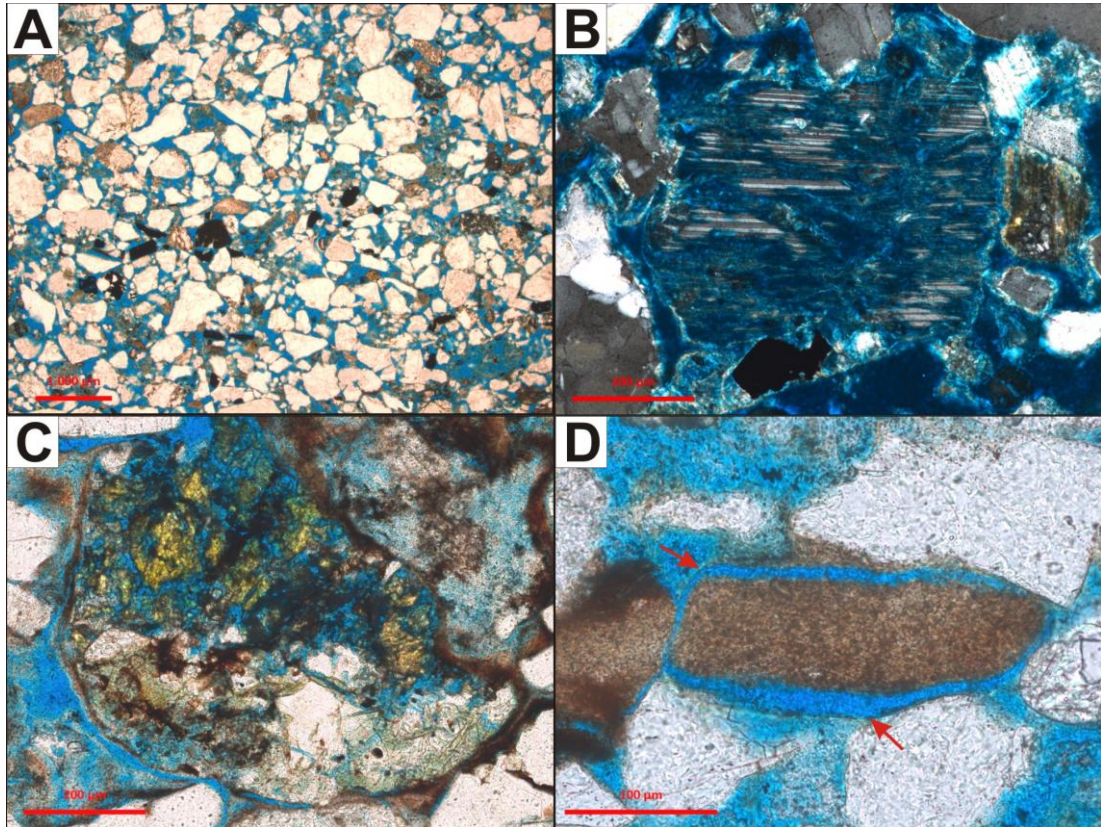


### 3.3.4 Compactação

O empacotamento nestes arenitos é predominantemente frouxo, com ocorrência subordinada de empacotamento normal. A cimentação por calcita e a presença de intraclastos lamosos dispostos como laminações serviram como sustentação do arcabouço, impedindo uma compactação mais intensa. No caso dos intraclastos lamosos a compactação gerou pseudomatriz lamosa através de sua deformação.

### 3.3.5 Porosidade

A porosidade intergranular primária encontra-se bastante preservada nestes arenitos (méd.= 9,3%; máx.= 16,7%) (Figura 28A), sendo a formação de pseudomatriz lamosa pela compactação de intraclastos macios e a cimentação por carbonatos os principais processos pela sua redução. A dissolução de constituintes primários é um importante processo que contribui positivamente para a porosidade total, sendo os principais afetados os feldspatos (méd.= 3,3%; máx.= 6%) (Figura 28B), os fragmentos de rochas metamórficas, plutônicas e sedimentares (méd. <1%; máx.= 2%) (Figura 28C), os intraclastos lamosos, pelóides argilosos e a matriz de fluidização (méd. <1%; máx.= 3,3%) e grãos de epidoto (méd. <1% e máx.= 1,3%). A dissolução de calcita foi um processo importante na geração de porosidade secundária, mas encontra-se restrito a uma amostra (méd. <1%; máx.= 1,33%). A dissolução de siderita, dolomita e pseudomatriz também são observadas, mas com ocorrência restrita (méd. e máx. <1%). A porosidade de fratura em grãos (méd. <1%; máx.= 3,3%) e em rocha (méd. e máx <1%) e a porosidade de contração por desidratação de intraclastos lamosos (Figura 28D) e cutículas de argila (méd. <1%; máx.= 1,3%) são de importância subordinada para a porosidade total.



**Figura 28: Principais aspectos de porosidade nos arenitos analisados das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. A) Porosidade intergranular primária preservada (polarizadores descruzados //P); B) Porosidade de dissolução de plagioclásio (polarizadores cruzados, XP); C) Porosidade de dissolução de epidoto (amarelo esverdeado) e feldspato em fragmento de rocha plutônica (//P); D) Porosidade de contração de intraclasto lamoso (//P).**

## 4 DISCUSSÃO

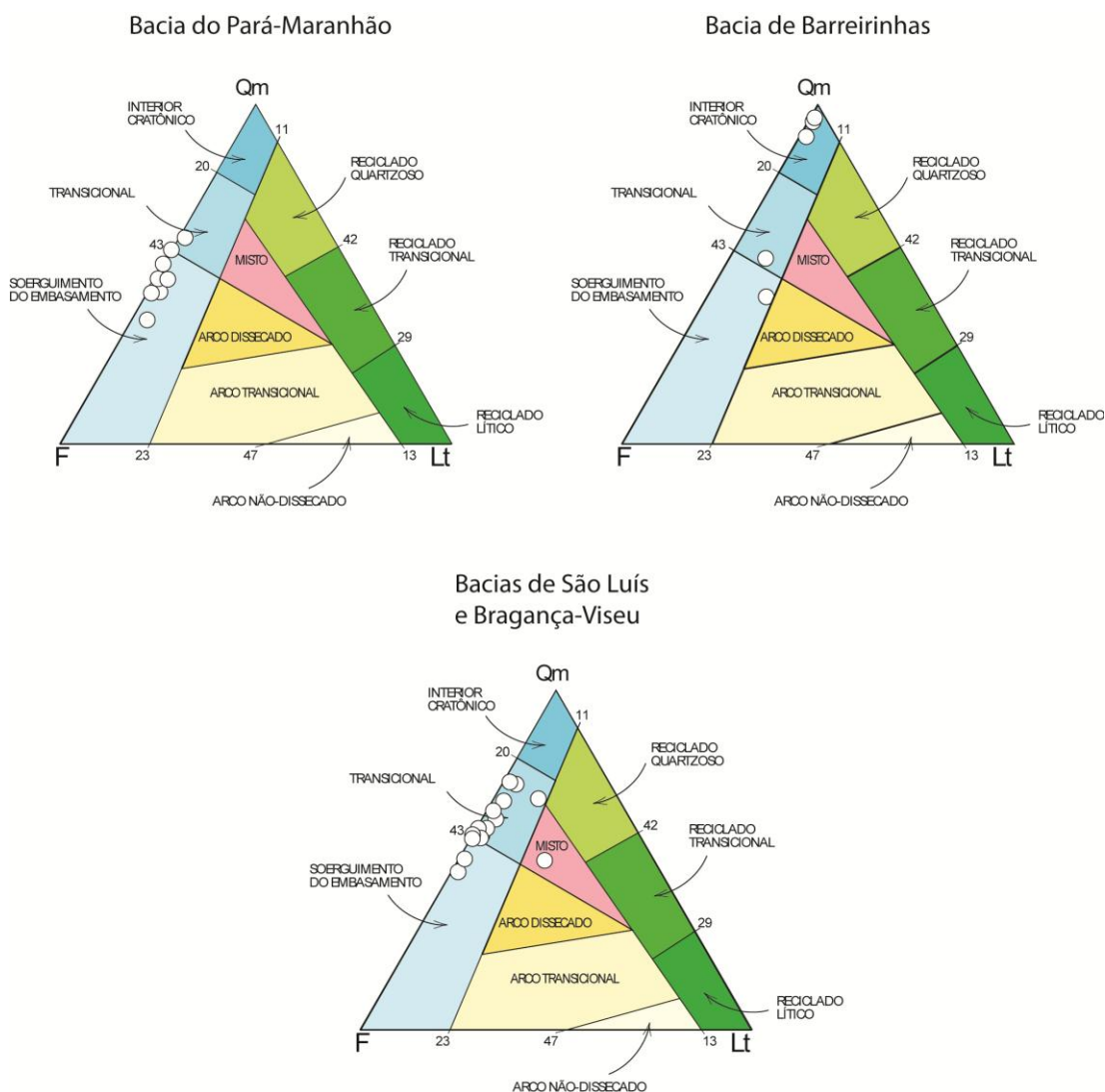
### 4.1 Proveniência

Os arenitos da Bacia do Pará-Maranhão analisados apresentam uma composição detrítica essencial quartzo-feldspática indicando proveniência de soerguimento do embasamento, com transição para condições progressivamente cratônicas (*sensu* Dickinson, 1985) (Figura 29). Fragmentos de rochas metamórficas de baixo grau são provenientes da reciclagem de terrenos orogênicos. Os fragmentos de rocha são predominantemente de tipos plutônicos do embasamento soerguido. Contudo, a abundância de fragmentos plutônicos com epidotos, juntamente com sericita e albita substituindo os feldspatos sugere a ação de processos hidrotermais ou retro-metamórficos atuantes nas áreas-fonte (Bird & Spieler, 2004), o que seria também sugerido pela ocorrência de fragmentos de rochas não foliadas constituídos por lamelas desorientadas de clorita, e pela abundância de grãos de epidotos entre os minerais detríticos pesados.

A Bacia de Barreirinhas apresenta a maior variação composicional, apresentando composições quartzosas provenientes de crátons estáveis e quartzo-feldspáticos de soerguimento do embasamento (*sensu* Dickinson, 1985) (Figura 29). Os fragmentos de rochas são predominantemente plutônicos, mas fragmentos de rochas metamórficas e sedimentares indicam uma contribuição da reciclagem de terrenos orogênicos. O epidoto representa o principal mineral pesado presente nestas rochas, indicando aqui também a ação hidrotermal sobre os terrenos-fonte (Bird & Spieler, 2004).

As Bacias de São Luís e Bragança-Viseu apresentam composições predominantemente quartzo-feldspáticas características de soerguimento de embasamento com transição continental. Uma ocorrência de mistura de arco magmático, cráton estável, soerguimento do embasamento e reciclagem orogênica

foi observada (*sensu* Dickinson, 1985) (Figura 29). Fragmentos de rochas metamórficas e sedimentares são provenientes de reciclagem. Epidoto foi igualmente o mineral pesado mais comumente encontrado nos arenitos destas bacias, sugerindo alterações hidrotermais sobre os terrenos-fonte (Bird & Spieler, 2004). Fragmentos de rocha não foliadas constituídas por lamelas de muscovita detrítica também podem ser de origem hidrotermal.



**Figura 29: Diagramas Dickinson (1985), onde Qm representa a quantidade de quartzo monocrystalino, Lt a soma de litoclastos metamórficos, sedimentares, vulcânicos e quartzo policristalino e F os feldspatos totais. As Bacias apresentam uma distribuição relativamente homogênea entre os vértices Qm e F.**

## 4.2 Processos e padrões diagenéticos

Os padrões de ocorrência dos processos e produtos diagenéticos foram identificados pela análise petrográfica e suas relações paragenéticas foram detalhadas por microscopia eletrônica de varredura. Abaixo são discutidos seus processos de formação bem como seu impacto na porosidade dos arenitos.

### 4.2.1 Bacia do Pará-Maranhão

Os processos diagenéticos reduziram fortemente a porosidade destes arenitos. Os principais processos diagenéticos da Bacia do Pará-Maranhão são apresentados na Figura 30.

O primeiro processo diagenético atuante nas rochas estudadas foi a formação de cutículas de argila autigênica ou infiltrada. A formação de cutículas de argila autigênica (provavelmente esmectitas) ocorreu em ambientes áridos, onde a taxa de evaporação supera a taxa de precipitação e resulta na concentração das águas subterrâneas em  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  por evaporação e dissolução de fases detríticas instáveis (Worden & Morad, 2003). A ação destas águas ricas em íons também resultou na precipitação de crescimentos de K-feldspato (Worden & Burley, 2003; Morad *et al.*, 2010), que não tiveram impacto perceptível sobre a porosidade.

As argilas infiltradas apresentam origem detrítica e foram introduzidas através da zona vadosa de sedimentos grossos sob clima seco, sendo concentradas em três condições principais (Walker, 1976): 1) na zona vadosa, devido a pouca infiltração de água, resultando no aprisionamento das argilas em meniscos e agregados pendulares; 2) ao longo do nível freático, onde as águas sofrem uma redução na velocidade de infiltração; e 3) acima de barreiras impermeáveis, como embasamento, camadas lamosas, paleossolos ou níveis de caliche.

As cutículas e franjas de clorita podem apresentar um impacto positivo para a porosidade em reservatórios profundos por inibirem a precipitação de crescimentos de quartzo, importante processo de redução da porosidade em profundidade (Pittman, *et al.*, 1992, Bloch *et al.*, 2002, Anjos *et al.*, 2003, Berger *et al.*, 2009). As argilas autigênicas não foram eficazes na inibição da cimentação por quartzo nos arenitos estudados, devido ao seu caráter descontínuo, tal como observado em outras unidades (Pittman, *et al.*, 1992, Adjukiewicz, 2010). As argilas infiltradas inibiram a cimentação de quartzo, porém localmente preencheram a



porosidade como agregados caóticos. Com o soterramento progressivo, as argilas de composição esmectítica tornaram-se instáveis, transformando-se em clorita. Esta transformação libera água, causando a contração dos agregados. Este processo é evidenciado pelo descolamento das cutículas da superfície dos grãos, semelhante ao encontrado por Moraes & De Ros (1992) na Formação Sergi, Bacia do Recôncavo.

A incursão de águas meteóricas levemente ácidas e de baixas concentrações iônicas promoveu a dissolução de feldspatos e minerais pesados e a precipitação de caulinita (Worden & Morad, 2003). A vermiculita ocorre de maneira concomitante com a caulinita, formando-se como produto de alteração de biotitas (Price & Velbel, 2000). O impacto da caulinita foi negativo pelo preenchimento de porosidade primária. A precipitação de argilas expansivas (caulinita e vermiculita) resultou na redução da porosidade, particularmente nos arenitos micáceos. A dissolução de feldspatos e pesados teve um impacto positivo na porosidade, porém reduzido pela precipitação de caulinita e óxidos de titânio, respectivamente. O impacto da caulinita e vermiculita na porosidade foi subordinado em comparação a compactação e com a cimentação por quartzo e calcita.

A compactação foi o principal processo de redução de porosidade nos arenitos do Pará-Maranhão, sendo localmente limitada por crescimentos precoces de quartzo. A compactação envolve o rearranjo de grãos, a deformação plástica de grãos dúcteis, a deformação rúptil de grãos rígidos e a dissolução por pressão (Wilson & Stanton, 1994). O principal mecanismo responsável pela redução da porosidade nos arenitos estudados foi o rearranjo dos grãos pela rotação e escorregamento de grãos. A dissolução por pressão também foi um processo importante na redução da porosidade, por servir de fonte de sílica para a precipitação de crescimentos de quartzo (Worden & Morad, 2000). O impacto da compactação e cimentação na porosidade pode ser observado na Figura 31.

A albitização de feldspatos e a precipitação de crescimentos de albita estão relacionada à alta atividade de  $\text{Na}^+$  em relação ao  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  nas águas intersticiais (Morad *et al.*, 2000, Worden & Burley, 2003). A albitização de plagioclásio libera  $\text{Al}^{3+}$ , que pode ser precipitado como dickita ou caulinita, e  $\text{Ca}^{2+}$ , que pode ser precipitado como carbonatos (Morad *et al.*, 2000). A albitização de feldspatos potássicos também foi observada, mas em volume consideravelmente menor. Os crescimentos de albita apresentaram um impacto negativo na porosidade, porém bastante subordinado, enquanto a albitização de feldspatos detríticos não apresentou impacto na porosidade.

O segundo evento de precipitação de caulinita que ocorreu cobrindo crescimentos de albita deve estar relacionado à redução do pH das águas intersticiais relacionada à geração de CO<sub>2</sub> e ácidos orgânicos pela maturação do querogênio (Morad *et al.*, 2000). Muitos agregados descritos como caulinita devem corresponder a dickita, estável em temperaturas mais altas do que 100°C (Worden & Morad, 2003). A diferenciação entre caulinita e dickita por petrografia ótica e análise por BSE e EDS não é possível. O impacto da caulinita na porosidade é negativo por ocupar espaço intergranulares originais, porém é subordinado quando comparado com o efeito da compactação e cimentação por carbonatos.

A transformação de cutículas de argila infiltrada e autigênica em clorita deve ter ocorrido através da formação de camadas-mistas C/S (Chang *et al.*, 1986, Moraes & De Ros, 1992). Esta transformação deve ter ocorrido pela disponibilidade de íons de Fe<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> derivados da dissolução de biotita, minerais pesados e oxidróxidos de ferro (Worden & Burley, 2003). A neoformação de clorita está relacionada a diversas fontes distintas de Fe e Mg como a dissolução de grãos ferromagnesianos (Anjos *et al.*, 2003), a transformação de argilominerais em litologias finas adjacentes (Moncure *et al.*, 1984), ou a desestabilização de complexos organometálicos (Surdam *et al.*, 1989). O efeito das cutículas e franjas de clorita na preservação da porosidade não foi particularmente eficiente devido a sua continuidade limitada sobre os grãos. Estas descontinuidades permitem a nucleação de quartzo diagenético sobre grãos detríticos, como descrito por Bahlis e De Ros (2013). A substituição pseudomórfica de caulinita por clorita não é comum, porém pode ocorrer em ambientes ricos em Fe e Mg (Anjos *et al.*, 2003).

A pirita não apresenta grande impacto na porosidade. Sua formação ocorreu pela redução de sulfato das águas intersticiais por bactérias (Berner, 1981). A formação de pirita em profundidade é resultado da redução térmica de sulfato (Morad *et al.*, 2000).

A precipitação de crescimentos de quartzo se iniciou antes da compactação, como evidenciado pela presença rara de crescimentos contínuos, mas foi mais intenso em profundidades maiores. As fontes de sílica nestes arenitos provavelmente foram a dissolução e caulinição de feldspatos, a cloritização de esmectitas e a dissolução por pressão de grãos de quartzo detrítico (Worden & Morad, 2000), localmente facilitada pela presença de material micáceo (Milliken, 2003). A cimentação por crescimentos de quartzo foi reconhecida como o principal responsável pela destruição da porosidade em diversos arenitos profundos (Bjørlykke *et al.*, 1989; Ehrenberg, 1990; Nedkvitne *et al.*, 1993, De Ros *et al.*, 2000,

Worden & Morad, 2000), sendo grande seu impacto na redução da porosidade dos arenitos estudados, juntamente com a compactação.

A formação de carbonatos na mesodiagênese foi descrita por Morad (1998) como sendo causada por diversos mecanismos, sendo eles: 1) redução da pressão de  $\text{CO}_2$  induzida pela migração de fluidos para litologias mais permeáveis e submetidas a menor pressão, ou ao longo de zonas de fraturas ligadas a zonas de menor pressão, 2) adição de  $\text{CO}_2$  com um aumento do pH da solução por fontes externas, 3) aumento da concentração de  $\text{HCO}_3^-$  pela degradação de óleo por incursões de água meteóricas em profundidade. A formação de calcita está relacionada à atividade de  $\text{Ca}^{2+}$  de fontes externas, principalmente, como lutitos, rochas carbonáticas e evaporitos, e de fontes internas, como da albitização de plagioclásios cálcicos, a dissolução e reprecipitação de carbonatos eodiagenéticos e a dissolução de bioclastos (Morad, 1998). Estas duas últimas fontes de  $\text{Ca}^{2+}$  não foram observadas nos arenitos estudados. A cimentação por calcita foi um importante processo na redução da porosidade nos arenitos estudados.

A dolomita e siderita em geral ocorrem juntas nestes arenitos e apresentam um efeito negativo na porosidade pelo preenchimento de porosidade primária. Dois eventos de precipitação de carbonatos foram identificados. O primeiro evento ocorreu em ambientes enriquecidos em  $\text{Fe}^{2+}$  e com águas meteóricas ou salobras pobres em sulfato (Morad, 1998). A formação de dolomita e siderita em profundidade é dependente das diferentes razões de  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ , respectivamente (Morad, 1998). A dolomita apresenta zonação pelo aumento no teor de ferro disponível para precipitação. O grande aumento de  $\text{Fe}^{2+}$  em relação ao  $\text{Ca}^{2+}$  resultou no início da precipitação de siderita. A zonação da siderita mesodiagenética foi formada pela dissolução e reprecipitação de fases com variável razão Fe/Mg. Uma ocorrência semelhante de zonação de siderita-magnesita foi descrita por Morad *et al.* (1994) como formada pela ação de salmouras provenientes de argilitos dolomíticos marinhos de formações subjacentes.

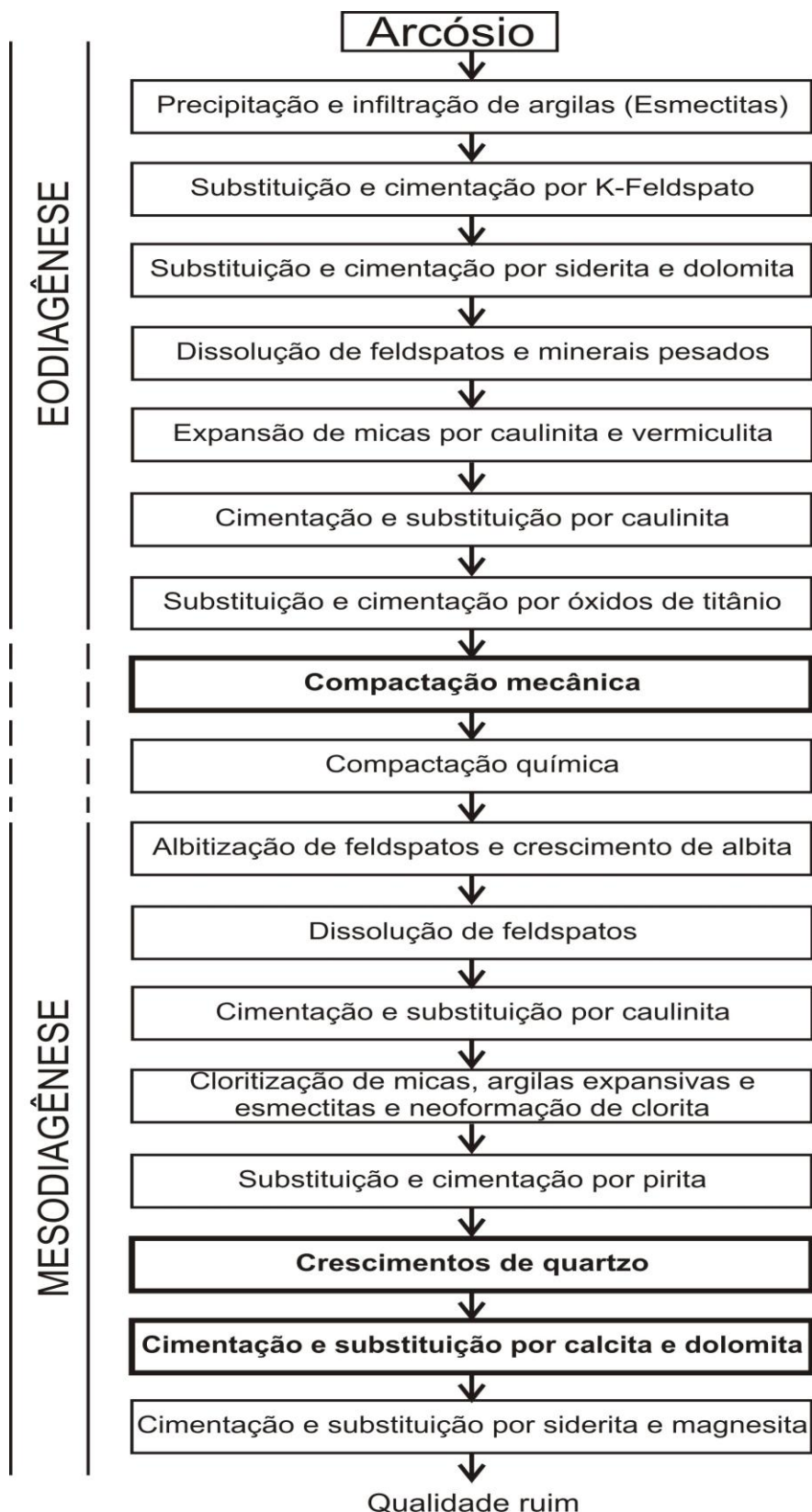


Figura 30: Fluxograma dos principais processos diagenéticos e seus resultados na qualidade dos reservatórios dos arenitos da Bacia do Pará-Maranhão. Os principais processos impactantes na porosidade encontram-se ressaltados.

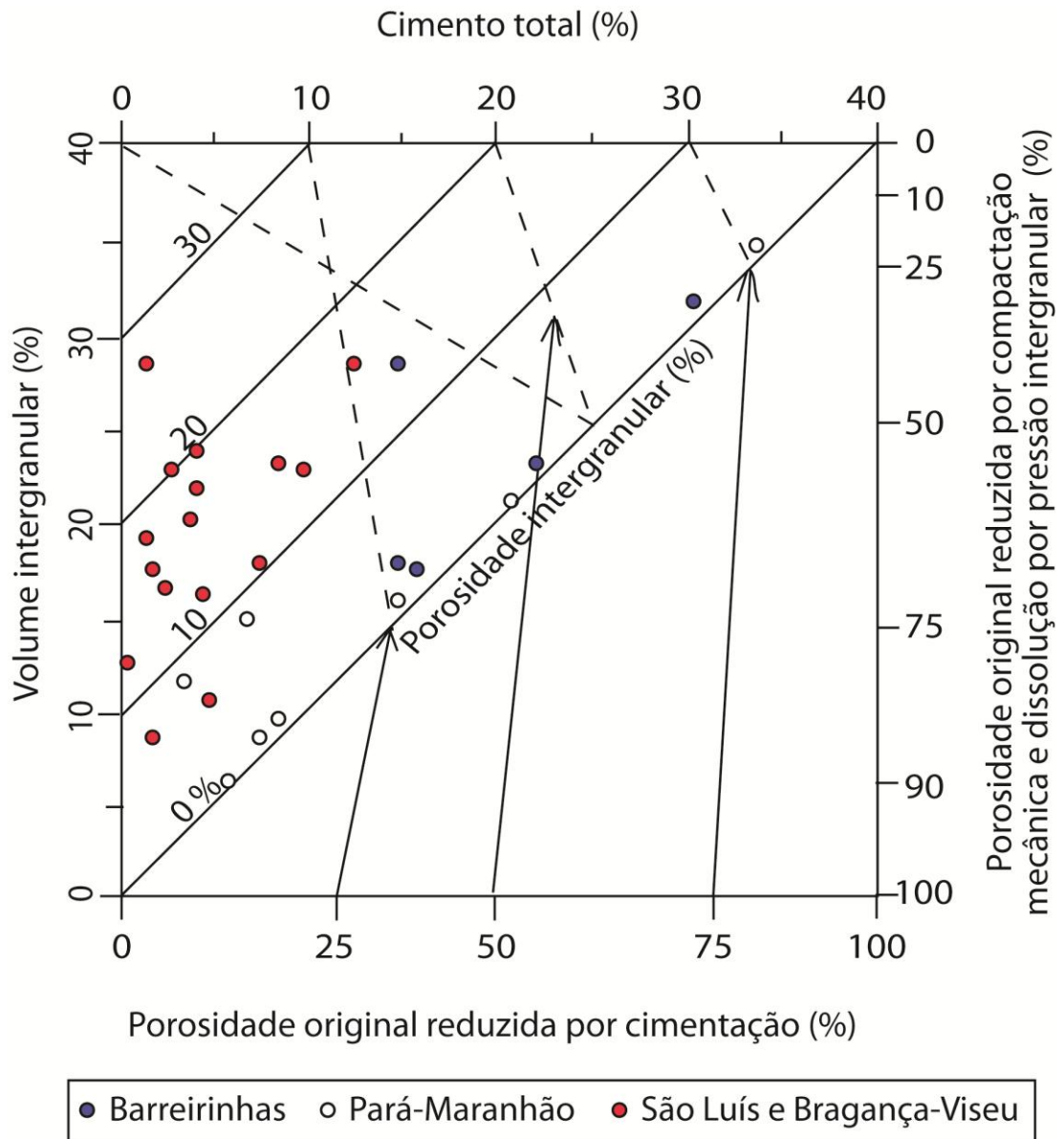


Figura 31: Diagrama de Ehrenberg (1989), mostrando os efeitos da compactação e cimentação sobre a porosidade original nos arenitos de cada Bacia.



#### 4.2.2 Bacia de Barreirinhas

Os processos diagenéticos nestes arenitos foram fortemente controlados pela sua composição primária. Quartzarenitos e arcósios líticos apresentam má qualidade como reservatórios de hidrocarbonetos, enquanto sub-arcósios apresentam qualidade média. A Figura 32 apresenta os principais processos diagenéticos relativos a cada litotipo observado nesta Bacia. Os efeitos da cimentação e compactação em cada litotipo podem ser observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

##### Quartzarenitos

Os quartzarenitos apresentaram abundante cimentação precoce por dolomita levemente ferrosa, responsável pela obliteração da porosidade primária e pela inibição da compactação. A dolomita ferrosa é formada em ambientes redutores com águas marinhas modificadas ou águas salobras pobres em sulfatos (Berner, 1981). A precipitação de pirita teve um efeito extremamente reduzido na porosidade dessas rochas. A pirita precoce foi formada em ambientes onde houve redução de sulfato por bactérias (Worden & Burley, 2003, Morad *et al.*, 2012). A pirita corrosiva é provavelmente resultado da redução térmica de sulfato durante a mesodiagênese (Morad *et al.*, 2000). A presença de raros bioclastos carbonáticos é indicativa dos ambientes deposicionais marinhos ou transicionais destas litologias.

##### Subarcóseos

Os subarcóseos apresentam a infiltração de argila como primeiro processo. A infiltração de argilas ocorreu, neste trabalho, da mesma maneira como descrito na Bacia do Pará-Maranhão. Entretanto, a presença de bioclastos de foraminíferos bentônicos nas amostras analisadas indica que estes são sedimentos marinhos, expostos à infiltração por queda no nível do mar (Morad *et al.*, 2010). Seu impacto na porosidade é bastante reduzido uma vez que a cimentação por carbonatos foi o principal processo de redução de porosidade, não sendo inibido pela presença de cutículas de argila.

Raros agregados vermiformes de caulinita foram formados pela ação de águas meteóricas levemente ácidas e de baixas concentrações iônicas (Worden & Morad, 2003), com impacto subordinado na porosidade. A cimentação extensa por calcita foi o principal processo de redução da porosidade nestes arenitos, porém

grande parte da porosidade original encontra-se preservada. Além disso, a dissolução parcial deste carbonato ocasionou em um aumento (relativamente pequeno) da porosidade total. A calcita é descrita como um cimento comum em arenitos depositados em ambientes marinhos e transicionais pela perda de CO<sub>2</sub> e evaporação de água do mar (Morad *et al.*, 2000). A dissolução de calcita na mesodiagenese é normalmente causada por águas ácidas formadas pela maturação térmica da matéria orgânica (Morad, 1998).

### **Arcósios líticos**

Os arcósios líticos apresentam processos diagenéticos semelhantes aos encontrados nos arenitos do Pará-Maranhão. A precipitação de cutículas de argila autigênica (esmectitas) foi o primeiro processo atuante. A cloritização em profundidade destas argilas foi parcial, preservando as cutículas esmagadas entre fragmentos de rochas metamórficas. A expansão de micas por caulinita também foi observada nesta Bacia, mas de forma mais subordinada quando comparada a Bacia do Pará-Maranhão, apresentando os mesmos processos de formação.

A compactação foi o principal processo de redução de porosidade nestas litologias, principalmente a deformação plástica dos fragmentos dúcteis de rochas metamórficas de baixo grau, gerando pseudomatriz lítica (Wilson & Stanton, 1994). O rearranjo de grãos rígidos e a dissolução por pressão também foram de grande importância para a redução da porosidade primária, principalmente na ausência de litoclastos dúcteis. A dissolução por pressão forneceu sílica para a cimentação por crescimentos de quartzo (Worden & Morad, 2000).

As cutículas e franjas de clorita foram descritas por diversos autores como sendo eficazes na preservação da porosidade primária pela inibição de crescimentos de quartzo (Pittman, *et al.*, 1992, Bloch *et al.*, 2001, Anjos *et al.*, 2003, Berger *et al.*, 2009), entretanto, este efeito não foi observado nestas litologias devido a pequena continuidade destas coberturas (cf. Bahlis e De Ros, 2013). A neoformação de clorita encontra-se restrita as áreas que não apresentaram concentração de litoclastos macios. A substituição de cutículas de argila e neoformação de clorita ocorreram do mesmo modo como descrito na Bacia do Pará-Maranhão neste trabalho.

A precipitação de crescimentos de quartzo efetivamente obliterou qualquer porosidade restante após a compactação. A formação de cimento de quartzo e o seu impacto na porosidade foram discutidos anteriormente na Bacia do Pará-Maranhão

A albitização de feldspatos foi o principal processo de alteração da composição primária nos arenitos estudados, tendo, entretanto, pouco impacto na porosidade. A formação de albita foi descrita, neste trabalho, na Bacia do Pará-Maranhão. A concentração de  $\text{Na}^+$  e  $\text{SiO}_2$  foi provavelmente derivada da transformação de esmectitas em clorita ou illita em rochas adjacentes (Worden & Morad, 2003). A precipitação de crescimentos de albita teve um efeito negativo sobre a porosidade, porém de pequena importância.

A formação da pirita pode estar relacionada à redução de sulfato por bactérias na eodiagênese (Morad *et al.*, 2012) ou à redução térmica de sulfatos na mesodiagênese (Morad *et al.*, 2000), não tendo sido observadas relações paragenéticas suficientes para restringir sua ocorrência. A pirita não apresenta grande impacto na porosidade. Os óxidos de titânio se formaram a partir da dissolução de minerais pesados e apresentam impacto bastante subordinado na porosidade.

A calcita não apresenta impacto na porosidade, ocorrendo principalmente como substituição de grãos. Sua formação ocorreu pelos processos descritos na Bacia do Pará-Maranhão. A presença de bioclastos e carbonatos eodiagenéticos dissolvidos não foi observada nestas litologias.

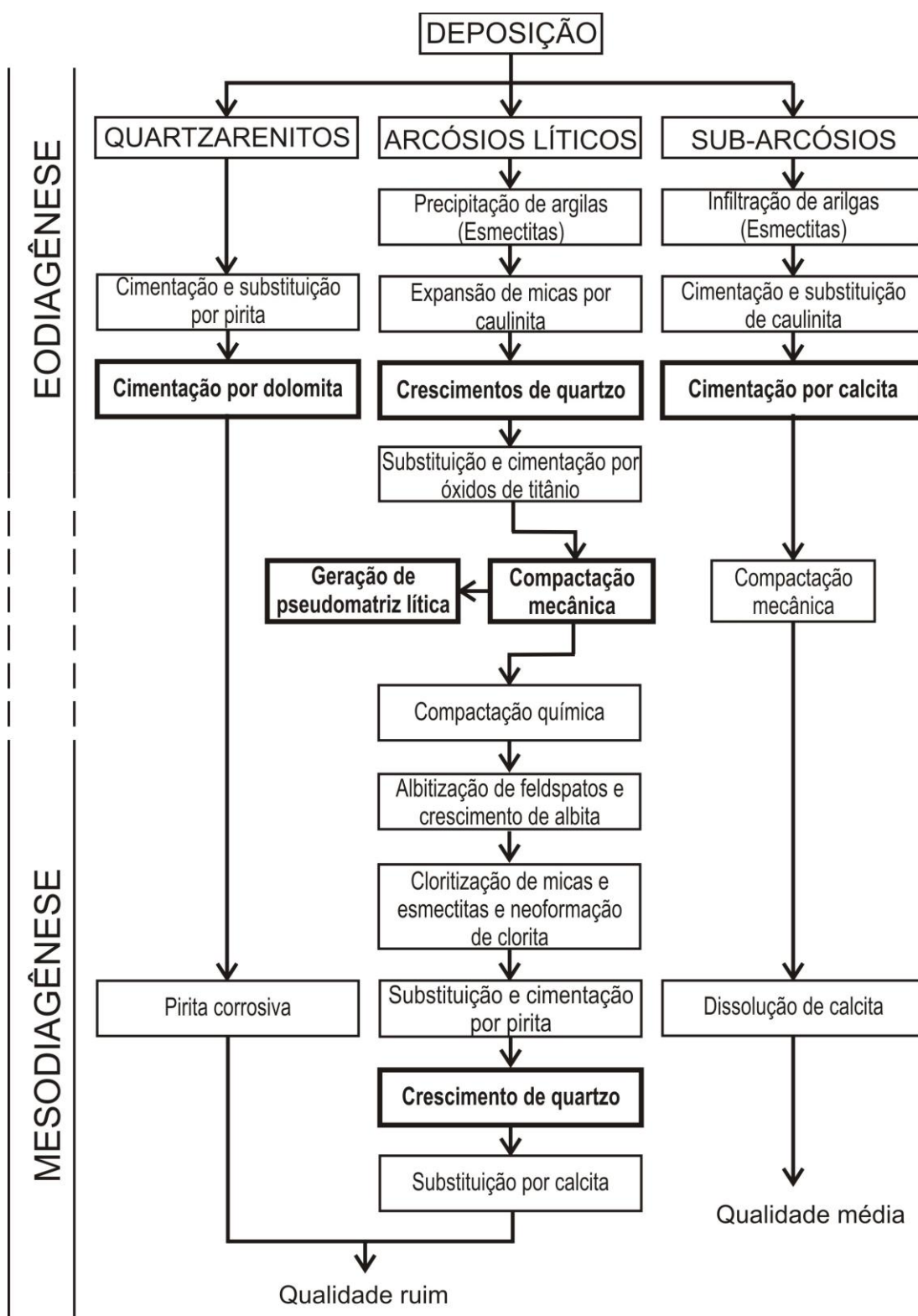


Figura 32: Fluxograma dos principais processos diagenéticos e seus resultados na qualidade dos reservatórios dos arenitos da Bacia de Barreirinhas. Os principais processos impactantes na porosidade encontram-se ressaltados.

### 4.2.3 Bacias de São Luís e Bragança-Viseu

Os arenitos das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu apresentam boa qualidade como reservatórios de hidrocarbonetos. Os principais processos diagenéticos atuantes nos arenitos destas Bacias encontram-se esquematizados na Figura 33.

O primeiro processo atuante nos arenitos destas Bacias foi a infiltração e formação *in situ* de argilas, formadas como descrito na Bacia do Pará-Maranhão. As esmectitas autigênicas em baixa profundidade não sofreram transformação para illita ou clorita e não apresentaram grande impacto na porosidade. As argilas infiltradas tiveram um efeito negativo na porosidade devido a sua grande espessura e ao preenchimento de poros como agregados maciços. Feldspatos potássicos formam-se nos mesmos ambientes de ocorrência destas argilas (Morad *et al.*, 2010) e apresentaram um impacto bastante reduzido na porosidade.

A hematita ocorreu nestes ambientes oxidantes quentes e secos, com ferro no seu estado férrico (Worden & Burley, 2003). Seu impacto na porosidade é extremamente subordinado e sua ocorrência encontra-se associada à presença de litologias finas em contato com os arenitos. A dissolução de feldspatos e minerais pesados e a formação de caulinita, vermiculita e óxidos de titânio ocorreram pelos mesmos mecanismos descritos na Bacia do Pará-Maranhão. A dissolução de feldspatos e minerais pesados foi um importante evento de geração de porosidade secundária, parcialmente reduzido pela precipitação de caulinita e óxidos de titânio. A caulinita, os óxidos de titânio e a vermiculita tiveram um impacto extremamente subordinado na redução da porosidade original.

A precipitação de pirita ocorreu pela redução de sulfato por bactérias (Worden & Burley, 2003, Morad *et al.*, 2012). A pirita não apresentou grande impacto na porosidade. A cimentação por calcita deve estar relacionada à fermentação ou descarboxilação de matéria orgânica (Morad, 1998). A calcita teve um efeito negativo pouco significativo na porosidade, devido a sua distribuição heterogênea e limitada.

A compactação foi o principal processo de redução da porosidade nos arenitos destas Bacias, principalmente pelo rearranjo de grãos e pela geração de pseudomatriz através da deformação de intraclastos lamosos. A compactação química foi bastante limitada nestes arenitos, reduzindo a disponibilidade de sílica para a cimentação de quartzo. O impacto da compactação e da cimentação na porosidade pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**



A albitização de feldspatos não apresentou impacto na porosidade, sendo formada pelos mesmos mecanismos descritos na Bacia do Pará-Maranhão.

O aumento progressivo da profundidade de soterramento promoveu a transformação de esmectitas. Esmectitas dioctaédricas devem ter sido transformadas em illitas e esmectitas trioctaédricas em cloritas através de camadas mistas C/S e I/S (Chang *et al.*, 1986). O  $K^+$  necessário para a ilitização de esmectitas pode ser derivado da dissolução de K-feldspatos (Worden & Morad, 2003). A cloritização de esmectitas e sua grande eficiência na preservação da porosidade foram descritas acima na Bacia do Pará-Maranhão. A illita também foi capaz de inibir a nucleação de crescimentos de quartzo nos arenitos onde ocorreram (Franks & Zwingmann, 2010).

Arenitos que não apresentaram a formação de argilas mesodiagenéticas como coberturas de grãos exibiram crescimentos de albita e quartzo em concentrações variadas. Seus mecanismos de formação foram discutidos neste trabalho na Bacia do Pará-Maranhão. As fontes de íons para a precipitação de albita podem ser obtidas pelas reações de ilitização e cloritização de esmectitas (Worden & Morad, 2003) e possivelmente pela dissolução de feldspatos. Os crescimentos de albita e quartzo apresentaram um impacto negativo na porosidade, mas sua ocorrência foi bastante restrita.

A última fase diagenética nos arenitos que não apresentaram argilas mesodiagenéticas foi a precipitação de dolomita em sela. Spötl & Pitman (1998) descreveram a dolomita em sela como sendo formada a partir de fluídos altamente salinos e com pH praticamente neutro. As temperaturas de formação deste tipo de dolomita encontram-se entre 60-80 °C, porém são mais comuns em temperaturas entre 90-160 °C (Spötl & Pitman, 1998). Nas Bacias de São Luis e Bragança-Viseu a dolomita apresentou um impacto negativo na porosidade, mas sua ocorrência é relativamente rara.

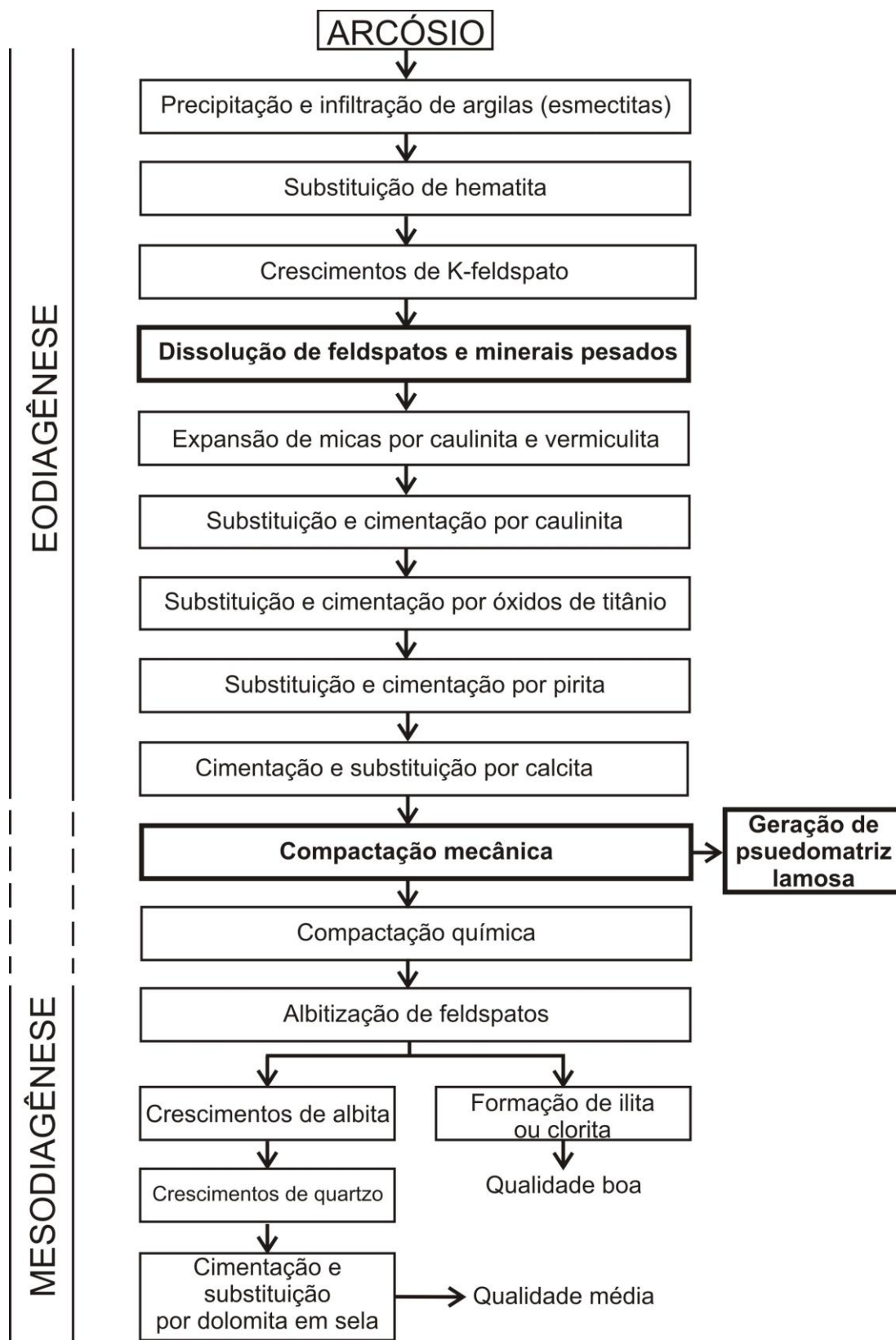


Figura 33: Fluxograma dos principais processos diagenéticos e seus resultados na qualidade dos reservatórios das Bacias de São Luís e Bragança-Viseu. Os principais processos impactantes na porosidade encontram-se ressaltados.

## 5 CONCLUSÕES

A análise de 31 lâminas das Bacias do Pará-Maranhão, Barreirinhas, São Luís e Bragança-Viseu revelou que:

- 1) A composição detrítica é relativamente homogênea nos arenitos das Bacias do Pará-Maranhão, São Luís e Bragança-Viseu, não sendo observada grande variação nos processos diagenéticos.
- 2) Foi observado um grande controle da composição detrítica nos processos diagenéticos da Bacia de Barreirinhas.
- 3) A presença comum de epidotos nas Bacias estudadas é indicativa de áreas-fontes de embasamento plutônico soerguido afetado por processos hidrotermais, com contribuição subordinada de coberturas orogênicas recicladas.
- 4) Os principais processos diagenéticos que impactaram a porosidade nos arenitos do Pará-Maranhão foram a compactação e a cimentação por quartzo e calcita.
- 5) Os principais processos que impactaram a porosidade na Bacia de Barreirinhas foram a compactação e cimentação por quartzo nos arcósios líticos, a cimentação por calcita no subarcósio e a cimentação por dolomita nos quartzarenitos.
- 6) Os principais processos que impactaram a porosidade nas Bacias de São Luís e Bragança-Viseu foram a formação de pseudomatriz lamosa e a dissolução de feldspatos e minerais pesados.

- 7) Os arcósios da Bacia do Pará-Maranhão apresentam má qualidade de reservatório. Os arcósios líticos e quartzarenitos da Bacia de Barreirinas representam reservatórios de má qualidade, enquanto os sub-arcósios apresentam qualidade média. Os arcósios de São Luís e Bragança-Viseu apresentam qualidade predominantemente boa, com ocorrência subordinada de reservatórios de qualidade média. A Tabela 1 demonstra de forma sucinta as características de cada reservatório.
- 8) Sugere-se que mais estudos sejam realizados nas Bacias da Margem Equatorial Ocidental Brasileira, uma vez que trabalhos petrográficos nestas Bacias são extremamente escassos e sua diagênese bastante complexa.

**Tabela 1: Tabela mostrando as composições detríticas e os principais processos diagenéticos em cada Bacia, indicando suas respectivas qualidades como reservatórios potenciais.**

Bacia	Composição detrítica	Processos diagenéticos	Qualidade de reservatório
Pará-Maranhão	Arcósio	Compactação e cimentação por quartzo e calcita	Ruim
Barreirinas	Quartzarenito	Cimentação por dolomita	Ruim
	Arcósio Lítico	Compactação e cimentação por quartzo	Ruim
	Sub-Arcósio	Cimentação por calcita e compactação limitada	Média
São Luís e Bragança-Viseu	Arcósio	Compactação de intraclastos lamosos e dissolução de grãos	Boa

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajdukiewicz, J. M., Nicholson, P. H. & Esch, W. L. 2010. Prediction of deep reservoir quality using early diagenetic process models in the Jurassic Norphlet Formation, Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin*, 94(8): 1189-1227.
- Anjos, S. M. C., De Ros, L. F. & Silva, C. M. A. 2003. Chlorite authigenesis and porosity preservation in the Upper Cretaceous marine sandstones of the Santos Basin, offshore eastern Brazil. *In: Worden, R. H. & Morad, S. (Eds.). Clay mineral cements in sandstones*. International Association of Sedimentologists Special Publications 34, p. 291-316.
- Bahlis, A. B., De Ros, L. F. 2013. Origin and impact of authigenic chlorite in the Upper Cretaceous sandstone reservoirs of the Santos Basin, eastern Brazil. *Petroleum Geoscience* 19: 185–199.
- Berger, A., Gier, S. & Krois, P. 2009. Porosity-preserving chlorite cements in hallow-marine volcanoclastic sandstones: Evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan gas field, Pakistan. *AAPG Bulletin*, 93(5): 595-615.
- Berner, R. A. 1981. A new geochemical classification of sedimentary environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 359–365.
- Bird, D. K. & Spieler, A. R. 2004. Epidote in geothermal systems. *Reviews in mineralogy & geochemistry*, 56: 253-300.
- Bjørlykke, K., Ramm, M., Saigal, G.C. 1989. Sandstone diagenesis and porosity modification during basin evolution. *Geologische Rundschau*, 78: 243–268.
- Bloch, S., Lander, R. H. & Bonnell, L. 2002. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2): 301-328.
- Chang, H. K., Mackenzie, F. T. & Schoonmaker, J. 1986. Comparisons between the diagenesis of dioctahedral and trioctahedral smectite, Brazilian offshore basins. *Clay, Clay Mineral*, 34(4): 407–423.



- Choquette, P. W. & Pray, L. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, 54(2): 207-250.
- Compton, R. R. 1962. *Manual of field geology*. New York: John Wiley and Sons. 378p.
- De Ros, L. F. 1996. Compositional controls on sandstone diagenesis. *Comprehensive summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*, 198: 1-24.
- De Ros, L. F., Goldberg, K., Abel, M., Victoreti, F., Mastella, L. & Castro, E. 2007. Advanced Acquisition and Management of Petrographic Information from Reservoir Rocks Using the PETROLEDGE System. *AAPG Annual Convention and Exhibition*, 1-4 April. Expanded Abstract, 6p.
- De Ros, L. F., Morad, S., Broman, C., Césero, P. & Gomez-Gras, D. 2000. Influence of uplift and magmatism on distribution of quartz and ilite cementation: evidence from Siluro-Devonian sandstones of the Paraná Basin, Brazil. *In: Worden, R. H. & Morad, S. (Eds.). Quartz Cementation in Sandstones*. International Association of Sedimentologists Special Publication 29, Blackwell Science, Oxford 88: 253–266.
- Dickinson, W. R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *In: Zuffa, G. G. (Ed.). Provenance of arenites*. NATO-ASI Series C. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Netherlands, p. 333-361.
- Ehrenberg, S. N. 1989. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: discussion; compaction and porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura Basins, California: Discussion. *AAPG Bulletin*, 73(10): 1274-1276.
- Ehrenberg, S. N. 1990. Relationship between diagenesis and reservoir quality in sandstones of the Garn Formation, Haltenbanken, mid-Norwegian continental shelf. *AAPG Bulletin*, 74(10): 1538-1558.
- Feijó, F. J. 1994. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1): 103-105.
- Folk, R. L. 1968. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin: Hemphill's. 182p.
- Franks, S. G. & Zwingmann, H. 2010. Origin and timing of early diagenetic ilite in the Permian-Carboniferous Unayzah sandstone reservoirs of Saudi Arabia. *AAPG Bulletin*, 94(8): 1133-1159.
- Milani, E. J., Brandão, J. A. S. L., Zalán, P. V. & Gamboa, L. A. P. 2000. Petróleo na Margem Continental Brasileira: Geologia, Exploração, Resultados e Perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, 18(3): 351-396.

- Milani, E. J. & Thomaz Filho, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. *Tectonic evolution of South America*, 389-449.
- Milliken K. L., 2003. Late diagenesis and mass transfer in sandstone shale sequences. *In: Mackenzie, F. T. (Ed.). Treatise in geochemistry*. Elsevier, p. 159-188.
- Mohriak, W. U. 2003. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. *In: Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M. & Gonçalves, J. H. (Eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais Brasileiros*. Brasília: CPRM, p. 87-165.
- Moncure, G. K., Lahann, R. W. & Siebert, R. M. 1984 Origin of secondary porosity and cement distribution in a sandstone/shale sequence from the Frio Formation (Oligocene). *In: McDonald, D. A. & Surdam, R. C. (Eds.), Clastic Diagenesis*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 37, Tulsa, OK, p. 151–161.
- Moraes, M. A. S & De Ros, L. F. 1992. Depositional, infiltrated and authigenic clays in fluvial sandstones of the Jurassic Sergi Formation, Recôncavo Basin, northeastern Brazil. *Origin, diagenesis, and petrophysics of clay minerals in sandstones*, SEPM Special Publications, 47: 197-208.
- Morad, S. 1998. Carbonate cementation in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution. *In: Morad, S. (Ed.), Carbonate Cementation in Sandstones*. International Association of Sedimentologists Special Publications 26, Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 1-26.
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 94(8): 1267-1309.
- Morad, S., Bem Ismail, H. N., De Ros, L. F., Al-Aasm & Serrhini, N-E. 1994. Diagenesis and formation water chemistry of Triassic reservoir sandstones from southern Tunisia. *Sedimentology*, 41: 1253-1272.
- Morad, S., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, 47: 95-120.
- Morad, S., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. 2012. Linking diagenesis to sequence stratigraphy: an integrated tool for understanding and predicting reservoir quality distribution. *In: Morad, S., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. (Eds.)*.

- Linking diagenesis to sequence stratigraphy*, International Association of Sedimentologists Special Publications, Wiley, Nova York, p. 1-36
- Nedkvitne, T., Karlsen, D.A., Bjørlykke, K. & Larter, S.R. 1993. Relationship between reservoir diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula field, north North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 10: 255–270.
- Pittman, E. D., Larese, R. E. & Heald, M. T. 1992. Clay coats: occurrence and relevance to preservation of porosity in sandstones. *In*: Houseknecht, D. W. & Pittman, E. D. (Eds.). *Origin, diagenesis, and petrophysics of clay minerals in sandstones*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 47, Tulsa, OK, p. 241–264.
- Price, J. R. & Velbel, M. A. 2000. Weathering of the Eaton sandstone (Pennsylvanian), Grand Ledge, Michigan: geochemical mass-balance and implications for reservoir properties beneath unconformities. *Journal of Sedimentary Research*, 70(5): 1118-1128.
- Rodrigues, A. G. 2012. *Padrões composicionais e diagenéticos da seção rifte no campo de Caioba, Bacia de Sergipe-Alagoas*. Porto Alegre, 107p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rossetti, D. d. F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Science*, 14(3): 77-89.
- Rossetti, D. d. F. & Truckenbrodt, W. 1992. Sedimentologia e diagênese dos arenitos da formação Barro Duro (Albiano), área de estudo oeste da bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 6(3/4): 201-221.
- Soares Jr., A. V. 2002. Paleogeografia e evolução da paisagem do nordeste do Estado do Pará e Noroeste do Maranhão - Cretáceo ao Holoceno. 126p. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará*.
- Soares Jr., A. V., Costa, J. B. S. & Hasui, Y. 2008. Evolução da Margem Atlântica Equatorial Brasileira: três fases distensivas. *Geociências*, 27(4): 427-437.
- Soares, E. F., Zalán, P. V., Figueiredo, J. J. P. & Trosdorf Jr., I. 2007. Bacia do Pará-Maranhão. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 321-329.
- Spötl, C. & Pitman, J. K. 1998. Saddle (baroque) dolomite in carbonates and sandstones: a reappraisal of a burial-diagenetic concept. *In*: Morad, S. (Ed.), *Carbonate Cementation in Sandstones*. International Association of Sedimentologists Special Publications, Blackwell Scientific Publications Oxford, p. 437-460.

- Surdam, R. C., Dunn, T. L., Heasler, H. P. & MacGowan, D. B. 1989. Porosity evolution in sandstone/shale systems. *In: Hutcheon, I.E. (Ed.), Short Course on Burial Diagenesis*, Mineralogical Association of Canada, Montreal, 61–133.
- Trosdorf Jr., I., Zalán, P. V., Figueiredo, J. J. P. & Soares, E. F. 2007. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 331-339.
- Walker, T. R. 1976. Diagenetic origin of continental red beds. *In: Falke, H. (Ed.) The continental Permian in central, west and south Europe: Dordrecht, D. Reidel*, p. 240-482.
- Wilson, M. D. & Stanton, P. T. 1994. Diagenetic mechanisms of porosity and permeability reduction and enhancement. *In: Wilson, M. D. (Ed.). Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks*. SEPM Publications, U.S., p. 59-118.
- Worden, R. H. & Burley, S. D. 2003. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *In: Burley, S. D. & Worden, R. H. (Eds.). Sandstone diagenesis: Recent and Ancient*. International Association of Sedimentologists, p. 1-42.
- Worden, R. H. & Morad, S. 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. *In: Worden, R. H. & Morad, S. (Eds.). Quartz cementation in sandstones*, Special Publications International Associations of Sedimentologists, p. 1-20.
- Worden, R. H. & Morad, S. 2003. Clay minerals in sandstones: controls on formation distribution and evolution. *In: Worden, R. H. & Morad, S. (Eds.). Clay minerals cements in sandstones*. International association of Sedimentologists, p. 3-41
- Zalán, P. V. 2001. Growth folding in gravitational fold-and-thrust belts in the deep waters of the Equatorial Atlantic, Northeastern Brazil. *AAPG Annual Convention and Exhibition*. Denver: Official Program Book, 223p.
- Zalán, P. V. 2007. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 341-345.
- Zuffa, G. G. 1985. Optical analyses of arenites: influence methodology of compositional results. *In: Zuffa, G. G. (Ed.). Provenance of Arenites*, p. 165-189.

## **7 ANEXOS (CD)**

- 1) Monografia em formato digital.
- 2) Descrições petrográficas de cada lâmina analisada em formato PDF, juntamente com tabelas de descrições em planilhas do excel.
- 3) Fotos de micrografia ótica dos principais aspectos texturais, composicionais primários e diagenéticos e de porosidade de cada lâmina.
- 4) Fotos de MEV por elétrons retroespalhados (BSE).
- 5) Fotos de BSE com pontos de análise por EDS e seus respectivos espectros.