



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ARALY FABIANA LIMA DE ARAÚJO

**ESTRATIGRAFIA MECÂNICA DE LAMINITOS APTIANOS DA BACIA DO
ARARIPE: aplicação à caracterização de reservatórios naturalmente fraturados**

RECIFE
2020

ARALY FABIANA LIMA DE ARAÚJO

**ESTRATIGRAFIA MECÂNICA DE LAMINITOS APTIANOS DA BACIA DO
ARARIPE: aplicação à caracterização de reservatórios naturalmente fraturados**

Dissertação apresentada à Pós-graduação em
Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos para
obtenção do título de mestre em Geociências.

Área de Concentração: Geologia Sedimentar e
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Siqueira Miranda

RECIFE

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

A663e

Araújo, Araly Fabiana Lima de.

Estratigrafia mecânica de Laminitos Aptianos da Bacia do Araripe: aplicação à caracterização de reservatórios naturalmente fraturados / Araly Fabiana Lima de Araújo. - 2020.

166 folhas, il.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Barbosa.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Siqueira Miranda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2020.

Inclui Referências.

1. Geociências. 2. Estratigrafia mecânica. 3. Calcários laminados.
4. Heterogeneidades diagenéticas. 5. Reservatórios fraturados. I. Barbosa, José Antonio (Orientador). II. Miranda, Tiago Siqueira (Coorientador). III. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-196

ARALY FABIANA LIMA DE ARAÚJO

**ESTRATIGRAFIA MECÂNICA DE LAMINITOS APTIANOS DA BACIA DO
ARARIPE: aplicação à caracterização de reservatórios naturalmente fraturados**

Dissertação apresentada à Pós-graduação em
Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências como parte dos requisitos para
obtenção do título de mestre em Geociências.

Aprovada em: 21 / 10 / 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Antônio Barbosa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Virgínio Henrique Neumann
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Francisco César Costa Nogueira
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço a primeiramente à Deus, digno de toda honra e glória. Por sua Graça me alcançou antes mesmo da fundação do mundo, modificando minha mente e coração. Tudo que sou e que fiz, só foi possível graças a Tua infinita misericórdia. Tu és tudo em mim e tudo que preciso.

Gostaria de agradecer de todo meu coração aqueles que sempre estão meu lado independente das minhas falhas e acertos. Vocês, meus pais Analy Araújo e Fábio Araújo, e minha irmã Ylana Araújo são muito mais do que eu mereço. Agradeço à Deus por ter me enviado para fazer parte de suas vidas, é um privilégio chamar vocês de minha família. Sem todo o apoio de vocês este trabalho nunca ficaria pronto. Amo todos, com um amor imensurável. Venho agradecer também a João Victor por todo apoio ao longo dos anos.

Quero agradecer a minha preciosa igreja, o Ministério da Reconciliação, ao pastor Antônio José e toda sua família, ao grupo Sacrifício de Louvor e aos meus irmãos em Cristo. Pastor, através do senhor venho aprendendo a coisa mais preciosa que a alguém pode aprender, a palavra de Deus. Nenhum conhecimento humano supera o conhecimento espiritual. Sou grata a Deus pela sua vida, por ser um instrumento nas mãos do Criador para me fortificar e abençoar através das pregações e conselhos. Meus irmãos em Cristo, vocês são preciosos. Graças a vocês, eu aprendo a cada dia sobre o amor de Deus, amizade e respeito. Amo vocês!

A todos os professores da UFPE e aos funcionários que trabalham diariamente em todos os setores, meu sincero agradecimento. Venho agradecer também ao meu orientador e professor José Antônio por toda a paciência e a transmissão de conhecimento ao longo desses anos, ainda a Virgínio Neumann e ao meu coorientado Tiago Miranda. Agradeço imensamente aos meus amigos e colegas de trabalho que me ajudaram e apoiaram nessa jornada: Germano, Jefferson, Topan, Osvaldo, Márcio e Alcione, obrigada pelo conhecimento compartilhado. Agradeço por participar do capítulo estudantil AAPG (*American Association of Petroleum Geologists*) e a cada membro, que nosso capítulo venha crescer cada dia mais.

Venho agradecer também a PETROBRAS que por meio do projeto de cooperação em PD&I FADE/UFPE/PETROBRAS, intitulado: Análise Comparativa entre Modelos Geológicos de Sistemas Fraturados (Calcários Laminados), Executados com Base nos Métodos de Levantamento de Pseudopoços e de Varredura de Superfícies em Afloramentos Análogos, Nº ANP - 20644-1.

"Pois os Seus atributos invisíveis, o Seu eterno poder e divindade, são claramente vistos desde a criação do mundo, sendo percebidos mediante as coisas criadas, de modo que eles são inescusáveis [...]". (ROMANOS, 1, 20).

RESUMO

Em reservatórios compostos por rochas calcárias de baixa permeabilidade as redes permoporosas formadas por sistemas de fraturas representam aspecto crítico para a compreensão de processos hidromecânicos. O presente estudo tratou da influência de processos deposicionais e diagenéticos na estratigrafia mecânica e na distribuição de fraturas em calcários laminados do intervalo C6 da Formação Crato (Aptiano), Bacia do Araripe. A abordagem incluiu a varredura integral de superfícies de afloramentos em exposições de minerações, e a construção de painéis fotográficos de alta resolução. Foi executada a construção de seções estratigráficas de 20 cm de largura escala 1:1, para simular informações providas por perfis de poços (pseudo-poços). O conceito de petrofácies foi aplicado na descrição dos perfis, que também incluíram a aquisição de dados de emissões gama, e de resistência mecânica in situ. Amostras coletadas nos perfis e painéis foram utilizadas para a execução de ensaios de compressão uniaxial, estudo petrográfico com apoio de catodoluminescência, e de MEV/EDS. Foram definidas 13 petrofácies, agrupadas em dois grupos de *mudstones* – calcário laminado de cor amarela (G1) e calcário laminado de cor cinza (G2). Os ensaios in situ (martelo Schmidt) e testes uniaxiais mostraram que os valores de resistência mecânica das petrofácies do grupo G2 são cerca de 21,88% e 38,79% mais altos do que os valores do grupo G1, respectivamente. Os perfis de raios gama mostraram maiores valores de contagem total, e de Th e U, e baixos valores de K na porção inferior do intervalo C.A integração dos dados permitiu a divisão da sucessão estudada com cerca de 6 metros em três intervalos mecânicos distintos. A variação faciológica está relacionada à mudança na taxa de sedimentação e nas condições químicas que dominaram a diagênese precoce, o que resultou em uma variação vertical de porosidade e de conteúdo de fluidos, o que favoreceu a cimentação precoce local do espaço poroso com sílica microcristalina na porção inferior do intervalo (grupo de petrofácies G2). Estas camadas cimentadas precocemente apresentam alta continuidade lateral, e formaram barreiras hidráulicas e zonas de maior competência mecânica. A variação de aspectos sin-deposicionais controlou processos diagenéticos e a distribuição e continuidade dos planos de fratura. O estudo comprovou que a variação vertical de alta-frequência nas propriedades mecânicas de rochas finamente laminadas produz um efeito de intensa segmentação de fraturas verticais, o que é um fator relevante para a construção de modelos DFN (Discrete Fracture Networks), em reservatórios naturalmente fraturados.

Palavras-chave: estratigrafia mecânica; calcários laminados; heterogeneidades diagenéticas; reservatórios fraturados

ABSTRACT

In reservoirs composed of low permeability limestone rocks, the porous networks formed by fracture systems represent a critical aspect for the understanding of hydromechanical processes. This investigation focused on the control exerted by depositional and diagenetic processes in the mechanical stratigraphy (and fractures distribution) of the laminated limestone deposits of the C6 interval of the Crato Formation (Aptian), Araripe Basin. The approach included the full description of outcrop surfaces that occur in quarries and the construction of high-resolution photographic panels. The research applied the concept of petrofacies to build 20 cm wide stratigraphic sections (1:1 scale) to provide information similar to boreholes (pseudo-wells), which included vertical logs of gamma-ray and mechanical strength acquired in situ. Samples collected in the outcrops were used to perform uniaxial compression tests, petrographic analyses with the support of cathodoluminescence, and SEM/EDS analyses. We have defined thirteen petrofacies divided into two groups of mudstones - yellow laminated limestone (G1) and gray laminated limestone (G2). The G2 group dominates the basal part of the studied succession, and the G1 dominates the upper part. The results obtained with Schmidt hammer essays and unconfined compression tests showed that the G2 group is approximately 21.88% and 38.79% higher than the G1 group, respectively. Gamma-ray logs showed higher values of the total count, Th and U, and low values of K, for the lower part of the study succession. The integration of data allowed the division of the succession, about 6 meters height, in three mechanical intervals. The petrofacies differences are linked to variations in sedimentation rates and Physico-chemical parameters that dominated the early diagenesis, which led to the early local cementation of porous space with micro-quartz in the lower part of the laminates succession (G2 group). Beds affected by early cementation present high lateral continuity and formed hydraulic barriers as large planar heterogeneities with greater mechanical competence. The depositional conditions influenced the diagenetic processes and the formation of brittle fractures and veins. The study showed that the high-frequency variation of the mechanical properties of laminated rocks can create important segmentation of vertical fractures. This process represents a crucial aspect of building DFN models (Discrete Fracture Networks) for naturally fractured reservoirs.

Keywords: mechanical stratigraphy; laminated limestones; diagenetic heterogeneities; fractured reservoirs

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	APRESENTAÇÃO.....	11
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo geral.....	13
1.2.2	Objetivos específico.....	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	14
1.4	ESTRATIGRAFIA MECÂNICA E A ESTRATIGRAFIA DE FRATURAS NA CARACTERIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS.....	15
1.5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
1.5.1	Levantamento dos pseudo-poços, painéis de alta, resolução, <i>scanlines</i> e processamento dos dados.....	20
1.5.2	Caracterização Petrográfica.....	23
1.5.2.1	Análise petrográfica e de catodoluminescência.....	23
1.5.2.2	MEV com WDS e EDS Acoplado.....	24
1.5.3	Gama-espectrometria portátil (<i>Gamma Ray</i>)	26
1.5.4	Caracterização das propriedades mecânicas.....	26
1.5.4.1	Esclerômetro - <i>Schmidt Hammer</i>	26
1.5.4.2	Ensaio mecânico de compressão de uniaxial.....	28
1.5.5	Técnica de <i>Scanline</i>.....	29
1.6	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	30
2	ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
2.1	PROVÍNCIA BORBOREMA.....	31
2.2	BACIA DO ARARIPE.....	32
2.2.1	Formação Crato	35
2.2.1.1	Estruturas de deformação sin-deposicionais nos laminitos.....	40
2.2.1.2	Heterogeneidades de origem diagenética nos laminitos.....	43
2.2.1.3	Estruturas rúpteis pós-deposicionais nos laminitos	44

2.2.2	Análogos da Formação Crato – Formação Barra Velha, Bacia de Campo.....	47
3	RESULTADOS	51
3.1	DETALHE DA ÁREA DE LEVANTAMENTO DOS PAINÉIS NAS MINERAÇÕES DE CALCÁRIO LAMINADO	51
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PETROFÁCIES	51
3.2.1	Petrografia, Catodoluminescência e MEV/EDS das Petrofácies	60
3.2.2	Resistência mecânica das petrofácies - Teste de compressão uniaxial e <i>Schmidt Hammer</i>	80
3.3	DESCRIÇÃO DOS PSEUDO-POÇOS	86
3.3.1	Pseudo-Poço 1 e Pseudo-Poço 2 - Painei 1	86
3.3.1.1	Perfis de Gamaespectrometria Pseudo-Poço 1 e 2 do Painei 1.....	89
3.3.1.2	Descrição dos perfis de resistência mecânica dos Pseudo-Poços 1 e 2 do Painei 1.....	90
3.3.2	Descrição do Pseudo-Poço 3 do Painei 2.....	93
3.3.2.1	Perfil de Gamaespectrometria do Pseudo-poço 3 e Perfil 1 do Painei 2.....	95
3.3.2.2	Descrição dos perfis de resistência mecânica do Pseudo-Poço 3 e Perfil 1 do Painei 2.....	96
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS 2D.....	98
3.4.1	Painei 1- Mineração Idemar.....	100
3.4.1.1	Perfis de propriedades mecânicas e gamaespectrométricas- Painei 1-Mineração Idemar.....	100
3.4.1.2	Relação espacial das petrofácies, heterogeneidades sin e pós- deposicionais e feições diagenéticas no Painei 1 - Mineração Idemar.....	101
3.4.1.3	Análise estatística e espacial das fraturas – Painei 1- Mineração Idemar.....	107
3.4.2	Painei 2- Mineração Willian.....	113
3.4.2.1	Perfis de propriedades mecânicas e gamaespectrométricas no painei 2.....	113
3.4.2.2	Relação espacial das petrofácies, heterogeneidades sin-deposicionais e diagenéticasdo do Painei 2.....	114
3.4.2.3	Análise estatística e espacial das fraturas – Painei 2- Mineração Willian.....	120
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	125

4.1	ANÁLISE DOS ASPECTOS MACROFACIOLÓGICOS E GENÉTICOS DAS PETROFÁCIES.....	125
4.1.1	Análises dos aspectos microfaciológicas das petrofácies.....	125
4.1.2	Variação da resistência mecânica das petrofácies.....	129
4.2	APLICAÇÃO DO PSEUDO-POÇOS NA CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E GAMAESPECTROMÉTRICA.....	131
4.3	GÊNESE, DISTRIBUIÇÃO E RELAÇÕES DAS HETEROGENEIDADES DEPOSICIONAIS, DIAGENÉTICAS E ESTRUTURAIS SIN E PÓS-DEPOSICIONAIS NOS PAINÉIS.....	134
4.4	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ROCHA NOS INTERVALOS MECÂNICOS DEFINIDOS NOS PAINÉIS.....	139
4.5	INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ROCHA NA SEGMENTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTRUTURAS VERTICAIS NOS PAINÉIS.....	141
5	CONCLUSÕES.....	147
6	SUGESTÕES.....	149
	REFERÊNCIAS.....	150

1 INTRODUÇÃO

A introdução da presente pesquisa é constituída pelos tópicos descritos a seguir.

1.1 APRESENTAÇÃO

Esta pesquisa teve como finalidade o estudo de propriedades físicas de calcários laminados do intervalo C6, topo da sucessão de depósitos da Formação Crato, Bacia do Araripe (NEUMANN, 1999; ASSINE, 1994, 2007; ASSINE et al., 2014). Estes parâmetros, analisados de forma integrada, permitiram estabelecer uma melhor compreensão entre a estratigrafia mecânica do intervalo de laminitos e a distribuição espacial de estruturas rúpteis, estratigrafia de fraturas do intervalo, em especial veios preenchidos por calcita e gipsita (LAUBACH et al., 2009; LAVENU et al., 2015; MIRANDA, 2015).

Este tipo de investigação permite definir mecanismos de relação entre propriedades mecânicas das rochas, e o efeito de formação de estruturas rúpteis, como veios e fraturas. O entendimento sobre o controle na distribuição das estruturas em relação a propriedades físicas das rochas, que se formam devido a processos deposicionais e diagenéticos, permite a construção de modelos numéricos de reservatórios melhores, o que possibilita a realização de estudos e de simulações que visam à redução de incertezas e uma melhor previsão do comportamento de formações rochosas sob condições de produção (LAVENU et al., 2015; THOMPSON et al., 2015). O estudo da distribuição de propriedades mecânicas e de estruturas rúpteis, a estratigrafia mecânica e estratigrafia de fraturas, tem apresentado enorme evolução nos últimos anos (LAUBACH et al., 2009; MCGINNIS et al., 2017; FERRILL et al., 2017). Isto é motivado pela necessidade de compreender padrões naturais, sua origem e produtos em reservatórios convencionais e não-convencionais. Uma forma de tratar esse problema é o estudo de análogos de reservatórios compostos por rochas cuja rede permoporosa é dominada por sistemas de fraturas, veios e falhas (LAVENU et al., 2013, 2015; WENNERBERG et al., 2016).

Os depósitos da Formação Crato, de origem lacustre (Aptiano-Albiano) (NEUMANN, 1999) apresentam ótimas exposições naturais nas minerações Willian e Idemar, nas cidades de Santana do Cariri e Nova Olinda, no estado do Ceará, onde foi realizada a pesquisa.

O estudo contou com a caracterização e descrição sistemática de seções estratigráficas de alta resolução, para as quais foi considerada a distribuição de petrofácies, que resultaram da interpretação de propriedades sedimentológicas e diagenéticas (DE ROS E GOLDBERG, 2007; ROCHA, 2018). A elaboração de painéis fotográficos e descrição em pavimentos, os quais foram utilizados para a identificação sistemática de todas as estruturas de origem sin-deposicionais e originadas por efeito de diagênese ou deformação mecânica pós-deposição. Especial atenção foi dada para estruturas de deformação sin e pós-deposicionais (falhas sin-deposicionais de pequeno porte, veios de calcita e gipsita, estilólitos verticais e fraturas),

(SANTOS et al., 2015; MIRANDA et al., 2018), e para heterogeneidades sin-deposicionais e diagenéticas (concreções calcárias, acumulações de pirita, dolomitização e silicificação locais, *loop bedding*, laminações convolutas, *breccia pipes* e estruturas de escape de fluídos) (NEUMANN, 1999; MIRANDA et al., 2012; CATTO et al., 2016).

A realização das seções estratigráficas nos calcários laminados da Formação Crato foi definida de forma que estas foram construídas para simular poços reais, e por isso adotou-se a denominação de pseudo-poços. Uma das motivações do estudo é a similaridade física destas rochas com intervalos de laminitos da Formação Barra Velha que compõem reservatórios do intervalo pré-sal da margem leste brasileira (TERRA et al., 2010; ASSINE et al., 2014, CATTO et al., 2016; SANTOS et al., 2016; MIRANDA et al., 2016; ZIHMS et al., 2017, FARIAS, 2018). Também nestes reservatórios, a existência de feições como fraturas e carstes representa enorme importância para a construção de modelos computacionais que permitam previsões efetivas de fluxo, e redução de incertezas (LAVENU et al., 2015; THOMPSON et al., 2015). O estudo de modelos análogos de superfície é muito importante devido ao maior número de informações que podem ser obtidas nas exposições naturais e em minas. Para o estudo dos parâmetros das estruturas rúpteis (espaçamento, abertura, orientação) foi aplicada a técnica de varredura linear (*scanline*) e em área nas superfícies dos afloramentos estudados (ORTEGA et al., 2006; SANTOS et al., 2016; MIRANDA et al., 2018). A varredura compreende a coleta de informações, como: direção, espaçamento, abertura, comprimento, tipo de terminação e cruzamento de estruturas. Neste estudo foram consideradas apenas estruturas preenchidas, veios, por calcita e gipsita, por estes representarem estruturas formadas sob condições de soterramento (MIRANDA, 2015; FARIAS, 2018).

Também foram realizados levantamentos para extração de propriedades mecânicas dos depósitos, por meio do processo de aquisição in situ (esclerômetro-*Schmidt Hammer*), e por meio da realização de ensaios de compressão uniaxial em plugues realizados em laboratório. Os plugues foram extraídos sobre as seções verticais e de forma aleatória nos depósitos estudados. Também foram realizadas leituras sistemáticas ao longo dos pseudo-poços de gamaespectrometria, perfil de raios gama, por meio da utilização de um gama espectrômetro portátil. Esta etapa permitiu a coleta de dados que são comuns em poços reais, e que podem auxiliar no estudo da relação entre propriedades físicas, diagenéticas, e a distribuição de feições de heterogeneidades mecânicas. Também foi realizado o estudo petrográfico dos depósitos, em microscópio de luz transmitida e com catodoluminescência, além de estudos de microscopia eletrônica com apoio de EDS. Algumas feições foram descritas de forma detalhada como a

ocorrência de heterogeneidades nas laminações, e o efeito de distribuição de minerais como pirita de origem diagenética

A proposta deste trabalho foi produzir modelos de alta resolução da distribuição das petrofácies e das heterogeneidades deposicionais para definir a relação de propriedades mecânicas de rochas laminadas de baixa permeabilidade e a distribuição de estruturas rúpteis como fraturas e veios.

A integração de um importante conjunto de informações permitiu entender a origem deposicional e diagenética de heterogeneidades na sucessão estudada, e estabelecer a relação destas feições com o padrão de fraturamento encontrado. O trabalho objetivou contribuir com informações sobre o efeito da estratigrafia mecânica em rochas calcárias finamente laminadas. O controle da anisotropia mecânica dessas rochas na formação de fraturas permitirá a construção de modelos de redes de fraturas (*Discrete Fractures Networks-DFNs*) mais realistas, e desta forma melhorar as simulações de fluxo de fluídos em reservatórios de hidrocarbonetos. Os dados obtidos também permitirão uma melhor interpretação dessas relações em rochas similares, na definição de modelos de *upscaling*.

A realização deste trabalho contou com o apoio do projeto de pesquisa intitulado: Análise Comparativa entre Modelos Geológicos de Sistemas Fraturados (Calcários Laminados), executado com base nos Métodos de Levantamento de Pseudo-poços e de Varredura de Superfícies em Afloramentos Análogos - “Projeto Pseudo-Poços”, realizado conforme convênio de cooperação em PD&I estabelecido pela FADE/UFPE/PETROBRAS.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa são devidos em objetivo geral e objetivos específicos, e são apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo teve como principal objetivo investigar a relação entre as propriedades mecânicas de rochas calcárias laminadas (nível C6 da Formação Crato), incluindo o efeito de heterogeneidades deposicionais e diagenéticas, em relação ao padrão de distribuição de estruturas rúpteis, com foco nos veios verticais e horizontais para criação de modelo bidimensional discretizado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar o controle exercido por feições diagenéticas na variação das propriedades mecânicas de calcários laminados a partir de seções estratigráficas de alta resolução (pseudo-poços verticais), e em modelos integrais das superfícies dos afloramentos;

- Observar a relação das propriedades mecânicas e a distribuição estratigráfica de estruturas sedimentares resultantes de estruturas sin-deposicionais (*loop bedding*, laminações convolutas, *shear fractures*, estruturas de escape de fluídos), e heterogeneidades diagenéticas (zonas de formação de concreções, níveis de acumulação de pirita, estilólitos, veios horizontais e verticais, *vugs* e cavernas);
- Investigar o efeito de continuidade lateral das heterogeneidades (deposicionais e diagenéticas), e o efeito de ciclicidade das mesmas;
- Elaborar um modelo bidimensional discretizado com base na sucessão estudada envolvendo a integração das propriedades mecânicas, produtos deposicionais e diagenéticos, de forma a verificar o controle destes aspectos na relação entre abertura e dimensão de fraturas verticais nos depósitos estudados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nas últimas duas décadas, a indústria do petróleo tem se voltado para a exploração e exploração de recursos (gás e óleo cru) em reservatórios convencionais formados em rochas calcárias (LAVENU et al., 2015; WENNBORG et al., 2016). Estima-se que mais de 60% das reservas atuais de óleo, e mais de 40% das reservas de gás estão contidas em reservatórios compostos por rochas calcárias. No Oriente Médio, cerca de 70% das reservas de óleo e cerca de 90% das reservas de gás ocorrem neste tipo de Reservatório (SCHLUMBERGER, 2017). No Brasil, destaca-se a existência de grandes acumulações de petróleo e gás em reservatórios carbonáticos na margem sudeste, nas bacias de Santos, Campos e Espírito Santo. Essas acumulações são conhecidas como Pré-Sal, possuem estimativas de reserva com potencial de 70 a 100 bilhões de *boed* (*barrel of oil equivalent* -barris de óleo equivalente) (RICCOMINI et al., 2012), com uma produção atual de mais de mais de 1.000.000 *boed* (JOHANN & MONTEIRO, 2016). Os reservatórios do Pré-Sal são compostos principalmente por rochas calcárias, como: laminitos, coquinas e biolitos (TERRA et al., 2010; MUNIZ & BOSENCE, 2015; JOHANN & MONTEIRO, 2016).

No entanto, os campos petrolíferos do Pré-Sal são explorados em águas profundas a ultra-profundas, e os dados de subsuperfície, como dados de poços e de sísmica de reflexão, possuem efeito de continuidade lateral e de resolução limitados, respectivamente. A extrapolação do efeito dos dados entre perfis 1D, de alta resolução, ainda não permite a construção de modelos completos de padrões de fraturas que podem apresentar enorme número de componentes por unidade de área ou volume cúbico (NARR, 1996; ANGERER et al., 2003; PEACOCK, 2006). Da mesma forma, a questão dos custos para a obtenção de dados de perfis geofísicos, a perfuração de poços e a realização de amostragem em regiões de águas profundas,

limita ainda mais a quantidade de dados disponíveis para campos de grandes dimensões, o que amplia os desafios da modelagem desses reservatórios (BOYD et al., 2015). Devido aos fatores mencionados acima, a utilização de formações geológicas análogas às rochas que compõem os reservatórios do Pré-sal tem representado uma possibilidade de desenvolvimento e de apoio na construção de modelos e de predição de seu comportamento. A utilização de rochas aflorantes em bacias interiores e faixas costeiras tem permitido o estudo de parâmetros como propriedades mecânicas, texturais, químicas e mineralógicas, similares às rochas de reservatório em subsuperfície. Estas são aplicadas na construção de modelos geológicos/petrofísicos mais realistas, resultando em menor incerteza, melhores simulações numéricas e ganho econômico de longo prazo (THOMPSON et al., 2015). Conforme discutido em estudos anteriores, os laminitos da Formação Crato representam análogos físicos de laminitos do intervalo de rochas do Pré-Sal (ASSINE, 1994, 2007; ASSINE et al., 2014, CATTO et al., 2016; SANTOS et al., 2016; MIRANDA et al., 2016; ZIHMS et al., 2017, FARIA, 2018). Outro fator determinante é o fato de existirem ótimas exposições desses depósitos em minerações semimecanizadas na região da borda norte da bacia do Araripe, próximo à cidade de Nova Olinda, CE. A continuidade faciológica dos intervalos de laminitos (NEUMANN, 1999), também é outro fator que favorece a aplicação de estudos de estratigrafia mecânica nestes afloramentos, pois isso permite a correlação lateral de tendências gerais entre os afloramentos. Os reservatórios formados por rochas calcárias apresentam de forma geral estruturas de deformação e dissolução. Estas feições representam também de forma geral importante contribuição para a permeabilidade e o fluxo de fluido em reservatórios desta natureza, que comumente apresentam fenômenos complexos como dupla porosidade e dupla permeabilidade (LAVENU et al., 2015). E conforme proposto na presente pesquisa o estudo de análogos representa papel importante para a criação de modelos geológicos cada vez melhores (WENNBERG et al., 2006; LAVENU et al., 2015; GIUFFRIDA et al., 2019, 2020), conforme é a proposição desta pesquisa.

1.4 ESTRATIGRAFIA MECÂNICA E A ESTRATIGRAFIA DE FRATURAS NA CARACTERIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS

Os reservatórios fraturados em rochas sedimentares podem ser descritos em termos de matriz, caracterizada pela sua composição mineralógica, aspectos faciológicos e processo diagenéticos, e o sistema de fraturas, caracterizadas pelo comprimento dos componentes de cada família (set), orientação, espaçamento (densidade), e conectividade (DI NACCIO et al., 2005). A matriz e as fraturas apresentam propriedades de porosidade e permeabilidade, responsáveis pelo armazenamento e fluxo de fluido nos reservatórios (DI NACCIO et al., 2005;

UNDERWOOD et al., 2003; WENNERBERG et al., 2006; GIUFFRIDA et al., 2019). A porosidade da matriz e da fratura são importantes para o cálculo da capacidade de armazenamento, enquanto a permeabilidade da matriz e do sistema de fraturas são importantes para a predição do fluxo de fluido nos reservatórios (AGUILERA, 1995; LAVENU et al., 2015; WENNERBERG et al., 2006, 2016; GIUFFRIDA et al., 2020). Em reservatórios de rochas calcárias, fatores como pressão confinante, taxa de deformação, temperatura, e o comportamento reológico da rocha (grau de fragilidade), são condicionados pela litologia e pelo tamanho dos grãos componentes da matriz e espessura das camadas, sendo estes fatores importantes para a abordagem das relações entre as fraturas e características estratigráficas, como fácies, ciclos sedimentares e diagênese (DÜRRAST & SIEGESMUND, 1999; SINCLAIR, 1980; SHACKLETON et al., 2005; FERRILL et al., 2017)

O conceito de estratigrafia mecânica foi proposto inicialmente para descrever as camadas que refletem as variações na intensidade e tipo das deformações geradas pelas alterações litológicas, petrológicas e petrofísicas que afetaram a rocha (CORBETT et al., 1987; GROSS et al., 1995; HANKS et al., 1997; MORETTINI et al., 2005). Estudos realizados sobre a estratigrafia mecânica de depósitos sedimentares mostraram que a ligação entre fácies, diagênese e padrão das fraturas não é só evidente, mas é de vital importância para compreensão do fluxo de fluidos em reservatórios carbonáticos (EBERLI et al., 2003; UNDERWOOD et al., 2003; MORETTINI et al., 2005). A partir de um uso corrente na geologia estrutural, a estratigrafia mecânica é compreendida como uma subdivisão da sucessão rochosa em intervalos mecânicos discretos de acordo com as propriedades mecânicas predominantes (CORBETT et al., 1987; COOKE, 1997). Todavia, conforme outros autores, esta também pode ser definida como a resposta mecânica das rochas a um esforço aplicado (GROSS et al., 1995). A estratigrafia mecânica atualmente é reconhecida como subproduto da composição e estrutura de deposição, mudanças químicas e mecânicas sobrepostas à composição da rocha, textura e interfaces, após a deposição (LAUBACH et al., 2009). Enquanto a estratigrafia de fratura é definida como a análise essencial para o estudo dos fatores que controlam a formação das fraturas em intervalo específicos da rocha, de acordo com a extensão, intensidade, distribuição e parâmetros geométricos, com base no histórico do soterramento e a estratigrafia mecânica das rochas durante a formação das fraturas (Figura 1) (LAUBACH et al., 2009; LAVENU et al., 2015). Os aspectos da estratigrafia mecânica e da estratigrafia de fraturas podem ou não

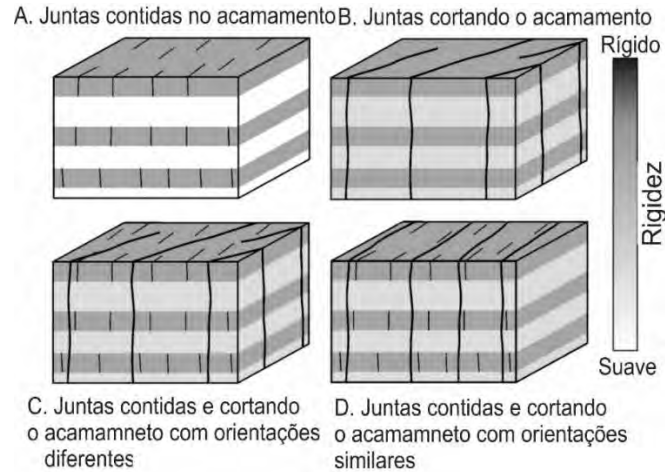
coincidir, já que as propriedades mecânicas da rocha evoluem com a diagênese, enquanto as fraturas evoluem com o histórico de deformação (LAUBACH et al., 2009).

A estratigrafia mecânica em reservatórios pode ser definida, com base em perfis geofísicos e na análise de amostras, porém a estratigrafia de fraturas geralmente é limitada. Devido a esses limites o estudo comparativo pode ser realizado em análogos de superfície, visando uma avaliação mais precisa da relação entre as propriedades mecânicas das rochas com a distribuição e o controle do fraturamento. Tais dados podem ser integrados aos modelos de reservatórios a partir de métodos geoestatísticos principalmente (FERRIL et al., 2014).

A maior parte das técnicas empregadas para a caracterização de sistemas de fraturas naturais se baseiam no uso de operadores estatísticos, que são utilizados para extrapolar (*upscaling*) o comportamento local observado nos meios fraturados, a partir de dados de campo (análogos), e/ou de poços. A distribuição de famílias de fraturas, em grande parte, pode ser capturada/representada por leis de potências (mecanismo de tratamento amplamente utilizado por vários códigos comerciais e não-comerciais), devido ao comportamento fractal ou quasi-fractal dos sistemas de fraturas naturais (TURCOTTE, 1989; GILLESPE et al., 1993; PICKERING et al., 1995; MARRETT et al., 1999; ORTEGA & MARRETT, 2000; ORTEGA et al., 2006; GUERRIERO et al., 2010, 2011; GUERRIERO, 2012; ZAZOUN et al., 2015) (Figura 2).

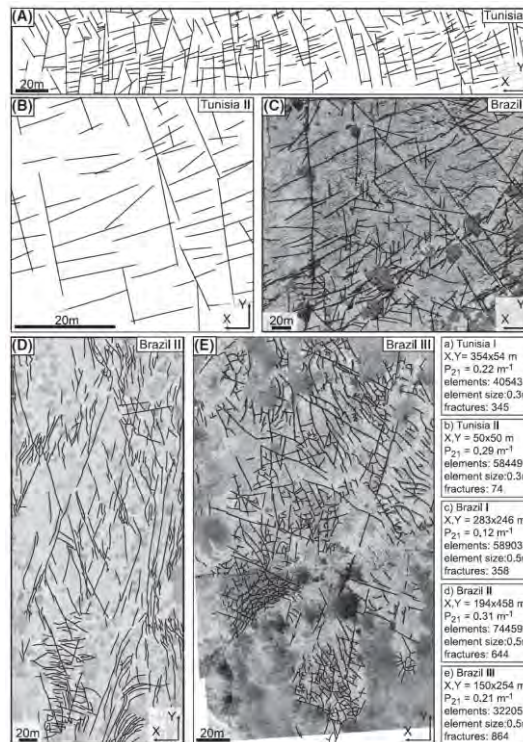
O uso de leis de potências permite criar modelos com uma previsão da distribuição espacial das famílias de fraturas, discretas, por meio do emprego de modelagem numérica (LANARO & STEPHANSON, 2003; FLODIN et al., 2004; DREUZY et al., 2012, 2013; SANTOS et al., 2015; SANDERSON & NIXON, 2015) (Figuras 3 e 4). Apesar do relativo sucesso dessas abordagens, alguns problemas persistem no que diz respeito a eficiência preditiva dos modelos obtidos. Um grande número de estruturas de pequenas dimensões (fraturas e microfraturas) pode produzir efeito muito local na rede permo-porosa, e o tratamento destes efeitos normalmente precisa ser homogeneizado, ou descartado, devido a impraticabilidade de seu tratamento em modelos reais, em escala de reservatório. Entretanto, estudos de problemas específicos também apresentam tendências que impedem a criação de sistemas preditivos de espectro mais abrangente (BOURBIAUX, 2010; HEALY et al., 2006; WATKINS et al., 2015). O acúmulo de exemplos de boa qualidade pode, no entanto, levar a utilização de ferramentas computacionais avançadas que permitam o delineamento de padrões robustos que podem reduzir significativamente a incerteza dos modelos (HASSANI & SILVA, 2018).

Figura 1-Blocos digrama mostrando exemplos simplificados da relação entre a estratigrafia mecânica e a estratigrafia de fratura. Padrões comuns de juntas resultante do controle exercido pela constante (A e B), e variação temporal (C e D) da estratigrafia mecânica. A) Padrões de juntas formadas devido ao alto contraste de rigidez das camadas. B) Padrão de Juntas formadas devido ao menor contraste da rigidez entre as camadas. C e D) Padrão de juntas formadas ao mesmo tempo, quando o contraste de rigidez era alto e quando o contraste de rigidez era baixo, respectivamente.



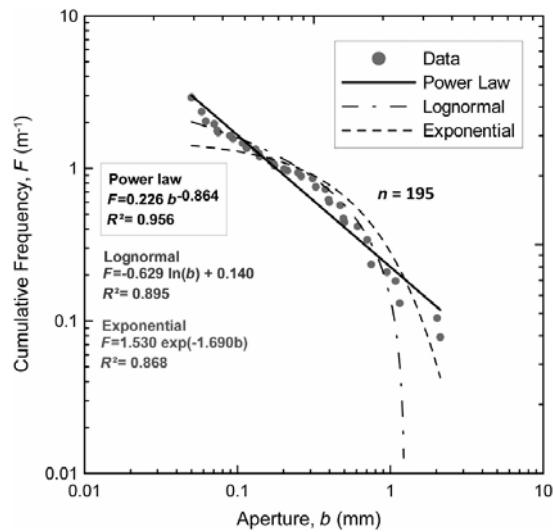
Fonte: Modificada de Shackleton *et al* (2005).

Figura 2 - Coletas de dados de fraturas em sistemas naturais (número de fraturas por área), em afloramentos (pavimentos) de rochas carbonáticas, em diferentes localidades, com base na análise de imagens.



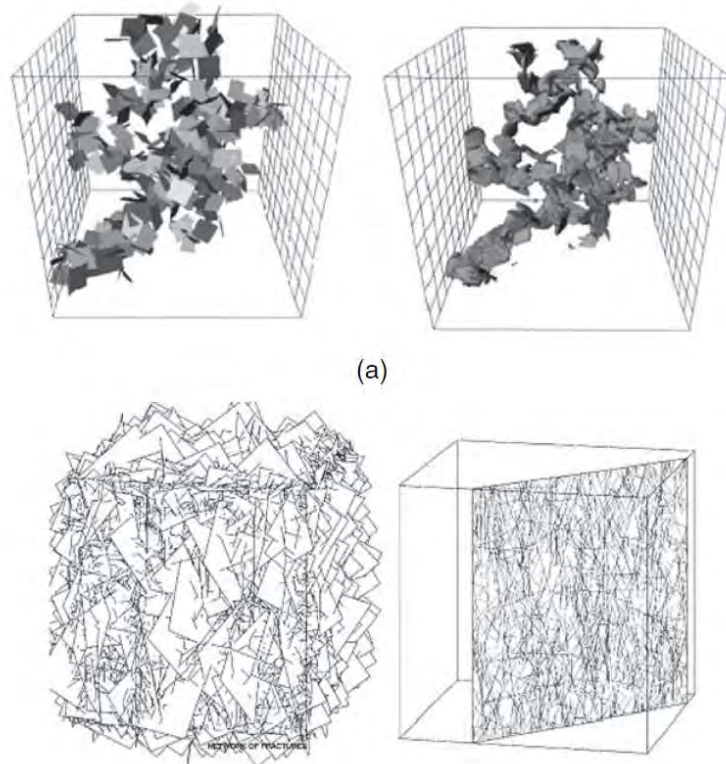
Fonte: Bisdon *et al.*, 2016.

Figura 3 - Gráfico log-log mostrando a relação de parâmetros de fraturas (abertura e frequência cumulativa) medidas em calcários laminados da Bacia do Araripe. Observa-se que a lei de potência representa a melhor representação para a análise de correlação de propriedades.



Fonte: Santos et al., 2015.

Figura 4 - Dois exemplos de modelos DFN criados a partir de: A) realização estocástica com base em dados de superfície. Modelo total de fraturas (direita), e corredor de fluxo formado pelas fraturas conectadas (esquerda) e B) por dados obtido a partir de logs de poços. Modelo total da distribuição de fraturas (esquerda), e traços de fraturas em uma seção bidimensional vertical (direita).



Fonte: modificado de Svenson, (2001) e Park et al (2002).

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi construído com base nos seguintes materiais e métodos, descritos a seguir.

1.5.1 Levantamento dos pseudo-poços, painéis de alta, resolução, *scanlines* e processamento dos dados.

Os pseudo-poços, painéis de alta resolução e *scanlines* foram executadas em exposições verticais do calcário laminado, em frentes de lavra das minas Willian e Idemar, localizadas no município de Nova Olinda. Os afloramentos foram cuidadosamente escolhidos, levando em consideração parâmetros, como: maior exposição lateral e vertical dos calcários laminados, menor grau de intemperismo e a exposição de várias superfícies no mesmo afloramento (exposição 3D). Depois de selecionados, as faces dos afloramentos foram limpas com auxílio de pincéis, vassouras, borrifadores e máquina de jato de alta pressão.

O levantamento dos pseudo-poços e painéis de alta resolução foi realizado com o auxílio de lupas, bússolas, réguas, comparador (para leitura da abertura de veios, conforme proposto por Ortega et al., 2013), marcadores permanentes, câmera fotográfica de alta resolução e trenas. Os perfis estratigráficos tratados como pseudo-poços foram localizados sobre locais dos afloramentos que continham um número importante de veios para uma posterior avaliação do efeito de amostragem, em relação a áreas com menos estruturas (Figura 5A). As descrições dos perfis de alta resolução, pseudo-poços, foram realizadas com base em aspectos sedimentológicos, diagenéticos, deposicionais, estruturais e texturais dos laminitos.

O conceito de petrofácies de reservatório, conforme discutido por De Ros e Goldberg (2007) foi considerado como ferramenta neste trabalho, para a individualização dos intervalos de laminações com características diferentes do ponto de vista da modelagem de reservatórios. As petrofácies de reservatório são definidas pela descrição sistemática de estruturas deposicionais, texturas e composição primária essencial, fatores que controlam a porosidade e permeabilidade originais das rochas sedimentares, juntamente com os processos e produtos diagenéticos, que afetam a distribuição atual da porosidade e permeabilidade das rochas (DE ROS E GOLDBERG, 2007). Esse conceito visa avaliar a qualidade de reservatórios de hidrocarbonetos, a partir das descrições sistemáticas desses atributos, podendo ainda integrar modelos estratigráficos e estruturais, em uma escala de maior detalhe do que a representada pelas litofácies deposicionais (ROCHA, 2018). Por apresentarem proporção de atributos petrográficos importantes, as petrofácies podem ser utilizadas para a calibração e representação tri-dimensional em modelos de reservatório, que são consistentes com as características petrofísicas, assinaturas sísmicas e perfis geofísicos para representação da qualidade de reservatórios análogos (ROCHA, 2018). A descrição sistemática das petrofácies definidas por

essa pesquisa nos perfis dos pseudo-poços permitiu a identificação de feições e atributos de maior impacto sobre as propriedades mecânicas e físicas dos calcários laminados. Foi realizada uma definição inicial de petrofácies para os laminitos, que foi comparada com outros dados obtidos durante a pesquisa, incluindo parâmetros mecânicos e petrográficos. A análise destes parâmetros permitiu estabelecer treze petrofácies para a sucessão de laminitos que compõem o intervalo C6 de calcários laminados.

Foram executados 3 pseudo-poços, faixas de amostragem, nas quais a descrição de petrofácies foi realizada na escala 1:1, sobre as superfícies verticais de dois afloramentos escolhidos nas minerações citadas. Para a descrição da variação vertical de petrofácies assumiu-se o limite de espessura de uma lâmina, ou conjunto de lâminas, de até 5 mm. Cada seção procurou simular um perfil de um poço, em uma faixa de 20 cm de largura. Os perfis executados variaram de 3,00 a 5,00 m de comprimento. Nestas mesmas seções, também foram realizados perfis (*logs*) de resistência mecânica e de gamaespectrometria, para análise da variação das propriedades físicas da rocha. Foram criados dois painéis de alta resolução por meio da tomada de fotografias e da varredura com câmeras a partir de UAV (veículo não tripulado), um para o afloramento estudado na Mina Idemar e outro para o afloramento 3D analisado na Mina Willian, com cerca 23,5 m e 41,5 m de comprimento, 4 e 5 m de altura, respectivamente. O posicionamento dos painéis nas respectivas minerações, dos pseudo-poços, e dos pavimentos estudados foi realizado com o auxílio de um equipamento de posicionamento de alta precisão, DGPS/GNSS, da marca Trimble, modelo R8S (Figura 5B).

A varredura integral dos painéis foi realizada após a limpeza das superfícies com vassouras e máquina de jato de água. Esta varredura consistiu na identificação visual de todas as estruturas encontradas nas superfícies escolhidas, até o limite submilimétrico, com o uso de lupas de bolso. Foi realizada uma marcação de todas as estruturas individuais (concreções, nódulos de pirita, *vugs*, veios, *shear fractures*, planos estilolíticos), com marcadores permanentes, por meio de simbologia, anotações e convenções. Para as estruturas planares como veios, *shear fractures* e estilólitos procurou-se medir a orientação dos planos e marcar as suas terminações (direção, intensidade de mergulho, sentido de mergulho e espessura) (Figura 5A e 5B), que também foram assinaladas nos afloramentos para auxiliar a posterior reconstrução de todos os dados com base nas imagens de alta resolução. A etapa de varredura foi realizada por duas equipes diferentes em momentos distintos, para reduzir problemas de *censoring* (*censoring* - FERNANDES et al., 2015), com o auxílio de escadas, pinceis, lupas, bússolas, marcadores, comparadores, borrifadores e nível de bolha. o caso de *shear fractures*, veios e juntas. Após a preparação, limpeza e marcação os painéis foram fotografados, e foram

elaborados fotomosaicos ortoretificados dos mesmos. Após a confecção dos painéis de varredura integral das superfícies foram extraídas doze *scanlines* verticais digitais (P10).

Também foi realizada a coleta de plugues, ao longo dos perfis de pseudo-poços, e na superfície dos painéis e de pavimentos (Figura 5C). Os plugues possuem diâmetro de 3,8 cm, e altura de 5 a 12 cm. Foram coletados aproximadamente 200 plugues (Figura 5D, E e F), que passaram por etapa posterior de seleção para sua utilização em análises petrográficas e ensaios de compressão uniaxial.

Na etapa de processamento dos dados, os plugues foram cortados e retificados, Posteriormente foram selecionados, considerando as dimensões e presença de variado número de feições (fraturas, convoluções, estilólitos, sem estruturas, microfalhas), foram fotografados e a partir das fotos foi realizada a reconstrução de um modelo 3D de cada plugue. A partir do pool de amostras final, foram escolhidas as amostras para os ensaios mecânicos (compressão uniaxial). Também a partir dos plugues selecionados seguindo as petrofácies definidas, foram confeccionadas lâminas delgadas para a investigação de petrografia de luz transmitida, com CL, e de MEV.

Os perfis estratigráficos, pseudo-poços, também foram reconstruídos através do software AutoCAD e Strater. Também foi utilizado o software AutoCAD para a reconstrução dos painéis a partir da vetorização dos elementos discretizados sobre o mosaico de imagens (estruturas rúpteis, feições diagenéticas, etc.), além dos perfis de pseudo-poços. Os dados das *scanlines* foram processados para a construção de gráficos que tratam a relação de fatores como abertura versus a frequência das estruturas, que normalmente representa uma lei de potência. Esta reconstrução permitiu a visualização da relação das estruturas em modelos 2,5D, o que auxiliou a interpretação dos padrões existentes entre as feições estudadas.

Após a completa integração dos dados espaciais das feições tratadas, sobre os painéis fotográficos, e os perfis estratigráficos com os *logs* de resistência mecânica e de gamaespectrometria, foi realizada uma interpretação dos padrões, e da influência de aspectos deposicionais e diagenéticos nas distribuições do sistema de fraturas (veios verticais e horizontais).

Figura 5 - Detalhes do processo de aquisição de dados nas superfícies dos afloramentos. A e B) Mina Willian e Idemar. Essas imagens ilustram o processo de escolha, limpeza, preparação e marcação dos afloramentos. C) Construção de uma faixa vertical para a aquisição de dados em seção vertical simulando um poço. D) Coleta de plugues e de blocos para execução de ensaios em laboratório e preparação de lâminas. E e F) Serras tipo copo, comerciais e de fabricação especial, utilizadas na extração de plugues.



Fonte: A autora (2020).

1.5.2 Caracterização Petrográfica

A caracterização petrográfica dos calcários laminados consistiram na análise petrográfica, catodoluminescência e MEV com WDS e EDS Acoplado, descritas em detalhe a seguir.

1.5.2.1 Análise petrográfica e de catodoluminescência

As análises petrográficas foram realizadas a partir de amostras de 40 plugues coletados nos afloramentos, a partir das quais foram confeccionadas lâminas delgadas polidas. As descrições das lâminas delgadas foram executadas através de microscópio de luz transmitida (Zeiss/Axio Scope A1) com apoio de um equipamento de técnica de catodoluminescência (CL), modelo CITL MK-5 acoplado ao microscópio petrográfico, no Laboratório de Catodoluminescência (UFPE-DGEO) (Figura 3A). Foi realizada a descrição de feições texturais, estruturais e diagenéticas, composição mineralógica, conteúdo fóssil e aspectos da porosidade. Além, da classificação da rocha de acordo com as feições (grão, matriz e cimento) segundo Folk (1962).

Usado como método auxiliar à descrição petrográfica, a técnica de catodoluminescência ajudou na identificação de feições não observáveis por meio da microscopia óptica convencional (LAUBACH et al., 2004; LAUBACH & MEGHAN, 2006; HOOKER et al., 2012). A catodoluminescência também forneceu informações a respeito dos processos diagenéticos, como evolução da porosidade e processo de cimentação/substituição mineral, relação temporal de geração de fraturas e a composição do material que as preenchem. Portanto, esta técnica auxiliou a identificar de forma qualitativa a evolução diagenética das rochas estudadas (SCHOLLE, 2003). De forma geral, a luminescência é produzida por meio do bombardeamento da superfície mineral com um feixe de elétrons (anodo - catodo). Os minerais apresentam respostas que podem ser classificadas como fortemente luminescente, luminescente e não-luminescente (*dull*). Minerais ricos em Fe e Mg apresentam muito baixa ou nenhuma luminescência (SCHOLLE, 2003; PAGEL et al., 2000). Para o caso de rochas calcárias, a incorporação de Mn^{+2} no retículo cristalino da calcita estimula a luminescência, e a incorporação de Fe^{+2} reduz a luminescência. A calcita rica em manganês tende a apresentar luminescência brilhante de cor laranja-amarelada. A calcita ferrosa tende a apresentar coloração marrom, a vermelho escuro e baixa luminescência. Condições redutoras durante os estágios iniciais e intermediários da diagênese, tendem produzir altas razões de Mn/Fe nos minerais carbonáticos, o que resulta como resposta uma alta luminescência. Enquanto, estágios intermediários a tardios da diagênese ligadas a formação de cimento secundário, ou substituição de minerais está relacionada a uma baixa razão de Mn/Fe, resultando como resposta uma baixa luminescência (PAGEL et al., 1999; SCHOLLE, 2003; FLUGEL, 2004) (Figura 6A).

O estudo petrográfico permitiu a definição das petrofácies, juntamente com feições macroscópicas observadas nas rochas como a existência de feições de dissolução. Para o estudo de aspectos macroscópicos, feições centimétricas a milimétricas, em amostras de mão e blocos de laminitos coletados para estudo em laboratório, foi utilizado um microscópio digital, da marca Dino-Lite 5MP USB AM7013MZT4, com capacidade de aumento de 200x (Figura 6B).

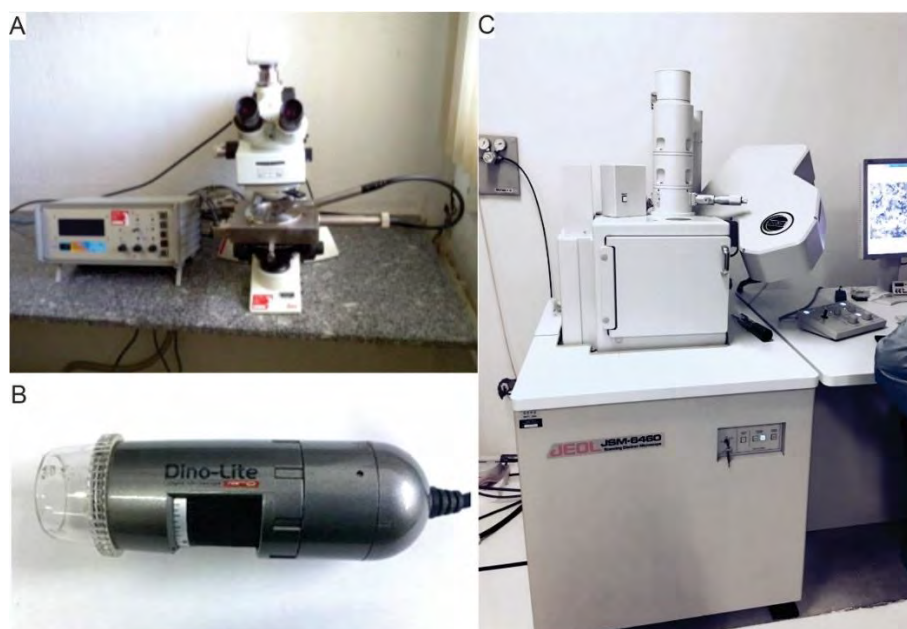
1.5.2.2 MEV com WDS e EDS Acoplado

Para estudo detalhado de aspectos texturais e minerais dos laminitos foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JSM-6460 fabricado pela JEOL Ltd., que está instalado no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE (Figura 6C). Este equipamento permite aumentos de até 300.000 vezes, para a observação e criação de imagens de alta resolução da superfície de lâminas delgadas de rochas e de amostras na forma de blocos de pequenas dimensões. O equipamento de Espectrometria por Dispersão de

Comprimento de Onda (*Wavelength Dispersive Spectrometry* – WDS), usado de forma acoplada ao MEV, é utilizado para análise da composição elementar, através de cristais de difração para discriminações dos raios-X, o que permite obter análise quantitativa em materiais multicomponentes e a determinação da presença de elementos com baixas concentrações (SILVEIRO et al., 2016). Por sua vez, o equipamento de Espectrometria por Dispersão de Energia (*Energy Dispersive Spectrometry*- EDS) é uma técnica utilizada para caracterização qualitativa e quantitativa de componentes químicos. Esse método atualmente tem sido amplamente utilizado, por ser mais rápido, pois os raios-X produzidos pelo processo de imageamento da amostra são varridos simultaneamente (SILVEIRO et al., 2016).

A análise realizada para esta pesquisa consistiu na investigação de MEV com EDS acoplado, de dois tipos de amostras: dois conjuntos de pequenos pedaços de amostras montados sobre lâminas de vidro (uma com 7 e outras com 6 pequenos pedaços com até 2 cm de comprimento), e imagens da superfície de 6 lâminas petrográficas polidas. As lâminas passaram pelo processo de cobertura com carbono para a execução das análises.

Figura 6 - Imagem dos equipamentos utilizados para realização de análises das rochas da Formação Crato do presente estudo. A) Microscópio petrográfico modelo Zeiss/Axio Scope A1, com o equipamento de catodoluminescência acoplado, modelo MK5 fabricado pela empresa CITL - Cambridge Tech. B) Microscópio Digital Dino- Lite Pro. Apresenta capacidade de aumento de até 200 vezes. C) Microscópio eletrônico de varredura (MEV) de alta resolução, modelo JSM-6460 fabricado pela JEOL Ltd., instalado no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN).



Fonte: A autora (2020).

1.5.3 Gama-espectrometria portátil (*Gamma Ray*)

A gama-espectrometria portátil baseia-se na medição *in situ* da radiação gama emitida espontaneamente pelos minerais presentes nos estratos rochosos. A leitura é principalmente baseada na leitura dos elementos radioativos tório, urânio e potássio (SPERRY-SUN, 1999). Os perfis de raios gama são comumente utilizados na caracterização de rochas em subsuperfícies a partir de logs de poços, e quando executados em afloramentos análogos permitem o estudo comparativo de aspectos litológicos juntamente com outros parâmetros (AIGNER et al., 1995; JORDAN et al., 1993). Outra aplicação do método é a estimativa de "argilosidade" dos estratos sedimentares, já que grande parte dos minerais argilosos contém grande quantidade de átomos de potássio em sua estrutura (SILVA, 2013). Segundo Jiang & Mokhtari (2019), a leitura das concentrações de U pode ser aplicada como ferramentas na avaliação da presença de matéria orgânica em calcários e margas, porém esta análise deve ser feita com alguns cuidados, devido a influência de minerais de argila na leitura dos raios gama naturais. De acordo com os mesmos autores, ainda a razão Th/U pode ser um indicador do status redox do ambiente deposicional.

Os levantamentos de perfis de gama-espectrometria no presente estudo foram realizados com um espectrômetro portátil, da marca Terraplus Inc, modelo RS-230 BGO (detector de bismuto), que permite uma leitura da contagem total de raios gama, e a leitura dos canais de Th, K e U, separadamente. Dois perfis gama foram executados na frente de lavra da Mina Willian, e dois foram executados na frente de lavra da Mina Idemar (Figura 7A). As leituras foram realizadas sobre os perfis estratigráficos, pseudo-poços, com tempo de contagem de 5 min, e espaçamento de 25, ou 20 cm.

1.5.4 Caracterização das propriedades mecânicas

A caracterização das propriedades mecânicas dos laminitos foram realizadas através da utilização do esclerômetro - *Schmidt Hammer* e dos ensaios de compressão uniaxial, detalhados a seguir.

1.5.4.1 Esclerômetro - *Schmidt Hammer*

O esclerômetro (*Schmidt Hammer*) foi desenvolvido em 1948, para utilização na indústria de construção civil em ensaios não destrutivos de resistência do concreto. Posteriormente começou a ser amplamente utilizado para estimar valores de elasticidade efetiva de rochas, principalmente dados de resistência à compressão uniaxial – *Uniaxial Compressive Strength* (UCS), e para estimativa do módulo de Young (KASTZ et al., 2000; AYDIN & BASU, 2005; VILES et al., 2011; SCHMIDT, 1951; STEER et al., 2011). Este equipamento é utilizado

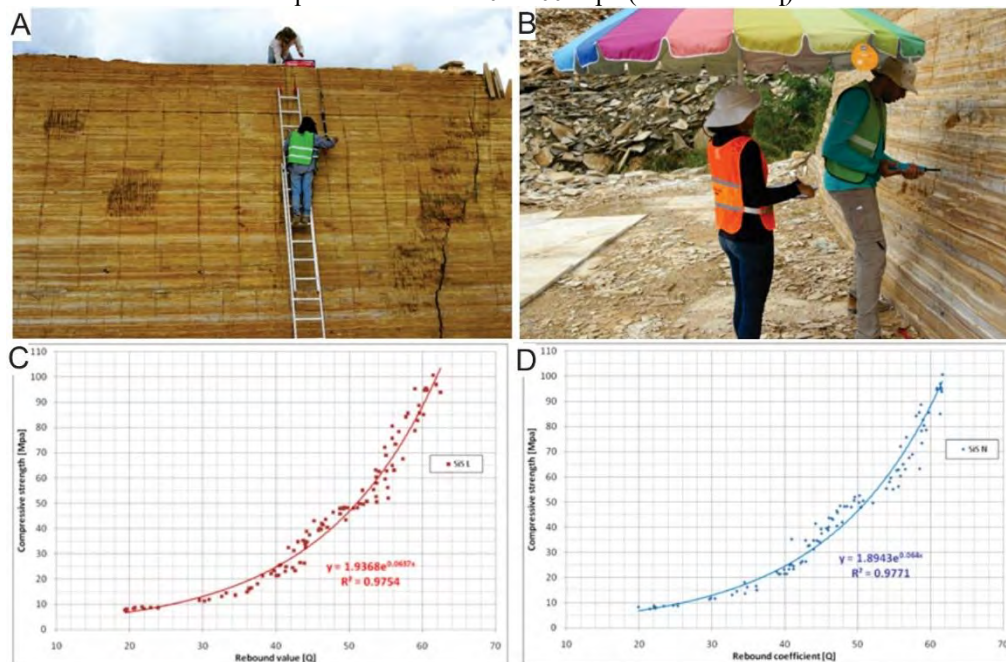
para medir a elasticidade efetiva da rocha através da conversão da energia de impacto em energia de deformação, que é produzida quando o êmbolo do martelo é empurrado contra a superfície do material. A rocha por sua vez, absorve uma quantidade de energia a partir da qual estima-se a sua elasticidade efetiva ou rigidez. As rochas de baixa elasticidade efetiva ou rigidez, como folhelhos e margas, estão relacionadas à grande absorção de energia de impacto. Rochas com maior elasticidade efetiva, estão relacionadas a baixa absorção de energia de impacto, como calcários e arenitos bem litificados (MIRANDA et al., 2012). Fatores naturais ou/e operacionais podem afetar as medidas de rigidez da rocha, tais como: composição mineral da rocha, tamanho de grãos componentes, intemperismo, diagênese e fraturamente, ou/e dimensão das amostras, ocorrência de argila, rugosidades na superfície da rocha e fadiga da mola (KATZ et al., 2000; BASU & AYDIN, 2004; AYDIN & BASU, 2005; VILES et al., 2011).

Neste estudo dados de resistência mecânica in situ foram adquiridos em dois perfis no painel construído na Mina Willian, e dois foram executadas no painel elaborado na Mina Idemar. Os dados de resistência mecânica foram obtidos nos mesmos perfis com dois esclerômetros da marca PROCEQ, modelo Rockshmidt – Tipo L, de baixa energia de impacto (0,735Nm), e Tipo N, de alta energia de impacto (2.207 Nm). A obtenção da medida de rigidez foi feita com base na média de 10 impactos executados na mesma região do perfil do pseudo-poço (AYDIN & BASU, 2005). As dez leituras foram realizadas com o instrumento na horizontal, dentro da faixa dos pseudo-poços, respeitando um conjunto de lâminas pertencentes a mesma petrofácies, com espaçamento de 15 ou de 20 cm, conforme os perfis levantados (Figura 7B). E ainda, foram realizadas 10 leituras em níveis horizontais da mesma petrofácies em diferentes regiões do painel, para verificar a variação da rigidez elástica para cada petrofácies. Os valores de rigidez da rocha são fornecidos pelo equipamento como coeficiente de rebote (Q) e posteriormente convertidos para MPa (Mega Pascal). No presente estudo, esses valores foram convertidos através das curvas padrão fornecida pelo fabricante do equipamento desenvolvida para concreto. Os dados obtidos e processados foram comparados com levantamentos realizados anteriormente dos laminitos da Formação Crato, e discutidos conforme as informações disponíveis na literatura sobre a implicação das informações obtidas com esse tipo de equipamento para o estudo de mecânica das rochas (Figura 7C e 7D) (MIRANDA, 2015).

1.5.4.2 Ensaio mecânico de compressão de uniaxial

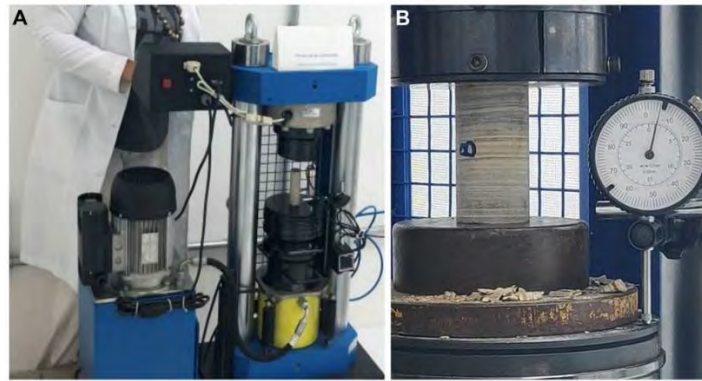
Foram realizados ensaios mecânicos para caracterização de alguns parâmetros dos calcários laminados das Minerações estudadas. Os ensaios foram realizados em plugues com $\varnothing$ 38 mm, e consistiu em ensaios de resistência a compressão simples *Uniaxial Compressive Strength* (UCS). As amostras foram submetidas a uma tensão vertical (σ_1) crescente, sem tensão confinante ($\sigma_3 = 0$), distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova. Foi utilizada uma prensa servo controlada com capacidade de 100 t. que permite o avanço à velocidade controlada de 0,122 mm/min (Figura 8). Um total de 30 plugues foram ensaiados no Laboratório de Geotecnia do DECIV-UFPE, e no Laboratório de Geomecânica da UFPE.

Figura 7 - Aquisição dos dados de resistência mecânica e gamaespectrométricos em campo. A) Procedimento de aquisição de dados de gamaespectrometria em perfil no Painel 2- Mina Willian. Posicionamento do equipamento, para leitura de 5 min, com o apoio de cabo para içamento e escada. B) Levantamento de perfis de resistência mecânica em campo utilizando o Martelo de Schmidt (esclerômetro). A aquisição dos dados foi realizada nos perfis verticais de pseudo-poços. C) e D) Curva padrão do esclerômetro *Silver Schmidt Hammer* Tipo L (Sis L) e Tipo N (Sis N), as curvas exponenciais mostram a correlação entre o Fator Q e a resistência mecânica para rochas/concretos com valores UCS que variam entre 10 e 100 Mpa (Fonte: Proceq).



Fonte: A autora (2020) e Proceq (C e D).

Figura 8 - Ensaio mecânico realizado com amostras do calcário laminado. A) detalhe da prensa para ensaios de compressão uniaxial localizada no LGEOMEC-UFPE, B) plugue sob ensaio.



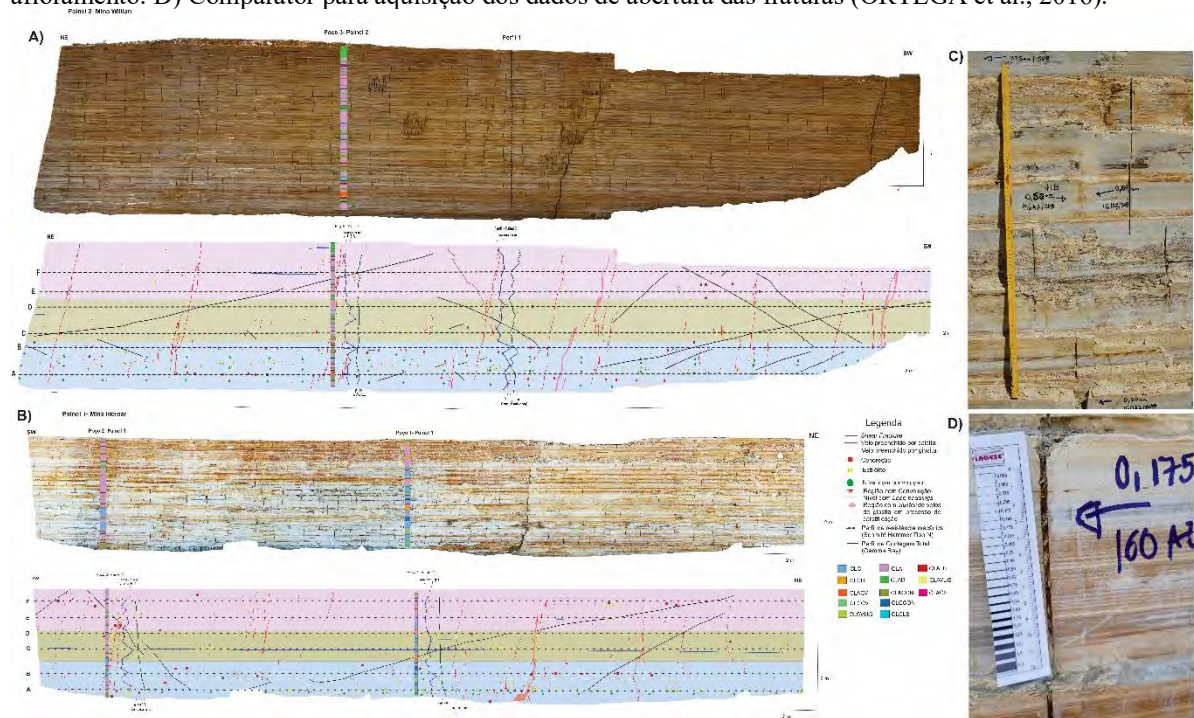
Fonte: A autora (2020).

1.5.5 Técnica de Scanline

A técnica de captura de propriedades de sistemas de fraturas por meio de varredura linear, *scanline*, representa uma abordagem direta de baixo custo que permite definir parâmetros utilizados na modelagem de reservatório naturalmente fraturados (MIRANDA et al., 2012; WATKINS et al., 2015). A varredura é realizada por meio da aquisição de dados de atributos das fraturas (veios): orientação, comprimento, abertura, espaçamento entre as paredes das fraturas, composição dos preenchimentos de veios e, quando a aquisição é feita por área, também são coletados dados de relação de interseção (ORTEGA et al., 2006; GALE & GOMEZ, 2007; GUERRIERO et al., 2010; HOOKER et al., 2012; MIRANDA et al., 2012; HOOKER et al., 2013; WATKINS et al., 2015).

Para a integração de dados de padrões de fraturas foram executadas doze varreduras lineares (P10) em painéis dos afloramentos estudados (Figura 9). As *scanlines* lineares tiveram suas linhas marcadas de forma aleatória conforme a metodologia proposta por Ortega et al (2006), e perpendiculares a direção principal das fraturas. A coleta das medidas de abertura das estruturas, foi feita com o apoio de lupas bolso e régua comparadora (comparator) (Figura 9), conforme metodologia descrita por Ortega et al. (2006). Esta régua possui valores normalizados em escala logarítmica, de 0,05 a 5 mm, o que permite o agrupamento e posterior tratamento estatístico dos valores de abertura dos planos de fratura (ORTEGA et al., 2006; SANTOS et al., 2015; MIRANDA et al., 2018).

Figura 9 - Imagens da exposição com e processo de levantamento digital das *scanlines* nos calcários laminados na Mina Willian e Idemar. A) Localização das *scanlines* digitais do tipo P10, realizadas na exposição da Mineração Willian. B) Localização das *scanlines* digitais do tipo P10, realizadas na exposição da Mineração Idemar. C) Imagem mostrando as marcações sistemáticas de todas as estruturas deposicionais, diagenéticas e rúpteis no afloramento. D) Comparador para aquisição dos dados de abertura das fraturas (ORTEGA et al., 2016).

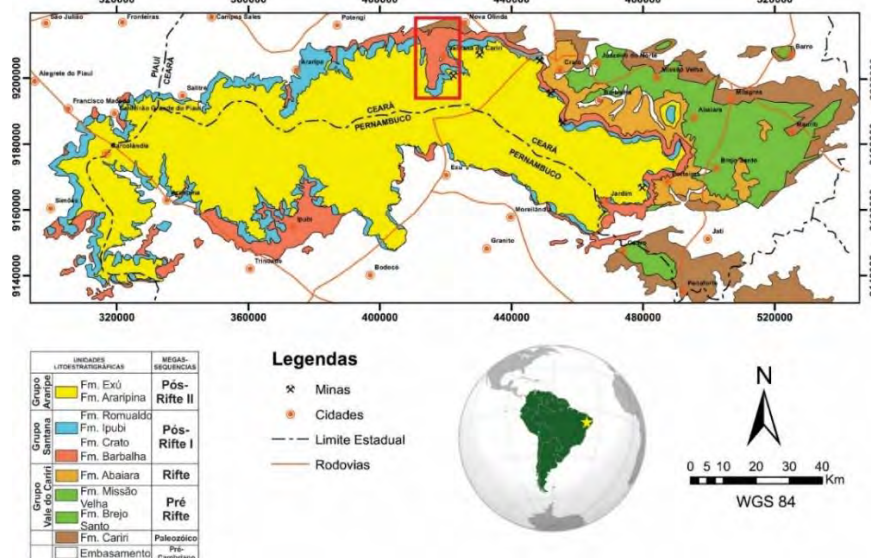


Fonte: A autora (2020).

1.6 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O presente estudo foi realizado em afloramentos de calcários laminados em minerações localizadas na borda norte da Bacia do Araripe, próximo as cidades de Nova Olinda e Santana do Cariri, CE, nordeste do Brasil (Figura 10). A região foi escolhida por apresentar boas exposições dos depósitos de laminitos em minerações mecanizadas a semi-mecanizadas, e em afloramentos naturais.

Figura 10 - Mapa geológico da Bacia do Araripe com as principais estradas de acesso e cidades. A área de estudo está representada pelo retângulo vermelho, localizada próximo à cidade de Nova Olinda, Ceará.



Fonte: Mapa geológico modificada de Assine et al (2014).

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Os aspectos da área de estudo serão detalhados nos tópicos seguintes.

2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA

A Província Borborema (PB) está localizada na região Nordeste do Brasil, e faz parte da Plataforma Sul-Americana (OLIVEIRA, 2008). Foi definida por Almeida et al (1997) como umas das 10 províncias do escudo Atlântico, possui uma área de aproximadamente 450.000 km². É limitada a leste e a norte pelo oceano Atlântico, a noroeste pelo Cráton São Luís, a sul pelo Cráton São Francisco e oeste pela bacia do Parnaíba. As bacias costeiras do Ceará, Potiguar, Plataforma de Natal, Pernambuco, Paraíba e Sergipe-Alagoas representam a borda leste da província.

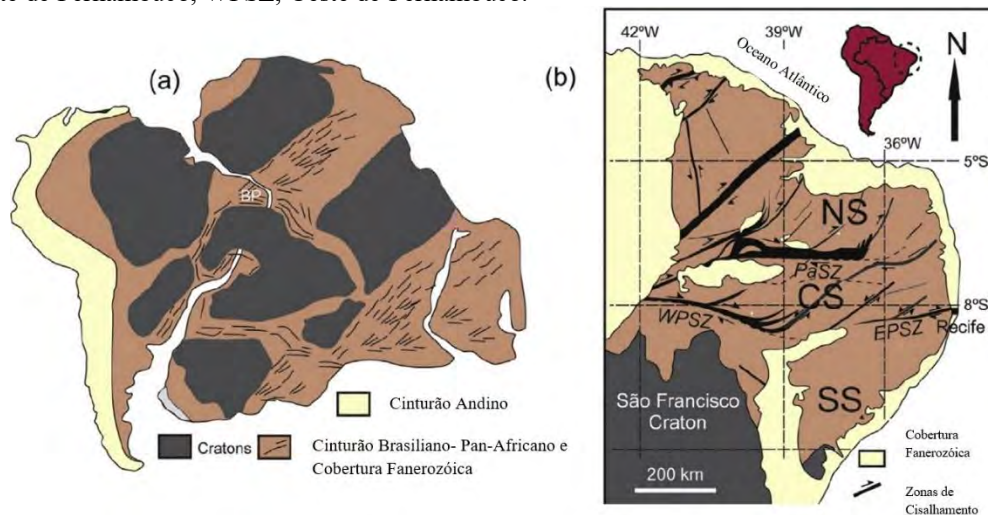
Descrita por Brito Neves (1975) e Almeida et al (1997, 1981) como uma região de dobramentos estruturados no final do neoproterozoico, durante o Ciclo Orogenético Brasileiro (650-520 Ma), esta província apresenta um arranjo complexo, em mosaico, que inclui diversos sistemas e dobras lineares, separados por partes elevadas do embasamento, relacionadas ou não a zonas de cisalhamento de escala continental e com diversas intrusões de plutões graníticos (ALMEIDA et al., 1981). Em uma reconstrução *pré-drift* segundo o modelo geotectônico de Van Schmus et al (2008), a formação da província foi iniciada a partir da quebra do supercontinente Columbia no final do mesoproterozoico início do neoproterozoico (GUIMARÃES et al., 2012; SILVA FILHO et al., 2016), e posteriormente incorporou o resultado da convergência e colisão entre as massas do oeste Africano, Congo/São Francisco e Amazônia, por volta de 600 Ma. A quebra desse supercontinente gerou a abertura do Oceano

Atlântico, que foi responsável pela configuração atual dos continentes Africanos e Sul-Americano (BRITO NEVES et al., 2000; VAN SCHMUS et al., 2008, 2011). De acordo com Van Schmus et al (2008) dados isotópicos, estruturais e datações absolutas U-Pb mostraram a ocorrência de características geológicas semelhantes entre a Borborema e a Faixa de Dobramentos da África Central, o que leva a compreensão que a história evolutiva da PB está diretamente ligada à sua contraparte africana, que é representada pelas Províncias Hoggar, Nigéria e África Central, além do Cinturão Phasuriano (Figura 11a). Van Schmus et al (2011) propuseram a divisão da província em três grandes subprovíncias, separadas pelas zonas de cisalhamento de grande escala (Zona de cisalhamento Patos e Pernambuco): a subprovíncia Norte (Sentrional), subprovíncia Central (Transversal) e a subprovíncia Sul (Meridional) (SANTOS, E. et al., 2004) (Figura 11b). A Bacia do Araripe foco da área de estudo está localizada no Domínio Transversal da PB, entre a Zona de Cisalhamento Patos (limite norte) e Pernambuco (limite sul). Essa bacia apresenta rochas do seu embasamento pertencentes a porção oeste da subprovíncia Central e sudoeste do domínio Norte.

2.2 BACIA DO ARARIPE

A Bacia do Araripe é uma bacia interior localizada no Nordeste do Brasil, seus domínios se estendem sobre os estados do Ceará, Piauí, Paraíba e Pernambuco. A bacia é considerada poligenética, possui forma alongada, com o maior eixo na direção E-W, e uma área aproximada de 9.000 km² (ASSINE, 1992). Esta bacia apresenta uma história geológica complexa e um empilhamento estratigráfico implantado sobre terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da PB, a sul da Zona de Cisalhamento Patos (PONTE, 1991, 1993; BRITO NEVES et al., 2000; ASSINE, 2007) (Figura 13).

Figura 11 - (a) Reconstrução *pré-drift* entre América do Sul e a África, mostrando o cinturão Andino, os Crátons Arqueanos/Proterozoicos e as Províncias brasileiras/Pan-africanas do Gondwana ocidental. BP - Província da Borborema. (b) Esboço mostrando a divisão da Província Borborema nas subprovíncias Norte (NS - Domínio Norte), Central (CS - Zona Transversal), e Sul (SS domínio Sul). Sistemas de zona de cisalhamento: PASZ, Patos; EPSZ, leste de Pernambuco; WPSZ, Oeste de Pernambuco.



Fonte: Modificada de Neves (2015).

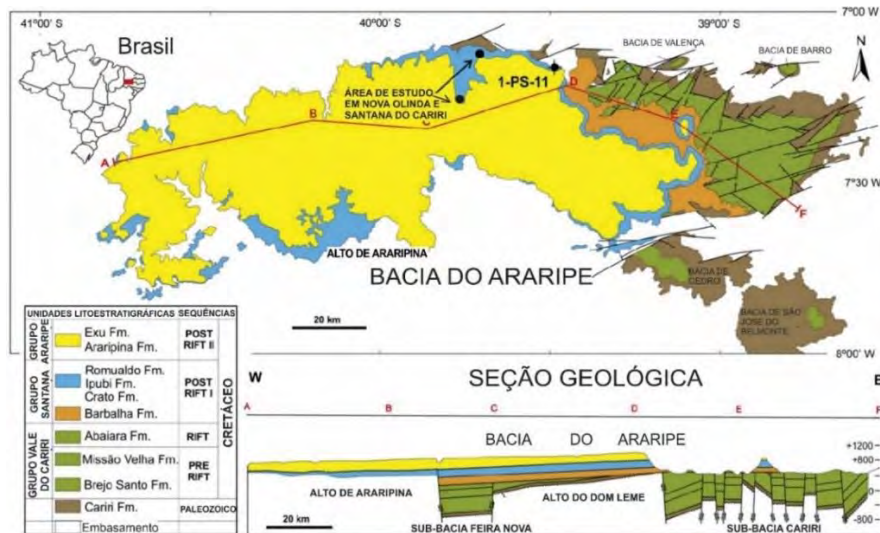
A bacia faz parte de um conjunto de pequenas bacias interiores do Nordeste, como as bacias Potiguar, Parnaíba e Tucano-Jatobá, que são fortemente controladas pelas estruturas do embasamento pré-cambriano/paleozoico, reativadas ao longo do Fanerozoico, em especial durante os eventos tafrogênicos do Cretáceo Inferior (Reativação Wealdiana de ALMEIDA, 1967). A Formação das bacias interiores teve início entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior, como consequência da separação e fragmentação do supercontinente Gondwana (MATOS, 1992).

De acordo com Matos (1992) as bacias interiores do Nordeste brasileiro foram geradas pela reativação de pequenos segmentos durante o Cretáceo Inferior da Zona de Cisalhamento Patos, causada por uma distensão na direção NW-SE, que inverteu as falhas originalmente transpressionais para falhas normais. No entanto, novas propostas têm sido feitas em relação a possibilidade de sua evolução. Segundo Miranda et al (2014) e Miranda (2015) a bacia do Araripe teve uma fase tectônica responsável pela formação dos depósitos paleozoicos relacionado a um regime do tipo pull-apart, que pode ter sobreposto, ou não, a fase de sinéclese. Já segundo Marques et al (2014) a bacia teria passado por um processo de inversão tectônica, evidenciado pela formação da chapada do Araripe que representa um relevo positivo regional, durante o Cenozoico. Peaulvast & Bétard (2015) sugeriram que a formação da chapada está associada a um processo de arqueamento regional e denudação periférica dos domínios da bacia.

2.2.1 Formação Crato

A Formação Crato é composta por calcários laminados micríticos de idade Aptiano-Albiano (COIMBRA et al., 2002), com espessuras que variam de 20 até 70 m (ASSINE et al., 2014). Esta unidade representa a segunda fase do sistema flúvio-lacustre da supersequência Pós-Rifte I da Bacia do Araripe (ASSINE, 2007) (Figura 13 e 14).

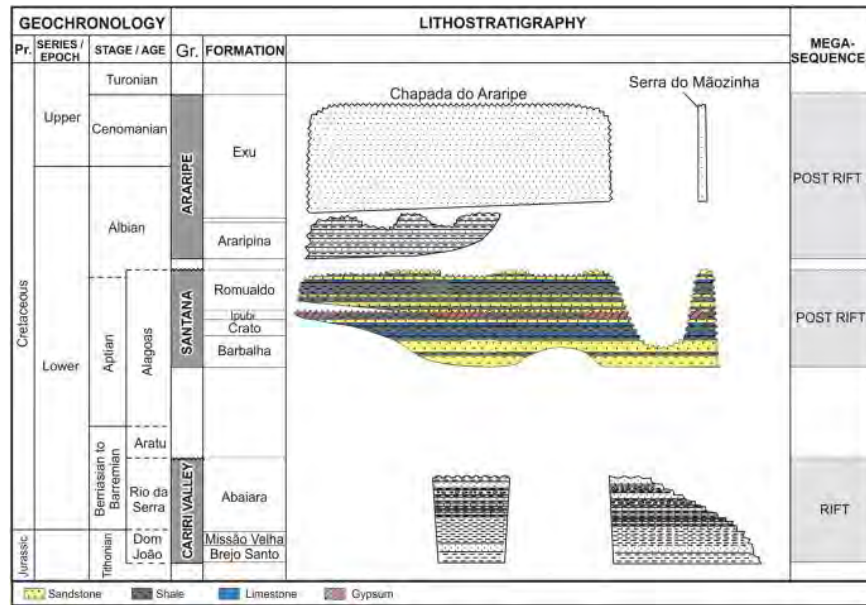
Figura 13. Mapa Geológico da Bacia do Araripe com a localização da área de estudo. O poço estratigráfico 1-PS-11, utilizado com referência para a litoestratigrafia, está localizado a leste da cidade de Nova Olinda. Abaixo, seção geológica regional A–F. A área em azul representa a extensão regional do Grupo Santana, que contém os calcários laminados da Formação Crato.



Fonte: Modificada de Assine (2007).

De acordo com Assine et al. (2014), o ambiente deposicional dessa formação é interpretado como ambiente costeiro subaquoso, apresentando conteúdo fossilífero rico em ostracodes e troncos de madeira carbonizados. A formação foi dividida de acordo com Neumann (1999) em seis intervalos de calcários laminados, denominados de C1 a C6. Os níveis de calcário são intercalados por arenitos, siltitos e folhelhos carbonáticos e margas, e tornam-se mais espessos e extensos em área, da base para o topo da sequência (NEUMANN, 1999; SILVA et al., 2002; SILVA & NEUMANN, 2002). E é sobreposta pelas formações Ipubi, composta por folhelhos negros calcíferos, e camadas de evaporitos (gipsita e anidrita), depositada sobre discordância que marca o topo da Formação Crato na região de borda da bacia (ASSINE et al., 2014; FABIN et al., 2018) (Figura 15).

Figura 14. Carta litoestratigráfica da Bacia do Araripe, em destaque o Grupo Santana e as Formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo.



Fonte: Custódio et al (2017).

O intervalo C6 objeto de estudo do presente trabalho foi identificado a partir de afloramentos e registros de subsuperfície em testemunhos do poço estratigráfico PS-11 (Figura 13), localizados na região de Nova Olinda-CE (NEUMANN, 1999). Esta unidade apresenta a mais extensa deposição de sedimentação carbonática da sequência Aptiana-Albiana. Os depósitos desta unidade podem alcançar cerca de 20 m de espessura e centenas de metros de extensão. Os calcários do nível C6 são caracterizados pelo termo laminado, segundo Neumann (1999) levando em consideração aspectos da geologia regional e outras propriedades. Terra et al. (2010) propôs o termo laminitos para a classificação das rochas carbonáticas das bacias sedimentares brasileiras, correlatas aos calcários laminados da Bacia do Araripe.

Neumann (1999) e Silva et al. (2002), definiram seis microfácies para os laminitos da Formação Crato;

- Sm1 – caracterizada por lâminas centimétricas, planas ou plano onduladas, com presença de pequenas concreções;
- Sm2 – Caracterizada por lâminas, planas ou plano-onduladas, com ocorrência de *loop beddings*;
- Sm3 – Representada por calcarenitos peloidais com esteiras algáticas;
- Sm4 – Diferenciada pela ocorrência de lâminas onduladas e plano-onduladas e pela presença de *slumps*;
- Sm5 – Caracterizada por lâminas centimétricas, planas ou plano-ondulada, com presença de concreções, convoluções e microfalhas;

- Sm6 – Caracterizada por lâminas centimétricas, planas e plano-onduladas, com microfósseis e ostracodes.

Posteriormente, Catto (2015) e Catto et al. (2016), estudaram os laminitos, incluindo amostras do poço 1-PS-11-CE, e propuseram quatro microfácies: nodular, drusiforme, laminar e rítmica.

Figura 15 - Exposições de um corpo de calcários laminados que fazem parte da Formação Crato, região de Nova Olinda, CE. A) Nível de calcários laminados, B) sucessão de camadas de calcário, margas e argilitos calcíferos que ocorrem intercalados com os corpos de laminitos.



Fonte: A autora (2019).

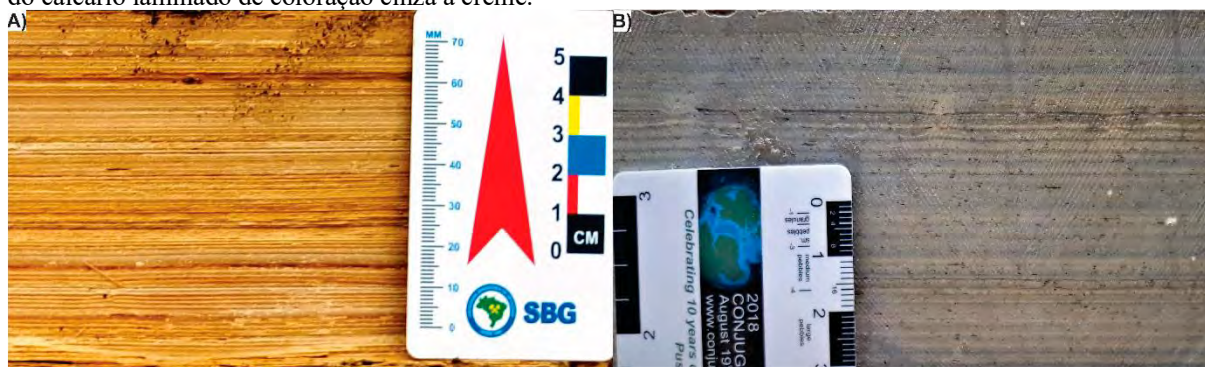
Os calcários laminados do nível C6 da Formação Crato são compostos por calcita micrítica de baixo a médio teor de magnésio, com litofácies rítmicas. De modo geral, os depósitos de laminitos em exposições nas minerações variam de coloração cinza e bege acinzentado na porção basal, e na porção superior bege, creme a amarelada, ou esbranquiçada (NEUMANN, 1999). Essa variação, segundo Neumann (1999), e Miranda (2015), estaria possivelmente relacionada a ação diagenética tardia, ligada a circulação de água meteórica nos calcários devido a exposição dos depósitos.

Todavia, estudos realizados por Osés et al. (2016, 2017) propuseram que a variação de coloração pode estar relacionada a origem deposicional, quantidade de material siliciclástico e orgânico. Com base na análise da preservação de peixes fósseis que ocorrem nos estratos basais e mais superiores do nível C6 estes concluíram que os laminitos de coloração cinza apresentaram uma maior taxa de sedimentação que os laminitos de coloração amarela. Desta

forma, o estado de preservação dos fósseis poderia estar relacionado às condições de eodiagenese (OSÉS et al., 2017). A taxa de sedimentação estaria diretamente ligada ao clima que dominava a região, e que variavam de úmido a árido. Durante períodos de clima úmido as taxas de sedimentação eram maiores o que contribuiu para a formação de querogênio, o que resultou na coloração cinza escuro. Durante os períodos de clima árido, as taxas eram menores, o que resultou na oxidação da pirita depositada em condições de anoxia, o que resultou em cores mais claras (bege - amarelado).

Alencar (2018) afirmou que os calcários laminados de coloração creme a bege são finamente laminados (0,5 mm), e são compostos por lâminas de calcita microcristalina intercaladas por poucas lâminas de coloração escura, que contem matéria orgânica amorfa e poucos minerais de argila. Lâminas de coloração amarelada estão relacionadas a oxidação da pirita e em menor quantidade matéria orgânica (Figura 16). Os calcários laminados de coloração cinza apresentam lâminas que variam de 1 a 3 mm, e são compostos por lâminas de calcita microcristalina, por vezes intercaladas com lâminas onduladas de coloração cinza escura ricas em pirita, e também com abundante conteúdo de matéria orgânica e argilominerais. Heimhofer et al. (2010) propôs que a variação na coloração das lâminas está relacionada à sua composição química, e que as lâminas mais claras apresentam baixas concentrações de Fe e S, enquanto as lâminas mais escuras apresentam altas concentrações destes elementos (Figura 17).

Figura 16 - Variação da coloração dos calcários laminados da Formação Crato – Nível C6, observada nos afloramentos. A) Lâminas do calcário laminado de coloração bege a creme amarelado. B) Lâminas do calcário laminado de coloração cinza a creme.



Fonte: A autora (2020).

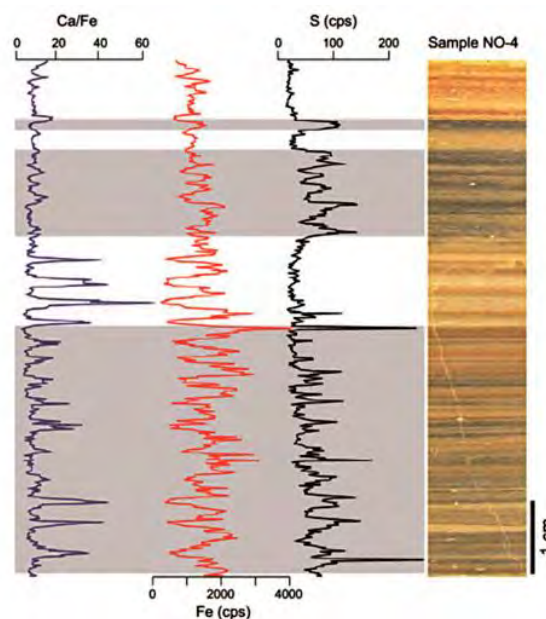
No topo do nível C6, ocorre intensa ação de carstificação e formação de halos de alteração devido ação de água meteórica que percolou através de planos de falhas, fraturas e veios, produzindo uma coloração amarelada a laranja nos depósitos calcários (MIRANDA, 2015; MCKINNON, 2017). Eventualmente, o efeito desta alteração recente pode gerar

confusão com relação a variação faciológica refletida na cor como foi demonstrado por Osés et al (2017).

Estudos realizados por Miranda et al. (2012) e Santos et al. (2015) nos calcários da Formação Crato propuseram que diversos eventos deposicionais e diagenéticos, causaram uma variada quantidade de estruturas rúpteis pós-deposicionais, e de heterogeneidades diagenéticas (NEUMANN, 1999; MIRANDA et al., 2012; CATTO et al., 2016) e diagenéticas. A análise dessas heterogeneidades e estruturas de pequena escala, possuem uma grande importância na caracterização de rochas reservatório, para a modelagem de sua qualidade, e do efeito destas feições sobre o fluxo de fluídos e processo de recuperação e exploração (GALE et al., 2014, FITCH et al., 2015).

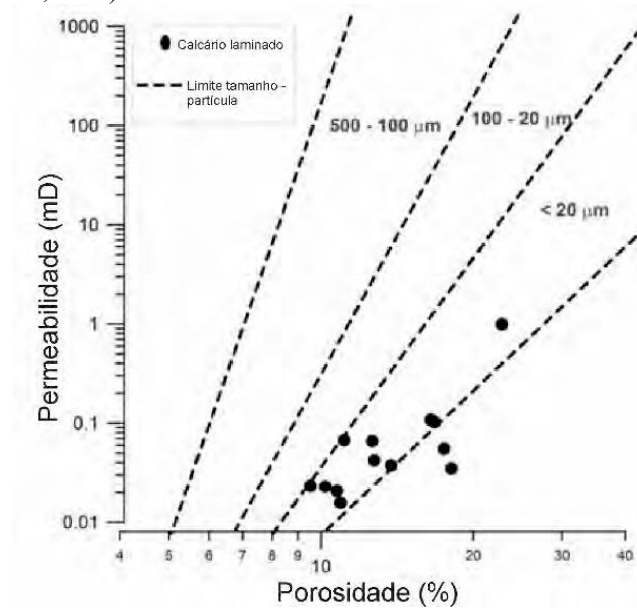
A Formação Crato apresenta uma porosidade que varia de 4 a 22%, com média de 12%, embora o aumento da porosidade está relacionado a exposição dos depósitos, e ação de água meteórica durante a telodiagênese. Os valores de permeabilidade variam de 0,0 a 0,09 mD, com média de 0,04 mD (MIRANDA et al., 2016, 2018). A matriz dos calcários laminados é composta predominantemente de calcita micrítica, com ocorrência de dolomita e sílica, e conforme análises existentes apresenta tamanho dos grãos predominantemente $< 20 \mu\text{m}$ (Figura 18).

Figura 17 - Análise de microfluorescência de raios-X em amostra de calcário laminado de uma Pedreira de Nova Olinda, CE. Os resultados nos gráficos apontam que as maiores contagens de Fe e S estão restritas às lâminas escuras.



Fonte: Heinhofer et al (2010).

Figura 18 - Gráfico de correlação de dados de porosidade versus permeabilidade (ar) dos calcários laminados da Formação Crato. Os dados foram comparados conforme a relação entre porosidade e tamanho de grãos constituintes da matriz (Lucia, 1995).



Fonte: Miranda et al (2016).

2.2.1.1 Estruturas de deformação sin-deposicionais nos laminitos

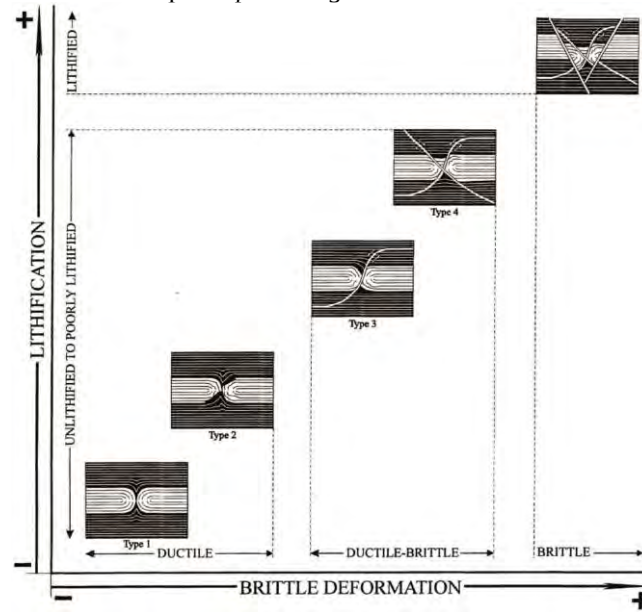
As estruturas sin-sedimentares encontradas de forma abundante nos laminitos da Formação Crato, podem estar relacionadas a processos sin-tectônicos, com diferentes graus de energia, e constituem: *loop beddings*, lâminas convolutas, estruturas de escape de fluido e falhas de pequeno rejeito (*shear fractures*) (ALENCAR, 2018).

- Os *loops beddings* representam estruturas sin-sedimentares formadas pela constrição e rompimento de um grupo de laminação, encontrados geralmente em rochas laminadas de origem lacustre. Essas estruturas são formadas em sedimentos com nenhum ou baixo grau de litificação. De acordo com Calvo et al (1998), os *loop beddings* podem ser classificados segundo o grau de litificação das lamina quando ocorreu o evento deformacional (Figura 19 e 20 A e B), em quatro tipos: 1- formados a partir da deformação dúctil, com preservação das lâminas rompidas, sugerindo nenhum grau de litificação da rocha; 2- formado a partir da deformação dúctil-rúptil, com degradação do *neck* (com o eventual rompimento das lâminas), sugerindo um leve grau de litificação; e, 3 e 4- considerados *loop beddings* complexos com formação de microfalhas na região de rompimento, indicativo de deformação rúptil, sugerindo um nível maior de litificação.

O efeito de sismos de baixa magnitude em sedimentos de fundo de lagos foi interpretado como a principal causa da formação de estruturas como os *loop beddings*, e diversas estruturas associadas (RODRIGUEZ-PASCUA et al., 2000, CALVO et al., 1998).

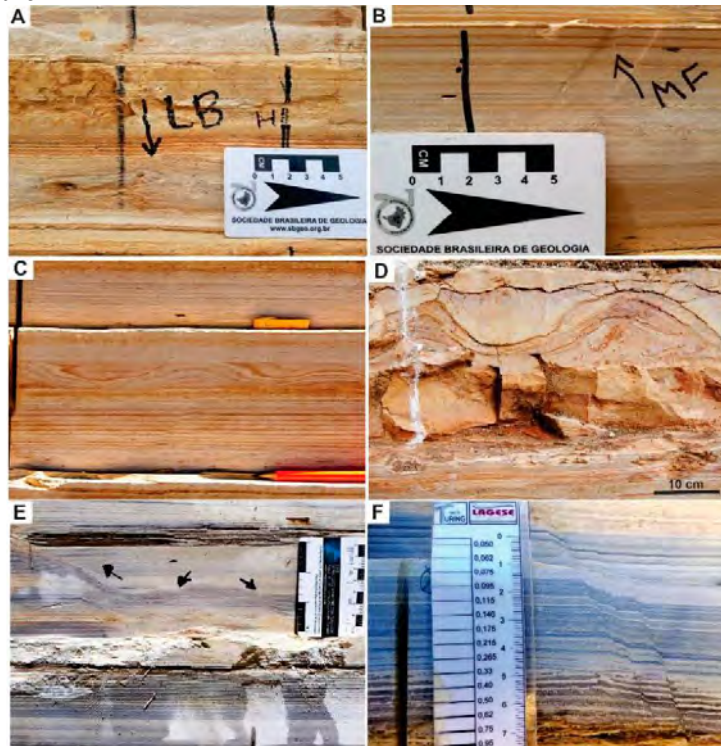
- As lâminas convolutas são estruturas sin-sedimentares formadas pelo movimento de fluxo de massa e/ ou atividades sísmicas, e se formam quando os sedimentos ainda não estão consolidados. Através do deslizamento de parte da matriz de sedimentos devido a força da gravidade, os planos da estratificação assumem formas contorcidas que se assemelham a dobramentos (NEUWERTH et al., 2006; TOPAL & OZKUL, 2014, SANTOS et al., 2017) (Figura 20 C).
- As estruturas de escape de fluido se formam a partir da injeção de material inconsolidado devido a processos de fluidização local (OWEN, 1996; NEUWERTH et al., 2006). A geração desse tipo particular de feição geralmente é acompanhada pela formação de uma "cauda" alongada que a diferencia de uma estrutura em chama (NEUWERTH et al., 2006) (Figura 20 D).
- As *shear fractures* (fraturas de cisalhamento) apresentam caráter dúctil-rúptil cuja natureza está ligada a indução de comportamento coesivo quando a pressão de poro não é suficiente para liquefazer os sedimentos, e se forma quando os sedimentos se encontram inconsolidados ou parcialmente consolidados (NEUWERTH et al., 2006; TOPAL & OZKUL, 2014). A condição plástica dos sedimentos pode gerar a instalação de falhas normais e reversas, de acordo com o grau de compactação diferencial e instabilidade local, que a rocha inconsolidada apresenta (NEUWERTH et al., 2006). Segundo Miranda (2015) as falhas presentes na Formação Crato foram geradas na fase eo-diagenéticas e apresentam rejeito de escala milimétrica a centimétrica ao longo do plano de falha, e são caracterizadas por regime dúctil (Figura 20 E e F). Os planos das fraturas cisalhantes podem apresentar-se em pares conjugados.
- As *breccia pipes* (MARTILL, 2008), formadas pela injeção de água/fluídos quando os laminitos ainda estavam inconsolidados aponta, juntamente com a presença de sismitos, para a forte influência de sismos durante a deposição e estágios iniciais de diagênese dos laminitos (Figura 21).

Figura 19 - Diagrama esquemático mostrando a relação do grau de litificação com processos de deformação que influenciam a morfologia de estruturas do tipo *loop beddings*.



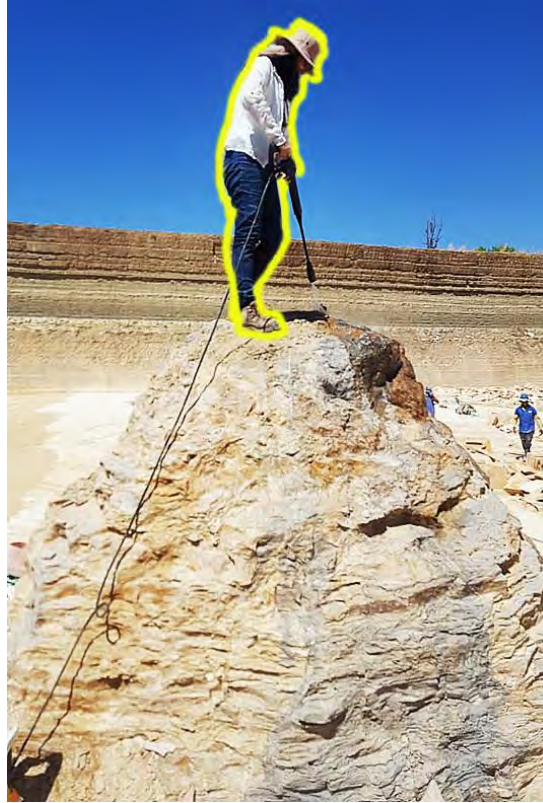
Fonte: Calvo et al (1998).

Figura 20- Estrutura sin-deposicionais que ocorrem nos laminitos da Formação Crato. A) *Loop beddings*, B) Convolução, C) Estrutura de escape de fluido, D) Microfalha e deslocamento das lâminas, E) *Shear fracture*. F) Detalhe da *shear fracture*.



Fonte: A autora (2020).

Figura 21 – Estrutura *breccia piper* da Formação Crato formada pela injeção de água/fluido nos calcários laminados quando ainda não estavam consolidados, ocasionado por eventos de sismos.



Fonte: A autora (2020).

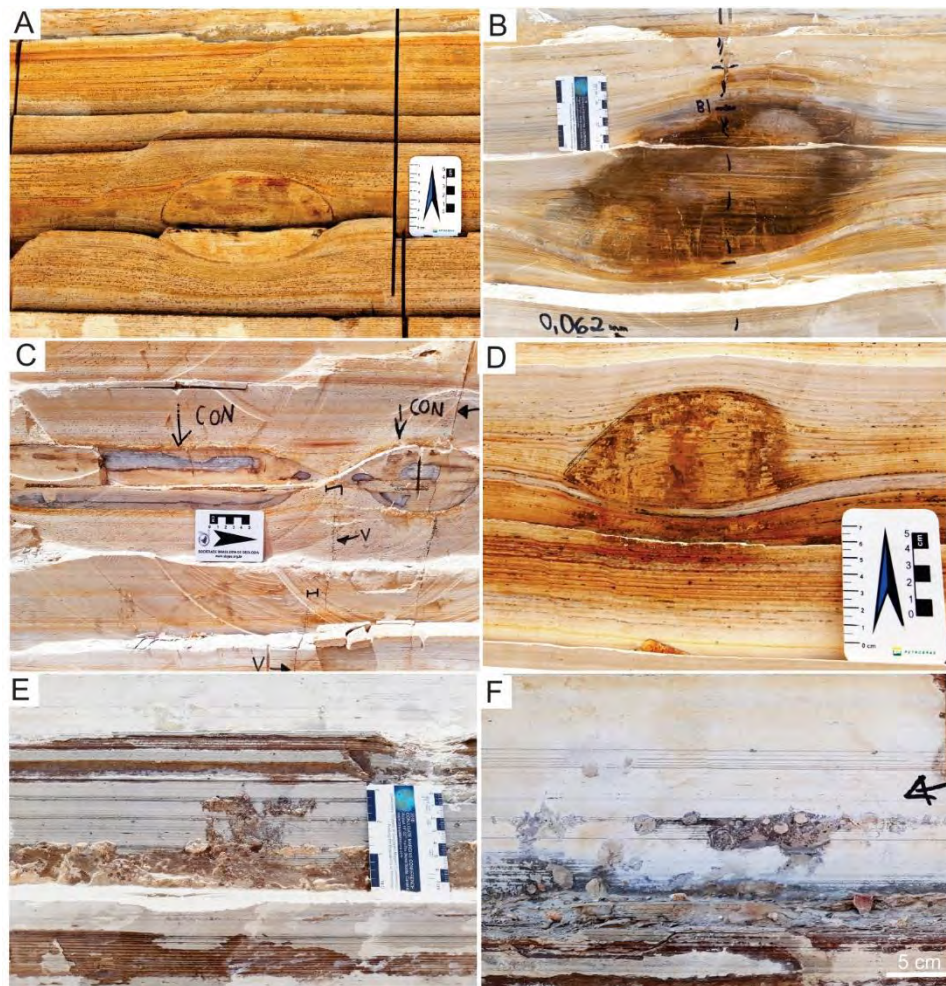
2.2.1.2 Heterogeneidades de origem diagenética nos laminitos

Várias feições diagenéticas que produzem heterogeneidades físicas ocorrem de forma abundante nos calcários laminados do nível C6, conforme descrito abaixo:

As concreções calcárias que ocorrem nos laminitos foram principalmente formadas devido a cimentação precoce da matriz micrítica, durante os primeiros estágios de soterramento (ALENCAR, 2018). Estas apresentam quatro configurações: ovóides, sub-esféricas, oval-alongadas e irregulares (SARAIVA et al., 2007) (Figura 22 A, B, C e D). Essas estruturas sedimentares podem guardar o registro da natureza geoquímica dos fluidos dos poros nos estágios de eo-diagênese e registro de atividade biogênica, fornecendo conseqüentemente informações importantes sobre a precipitação de cimento (carbonato ou sílica) precoce nos poros da rocha hospedeira (HEIMHOFER et al., 2017). Segundo Raiswell & Risher (2010) e Marshall & Pirrie, (2013) as concreções que ocorrem nos laminitos podem ser classificadas em tipo A eo-diagenéticos (antes da compactação), onde há deformação nas lâminas que envolvem as concreções (Figura 22 A), e tipo C, formadas durante a diagênese profunda, após a compactação dos depósitos, sem deformação das lâminas. Em rochas laminadas as concreções podem fornecer informações sobre a taxa de compactação, através da análise de deformação das lâminas. É possível inferir o efeito progressivo de redução do volume da rocha (LASH &

BLOOD, 2004) com base na morfologia preservada pela cimentação precoce das concreções. Devido ao seu alto grau de cimentação as concreções são consideradas zonas de maior resistência mecânica e barreiras de fluxo de fluidos em reservatórios (MARSHALL & PIRRIE, 2013). Nos laminitos da Formação Crato também ocorre em alguns níveis, concentrações de pirita (ALENCAR, 2018) (Figura 22 E e F) formados devido a condições de anoxia e elevada salinidade.

Figura 22 - Estrutura diagenéticas e heterogeniedades nos laminitos. A) Concreção ovóide, B) Concreção sub-esférica, C) Concreção oval-alongada, D) Concreção irregular, E) Concentrações de Pirita e F) Pseudomorfos de pirita.



Fonte: A autora (2020).

2.2.1.3 Estruturas rúpteis pós-deposicionais nos laminitos

As estruturas rúpteis pós-deposicionais que ocorrem nos calcários laminados do intervalo C6 são descritas abaixo:

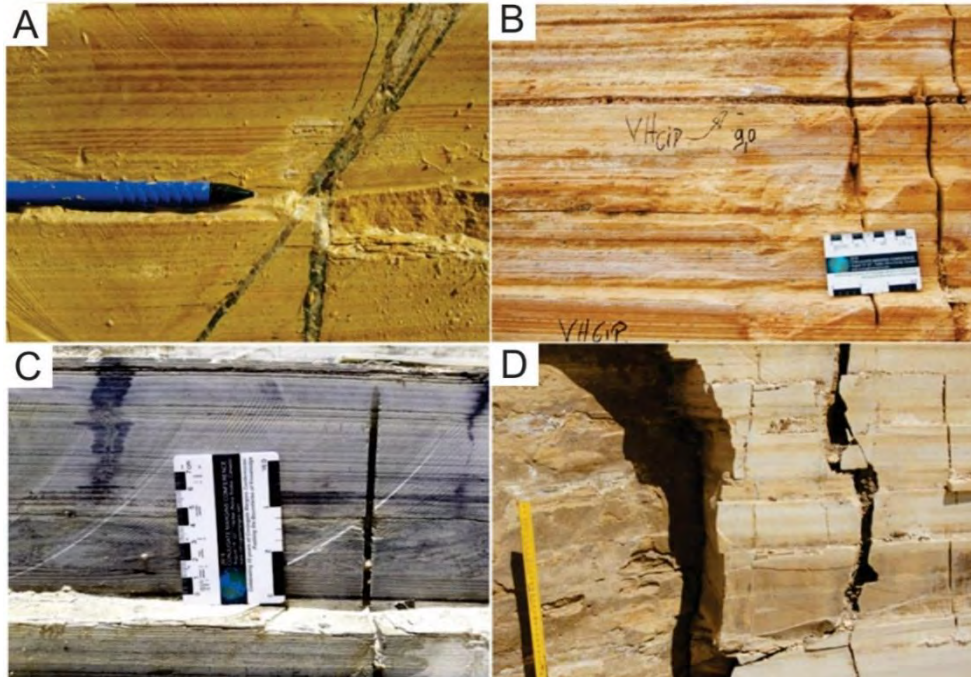
- Veios horizontais e verticais - são formados a partir do preenchimento de fraturas de extensão por gipsita ou calcita (MIRANDA, 2015). Os veios verticais preenchidos por

calcita espática, são classificados segundo Ramsay & Huber (1987) como sintaxiais, e indicam que o preenchimento desses veios ocorreu em subsuperfície, simultaneamente ao desenvolvimento da fratura (MIRANDA, 2015) (Figura 23A). Já os veios horizontais ocorrem paralelos à laminação, a qual apresenta mergulho suave entre 1 e 6° para ESE (MIRANDA, 2015; MCKINNON, 2017). Conforme (ALENCAR, 2018), os veios foram formados durante a meso-diagênese, quando os laminitos apresentavam relativo grau de litificação (Figura 23B).

- Os estilólitos são formados pelo processo de dissolução por pressão na rocha hospedeira. Nos laminitos do intervalo C6 os estilólitos apresentam dimensões de poucos centímetros (ALENCAR, 2018), e possuem orientação vertical a sub-vertical em relação à laminação. Os planos estilolíticos apresentam direção preferencial N50E a N60E (Figura 23 C). Conforme Alencar (2018), os estilólitos podem ter sido gerados por eventos de sismicidade que criaram o aumento de pressão de poro local, controlada pela baixa permeabilidade dos laminitos e a existência de barreiras de fluxo, durante a transição da eo-diagênese para a meso-diagênese.
- As juntas com abertura milimétrica a centimétrica se formaram em estágio tardio (Figura 23 D), influenciado pelo processo de erosão e soerguimento dos depósitos de calcário nas regiões de borda da Chapada do Araripe. Essas juntas se apresentam em alguns locais parcialmente preenchidas por calcita e gipsita formada pela percolação de água de fluídos meteóricos (ALENCAR, 2018).
- Os *vugs* apresentam diâmetros maiores que 1 mm, não apresentam relação com a textura da rocha, sua formação está ligada a dissolução de níveis estratigráficos isolados. Lucia (1995) criou uma classificação para o espaço poroso vugular conforme descrito: *vugs* separados - fábrica dominada por grãos (poros móldicos, poros formados composicionais móldicos, poros intrafossilíferos e microporosidade intragranular) e fábrica dominada por material na fração argila (poros móldicos, poros intrafossilíferos e poros esqueléticos); e *vugs* conectados - fábrica dominada por grãos e por material na fração argila (cavernas, brechas, fraturas, dissolução ampliando fraturas e fenestral) (Figura 24). Esta classificação tem como base a caracterização das propriedades petrofísicas, e não a gênese, e inclui porosidade de fratura como um tipo de poro, independentemente de sua origem. As estruturas do tipo *vug* em reservatórios carbonáticos aumentam a capacidade de armazenamento de óleo e gás, e podem aumentar consideravelmente a permeabilidade de sistemas de poros interpartículas. A porosidade vugular de fratura é classificada como *vugs*-conectados apresenta importante

contribuição para o fluxo de fluido de reservatórios carbonáticos e, portanto, devem ser incluídos em qualquer classificação petrofísica do espaço poroso (LUCIA, 1995).

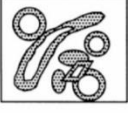
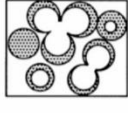
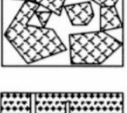
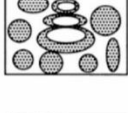
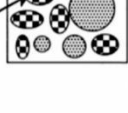
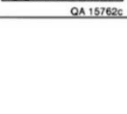
Figura 23 - Estruturas rúpteis pós-deposicionais nos laminitos. A) Veio vertical de calcita, B) Veio horizontal de gipsita, C) Estilólitos e D) Juntas de extensão.



Fonte: A autora (2020).

Segundo Miranda (2015) as rochas da Formação Crato, teriam sofrido a influência de um único regime de caráter extensional (WNW-ENE), que teria gerado falhas normais de pequeno rejeito (*shear fractures*- fraturas de cisalhamento). O autor sugere ainda que, as falhas normais, são responsáveis por zonas locais de compressão, gerando assim os estilólitos nos laminitos. Estruturas como veios e juntas verticais poderiam representar estruturas tardias que cortam as fraturas de cisalhamento, e ainda que veios horizontais de gipsita e calcita, foram gerados pelo alívio de pressão pela exumação da Formação Crato (MIRANDA, 2015). De acordo com Miranda (2015) a interação entre estruturas mais antigas como veios e fraturas de cisalhamento, com as juntas, deram a origem ao processo de carstificação, formando estruturas milimétricas a centimétricas denominadas de *vugs* e cavernas.

Figura 24 - Classificação geológica e petrofísica do espaço poroso vugar baseado na interconecção do vugs. O volume da separação do espaço poroso vugar é importante.

VUGGY PORE SPACE			
	SEPARATE-VUG PORES (VUG-TO-MATRIX-TO-VUG CONNECTION)		TOUCHING-VUG PORES (VUG-TO-VUG CONNECTION)
	GRAIN-DOMINATED FABRIC	MUD-DOMINATED FABRIC	GRAIN- AND MUD-DOMINATED FABRICS
	EXAMPLE TYPES	EXAMPLE TYPES	EXAMPLE TYPES
PERCENT SEPARATE-VUG POROSITY	Moldic pores 	Moldic pores 	Cavernous 
	Composite moldic pores 	Intrafossil pores 	Breccia 
	Intrafossil pores 	Shelter pores 	Fractures 
	Intragranular microporosity 		Solution-enlarged fractures 
			Fenestral 

Fonte: Lucia (1995).

2.2.2 Análogos da Formação Crato – Formação Barra Velha, Bacia de Campos

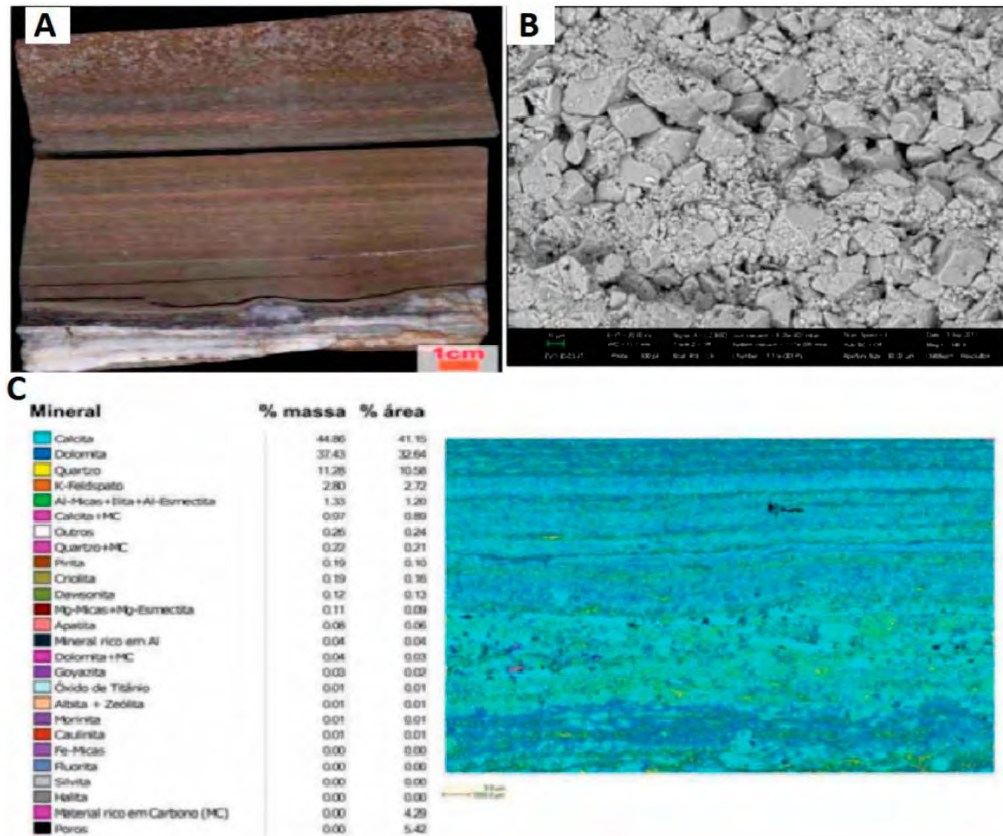
O grande desenvolvimento de estudos relacionados aos calcários da Formação Crato, está relacionada a sua importância como análogo a reservatórios formados por rochas com matriz compacta, de baixa permeabilidade, naturalmente fraturado (MIRANDA et al., 2018). Devido a estes fatores os laminitos foram considerados análogos de fácies da Formação Barra Velha, da Bacia de Santos por Terra et al. (2010), que compõem a sucessão de rochas do intervalo pré-sal.

A Formação Barra Velha corresponde a base da Fase Sin-rifte III na Bacia de Campos, e está dividida em duas sequências: rifte superior e sag (LEBRE, 2019). A porção inferior de idade Eoaptiano é composta por calcários microbiais, estromatólitos e laminitos nas porções proximais e folhelhos nas porções distais. A sucessão superior desta unidade, mais nova, foi depositada durante o Neoaptiano, que correspondente ao andar local Alagoas superior. O limite superior da Formação Barra Velha marca a transição da sequência sedimentar clástica/carbonática para um ambiente evaporítico. Esta sequência superior é composta predominantemente por calcários microbiais intercalados com folhelhos. Farias (2018) demonstrou que os laminitos da Formação Barra Velha apresentam alternância de lâminas

claras e escuras, que respectivamente, tendem a ser compostas por calcita ou Mg-calcita microcristalina, dolomita/ Ca-dolomita microcristalina (eventualmente Mg-filossilicatos ricos em Mg e Si) e matéria orgânica. Os laminitos apresentam intercalações de lâminas milimétricas que podem ser plano-paralelas ou com crenulação incipiente. As lâminas individuais são compostas por dolomita planar romboédrica com tamanho cristalino muito fino a fino ($<50\ \mu\text{m}$) e por agregados microcristalinos esféricos a subesféricos de Mg-calcita ou Ca-dolomita com dimensões entre 50 e 100 μm . Petrograficamente os laminitos são compostos por grãos de quartzo, feldspatos e micas, com tamanho silte, geralmente dispersos. Partículas como ostracodes e bioclastos fosfáticos, a maioria proveniente de fragmentos de peixes, são comuns. Estes laminitos podem ser ricos em estruturas tipicamente orgânicas, tais como numerosos filamentos alongados mineralizados por dolomita e magnesita, ou parcialmente silicificados. Geralmente os laminitos apresentam um sistema poroso tipo fenestral, com predominância de micro e mesoporos alargados ou não por dissolução e/ou degradação da matéria orgânica, muitas vezes gerando uma estrutura porosa "favo de mel", e tendem a ser mais alongado e mais orientado na direção horizontal do que na vertical. As principais modificações diagenéticas são a substituição/cimentação por dolomita e por calcedônia, quartzo microcristalino e quartzo macro cristalino. Os laminitos em geral são caracterizados por um processo de silicificação precoce (sin-deposicional ou na diagênese muito rasa em ambiente freático) na forma de um agregado de microcristais de quartzo e pela substituição de constituintes carbonáticos microcristalinos (FARIAS, 2018) (Figura 25).

De acordo com Farias (2018), os aspectos sedimentológicos e diagenéticos dos laminitos da Formação Barra Velha, sugerem que a presença de laminações milimétricas a dessimétricas de calcita e dolomita, com possíveis vestígios de filamentos microbianos (EPS) pontualmente intercalados a sedimentos calcíticos crostiformes, com predomínio de matéria orgânica amorfa/membrana e baixo teor de COT em análise da matéria orgânica, sugere que sua deposição ocorreu em períodos de leve estratificação de um lago holomítico raso evaporativo.

Figura 25 – Laminito da Formação Barra Velha. A) Amostra obtida do testemunho de poço perfurado na Bacia de Santos. B) Imagem de MEV de amostra de laminito da Formação Barra Velha, coletada a partir de testemunho de poço da Bacia de Santos (Farias, 2018). Observa-se a organização horizontal dos cristais de calcita e dolomita que conferem continuidade lateral as lâminas. A porosidade intercrystal é maior em algumas lâminas. C) Imagem com mapeamento de minerais em lâmina (QEMSCAN), em amostra de laminito da Formação Barra Velha, Bacia de Santos (Farias, 2018). Observa-se a predominância de calcita, dolomita e quartzo. Conforme observado em imagem de MEV, a porosidade está associada a existência de microporos.

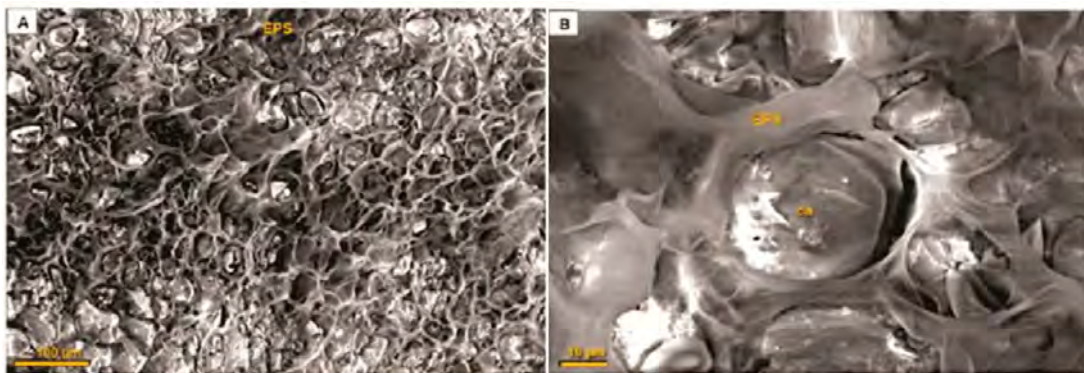


Fonte: modificado de Farias (2018).

Devido à grande correlação com a Formação Barra Velha, a estudo sedimentológico e diagenético dos calcários laminados da Bacia do Araripe é de grande importância para o entendimento dos reservatórios carbonáticos das bacias marginais do sudeste brasileiro, a discussão sobre sua gênese tem sido bastante debatida. Os primeiros estudos relacionados a origem dos calcários laminados da Formação Crato, sugere uma gênese relacionada a precipitação química, ligada a taxa de evaporação e redução do aporte de água do no corpo lacustre, causando assim, a deposição da mesma (NEUMANN, 1999). Outra hipótese, sugere a formação dos laminitos por precipitação de calcita autigênica, proveniente da porção superior da coluna de água do sistema lacustre. Essa precipitação teria sido induzida pela atividade de algas e bactérias (HEIMHOFER, 2010). Catto (2015) no entanto, observou impressões microscópicas de substância polimérica extracelular (EPS), que está ligada a atuação de

bactérias filamentosas, cocóides e cianobactérias, e propôs que a gênese desses calcários laminados envolvera precipitação bioinduzida de carbonato de cálcio. Em relação a influência de microrganismos Warren et al (2017), descreveu a presença de estruturas dômicas de baixo relevo formadas por laminações, bem como a presença de microestruturas filamentosas e de natureza colonial que indicam a ação de microrganismos durante a deposição dos laminitos. Os autores concluíram que ao menos em alguns níveis, a ação de microrganismos foi importante para a formação de estruturas e a produção de carbonato (Figura 26).

Figura 26 - Micrografia obtida por MEV de amostra de calcário laminado da Formação Crato: A) Aspecto alveolar e cristais esféricos de calcita na matriz carbonática, pode ser relacionada a preservação de tecido EPS, podendo ser gerados por colônias microbiais; e B) detalhe da matriz EPS preservada na matriz carbonática.



Fonte: Catto (2015).

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos no presente estudo estão detalhados a seguir.

3.1 DETALHE DA ÁREA DE LEVANTAMENTO DOS PAINÉIS NAS MINERAÇÕES DE CALCÁRIO LAMINADO

As principais áreas de coletas das informações foram concentradas nas minerações de calcário laminado (Mineração Idemar e Willian - localmente conhecida como Mineração Três Irmãos) localizadas entre as cidades de Santana do Cariri e Nova Olinda. A Figura 27 mostra um bloco diagrama com a configuração geomorfológica e estratigráfica da área de estudo localizada no mapa da Figura 13. É importante denotar que por se tratar da seção pós-rifte, os estratos apresentam de forma geral uma inclinação suave da borda da bacia para o seu interior. Conforme destacado, nesta região as unidades da fase pós-rifte estão posicionadas sobre os arenitos da Formação Cariri. O diagrama demonstra como as formações ocorrem de forma horizontalizada controlada pela topografia. As minerações de calcário, por exemplo, ocorrem em um intervalo de cotas específicas na escarpa da chapada (Figura 27). Na mineração Idemar foi executado o painel vertical 1 e os pseudo-poços 1 e 2, com cerca de 4,0 m de altura, e na mineração William foi executado o painel 2, o pseudo-poço 3 e o perfil 1, com cerca de 5,0 m de altura.

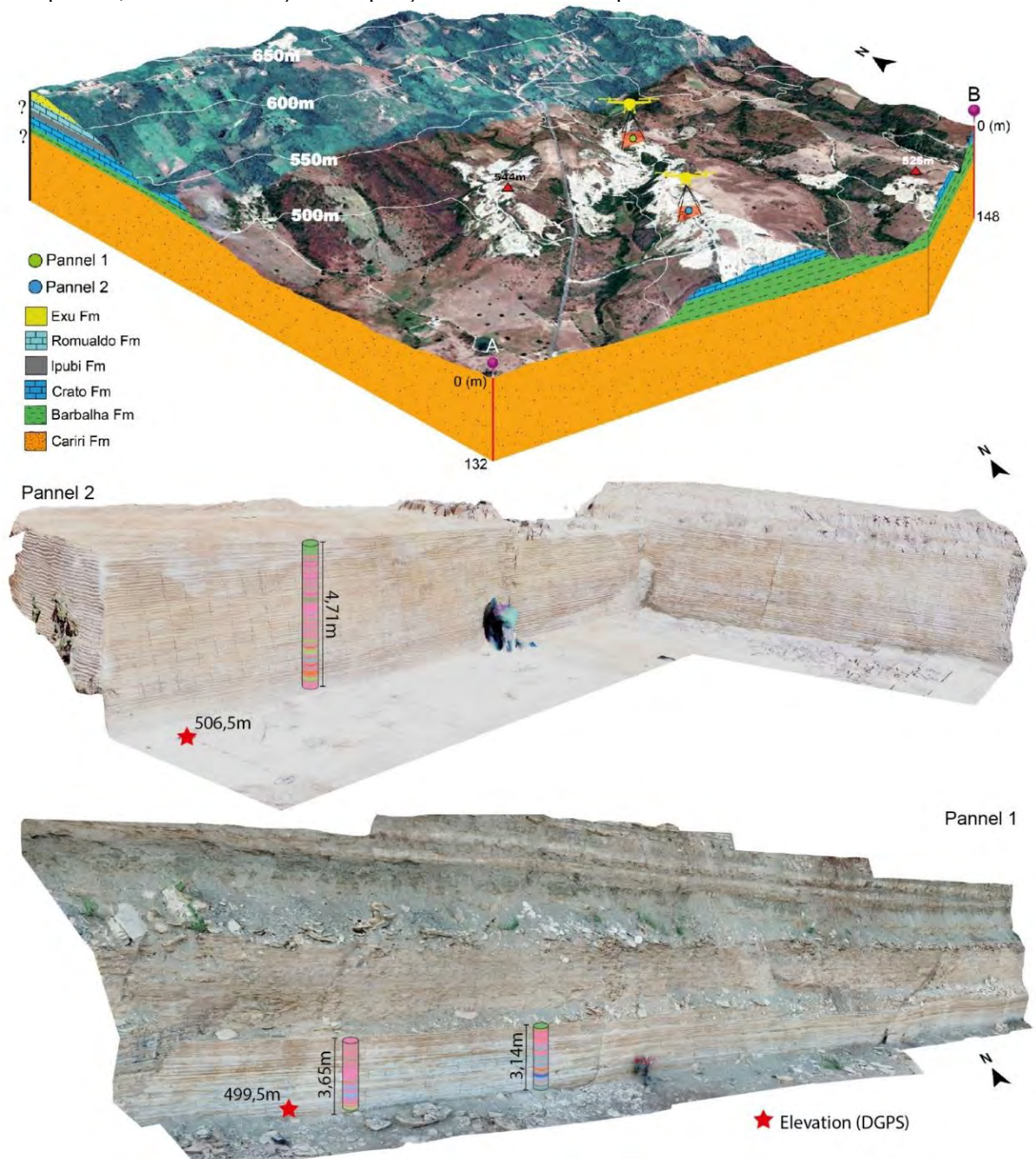
Os painéis 1 e 2, e os pseudo-poços a eles relacionados, se encontram afastados cerca de 1 km (Figura 28), e a diferença topográfica entre a base dos dois painéis é de cerca de 7 m (Figura 27). O topo da chapada apresenta um mergulho suave para oeste. De acordo com Miranda et al (2018), o acamamento dos calcários laminados apresenta um mergulho suave de 2 a 6° para ESE. Desta forma, é possível considerar esta pesquisa como uma investigação realizada em um reservatório delgado, composto por um intervalo de calcários laminados de cerca de 10 a 15 m, com geometria tabular, capeado por rochas de composição fina, margas, arenitos e siltitos argilosos calcíferos, ainda do topo da Formação Crato, e por folhelhos e evaporitos da Formação Ipubi (Figura 29).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PETROFÁCIES

A definição de petrofácies para os depósitos do intervalo C6 incluiu a observação da variação macro litofaciológica dos lamintos nos três perfis de pseudo-poços, realizados sobre os painéis selecionados para o estudo. Na Mineração Idemar foram descritos dois perfis de pseudo-poços, Poço 1 e Poço 2, sobre o Painel 1. Este painel possui as seguintes dimensões 4 m de altura e 23,5 m de comprimento. Um perfil de pseudo-poço foi construído sobre um painel na Mineração William, Poço 3 do Painel 2. Este painel possui 5 m de altura, e 41,5 m de

comprimento. A descrição dos perfis foi baseada no aspecto sedimentológico dos laminitos, que apresentam granulação fina, e são formados predominantemente por lâminas plano-paralelas e localmente onduladas. Nas duas minerações, observou-se que a lavra expôs, em ambas as minas, sucessão de laminitos com intercalações de calcários margosos, folhelhos calcíferos e margas posicionadas acima do intervalo de laminitos. O intervalo de laminitos apresenta como litofácies principais laminitos de coloração cinza na base, com boa exposição na Mineração Idemar, cuja cota topográfica da base do painel 1 foi de 499,834 m. O painel elaborado na Mineração William (painel 2), cuja cota em sua base foi de 507,961 m, também apresenta sucessão de laminitos de coloração predominantemente cinza esverdeado na base, e laminitos de coloração creme a bege na porção média e superior da seção. Neste trabalho os calcários laminados foram separados em dois grupos de mudstone, os conjuntos de lâminas pertencentes às fácies de coloração bege a creme amarelado foram definidas como pertencentes ao grupo G1, enquanto os conjuntos de lâminas de coloração cinza esverdeado foram definidos como pertencentes ao grupo G2.

Figura 27 – Painéis e pseudo-poços executados nas minerações. Acima, bloco diagrama com a localização dos dois painéis nas minerações, posicionadas em elevações diferentes na escarpa da chapada. O diagrama foi construído com base em imagem de satélite, e dos perfis dos poços A e B, para a definição das unidades em subsuperfície, e com a informação da exposição das mesmas em superfície.



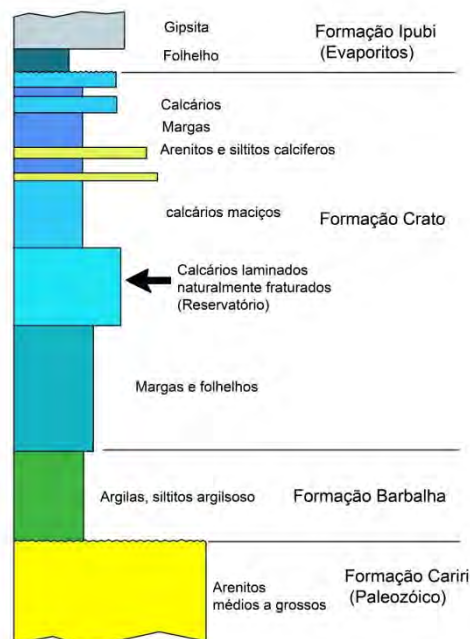
Fonte: A autora (2020).

Figura 28 – Imagem de satélite mostrando a região das minerações na escarpa norte da Chapada do Araripe, e a localização das minerações de calcário, entre as cotas de 500 e 600 m. A Formação Crato nesta região é caracterizada por um intervalo de calcário laminado intercalado com depósitos de margas, folhelhos, calcários maciços e siltitos calcíferos. Este horizonte foi tratado como um reservatório de comportamento tabular, com mergulho suave para ESE (seta verde), e capeado por rochas folhelhos e evaporitos da Formação Ipubi. A distância entre os painéis (1 e 2) e os pseudo-poços relacionados foi de aproximadamente 1,0 km (círculos amarelos).



Fonte: A autora (2020).

Figura 29 - Modelo (sem escala) da sucessão das unidades, e principais litofácies encontradas na área de estudo, com o posicionamento do intervalo reservatório (análogo), formado pelos calcários laminados naturalmente fraturados.



Fonte: A autora (2020).

Nas minerações o objetivo da exploração dos calcários se concentra na porção média e superior do intervalo de laminitos, porque este apresenta maior fissilidade e desta forma maior produtividade de placas para revestimento, o que representa o objetivo comercial da exploração. A base do intervalo apresenta menor fissilidade entre as laminações, maior rigidez, o que dificulta a produção de placas. Desta forma as exposições do intervalo de laminito nem sempre apresentam a base da sucessão. Esta foi melhor observada e analisada no Painel 1 do que no Painel 2. A execução de medidas de DGPS permitiu comprovar que o nível de laminitos formado nesta região de borda da bacia apresenta boa continuidade lateral, e apresenta cerca de 10 a 15 m de espessura. A espessura da Formação Crato neste local pode alcançar cerca de 25 m. A distância linear entre os dois painéis foi de cerca de 1,08 km, o que permitiu considerar as seções como poços próximos dentro do intervalo considerado como reservatório.

A definição de petrofácies considerou aspectos propostos por Óses et al. (2017), sobre a influência na variação de taxas de sedimentação e a influência desse aspecto na criação de condições de anoxia ou oxidação. Trabalhos anteriores trataram a relação de posicionamento dos laminitos de forma sistemática como foi realizado nesta pesquisa por meio de DGPS. Isto permitiu verificar sugestões anteriores de que em alguns locais o intervalo C6 apresentaria coloração amarelada devido a exposição e alteração meterórica, e que a coloração cinza indicara condição original dos laminitos sem alteração. Entretanto, esta pesquisa comprovou que o intervalo C6 apresenta alternância de laminitos amarelados e cinzentos em todo o intervalo. Entretanto, existe uma maior dominância de laminitos de coloração cinza na base do intervalo, e predominância de laminitos de cor amarela na porção superior. A coloração é da diagênese profunda dos depósitos, que localmente pode ser intensificado por causa da alteração meteórica como a oxidação e a dissolução seletiva de laminações isoladas. descrever a sucessão de laminitos, foram considerados aspectos sedimentológicos e diagenéticos tais como: a cor, a presença de estruturas sin-deposicionais como *loop beddings* e convolução, e pós-deposicionais, tais como a presença de feições de dissolução milimétricas e de *vugs* (>1 mm). Aliado aos aspectos sedimentológicos e diagenéticos, dados de resistência mecânica das petrofácies foram adquiridos através dos perfis de *Schmidt Hammer* Tipo N e Tipo L, porém devido a melhor precisão para rochas com valores de recuperação >10 R (*Rebound energy*) e uma melhor resposta a heterogeneidade e microestruturas, foi levado em consideração apenas os dados do Tipo N para a avaliação da variação mecânica das petrofácies, conforme discutido por Buyuksagis & Goktan (2007) e Wang et al (2017). Devido ao espaçamento de aquisição dos dados de *Schmidt Hammer* (15 cm ou 20 cm), não foi possível obter valores de

resistência das petrofácies CLCLB, CLAVUG e CLCCON. Devido a condição de alteração meteórica também não foi possível obter valores das petrofácies CLAD e CLCD. Devido ao estado de alteração/dissolução dos laminitos portadores destas petrofácies não foi possível realizar os ensaios in situ. Ensaios de compressão uniaxial foram realizados em plugues de laminitos para as petrofácies CLA, CLCCV, CLCCON, CLACON e CLC.

Esta abordagem procurou relacionar a ocorrência de unidades de fluxo, relacionadas a zonas de dissolução planares nos laminitos, relacionadas a fatores sedimentológicos e diagenéticos. Isto permite verificar a suscetibilidade prévia de alguns níveis de laminitos de conduzir fluídos, e de que forma esta pré-disponibilidade foi controlada por fatores deposicionais, tais como a taxa de sedimentação, efeito de saturação original na eo-diagêneses, no caso de camadas que apresentam estruturas associadas a fluidização, ou convolução. Além da descrição macro e mesolitofaciológica, também foram incorporados na classificação alguns aspectos microfaciológicos observados posteriormente em lâminas delgadas. Conforme os dados disponíveis, treze petrofácies foram propostas, sete que abrangem os laminitos de cor amarela (grupo G1), e seis que abrangem os laminitos de cor cinza (grupo G2):

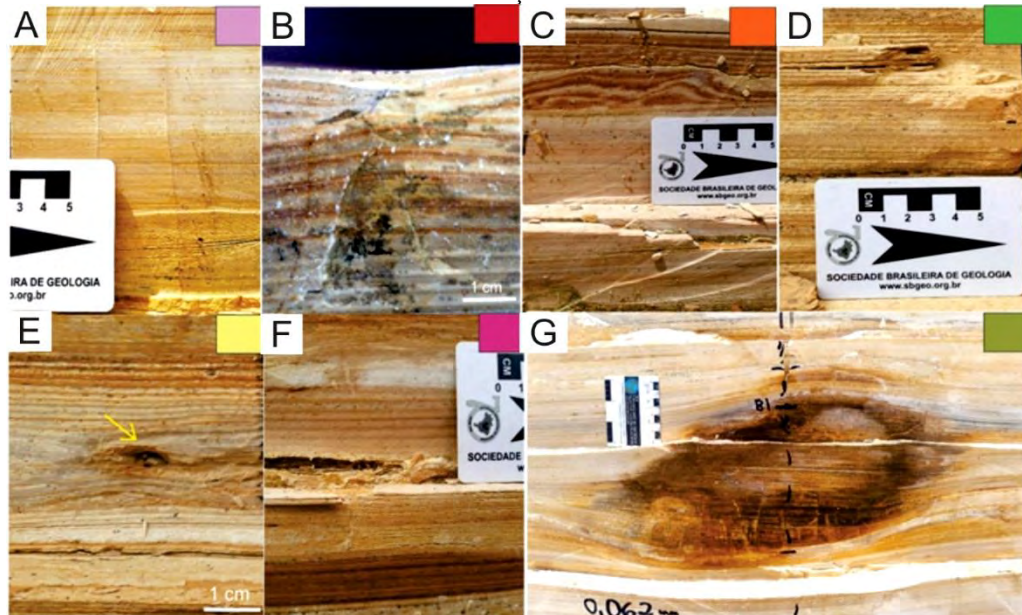
- 1 Petrofácies CLA (Calcário Laminado Amarelo maciço): é a petrofácies mais abundante. Não possui macro heterogeneidades, porém pode apresentar localmente cimentação por sílica na forma de nódulos e áreas amorfas de silificação (Figura 30A). É comum a presença de dendritos de piroluzita ($Mn^{4+}O_2$) e óxidos de ferro resultante da oxidação de cristais de pirita. A oxidação da pirita foi observada principalmente em lâminas petrográficas. Pode apresentar níveis com poros submilimétricos criados por dissolução (< 0,5 cm). A espessura de intervalos desta petrofácies variou de 1 cm a 32 cm (Figura 32).
- 2 Petrofácies CLALB (laminito Amarelo portador de *Loop beddings*): é uma das petrofácies menos frequentes (Figura 30B). Pode apresentar *loop beddings* dos tipos I, II e III, embora os mais comuns são I e II. Esta petrofácies é formada por conjuntos de lâminas com espessuras que variam de 0,5 a 2,2 cm (Figura 32). Os *loops bedings* ocorrem isolados ou formam horizontes que se estendem lateralmente por vários de metros.
- 3 Petrofácies CLACV (laminito amarelo portador de lâminas convolutas): Estes níveis apresentam de forma geral uma grande continuidade lateral de dezenas a centenas de metros, mas alguns níveis de pouca extensão lateral também foram encontrados nos afloramentos (Figura 30C). Os intervalos de laminitos portadores desta petrofácies apresentam espessura que varia de 1,9 a 8 cm (Figura 32). As convoluções essencialmente são formadas por lâminas em formas de domos, dobras sinclinais e anticlinais, e

ondulações. Estes níveis apresentam coloração amarelada a alaranjada devido a ação expressiva de oxidação nas lâminas.

- 4 Petrofácies CLAD (Calcário Laminado Amarelo com Dissolução): é umas das petrofácies mais abundantes. Intervalos de laminitos portadores desta petrofácies apresenta grande continuidade lateral nos painéis 1 e 2. O processo de dissolução observado como sua característica distintiva resultou na alteração completa de algumas lâminas, por vezes criando halos de alteração. Este aspecto da porosidade formada pela dissolução é visível a olho nu ou com o auxílio de lupa de bolso (Figura 30D). Os intervalos de laminitos portadores desta petrofácies apresenta espessura que varia de 0,5 a 20 cm (Figura 32).
- 5 Petrofácies CLAVUG (Calcário Laminado Amarelo com *Vugs*): é umas das petrofácies menos abundantes. Apresenta *vugs* de geometria semicircular ou oval com dimensão maior que varia de 0,7 cm e 0,9 cm. Os *vugs* ocorrem contidos em lâminas isoladas ou em conjuntos de lâminas (Figura 30E). Intervalos de laminitos portadores desta petrofácies apresentam espessura de 0,5 a 1 cm (Figura 32).
- 6 Petrofácies CLAGP (Calcário Laminado Amarelo com Veio de Gipsita): é uma das petrofácies que ocorrem com frequência no pseudo-poço 1 do painel 2. Os veios horizontais apresentam preenchimento formado por gipsita fibrosa (Figura 30E). A espessura dos intervalos portadores desta petrofácies variam de 0,5 a 3 cm (Figura 32). Estas também foram bastante afetadas por alteração meteórica.
- 7 Petrofácies CLACON (Calcário Laminado Amarelo com Concreção): Esta petrofácies são abundantes nos pseudo-poços. Esta geralmente apresenta pequenos veios verticais preenchidos por calcita distribuídos de forma radial a estrutura da concreção. Os veios ocorrem limitados ao conjunto de lâminas que formam a petrofácies (Figura 30G). As concreções geralmente apresentam forma ovalada e por vezes alongadas, cimentadas por sílica, e menor efeito de formação de porosidade tardia. A formação das concreções gerou a deformação da laminação ao redor destas estruturas. Os intervalos desta petrofácies apresentam espessura que varia de 1,2 a 15 cm (Figura 32).
- 8 Petrofácies CLC (Calcário Laminado Cinza maciço): é uma das petrofácies mais abundante. Não possui macro heterogeneidades, mas apresenta importante conteúdo de matéria orgânica, o que foi observado em lâminas delgadas. Esta petrofácies apresenta alto processo de litificação (Figura 31A). Também é comum a abundante presença de pirita, tanto na forma de cristais disseminados na matriz, pirita framboidal, quanto na forma de cristais cúbicos euédricos, que podem substituir a matéria orgânica. Esta petrofácies possui espessura que varia de 2 a 16 cm (Figura 32).

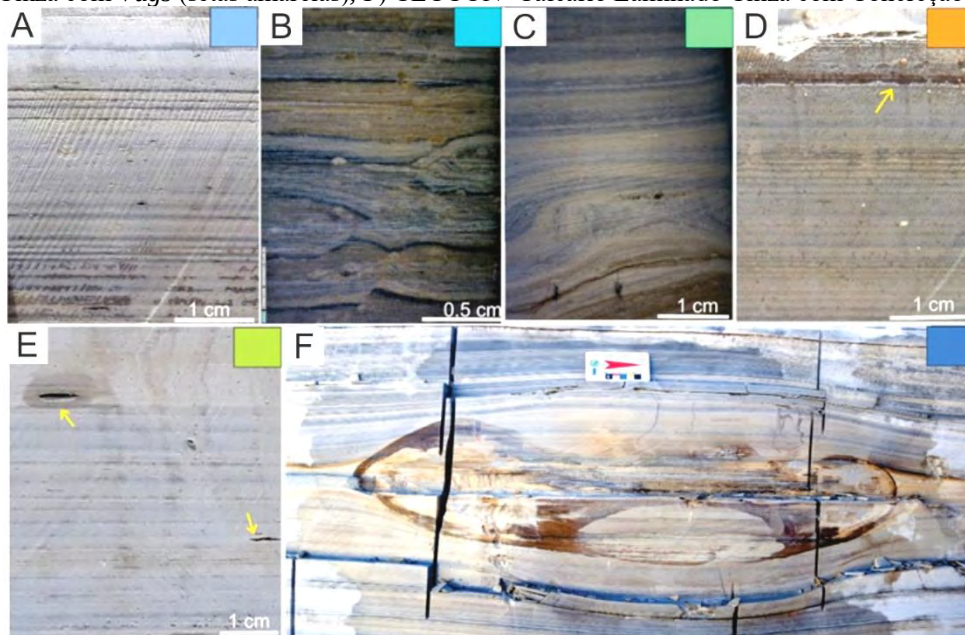
- 9 Petrofácies CLCLB (Calcário Laminado Cinza com *Loopbeddings*): é uma das petrofácies menos abundantes. Apresenta estruturas *loop bedding* dos tipos I, II e III, embora sejam mais comuns o tipo III (Figura 31B). Essas estruturas podem ocorrer de forma isolada ou formando horizontes que se estendem lateralmente por vários metros. Os intervalos desta petrofácies apresentam espessura que varia de 0,5 a 1 cm (Figura 32). Esta petrofácies também apresenta alto grau de litificação.
- 10 Petrofácies CLCCV (Calcário Laminado Cinza com Convolução): Esta petrofácies forma intervalos de poucos metros a zonas com grande continuidade lateral de vários metros. Esta petrofácies é caracterizada por laminações onduladas, dobras e convolutas (Figura 31C). Nesta petrofácies é comum a ocorrência de pirita na forma de aglomerados de cristais e cristais isolados. A espessura dos intervalos desta petrofácies variam de 1 a 5,5 cm (Figura 32).
- 11 Petrofácies CLCD (Calcário Laminado Cinza com Dissolução): representa uma petrofácies pouco abundante nos afloramentos. A dissolução do material de algumas lâminas foi intensa o que criou zonas de alta porosidade visíveis a olho nu (Figura 31D). As áreas com efeito de dissolução apresentam coloração marrom escuro no calcário laminado cinza. Os intervalos portadores desta petrofácies apresentam espessuras que variam de 0,5 a 12,3 cm (Figura 32).
- 12 Petrofácies CLCVUG (Calcário Laminado Cinza com *Vugs*): representa uma petrofácies pouco abundante nos afloramentos. Apresenta *vugs* de geometria elipsoidal com no mínimo 0,5 cm em seu eixo vertical e até 2 cm de comprimento, essas estruturas geralmente estão contidas em lâmina ou em um conjunto de lâminas (Figura 31E). Esta petrofácies possui espessuras que variam de 0,5 a 7,4 cm (Figura 32).
- 13 Petrofácies CLCCON (Calcário Laminado Cinza com Concreção): Esta petrofácies é pouco abundante nos afloramentos. É formada por lâminas ou conjunto de lâminas, e apresenta dimensões centimétricas. Esta petrofácies contém pequenos veios distribuídos de forma radial as concreções, que são preenchidos por calcita. Estes veios foram considerados como parte da petrofácies (Figura 31F). As concreções contidas no conjunto de lâminas desta petrofácies apresentam forma geral ovalada, e por vezes alongadas. A presença das concreções produziu a deformação das lâminas ao redor dos nódulos. Esta petrofácies possui espessuras que variam de 4,5 a 12 cm (Figura 32).

Figura 30 - Petrofácies criadas para a caracterização dos laminitos de coloração amarela. As cores indicam o código utilizado para as petrofácies nos perfis estratigráficos. A) CLA- Calcário Laminado Amarelo, B) CLALB- Calcário Laminado Amarelo com *Loop beddings* tipo simples, C) CLACV- Calcário Laminado Amarelo com Convolução, D) CLAD- Calcário Laminado Amarelo com Dissolução. As setas amarelas indicam os níveis de dissolução, E) CLAVUG- Calcário Laminado Amarelo com *Vugs*, F) CLAGP- Calcário Laminado Amarelo com Veio de Gipsita, G) CLACON- Calcário Laminado Amarelo com Concreção.



Fonte: A autora (2020).

Figura 31 - Petrofácies criadas para a caracterização dos laminitos de coloração cinza. As cores indicam o código utilizado para a petrofácies nos perfis estratigráficos. A) CLC- Calcário Laminado Cinza maciço, B) CLCLB- Calcário Laminado Cinza com *Loopbeddings* tipo III complexa, C) CLCCV- Calcário Laminado Cinza com Convolução, D) CLCD- Calcário Laminado Cinza com Dissolução (setas amarelas), E) CLCVUG- Calcário Laminado Cinza com *Vugs* (setas amarelas), F) CLCCON- Calcário Laminado Cinza com Concreção.

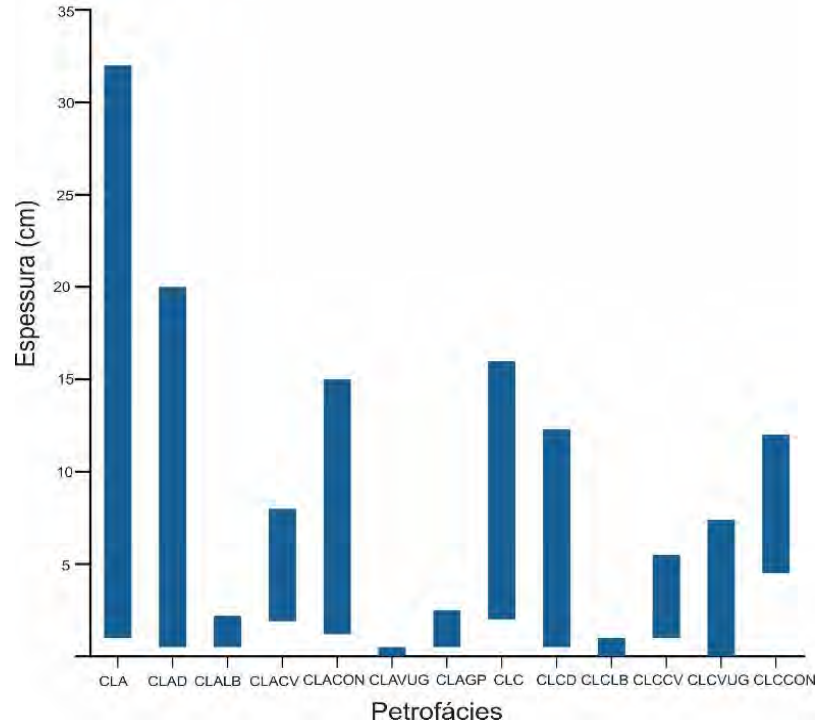


Fonte: A autora (2020).

A Figura 32 apresenta um gráfico com a comparação dos valores máximo e mínimo das espessuras das petrofácies definidas nos laminitos. O gráfico mostra que as petrofácies

pertencem ao grupo G1 (CLA) apresentam as maiores espessuras, e estas representam as petrofácies relacionadas aos níveis concrecionais e feições de dissolução.

Figura 32 - Valores de espessuras máximas e mínimas de cada petrofácies identificada nos pseudo-poços e afloramentos de laminitos calcários.



Fonte: A autora (2020).

3.2.1 Petrografia, Catodoluminescência e MEV/EDS das Petrofácies

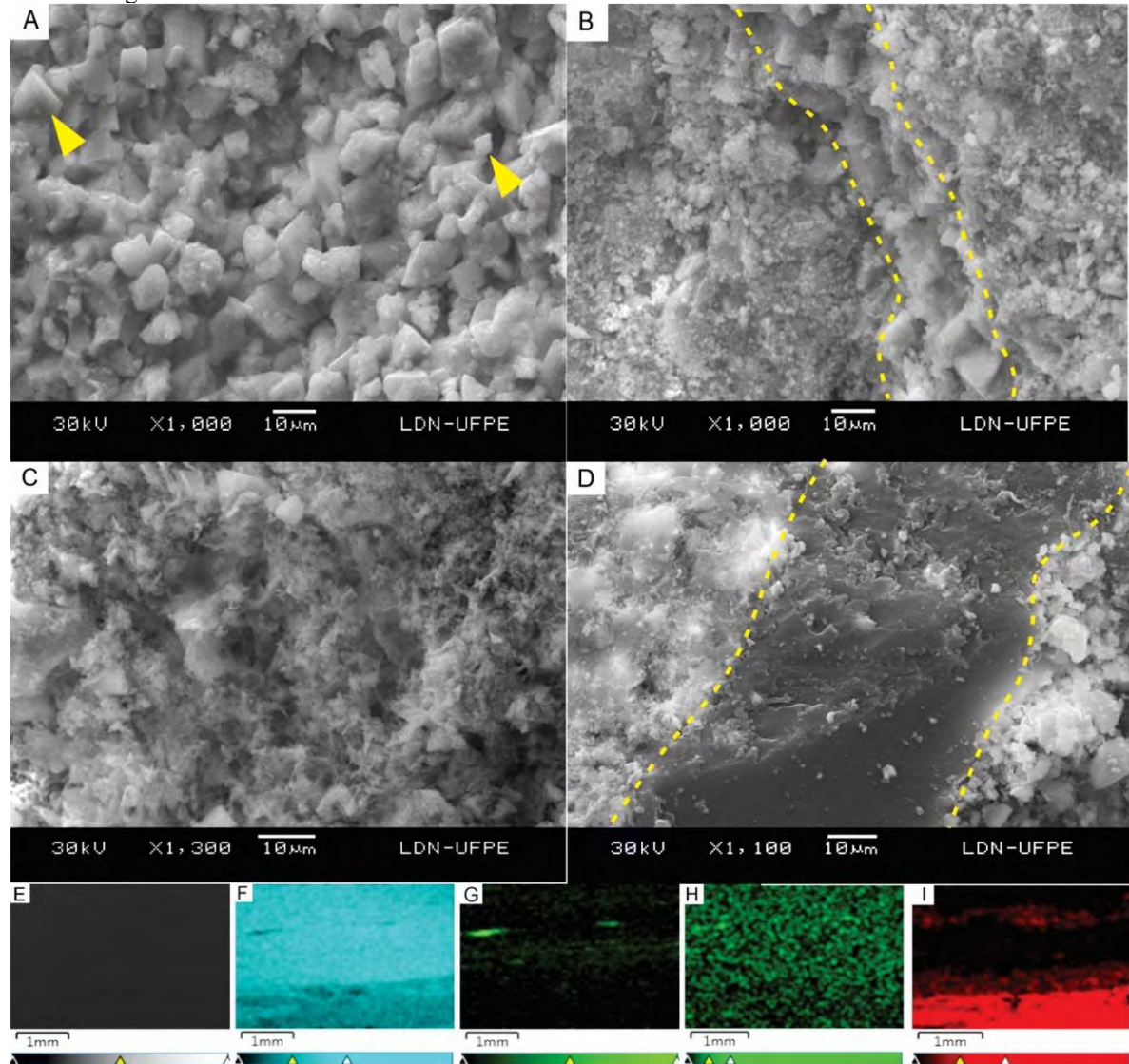
Trinta lâminas delgadas polidas foram utilizadas para o estudo de aspectos microfaciológicos a definição das petrofácies. O estudo petrográfico visou avaliar aspectos sedimentológicos, diagenéticos e presença de heterogeneidades. As lâminas foram realizadas com amostras retiradas dos painéis, pseudo-poços e pavimentos da área de estudo, visando obter o maior número de amostras das diferentes petrofácies de ambos os grupos de laminitos: G1 (amarela a bege) (CLA, CLAD, CLALB, CLAVUG, CLACV, CLAGP e CLACON); e G2 (cinza a esverdeada) (CLC, CLCD, CLCLB, CLCVUG, CLCCV e CLCCON).

A Petrofácies CLA (Calcário Laminado Amarelo): é composta por lâminas plano-paralelas com espessuras que variam de 30 a 60 μm . A matriz dessa rocha é composta essencialmente por cristais romboédricos de calcita e dolomita com tamanhos que variam de 4-10 μm , classificado segundo Folk (1962) como micrito e *mudstone* segundo Dunham (1962). A rocha apresenta cimento diagenético constituído por cristais subédricos a anédricos de calcita com tamanhos menores que 4 μm , e também sílica amorfa e por vezes pseudo-morfos dos cristais de calcita substituídos por sílica microcristalina em menor proporção, estes podem aparecer preenchendo a porosidade primária intergranular e secundária intracristalina e

intercristalina preferencialmente em algumas lâminas geralmente próximo a níveis concrecionais (Figura 33). As imagens do MEV revelaram que os óxidos de manganês podem apresentar um hábito fibroso e preencher localmente a porosidade. Através da análise no EDS foi possível observar três variações composicionais das lâminas desta petrofácies: 1) lâminas esporádicas ricas em matéria orgânica (Figura 33); 2) lâminas predominantes na petrofácies, ricas Fe e Mg (óxidos de ferro e dolomita) relacionadas as lâminas creme a bege amareladas identificadas na petrografia e com baixa a média luminescência na análises de CL; 3) lâminas ricas em Mn e S geralmente associadas a presença de matéria orgânica e relacionadas a lâminas de coloração laranja a marrom identificadas na petrografia e com média luminescência na análises de CL (Figura 33 e 34). O laminito desta petrofácies apresenta uma textura predominantemente poikilotópica, e é possível observar a alternância de lâminas de cor creme a bege amarelado, com lâminas de coloração laranja a marrom. Ocorrem nódulos compostos por fosfato e microcalcisferas, e também carapaças de ostracodes deformadas e retrabalhadas, óxidos de ferro e manganês, e matéria orgânica que passou por processo de sulfetização. Essa petrofácies pode apresentar uma porosidade um pouco mais expressiva quando compara as demais petrofácies, com predominância do tipo intracristalina, móldica e intercristalina, causada principalmente pela maior ação da dissolução devido a textura poikilotópica (Figura 34).

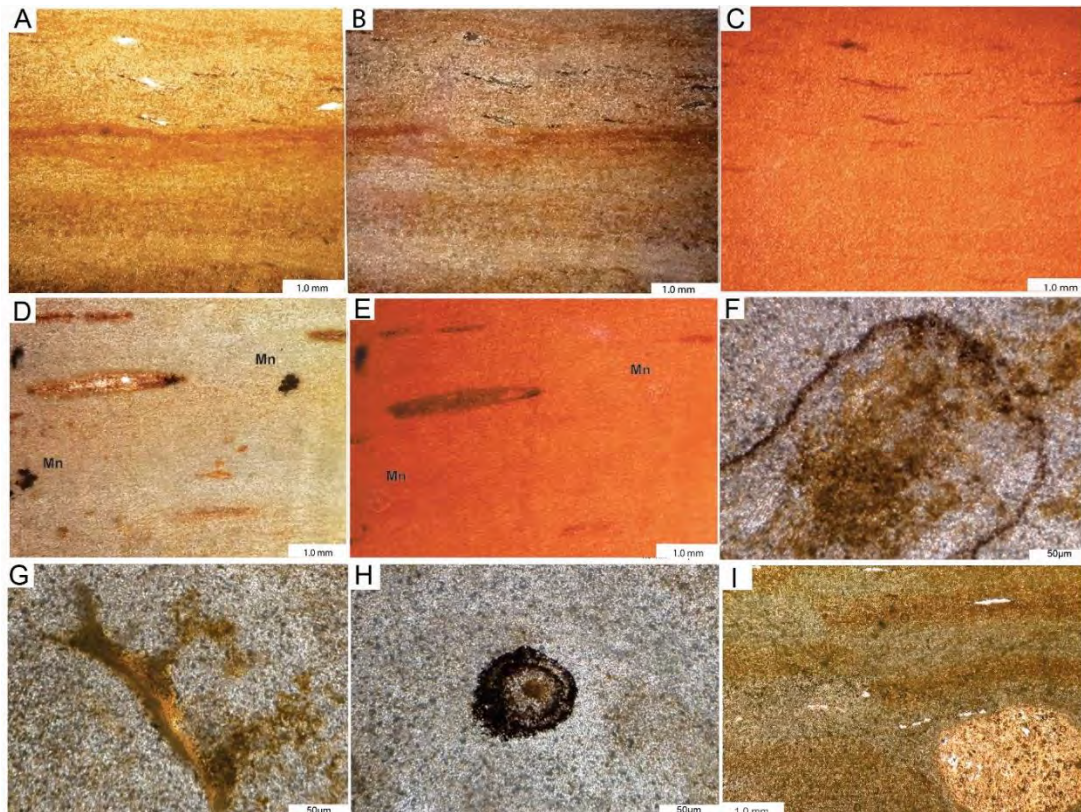
Petrofácies CLALB (Calcário Laminado Amarelo com *Loop beddings*): Esta petrofácies corresponde a conjuntos de lâminas que contem microestruturas formadas por deformação sin-deposicional, que foram classificadas predominantemente como *loopbeddings* do tipo simples, formadas por sismicidade. A presença destas estruturas pode indicar que as lâminas portadoras apresentavam menor coesão entre as partículas, possivelmente devido a saturação por água, o que favoreceu a formação das estruturas. Isto significa que este pode ser um indicador de condições eo-diagenéticas que influenciam a evolução da cimentação e da porosidade nestas lâminas. A porosidade nesta petrofácies tende a ser reduzida após a diagênese, em consequência do efeito de constrição local criado pelas estruturas.

Figura 33 - Análise da petrofácies CLA- G2 pelo MEV/EDS. A) Morfologia predominante da petrofácies com cristais euédricos e subédricos de calcita 4-10 μm e cristais de dolomita indicados pelas setas amarelas. B) A imagem mostra que as lâminas da petrofácies podem apresentar uma bimodalidade na cimentação, onde a lâmina em destaque pelas linhas tracejadas de cor amarela apresenta em menor proporção uma cimentação por cristais de calcita subédricos a anédricos menores que 4 μm , enquanto as lâminas adjacentes apresentam. C) Óxidos de manganês com hábitos fibroso. D) Lâmina formada essencialmente por Carbono. E) Imagem Backscatter das lâminas da petrofácies; F) Elemento químico Ca; G) Fe; H) Mg; I) S, lâminas que apresentam maior concentração em Ca apresentam-se ricas em Fe, enquanto são pobres em S. As lâminas no geral apresentam uma concentração similar de Mg.



Fonte: A autora (2020).

Figura 34 - Aspectos microfaciológicos da Petrofácies CLA. A) Micrografia com nicóis paralelos, B) mesma micrografia com nicóis cruzados, e C) mesma micrografia com CL. Estas mostram a matriz predominantemente micrítica com a presença de lâminas de cores diferentes a luz transmitida (A e B). Sob a CL as lâminas apresentam luminescência avermelhada indicando calcita ferrosa, e um pouco alaranjada, indicando calcita menos ferrosa e com maior teor de Mn. D) e E) mesma micrografia vista com nicóis paralelos e com CL, mostrando a presença de agregados de óxido de Mn, e partículas bioclásticas oxidadas e com presença de fosfato. F) Micrografia com nicóis cruzados, mostrando zona de alteração com a formação de óxidos. G) Micrografia com nicóis cruzados mostrando partícula bioclástica com processo de oxidação. H) Micrografia com nicóis cruzados mostrando partícula bioclástica com oxidação de Mn. I) Micrografia com nicóis cruzados mostrando uma microfalha (sin-deposicional), e um nódulo fosfático com microcalcisferas e formação de poros na matriz e no bioclasto causada pela circulação tardia de fluídos.



Fonte: A autora (2020).

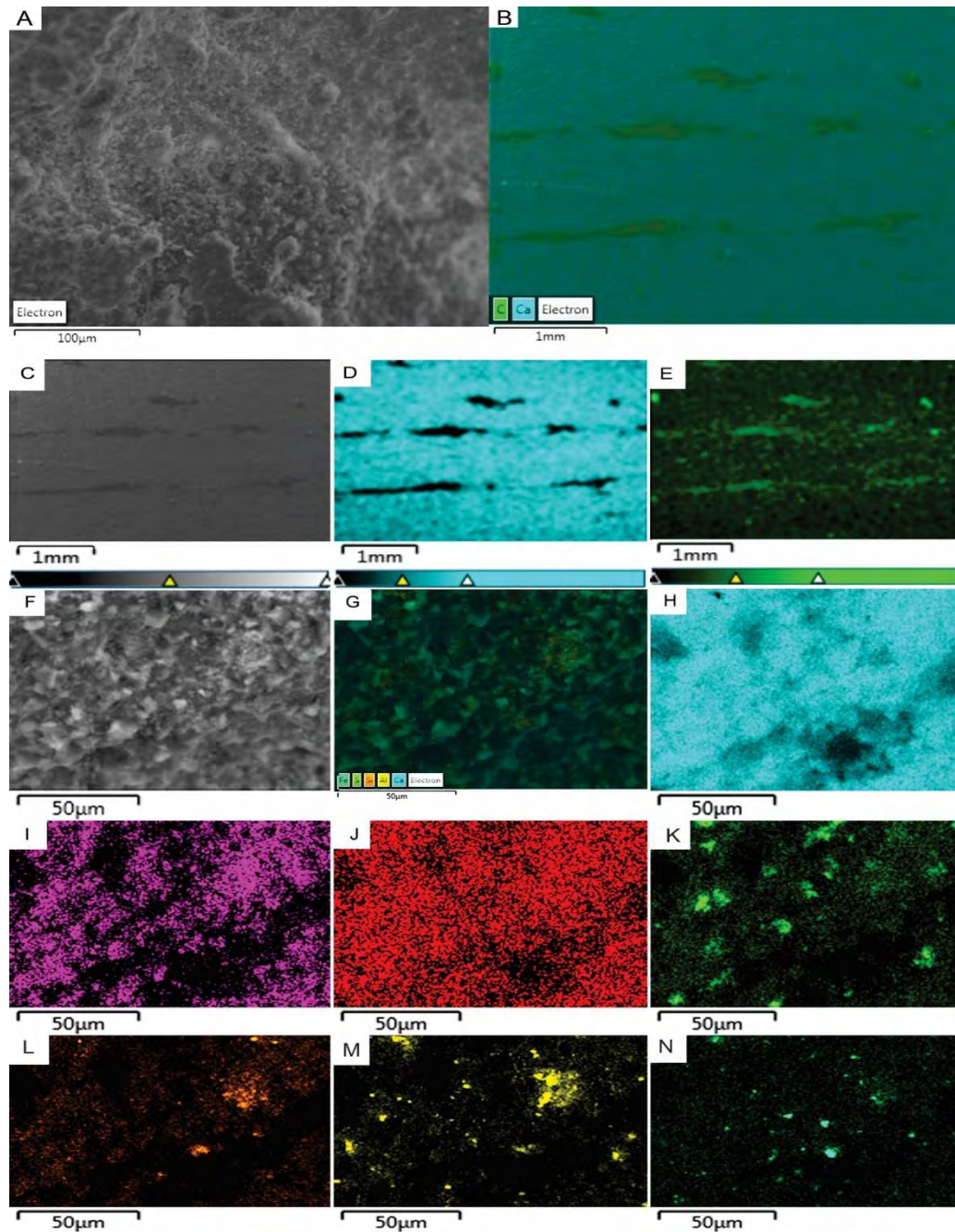
Petrofácies CLACV (Calcário Laminado Amarelo com Convolução): Esta petrofácies apresenta lâminas convolutas apresentam cimentação por amorfa sílica e calcita, e são compostas essencialmente por matéria orgânica oxidada, ricas em óxido de ferro e manganês, filossilicatos e sulfetos conforme mostrado na Figura 35. As imagens de EDS da petrofácies indicam que algumas lâminas sofreram um maior processo de dolomitização que outras, os cristais de dolomita em estágio inicial e substituiu mimeticamente a calcita com alto Mg, devido a percolação de fluídos durante os processos eo-diagenéticos (Figura 35). Também pode ser observada a presença de pirita framboidal. Ao microscópio está apresenta muito pouca porosidade secundária formada por circulação tardia de fluídos. A análise petrográfica revelou que esta é composta essencialmente por lâminas de coloração marrom a alaranjada, com baixa

luminescência na catodoluminescência e apresenta geometria suavemente ondulada e dômica (Figura 36). A estrutura convoluta pode ter sido formada pelo crescimento de esteiras algálicas ou/e escape de fluídos dos estratos mais porosos gerados por eventos de sismicidade, porém devido a ao ambiente mais oxidante durante a deposição desses estratos a matéria orgânica não foi preservada, restando apenas as lâminas ricas em carbono (Figura 36).

Petrofácies CLAD (Calcário Laminado Amarelo com Dissolução): Esta petrofácies normalmente é encontrada intercalada com a petrofácies CLA, onde o processo de dissolução ocorre de forma horizontal, paralelo ao acamamento e a interface entre as lâminas, nas minas. A dissolução ocorreu preferencialmente em lâminas que apresentam textura poikilotópica, o que formou strings de poros conectados ou não, e porosidade do tipo fenestral (CHOQUETTE & PRAY, 1970). A imagem WDS mostra uma lâmina com dissolução preferencial, com poros primários do tipo interpartícula e secundários do tipo intracristalina e intercristalina, por vezes interconectados (Figura 37). Conforme demonstrado na Figura 38, a dissolução ocorreu preferencialmente em lâminas, ou conjunto de lâminas, que apresentavam variação na composição da matriz, ou a presença de microporosidade original que favoreceu o início da circulação tardia. Isto sugere que o acamamento exerce forte controle em processos de injeção/dissolução neste tipo de cenário que envolve geometria x composição.

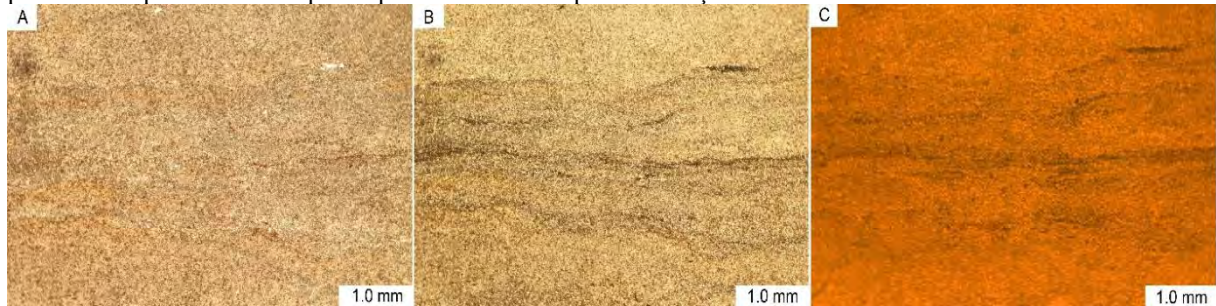
Petrofácies CLAVUG (Calcário Laminado Amarelo com Vugs): Esta petrofácies é pouco frequente nos estratos estudados. A análise petrográfica revelou que esta ocorre principalmente em regiões das lâminas com um processo de dissolução preferencial formando porosidade vugular intrafossilífera em carapaças de ostracodes e móldica em partículas de matéria orgânica (LUCIA, 1995) (Figura 39). A formação de fraturas-*vugs* também pode ser observada em lâminas de amostras coletadas próximas a falhas, estilólitos e fraturas, essas estruturas podem fornecer uma grande contribuição à migração e acumulação de hidrocarbonetos formando reservatórios com características típicas de dual-porosidade (matriz + fratura) (LUCIA, 1995; LI, 2017). É a petrofácies que apresenta maior aspecto de porosidade dentre as que foram definidas (Figura 39). Este aspecto revelou outro controle no processo de formação de porosidade secundária devido a circulação de fluídos, que é a associação com lâminas formadas quando houve o incremento da deposição de partículas de matéria orgânica (fragmentos de algas, ostracodes e de plânctons) e textura poikilotópica típica das fácies amarela.

Figura 35 - Análise da petrofácies CLA pelo MEV/EDS. A) Imagem da petrofácies CLACV cimentada. B) Mapa dos elementos Ca e C. C) Imagem Backscatter da petrofácies com lâminas convolutas. D) Ca e E) C mostram os mapas composicionais, lâminas que apresentam maior concentração em Ca apresentam ausência de concentração de C. F) Imagem Backscatter da petrofácies, mostrando os cristais de calcita e a redução da porosidade por cimentação. G) Mapa das concentrações dos elementos Fe, S, Si, Al e Ca; H) Elemento químico Ca, I) Mg, mostrando algumas lâminas sofreram processo de dolomitização ou com calcita rica em Mg, J) algumas regiões na laminação apresentam altas concentrações de Mn. K) e algumas lâminas também podem apresentar uma maior concentração S. Em L) é possível observar que algumas lâminas apresentam uma maior concentração Si e preenchem a porosidade intercrystalina na rocha M) lâminas convolutas apresentam concentração maior Al e em N) há presença de óxidos de ferro disseminados na matriz.



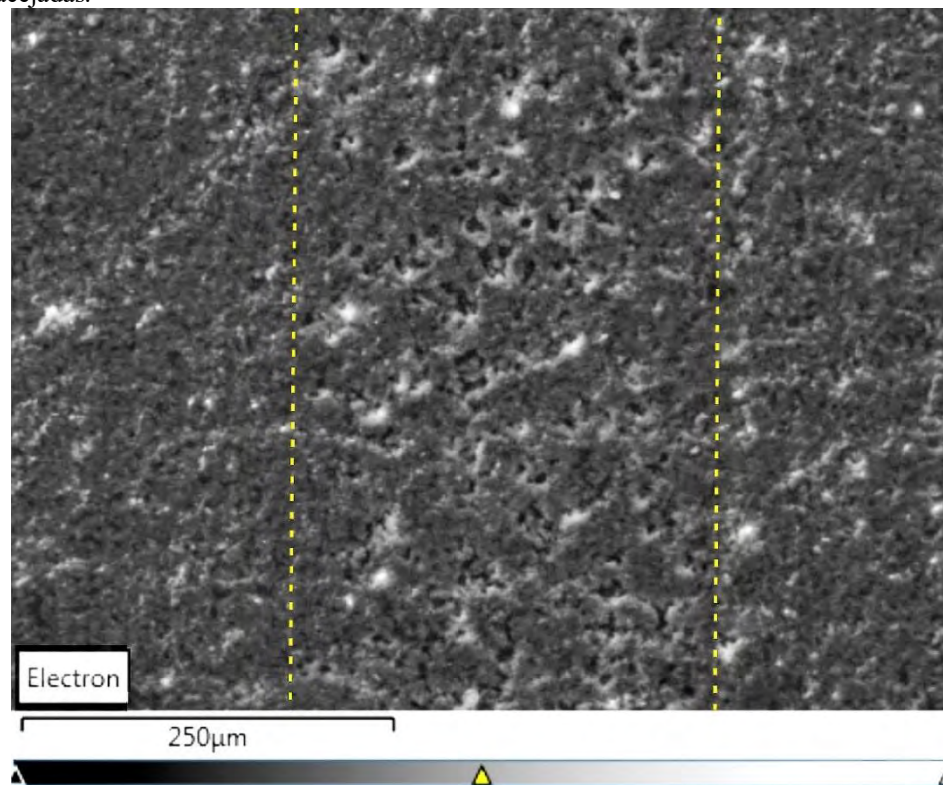
Fonte: A autora (2020).

Figura 36 - Aspectos petrográficos da petrofácies CLACV. A, B e C) Micrografias com nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL da mesma região. As lâminas apresentam ondulação e convolução. A deformação possivelmente se deve ao efeito de escape de fluidos ou/e crescimento de esteiras algálicas, conforme sugerido pelo aspecto macroscópico observado em amostras. Ocorrem lâminas escuras devido à presença de óxidos e de sulfetos. Esta petrofácies apresenta muito pouca porosidade criada pela circulação de fluidos tardios.



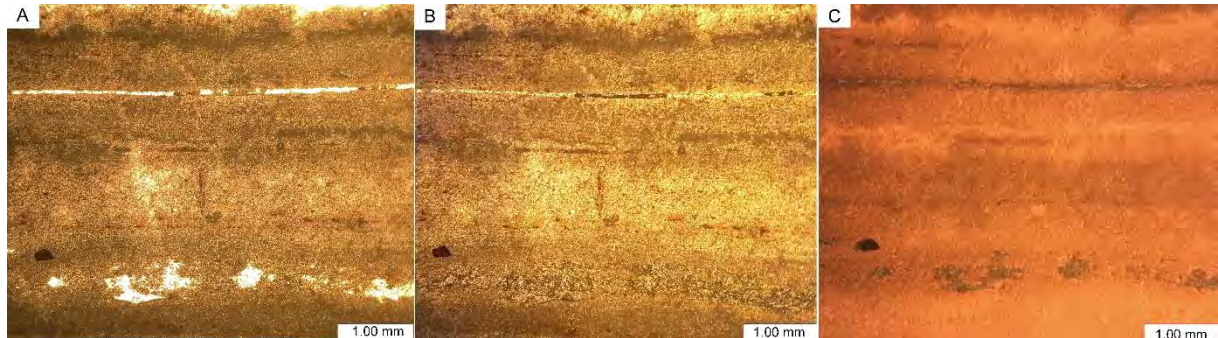
Fonte: A autora (2020).

Figura 37 - Imagem do WDS Backscatter em escala de cinza mostrando lâmina com microporosidade primária interpartícula e secundária intercrystalina e intracrystalina gerada pela circulação tardia de fluidos, os poros por vezes apresentam-se conectados. Os limites da lâmina com dissolução preferencial estão destacados pelas linhas amarelas tracejadas.



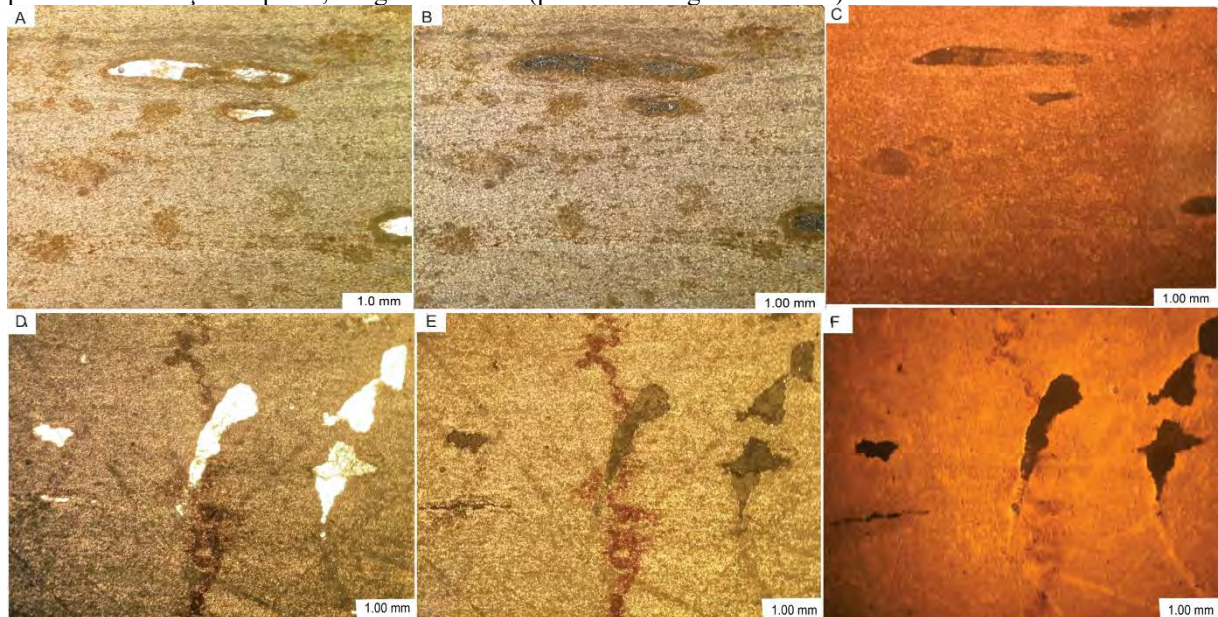
Fonte: A autora (2020).

Figura 38 - Micrografias da mesma região, referentes a petrofácies CLAD. A, B e C) nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente. É possível observar as lâminas com coloração variando de marrom avermelhado (calcita ferrosa), a vermelho amarelado, ou alaranjado, calcita menos ferrosa com mais Mn. Algumas lâminas apresentam a formação de poros e microporos a partir da dissolução da matriz, devido a circulação tardia de fluídos. A dissolução também foi acompanhada pela precipitação de óxidos, que aparecem com a coloração escura na CL.



Fonte: A autora (2020).

Figura 39 - Micrografias da mesma região, referentes a petrofácies CLAVUG. A, B, C, D, E e F) nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente. As laminações apresentam sob CL coloração marrom avermelhada a vermelho alaranjado. Esta petrofácies apresenta uma grande quantidade de partículas sedimentares de origem orgânica. As partículas, compostas por carapaças de ostracodes e fragmentos de algas apresentam sulfetização e oxidação tardia. De forma geral essas partículas passaram por um processo de micritização e sua dissolução tardia permitiu a formação de poros, em geral isolados (porosidade vugular moldica).



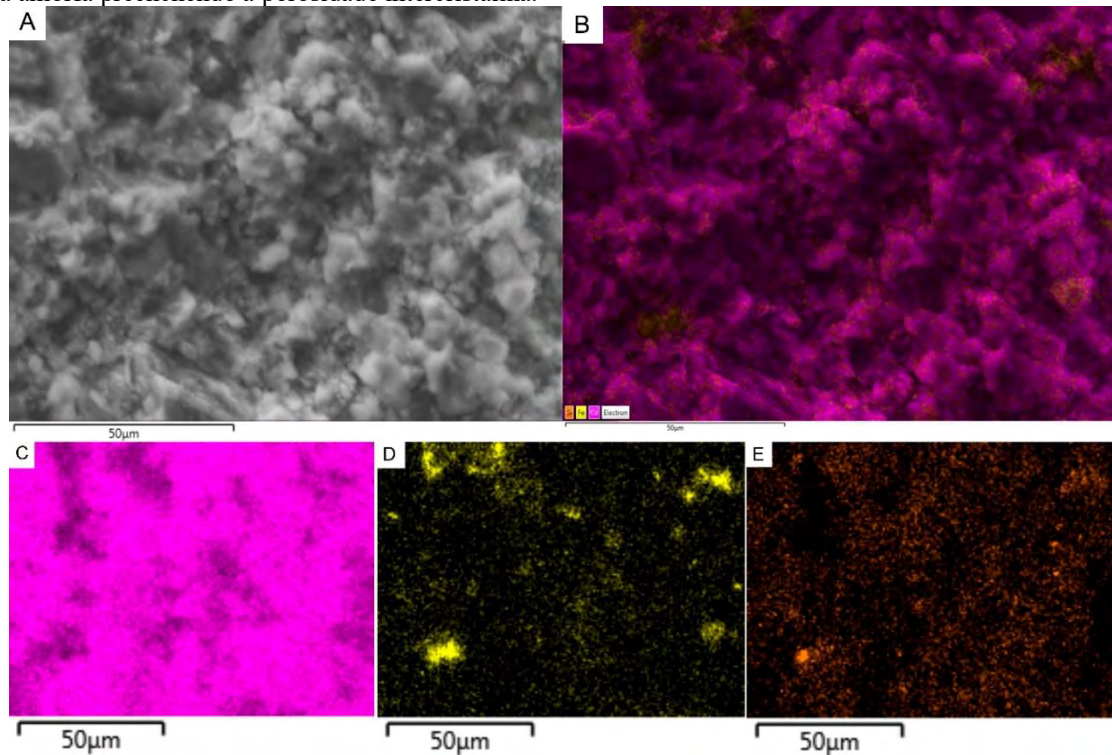
Fonte: A autora (2020).

Petrofácies CLAGP (Calcário Laminado Amarelo com Veio de Gipsita): Esta foi caracterizada como o conjunto de lâminas portador de veios de gipsita horizontais, paralelos ao acamamento (*beefs*), compostos por gipsita fibrosa precipitada a partir da circulação de fluídos na interface entre as lâminas. Em alguns casos, conjuntos de lâminas comportam veios horizontais de grande continuidade lateral, cuja espessura pode variar de milimétrica a centimétrica. De forma geral, os veios apresentam processos de dissolução tardia favorecido

pela circulação de fluídos ao longo dessas discontinuidades pré-existentes, o que implica que estes podem apresentar controle de fluxo dentro do reservatório.

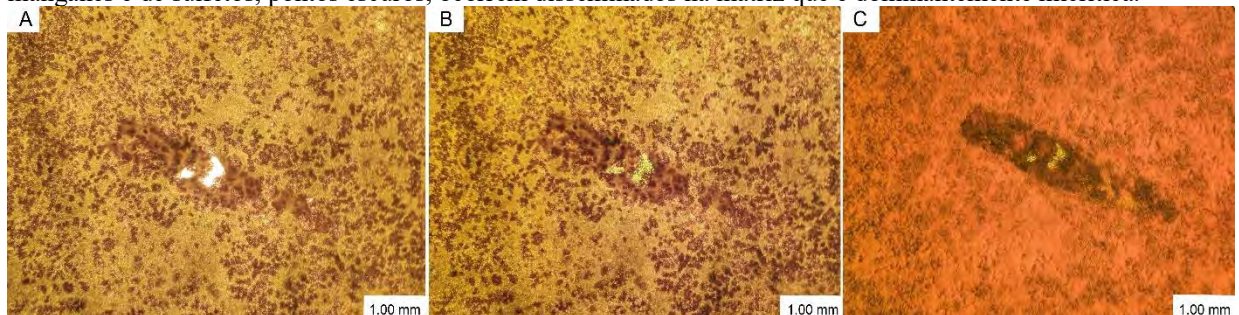
Petrofácies CLACON (Calcário Laminado Amarelo com Concreção): Esta petrofácies é caracterizada por conjuntos de lâminas que são portadoras de concreções. De forma geral as concreções ocorrem espaçadas, formando níveis horizontais dentro do acamamento, normalmente dentro do mesmo conjunto de lâminas. A origem das concreções pode estar associada à cimentação precoce ou pós-diagenética da matriz dos laminitos, induzida por processos químicos e biológicos, discutidos adiante (RAISWEL, 1987; LIU et al., 2019). Neste sentido, sugere-se que os conjuntos de lâminas portadores de concreções apresentavam fator indutivo eo-diagenético, e possivelmente também pós-diagenético para a cimentação por sílica microcristalina e calcita, provavelmente induzida por agentes biológicos, o que reduziu de forma considerável a porosidade primária da rocha (Figura 40). Segundo Marshall & Pirrie (2013) as concreções desta petrofácies podem ser classificadas como Tipo C (concreções formadas após a compactação). Essas concreções não apresentam deformação das lâminas, tanto no seu interior quanto ao redor do nódulo, podendo indicar que o volume de cimento precipitado durante a cimentação era equivalente ao volume poroso das laminações. Outra hipótese (Raiswell, 1987) propõe que a compactação para esses tipos de concreção pode ter ocorrido concomitantemente a sedimentação dos laminitos devido à baixa taxa de sedimentação, o que impediu a litificação precoce das heterogeneidades. O processo de cimentação das concreções também envolveu a formação de óxidos ferro e de manganês com a evolução da diagênese (Figura 40). Na análise petrográfica as regiões ricas em óxidos de manganês apresentam-se com coloração marrom, difusos na matriz da rocha e com média a alta luminescência, enquanto a óxidos de ferro apresentam-se com coloração marrom escura e baixa luminescência. Essa petrofácies apresenta uma grande quantidade de carapaças de ostracodes retrabalhadas e compactadas que passaram por processo de micritização e posteriormente substituição por óxidos de ferro e manganês e sulfetização (Figura 41).

Figura 40. Análise da petrofácies CLACON pelo MEV/EDS. A) Imagem Backscatter da petrofácies CLACON indicando matriz composta por cristais de calcita com uma forte cimentação por sílica intersticial. B) Mapa dos elementos Ca, Si e Fe, mostrando a distribuição da pirita, calcita e cimentação de sílica. C) Elemento químico Ca, predominante na rocha. D) Elemento químico Fe, distribuição da pirita e E) Elemento químico Si, presença de sílica amorfa preenchendo a porosidade intercrystalina.



Fonte: A autora (2020).

Figura 41. Micrografias da matriz de laminitos no interior de uma concreção. A, B e C) nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente. Observa-se a cimentação intensa dos laminitos no interior de uma concreção. Neste caso um fragmento de matéria orgânica exibe processos de oxidação. Uma grande quantidade de óxidos manganês e de sulfetos, pontos escuros, ocorrem disseminados na matriz que é predominantemente micrítica.



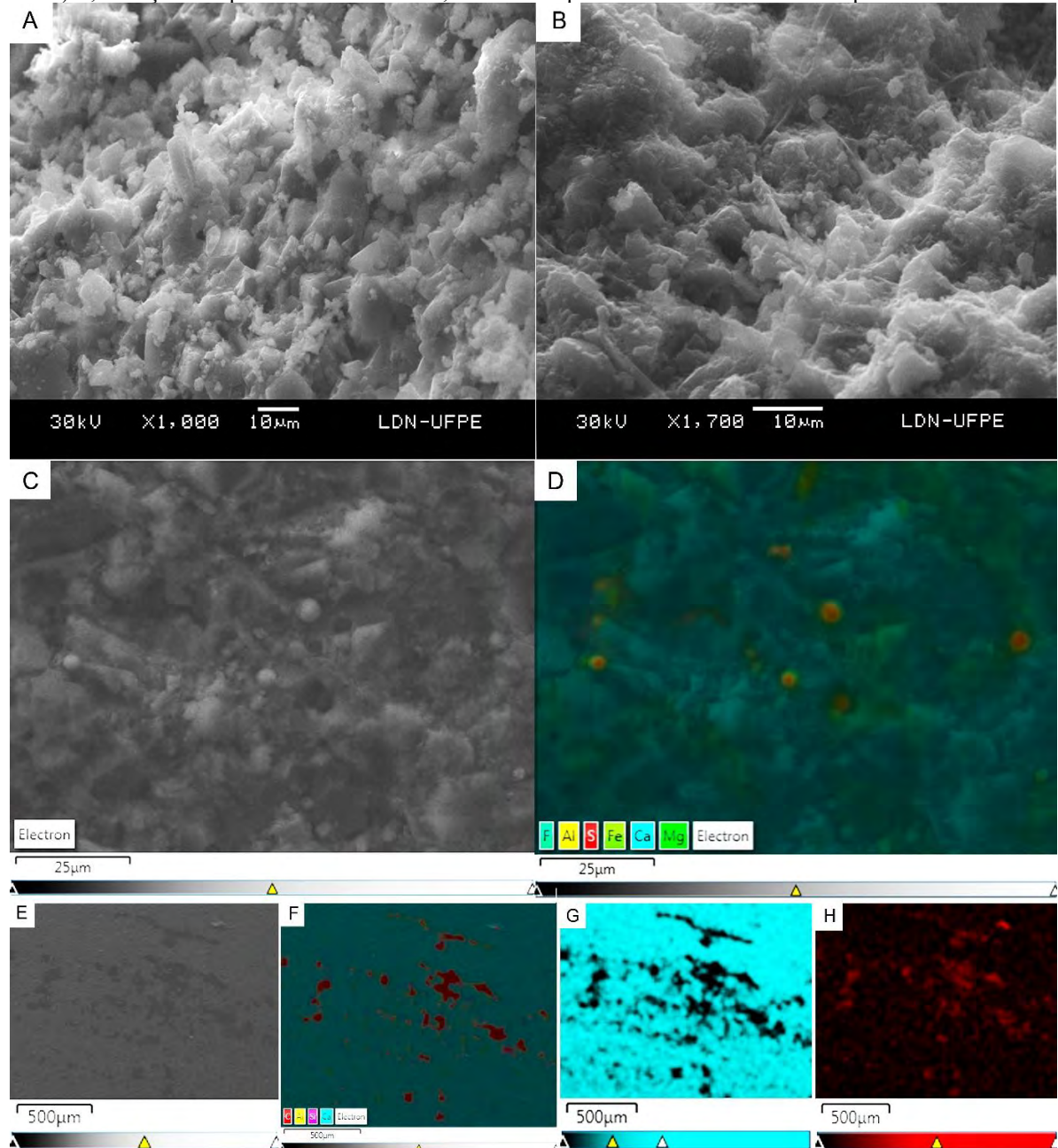
Fonte: A autora (2020).

Petrofácies CLC (Calcário Laminado Cinza): Esta petrofácies é composta por lâminas plano-paralelas, com boa continuidade lateral, com espessuras que variam de 40 a 90 μm (Figura 42). A matriz dos laminitos nesta petrofácies apresentada principalmente cristais euédricos a subédricos de calcita de 4 a 10 μm (micrito), alguns cristais podem apresentar dimensões um pouco maiores que 10 μm . A petrofácies apresenta um cimento eo-diagenético constituído por cristais subédricos a anédricos de calcita por vezes substituída por sílica

menores que 4 μm , ou ainda sílica amorfa e pirita framboidal, estes podem aparecer preenchendo a porosidade primária (intergranular) e secundária (intracristalina e intercristalina). Os laminitos desta petrofácies podem apresentar presença de filamentos algálicos (cianobactérias) disseminados na matriz. Cristais de pirita ocorrem disseminados por toda matriz, ou ainda formando concentrações associadas a substituição de matéria orgânica. Também ocorrem cristais de fluorita com hábito fibro-radial ou amorfo (Figura 42). A variação observada em relação a coloração, mais clara ou mais escura, é principalmente causada pela concentração de matéria orgânica e cristais de pirita que varia, sendo maior nas lâminas mais escuras. A análise de CL indica que a matriz é composta por calcita predominantemente mais rica em Mn e menos em Fe - coloração amarelada a alaranjada (Figura 43). Foram encontrados palinomorfos preservados, lâminas ricas em matéria orgânica carbonizada e pellets com esferulitos de pirita. Esta petrofácies apresenta pouca ou nenhuma porosidade primária, e também muito pouca porosidade secundária.

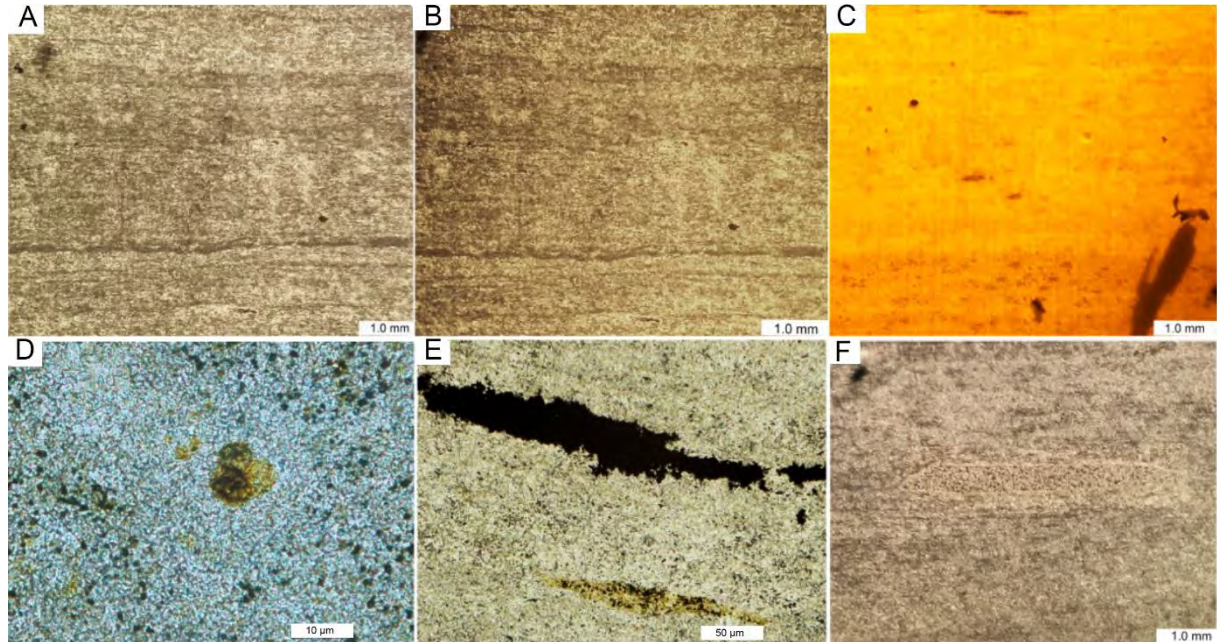
Petrofácies CLCLB (Calcário Laminado Cinza com *Loop beddings*): Esta petrofácies é representada por conjunto de lâminas de cor cinza, portadoras de estruturas do tipo *loop beddings* (Figura 44), formadas pela constrição das lâminas. Estas foram classificadas predominantemente como *loop beddings* do tipo simples ou complexas tipo III. Estas representam estruturas geradas por sismos em depósitos inconsolidados. Conforme discutido no texto acima, para a petrofácies CLALB (Calcário Laminado Amarelo com *Loop beddings*), estas lâminas possivelmente apresentavam maior quantidade de fluido intersticial, o que reduziu o efeito de coesão entre os grãos componentes do sedimento. Este processo pode ter resultado do aumento na taxa de sedimentação, o que aumentou a quantidade de água nos poros. A porosidade nesta petrofácies foi reduzida pelo processo de cimentação precoce.

Figura 42 - Análise da petrofácies CLC pelo MEV/EDS. A) Imagem Backscatter da petrofácies CLC indicando uma matriz micrítica dominada por cristais maiores de calcita, com cimento constituído por calcita anédricas a subédricas por vezes substituídas por sílica e pirita framboidal preenchendo a porosidade da rocha. B) Imagem Backscatter mostrando a presença de filamentos algálicos parcialmente substituídos por pirita e sílica. C) Imagem Backscatter da matriz da rocha. D) Mapa de elementos químicos F, S, Al, Mg, Ca, Fe, a imagem mostra a presença de pirita esféricas disseminadas na matriz da rocha, além de fluorita fibro-radial. E) Imagem Backscatter das lâminas da petrofácies CLC. F) Mapa de distribuição dos elementos químicos C, Ca, Al e Si. G) Elemento químico Ca e H) C, variação composicional das lâminas, mostrando que lâminas ricas em C são empobrecidas em Ca.



Fonte: A autora (2020).

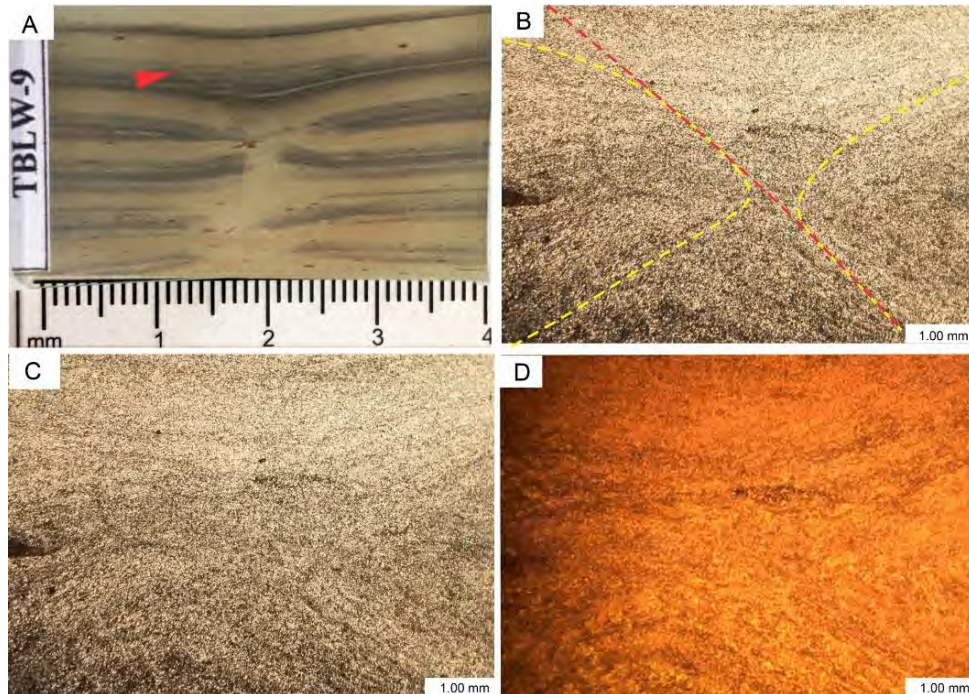
Figura 43 - Micrografias da petrofície CLC. A e B), nicóis cruzados e nicóis paralelos, respectivamente da mesma região. Observa-se o efeito da laminação composta essencialmente por micrito, com lâminas mais escuras devido à presença de matéria orgânica. C) detalhe da matriz com luminescência alaranjada clara, e alaranjada mais escura quando apresenta maior conteúdo de partículas orgânicas e de finos cristais de pirita (porção inferior da foto). D) detalhe da grande quantidade de cristais de pirita na matriz e presença de palinórfos preservados. E) poro formado pela dissolução de partícula orgânica. F) Pelete com uma grande concentração de esferulitos de pirita no seu interior.



Fonte: A autora (2020).

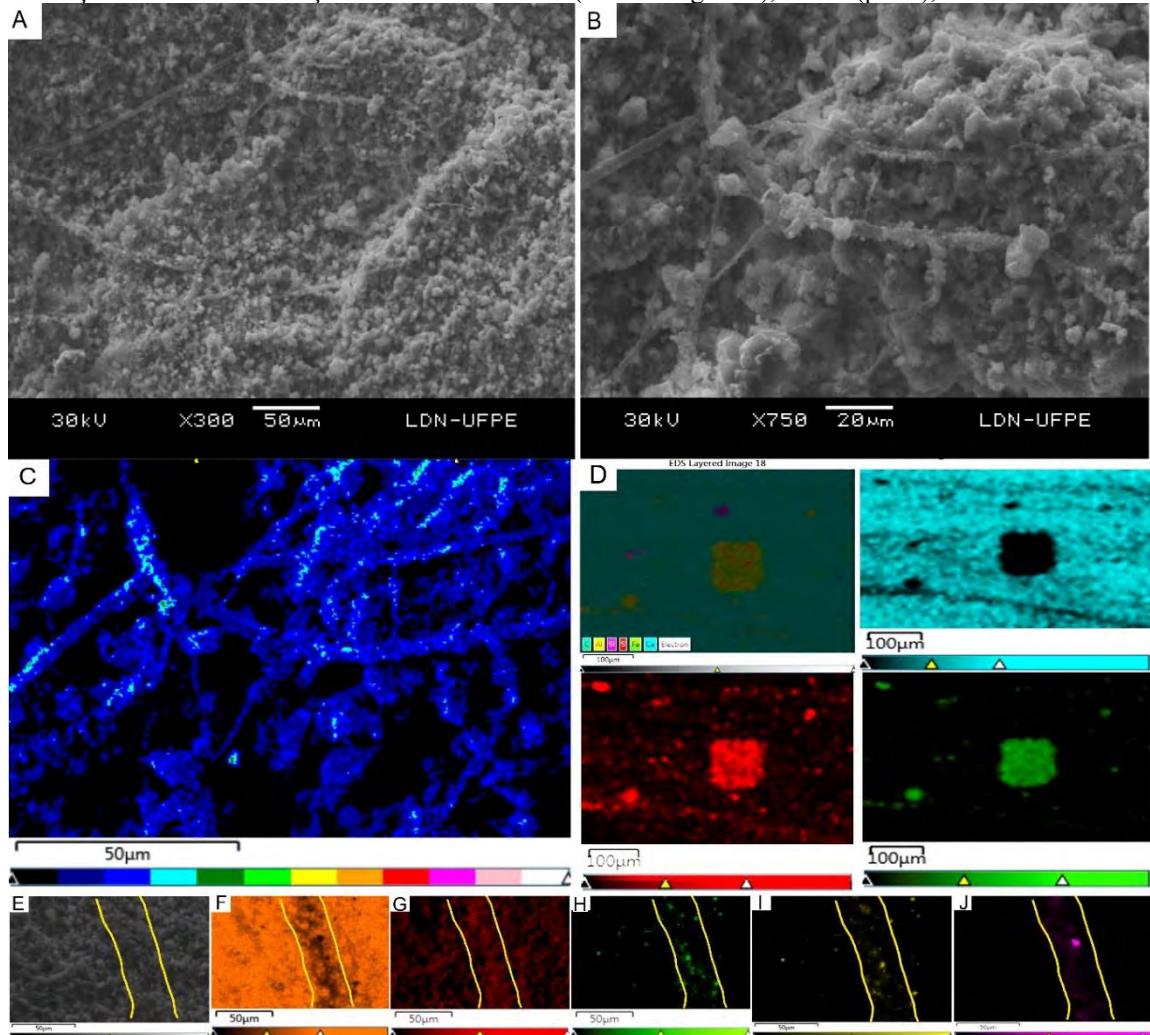
Petrofácies CLCCV (Calcário Laminado Cinza com Convolução): Esta petrofácies é composta por lâminas convolutas formadas por crescimento algálico em uma matriz de calcita micrítica (Figura 45). A presença de partículas de origem biogênica é principalmente dominada por filamentos algálicos (cianobactérias), que apresentam substituição parcial por pirita e sílica, e também podem apresentar oxidação tardia e formação de filossilicatos (CATTO et al., 2016). Essa petrofácies sofreu um intenso processo de cimentação por sílica amorfa e ou substituição do cimento calcítico por sílica, além da presença de pirita e óxidos de ferro e manganês gerados que preencheram toda a porosidade da rocha. Nos laminitos desta petrofácies é comum a ocorrência de laminações onduladas a suavemente crenuladas, ricas em matéria orgânica, óxido de ferro e sulfetos. Esta também apresenta presença de cristais euédricos de pirita e agregados framboidais. Esta petrofácies apresenta muito pouca ou nenhuma porosidade secundária. A análise petrográfica revelou que esta é composta essencialmente por lâminas de coloração marrom a marrom escuro, com baixa luminescência sob a CL (Figura 46). A presença de fragmentos biogênicos sulfetizados são comuns.

Figura 44 - Detalhes da petrofacies CLCLB. A) Estrutura do tipo loop bedding, complexa do tipo III, em lâmina delgada. uma micro-falha está indicada pela seta vermelha. B, C e D) micrografias com nicóis cruzados, nicóis paralelos e CI, da mesma região, respectivamente. Observa-se a deformação da laminação, criada pela perda de coesão das partículas sedimentares que compunham os laminitos. As lâminas apresentam encurtamento entre lâminas claras e escuras o que indica a diferença de competência entre elas, a presença da micro-falha ocorreu em um regime dúctil-rúptil durante a formação da estrutura.



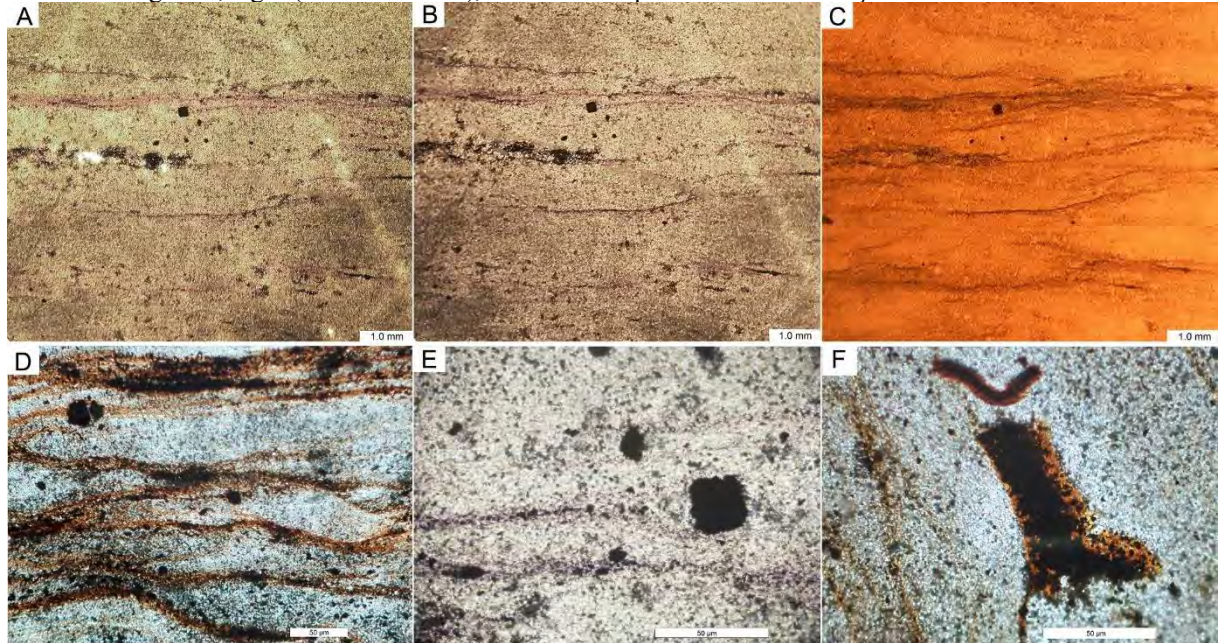
Fonte: A autora (2020).

Figura 45 - Análise da petrofácies CLCCV pelo MEV/EDS. A) Imagem Backscatter da petrofácies CLCCV indicando uma matriz micrítica dominada por cristais de calcita com uma grande quantidade de filamentos algálicos preservados. B) Detalhe da presença de filamentos algálicos parcialmente substituídos por pirita e sílica. C) Imagem EDS do detalhe dos filamentos algálicos mostrando a alta concentração de C dos filamentos algálicos. D) Mapa de elementos químicos C, S, Al, Si, Ca, Fe, a imagem mostra a presença de pirita com hábito cúbico preservado. E) Mapas de elementos individuais Ca (azul), S (vermelho) e Fe (verde). E) Imagem Backscatter da lâmina convoluta. Elementos químicos F) Ca, G) C, H) Fe, I) S e J) Si, a lâmina convoluta apresenta uma baixa concentração de Ca e concentrações consideráveis de C (matéria orgânica), Fe e S (pirita), e Si.



Fonte: A autora (2020).

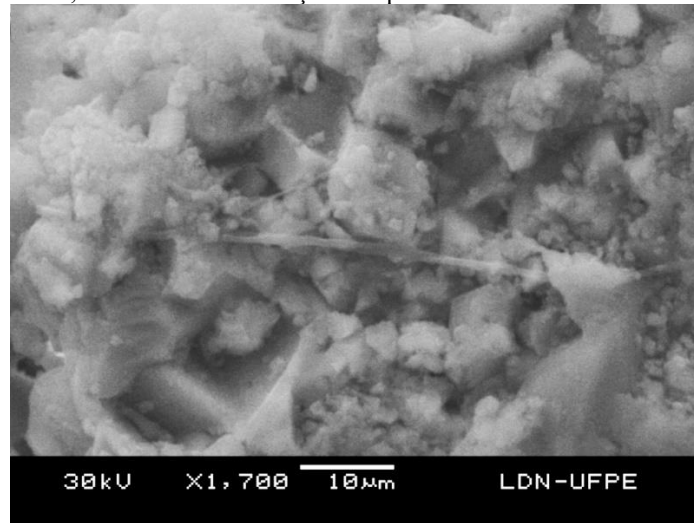
Figura 46 - Micrografias da petrofácies CLCCV. A, B e C) nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente, da mesma região. Observa-se o aspecto ondulado da laminação, com lâminas essencialmente compostas de micrito, e lâminas escuras ricas em matéria orgânica (esteiras algálicas) e sulfetos. A pouca porosidade está relacionada a dissolução de partículas orgânicas. A matriz apresenta luminescência amarelo-alaranjado (Mn), a marrom, onde a calcita micrítica é mais ferrosa. D) Detalhe da laminação ondulada, com lâminas escuras, e formação de pirita framboidal. E) Detalhe dos cristais de pirita euédricos, formados na co-diagênese. F) Fragmento de matéria orgânica, algas (cianobactérias?), onde ocorreu processo de sulfetização.



Fonte: A autora (2020).

Petrofácies CLCD (Calcário Laminado Cinza com Dissolução): Essa petrofácies apresenta uma dissolução intracristalina e intercristalina bastante evidente em imagens de MEV (Figura 47), e em análise petrográfica é possível observar que a dissolução ocorre de forma preferencial na horizontal em lâminas ricas em matéria orgânica formando porosidade do tipo fenestral. No entanto, esse aspecto ocorre em menor proporção que na petrofácies CLA, encontradas nos calcários laminados de coloração creme a bege amarelada (Figura 48).

Figura 47 - Imagem backscatter em escala de cinza mostrando uma lâmina com microporosidade secundária intercrystalina e intracrystalina, mostrando a dissolução completa do romboedro de calcita e filamentos algálicos.



Fonte: A autora (2020).

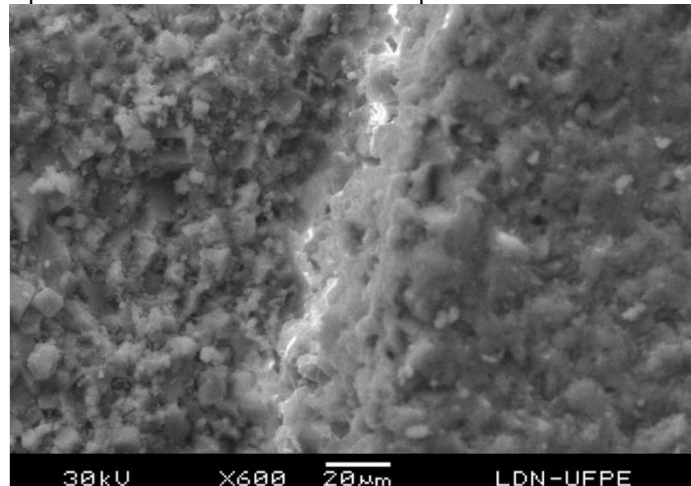
Figura 48 - Micrografias da mesma região, referentes a petrofácies CLCD. A) Algumas lâminas apresentam a formação de poros e microporos alongados a partir da dissolução de níveis de matéria orgânica, devido a circulação tardia de fluídos. A dissolução também foi acompanhada pela precipitação de óxidos, que aparecem com a coloração escura na CL.



Fonte: A autora (2020).

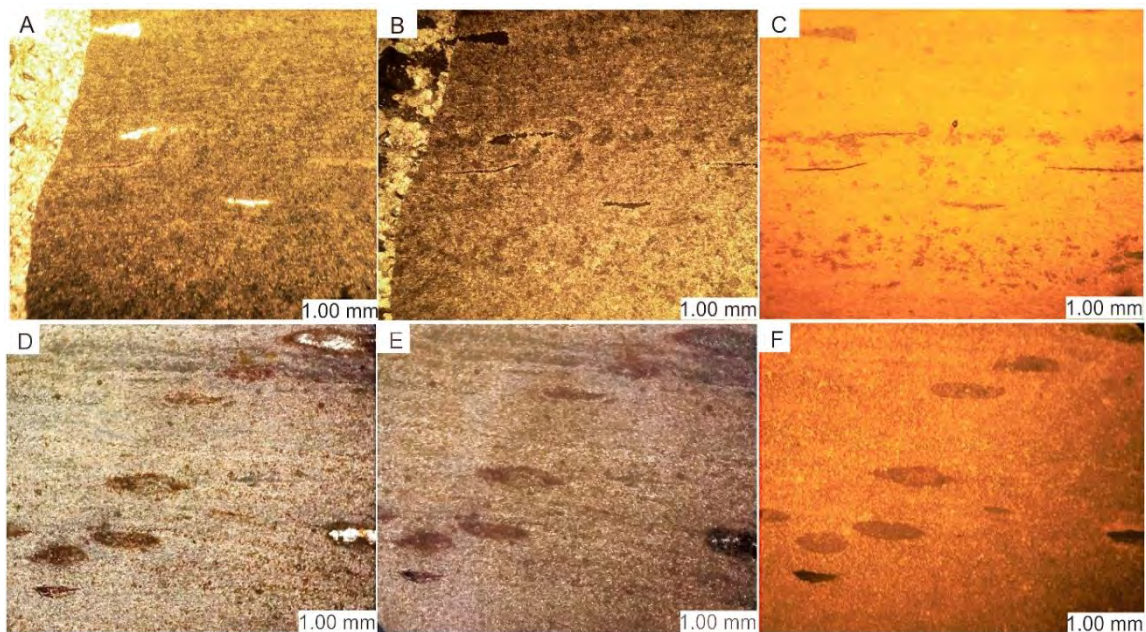
Petrofácies CLCVUG (Calcário Laminado Cinza com *Vugs*): Esta petrofácies é pouco frequente e é caracterizada pela porosidade vugular relacionada a fraturas (*fratura-vug*) e em menor proporção porosidade vugular formada em bioclastos, carapaças de ostracodes, e móldica em partículas de matéria orgânica (LUCIA, 1995) (Figura 49 e 50). A formação de micro-vugs conforme discutido acima, para a petrofácies CLAVUG (Calcário Laminado Amarelo com *Vugs*), ocorre em lâminas com maior concentração de partículas bioclásticas, o que sugere o controle de condições ambientais no processo de deposição e na formação de heterogeneidade de microescala com efeito no controle de fluxo de fluídos.

Figura 49 - Imagem backscatter em escala de cinza mostrando a porosidade vulgular do tipo fratura-vug, também apresenta porosidade do tipo intercristalina e intracristalina da petrofácies CLCVUG.



Fonte: A autora (2020).

Figura 50 - Micrografias da mesma região, referentes a petrofácies CLCVUG. A, B, C, D, E e F) nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente. Observa-se as laminações, que sob a CL apresentam coloração vermelho alaranjado a laranja. A petrofácies apresenta uma alta frequência de ocorrência de fraturas preenchidas por calcita, consideradas como regiões próprias a alta circulação de fluidos. Essa petrofácies também apresenta uma grande quantidade de partículas orgânicas, compostas por carapaças de ostracodes e fragmentos de algas apresentam sulfetização e oxidação tardia. De forma geral essas partículas passaram por um processo de micritização e sua dissolução tardia permitiu a formação de poros, em geral isolados (porosidade vulgular intrafossilífera).

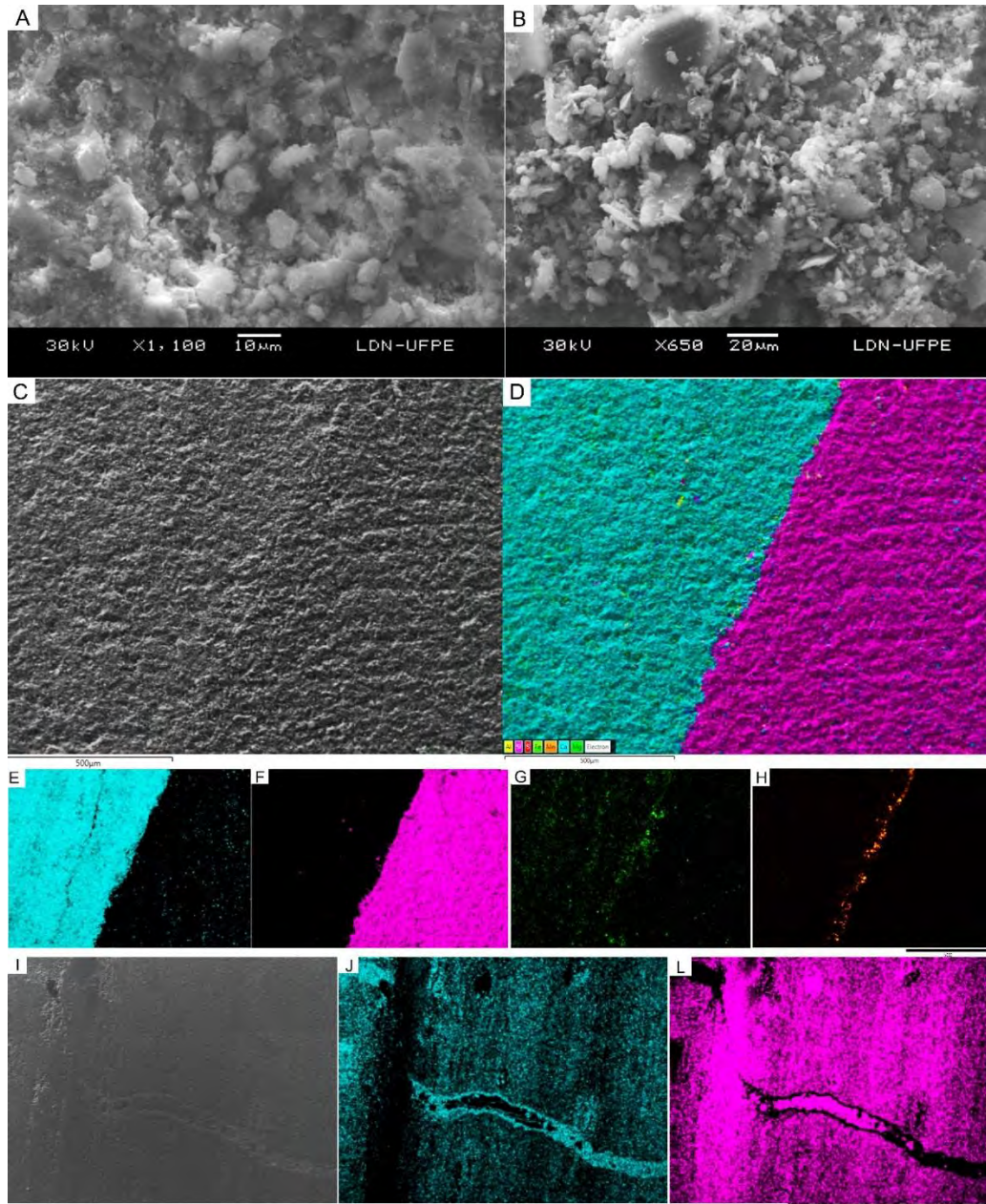


Fonte: A autora (2020).

Petrofácies CLCCON (Calcário Laminado Cinza com Concreção): Essa petrofácies apresenta muito pouca ou nenhuma porosidade primária, devido ao processo de cimentação precoce que deu origem as estruturas. Esta cimentação, envolveu também a precipitação de sílica microcristalina em grande quantidade na região da concreção, calcita e de pirita no espaço intercristalino, a presença destes minerais podem indicar reações de metanogênicas oxidantes

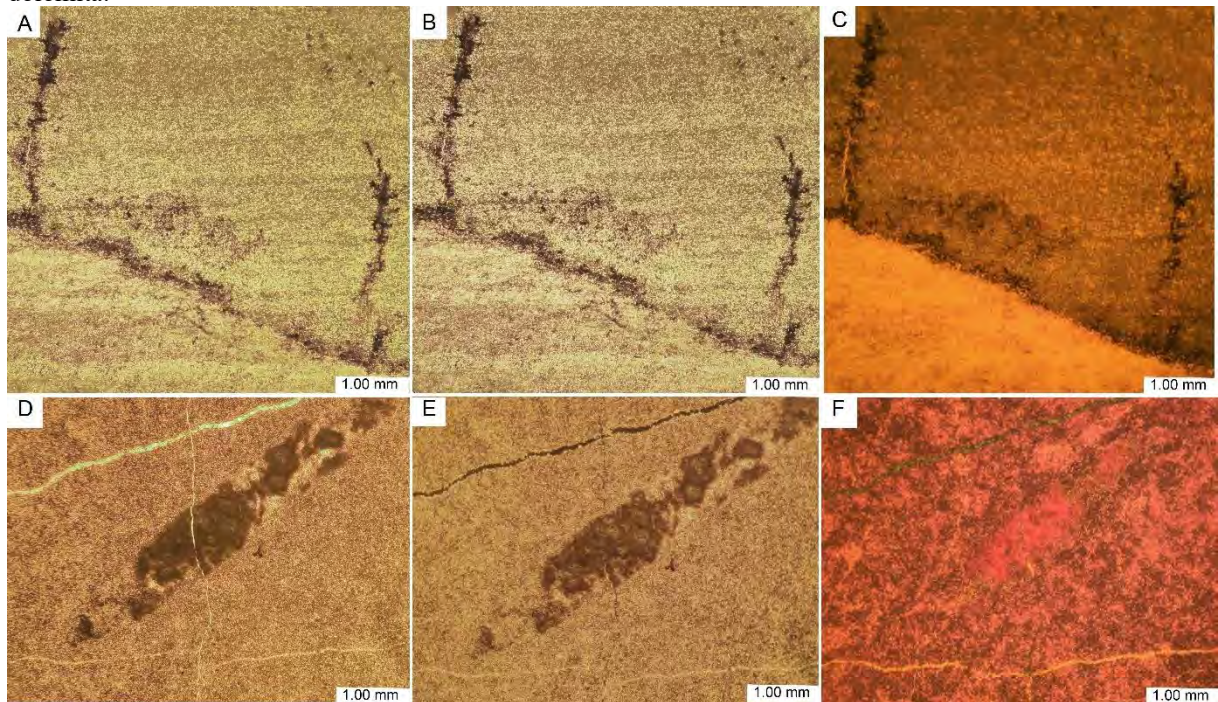
(RAISWEL, 1987, LIU et al., 2019). As concreções desta petrofácies podem ser classificadas como Tipo A, de acordo com Marshall & Pirrie (2013). A petrofácies CLCCON demonstrou uma maior influência da cimentação por sílica que a petrofácies CLACON. É notável a diferença entre o processo de cimentação por sílica na concreção, comparada a cimentação no laminito, que é predominantemente por calcita microcristalina. No laminito é observada pouca ou nenhuma influência de cimentação por sílica, exceto em lâminas sobrepostas e sotopostas as concreções, e, portanto, maior porosidade e menor rigidez. Além do processo diagenético de precipitação da sílica nas concreções, também é possível observar a substituição da calcita microcristalina por sílica microcristalina, preservando a forma original dos cristais de calcita na concreção. A alta concentração de partículas biogênicas possivelmente contribuiu para o desenvolvimento de processos que permitiu a cimentação precoce local, que deu origem as estruturas dentro de conjuntos específicos de lâminas na sucessão (RAISWEL, 1987, MCBRIDE et al., 2003, LIU et al., 2019, HESSE et al., 2019) (Figura 51). A petrofácies como observada na Figura 53, demonstra também uma maior constituição ou preservação de agentes biogênicos na sua formação, sendo observado microrganismos retrabalhados e deformados em algumas regiões da amostra TCLW3, assim como identificados nos laminitos do estudo de Catto et al. (2016) e Warren et al. (2017). A interface entre os laminitos compactados e a região da concreção na petrofácies CLCCON apresentam normalmente dendritos manganês e ferro, que bordejam a estrutura da concreção e pode ser apresentar de maneira perpendicular ao acamamento dos laminitos, esta evidencia não é observada na petrofácies CLACON. Devido à alta rigidez da concreção, processo de fraturamento (fraturas septárias) é bastante comum e se concentraram nos conjuntos de camada portadores de concreções, nesta petrofácies as estruturas representam a porosidade secundária (Figura 52). É possível observar através da catodoluminescência três tipos de preenchimento de veios; veios preenchidos por calcita rica em Mn com alta luminescência, veios preenchidos por sílica com baixa luminescência, e ainda veios preenchidos inicialmente por calcita, posteriormente foram dissolvidos e usados como condutos para circulação de fluidos ricos em sílica, deixando assim registrados os dois tipos de preenchimento. As concreções nesta petrofácies apresentam uma baixa luminescência mostrando uma coloração vermelho escuro na Figura 52F, cimentação por dolomita, gerado pela circulação de fluidos tardios e ainda mais baixa luminescência mostrando coloração marrom, indicado cimentação por sílica na matriz. É observada uma vasta quantidade de conteúdo fóssilífero formado principalmente por ostracodes, peletes fecais e matéria orgânica sulfetizada.

Figura 51 - Análise da petrofácies CLCCON pelo MEV/EDS. A) Imagem Backscatter da petrofácies CLCCON indicando uma matriz micrítica dominada por cristais maiores de calcita, com cimento constituído por sílica e pirita framboidal preenchendo a porosidade da rocha. B) Imagem Backscatter em escala de cinza mostrando material biogênico (cocólitos) retrabalhados e deformados C) Imagem Backscatter em escala de cinza interface laminito-concreção. D) Mapa de distribuição de elementos químicos Ca e Si, interface laminito-concreção, a imagem mostra o laminito composto essencialmente por calcita (cor azul) e concreção com uma intensa cimentação por sílica (cor rosa). Mapa de distribuição individual dos elementos químicos E) Ca, F) Si, G) Fe e H) Mn, mostrando que a interface laminito-concreção apresenta óxidos de manganês e ferro que bordejam a concreção ou apresentam-se perpendiculares ao laminito. I) Imagem Backscatter do veio de calcita-sílica no interior da concreção. Mapas de distribuição dos elementos J) Ca e L) Si mostrando que houve inicialmente uma fratura preenchida por calcita, e posteriormente foi dissolvido e serviu como meio de percolação de um fluido rico em sílica.



Fonte: A autora (2020).

Figura 52 - A, B e C) Micrografias da interface entre lâminas compactadas normalmente, a direita, e o interior de uma concreção onde a compactação foi reduzida pela cimentação precoce do espaço poroso inicial - nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente. Sob a CL é possível ver a interface entre o interior da concreção, onde a matriz micrítica apresenta coloração laranja-amarelada, e os laminitos compactados normalmente ao redor da concreção, com coloração marrom avermelhada. O contorno da concreção exibe um halo de oxidação, formado pela oxidação de cristais de pirita. Na interfície entre a concreção-laminito é formado uma fina película óxidos de manganês e ferro, ou formados perpendiculares ao laminito. D, E e F), Detalhe do interior da concreção, nicóis paralelos, nicóis cruzados e CL, respectivamente. Observa-se a matriz de cor laranja-avermelhada, com veios de calcita de cor alaranjada (Mn) e veios de sílica de cor marrom, tardios, devido a deformação mecânica. A região no centro da micrografia exibe uma região com coloração vermelha o que sugere a formação de cimento de dolomita.



Fonte: A autora (2020).

3.2.2 Resistência mecânica das petrofácies - Teste de compressão uniaxial e *Schmidt Hammer*

A resistência mecânica das petrofácies foi obtida através dos perfis levantados com esclerômetro (*Schmidt Hammer*) tipo N nos perfis estratigráficos e através de ensaios de compressão uniaxial não confinada em plugues de laminitos.

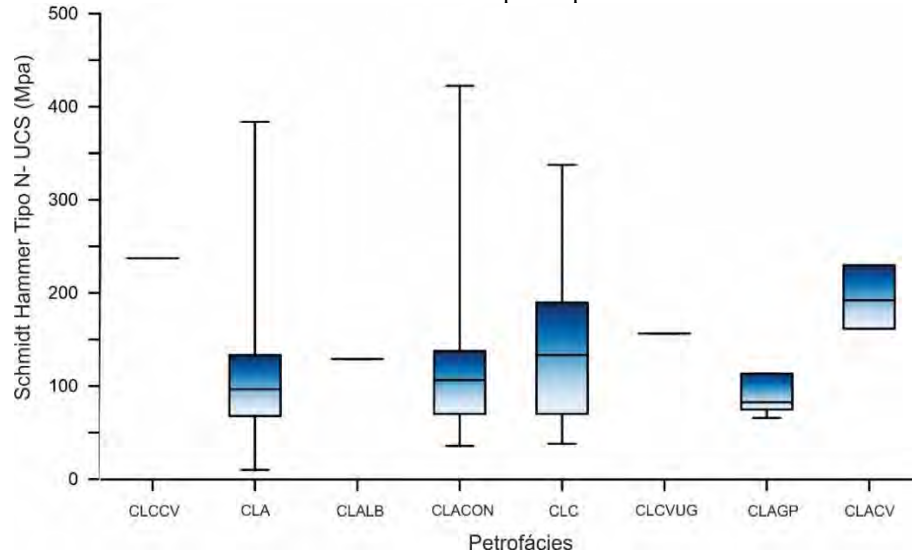
Os dados de rebote (Q) foram adquiridos para as petrofácies CLA, CLACV, CLACON, CLALB, CLAGP, CLC, CLCCV e CLCVUG nos perfis levantados nos afloramentos. A resistência mecânica destas petrofácies apresentam um valor médio de 120,9 Mpa, esses valores são relativamente mais altos do que os valores descritos na literatura para rochas calcárias (PERRAS & DIEDERICHS, 2011; KATZ et al, 2000; BUYUKSAGIS & GOKTAN, 2007; AYDIN & BASU 2005).

O grupo G1 de petrofácies CLA (laminitos amarelos), apresentou valor médio de 107,05 Mpa, com valor máximo obtido em regiões próximas a petrofácies portadora de concreções

(CLACON) de 384,07 Mpa, e valor mínimo de 10 Mpa próximo a petrofácies com processo de dissolução (CLAD). A grande variação de resistência mecânica deste grupo pode estar relacionada a ocorrência de zonas que sofreram alteração diagenética local (cimentação e substituição por sílica) e compactação diferencial, ou a ação de processos diagenéticos tardios, como dissolução (Figura 53).

No entanto, petrofácies como CLA, CLALB, CLACV, CLAGP, CLACON, CLC, CLCCV e CLCVUG geralmente apresentam valores médios a altos de resistência: a petrofácies CLALB apresentou um único valor no perfil do pseudo-poço 2 de 129,3 Mpa; a petrofácies CLACV apresentou valor médio de 194,216 Mpa, mediana de 192,4 Mpa, e um valor máximo de 230 Mpa e valor mínimo de 161 Mpa; a petrofácies CLAGP apresentou valor médio de 86,5 Mpa, mediana de 83,5 Mpa, um valor máximo de 113 Mpa e valor mínimo de 66 Mpa; a petrofácies CLACON apresentou valor médio de 154,7 Mpa, mediana de 106,8 Mpa, e um valor máximo obtido de 422 Mpa. Nesta petrofácies foi identificado um valor mínimo de 35 Mpa relacionado a uma área de alteração tardia, dissolução, em uma concreção (Figura 53); a petrofácies CLC apresentou valor médio de 140 Mpa, mediana de 133,6 Mpa e um valor máximo de 337 Mpa em regiões próximas a petrofácies portadoras de concreções (CLCCON), e um valor mínimo de 38,35 Mpa próximo a petrofácies com processo de dissolução (CLCD); a petrofácies CLA apresentou valor médio 107,6 Mpa, mediana de 97,01 Mpa, um valor máximo de 384 Mpa e um valor mínimo de 10 Mpa. A petrofácies do grupo G1 (CLC) apresenta uma predominância de médios a altos valores de resistência mecânica; a petrofácies CLCCV apresentou no perfil do pseudo-poço 1 o valor de 237,8 Mpa; e a petrofácies CLCVUG apresentou no perfil do pseudo-poço 1 o valor de 156,7 Mpa (Figura 53).

Figura 53 - Relação de valores de resistência mecânica UCS (Mpa) obtidos nos perfis estratigráficos com esclerômetro (Schmidt Hammer tipo N) para as petrofácies CLC, CLA, CLCCV, CLALB, CLACON, CLCVUG, CLAGP e CLACV. As petrofácies que apresentam maiores valores de UCS estão relacionadas a estruturas como concreções e laminações convolutas. O grupo de petrofácies de laminitos amarelos CLA apresenta valores altos a médios de UCS, e altos valores de associados a proximidade com zonas portadoras de concreções e laminações convolutas. O grupo de petrofácies de laminitos cinza CLC apresenta uma predominância de valores médios a altos de resistência. Os valores mais altos de resistência nesta petrofácies está relacionado a regiões próximas a níveis portadores de concreções relativos as petrofácies CLCCON. As petrofácies CLAGP, CLALB e CLCVUG apresentam valores médios de UCS. A barra central no box-plot representa a mediana dos valores da petrofácies.



Fonte: A autora (2020)

Já os dados de compressão uniaxial obtidos através de ensaios laboratoriais em plugues das petrofácies CLA, CLC, CLCCON e CLCCV, apresentaram um valor médio de UCS de 56,34 Mpa, valor similar ao que é descrito pela literatura para rochas calcárias (KATZ et al., 2000; AYDIN & BASU, 2005; BUYUKSAGIS & GOKTAN, 2007; CHESHOMI; SHESHDE, 2013). A Figura 54 apresenta os resultados dos ensaios de compressão uniaxial para as amostras das petrofácies analisadas. A resposta tensão deformação é analisada em termos da relação entre a tensão desviadora aplicada às amostras e a deformação axial medida. Na Figura 54A, estão mostrados os resultados para os diferentes tipos de petrofácies, onde observa-se uma variação no padrão de resposta tensão deformação entre elas. As leituras, para todos os ensaios, são descontinuadas quando o material chega à completa ruptura acompanhada da desestruturação da amostra. De uma forma geral os materiais apresentam uma resposta elástica inicial até atingirem uma mudança na curva para valores limites de tensão. Em algumas das amostras observa-se a interrupção do trecho elástico pela presença de pontos de inflexão, mudando-se a curva no sentido de um alívio da

tensão, porém seguindo de um aumento das deformações. Este tipo de resposta pode ser observado em algumas das amostras de calcário laminado cinza (Figura 54) e em uma amostra do amarelo (Figura 54B), bem como no cinza com convolução (Figura 54E). Este tipo de resposta indica que o material iniciou, a partir de uma tensão limite, um processo de

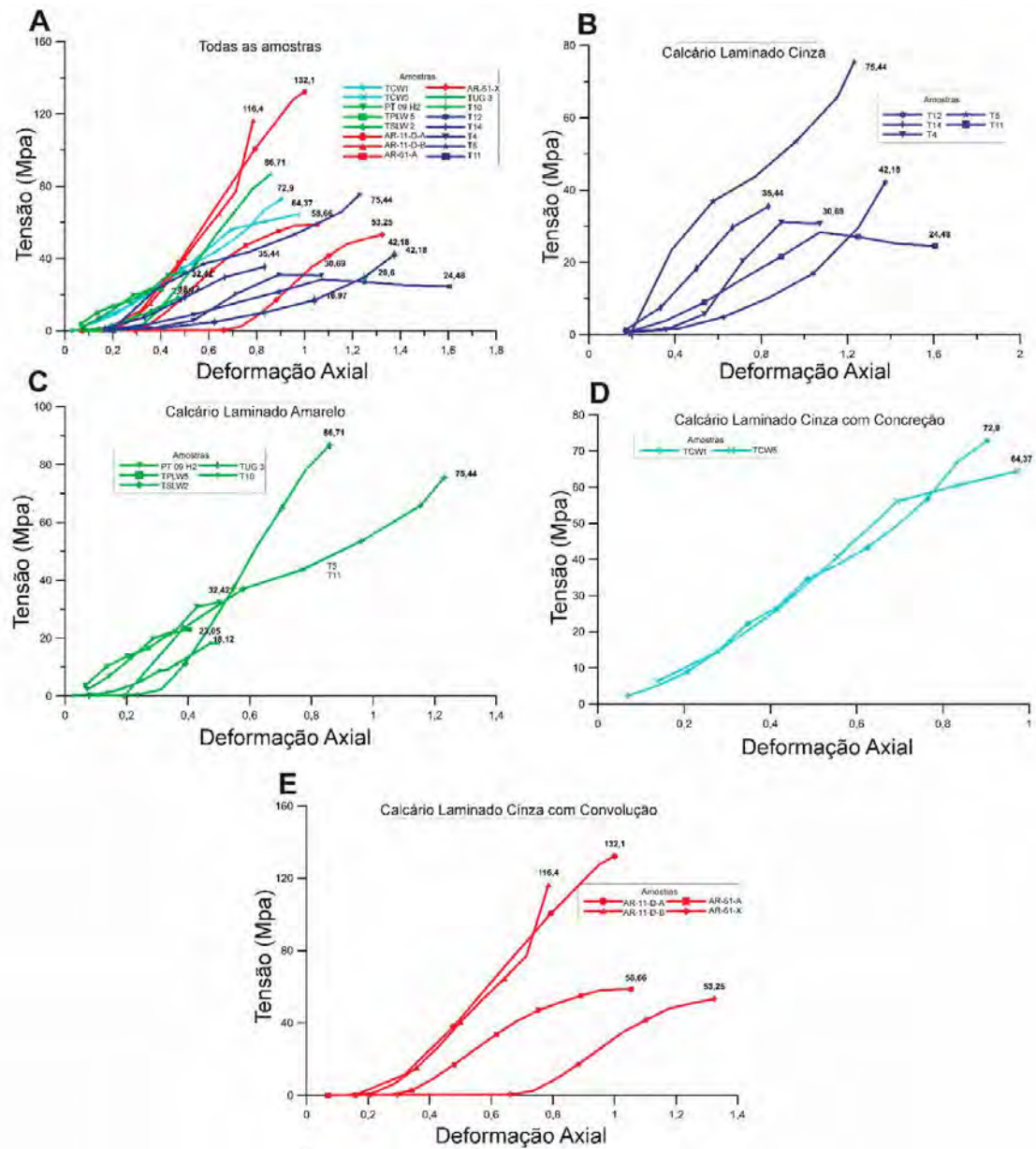
plastificação ou de dano mecânico levando à formação de zonas de cisalhamento ou de micro fraturas que se desenvolvem internamente como resposta de um processo de deformações inelásticas (irreversíveis). Neste caso, essas zonas promovem uma redução da resistência mecânica do material o que implica na tendência de declive da curva após um trecho de pico. Quando este declive é bem pronunciado, pode-se indicar uma resposta de *softening* (abrandamento) do material, caracterizando-se bem a redistribuição de tensão pós ruptura. Neste caso, a rocha apresenta um comportamento frágil-dúctil, onde especificamente estas se mostram mais deformáveis, onde durante o período de deformações inelásticas as propriedades mecânicas resistentes (coesão, ângulo de atrito, módulo de elasticidade) tendem a ser alteradas e reduzidas, para o caso de *softening* em virtude das zonas internas de cisalhamento e/ou de formação de microfraturas.

Para as situações em que este tipo de resposta não foi observada, pode-se inferir a existência de alguma característica ou heterogeneidade na amostra que leva à amostra de rocha admitir limites de tensão maiores como observado no calcário cinza com concreção (Figura 54D), no cinza com convolução (duas das amostras) e uma do calcário amarelo. O calcário cinza com concreção e na amostra TUG-3 do amarelo, pode-se observar uma maior tensão de pico e maior deformação. Este mais alto valor para o plugue TUG-3, de 86,71 Mpa, possivelmente está relacionado a presença de conjuntos de lâminas pertencente a petrofácies CLC. Estas são amostras de maior resistência à deformação, devido a presença de cimentação precoce de sílica microcristalina ou pseudo-morfismo dos cristais de calcita (substituição por sílica) nesta petrofácies modificou a rigidez da rocha e reduziu dramaticamente a porosidade (RAISWEL, 1987, MCBRIDE et al., 2003, LIU et al., 2019, HESSE et al., 2019). Deve-se considerar a possibilidade da influência, no processo deformacional, de estruturas de descontinuidade ou heterogeneidades mecânicas internas às amostras que podem afetar diretamente na resposta tensão deformação. Observa-se que num trecho inicial, para algumas amostras, a ascensão da curva se dá de forma mais tardia que em outras, podendo estar relacionada à acomodação do conjunto amostra/equipamento, bem como pelo fechamento de micro fraturas. A microporosidade também pode ter um efeito determinante neste ponto, em especial em algumas das amostras que apresentam uma mudança da curva no sentido de um aumento da tensão admitida com uma redução na taxa de aumento da deformação, o que estaria relacionado a um aparente ganho de resistência durante o processo deformacional. O ganho de resistência pode estar associado ao aumento da rigidez do material em virtude de um rearranjo microestrutural proveniente do colapso dos poros ou microporos, como também fechamento de micro fraturas.

Por fim, observa-se claramente grupos de respostas tensão deformação distintos, evidenciando a variação de competência mecânica do laminito da Fm. Crato, através das suas distintas petrofácies, o que implica na importante verificação de uma heterogeneidade geomecânica da rocha que, em uma primeira vista, pode ser compreendida como lateralmente homogênea.

A adoção de um número maior de amostras e respectivos ensaios para cada petrofície pode levar a um panorama mais conclusivo, especialmente contemplando um estudo estatístico sobre os dados. Os dados de resistência mecânica obtidos através das análises de UCS, levantados em campo e em ensaios laboratoriais apresentaram respostas semelhantes para as petrofácies CLA, CLC e CLACON.

Figura 54 – Gráficos de tensão deformação axial das petrofácies. A) Gráfico tensão x deformação axial de todas os plugues analisados das petrofácies. B) Gráfico tensão x deformação axial da petrofácies CLA, apresentando baixos valores de tensão. C) Gráfico tensão x deformação axial da petrofácies CLC, mostrando médios a altos valores de deformação. D) Gráfico tensão x deformação axial CLCCON, mostrando altos valores de deformação. E) Gráfico tensão x deformação axial CLCCV mostrando os mais altos valores de tensão.



Fonte: A autora (2020).

3.3 DESCRIÇÃO DOS PSEUDO-POÇOS

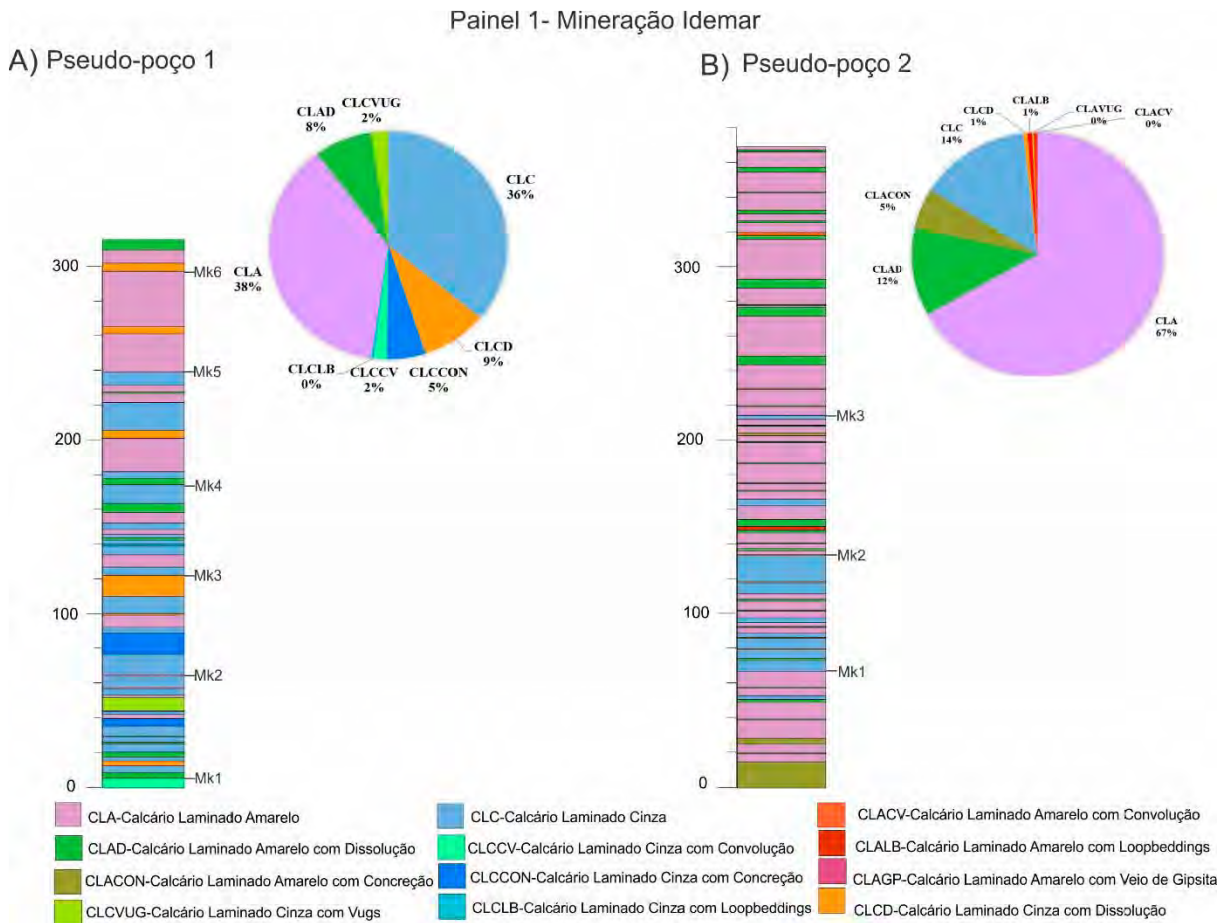
A seguir será detalhada a descrição dos pseudo-poços executados.

3.3.1 Pseudo-Poço 1 e Pseudo-Poço 2 - Painei 1

Na Mineração Idemar foram executados dois perfis estratigráficos denominados de Poço 1 e Poço 2 do Painei 1, com 3,14 e 3,65 m de altura, respectivamente. O pseudo-poço 1 está localizado na coordenada 24M 9212566,604 E /422439,760 S, e encontra-se na cota 500,181 m, e o pseudo-poço 2 está localizado na coordenada 24 M 9212560,649 E/ 422432,839 S, na cota 499,884 no Painei 1. A descrição da sucessão de depósitos neste perfil, considerando a classificação de petrofácies descrita acima, permitiu identificar a ocorrência de oito petrofácies, classificadas em ordem decrescente de frequência em relação a espessura total da seção: CLA (38%); CLC (36%); CLCD (9%); CLAD (8%); CLCCON (5%); CLCVUG (2%); CLCCV (2%) e CLCLB (<1%) (Figura 55A). A espessura média de cada petrofácies neste pseudo-poço foi de: CLA (8,7 cm); CLC (5,65 cm); CLCD (4,71 cm); CLAD (2,7 cm); CLCCON (8,25 cm); CLCVUG (7,4 cm); CLCCV (5,5 cm) e CLCLB (1 cm) (Figura 56A).

O perfil do poço 2 está localizado na coordenada 24M 9212560,649 E/ 422432,839 S, na cota 499,834 m, a uma distância de 9,95 m do poço 1. Neste perfil foram identificadas oito petrofácies, classificadas em ordem decrescente de predominância em relação a espessura total da seção: CLA (67%); CLC (14%); CLAD (12%); CLACON (5%); CLALB (1%); CLCD (1%); CLAVUG (<1%) e CLACV (<1%) (Figura 55B). A espessura média de cada petrofácies neste pseudo-poço foi: CLA (6,98 cm); CLC (5,0 cm); CLAD (1,5 cm); CLACON (6,5 cm); CLALB (2,2 cm); CLCD (0,5 cm); CLAVUG (0,5 cm) e CLACV (1,9 cm) (Figura 56B).

Figura 55. Perfil de petrofácies na sucessão dos pseudo-poços executados no painel 1- Mina Idemar (o código de cores e siglas se refere a classificação descrita no item 3.1). Os gráficos abaixo mostram a distribuição percentual das petrofácies identificadas em cada poço em relação a espessura total da seção.

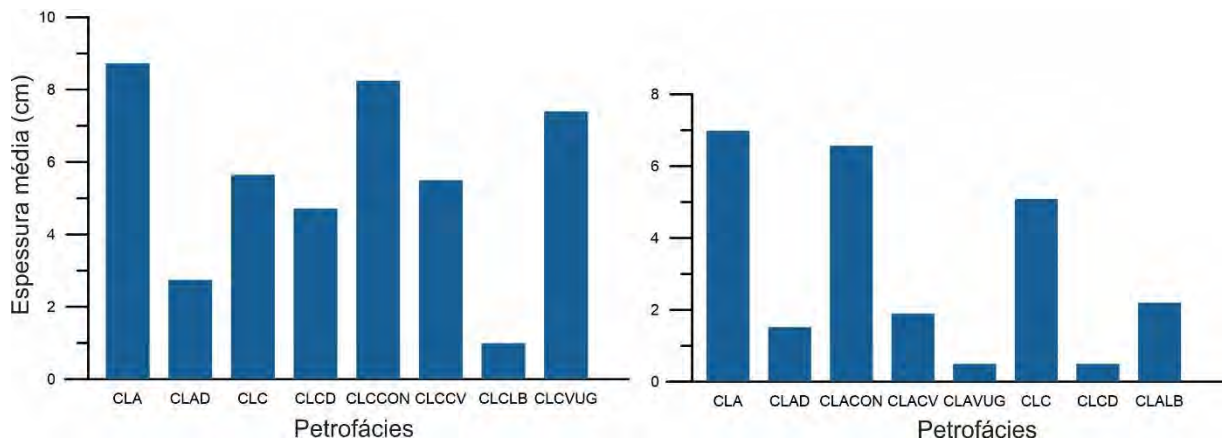


Fonte: A autora (2020).

Algumas petrofácies identificadas nos pseudo-poços 1 e 2 do painel 1 apresentam uma certa continuidade lateral, e eventualmente ocorrem nos dois poços. As petrofácies CLA e CLC apresentam-se de forma cíclica, geralmente intercaladas por níveis de petrofácies caracterizadas por processo de dissolução CLAD e CLCD, respectivamente. Na base dos perfis ocorre uma boa continuidade lateral das petrofácies relacionadas a presença de concreções (CLACON e CLCCON), e a petrofácies CLC. Em ambos as petrofácies portadoras de feições de loop beddings (CLCLB e CLALB) só estão presentes acima 1,20 m de altura, a partir da base dos poços. Na parte superior dos perfis a petrofácies CLC ocorrem com menor frequência, e ocorre aumento na frequência e na espessura dos níveis das petrofácies CLA e CLAD. A petrofácies CLC está relacionada a concentrações de pirita, que ocorre de forma pouco frequente nas petrofácies CLA e CLCD. A ocorrência de agregados de cristais de pirita formando

concentrações com grande continuidade lateral de dezenas de centímetros a metros, foi observada no painel 1, aparece nos pseudo-poços 1 e 2 do Painel 1.

Figura 56 - Gráfico da espessura média de cada petrofácies por perfil nos pseudo-poços 1 e 2. A) Espessura média das petrofácies identificadas no pseudo-poço 1, B) Espessura média das petrofácies identificadas no pseudo-poço 2.



Fonte: A autora (2020).

No pseudo-poço 1 foram identificadas estruturas rúpteis sin e pós-deposicionais, como: *shear fracture* (fratura de cisalhamento), veios verticais preenchidos por calcita e estilólitos. O pseudo-poço 1 apresenta apenas uma *shear fracture* que cortou a petrofácies CLCD, com direção NW-SE e mergulho de baixo ângulo (20°/232 Az). Esta *shear fracture*, apresenta característica padrão destas feições nos laminitos da Formação Crato, apresenta rejeito milimétrico a centimétrico, e cimentada. Esta *shear fracture* ocorre a aproximadamente 1,30 m de altura no perfil. No perfil também foram encontrados dois veios verticais preenchidos por calcita com 0,050 mm de espessura e direção NE-SW, contidos em lâminas classificadas como petrofácies CLC. Acima deste, próximo ao nível de referência MK2 (0,40 m a 0,80 m no poço 1), foi observada a presença de um veio com 0,115 mm de espessura e direção NW-SE, contido em conjuntos de laminações classificadas como petrofácies CLC. Abaixo do nível de referência MK3, contidos em conjuntos de laminações classificadas como petrofácies CLC e CLCD, há dois veios, um veio subvertical (60°) com direção NE-SW e 0,05 mm de espessura, e outro com 0,075 mm e direção NNW-SSE. Também no poço 1, foram observados seis estilólitos verticais, dois na base do poço, localizados acima da petrofácies CLCCV com direção NW-SE; três acima da altura de 0,40 m. Uma ocorrência de estilólito foi encontrada abaixo do nível de referência MK4 confinado a petrofácies CLC (Figura 57).

No pseudo-poço 2 foram identificadas estruturas rúpteis, *shear fractures* e veios. Foi encontrada uma *shear fracture* que cortou a petrofácies CLA, com direção NW-SE e mergulho

moderado (40°/70Az), localizada no perfil a aproximadamente 3,0 a partir da base. Na base do poço, contidos na petrofácies CLACON também foram encontrados cinco veios de calcita de comprimento centimétrico, localizados entre 0,40 e 1,38 m de altura. Ao longo do perfil do poço foi encontrado um veio de calcita contínuo que possui espessura variando de 0,95 a 1,75 mm, com 80° a 88° de intensidade de mergulho, e direção NW-SE. Foram encontrados três estilólitos a aproximadamente 0,40 m de altura no poço 2, confinados a um conjunto de lâminas classificados como petrofácies CLA. Estes ocorrem acima de níveis com concreção em laminações classificadas como a petrofácies CLACON (Figura 58).

3.3.1.1 Perfis de Gamaespectrometria Pseudo-Poço 1 e 2 do Painel 1

Para os pseudo-poços 1 e 2 do painel 1 foram realizados perfis de Contagem Total de gamaespectrometria (cpm), e os perfis com a extração de dados por canais de K (%), Th (ppm) e U (ppm). As leituras para a realização dos perfis foram feitas com um espaçamento de 15 cm. No pseudo-poço 1 os valores de contagem de gama total variam de 1138,7 a 451,6 cpm, enquanto no pseudo-poço 2 variam de 1291,3 a 531,4 cpm. Os perfis apresentaram uma tendência semelhante das curvas, da base para o topo da seção. A contagem total é maior na base do perfil, e tende a diminuir de forma gradual até aproximadamente 1,00-1,40 m nos poços. A partir desta altura as curvas apresentam um patamar de valores, e uma leve redução no topo. Os perfis de K e Th apresentam uma tendência similar ao que foi observado na curva de contagem total para o pseudo-poço 1. Porém, com concentrações muito baixas para K (0,5 a 0,2 %) e Th (0,9 - 3,6 ppm). O perfil de U apresenta pequenas oscilações, com valores mais altos, 1 a 0,6 ppm, encontrados no intervalo de aproximadamente 0 a 0,80 m de altura, e no intervalo 1,40 a 2,20 m. Após este último intervalo as concentrações de U permanecem constantes, com valor médio de 0,5 ppm até 3,00 m (Figura 57).

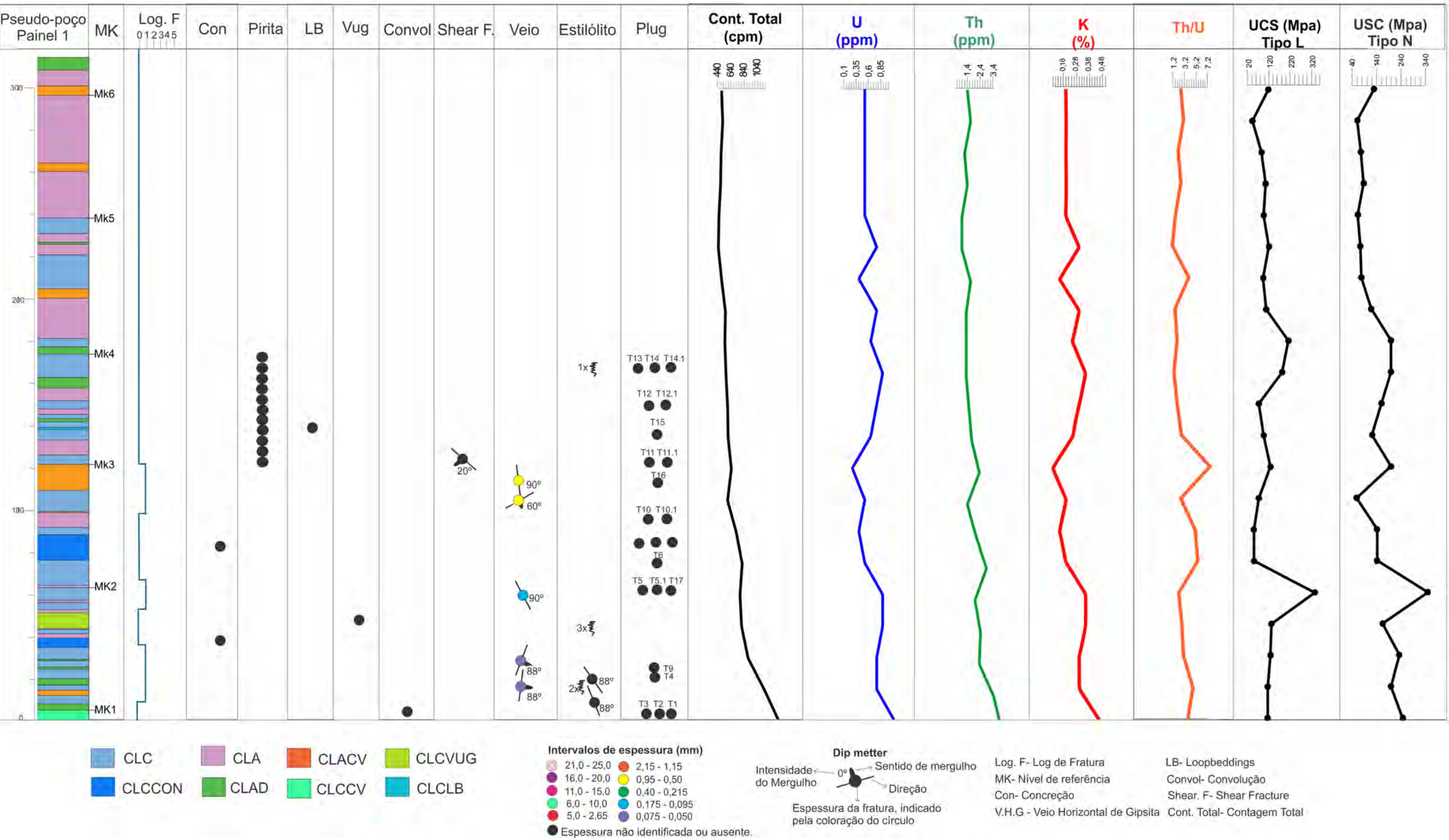
Os perfis de Th e U para o pseudo-poço 2 apresentam uma tendência similar ao que foi verificado para o poço 1 nos perfis de contagem total, com concentrações mais altas na base, que tendem a diminuir para o topo das seções. Enquanto o perfil de concentração de K mostra uma tendência mais linear, com pouca variação nos valores, variando de 0,4 a 0,1 %. As razões Th/U no pseudo-poço 1 variam de 1,28 a 7, e o maior valor da razão encontra-se associado a petrofácies CLCD. No pseudo-poço 2 a razão varia de 1,2 a 13,8, e os valores desta apresentam-se mais baixos na base da seção, e aumentam para o topo em consonância com o aumento da frequência e espessura da petrofácies CLA (Figura 58).

3.3.1.2 Descrição dos perfis de resistência mecânica dos Pseudo-Poços 1 e 2 do Painel 1

Os valores de resistência elástica obtidos pelo *Schmidt Hammer* Tipo L no pseudo-poço 1 apresentaram valores entre 35,1 a 359,4 Mpa, com um valor médio de 117,44 Mpa. Enquanto no perfil executado com o *Schmidt Hammer* Tipo N apresentou valores entre 51,1 e 337,9 Mpa, com um valor médio de 139,35 Mpa. Os perfis levantados com os esclerômetros Tipo L e Tipo N apresentam um comportamento semelhante. Os maiores valores estão presentes na base do perfil e estão relacionados às petrofácies CLCCV, CLCCON e CLC (intervalo de 0 a 1,10 m de altura), valores médios estão relacionados com a petrofácies CLA (intervalo de 1,10 a 2,00 m), e valores relativamente baixos relacionados às petrofácies CLA e CLAD (intervalo de 2,00 a 3,05 m) (Figura 57). As leituras para a realização dos perfis foram feitas com um espaçamento de 15 cm.

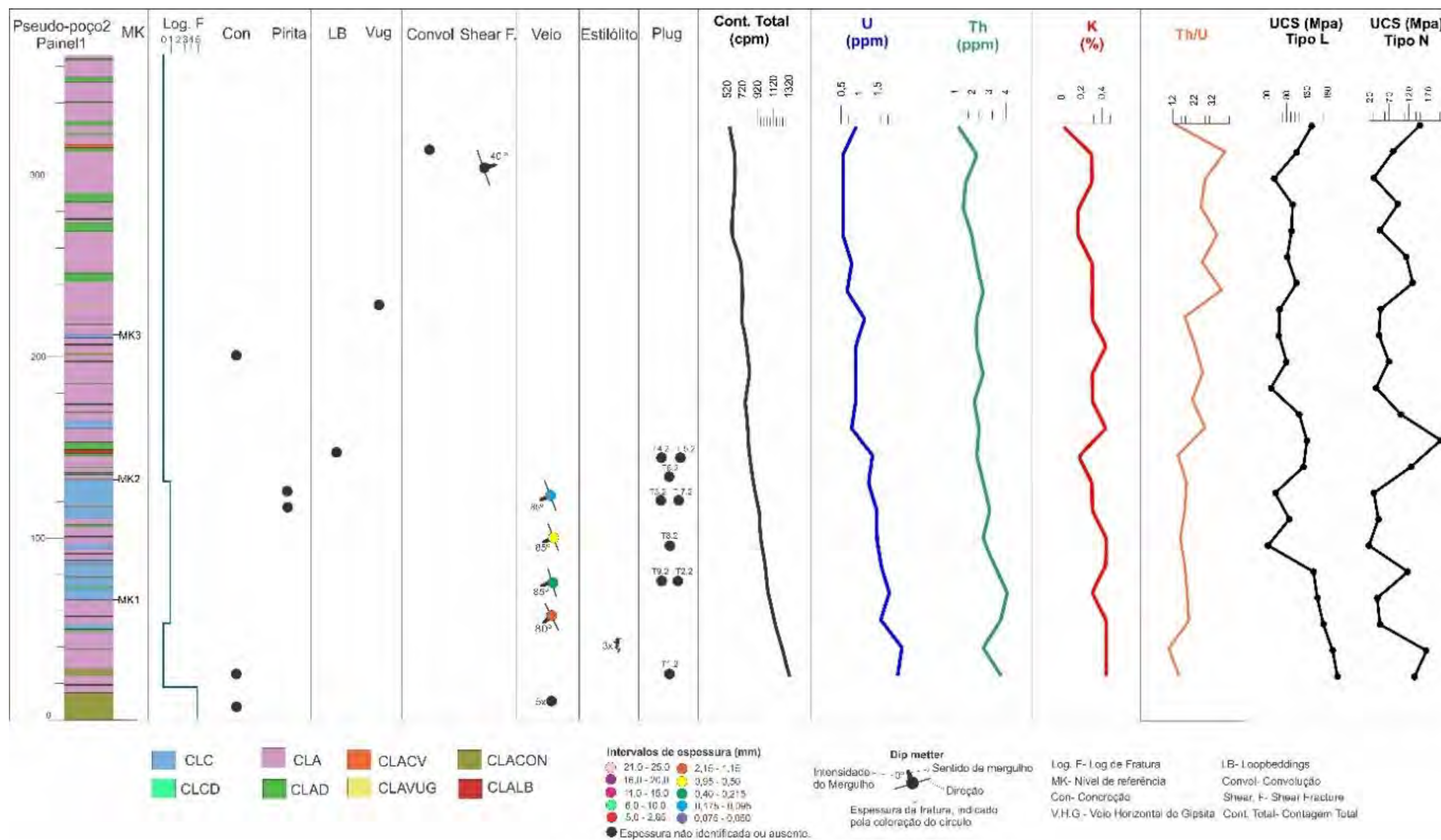
Já os valores de resistência elástica obtidos pelo *Schmidt Hammer* Tipo L para pseudo-poço 2 variaram de 31,9 a 215,8 Mpa, com o valor médio de 108,3 Mpa. Enquanto os valores de resistência no Tipo N variam de 26,1 a 202,5 Mpa, com valor médio de 89,8 Mpa. Os perfis Tipo L e Tipo N também apresentaram curvas com comportamento semelhante. Os maiores valores foram observados na base do perfil, intervalo de 0,25 a 1,00 m, e estão relacionados com a petrofácies CLACON e CLC. Os valores médios a altos, intervalo de 1,30 a 1,80 m, estão relacionados com a petrofácies CLALB e CLA. Valores mais baixos, intervalo de 1,80 a 3,15 m, estão relacionados com a petrofácies CLA e CLAD. A partir da altura de 3,15 ocorreu um aumento nos valores, e este aumento está relacionado com a petrofácies CLACV (Figura 58). As leituras para a realização dos perfis foram feitas com um espaçamento de 15 cm.

Figura 57 - Perfil composto com classificação das petrofácies, localização de estruturas sin e pós-deposicionais, feições diagenéticas, perfis gamaespectrométricos, e perfis de resistência mecânica em UCS (Mpa) para o poço 1 do painel 1.



Fonte: A autora (2020).

Figura 58 - Perfil composto com classificação das petrofácies, localização de estruturas sin e pós-deposicionais, feições diagenéticas, perfis gamaespectrométricos, e perfis de resistência mecânica em UCS (Mpa) para o poço 2 do painel 1.



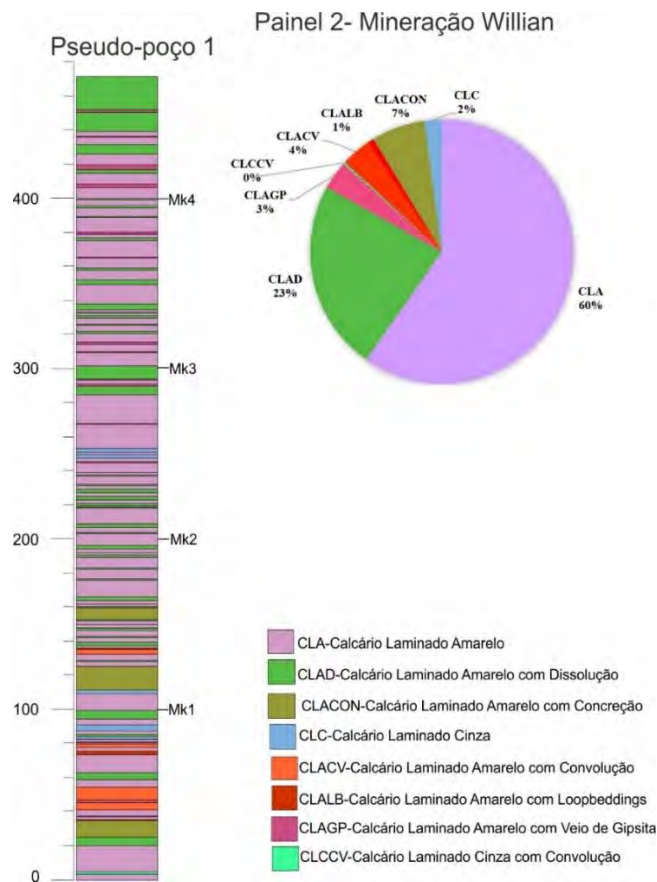
Fonte: A autora (2020).

3.3.2 Descrição do Pseudo-Poço 3 do Painel 2

Na Mina Willian foram realizados a descrição do pseudo-poço 3 com 4,71 m de comprimento e o levantamento do perfil 1, que não contou com uma seção estratigráfica mas apenas perfis de resistência e gamaespectometria, no Painel 2. O pseudo-poço 3 está localizado na coordenada 24M 9213428,140 E/ 422986,786 S, encontra-se na cota 508,248 m, e o perfil localizado na coordenada 24M 9213424,742 E/ 422983,183 S, e encontra-se na coordenada 508,055, no Painel 2. Neste poço foram identificadas oito petrofácies, classificadas em ordem decrescente de frequência em relação a espessura total da seção: CLA (60%); CLAD (23%); CLACON (7%); CLACV (4%); CLAGP (3%); CLCLB (1%); CLC (2%) e CLCCV (< 1%) (Figura 59). A espessura média de cada petrofácies são CLA (4,6 cm); CLAD (2,3 cm); CLACON (10,3 cm); CLACV (4,3 cm); CLAGP (1,0 cm); CLCLB (1,16 cm); CLC (2,0 cm) e CLCCV (1,0 cm) (Figura 60).

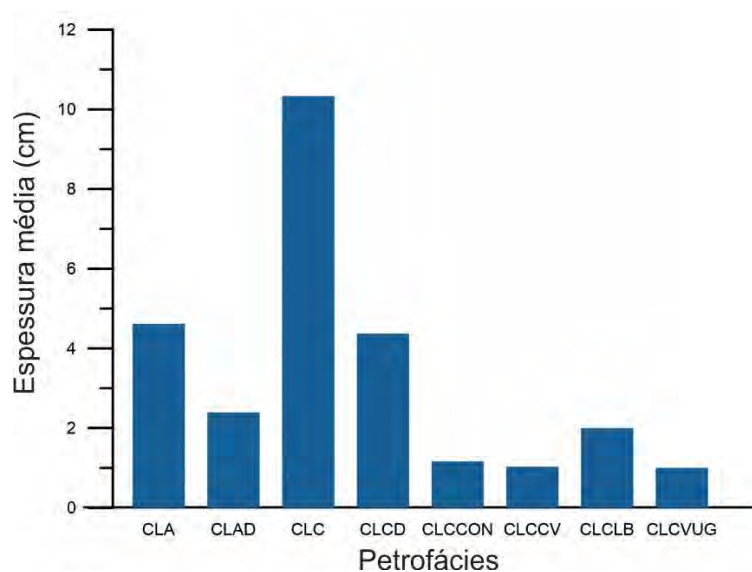
A petrofácies CLA no pseudo-poço apresenta-se de forma cíclica, geralmente intercaladas por níveis com processo de dissolução e veios horizontais preenchidos por gipsita (CLAD e CLAGP). As petrofácies identificadas na porção basal da seção apresentam uma boa continuidade lateral no painel sobre o qual o poço foi descrito. Esta continuidade lateral está relacionada a presença de conjuntos de laminações com concreções e convoluções que compõem as petrofácies CLACON e CLACV. Neste perfil as petrofácies relacionadas ao laminito de coloração cinza, petrofácies CLC apresentam pouquíssima representatividade. Neste poço do Painel 2 conjuntos de laminações portadores de *loop beddings*, petrofácies CLALB, apresentam no máximo 2 cm de espessura e aparecem associados as petrofácies CLACV e CLACON. No topo desta seção a petrofácies CLAGP ocorre com maior frequência, e apresenta maior espessura, da mesma forma como as petrofácies CLA e CLAD.

Figura 59 - Perfil de petrofácies na sucessão do pseudo-poço 3 executados no painel 2- Mina Willian (o código de cores e siglas se refere a classificação descrita no item 3.1). Os gráficos abaixo mostram a distribuição percentual das petrofácies identificadas em no poço em relação a espessura total da seção.



Fonte: A autora (2020).

Figura 60 - Gráfico da espessura média de cada petrofácies nos poços. A) Espessura média das petrofácies identificadas no dos pseudo-poços 3 do Painel 2.



Fonte: A autora (2020).

No pseudo-poço 3 foram identificadas estruturas rúpteis sin e pós-deposicionais, como: shear fracture (fratura de cisalhamento), veios verticais preenchidos por calcita e estilólitos. Neste perfil foi encontrado apenas uma shear fracture que corta as petrofácies CLA, CLAD e CLAGP, com direção ENE-WSW, e apresenta mergulho de baixo ângulo ($20^{\circ}/350$ Az). Esta shear fracture ocorre em aproximadamente 3,80 m de altura na seção. O poço foi localizado em uma região do painel que apresenta clusters de veios preenchidos por calcita recristalizada. Os veios estão despostos em forma de segmentos de tamanhos centimétricos a métricos que cortaram toda a seção do poço. Os veios apresentam uma maior relação com as petrofácies CLACON e CLA, mas estes cortam diversas petrofácies ao longo da seção. Essas estruturas possuem direção preferencial NW-SE e são subverticais a verticais, e a espessura varia de 0,115 a 1,15 mm. Foram observados também quatro estilólitos verticais, presentes na base da seção no intervalo de 0,40 a 1,00 m de altura, relacionados aos conjuntos de lâminas classificadas como petrofácies CLCCV. A identificação da direção dos estilólitos presentes neste perfil não foi possível devido à dificuldade de verificação dos planos de estilolitização (Figura 61).

3.3.2.1 Perfil de Gamaespectrometria do Pseudo-poço 3 e Perfil 1 do Painel 2

Nesta exposição foram executados os perfis de Contagem Total (cpm), e os perfis com canais separados de K (%), Th (ppm) e U (ppm). As leituras para a realização dos perfis foram feitas com um espaçamento de 20 cm.

No pseudo-poço 3 os valores de contagem total variam de 331,9 a 211,5 cpm e no perfil 1 de 319 a 224,5 cpm, e valores médios de respectivamente 261,1 e 234,1 com, respectivamente. Esses perfis apresentam um comportamento semelhante das curvas, mostrando pequenas variações ao longo dos perfis e valores mais altos no topo. O perfil de K possui concentrações extremamente baixas, sendo praticamente ausentes (0 a 0,1 %), assim também como os perfis de Th (0 a 0,8 ppm) e U (0,2 a 0,7 ppm) no pseudo-poço 3 e perfil 1. Os perfis de K, U e Th mesmo em baixas concentrações possuem curvas aproximadamente semelhantes, com a tendência de aumento das concentrações dos radionuclídeos para topo dos perfis (Figura 61).

As razões Th/U nos perfis variam de 0 a 3 e apresentam uma tendência no aumento da razão para o topo dos perfis (Figura 61 e 62).

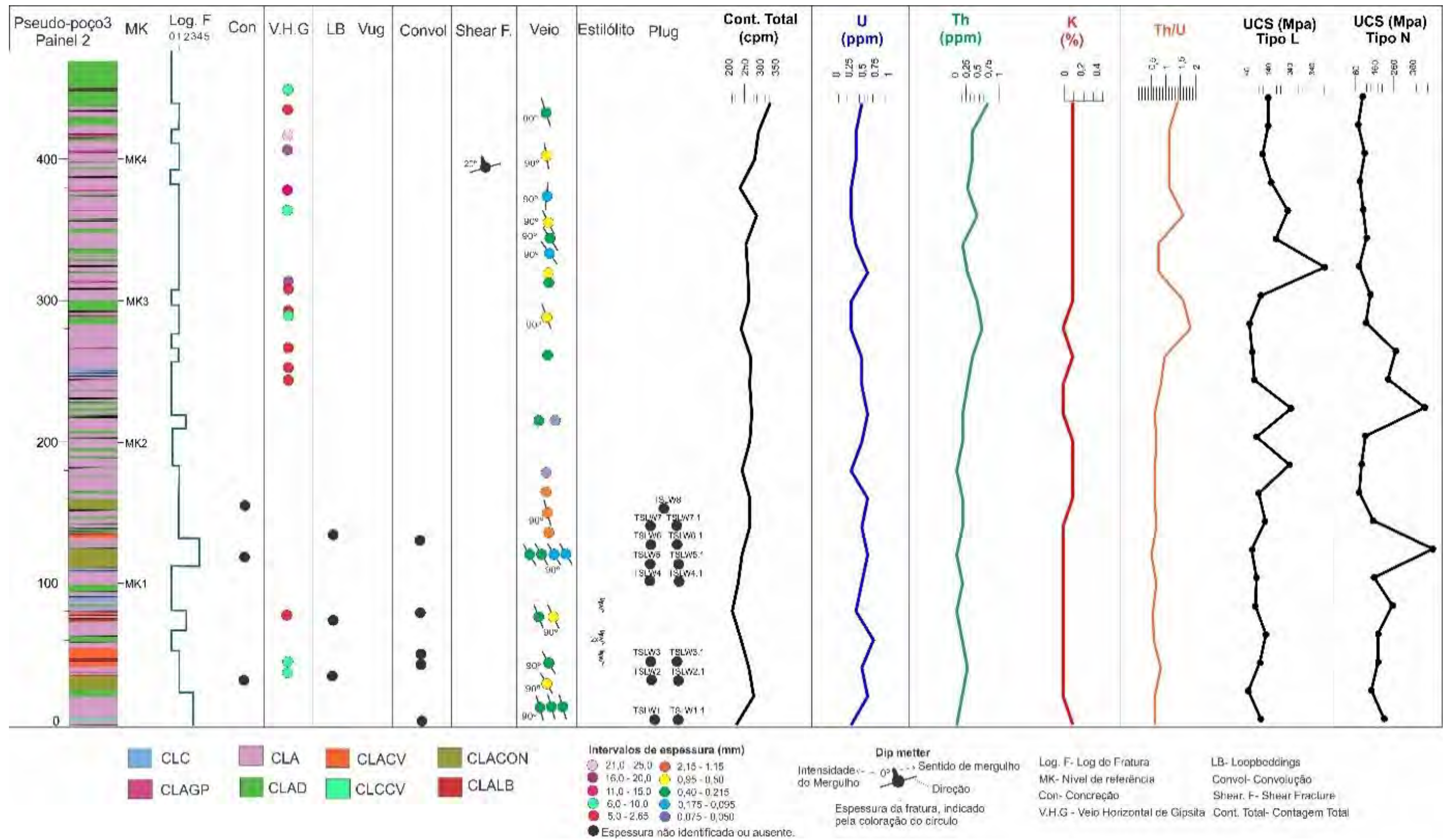
3.3.2.2 Descrição dos perfis de resistência mecânica do Pseudo-Poço 3 e Perfil 1 do Painel 2

O levantamento dos perfis geomecânicos através do Schmidt Hammer Tipo L e N foram executados ao longo da seção do pseudo-poço 3, e em um perfil adicional perfil 1, ambos construídos sobre painéis verticais na Mineração Willian. Conforme descrito, o objetivo foi analisar a variação vertical da resistência à compressão uniaxial- UCS (Mpa) dos calcários laminados nas seções selecionadas sobre os painéis. Os perfis foram realizados a partir de um espaçamento de 20 cm.

Os valores de resistência elástica obtidos pelo Schmidt Hammer Tipo L na seção do pseudo-poço 3 do painel 2, apresentaram uma variação de 53,1 a 383 Mpa, com um valor médio de 132,6 Mpa. Os valores do perfil feito com o Schmidt Hammer Tipo N variaram de 66 a 422,7 Mpa, com um valor médio de 151,8 Mpa. Os perfis Tipo L e Tipo N apresentaram diferenças no comportamento das curvas, que pode estar ligado a presença de microheterogeneidades ou processos diagenéticos e/ ou ação de intemperismo. O perfil Tipo L apresentou uma curva suave, com altos valores de UCS nos intervalos 1,60 a 2,20 m e 3,00 a 3,50 m, que estão relacionados neste local as petrofácies CLA e CLAGP. Enquanto o perfil realizado com o Schmidt Hammer Tipo N mostrou altos valores de resistência nos intervalos de 0 a 1,40 m e 2,00 a 3,00 m, que estão relacionados às petrofácies CLACV, CLALB, CLACON e CLA.

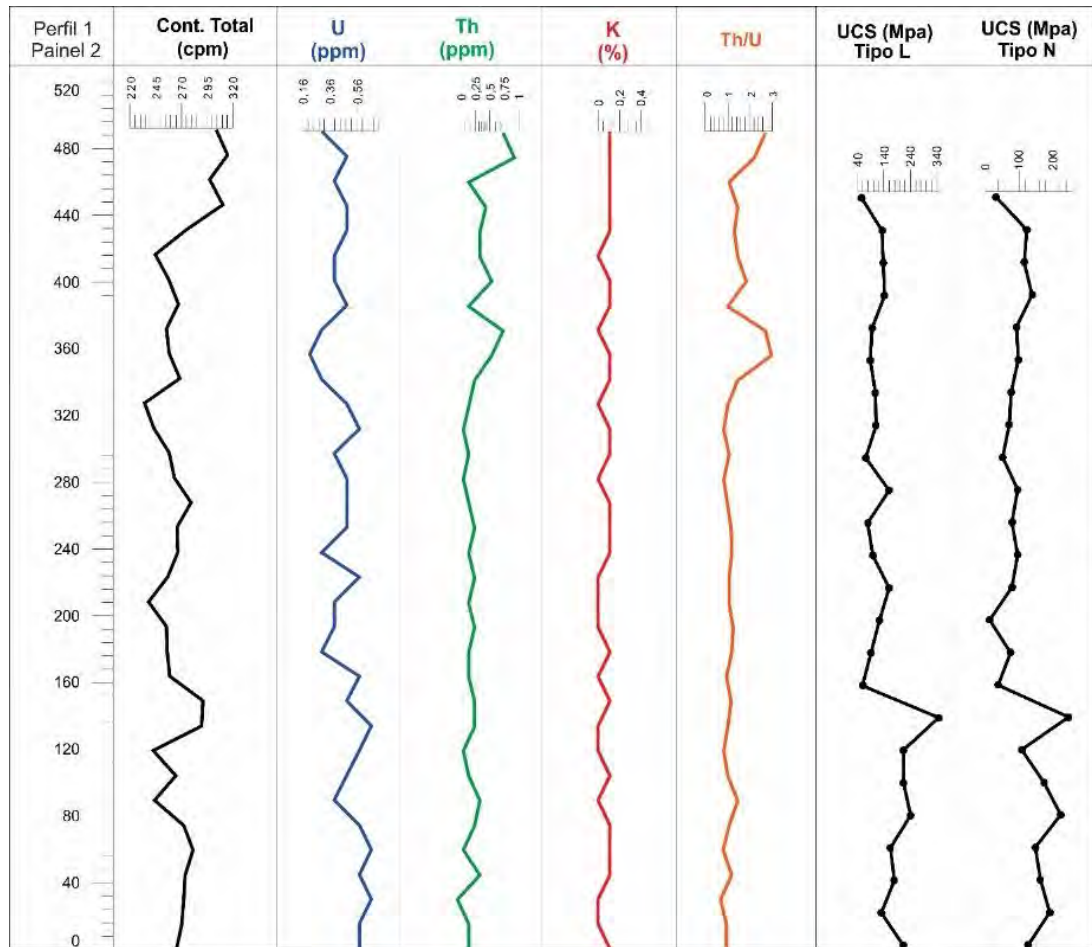
No perfil 1, realizado no mesmo painel 2, os valores obtidos pelo Schmidt Hammer Tipo L variaram de 43,9 a 348,1 Mpa, com o valor médio de 134,3 Mpa. Enquanto os valores do Tipo N variaram de 29,6 a 245 Mpa, com valor médio de 109 Mpa. Os perfis Tipo L e Tipo N apresentaram um comportamento das curvas semelhante com a curva do Tipo N do perfil da seção do pseudo-poço do Painel 2, no qual os maiores valores presentes na base da seção (intervalo de 0 a 1,40 m), podem estar relacionados a continuidade lateral das petrofácies CLACV, CLALB, CLACON e CLA. Os valores médios e baixos que registrados a partir de 1,40 m até o topo do perfil, estão relacionados às petrofácies CLA e CLAD (Figura 61 e 62).

Figura 61 - Perfil composto com classificação das petrofácies, localização de estruturas sin e pós-deposicionais, feições diagenéticas, perfis gamaespectrométricos, e perfis de resistência mecânica em UCS (Mpa) para o poço 1 do painel 2.



Fonte: A autora (2020).

Figura 62 - Perfis gamaespectrométricos de Contagem Total, U, Th, K, Th/U, e perfis de resistência mecânica em UCS (Mpa) do perfil 1 do Painei 2.

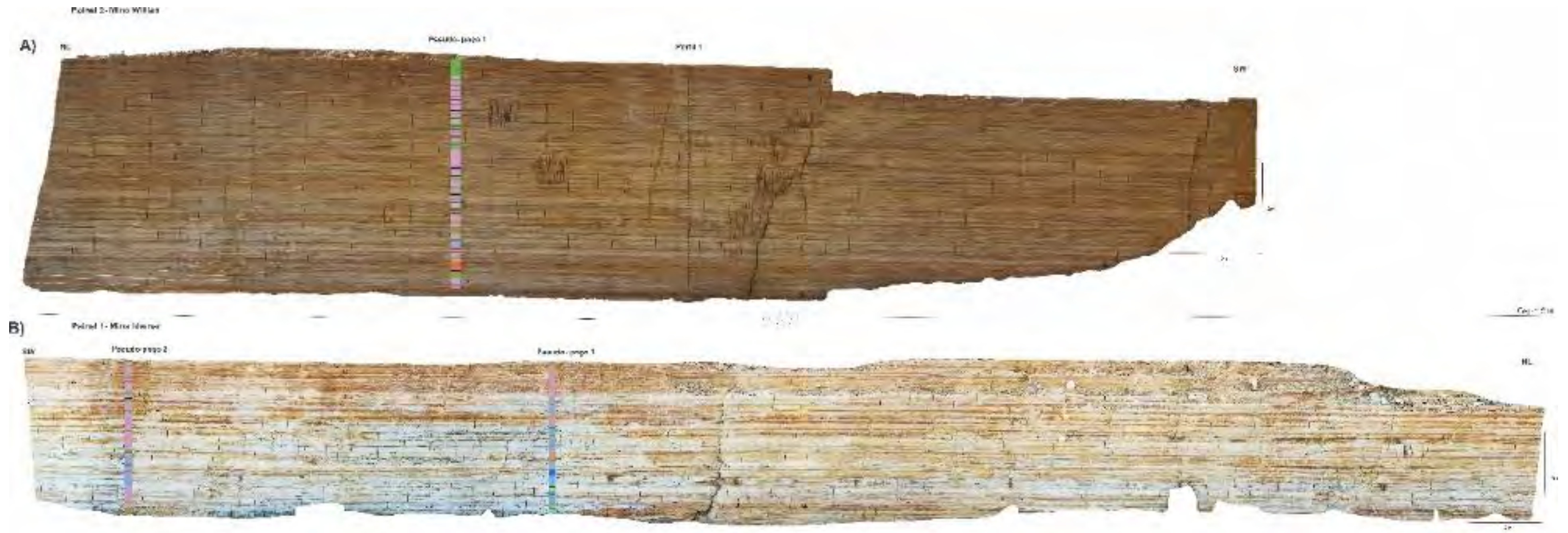


Fonte: A autora (2020).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS 2D

A discretização integral das feições expostas nas superfícies verticais, permitiu a correlação entre as feições "lidas" apenas nos perfis dos pseudo-poços e a distribuição total destas nas superfícies. Para efeito de correlação local da continuidade das petrofácies e das feições diagenéticas e deposicionais, foi realizada a interpretação da correlação entre os poços 1 e 2 do painei 1, e entre o poço 3 (petrofácies, gamaespectrometria e resistência mecânica), e operfil complementar 2 (resistência mecânica e gamaespectrometria) do painei 2, estudado namineração Willian representado na Figura 63.

Figura 63 - Painéis fotográficos (ortoretificados) das superfícies verticais dos afloramentos estudados, painel 1 e painel 2, com a localização dos pseudo-poços 1 e 2 (Painel 1), e 3 (Painel 2). A base do Painel 2 A), apresentou a cota de 506,5 m, e o painel 1 B), foi posicionado na cota de 499,834 m e altura de 4,47 m. Os painéis ficaram afastados cerca de 1 km



Fonte: A autora (2020).

3.4.1 Painei 1- Mineração Idemar

O Painei 1 da mineração Idemar será caracterizado nos tópicos a seguir.

3.4.1.1 Perfis de propriedades mecânicas e gamaespectrométricas- Painei 1-Mineração Idemar

Com base nos dados dos perfis de resistência mecânica (*Schmidt Hammer* Tipo N) e gamaespectrométricos (Contagem Total) realizados nos pseudo-poços 1 e 2 do painei 1. Foi possível determinar três intervalos estratigráficos com características mecânicas e diagenéticas distintas, que também controlaram a distribuição de feições rúpteis (Figura 66A):

- Intervalo 1- Representa a base da sucessão de calcários laminados estudados no painei 1. Este intervalo apresenta valores altos a médios no perfil de resistência mecânica, e de contagem total de raios gama. Alguns pontos com baixos valores de resistência elástica neste intervalo foram resultado de questões que influenciam a extração da informação (rugosidade da superfície, intemperismo, heterogeneidades abaixo da superfície de leitura). No pseudo-poço 1 os valores de resistência elástica (*Schmidt Hammer* Tipo N), e contagem total de raios gama variam de 133,5 a 337 Mpa, e 560,2 a 1138,7 cpm, respectivamente. No pseudo-poço 2 os valores de resistência elástica (*Schmidt Hammer* Tipo N), e contagem total variam de 26 a 167 Mpa e 918,9 a 1291,3cpm, respectivamente.
- Intervalo 2 - Foi definido como a fácies mecânica intermediária deste painei. Este intervalo apresenta valores médios a baixos de resistência elástica, e valores médios no perfil de contagem de raios gama. No pseudo-poço 1 os valores de resistência e contagem total variam de 51 Mpa e 189 Mpa e 489 a 598,5 cpm, respectivamente. No pseudo-poço 2 os valores de resistência e contagem total variam de 38 Mpa a 202,5Mpa e 899 a 750,7 cpm, respectivamente.
- Intervalo 3 - Foi definido como a fácies mecânica da parte superior do painei. Este intervalo apresenta valores médios a baixos resistências elásticas e baixos valores de contagem total no perfil gama. No pseudo-poço 1 os valores de resistência e contagem total variam respectivamente de 54 Mpa a 121 Mpa e 461,3 a 501,4 cpm. E no pseudo-poço 2 os valores de resistência elástica (*Schmidt Hammer* Tipo N) e contagem total variaram de 38 Mpa a 151 Mpa e 750,7 a 531,4 com, respectivamente.

3.4.1.2 Relação espacial das petrofácies, heterogeneidades sin e pós- deposicionais e feições diagenéticas no Painel 1 - Mineração Idemar

A superfície discretizada do Painel 1 apresenta 23,5 de extensão e cerca de 4 m de altura (Figura 64 e 65). Este painel apresentou uma predominância de laminações de coloração cinza escuro na base, enquanto no topo ocorre maior abundância de laminitos de cor creme a bege amarelado, relacionados respectivamente às petrofácies principais CLC e CLA (Grupo 2 e 1), descritas nos pseudo-poços 1 e 2 para este painel (Capítulo 3.1). Os calcários laminados possuem estratificação plano-paralela com mergulho deposicional de baixo ângulo (1° a 3°), tanto para SE, como para NE.

- ***Loop beddings***

As estruturas do tipo *Loop beddings* foram identificadas em níveis isolados no intervalo 3, e em um nível com ótima continuidade lateral que apresenta 23 m de extensão no intervalo 2 (Figura 64A). Os intervalos com os maiores valores de resistência mecânica apresentam maior concentração de estruturas do tipo *loop beddings* (Figura 66A). Na região interna a esses níveis foi observado o rompimento das lâminas, e na porção externa perturbação das lâminas, formando ondulações suaves, conhecidas como estruturas de *pinch-and-swell*. Este fato pode influenciar na resistência das camadas adjacentes ao nível (MARTIN-CHIVELET et al, 2011). Os *loop beddings*, foram gerados por eventos de sismicidade de baixa magnitude, que criaram a deformação dos laminitos quando estes ainda não estavam consolidados (CALVO et al., 1998). Essas estruturas, formadas durante a eo-diagênese, ocorrem tanto em petrofácies compostas por laminitos de coloração cinza (CLCLB), e por laminitos de coloração amarela (CLACLB). Acima dos horizontes de *loop beddings* ocorrem abundante número de estilólitos verticais (Figura 67A).

- **Convoluções**

As convoluções ocorrem neste painel em um nível isolado no intervalo 3, superior, e também ocorrem em um nível com cerca de 19,50 m de comprimento no intervalo 1 (Figura 64A). Os intervalos que apresentam níveis com convoluções mostraram altos valores de resistência mecânica coletados in situ. Essas estruturas estão associadas as petrofácies CLCVC e CLACV, descritas nos pseudo-poços 1 e 2 (Figura 66B e C) (ALENCAR, 2018). Esses níveis apresentam uma alta correlação com o aumento da frequência dos estilólitos, que são formados em laminitos acima ou podem ocorrer confinados nos níveis de laminitos portadores de laminações convolutas (Figura 67A). Também foi observado a interrupção da propagação de fraturas de cisalhamento nesses níveis (Figura 67B).

- ***Shear fractures* (fraturas de cisalhamento)**

As fraturas de cisalhamento estão presentes em toda a extensão do painel 1, são observados cerca de 7 segmentos que variam em tamanho de centímetros a vários metros. As falhas possuem dois sets principais: set 1 com direção NW-SE e mergulho de baixo a moderado ângulo (10° a 42°) para NNW; set 2 com direção NE-SW e mergulho moderado (40° a 50°) para NW (Figura 64B). Essas estruturas não apresentam associação a um intervalo mecânico específico, observa-se a segmentação de 25 cm na falha que corta o pseudo-poço 2 no intervalo mecânico 2, e interrupção da propagação da falha que corta o pseudo-poço 1 com a mudança da propriedade mecânica do intervalo 3 para o 2 (Figura 64A). A origem dessas estruturas também está associada a ocorrência de sismos na região, e a saturação de água dos estratos inconsolidados.

- **Concreções**

As concreções carbonáticas são bastantes comuns no painel 1, e ocorrem ao longo de quatro níveis de concreções (Figura 65). No intervalo 1 foram observados dois níveis de concreções, com 14 dessas estruturas; no intervalo 2 ocorre um outro nível com 3 concreções; e no intervalo 3 ocorre um nível com cerca de 7 concreções (Figura 64A). As concreções apresentam concentrações de veios verticais centimétricos, preenchidos por calcita, confinados na parte superior das estruturas. Os intervalos de laminitos portadores de concreções representam camadas com maior resistência mecânica e frequentemente a propagação dos veios verticais de maior comprimento foi interrompida e desviada por esses intervalos (Figura 67C e D). Os intervalos de laminitos portadores concreções apresentam espessura similar (Figura 65).

- **Nódulos e agregados de cristais de Pirita**

As concentrações de cristais de pirita estão presentes neste painel na forma de corpos alongados em intervalos estratigráficos específicos. O tamanho dos intervalos com esta heterogeneidade varia de alguns centímetros a metros e possuem espessura centimétrica. Localmente os agregados foram afetados por oxidação devido a efeito meteórico (Figura 66F). Os níveis de concentrações de pirita estão em sua maioria associadas as petrofácies CLC e CLCD. A ocorrência de pirita no painel 1 está concentrada no intervalo 2, e este aspecto pode ter uma relação com a segmentação dos veios verticais neste intervalo (Figura 64A).

- **Veios verticais preenchidos por calcita**

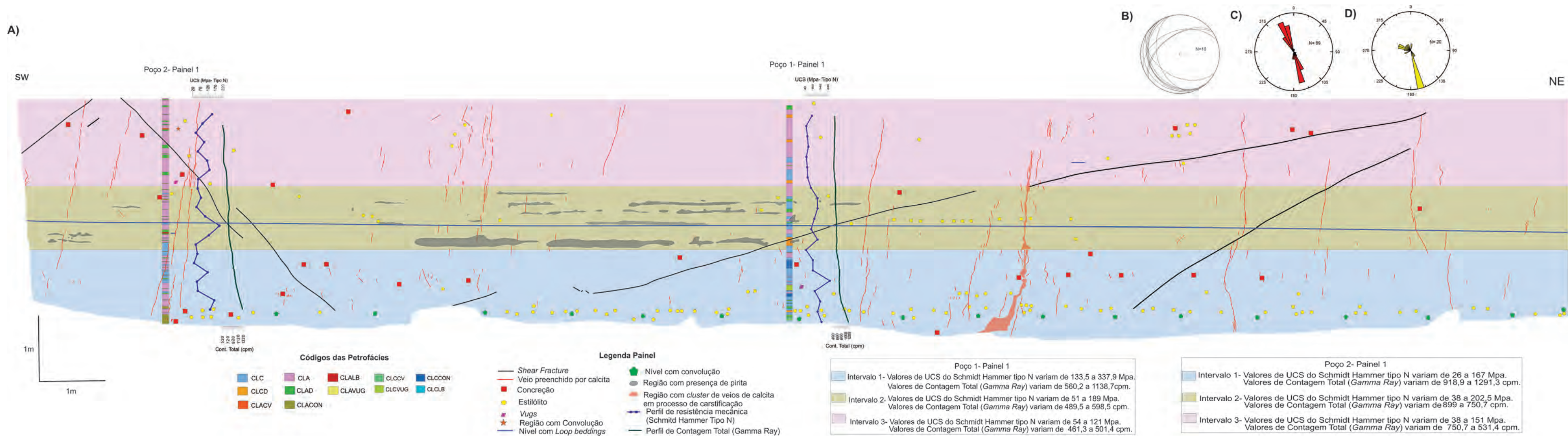
Existe uma grande quantidade de veios verticais no painel 1, e estes são preenchidos por calcita recristalizada. Os preenchimentos dos veios fio localmente dissolvido devido a ação de fluídos meteóricos que percolaram nas estruturas e no acamamento dos laminitos. Os veios verticais apresentam-se segmentados a partir de horizontes de variação das propriedades mecânicas, e os segmentos em geral apresentam offset lateral. Os segmentos apresentam

tamanho centimétrico a métrico. Alguns intervalos de laminitos apresentam uma concentração de segmentos de veios verticais devido ao confinamento reológico dessas relacionado a ocorrência destes (*stratabound*) (Figuras 64A e 66G). Nos locais onde ocorre a formação de clusters de veios, a continuidade vertical é mais expressiva. Estes locais também concentraram efeito de carstificação devido a ação de fluídos meteóricos (Figura 64H). O painel 1 apresenta sete faixas de veios verticais, segmentados, com continuidade vertical variável devido ao processo de segmentação. O espaçamento entre as faixas de veios também apresentou certa regularidade, com valor médio é de 3,37 m (Figuras 64 e 65). No painel foram discretizados cerca de 301 segmentos verticais e subverticais de veios de calcita, distribuídos da seguinte forma, conforme os intervalos mecânicos: 128 segmentos no intervalo 1; 76 segmentos no intervalo 2; e 97 veios no intervalo 3 (Figura 64A). Essas estruturas possuem direção preferencial NW-SE, verticais e subverticais (Figura 64C). A espessura dos veios variou de 0,005 mm a 4 mm, com média de 0,057 mm. A abundância dos veios de calcita centimétricos no intervalo 1, parece estar relacionada às petrofácies CLC, CLCCON e CLACON. Este intervalo apresenta maior resistência mecânica.

- **Estilólitos**

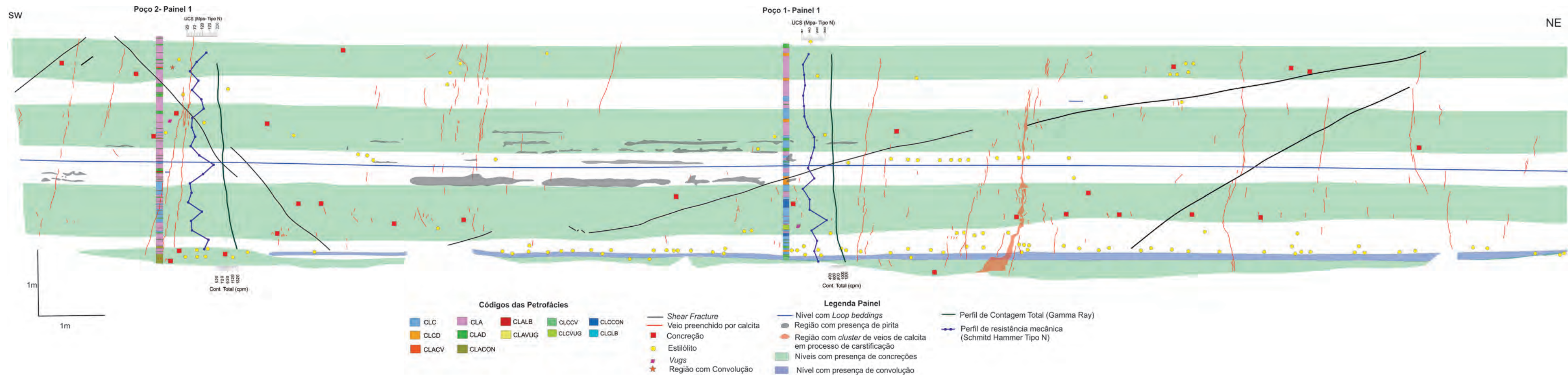
Os estilólitos verticais apresentam tamanho centimétrico e são perpendiculares ao acamamento da laminação (ALENCAR, 2018). Ocorrências isoladas são raras, e essas estruturas ocorrem concentradas em áreas específicas do painel. Também são mais abundantes na base da sucessão, e menos frequentes na parte superior (Figura 64A e 66I). Foram identificados cerca de 120 estilólitos, distribuídos da seguinte forma nos intervalos geomecânicos: 82 estilólitos no intervalo 1; 21 estruturas no intervalo 2; 17 planos estilolíticos no intervalo 3 (Figura 64A). Essas estruturas apresentam dois sets de direções principais: set 1 com direção SE, e set 2 com direção WNW (Figura 64D). Há uma grande quantidade dessas estruturas no intervalo 1 e estas estão associadas a um nível portador de laminações convolutas. A distribuição dos estilólitos nos demais intervalos está relacionada a outras estruturas diagenéticas: concreções, níveis com *loop beddings* e *shear fractures* (Figura 67A, B e C)

Figura 64 - Mapeamento das feições encontradas na superfície do afloramento do painel 1 com a localização dos pseudo-poços. A) Interpretação de intervalos geomecânicos com base nos dados de resistência mecânica e gamaespectrometria – azul = Intervalo 1, verde = Intervalo 2, rosa = intervalo 3. Todas as feições sin-deposicionais, estruturas rúpteis pós-deposicionais, e heterogeneidades diagenéticas foram mapeadas, por meio de símbolos ou da discretizadas direta, B) Estereograma para as shear fractures. C) Diagrama de Roseta dos veios de calcita verticais. D) Diagrama de Roseta dos estilólitos..



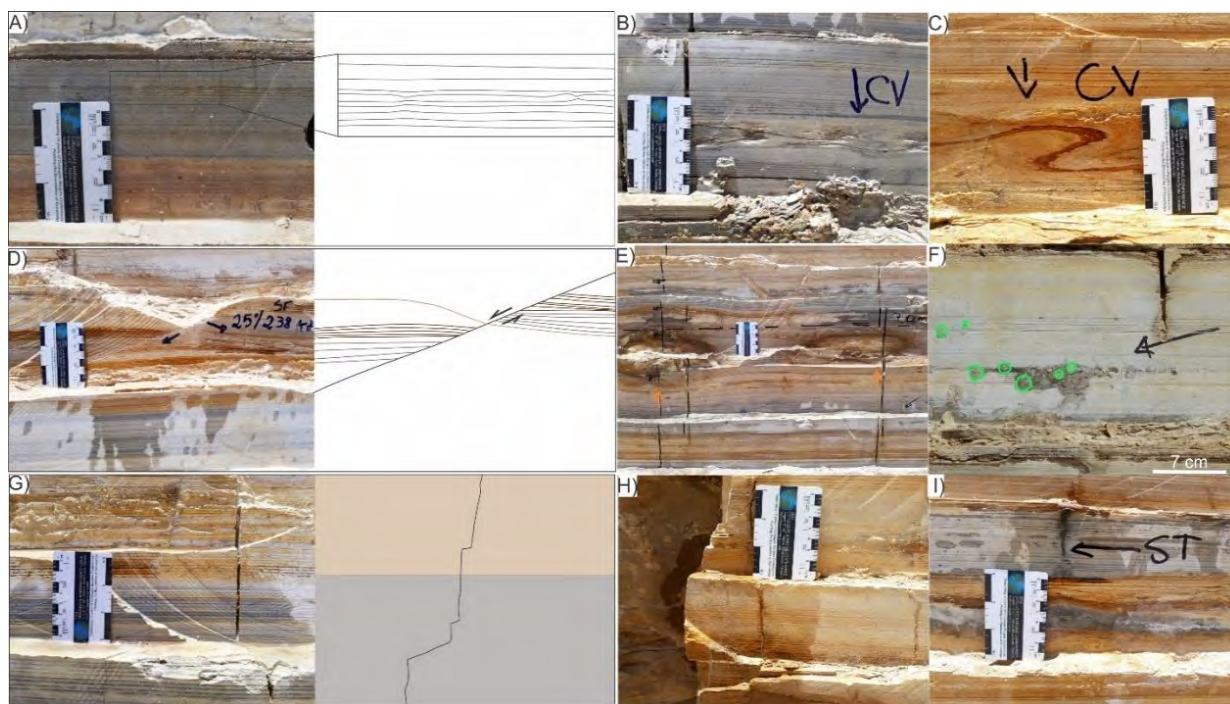
Fonte: A autora (2020)

Figura 65 - Mapeamento das feições encontradas na superfície do afloramento do painel 1 com a localização dos pseudo-poços. Os níveis de cor verde indicam intervalos de laminações que contem concreções calcárias. Estes também apresentam valores de resistência mecânica relativamente mais elevados, e atuaram no controle da propagação dos veios verticais.



Fonte: A autora (2020).

Figura 66 - Estruturas sin-deposicionais, estruturas diagenéticas mapeadas no Painel 1. A) conjunto de laminitos com loop beddings destacados pelas linhas amarelas, B) nível de laminitos cinza com laminações convolutas, C) conjunto de laminações convolutas de cor amarela a bege. D) Shear fracture normal com rejeito milimétrico, E) Nível de laminações portadoras de convoluções (setas laranja), F) Agregados de pirita formando um corpo alongado em meio a laminação. Cristais cúbicos euedrais destacados em verde, G) Veio vertical preenchido por calcita. H) Carstificação em clusters de veios de calcita. I) Estilólito. Imagens A, D e G apresentam esquemas ilustrativos das estruturas.



Fonte: A autora (2020).

Figura 67 - Feições sin-deposicionais e diagenéticas identificadas no painel 1. A) Conjunto de lâminas com estruturas convolutas (CV), e a presença de estilólitos acima desta (ST), B) Detalhe de uma shear fracture que se formou a partir de um descolamento produzido em um nível de laminitos com convolução, C) Concreção com diversos veios verticais de calcita confinados a região da estrutura. Shear fracture está indicada a esquerda. D) Níveis de laminitos com pequenas concreções. Veios verticais de calcita, cuja propagação foi afetada pelos níveis de concreções. Imagens A, B, C e D apresentam esquemas ilustrativos.



Fonte: A autora (2020).

3.4.1.3 Análise estatística e espacial das fraturas – Painel 1- Mineração Idemar

A análise estatística da distribuição espacial das fraturas do painel 1 permitiu avaliar as relações entre alguns parâmetros como comprimento, abertura, espaçamento e frequência das fraturas nos intervalos mecânicos da sucessão estudada. Os comprimentos e aberturas das fraturas foram obtidos através de medições das estruturas por todo o painel 1 e *scanlines*, enquanto o espaçamento das fraturas foi obtido através da *scanlines* digitais realizadas através de foto interpretações sobre o modelo discretizado. Os parâmetros não apresentam uma distribuição normal, e suas distribuições são assimétricas positivas. As fraturas possuem comprimento mínimo de 20 mm e máximo de 1980 mm. A média dos comprimentos foi de 168,80 mm com desvio padrão (DP) de 230,99 mm e coeficiente de variação (CV) de 136%. Os tamanhos mais frequentes dos comprimentos das fraturas apresentam uma moda de 40 mm. As aberturas das fraturas apresentam mínimo de 0,05 mm e máximo de 4 mm, e moda de 0,095 mm. A média das aberturas fraturas é de 0,54 mm com DP deste parâmetro de 0,734 mm, e o coeficiente de variação é de 135%. O espaçamento tem tamanho mínimo de 10 mm e máximo de 6510 m, com moda de 40 mm. A média de espaçamento entre as fraturas é de 1171,1 mm de um modo geral, com desvio padrão de 1370,6 mm e coeficiente de variação de 117% (Tabela 1). O espaçamento médio está diretamente relacionado com o espaço entre os *clusteres* de veios com maior continuidade que cortam toda a sucessão estudada, enquanto a moda está relacionada ao espaçamento entre os veios segmentados de pequeno porte, isolados em camadas de maior resistência. A análise dos parâmetros morfológicos das fraturas foi realizada a partir dos dados das *scanlines* digitais (comprimento, abertura e espaçamento). As relações entre comprimento e abertura ($r = 0,03$; $R^2 = 0,01$), espaçamento e abertura ($r = -0,19$; $R^2 = 0,037$) espaçamento e comprimento ($r = 0,23$; $R^2 = 0,054$), mostram muito baixa correlação (Tabela 2 e Figura 68).

Tabela 1 – Análise da dispersão dos atributos morfológicos dos veios verticais preenchidos por calcita da Formação Crato do Paine 1 (mm).

Atributo	Média (mm)	Mediana (mm)	Moda (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desvio Padrão (DP) (mm)	Coefficiente de Variação (CV) (%)
Comprimento	168,80	100	40	1980	20	230,99	136
Abertura	0,54	0,265	0,095	4	0,05	0,734	135
Espaçamento	1171,1	640	10	6510	10	1370,6	117

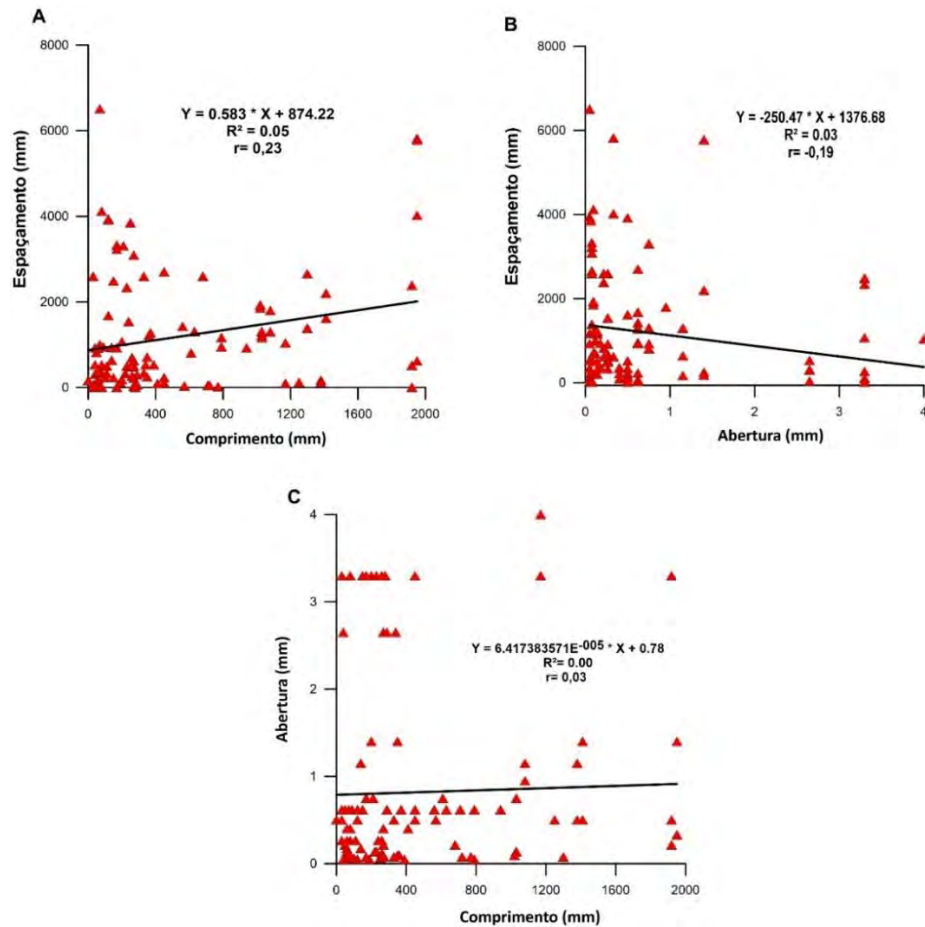
Fonte: A autora (2020).

Tabela 2- Correlação de Pearson e coeficiente de correlação para alguns parâmetros morfológicos dos veios verticais preenchidos por calcita estudados no Paine 1.

Correlações	Coefficiente Pearson (r)	R ²
Comprimento x Abertura	0,03	0,001
Espaçamento x Abertura	-0,19	0,037
Espaçamento x Comprimento	0,23	0,054

Fonte: A autora (2020).

Figura 68 - Gráfico de correlações entre os parâmetros morfológicos espaçamento, abertura e comprimento das fraturas do Paine 1. A) Espaçamento versus comprimento, B) Espaçamento versus abertura e C) Abertura versus Comprimento.



Fonte: A autora (2020).

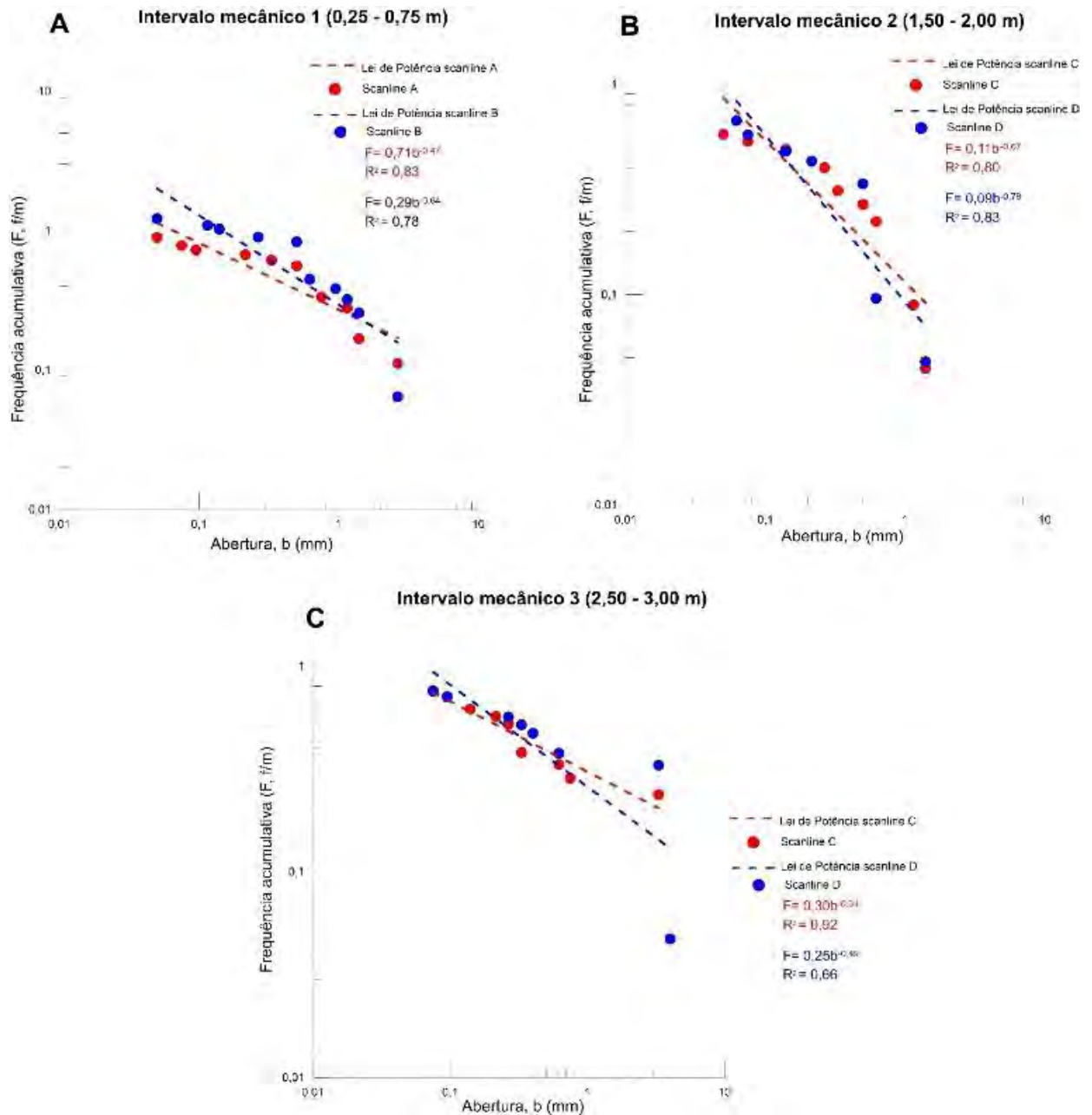
Visando avaliar a distribuição das fraturas, frequência, abertura com a variação das propriedades mecânicas, foram realizadas duas *scanlines* em cada intervalo mecânico do painel 1, totalizando 6 *scanlines* digitais, totalizando 141 metros de varredura linear.

1. As *scanlines* A e B no intervalo 1 apresentam um máximo de 3 f/m (fraturas por metro), com espaçamento médio entre as fraturas de 1,12 m e 0,91 m, nas *scanlines* A e B respectivamente. Este intervalo apresenta a maior frequência de fraturas por metro nas *scanlines* A e B porque os principais *clusters* do painel interceptam o intervalo 1. As relações entre a frequência cumulativa de fraturas e abertura apresentam um bom grau de correlação $R^2 = 0,83$ e $R^2 = 0,78$, e a lei de potência observada para a abertura das fraturas possui expoente escalar de -0,47 e -0,64, para a *scanlines* A e B, respectivamente. Neste intervalo há uma maior frequência cumulativa de fraturas de

menor abertura, diretamente relacionada ao grande número de heterogeneidades como concreções, convoluções e presença das petrofácies CLC;

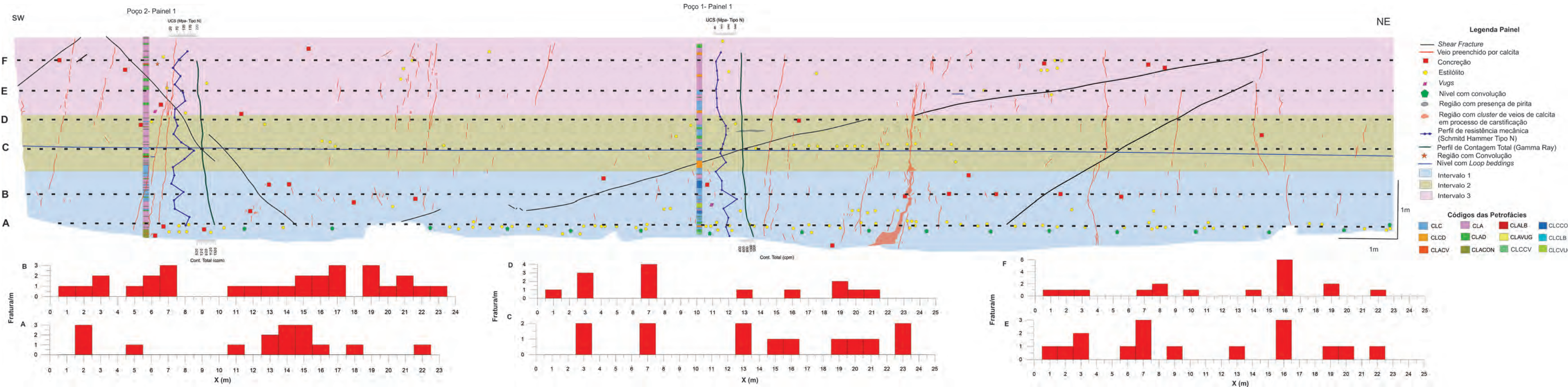
2. As *scanlines* C e D no intervalo 2 apresentam uma distribuição de fraturas semelhantes, com máximo de 4 f/m, com espaçamento médio de 1,72 m e 1,49 m, em C e D respectivamente. Este intervalo possui os maiores e mais regulares espaçamentos entre as fraturas. As correlações entre a frequência acumulativa e abertura apresentou boa de correlação $R^2 = 0,80$ e $R^2 = 0,83$, e a lei de potência observada para a abertura das fraturas apresentou expoente escalar de -0,67 e -0,79, em C e D respectivamente.
3. As *scanlines* E e F realizadas no intervalo mecânico 3 também apresenta uma distribuição de fraturas similar, e apresentam intervalo máximo de 6 f/m, com espaçamento médio de 1,31 m e 1,24 m, em E e F, respectivamente. Os parâmetros de frequência acumulativa e abertura apresentaram alto grau de correlação de $R^2 = 0,92$ para *scanline* E, e moderada $R^2 = 0,66$ para a *scanline* F. A lei de potência para a abertura das fraturas possui expoente escalar de -0,34 e -0,49, nas *scalines* E e F, respectivamente.

Figura 69 – Gráfico de correlação dos parâmetros das fraturas a partir das *scanlines* 1D. As aberturas para as *scanlines* nas fraturas naturais apresentam uma relação entre frequência cumulativa e valor de aberturas que pode ser expressa a partir de uma lei de potência. A) Intervalo mecânico 1 com o gráfico log-log das *scanlines* A e B. B) Intervalo mecânico 2 com o gráfico log-log das *scanlines* C e D. C) Intervalo mecânico 3 com o gráfico log-log das *scanlines* E e F.



Fonte: A autora (2020).

Figura 70 – Levantamento de scanlines digitais nos intervalos definidos no painel 1 da mineração Idemar. As scanlines foram executadas nos intervalos mecânicos definidos com base na correlação nos dados de resistência mecânica e gamaespectrometria e na boa continuidade lateral das petrofácies definidas (azul = Intervalo 1, verde = Intervalo 2, rosa = intervalo 3) para a análise da distribuição e frequências dos veios verticais preenchidos por calcita em cada intervalo e entre os intervalos. Scanline A realizada a 0,25 m de altura no painel e gráfico A de frequência versus comprimento do painel em metros (X). Scanline B realizada a 0,75 m de altura no painel e gráfico B de frequência de fraturas versus comprimento do painel em metros (X). Scanline C realizada a 1,50 m de altura no painel e gráfico C de frequência versus comprimento do painel em metros (X). Scanline D realizada a 2,00 m de altura no painel e gráfico D de frequência versus comprimento do painel em metros (X). Scanline E realizada a 2,50 m de altura no painel e gráfico E de frequência versus comprimento do painel em metros (X). Scanline F realizada a 3,0 m de altura no painel e gráfico F de frequência versus comprimento do painel em metros (X).



Fonte: A autora (2020).

3.4.2 Paineis 2- Mineração Willian

O Painel 2 da Mineração Willian será detalhado nos tópicos seguintes.

3.4.2.1 Perfis de propriedades mecânicas e gamaespectrométricas no painel 2

Com base nos perfis de resistência mecânica (*Schmidt Hammer* Tipo N) e gamaespectrométricos (Contagem Total) realizados nos pseudo-poços 3 e perfil 1 do painel 2, foi possível analisar a variação das propriedades mecânicas e a distribuição das feições deposicionais, mecânicas e diagenéticas. Foram três intervalos de mecânicos distintos (Figura 71):

- Intervalo 1 –Parte basal do painel. Apresenta valores elevados a médios de resistência elástica e valores mais elevados de gama nos dois perfis. No perfil do pseudo-poço 3 os valores de resistência elástica e de gama total variaram de 129 a 422 Mpa e 211,5 a 280,5 cpm, respectivamente. E no perfil 1 os valores de resistência elástica e contagem total variaram de 35,9 a 245,3 Mpa e 234,3 a 290,6 cpm, respectivamente.
- Intervalo 2 - intervalo mecânico intermediário da sucessão. Este intervalo apresenta valores de resistência médios e baixos, com alguns pontos de alto valor. Os perfis de gama total apresentam valores médios. No perfil do pseudo-poço 3 os valores de resistência elástica e contagem total variaram de 70 Mpa a 384 Mpa e 239,7 a 272,3 cpm, respectivamente. E no perfil 1 os valores de resistência elástica e contagem total variaram de 10,3 Mpa a 93,9 Mpa e 229,2 a 277,6 cpm, respectivamente.
- Intervalo 3 - Intervalo da porção superior da sucessão, que apresenta valores baixos a médios de resistência mecânica, e valores médios a altos na parte superior de gama total. No perfil do pseudo-poço 3 os valores de resistência elástica e contagem total variaram de 66 Mpa a 125,3 Mpa e 236,4 a 331,9 cpm, respectivamente. No perfil 1 os valores de resistência elástica e contagem total variaram respectivamente de 26 Mpa a 137 Mpa e 224,5 a 319 cpm, respectivamente.

3.4.2.2 Relação espacial das petrofácies, heterogeneidades sin-deposicionais e diagenéticas do Painel 2

Na Mineração Willian a superfície vertical de afloramento que foi varrida para a caracterização dos laminitos da parte superior do intervalo C6, apresenta de 41,5 m de comprimento e aproximadamente 5 m de altura (Figura 63).

- ***Loop beddings***

Foram também identificados dois níveis portadores de *loop beddings* com 36,60 e 17,00 m de comprimento, respectivamente, no intervalo mecânico 1, o que revela uma considerável continuidade lateral. Os intervalos de laminitos portadores de *loop beddings* no painel 2 apresentam valores elevados de resistência mecânica, conforme também foi observado para o painel 1 (Figura 71A). As estruturas identificadas como *loop beddings* foram classificadas como do tipo simples, porém o conjunto de laminações que contém essas estruturas podem apresentar microfalhas (Figuras. 73A e 74A). Os *loop beddings* estão associados a petrofácies CLACLB. Conforme observado para o painel 1, também no painel 2 foi observada uma enorme quantidade de estilólitos verticais localizados nos laminitos imediatamente acima e abaixo dos níveis de *loop beddings* (Figura 74A).

- **Convoluções**

Foram identificados quatro níveis de laminitos com estruturas convolutas no painel 2. Três níveis localizados no intervalo mecânico 1, apresentam boa continuidade lateral e abrangem toda a extensão horizontal do painel. O quarto intervalo localizado na base do intervalo 1 apresenta extensão de 20,70 m (Figura 73B) (ALENCAR, 2018). Também foi observada a abundância de estilólitos logo acima dos níveis de laminações convolutas, ou confinados no laminitos portadores de convoluções. Da mesma forma, os níveis convolutos também causaram o desvio na propagação dos veios verticais. Planos de shear fractures de grande extensão foram iniciados a partir de intervalos de laminações convolutas (Figura 74C).

- ***Shear fracture (fraturas de cisalhamento)***

As fraturas de cisalhamento estão presentes em todo o painel, e foram identificados cerca de 19 segmentos que variam de centímetros a vários metros de extensão. Os planos de pequeno porte parecem estar contidos nos níveis definidos, mas os planos de grande extensão cruzaram mais de um intervalo geomecânico (Figuras 73 e 74). Foram observados dez segmentos de falhas confinados no intervalo geomecânico 1, quatro segmentos confinados no intervalo 2 e dois segmentos confinados no intervalo 3. É possível observar que ocorreu um controle dos intervalos mecânicos na localização, e na propagação, das *shear fractures* de menor extensão (Figura 71A). As *shear fractures* apresentam dois sets principais: set 1 com

direção E-W, e mergulho de baixo a moderado ângulo (15° a 45°) para N; set 2 com direção NW-SE, e mergulho baixo a moderado (25° a 48°) para SW (Figura 71B).

- **Concreções**

As concreções carbonáticas também são comuns no painel 2, e foram identificados três intervalos de laminitos portadores dessas estruturas (Figura 72). No intervalo 1 são observados dois desses níveis onde foram contabilizadas cerca de 28 concreções; no intervalo 2 é observado um nível com 4 concreções; e no intervalo 3 é observado um nível com cerca de 6 concreções (Figura 71A). Essas estruturas diagenéticas também apresentam formas ovaladas e achatadas, compostas principalmente por uma matriz de calcita micrítica, *cherts* de sílica ou fosfática (Figura 73D). Esses níveis tendem a apresentar enxames de veios verticais centimétricos, confinados ou na parte superior da estrutura, e também por serem níveis de maior rigidez servem como barreiras, muitas vezes impedido e desviando a propagação dos veios verticais (Figura 74D).

- **Nódulos de sílica**

Nódulos de sílica ocorrem no painel 2 na forma de corpos irregulares ou circulares com dimensões centimétricas, principalmente nos intervalos geomecânicos 1 e 2 (Figura 71A). A análise macroscópica desses nódulos isolados nos laminitos permitiu identificar halos concêntricos compostos essencialmente por sílica e calcita (Figura 73E). A presença dos nódulos aumenta localmente a rigidez dos laminitos da petrofácies CLA.

- **Veios Horizontais e Verticais de Gipsita**

Neste painel foram encontrados veios centimétricos a milimétricos preenchidos com gipsita fibrosa. Existem veios com orientação vertical a subvertical em relação ao acamamento, e veios horizontais ao acamamento formados entre as laminações, com o mesmo mergulho do acamamento de 1° a 3° para SE ou NE (Figura 71A e 73F). A frequência dos veios horizontais é muito maior na porção superior da sucessão. A espessura dos veios variou entre 0,4 a 16 mm, com média de 4 mm. Os veios verticais de gipsita apresentam-se total ou parcialmente preenchidos por este mineral, e estão dispostos como clusters, e ainda apresentam intenso processo de carstificação tardia, por causa da circulação de fluidos. Foram identificados dois clusters de veios verticais de gipsita que cortam todo a sucessão de laminitos, os quais apresentam direção NW-SE (Figura 71C). Estes clusters formam faixas com espessura que varia de 3 a 16 mm, com média de 7 mm.

- **Veios Verticais de Calcita**

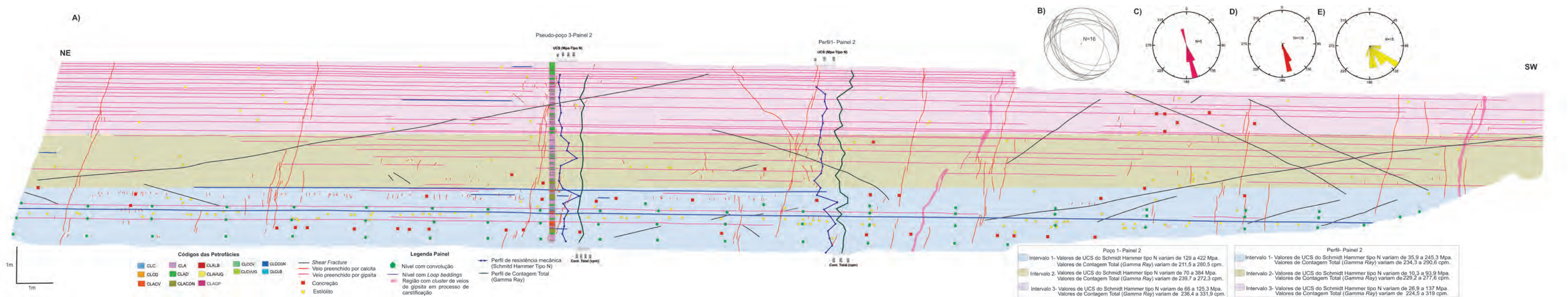
Os veios verticais encontrados de calcita apresentam-se total ou parcialmente preenchidos por este mineral, apresentam dimensões centimétrica, e estão dispostos na forma de

segmentos confinados em intervalos específicos de laminito. Ocorrem também veios formados por vários segmentos alinhados na mesma direção e extensão centimétrica a métrica e que atravessam toda a sucessão. Neste painel os veios verticais apresentam menor segmentação do que o que foi observado no painel 1. Alguns conjuntos de veios verticais de calcita também formam faixas de clusterização (Figura 73G). Devido a processos tardios de dissolução por circulação de fluidos, essas faixas de clusterização apresentam efeitos de carstificação. Foram identificados cerca de 300 segmentos de veios verticais preenchidos por calcita, distribuídos da seguinte forma: 164 veios no intervalo mecânico 1; 85 veios no intervalo 2; 50 veios no intervalo 3. Foram identificados faixas de veios verticais que formam clusters. O espaçamento destes clusters apresenta um padrão com média de 5 m (Figura 71A). Os veios verticais de calcita possuem direção preferencial SW e são subverticais a verticais (Figura 71D), com espessura que varia de 0,05 mm a 5 mm e apresentam uma espessura média de 0,74 mm. A abundância dos veios de calcita centimétricos no intervalo 1, pode estar relacionada a presença da petrofácies CLACON, que apresenta alta resistência mecânica (Figura 74D). Enquanto os veios que apresentam maior extensão possuem maior relação com a petrofácies CLA.

- **Estilólitos**

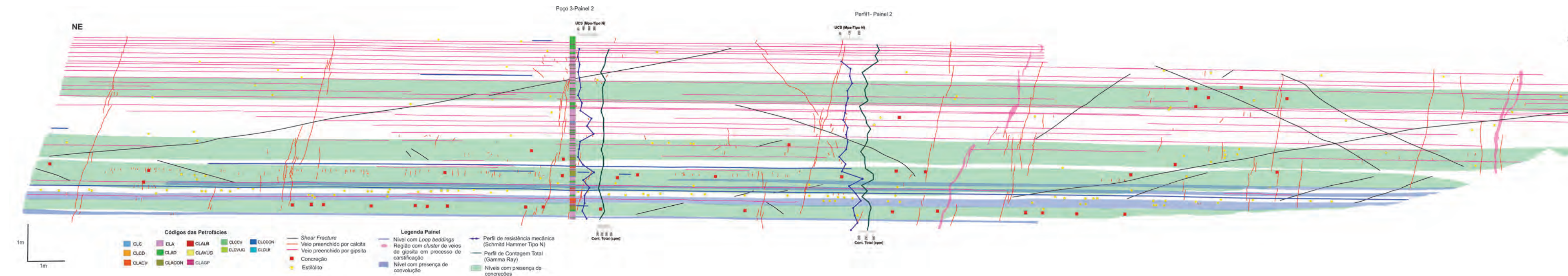
Os estilólitos verticais estão distribuídos em todos os intervalos mecânicos do painel, embora a frequência diminua da base para o topo da sucessão. Os estilólitos apresentam plano perpendicular ao acamamento, e possuem comprimento centimétrico. Foram identificados cerca de 134 estilólitos, distribuídos da seguinte forma: 83 estilólitos no intervalo mecânico 1; 25 estilólitos no intervalo 2; e 26 estilólitos no intervalo 3 (Figura 71A). Os planos estilolíticos apresentam direção principal SW (Figura 71E). A maior quantidade dessas estruturas no intervalo 1 apresenta estreita relação com os níveis de laminações convolutas e de *loop beddings*. Também foi possível observar que os estilólitos apresentam estreita relação de abundância e localização destas com outras estruturas como concreções *loop beddings* e *shear fractures* (Figura 71A, Figura 73H e 74B).

Figura 71 - Mapeamento das feições encontradas na superfície do afloramento do painel 2 com a localização do pseudo-poço 3 e do perfil 1. A) O modelo apresenta três intervalos geomecânicos, definidos com base na distribuição vertical de petrofácies do pseudo-poço 3, e os perfis de resistência mecânica e gamaespectrometria, representados respectivamente pelas cores azul = Intervalo 1, verde = Intervalo 2, e rosa = intervalo 3. Todas as feições sin-deposicionais, estruturas rúpteis pós-deposicionais, e heterogeneidades diagenéticas foram mapeadas, por meio de símbolos ou discretizadas de forma direta: B) Estereograma das shear fractures. C) Diagrama de Rosetas dos veios de gipsita verticais. D) Diagrama de Roseta dos veios de calcita verticais. E) Diagrama de Roseta dos estilólitos.



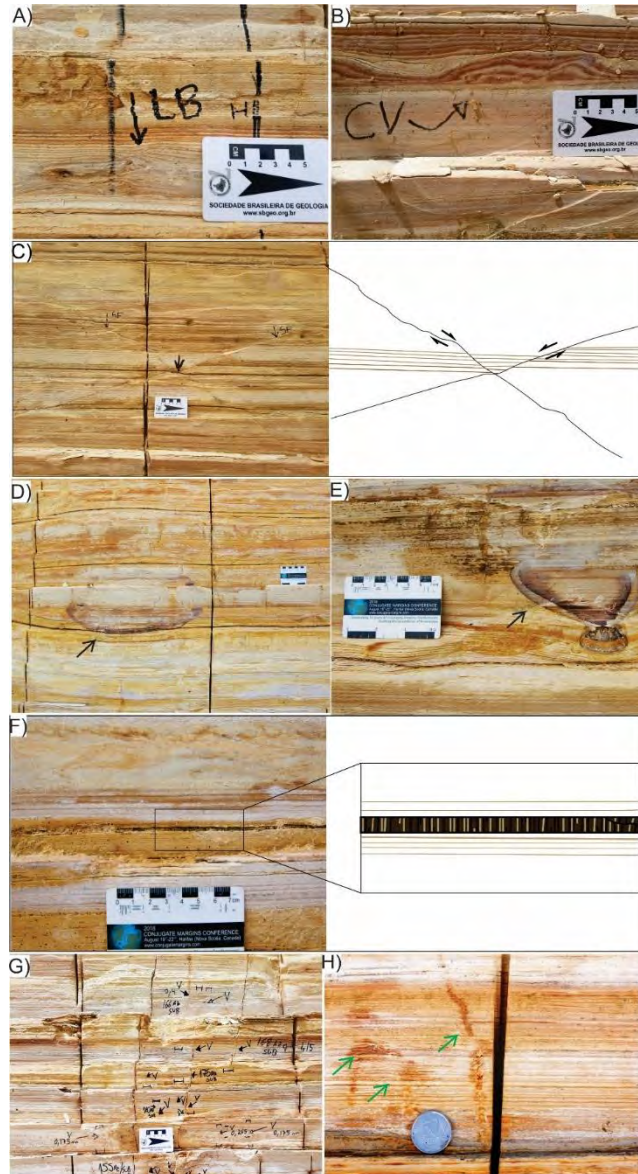
Fonte: A autora (2020).

Figura 72 - Mapeamento das feições encontradas na superfície do afloramento do painel 2 com a localização dos pseudo-poços. Os níveis de cor verde indicam intervalos de laminações que contem concreções calcárias. Estes também apresentam valores de resistência mecânica relativamente mais elevados, e atuaram no controle da propagação dos veios verticais.



Fonte: A autora (2020).

Figura 73 - Estruturas sin-deposicionais e diagenéticas mapeadas no Painel 2. A) Estrutura do tipo *loop beddings* (seta preta) (LB) em laminitos com estruturas convolutas. B) Intervalo de laminitos com laminações convolutas (seta preta) (CV). C) Par conjugado de *shear fractures* com rejeito milimétrico. D) Concreção. E) Nódulo de sílica (setas pretas); F) Veio horizontal de gipsita fibrosa e processo de carstificação; G) Veios verticais de calcita, segmentados, que formam uma faixa de clusterização. H) Estilólitos (setas verdes). Imagens C e F, apresentam esquema ilustrativo.



Fonte: A autora (2020).

3.4.2.3 Análise estatística e espacial das fraturas – Painei 2- Mineração Willian

Também foi realizada uma análise estatística da relação entre os parâmetros das fraturas (veios): comprimento, abertura, espaçamento e frequência nos intervalos mecânicos definidos no painel 2. Os valores de comprimento e abertura das fraturas foram extraídos dos dados de varredura dos painéis, enquanto o espaçamento entre as estruturas foi extraído a partir das *scanlines* digitais realizadas sobre o modelo discretizado. Os parâmetros não apresentam uma distribuição normal, que apresentam padrão assimétrico positivo. As fraturas possuem comprimento mínimo de 20 mm e máximo de 3190 mm. A média dos comprimentos é de 40 mm com desvio padrão (DP) de 412,57 mm, e coeficiente de variação (CV) de 1031,4 %. Os tamanhos mais frequentes dos comprimentos das fraturas apresentam uma moda de 40 mm. As aberturas das fraturas apresentam mínimo de 0,05 mm e máximo de 5 mm, e com moda de 0,265 mm. A média das aberturas fraturas é de 0,63 mm com DP deste parâmetro é de 0,804 mm, e o coeficiente de variação é de 126%. O espaçamento tem tamanho mínimo de 20 mm e máximo de 7200 m, com moda de 140 mm. A média de espaçamento entre as fraturas é de 1323 mm, com desvio padrão de 1890,3 mm e coeficiente de variação de 142%. O espaçamento médio está diretamente relacionado com a distância entre os clusters de veios que cortam toda a sucessão, enquanto a moda está relacionada ao espaçamento entre os veios de isolados de menor porte em camadas de maior resistência (Tabela 3). As relações entre comprimento e abertura ($r = 0,236$; $R^2 = 0,055$), espaçamento e abertura ($r = 0,101$; $R^2 = 0,010$) espaçamento e comprimento ($r = 0,335$; $R^2 = 0,112$), mostram baixa correlação (Tabela 4 e Figura 75).

Tabela 3 - Análise da dispersão dos atributos morfológicos dos veios verticais preenchidos por calcita da Formação Crato do Painei 2 (mm).

Atributo	Média (mm)	Mediana (mm)	Moda (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desvio Padrão (DP) (mm)	Coefficiente de Variação (CV %)
Comprimento	40	90	40	3190	10	412,57	1030
Abertura	0,63	0,33	0,265	5	0,05	0,804	126
Espaçamento	1323	370	140	7200	20	1890,3	142

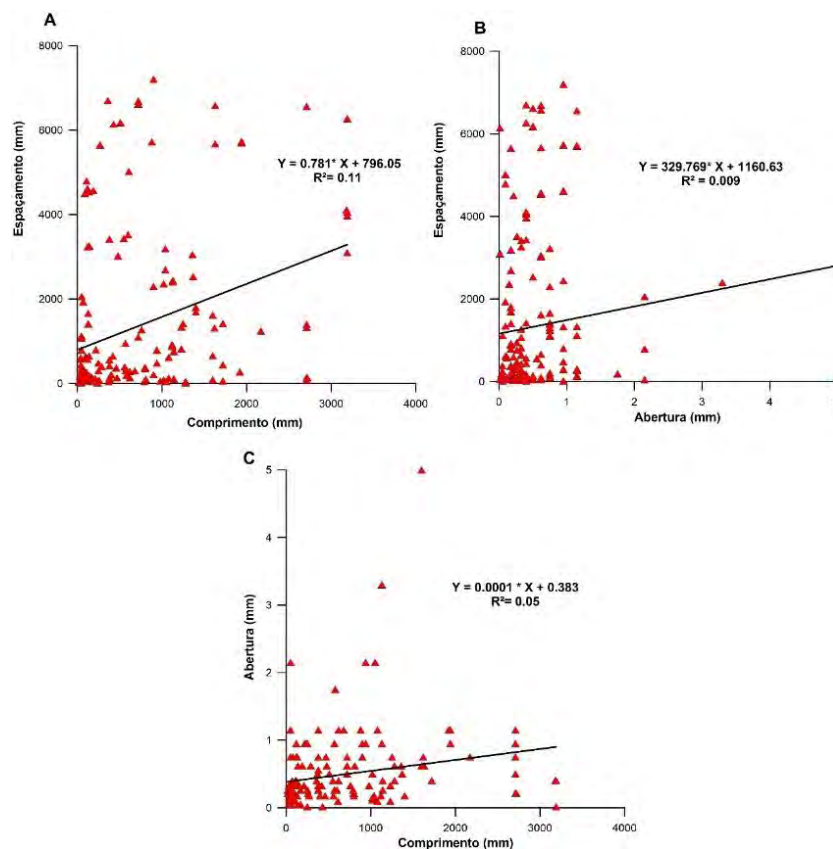
Fonte: A autora (2020).

Tabela 4 - Correlação de Pearson e coeficiente de correlação para alguns parâmetros morfológicos dos veios verticais preenchidos por calcita estudados no Painei 2.

Correlações	Coeficiente Pearson (r)	R ²
Comprimento x Abertura	0,236	0,055
Espaçamento x Abertura	0,101	0,010
Espaçamento x Comprimento	0,335	0,112

Fonte: A autora (2020).

Figura 75 - Gráfico de correlações entre os parâmetros morfológicos espaçamento, abertura e comprimento das fraturas do Painei 2. A) Espaçamento versus comprimento, B) Espaçamento versus abertura e C) Abertura versus Comprimento. Os gráficos mostram que os dados não apresentam uma correlação entre os parâmetros e uma grande dispersão dos dados.



Fonte: A autora (2020).

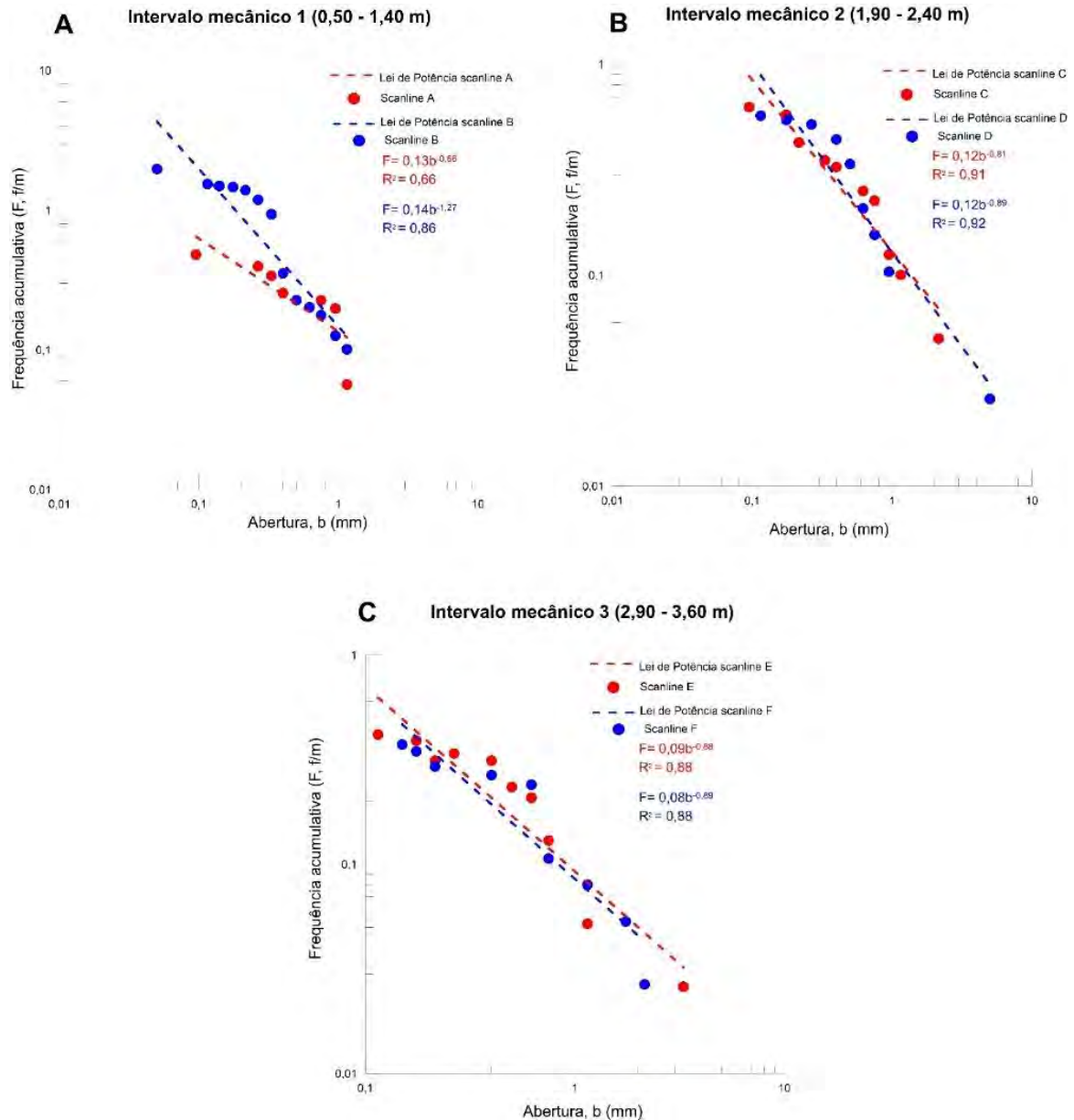
Para avaliar a relação espacial, e as propriedades das fraturas (abertura e espaçamento), em relação aos intervalos mecânicos foram realizadas duas *scanlines* em cada um dos três intervalos mecânicos da sucessão sobre os painéis discretizados, com um total de 245 m de varredura linear (Figura 76 e 77).

1. A densidade de fraturas nas *scanlines* A e B, no intervalo inferior, são diferentes. Este intervalo possui com maior número de fraturas por metro chegando ao máximo de 11 f/m.

O espaçamento médio entre as fraturas foi de 2,07 m e 0,49 m, nas *scanlines* A e B, respectivamente. Os dados das *scanlines* revelam as zonas de clusterização formadas por veios verticais. Os dados de regressão entre a frequência acumulativa de fraturas e os valores de abertura apresentam boa correlação ($R^2 = 0,66$ e $R^2 = 0,86$), e a lei de potência observada para a abertura das fraturas possui expoente escalar de -0,66 e -1,27, nas *scanlines* A e B, respectivamente.

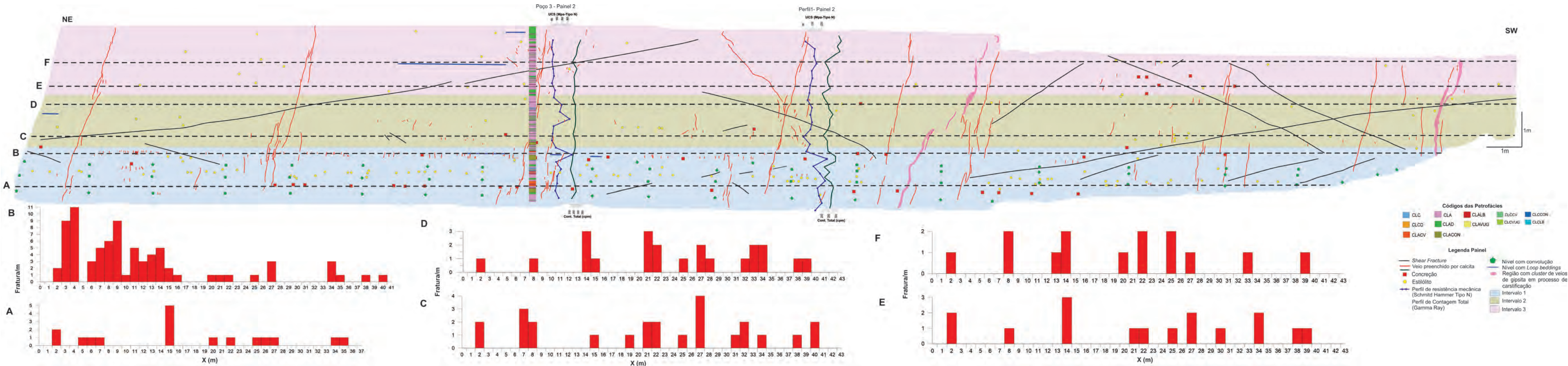
2. No intervalo mecânico 2 a distribuição de fraturas por metro nas *scanlines* C e D é semelhante. Apresenta no máximo 4 f/m, com espaçamento médio de 1,59 m e 1,74 m, em C e D respectivamente. Este intervalo apresenta uma maior regularidade entre as fraturas, do que o intervalo 1. As relações entre a frequência acumulativa das fraturas e a abertura são positivas, com um bom grau de correlação $R^2 = 0,91$ e $R^2 = 0,92$, e a lei de potência observada para a abertura das fraturas possui expoente escalar de -0,81 e -0,89, nas *scanlines* C e D, respectivamente. Há uma maior semelhança entre as retas de regressão das duas *scanlines*, e o intervalo apresentam fraturas com maior abertura.
3. No intervalo mecânico 3 a distribuição das fraturas por metro é semelhante nas *scanlines* E e F. O intervalo com menor número de fraturas por metro entre os intervalos de no máximo 3f/m, e com maior regularidade de espaçamento entre as fraturas, com média de 2,40 m e 2,67 m, nas *scanlines* E e F respectivamente. Os parâmetros de frequência cumulativa e abertura das fraturas apresentam uma boa correlação $R^2 = 0,88$ e $R^2 = 0,89$, e a lei de potência observada para a abertura das fraturas possui expoente escalar de -0,88 e -0,89, nas *scanlines* E e F respectivamente.

Figura 76 – Gráfico de correlação dos parâmetros das fraturas a partir das *scanlines* 1D. As aberturas para as *scanlines* nas fraturas naturais apresentam uma relação entre frequência cumulativa e valor de aberturas que pode ser expressa a partir de uma lei de potência. A) Intervalo mecânico 1 com o gráfico log-log das *scanlines* A e B. B) Intervalo mecânico 2 com o gráfico log-log das *scanlines* C e D. C) Intervalo mecânico 3 com o gráfico log-log das *scanlines* E e F.



Fonte: A autora (2020).

Figura 77- Levantamento de *scanlines* digitais nos intervalos mecânicos definidos no painel 2. *Scanline A* realizada a 0,25 m de altura no painel e gráfico A de frequência versus comprimento do painel em metros (X). *Scanline B* realizada a 0,75 m de altura no painel e gráfico B de frequência de fraturas versus comprimento do painel em metros (X). *Scanline C* realizada a 1,50 m de altura no painel e gráfico C de frequência versus comprimento do painel em metros (X). *Scanline D* realizada a 2,00 m de altura no painel e gráfico D de frequência versus comprimento do painel em metros (X). *Scanline E* realizada a 2,50 m de altura no painel e gráfico E de frequência versus comprimento do painel em metros (X). *Scanline F* realizada a 3,0 m de altura no painel e gráfico F de frequência versus comprimento do painel em metros (X).



Fonte: A autora (2020).

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados serão discutidos nos tópicos a seguir.

4.1 ANÁLISE DOS ASPECTOS MACROFACIOLÓGICOS E GENÉTICOS DAS PETROFÁCIES

A caracterização macrofaciológica das petrofácies da Formação Crato definidas nos pseudo-poços do Painei 1 e Painei 2 mostraram que os calcários laminados possuem uma grande variedade de heterogeneidades sin-deposicionais e diagenéticas. A sucessão de laminitos apresenta variação de cor que está ligada a composição dos estratos e a processos diagenéticos (HEINHOFER et al., 2010; OSÉS et al., 2016, 2017). Mudanças nas condições climáticas modificaram os processos químicos do sistema lacustre onde os laminitos se formaram, Eh, pH, salinidade, taxa de precipitação e solubilidade dos carbonatos. Estas variações produziram mudanças na composição mineral porosidade primárias e aspectos de diagênese precoce (AHR, 2010). A deposição dos carbonatos em lagos modernos ocorre através de precipitação química na região superior da coluna d'água, associada a ação de microrganismos (HEINHOFER et al., 2010). Essa interação acontece através da captura de CO₂ da água por fitoplanctons e picoplânctons, o que aumenta o pH do lago, e a saturação de carbonato de cálcio (KELTS E HSËU, 1978). A variação sazonal do clima pode ficar registradas no sedimento e são conhecidas como varvas não glaciais. Os varvitos são caracterizados pela variação de coloração em sua laminação, lâminas claras geralmente são compostas por calcita formada durante estação mais quente, e escuras formadas durante estações mais frias, compostas por lâminas menos ricas em carbonato de cálcio, resultante da precipitação de material orgânico e detritos. A associação de lâminas claras/escuras pode estar ligada à crescimento de esteiras bacterianas ou micro variações climáticas (KELTS E HSËU, 1978; ZOLITSCHKA, 2003; NEUMANN et al., 2003). Este processo é observado em depósitos lacustres de outras bacias, Campos, Santos e Espírito Santo (Cretáceo, TERRA et al., 2010; MUNIZ & BOSENCE, 2015; JOHANN & MONTEIRO, 2016), e Bacia de Jatobá (Cretáceo, NEUMANN et al., 2010). A precipitação físico-química de carbonato de cálcio, e de minerais como gipsita e halita podem ser comuns em regiões áridas, com mudanças sazonais de salinidade, como por exemplo a precipitação carbonática sazonal em bacias evaporíticas do Mar Morto (Israel) e Lago Van (Turquia) (MARTILL, BECHLY & LOVERINDGE, 2007).

4.1.1 Análises dos aspectos microfaciológicas das petrofácies

As análises petrográficas, com apoio de catodolumiscência e MEV (EDS/ WDS), realizadas nos laminitos sustentam a hipótese que existe uma diferença composicional, textural e principalmente diagenética entre os laminitos que apresentam coloração cinza (G2), e bege amarelado (G1). Ambos os grupos de petrofácies apresentam pouca contribuição clástica, o que

sugere que a deposição desses calcários foi autóctone. As petrofácies pertencentes ao grupo G1 apresentam matriz micrítica, com cristais de calcita predominantemente idiomórficos romboédricos e poliedrais (4 a 10 μm) e lâminas menos espessas (30 a 60 μm), enquanto as do grupo G2 apresentam matriz com cristais de calcita predominantemente subidiomórficos (4 a 10 μm), e por vezes com cristais maiores 10 μm e lâminas mais espessas (40 a 90 μm). Essas observações podem apontar para uma possível contribuição de bioindutores e/ou biomediadores na precipitação dos carbonatos na coluna de água, e ainda que a variação na taxa de sedimentação modificou a espessuras das lâminas e a formação dos cristais de calcita (MARTILL, BECHLY & LOVERINDGE, 2007; HEINHOFER et al., 2010; CATTO, 2015; OSÉS et al., 2017). A análise ao MEV mostrou que os laminitos sofreram uma alteração diagenética precoce que favoreceu a cimentação da porosidade primária interpartícula com calcita micrítica (< 4 μm) e/ou sílica microcristalina nos estratos do Grupo G2 (cinza) (Figura 78). Em rochas carbonáticas finamente granuladas, a grande superfície de contato entre o fluido e os grãos favorece a precipitação precoce e rápida de cimentos calcíticos, ainda em estágios iniciais do soterramento (LEVENU et al., 2015).

As petrofácies do grupo G1 se formaram sob uma taxa de deposição menor do que os laminitos cinza, e isto resultou em uma menor porosidade primária deposicional. Este processo limita a circulação de fluido a ação de microorganismos dentro do substrato raso e a precipitação de calcita nos poros. Uma taxa de deposição maior nos laminitos do grupo G2. CLC, resultou na formação de porosidade primária deposicional maior, e maior quantidade de fluidos intersticiais. A baixa permeabilidade permitiu a preservação de matéria orgânica e pirita nestes estratos, e a posterior precipitação de micrito e sílica microcristalina nos poros. A inversão da porosidade durante os estágios iniciais da diagênese, ou seja, níveis com maior porosidade primária, que se tornam menos porosos é um aspecto descrito em laminitos microbiais intrasalinos do Grupo Ara, Bacia de Oman-Iran/Paquistão (BECKER et al., 2019). Neste caso o fator desencadeador do processo foi o refluxo de água salina na bacia. A circulação de fluidos em níveis mais porosos resultou na precipitação precoce de cimentos de dolomita, anidrita e halita. Os níveis com menor porosidade primária funcionam como barreiras e apresentam um menor fator de cimentação precoce. A maior concentração de matéria orgânica e pirita nas petrofácies CLC, apontam para uma maior produtividade biogênica e/ou o maior efeito das condições de anoxia e salinidade do que nas petrofácies CLA.

Nas petrofácies do grupo G2 de um modo geral, é observada internamente sub-laminações formadas por grãos de piritas disseminadas ou substituindo a matéria orgânica, esse processo de piritização é predominante nestas petrofácies. A presença de pirita no grupo G2

aumenta consideravelmente a densidade da rocha. A formação de pirita nestas fácies pode ser atribuída ação bacteriana de sulfato redução, gerada pela degradação da matéria orgânica em fortes condições redutoras, durante a deposição dos carbonatos na bacia (SCHIEBER et al., 2007; MARTILL, BECHLY AND LOVERINDGE, 2007; RODRIGUES & QUIÑÓNEZ, 2018). Esse mesmo processo estratigraficamente confinado, ligado a fases de interrupção ou pausas de sedimentação no lago, pode gerar uma intensa precipitação calcítica em torno da matéria orgânica. Assim, favorecendo a intensa cimentação local que dá origem a concreções do tipo A (eo-diagenéticas), em intervalos estratigráficos isolados (antes da compactação) definidos pela petrofácies CLCCON, e do tipo C em fase posterior da eo-diagênese (após a compactação) definido pela petrofácies CLACON (RAISWELL & FISHER, 2010; MARSHALL & PIRRIE, 2013). Devido à baixa pressão de compactação a cimentação que deu origem as concreções nessas petrofácies preencheram de forma eficiente a porosidade primária e formaram um sistema fechado, um nódulo rígido diferenciado da matriz (RAISWELL & FISHER, 2010). Nas petrofácies do grupo G2 a presença de calcita magnesiânica (Mn^{+2}) - cimento tardio, observada na CL, e de óxido de titânio (pirolusita), possivelmente estão associadas a etapas tardias da diagênese.

Condições hipersalinas e redutoras na bacia também favoreceram o crescimento de fauna microbial bentônica cujos vestígios foram observados principalmente nos depósitos da petrofácies CLCCV, e em menor proporção na CLACV. Os microrganismos (ex. cianobactérias) podem apresentar um papel importante na coesão dos sedimentos e na formação de estruturas sedimentares, como biolaminações e tapetes microbriais (CATTO et al., 2016; RODRIGUES & QUIÑÓNEZ, 2018). Esses organismos fotossintetizantes podem alterar a solubilidade dos carbonatos, induzindo a precipitação de minerais (dolomita eo-diagenética, gipsita e carbonatos), disseminação de grãos, formação de óxidos e hidróxidos de ferro, cimentação em lâminas específicas (sílica amorfa e microcristalina, calcita microcristalina) e formação de oóides (RODRIGUES & QUIÑÓNEZ, 2018). Exemplos semelhantes de biolaminações em rochas carbonáticas são observadas em bacias cretáceas da Colômbia (Formação Tetuán, Paja e La Luna- RODRIGUES & QUIÑÓNEZ, 2018) e no Brasil (Formação Barra Velha – CATTO et al., 2016).

Foi registrada a presença frequente de sílica amorfa nos laminitos substituindo localmente ou completamente os cristais de calcita micrítica ou preenchendo a porosidade interpartícula.

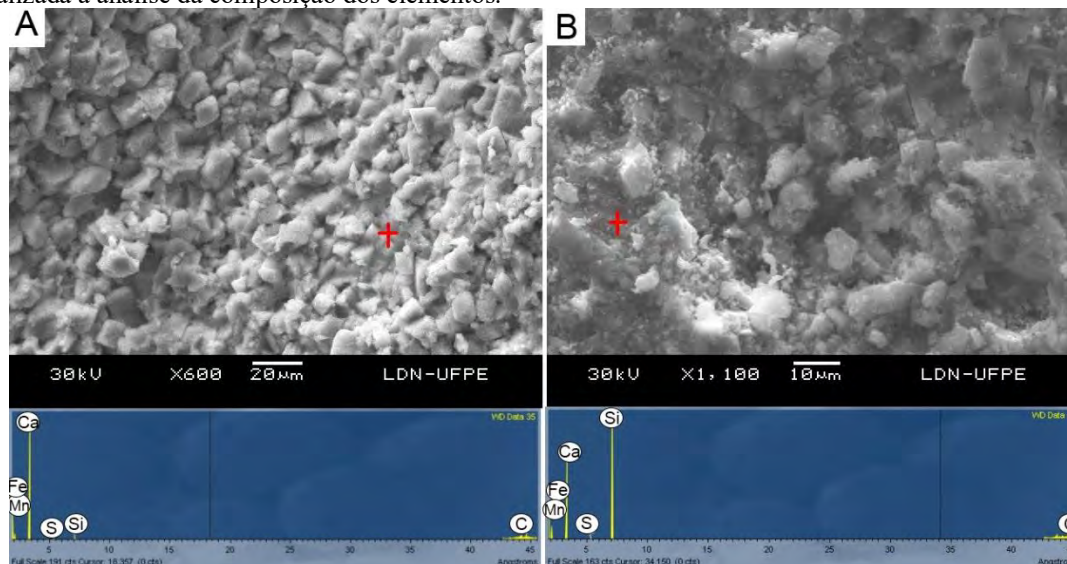
Fatores como porosidade e a permeabilidade inicial das fácies, condições de hipersalinidade e de anoxia/redutoras, de baixa temperatura e pH neutro durante a deposição de

carbonatos podem afetar a solubilidade da sílica, contribuindo para a maior precipitação no estágio inicial da diagênese (WILILAMS & CRERAR, 1985; NEUMANN, 1999; ANDHIKA et al., 2015). A disponibilidade de sílica nos fluidos intersticiais dos laminitos possivelmente foi favorecida pela circulação de fluidos provenientes da ascensão de água dos aquíferos sotopostos formados nos arenitos da Formação Cariri. Estruturas associadas a processos de fluidização e liquefação como breccia pipes, geradas por terremotos, indicam que eventos de alta energia promoveram o aumento da tensão interna dos fluídos e a sua mobilização através dos laminitos (MARTILL, LOVERIDGE & HEIMHOFER, 2007; RAMOS, 2020). O processo de silicificação é mais intenso nos laminitos das petrofácies do grupo G2 (cinza) (CLC, CLCCV e CLCCON). Contudo algumas petrofácies do grupo G1 CLACON e CLACV também apresentam sílica microcristalina que preencheu a porosidade primária e em menor proporção cristais de calcita microcristalina.

As petrofácies relacionadas as estruturas do tipo loop beddings e convolutas geralmente apresentam uma porosidade primária reduzida. Os laminitos portadores destas estruturas apresentavam maior porosidade primária e por isso foram afetados por processos de liquefação e deformação plástica (ALENCAR, 2018). Da mesma forma estes intervalos também passaram por intensa cimentação precoce, e a partir da inversão da porosidade, se transformaram durante a meso-diagênese em barreiras hidráulicas. Esse efeito é mais acentuado nas petrofácies CLCLB e CLCCV.

Processos locais de dolomitização, dedolomitização e dissolução podem estar ocorrendo durante a eo, meso e telo-diagênese, devido a percolação de fluidos diferentes. A análise de MEV e de CL mostrou que a dolomita ocorre como cimento no grupo G2, principalmente na petrofácies CLCCON. Já no grupo G1 há presença de cristais idiomórficos e pseudomorfos de dolomita. O processo de dissolução nos laminitos em escala meso e micro foi controlado por fatores deposicionais, composicionais e estruturais. O fluxo de fluido foi regido principalmente pela dupla porosidade (matriz + fratura). A maior intensidade de dissolução ocorre de forma horizontalizada, nas petrofácies CLAD e CLAVUG que apresentam textura poikilotópica, e nas petrofácies CLCD e CLCVUG, que são laminitos mais ricos em matéria orgânica e/ou associada a porosidade do tipo vugular (intrafossilífera e de fratura). O processo de dissolução pode ocorrer em sites nos conjuntos de lâminas, conectando a porosidade intercristalina, ou criando poros isolados através da dissolução dos cristais de calcita.

Figura 78 - Imagem backscatter (MEV-WDS) dos calcários laminados da Formação Crato. A) característica do grupo G1, petrofácies CLA - matriz micrítica constituída predominantemente por calcita microcristalina (4 – 10 μm), cimento calcítico e poucos microcristais de sílica (< 4 μm) preenchendo a porosidade primária. Em menor quantidade pirita, matéria orgânica e óxidos de manganês e ferro. B) características do grupo G2, petrofácies CLC - matriz constituída por calcita microcristalina (4 – 10 μm), e intensa cimentação da porosidade primária por sílica microcristalina, além de pirita, matéria orgânica e óxidos de manganês e ferro. A cruz vermelha indica olocal que foi realizada a análise da composição dos elementos.



Fonte: A autora (2020).

4.1.2 Variação da resistência mecânica das petrofácies

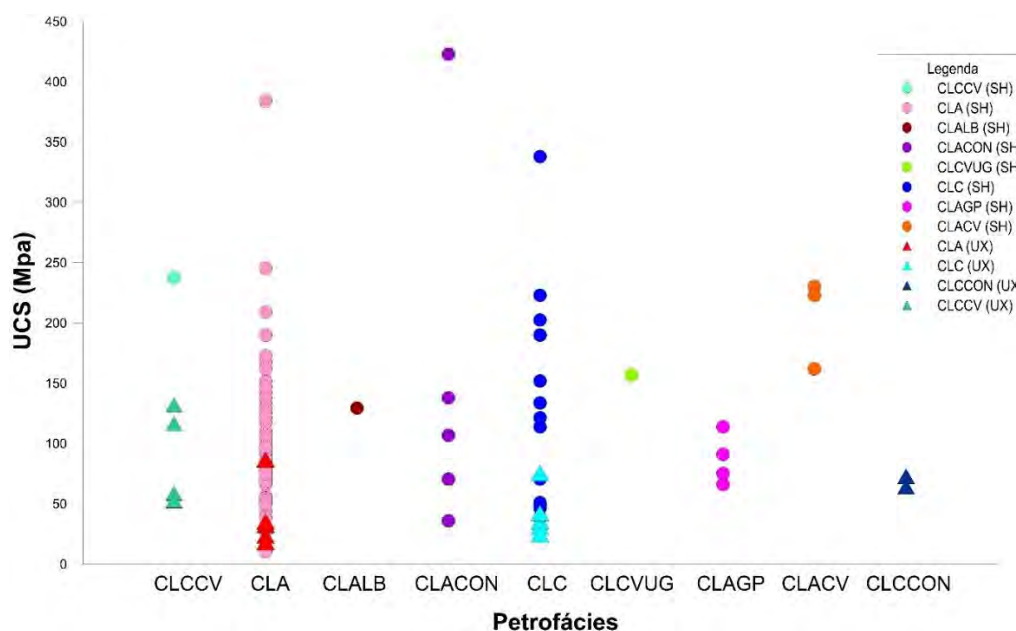
A influência do efeito deposicional, composicional e diagenético no comportamento das propriedades micromecânicas nos carbonatos apresenta-se como fator de grande importância. A variação das petrofácies, vertical e lateral, foi controlada por processos de natureza precoce de formação das rochas (PERRAS & DIEDERICHS, 2011). Segundo Rijken (2005) processos de cimentação nas rochas podem alterar as propriedades de resistência a tração, rigidez, fragilidade e mecânica de fraturas.

As análises de resistência mecânica nas petrofácies mostram que a ampla variação de rigidez está associada diretamente com fatores deposicionais e eo-diagenéticos, como a cimentação precoce. Esses processos tendem a causar segundo Perras & Diederichs (2011) maior grau de fragilidade nos carbonatos. Os níveis que preservaram mais da porosidade primária servem como sites de nucleação de fraturas, e apresentam menor rigidez, o que explica os valores mais baixos de UCS. Algumas dessas petrofácies (CLACV, CLALB e CLACON) podem apresentar valores mais altos de resistência, por causa da influência da cimentação e/ou substituição de cristais calcita por sílica microcristalina. Devido a estes fatores, os estratos tendem a apresentar altos valores de UCS (*Schmidt Hammer* e em testes uniaxiais), formando *layers* de alta rigidez com grande número de fraturas do tipo *stratabound*. As petrofácies do Grupo G2 que apresentam cimentação precoce, apresentam valores de UCS (*Schmidt Hammer*)

21,88% maiores do que nas petrofácies do Grupo G1. Já nos dados obtidos por meio dos testes uniaxiais mostram que as petrofácies definidas no G2 são 38,79% mais rígidas, que no G1. Gharechelou et al. (2020) demonstraram o mesmo efeito de aumento da rigidez em rochas carbonáticas (Formação Asmari- Iran). A presença de sílica nas petrofácies é a principal responsável pelo incremento da rigidez nos laminitos com e sem heterogeneidades (RAISWEL, 1987; MCBRIDE et al., 2003; LIU et al., 2019).

Na Figura 79 é possível observar que os dados de *Schmidt Hammer* possuem valores mais altos de UCS do que os valores dos testes de compressão uniaxial realizados em plugues para as petrofácies, porém continuam refletindo a mesma tendência de rigidez para cada petrofácies avaliada em ambos os métodos. A mesma resposta a rigidez nas petrofácies estudadas em ambos os métodos valida a utilização das análises de *Schmidt Hammer* realizadas em campo com os ensaios de compressão uniaxiais estáticos feitos em laboratório.

Figura 79 – Gráfico para a correlação entre os valores de *Schmidt Hammer* Tipo N (círculos), e valores dos testes de compressão uniaxial (triângulos) para as petrofácies CLCCV, CLA, CLALB, CLACON, CLC, CLCVUG, CLAGP, CLACV e CLCCON. Foi atribuído para dados de *Schmidt Hammer* a simbologia de círculos e para os valores de teste de compressão uniaxial triângulos.



Fonte: A autora (2020).

4.2 APLICAÇÃO DO PSEUDO-POÇOS NA CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E GAMAESPECTROMÉTRICA

A análise faciológica sistemática realizada a partir dos pseudo-poços mostram uma variação vertical de alta frequência das petrofácies, com uma microciclicidade entre dois principais grupos de mudstone, grupo G1 e G2, o agrupamento das lâminas predominantemente do mesmo litotipo resulta na formação de camadas de maior ou menor competência nos poços. Com isso, a predominância das fácies cinza na base dos pseudo-poços, assim como, a abundância das fácies amarela na porção média e superior dos poços, influencia na variação das propriedades mecânicas.

Os perfis de gamaespectrometria refletem a variação composicional das petrofácies. A predominância das petrofácies do grupo G2 na base dos pseudo-poços 1 e 2, rica em matéria orgânica apresenta maior influência de U, o que representa valores mais altos de raios gama (JIANG & MOKHTARI, 2019). Enquanto os mais baixos valores de raios gama nos poços são diretamente relacionados a ocorrência de petrofácies CLA e CLAD, e os maiores valores de Th e da razão Th/U nos perfis podem estar ligadas a mudança de um ambiente mais redutor para um ambiente oxidante durante a deposição (BELILA, 2014). Baixos valores de K demonstram a pouca ou nenhuma contribuição terrígena nos laminitos. Eventos cíclicos registrados em

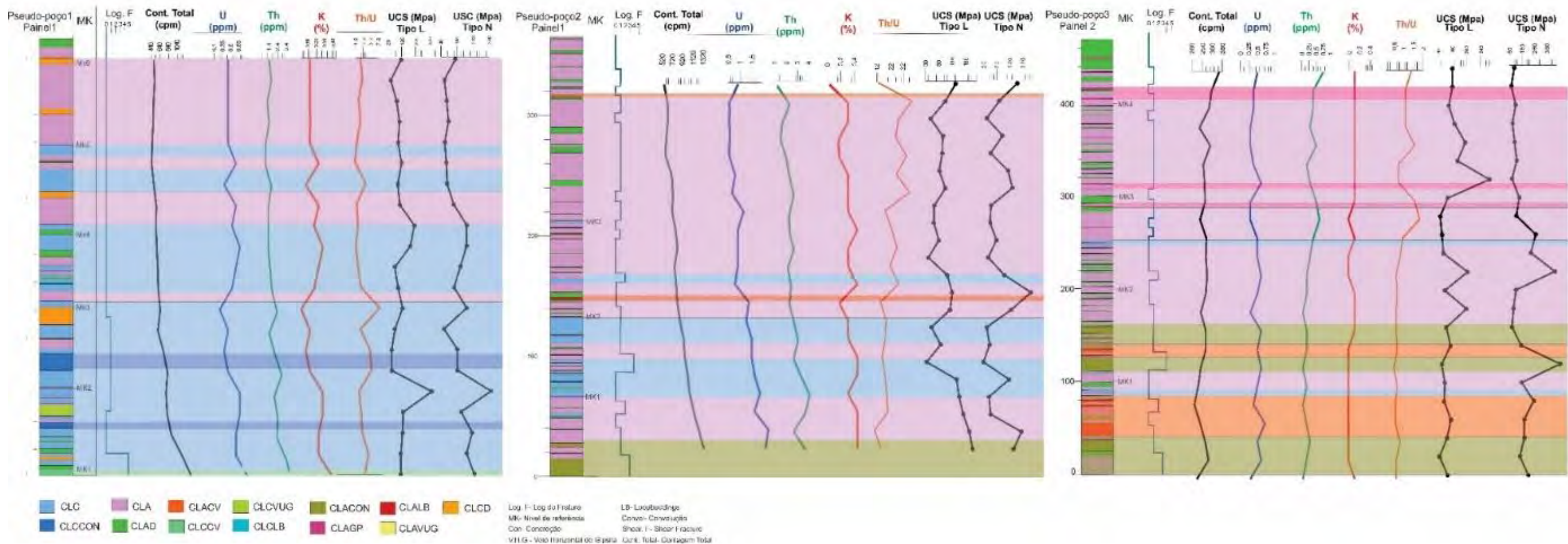
carbonatos lacustres da Formação Macabu, Bacia de Campos, foram reconhecidos em perfis de raios gama e está associada a flutuações no nível do paleolago, onde foram depositados (MUNIZ & BOSENCE, 2015).

Os altos valores de resistência nos perfis Schmidt Hammer Tipo L e N estão diretamente relacionados às petrofácies CLC, CLCCON, CLCCV, CLCLB, CLACV, CLALB e CLACON. O comportamento micromecânico destas petrofácies controlou parâmetros de fraturamento, como segmentação, comprimento, abertura e frequência das fraturas. Nos poços que apresentam predominância das petrofácies menos resistentes (CLA, CLAGP, CLAD, CLCD), há um menor fator de segmentação das fraturas (fraturas de maior comprimento) e maiores aberturas (0,115 a 1,15 mm), enquanto nas fácies de maior resistência mecânica (CLC, CLCLB, CLCCV, CLCCON, CLALB e CLACV) as fraturas são segmentadas do tipo *stratabound* (fraturas de menor comprimento, confinadas ao nível de maior resistência) com menores aberturas (0,05 a 0,115 mm). Em reservatórios carbonáticos naturalmente fraturados é comum a presença de heterogeneidades. Heterogeneidades são a causa do fraturamento em diferentes escalas, o que pode afetar a produtividade entre os poços. Este efeito é reconhecido por meio do fenômeno e grande volume de produção em um curto intervalo de tempo, devido a uma região intensamente fraturada nas proximidades do poço (NELSON, 2001; ABDOLLAHI et al., 2004; NARR et al., 2006; GALE et al., 2014; WENNERBERG et al., 2016).

De acordo com Perras & Diederichs (2011) a variabilidade das propriedades mecânicas pode facilitar o processo de iniciação de fraturas em rochas carbonáticas, e existe uma relação inversamente proporcional entre força e tamanho do grão. A diferença de rigidez entre os cristais, composição carbonática monomineralógica (matriz + cimento), processos de recristalização, dolomitização e plano de estratificação, também são fatores que podem atuar como locais de iniciação de fraturas por causa da baixa resistência a tração. A continuidade na propagação e conectividade das fraturas vistas nos poços pode ser estar associada ao contraste mecânico entre os intervalos mecânicos que compõem a sucessão.

Nos poços 1 e 2 os veios apresentam-se predominantemente subverticais a verticais com direções NE-SW e NW-SE, e no poço 3 os veios são verticais com direção NW-SE ou N-S. A presença de veios verticais, shear fractures (baixo a médio ângulo com direção variada) e estilólitos nos poços mostram que esses são os principais meios de fluxo de fluido na direção vertical, e a associação destas estruturas com níveis mais porosos (CLCD, CLAD, CLAGP, CLAVUG e CLCVUG) pode ser indício de uma complexa interação entre essa rede permeável.

Figura 80 – Correlação da sucessão de petrofácies encontradas nos pseudo-poços dos painéis 1 e 2. As imagens dos pseudo-poços mostram a influência e predominância de uma determinada petrofácies ou conjuntos de petrofácies no controle da abundância de fraturas, e no comportamento dos perfis de gamaespectrometria e de resistência mecânica. A e B) Pseudo-poço 1 e 2 do Pannel 1 levantado na mineração Idemar e C) pseudo-poço 3 do Pannel 2 levantado na mineração Willian.



Fonte: A autora (2020).

4.3 GÊNESE, DISTRIBUIÇÃO E RELAÇÕES DAS HETEROGENEIDADES DEPOSICIONAIS, DIAGENÉTICAS E ESTRUTURAIS SIN E PÓS- DEPOSICIONAIS NOS PAINÉIS

As análises dos painéis realizados nas minerações permitiram um entendimento mais amplo de como as pequenas variações nas condições deposicionais e diagenéticas controlam as propriedades físicas e mecânicas, e seu efeitos distribuição das estruturas sin e pós-deposicionais em escala de afloramento (Figura 81). Nestes painéis o controle deposicional e diagenético das petrofácies foi um dos fatores importantes para avaliar a variação da propriedade mecânica. Por meio da correlação dos pseudo-poços foi possível reconhecer que este tipo de depósito apresenta heterogeneidades associadas a intervalos mecânicos que possuem grande continuidade lateral (Figura 80), o que é essencial para a predição do fluxo de fluidos em reservatórios naturalmente fraturados.

Fatores deposicionais ligados a variação climática sazonal durante a deposição dos calcários são os principais responsáveis pela diferença faciológica de ampla continuidade lateral nos afloramentos do nível C6 Formação Crato (NEUMANN et al., 2003, OSÉS et al 2016, 2017, HEINHORFER et al., 2011). De acordo com Lavenu et al. (2015) a cimentação precoce pode modificar a propriedades mecânicas da rocha, podendo gerar mudanças na rigidez e na porosidade primária. Como, por exemplo, na Formação Altamura e Bari na Plataforma de Murge no sul da Itália, o processo de cimentação por calcita micrítica formou esqueleto rígido em torno dos grãos, o que levou a litificação e ao endurecimento precoce nas rochas carbonáticas (LAVENU et al., 2013; 2015).

A piritização forma agregados ou cristais euédricos centimétricos que podem claramente serem observados no painel 1, associado de forma mais restrita às petrofácies CLC, devido ao ambiente anóxico de deposição, que facilita a respiração anaeróbica de bactérias sulfato redutoras responsáveis pela formação de pirita no laminitos. A presença de sílica microcristalina ou em formas de nódulos também é comum nos mudstones da Formação Barra Velha (GOMES et al., 2020). De acordo com Alencar (2018) eventos sísmicos gerados durante os estágios iniciais da diagênese são os principais responsáveis pela formação das heterogeneidades sin-deposicionais nos laminitos. As delgadas espessuras dos intervalos portadores dessas estruturas e a extensa continuidade lateral dos níveis indicam que os eventos sísmicos aconteceram quando os estratos estavam sob um regime viscoso-elástico, o que afetou de forma mais intensa depósitos com maior conteúdo de água intersticial (CALVO et al., 1998; MARTIN-CHIVELET et al., 2011; PASCUA et al., 2000). Níveis portadores de estruturas convolutas e *loop beddings* ocorrem intercalados por níveis não perturbados, o que indica uma formação através de sismicidade de baixa intensidade.

Estruturas concrecionais também foram formadas durante a eo-diagênese em condições de baixa compactação, e estão dispostas nos painéis em níveis estratigráficos de alta continuidade e isolados, principalmente relacionados as petrofácies do grupo G2. Em ambos os painéis as concreções estão presentes em maior número e tamanho na porção basal, diminuindo tamanho e a quantidade em direção ao topo da sucessão. Há ainda uma diferença significativa na morfologia e grau de rigidez das concreções. Na base do painel 1 são maiores e apresentam maior rigidez mecânica com predominância das concreções do Tipo A, e as concreções (menores e menos rígidas) do Tipo C estão presentes no painel 2. O processo de formação das concreções está atrelado a alterações físico-químicas e a períodos de hiato deposicionais, o que produz uma intensa precipitação de carbonato de cálcio em torno da matéria orgânica e a cimentação dos poros (RAISWELL, 1987). A existência desses níveis concrecionais nos painéis geram um aumento diferencial de rigidez nos níveis portadores e adjacentes a estes, formando barreiras de fluxo de fluido, por causa da baixa permeabilidade (ALENCAR, 2018).

A presença de *shear fractures* está associada a desestabilização de níveis portadores de laminações convolutas que geraram instabilidade nos estratos acima, e a propagação de falhas normais, reversas e falhas listricas. Durante o estágio inicial da diagênese, as *shear fractures* podem ter servido como condutos para a circulação de fluxo de fluido subvertical (ricos em sílica) no laminitos (ALENCAR, 2018), ou posteriormente quando seladas, atuaram como barreiras.

A abundância dos estilólitos nas bases dos painéis (intervalo 1), estão relacionados diretamente a presença de níveis convolutos, concreções e *loop beddings*, e ainda *shear fractures*, consequentemente zonas de maior rigidez e baixa permeabilidade nos afloramentos estudados. Essas estruturas estão dispostas acima desses níveis ou confinadas, e apresentam poucos centímetros de comprimento e possui direção principal no painel 1 (SE e WNW) e painel 2 (SW). Na meso-diagênese com a evolução do soterramento, a geração de zona de sobrepressão pode explicar a formação de estilólitos verticais. Essas zonas são formadas devido à presença de barreiras hidráulicas verticais e horizontais, criando assim, bolsões de fluido pressurizado em rochas de baixa permeabilidade. Com a persistência de eventos sísmicos, gerando pulsos instantâneos de pressão, há indução de deslocamento do fluido na direção de menor tensão, gerando os estilólitos verticais pelo processo de dissolução por pressão (ALENCAR, 2018).

Veio horizontais preenchidos por gipsita estão presentes apenas no painel 2, na mineração Willian. Uma das hipóteses sugeridas para a presença destes veios no topo do intervalo C6, está ligada ao processo de fraturamento hidráulico. Durante o soterramento e a

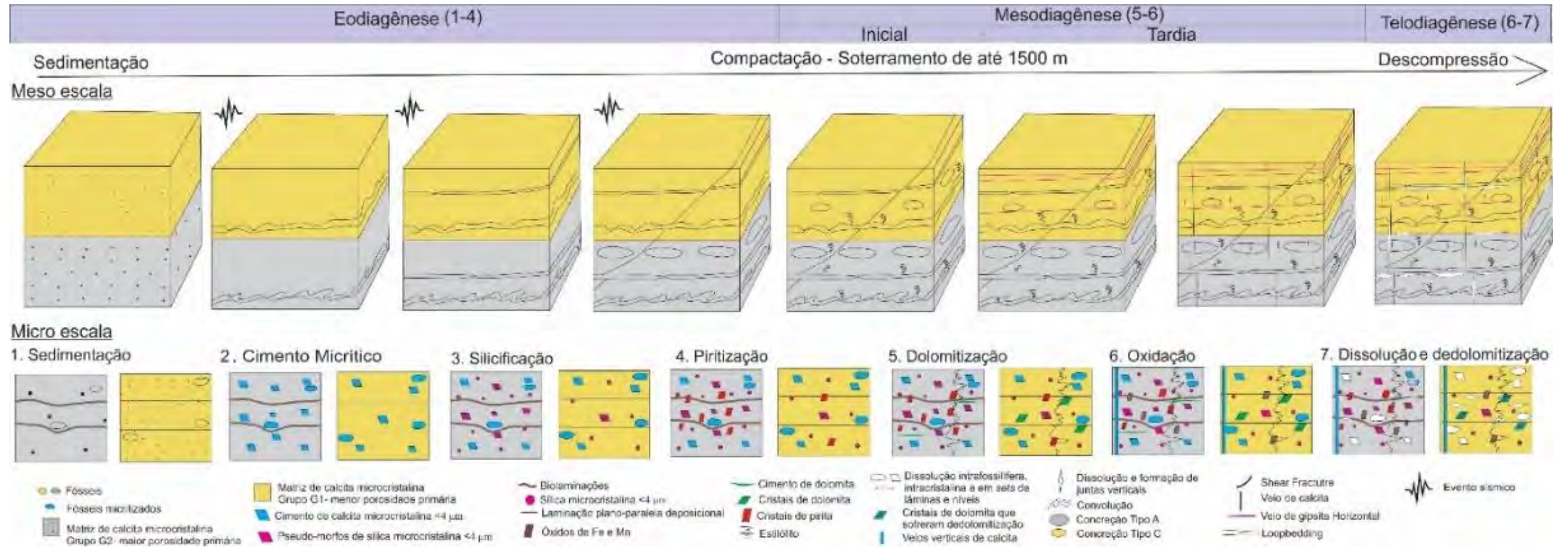
diagênese dos calcários, a pressão de sobrecarga aumenta, assim como também a pressão de fluido, devido à baixa permeabilidade. É possível que durante estágios mais avançados de diagênese a pressão e fluídos basais excedeu a pressão de confinamento e produziu veios verticais de calcita. A ascensão dos fluídos, entretanto, encontrou os estratos acima dos laminitos que compõem margas, folhelhos e os evaporitos da Formação Ipubi. Estes estratos agiram como um caprock, impedindo a continuidade de ascensão dos fluídos por meio de fraturas e falhas. Este processo pode ter levado a um acúmulo de pressão de fluido na porção superior do intervalo de laminitos, que posteriormente produziu fraturas hidráulica em zonas de menor tensão, que no caso dos calcários são as laminações horizontais. O fluido que chegou à interface entre os laminitos e os evaporitos ficou enriquecido em sulfato de cálcio, e por isso os veios horizontais foram preenchidos por *beefs* de gipsita (gipsita fibrosa), e não calcita como os veios verticais. Isto pode esclarecer a maior frequência e espessura dos veios de gipsita no topo do intervalo de laminitos, e diminuição desses parâmetros na sua base (COSGROVE, 2001; PHILIPP & GUDMUNDSSON, 2006). Em estudos realizados por Prajapati et al. (2018) foi demonstrados experimentalmente que o preenchimento das fraturas é contemporâneo ao processo de formação e abertura, e a morfologia dos cristais de gipsita podem indicar o tempo de abertura e determinar a maior ou menor porosidade interna das fraturas. Estes descreveram que o tempo de crescimento para o total preenchimento da fratura por gipsita fibrosa pode ser de até 3850 segundos, o que indica uma baixa taxa de abertura e porosidade das fraturas. Em estudo realizado por Cosgrove (2001) a presença de veios horizontais e verticais preenchidos por gipsita nos folhelhos da Bacia Bristol no Norte da Inglaterra, indicam que a sua formação ocorreu por fraturamento hidráulico, relacionado a diferentes estágios tectônicos na bacia.

A presenças de veios verticais preenchidos por calcita nos painéis possuem sua distribuição, segmentação e aberturas controlados pela presença dos níveis de heterogeneidades formado durante os estágios iniciais da diagênese. Na base (intervalo 1) de ambos os painéis há uma predominância de veios centimétricos confinados nas camadas de maior resistência (fácies cinza, convoluções, concreções e *loop beddings*), em níveis intermediários e superiores um menor fator de segmentação é observado. Conforme a literatura estudada a formação dos veios verticais de calcita estão relacionadas a processo extensionais na meso-diagênese tardia. No caso estudado, a formação possivelmente foi influenciada pela reativação das estruturas pretéritas do embasamento (MIRANDA, 2015).

A variabilidade micromecânica dos estratos é a principal responsável pela diferença nos padrões das fraturas encontradas. Com a evolução do soerguimento da bacia, durante a fase pós-rifte, a circulação de fluidos tardios nos laminitos causou processos de dilatação das juntas

(descompressão) e dissolução, o que criou estruturas de carstificação e precipitação tardia de gipsita. A formação local de *chert* e nódulos de sílica relacionadas ao segundo painel, mostra a influência da silicificação por meio da circulação de fluidos tardios durante a telo-diagênese (CABRAL, 2017).

Figura 81 – Modelo de formação das heterogeneidades deposicionais e diagenéticas dos laminitos da Formação Crato. Os blocos diagramas mostram a relação temporal dos processos da eodiagênese (porosidade primária, convoluções, *loopbedding*, concreções tipo A e *shear fractures*), mesodiagênese (concreções tipo C, estilólitos, veios horizontais de gipsita e veios verticais) e telodiagênese (dissolução e juntas). Os processos em micro escala também foram representados por símbolos: 1- sedimentação, 2- cimento micrítico, 3- silicificação, 4- piritização, 5- dolomitização, 6 – Oxidação, 7 – Dissolução e dedolomitização.



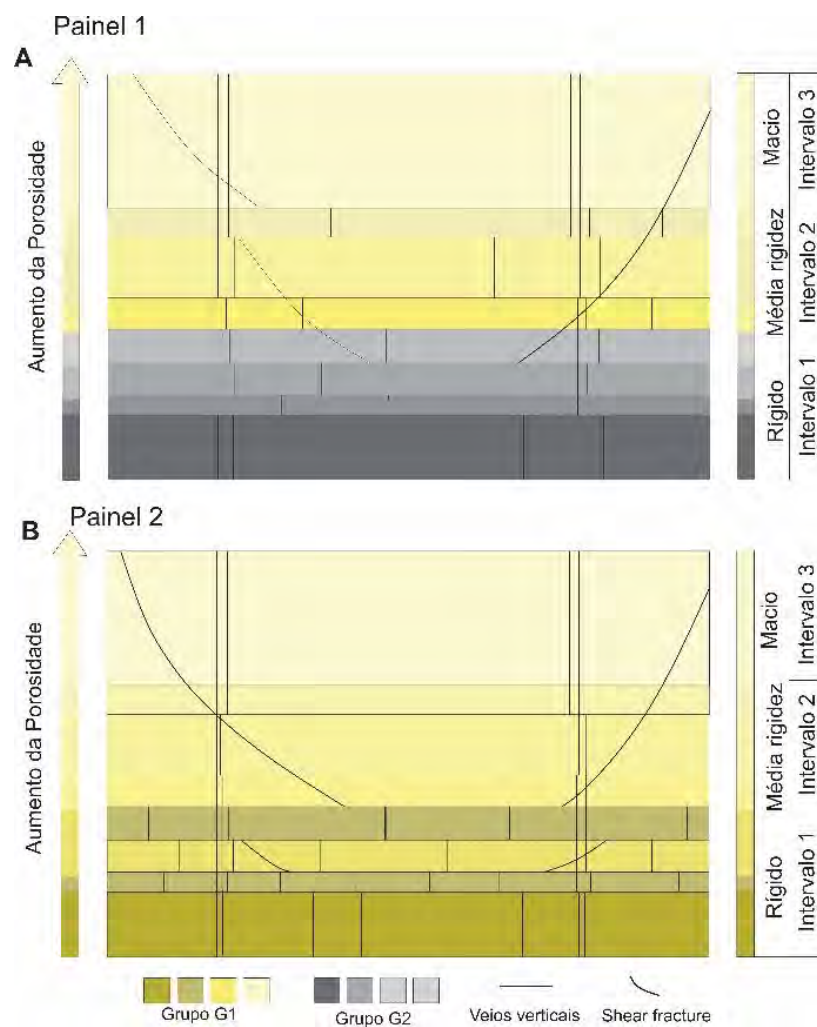
Fonte: A autora (2020).

4.4 VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ROCHA NOS INTERVALOS MECÂNICOS DEFINIDOS NOS PAINÉIS

O intervalo mecânico 1 (Figura 82), na porção basal do intervalo C6 apresenta valores mais altos a médios de resistência a compressão, enquanto nos perfis de raios gama os valores são mais altos para no painel 1, do que para no painel 2. A densidade de fraturamento no painel 1 é de no máximo 3 f/m, e no painel 2 é de 11 f/m. A maior densidade de fraturamento no painel 2 é explicada pela ocorrência de níveis concrecionais que representam zonas de maior rigidez. Na análise realizada por meio das *scanlines* digitais foi possível observar que o intervalo mecânico 1 em ambos os painéis apresentam uma mais alta dispersão nos dados de densidade de fraturas. Em todas as *scanlines* realizadas neste intervalo para ambos os painéis o fator de correlação é moderado a alto. Isto sugere que a maior ocorrência das petrofácies do grupo G2 (cinza) apresenta influência no contraste mecânico dos laminitos. Este processo controlou a relação entre a frequência cumulativa das fraturas, a abertura e o espaçamento. O espaçamento entre as fraturas de maior comprimento definido nas *scanlines* digitais para ambos os painéis ficou em torno de 1 a 1,50 m.

O intervalo mecânico 2 definido na porção intermediária dos painéis possui valores de resistência que variam de médio a baixos, com alguns pontos isolados de alta resistência a compressão. Já os perfis de raios gama apresentam valores médios a baixos. O que reflete a menor influência das petrofácies do grupo G2 (cinza). Em ambos os painéis existe uma densidade de 4 f/m e o espaçamento entre as fraturas adquiridos a partir das linhas de varredura para ambos os painéis giram em torno de 1,50 a 2,00 m. Nas *scanlines* realizadas neste intervalo em ambos os painéis o fator de correlação da frequência cumulativa das fraturas por metros com a abertura obtidos são altos. Em ambos os painéis existe similaridade no padrão de distribuição das fraturas versus abertura no intervalo 2. No intervalo 3 relacionado a porção superior da sucessão de laminitos os valores de resistência mecânica são médios a baixos, com predominância de baixos valores em direção ao topo da sucessão, assim como nos perfis de contagem total. É evidente que a diminuição dos valores neste intervalo também é explicada pelos mesmos fatores presentes no intervalo 2. Já no painel 2 ocorre uma diminuição no número de fraturas por metro. O espaçamento neste intervalo para o painel 1 varia entre 1,00 e 1,50 m, enquanto no segundo painel de 2,50 a 3,00 m. Nas *scanlines* realizadas neste intervalo, ambos os painéis apresentam um bom fator de correlação da frequência cumulativa das fraturas por metros, e não há diferença significativa entre a distribuição dos dados nas linhas de varredura. Conforme demonstrado na Figura 82 a variação da rigidez dos estratos controlou a propagação, a densidade e a segmentação das falhas sin-deposicionais, e das fraturas durante a meso-diagênese.

Figura 82 – A imagem esquemática mostrando a relação entre os intervalos mecânicos e a presença das petrofácies do grupo G1 (tonalidades de amarelo) e G2 (tonalidade de cinza), com a rigidez e a porosidade nos painéis (A- Painel 1 e B – Painel 2).



Fonte: A autora (2020).

4.5 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ROCHA NA SEGMENTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTRUTURAS VERTICAIS NOS PAINÉIS

A discretização das fraturas de extensão nos painéis permitiu realizar uma análise espacial, estatística detalhada e a correlação entre os parâmetros das fraturas. A estratigrafia mecânica nestes laminitos está diretamente ligada a estratigrafia de fraturas, pois controlou os principais parâmetros como espaçamento, comprimento, segmentação e abertura das fraturas. Com base nas petrofácies definidas, foi entendido que as variações estratigráficas de alta frequência relacionada a ciclicidade das petrofácies causam variação mecânica de muito pequena escala. O padrão fractal na segmentação das fraturas é observado em micrografias, plugues e em afloramentos, mostrando uma autossemelhança nos sistemas de fraturas em diversas escalas (GILLESPIE et al., 1993; SOUZA et al., 2008) (Figura 83).

A investigação sistemática dos veios verticais em ambos os painéis mostrou um duplo padrão de fraturamento: 1) fraturas menores dispostas em segmentos únicos e isolados, controladas pela espessura de camadas competentes, e 2) fraturas mais longas são comumente compostas de uma série de segmentos subparalelos próximos. O estudo relacionado a segmentação das fraturas por Vermilye & Scholzs (1995) sugere que as fraturas mais longas são formadas pela coalescência de fraturas menores, como observado no presente trabalho, e essas estruturas podem se conectar em subsuperfície. De acordo com os mesmos autores a variação do fator de segmentação desses veios está relacionada aos modelos de mecânica dos materiais de Dugdale (1960), em que fraturas de segmento único são formados em materiais com um comportamento predominantemente elástico-plástico, enquanto fraturas mais longas são formadas por um material com comportamento mais plástico (VERMILYE & SCHOLZS, 1995). Este fato representa bem o efeito natural descrito nesta pesquisa para a relação entre a estratigrafia mecânica e a estratigrafia de fraturas em rochas finamente laminadas. Isto explica o que foi descrito devido a relação tensão deformação dos dois grupos de *mudstones*: as petrofácies cinza apresentam comportamento mais frágil-dúctil, ou elástico-plástico, e as petrofácies amarela apresentam comportamento mais rúptil, ou plástico, mostrando que o fator de segmentação das fraturas é controlado pela propriedade do material em resposta a deformação (BONNET et al., 2001; DIEDERICHS, 2003; DIEDERICHS & PERRAS, 2011). A investigação dos sistemas de fraturas heterogêneos em análogos de reservatório permite considerar a relação dos processos naturais capturados por diferentes técnicas analíticas, e desta forma entender melhor padrões naturais e seus efeitos nas rochas. Isto é importante para a execução de processos de estimulação por fraturamento hidráulico em reservatórios, por exemplo (GALE et al., 2014).

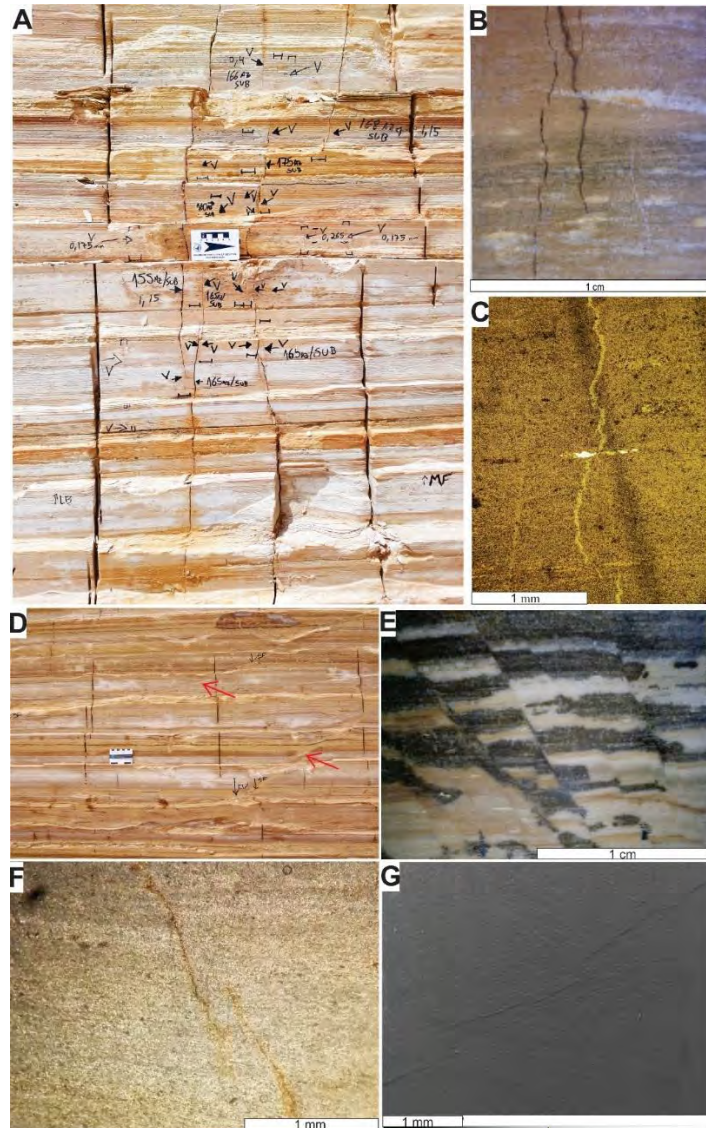
A análise da distribuição dos veios verticais preenchidos por calcita de forma geral não apresenta uma distribuição normal em ambos os painéis, devido à grande heterogeneidade dos parâmetros morfológicos das fraturas. Logo, a distribuição assimétrica positiva nos gráficos de frequência dos parâmetros como comprimento e abertura das fraturas reflete o controle da estratigrafia mecânica na estratigrafia de fraturas. De acordo com Gillespie et al. (1993) a aparente aleatoriedade nos espaçamentos das fraturas pode estar relacionada a análise indiferenciada de vários grupos de fraturas com comprimentos diferentes, no entanto na análise de subconjuntos de veios em termos de tamanho é possível observar um certo grau de correlação com o espaçamento entre as fraturas. Portanto, a partir do levantamento estatístico das fraturas foi possível identificar nos gráficos de frequência dois subconjuntos de fraturas (alta e baixa frequência) que apresentam uma certa relação entre comprimento, abertura e espaçamento com sua frequência e distribuição nos painéis. A alta frequência de fraturas de menor comprimento (Painel 1 - 10 a 600 mm; Painel 2 - 20 a 300 mm) e de menor abertura (Painel 1 - 0,05 a 0,095 mm; Painel 2 - 0,265 a 0,5 mm) é resultante da ocorrência de níveis rígidos pouco espessos nos painéis, que tendem a confinar ou segmentar as fraturas (Figura 84). A moda do comprimento das fraturas foi de 40 mm em ambos os painéis. Essas fraturas encontram-se dispostas de forma confinada aos níveis concrecionais, próximos à, ou no interior das concreções (*septurian cracks*) com espaçamentos aproximadamente regulares de 10 a 20 mm (espaçamento mínimo identificado nos painéis) (MARSHALL & PIERRIE, 2013) (Tabela 1 e 3). Nas análises realizadas em fraturas de extensão por Gillespie et al. (1993) foi atestado que o espaçamento regular destas estruturas é um produto natural da escala dos sistemas de fraturas controlados pela espessura das camadas, formado pela diferença entre as propriedades mecânicas e a deformação axial.

No entanto, também existe baixa frequência de fraturas de maior comprimento (Painel 1 - 600 a 2000 mm; Painel 2 - 600 a 3000 mm) nos painéis. Estas fraturas geralmente apresentam uma ampla variação na abertura, porém a presença de valores maiores de aberturas é mais frequente (Painel 1 - 1,15 a 4 mm; Painel 2 - 0,75 a 5 mm) (Figura 84). O maior fator de propagação destas fraturas (fraturas com maiores comprimentos) é visto no painel 2, devido a predominância das fácies CLA, devido a um menor contraste mecânico entre os intervalos 2 e 3. Assim também, ocorre com o espaçamento entre essas estruturas nos painéis, que apresenta maiores espaçamentos com valores médios entre as fraturas de 1117,1 e 1323 mm para o painel 1 e painel 2, respectivamente (Tabela 1 e 3).

Há uma diferença significativa entre a distribuição e segmentação das fraturas no painel 1 e no painel 2 mostrado na Figura 85 e detalhado na Figura 86. No painel 1 o fator de

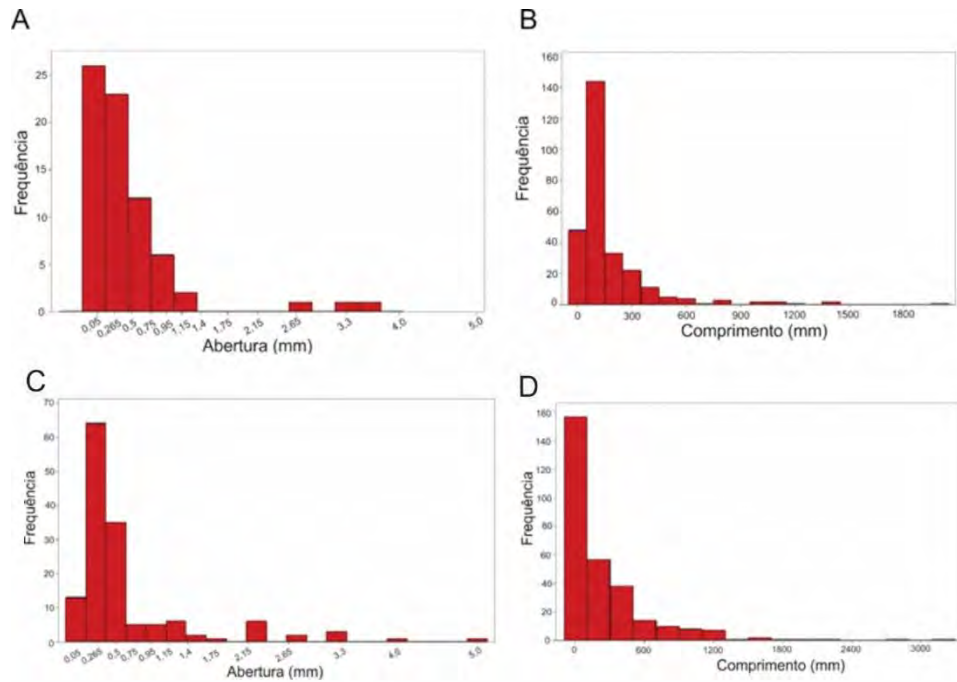
segmentação dos veios verticais é maior, devido ao maior contraste mecânico devido a influência das petrofácies do grupo G2, e uma melhor distribuição dos veios verticais de segmento único confinados aos níveis concrecionais. Já no painel 2 a segmentação dos veios contínuos é menor, e os segmentos únicos apresentam-se mais agrupados confinados mais especificamente em estruturas concrecionais. O maior número de fraturas por comprimento é observado no painel 1 (301 fraturas em 24,5 metros de comprimento), enquanto no painel 2 há um menor número de fraturas por comprimento (300 fraturas em 41,5 metros de comprimento). Um padrão similar foi observado em afloramentos de calcários na Bacia Biscay - França, em que fraturas verticais com grandes comprimentos apresentam maiores aberturas, enquanto fraturas com menores comprimentos possuem menores aberturas (ODONNE et al., 2007). A regularidade no espaçamento entre as fraturas de maior comprimento também pode estar associada ao processo extensional, criado por reativações de estruturas do embasamento (MIRANDA et al., 2015).

Figura 83 – Padrão fractal dos veios verticais preenchidos por calcita e das *shear fractures* em diferentes escalas. A) Veios verticais preenchidos por calcita em escala de afloramento, B) imagem veios em plugue, C) micrografia dos veios em lâmina delgada com nicóis paralelos. D) Segmentos de *shear fracture* em escala de afloramento, D) imagem de shear fracture em plugue, E) *shear fracture* em lâmina delgada com nicóis paralelos e E) imagem backscatter de MEV dos segmentos da *shear fracture*.



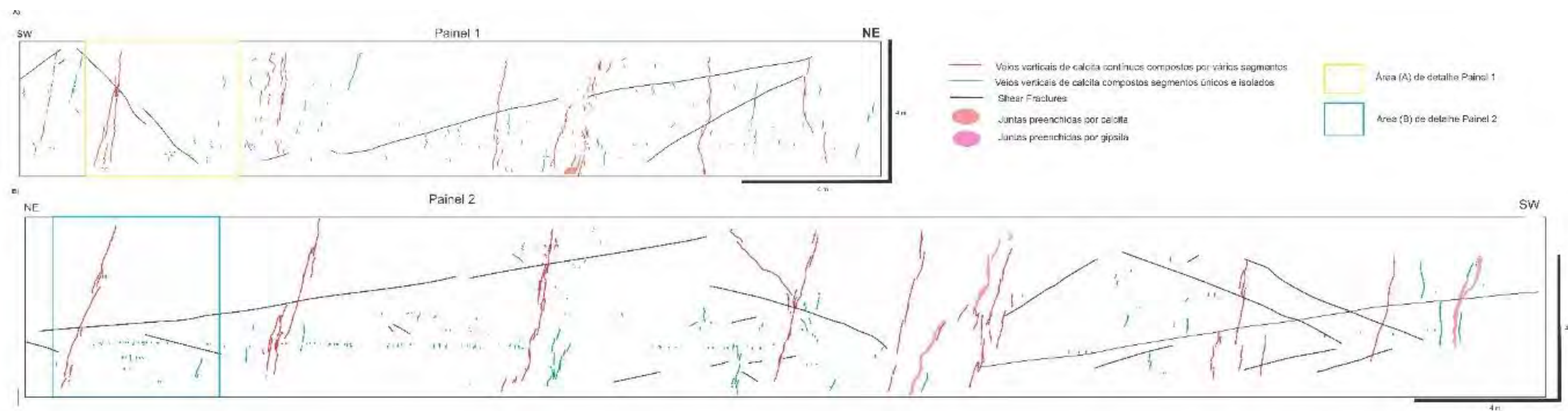
Fonte: A autora (2020).

Figura 84 – Gráficos de frequência dos parâmetros morfológicos dos veios verticais de calcita. A) Gráfico da frequência das aberturas e B) Gráfico da frequência dos comprimentos das fraturas no painel 1. C) Gráfico da frequência das aberturas e D) Gráfico da frequência dos comprimentos das fraturas no painel 2. Notar a predominância de alta frequências de fraturas de menor abertura e comprimento, e baixa frequência de fraturas com aberturas e comprimentos maiores.



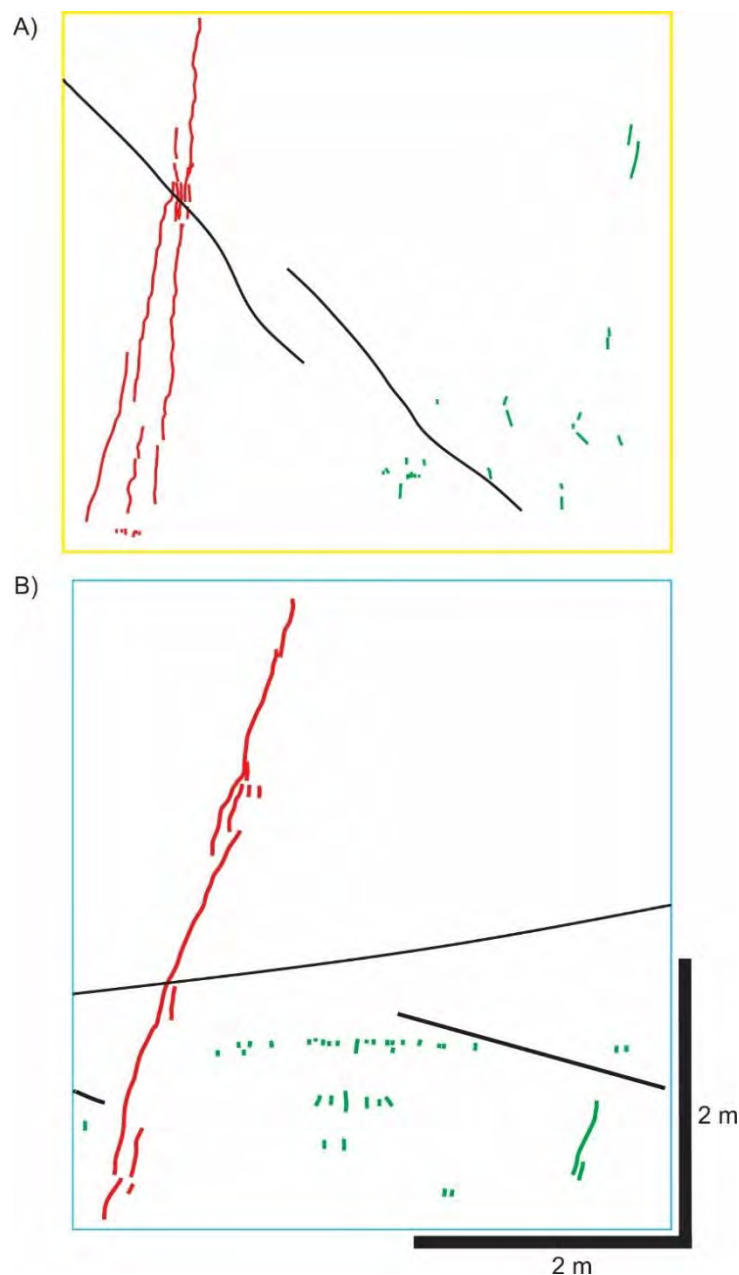
Fonte: A autora (2020).

Figura 85 – Imagem da interpretação da distribuição dos veios verticais preenchidos por calcita no intervalo C6. A) Distribuição dos veios no Painel 1 - mineração Idemar e B) no Painel 2 - mineração Willian. Os segmentos com coloração verde representam os veios segmentados e isolados de alta frequência, enquanto os segmentos de coloração vermelha, representam os veios contínuos de baixa frequência. Os retângulos amarelo e azul representam zonas que são mostradas na Figura 86.



Fonte: A autora (2020).

Figura 86 – Imagem da interpretação da distribuição das fraturas no A) Painel 1- mineração Idemar e B) Painel 2 –mineração Willian. É observado uma dois padrões distintos de fraturamento: 1- Veios verticais contínuos formados por múltiplos segmentos (em vermelho) e 2 – Veios em segmentos únicos e isolados (em verde). Há uma diferença significativa entre o padrão de fraturamento entre o painel 1 e o 2, em que os veios contínuos no painel 1 são mais segmentados que no painel 2, devido ao maior contraste mecânico deste.



Fonte: A autora (2020).

5. CONCLUSÕES

Por meio dos dados analisados neste trabalho foi possível avaliar a influência das propriedades sedimentológicas, diagenéticas e deposicionais, em micro e mesoescala na variação das propriedades mecânicas de calcários laminados da Formação Crato. O estudo microscópico, petrografia apoiada por CL e MEV, foi observado que estes processos criaram

complexa relação de heterogeneidades que representam zonas locais ou de alta continuidade lateral dentro dos estratos. A aplicação do conceito de petrofácies funcionou muito bem para um melhor entendimento da relação de aspectos sedimentológicos e diagenéticos que resultaram no controle de zonas de variação mecânica, de permeabilidade e porosidade, relacionada ao grau de cimentação precoce identificado. Foi possível definir que os calcários laminados apresentam uma anisotropia maior do que o que havia sido relatado em estudos anteriores (NEUMANN, 1999; NEUMANN et al., 2003; HEINHORFER et al., 2010; MIRANDA, 2015; OSÉS et al., 2017; MIRANDA et al., 2018; ALENCAR, 2018). A cimentação eo-diagenética por precipitação química, formação de pirita e sílica microcristalina, com provável contribuição de bioindutores, pode ter sua gênese ligada a injeção de fluidos enriquecidos em sílica provenientes dos paleoaquíferos da Formação Cariri sotopostos aos laminitos, por meio de falhas. A cimentação da porosidade primária por sílica microcristalina teve um papel importante na variabilidade de competência mecânica dos estratos. Níveis com mais alto grau de cimentação (sílica + calcita microcristalina) apresentam uma redução na permeabilidade e porosidade primária, e se comportam como barreiras de fluxo, assim como horizontes de maior competência mecânica.

Ensaio de resistência mecânica realizados nas petrofácies mostraram uma grande variação de rigidez. Os dados obtidos por meio dos testes uniaxiais mostraram que as petrofácies definidas no grupo G2 são mais rígidas e apresentam curvas típicas de um comportamento rúptil-dúctil ou frágil-dúctil, absorvendo mais deformação. Enquanto as petrofácies definidas no grupo G1 apresentam menor rigidez, um comportamento frágil. Os ensaios de *Schmidt Hammer* demonstraram os mesmos efeitos mecânicos. A presença de sílica nos depósitos foi a responsável pelo incremento da rigidez e da fragilidade nos laminitos.

O estudo dos pseudo-poços permitiu identificar o efeito de variação lateral de fácies entre poços em um intervalo delgado com mais de 1 km de distância, além de permitir a interpretação do comportamento dos intervalos com base nos pseudo-logs neles realizados. Dados dos perfis gamaespectrométricos mostram uma boa correlação entre a presença de matéria orgânica e aumento das contagens de raio gama total, U e Th. Enquanto os perfis de resistência mecânica mostram uma boa correlação entre os maiores valores de UCS, com presença de petrofácies mais rígidas (CLC, CLCCV, CLACON, CLACV) e maior frequência de fraturas.

Os intervalos mecânicos definidos nos painéis mostram a grande influência das heterogeneidades microfaciológicas em escala de afloramento. Os níveis mais rígidos são compostos por uma alta frequência de estruturas como concreções, convoluções e *loop*

beddings nos estratos, e são responsáveis pelo controle da propagação e frequência de estruturas como fraturas e falhas, consideradas principais condutos de fluxo de fluidos em reservatórios calcários. Esses estratos geralmente possuem uma boa continuidade lateral, ciclicidade de alta frequência. Níveis relacionados a dissolução também possuem uma ampla continuidade lateral, indicando que em reservatórios compostos por rochas calcárias laminadas é possível inferir uma tendência de fluxo de fluido horizontal.

As microvariações deposicionais e diagenéticas geradas pelos eventos climáticos sazonais influenciam a propagação e segmentação das estruturas rúpteis, como falhas e veios em diversas escalas (micrométrica, milimétrica, centimétrica e métrica), gerando um padrão fractal nestas estruturas (GILLESPIE et al., 1993; SOUZA et al., 2008). A análise estatística das fraturas nos painéis mostrou que os parâmetros morfológicos como abertura, comprimento e espaçamento não apresentam correlação entre si, devido à grande variabilidade mecânica vertical, criando uma diferenciação dos padrões das estruturas de acordo com a alta frequência da variação de competência dos estratos. A explicação plausível para o espaçamento aproximadamente regular entre as fraturas verticais contínuas nos painéis pode estar relacionada com processos distensivos associados a reativações tectônicas. E também a influência da espessura dos conjuntos de laminações com propriedades mecânicas distintas que afetaram a propagação das estruturas. O alto fator de segmentação dos veios verticais está estritamente relacionado as propriedades mecânicas do calcário, nos quais o comportamento rúptil-dúctil em níveis específicos tende a formar veios segmentados únicos e isolados, enquanto a predominância de intervalos com comportamento rúptil tende a formar veios de maior extensão formados por vários segmentos.

O entendimento da influência dos processos sedimentológicos (diagenéticos e deposicionais) no calcário laminado na estratigrafia mecânica e estratigrafia de fraturas, permitirá compreender melhor o comportamento do fluxo de fluido em reservatórios análogos, a partir da construção de modelos geológicos/numéricos mais realistas.

6. SUGESTÕES

- Para futuras pesquisas recomenda-se uma coleta mais ampla de dados de resistência mecânica através de *Schmidt Hammer* e plugues para ensaios de compressão uniaxial para mais completa caracterização das petrofácies definida;
- Estudo estatístico e de distribuição dos parâmetros morfológicos dos veios horizontais.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, J., CARLSEN, I.M., MJAALAND, S., SKALLE, P., RAFIEI, A. & ZAREI, S. 2004. Underbalanced drilling as a tool for optimized drilling and completion contingency in fractured carbonate reservoirs. Paper presented at the **SPE/IADC Underbalanced Technology Conference**, Houston, TX, 11–12 October, 2004.
- AHR, WAYNE M. Geology of Carbonate. **The Identification, Description and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks**. [S.l: s.n.], 2010.
- AIGNER, T., SHAUER, M., JUNGHANS, W. D., REINHARDT, L. Outcrops gamma-ray logging and its application examples from the German Triassic. **Sedimentary Geology**, 100: 47-61, 1995
- AGUILERA, R. Controversial: Is It Possible to Have Two (or More) Different, Well-defined, Water-oil Contacts Within a Single, Closed, Naturally Fractured Reservoir? **Annual Technical Meeting**, June 14 - 18, Calgary, Alberta. P. 17, 1995.
- ANGERER, E., P. LANFRANCHI, AND S. F. ROGERS. Fractured reservoir modeling from seismic to simulator: A reality? **The Leading Edge**, v. 22 (7), p. 684–689, 2003.
- ANDHIKA, MUHAMAD; CASTAÑEDA, MARIELA HERNÁNDEZ; REGENSPURG, SIMONA. Characterization of Silica Precipitation at Geothermal Conditions. **World Geothermal Congress**, n. April, p. 1–6, 2015
- ALENCAR, M. L. Caracterização dos Estilólitos Verticais do Nível Superior dos Calcários Laminados da Formação Crato, Borda Norte da Bacia do Araripe. **Dissertação de mestrado**, 2018.
- ALMEIDA, F. F. M. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. **Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia**, 1967.
- ALMEIDA, F. F. M. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 2017.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Sci. Rev.**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.
- ASSINE, M.L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, n. 19, p. 371-389, 2007.
- ASSINE, M.L. Paleocorrentes e paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 4, p. 223-232, 1994
- ASSINE, M.L., PERINOTTO, J. A. J. NEUMANN, V.H., CUSTÓDIO, M.A., VAREJÃO, F.G., MESCOLOTTI, P.C. Sequências Depositionais do Andar Alagoas (Aptiano superior) da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 22, p. 1, p. 3–28, 2014.
- ASSINE, Mario L. Análise estratigráfica da bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, p. 289-300, 2017.
- AYDIN, A., BASU, A. The Schmidt Hammer in rock Material Characterization. **Engineering Geology**, n. 81, p. 1-14, 2005.

- BASU, A., AYDIN, A. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, n. 41, p. 1211-1214, 2004.
- BELILA, A. M. P. **Caracterização Petrofísica dos Carbonatos da Formação Morro do Chaves, Bacia de Sergipe-Alagoas**, 2014.
- BEURLIN, K. A geologia da Chapada do Araripe. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 3, p. 365-370, 1962.
- BEURLIN, K. Geologia e Estratigrafia da Chapada do Araripe. In.: **XVII Congr. Bras. Geol.** Recife. p. 47, 1963.
- BEURLIN, K. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, n. 43, p. 411-415, 1971.
- BIBLIA, A.A ROMANOS. Português. In: Bíblia sagrada. Reed. Versão AA (**Almeida Revisada Imprensa Bíblica**), Cap. 1, vers.20.
- BONNET, E., BOUR, O., ODLING, N. E., DAVY, P., MAIN, I., COWIE, P., & BERKOWITZ, B. Scaling of fracture systems in geological media. **Reviews of geophysics**, v. 39, n. 3, p. 347-383, 2001.
- BOYD, A., SOUZA, A., CARNEIRO, G., MACHADO, V., TREVIZAN, W., SANTOS, B., ... & BERTOLINI, A. Presalt carbonate evaluation for Santos Basin, offshore Brazil. **Petrophysics**, v. 56, n. 06, p. 577-591, 2015.
- BOURBIAUX, B. Fractured reservoir simulation: A challenging and rewarding issue: Oil & Gas Science and Technology—**Revue de l'Institut Français du Pétrole**, v. 65, n. 2, p. 227–238, 2010. Doi: 10.2516/ogst/2009063.
- BRITO NEVES, B. B. Regionalização tectônica do precambriano nordestino. **Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências**, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 189, 1975.
- BRITO NEVES, B. B., VAN SCHMUS, W. R., SANTOS, E. J., CAMPOS NETO, M. C., KOZUCH, M. O evento Cariris Velhos na Província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas. **Ver. Brás. Geo.**, v, 25, p. 279-296, 1995.
- BRITO NEVES, B. B., DOS SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: Cordani. U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (eds) Tectonic evolution of South America, **31st International Geological Congress**. Rio de Janeiro, Brazil, p. 151-182, 2000.
- BUYUKSAGIS, I. S., & GOKTAN, R. M. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. **International journal of rock mechanics and mining sciences**, v. 44, n. 2, p. 299-307, 2007.
- SCHLUMBERGER. **Carbonates reservoir**, 2017. Disponível em: http://www.slb.com/services/technical_challenges/carbonates.aspx. Acesso em: 30 de Outubro de 2019.

- CABY, R., SIAL, A. N.; ARTHAUD, M., VAUCHEZ, A. Crustal evolution and the Brasiliano orogeny in Northeast Brazil. In: DALLMEYER, R.D. & LECORCHÉ, J.P. eds. The West African orogens and Circum-Atlantic correlatives. **Springer-Verlag**. p. 373-397, 1991.
- CALVO, J.P., RODRIGUEZ-PASCUA, M.A., MARTIN-VELASQUEZ, S., JIMENEZ, S., DE VICENTE, G. Microdeformation of Lacustrine Laminite Sequences from Late Miocene Formations of SE Spain: an Interpretation of Loopbedding. **Sedimentology**, v. 45, p. 279–292, 1998
- CATTO, B. Laminitos Microbiais no Membro Crato (Neoaptiano), Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Dissertação de Mestrado**. p. 111, 2015.
- CATTO, B., JAHNERT, R. J., WARREN, L. V., VAREJÃO, F. G., ASSINE, M. L. The Microbial Nature of Laminated Limestones: Lessons from the Upper Aptian, Araripe Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 341, p. 304-315, 2016. Doi: 10.1016/j.sedgeo.2016.05.007.
- CHESHOMI, A., & SHESHDE, E. A. Determination of uniaxial compressive strength of microcrystalline limestone using single particles load test. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 111, p. 121-126, 2013.
- CHOQUETTE, P. W., & PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG bulletin**, v. 54, n. 2, p. 207-250, 1970.
- CRAIN, E.R. Analysis of dipmeter logs-volution of dipmeter tools. Can. **Well Logging Soc. J.**, p. 18, 1992.
- COIMBRA, J.C., ARAI, M., CARRENO, A.L. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe Basin, northeastern Brazil. **Geobios**, v. 35, p. 687- 698, 2002.
- CORBETT, K., FRIEDMAN, M., SPANG, J. Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. **AAPG Bull.**, v. 71, p 17-28, 1987.
- COOKE, M. L. Predicting fracture localization in folded stratafrom mechanical stratigraphy and fold shape: Case study of east Kaibab monocline, Utah: **Proceedings of 36th U.S. Rock Mechanics Symposium: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Special Issue**, v. 34, no. 3/4, p. 351, 1997.
- COSGROVE, J. W. Hydraulic fracturing during the formation and deformation of a basin: A factor in the dewatering of low-permeability sediments. **Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.**, v. 85, p. 737-748, 2001.
- CUSTÓDIO, M.A., QUAGLIO F., WARREN, L.V., SIMÕES, M.G., FÜRSICH F.T., PERINOTTO, J.A.J., ASSINE M. L. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingression in the interior of Northeast Brazil, **Sedimentary Geology**, v. 359, p. 1-15, 2017. ISSN: 0037-0738. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.07.010>.
- DE ROS, L. F. & GOLDBERG, K. Reservoir Petrofacies: A Tool for Quality Characterization and Prediction. In: **AAPG Annual Convention and Exhibition**, Long Beach, CA, 2007.

- DIEDERICHS, M. S. Manuel rocha medal recipient rock fracture and collapse under low confinement conditions. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 36, n. 5, p. 339-381. 2003.
- DREUZY, J.R., MÉHEUST, Y., PICHOT, G. Influence of fracture scale heterogeneity on the flow properties of three-dimensional discrete fracture networks (DFN). **Journal of Geophysical Research**, v. 117, p. 1-21, 2012. Doi: 10.1029/2012JB009461
- DREUZY, J.R., PICHOT, G., POIRRIEZ, B., ERHEL, J. Synthetic benchmark for modeling flow in 3D fractured media. **Computers and Geosciences**, v. 50, p. 59-71, 2013. Doi: 10.1016/j.cageo.2012.07.025.
- DUGDALE, D. S. Yielding of steel sheets containing slits. **J. Mech. Phys. Solids**, v. 8, p. 100-104, 1960.
- DUNHAM, R. J. **Classification of carbonate rocks according to depositional textures**. 1962.
- DÜRRAST, H. E SIEGESMUND, S. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks. **Int. J. Earth Sci.**, v. 88, p. 392-408, 1999.
- EBERLI, G.P., SMITH, L.B., MORETTINI, L E., AL-KHARUSI. Porosity partitioning in sedimentary cycles: implications for reservoir modelling. **AAPG, Annual Meeting**, Salt Lake City, 2003.
- FABIN, C.E., CORREIA FILHO, O.J., ALENCAR, M.L., BARBOSA, J.A., MIRANDA, T.S., NEUMANN, V.H., GOMES, I.F., SANTANA, F.R. stratigraphic relations of the Ipubi Formation: siliciclastic-evaporitic succession of the Araripe Basin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, 2049-2071, 2018.
- FARIAS, F. A. Petrogênese de Carbonatos Acamadados da Formação Barra Velha, Aptiano da Bacia de Santos. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, p. 244, 2018.
- FERRILL, D. A., MCGINNIS, R. N., MORRIS, A. P., SMART, K. J., SICKMANN, T., Z. BENTZ, M., LEHRMANN, D., EVANS, M. A. Control of mechanical stratigraphy on bed-restricted jointing and normal faulting: Eagle Ford Formation, south-central Texas. **AAPG Bulletin**, v. 98, n. 11, p. 2477–2506, 2014.
- FERRILL, D. A., MCGINNIS, R. N., MORRIS, A. P., SMART, K. J., LEHRMANN, D. Mechanical stratigraphy and normal faulting. **Journal of Structural Geology**, v. 94, p. 275–302, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.010>>.
- FERREIRA V.P., SIAL A.N., JARDIM DE SÁ E. F. Geochemical and isotopic signatures of the Proterozoic granitoids in terrenes of the Borborema Province, northeastern Brazil. **Journal South American. Earth Science**, v. 11, n. 5, p. 439-455, 1998.
- FITCH, P.J.R., LOVELL, M.A., DAVIES, S.J., PRITCHARD, T., HARVEY, P. K. An integrated and quantitative approach to petrophysical heterogeneity. **Marine and Petroleum Geology**, v. 63, 82-96, 2015. ISSN 0264-8172. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.014>.
- FLUGEL, K. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. **Springer- Heindelberg**, Berlin, p. 996, 2004.

- FLODIN, E.A., DURLOFSKY, L.J., AYDIN, A. Upscaled models of flow and transport in faulted sandstones: boundary condition effects and explicit fracture modelling. **Petroleum Geosciences**, v.10, p. 173-181, 2004. Doi: 10.1144/1354-079303-587.
- FOLK, R. L. Spectral Subdivision of Limestones Types. In Ham, W.E. (Ed.) Classification of Carbonate Rocks: Tulsa. **American Association of Petroleum Geologists**, Memoir, v. 1, p. 62-85, 1962.
- GALE, J.F.W. & GOMEZ, L.A. Late opening-mode fractures in karst-brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: recognition, characterization, and implications for fluid flow. **AAPG Bulletin**, v. 91, p. 1005–1023, 2007.
- GALE, J.F.W., LAUBACH, S.E., OLSON, J.E., EICHHUBL, P., FALL, A. Natural fractures in shale: a review and new observations. **AAPG Bull**, v. 98, p. 2165-2216, 2014.
- GEIGER, J., HUNYADFALVI, Z., BOGNER, P. Analysis of small-scale heterogeneity in clastic rocks by using computerized X-ray tomography (CT). **Engineering Geology**, 2008. Doi: 10.1016/j.enggeo.2008.06.011.
- GILLESPIE, P. A., C. B. HOWARD, J. J. WALSH, AND J. WATTERSON. Measurement and characterization of spatial distributions of fractures. **Tectonophysics**, v. 226, n. 1–4, p. 113–141, 1993. Doi: 10.1016/0040-1951(93)90114-Y.
- GIUFFRIDA, A., LA BRUNA, V., CASTELLUCCIO, P., PANZA, E., RUSTICHELLI, A., TONDI, E., GIORGIONI, M., AGOSTA, F. Fracture simulation parameters of fractured reservoirs: Analogy with outcropping carbonates of the Inner Apulian Platform, southern Italy. **Journal of Structural Geology**, v. 123, n. June 2018, p. 18–41, 2019.
- GIUFFRIDA, A., AGOSTA, F., RUSTICHELLI, A., PANZA, E., LA BRUNA, V., ERIKSSON, M., TORRIERI, S., GIORGIONI, M. Fracture stratigraphy and DFN modelling of tight carbonates, the case study of the Lower Cretaceous carbonates exposed at the Monte Alpi (Basilicata, Italy). **Marine and Petroleum Geology**, v. 112, p. 104045, 2020.
- GHARECHELOU, S., AMINI, A., BOHLOLI, B., SWENNEN, R., NIKANDISH, A., & FARAJPOUR, V. Distribution of geomechanical units constrained by sequence stratigraphic framework: Useful data improving reservoir characterization. **Marine and Petroleum Geology**, p. 104398, 2020.
- GOMES, J. P., BUNEVICH, R. B., TEDESCHI, L. R., TUCKER, M. E., & WHITAKER, F. F. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt. **Marine and Petroleum Geology**, v. 113, p. 104176, 2020.
- GROSS, M.R., FISCHER, M.P., ENGELDER, T., GREENFIELD, R.J. Factors controlling joint spacing in interbedded sedimentary rocks: interpreting numerical models with field observations from the Monterey Formation, USA. M.S. Ameen (Ed.), Fractography: Fracture Topography as a Tool in Fracture Mechanics and Stress Analysis, **Geol. Soc. Am., Spec. Publ.**, v. 92, p. 215-233, 1995.
- GUERRIERO, V, IANNACE, A., MAZZOLI, S., PARENTE, VITALE, S., GIORGIONI, M. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues:

- Implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks. **Journal of Structural Geology**, v. 32, p. 1271-1278, 2010.
- GUERRIERO, V., S. VITALE, S. CIARCIA, AND S. MAZZOLI. Improved statistical multi-scale analysis of fractured reservoir analogues: **Tectonophysics**, v. 504, n. 1–4, p. 14–24, 2011. Doi: 10.1016/j.tecto.2011.01.003.
- GUERRIERO, V. Power law distribution: Method of multiscale inferential statistics. **Journal of Modern Mathematics Frontier**, v. 1, p. 21–28, 2012.
- GUIMARÃES, I. P., VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B., BITTAR, S. M. B., SILVA FILHO, A. F., ARMSTRONG, R. U-Pb zircon ages of orthogneisses and supracrustal rocks of the Cariris Velhos belt: Onset of Neoproterozoic rifting in the Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, v. 192-195, p. 52-77, 2012.
- HANKS, C. L., LORENZ, J., LAWRENCE, T., KRUMHARDT, A. P. Lithologic and structural controls on natural fracture distribution and behavior within the Lisburne Group, northeastern Brooks Range and North Slope subsurface, Alaska. **AAPG Bull.**, v. 81, p. 1700-1720, 1997.
- HASSANI, H. & SILVA, E.S. Big Data: a big opportunity for the petroleum and petrochemical industry. **OPEC Energy Review**, v. 42, n. 1, p. 74-89, 2018. Doi: 10.1111/opec.12118.
- HEALY, D., JONES, R., HOLDSWORTH, R.E. 2006. Three-dimensional brittle shear fracturing by tensile crack interaction. **Nature Letters**, 439: 64-67. doi: 10.1038/nature04346.
- HEIMHOFER, U., ARIZTEGUI, D., LENNINGER, M., HESSELBOL, S.P., MARTILL, D., RIOS-NETTO, A.M. Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, North-eastern Brazil), **Sedimentology**, v. 57, p. 677-694, 2010.
- HEIMHOFER, U.; MEISTER, P.; BERNASCONI, S. M.; ARIZTEGUI, D.; MARTILL, D. M.; RIOS-NETTO, A. M.; SCHWARK, L. Isotope and Elemental Geochemistry of Black Shale-Hosted Fossiliferous Concretions from the Cretaceous Santana Formation Fossil Lagerstätte (Brazil). **Sedimentology**, v. 64, p.150-167, 2017.
- HESSE, R., FONG, C., & SCHUMANN, D. Origin of spherulitic and cone-in-cone concretions in Cambro-Ordovician black shales, St Lawrence Estuary, Quebec, Canada. **Geological Magazine**, v. 156, n. 10, p. 1793-1804, 2019.
- HOOKE, J.N., GOMEZ, L.A., LAUBACH, S.E., GALE, J.F.W., MARRETT, R. Effects of diagenesis (cement precipitation) during rocks fracture opening on fracture aperture-size scaling in carbonate rocks. **Geological Society, Special Publications**, 2012. Doi 10.1144/SP370.9.
- HOOKE, J.N, LAUBACH, S.E., MARRETT, R. Fracture-aperture size – frequency, spatial distribution, and growth processes in strata-bounded and non-strata-bounded fractures, Cambrian Mesón Group, NW Argentina. **Journal of Structural Geology**, v. 54, p. 54-71, 2013.

- KATZA, O., RECHESA, Z., ROEGIERS, J. C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, p. 723-728, 2000.
- JIANG, S. & MOKHTARI, M. Characterization of marl and interbedded limestone layers in the Eagle Ford Formation, DeWitt county, Texas. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v. 172, p. 502–510, 2019.
- JOHANN, P.R.S. & MONTEIRO, R.C. Geophysical Reservoir Characterization and Monitoring at Brazilian PreSalt Oil Fields. In: **Offshore Technology Conference**, PETROBRAS, 2016.
- JORDAN, D. W., SLATT, R. M., GILLESPIE, R. H., D' AGOSTINO., STONE, C. G. Gamma Ray loggings of outcrops by a truck- monted sonde. **AAPG Bulletin**, v. 77, p. 118-123, 1993.
- KATZ, O., RECHES, Z., & ROEGIERS, J. C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. **International Journal of rock Mechanics and Mining sciences**, v. 37, n. 4, p. 723-728, 2000.
- KELTS, K. AND HS"U, K. J. Freshwater carbonate sedimentation. In Lerman, A. (ed.), *Lakes – Chemistry, Geology, Physics*. Berlin: Springer, p. 295–323, 1978.
- KIM, YESEUL; LEE, CHANGYEOL; LEE, YOUNG. Numerical analysis of sedimentary compaction: Implications for porosity and layer thickness variation. **Journal of the Geological Society of Korea**, v. 54, n. 6, p. 631–640, 2018.
- KOCHMAN, ALICJA; MATYSZKIEWICZ, JACEK. Experimental method for estimation of compaction in the Oxfordian bedded limestones of the southern Kraków-Czestochowa Upland, Southern Poland. **Acta Geologica Polonica**, v. 63, n. 4, p. 681–696, 2013.
- LAUBACH, S.E., REED, R.M, OLSON, J.E., LANDER, R.H., BONNELL, L.M. Coevolution of crack-seal texture and fracture porosity in sedimentary rocks: cathodoluminescence observations of regional fractures. **Journal of Structural Geology**, v. 26, p. 967-982, 2004.
- LAUBACH, S.E., MEGHAN, E.W. Diagenesis in porosity evolution of opening-mode fractures, Middle Triassic to Lower Jurassic La Boca Formation, NE Mexico. **Tectonophysics**, v. 419, p. 75-97, 2006.
- LAUBACH, S. E., J. E. O., GROSS., M. R. Mechanical and fracture stratigraphy. **AAPG Bulletin**, v. 93, p. 1413–1426, 2009.
- LANARO, F., STEPHANSSON, O. A unified model for characterization and mechanical behaviour of rock fractures. **Pure and Applied Geophysics**, v. 160, p. 989-998, 2003.
- NEUMANN, V. H. Sistemas lacustres aptiense-albienses de la Cuenca de Araripe, NE, Brasil. **Doctoral dissertation**, Universidad de Barcelona, p. 250, 1999.
- LASH, G. G. & BLOOD, D. Geochemical and Textural Evidence for Early (shallow) Diagenetic Growth of Stratigraphically Confined Carbonate Concretions, Upper Devonian Rhinestreet Black Shale, Western New York. **Chemical Geology**, v. 206, n. 3, p. 407-424, 2004.

- LAVENU, A. P.C., OTAL, B. D. M., GAUTHIER, T., LAMARCHE, J. M. Title : How sedimentary facies and diagenesis are controlling carbonates mechanical properties and fracturing ? **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 148, n. 1-2, p. 98-115, 2013.
- LAVENU, A. P. C., LAMARCHE, J., TEXIER L., MARIÉ, L., GAUTHIER, B. D. M. Background fractures in carbonates: inference on control of sedimentary facies, diagenesis and petrophysics on rock mechanical behavior. Example of the Murge Plateau (southern Italy). **Italy Journal Geosciences**, v. 134, p. 535-555, 2015. Doi: 10.3301/IJG.2014.58).
- Lebre, M.B.S. Comparação de metodologias para estimativa de propriedades de reservatório aplicadas nos carbonatos do pré-sal do campo de Búzios, Bacia de Santos. **Trabalho de Conclusão de Curso**, apresentado ao Programa de Graduação em Geofísica do Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense, p. 107, 2019.
- LIU, A. Q., TANG, D. J., SHI, X. Y., ZHOU, L. M., ZHOU, X. Q., SHANG, M. H., ... & SONG, H. Y. Growth mechanisms and environmental implications of carbonate concretions from the~ 1.4 Ga Xiamaling Formation, North China. **Journal of Palaeogeography**, v. 8, n. 1, p. 20, 2019.
- LI, YANG. Development theories and methods of fracture-vug carbonate reservoirs. **Academic Press is an imprint of Elsevier**, p. 513, 2017.
- LUCIA, F. J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. **AAPG bulletin**, v. 79, n. 9, p. 1275-1300, 1995.
- MABESOONE, J. M. & TINOCO, I. M. Paleocology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology**, v. 14, p. 97-118, 1973.
- MACEDO, M. H. F, JARDIM DE SÁ, E.F. & SÁ, J.M. Datações Rb-Sr em ortognaisses e a idade do Grupo Seridó. In: **Atas do Simpósio de Geologia do Nordeste**, v. 11, p. 253-262, 1984.
- MARTILL, D. M. Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil. **The Paleontological Association**; (London) Field Guides to Fossils, v. 5, p. 159, 1993.
- MARTILL, D. M., FREY, E. A New Pterosaur Lagerstätte in N. E. Brazil (Crato Formation, Aptian, Lower Cretaceous): Preliminary Observations. **Oryctos**, v. 1, p. 79-85, 1998.
- MARTILL, D.M., LOVERIDGE, R., HEIMHOFER, U. Halite Pseudomorphs in the Crato Formation (Early Cretaceous, Late Aptian-Early Albian), Araripe Basin, Northeast Brazil: Further Evidence for Hypersalinity. **Cretaceous Research**, v. 28, p. 613-620, 2007.
- MARTILL, DAVID M., GÜNTHER BECHLY, AND ROBERT F. LOVERIDGE. The Crato fossil beds of Brazil: window into an ancient world. **Cambridge University Press**, 2007.

- MARTILL, D. M., LOVERIDGE, R. F., HEIMHOFER, U. Dolomite Pipes in the Crato Formation Fossil Lagerstätte (Lower Cretaceous, Aptian), of Northeastern Brazil. **Cretaceous Research**, v. 29, p. 78-86, 2008.
- MARRETT, R. Aggregate properties of fracture populations. **Journal of Structural Geology**, v. 18, p. 169-178, 1996.
- MARTÍN-CHIVELET, J., PALMA, R.M., LÓPEZ-GÓMEZ, J., KIETZMANN, D. A. Earthquake Induced Soft-Sediment Deformation Structures in Upper Jurassic Open-Marine Microbialites (Neuquén Basin, Argentina). **Sedimentary Geology**, v. 235, p. 210–221, 2011.
- MARQUES, F.O., NOGUEIRA, F.C.C., BEZERRA, F. H. R., DE CASTRO, D. L. The Araripe Basin in NE Brazil: An Intracontinental Graben Inverted to a High-Standing Horst. **Tectonophysics**, v. 630, p. 251-264, 2014.
- MARSHALL, J. D., & PIRRIE, D. Carbonate Concretions - explained. **Geology Today**, v. 29, n. 2, p. 53-62, 2013
- MARIANO, G., NEVES S. P., SILVA FILHO, A. F., GUIMARÃES, I. P. Diorites of the high-K calc-alkalic association: geochemistry and Sm-Nd data and implications for the evolution of the Borborema Province, Northeast Brazil. **Inter. Geol. Rev.**, v. 43, p. 921-929, 2001.
- MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian Rift System. **Tectonics**, Washington, DC., v. 11, n. 4, p. 766- 791, 1992.
- MCBRIDE, E. F., PICARD, M. D., & MILLIKEN, K. L. Calcite-cemented concretions in Cretaceous sandstone, Wyoming and Utah, USA. **Journal of Sedimentary Research**, v. 73, n. 3, p. 462-483, 2003.
- MCGINNIS, R. N., FERRILL, D. A., MORRIS, A. P., SMART, K. J., & LEHRMANN, D. Mechanical stratigraphic controls on natural fracture spacing and penetration. **Journal of Structural Geology**, v. 95, p. 160-170, 2017.
- MCKINNON, E. Structural Diagenesis of Bed-Parallel and Bed-Normal Fractures, Cretaceous Crato Formation Carbonate Rocks, NE Brazil. [**M.S. thesis**]: Austin, University of Texas, p. 153, 2017.
- MIRANDA, T. S., BARBOSA, J. A., GOMES, I. F., NEUMANN, V. H., SANTOS, R. F. V. C., MATOS, G. C., GUIMARAES, L. J. N., FLORENCIO, R. Q., ALENCAR, M. L. Aplicação da Técnica de Scanline à Modelagem Geológica/Geomecânica de Sistemas de Fraturamento nos Depósitos Carbonáticos e Evaporíticos da Bacia do Araripe, NE do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 20, p. 305-326, 2012.
- MIRANDA, T. S., BARBOSA, J. A., GALE, J., MARRETT, R., GOMES, I. F., NEUMANN, V. H., MATOS, G. C., CORREIA FILHO, O. J., ALENCAR, M. L. Natural Fracture Characterization in Aptian Carbonates, Araripe Basin, NE Brazil. In: **76th EAGE Conference & Exhibition**, Amsterdam. Abstracts book, p. 88-92, 2014.
- MIRANDA, T., S. Caracterização Geológica e Geomecânica dos Depósitos Carbonáticos e Evaporíticos da Bacia do Araripe, NE Brasil. **Tese de Doutorado**, p. 259, 2015.

- MIRANDA, T., BARBOSA, A., GOMES, I., SOARES, A., SANTOS, R., MATOS, G., MCKINNON, E., NEUMANN, V., MARRETT, R. Petrophysics and Petrography of Aptian Tight Carbonate Reservoir, Araripe Basin, NE Brazil. **78th EAGE Conference & Exhibition**, Vienna, Austria, 30 May, 2016.
- MIRANDA, T., STEPHANIE, G. Z., LEWIS, H., FALCÃO, T., SOUZA, J., BARBOSA, J. A., . . . GOMES, I. Fracture-Enhanced Permeability in Tight Carbonate Reservoir Analogue. **AAPG Annual Convention & Exhibition**, p. 20-23, 2018.
- MEDEIROS V.C. Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. Natal. **Tese de Doutorado**, PPGG, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 200, 2004.
- MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M., JACOBS, P. Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences. **Geological Society. Special Publication**, p. 215, 2003.
- MUNIZ, M.C. AND BOSENCE, D.W. J. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. Geological Society, London, **Special Publications**, v. 418, p. 221–242, 2015. <http://dx.doi.org/10.1144/SP418.10>.
- MORETTINI, E., THOMPSON, A., EBERLI, G.P., RAWNSLEY, K.D., ASYEE, W., CHRISTMAN, P., CORTIS, T., FOSTER, K., HITCHINGS, V., KOLKMAN, W., VAN KONIJNENBURG, J.H. Combining high resolution sequence stratigraphy and mechanical stratigraphy for improved reservoir characterisation in the Fahud field of Oman. **GeoArabia**, v. 10, n. 3, p. 17-44, 2005.
- NARR, W. Estimating average fracture spacing in subsurface rock. **AAPG Bulletin**, v. 80, n. 10, p. 1565– 1586, 1996.
- NARR, W., SCHECHTER, D. W. & THOMPSON, L. B. Naturally Fractured Reservoir Characterization. **Society of Petroleum Engineers**, Richardson, TX, 2006.
- NELSON, R. A. Geological Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. **2 Gulf Publishing Co.**, Houston, TX, 2001.
- NEUMANN, V. H. Estratigrafia, Sedimentologia, Geoquímica y Diagenesis de los Sistemas Lacustres Aptiense-Albienses de la Cuenca de Araripe. **Tese de Doutorado**, p. 244, 1999.
- NEUMANN, V. H.; CABRERA, L. Uma nova proposta estratigráfica para la tectonosecuencia postrifte de la Cuenca de Araripe, Noreste de Brasil. In: **Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil**, Rio Claro. Boletim... Rio Claro: UNESP, p. 279-285, 1999.
- NEUMANN, V. H., BORREGO, A. G., CABRERA, L., & DINO, R. "Organic matter composition and distribution through the Aptian–Albian lacustrine sequences of the Araripe Basin, northeastern Brazil." **International Journal of Coal Geology**, v. 54, n.1-2, p. 21-40, 2003.
- NEUMANN, V. H. & ASSINE, M. L. Stratigraphic proposal to the post-rift I tectonic-sedimentary sequence of Araripe Basin, Northeastern Brazil. In: Strati 2015 - **2nd International Congress on Stratigraphy**, Graz (Austria), p. 274, 2015.

- NEUWERTH, R., SUTER, F., GUZMAN, C. A., AND GORIN, G. E. Soft-Sediment Deformation in a Tectonically Active Area: the Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca Valley (Western Colombia), *Sedimentary Geology*, v. 186, n. 67–88, 2006.
- NEVES, S. P. & MARIANO, G. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the Pernambuco lineament, northeastern Brazil. *J. Struct. Geol.*, v. 21, p. 1369–1383, 1999.
- NEVES, S. P. Proterozoic history of the Borborema Province (NE Brazil): correlations with neighboring cratons and Pan-African belts, and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics*, v. 22, n. 4, p. 1031, 2003.
- NEVES, S. P., BRUGUIER, O., VAUCHEZ, A., BOSCH, D., SILVA, J. M. R., MARIANO, G. Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. *Precambrian Research*, v. 149, p. 197-216, 2006.
- NEVES, P. S., BRUGUIER, S., OLIVIER, J. M. R. D., MARIANO, G., SILVA FILHO, A. F., TEIXEIRA, C. M. L. From extension to shortening: Dating the onset of the Brasiliano Orogeny in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 58, p. 238 – 256, 2015.
- NEVES, S.P. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 58, p. 150 -164, 2015.
- NEVES, S. P., GEYSSON, L. A., BRASILINO, R. G., MIRANDA, A. W. A. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): Geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 58, p. 165-187, 2015.
- NEUWERTH, R., SUTER, F., GUZMAN, C. A., AND GORIN, G. E. Soft-Sediment Deformation in a Tectonically Active Area: the Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca Valley (Western Colombia), *Sedimentary Geology*, v. 186, p. 67–88, 2006.
- ODONNE, F., LÉZIN, C., MASSONNAT, G., & ESCADEILLAS, G. The relationship between joint aperture, spacing distribution, vertical dimension and carbonate stratification: An example from the Kimmeridgian limestones of Pointe-du-Chay (France). *Journal of Structural Geology*, v. 29, n. 5, p. 746-758, 2007.
- OLIVEIRA, R. G. Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de Sua Margem Continental. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2008.
- OLIVEIRA, R. G. & BRITO NEVES. Padrões isotópicos Sm-Nd no limite entre os terrenos Alto Pajeú e Alto Moxotó (PB). *Revista Brasileira de Geociências*, 2008.
- ORTEGA, O. & MARRETT, R. Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico. *Journal of Structural Geology*, v. 22, n. 5, p. 571–588, 2000. Doi: 10.1016/S0191-8141(99)00186-8.

- ORTEGA, O.J., MARRETTT, R.A., LAUBACH, S. E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. **AAPG Bulletin**, v. 90, n. 2, p. 193–208, 2006.
- ORTEGA, O. & MARRETT, R. Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico. **Journal of Structural Geology**, v. 22, n. 5, p. 571–588, 2000. Doi: 10.1016/S0191-8141(99)00186-8.
- OSORIO-RODRIGUEZ, DANIELA, AND CARLOS ALBERTO SANCHEZ-QUINÓNEZ. "Biological and geological characterization of modern biofilms and microbial mats and comparison with similar lithified structures in Colombian Cretaceous formations." **Earth Sciences Research Journal**, v. 22, n. 3, p. 159-168, 2018.
- OSÉS, G.L., PETRI, S., VOLTANI, C. G., PRADO, G. M. E. M., GALANTE, D., RIZZUTO, M. A., RUDNITZI, I. D., DILVA, E. P., RODRIGUES, F., RANGEL, E. C., SUCERQUIA, P. A., PACHECO, M. L. A. F. Deciphering the Preservation of Fossil Insects: A Case Study from the Crato Member, Early Cretaceous of Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1468, 2016. Doi: 10.1038/s41598-017-01563-0.
- OSÉS, G.L., PETRI, S., VOLTANI, C.G. Deciphering pyritization-kerogenization gradient for fish soft-tissue preservation. **Sci. Rep.**, v. 7, p. 1468, 2017. Doi:10.1038/s41598-017-01563-0.
- OWEN, G. Experimental Soft-Sediment Deformation Structures Formed by the Liquefaction of Unconsolidated Sands and Some Ancient Examples. **Sedimentology**, v. 43, p. 279–293, 1996.
- PAGEL, M., BARBIN, V., BLANC, P., OHNENSTETTER, D. (Eds.), Cathodoluminescence in Geosciences. **Springer-Verlag**, Berlin, p. 514, 2000.
- PERRAS, M. A., & DIEDERICH, M. S. The importance of classification for carbonates and mudrocks in engineering. In: **Proceedings of the 2011 Pan-Am Canadian Geotechnical Conference**, Toronto, 2011.
- PEAULVAST, J. P. & BÉTARD, F. A History of Basin Inversion, Scarp Retreat and Shallow Denudation: The Araripe Basin as a Keystone for Understanding Long-term Landscape Evolution in NE Brazil. **Geomorphology**, v. 233, p. 20-40, 2015.
- PICKERING, G., J. M. BULL, AND D. J. SANDERSON. Sampling power-law distributions. **Tectonophysics**, v. 248, n. 1–2, p. 1–20, 1995. Doi: 10.1016/0040-1951(95)00030-Q.
- PHILIPP, S. L. Geometry and formation of gypsum veins in mudstones at Watchet, Somerset, SW England. **Geological Magazine**, v. 145, n. 6, p. 831-844, 2008.
- PONTE F. C. Arcabouço estrutural e evolução tectônica da bacia mesozoica do Araripe, Nordeste do Brasil. In: Ponte, F. C. et al. Coords. **Geologia da Bacias Sedimentares Mesozoicas do Interior do Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro, Petrobrás/CENPES/DIVEX/SEBIPE. (**Relatório interno**), 1991.
- PONTE, F. C. Origem e evolução das pequenas bacias cretáceas do interior do Nordeste do Brasil. **Simpósio sobre as bacias cretáceas Brasileiras**, v. 2, p. 55-58, 1992.

- PONTE, F.C. Interpretação Geológica de Linhas de reflexão sísmica na Bacia do Araripe. Rio Claro, DNPM/CNPq. apênd. (**Relatório interno**), p. 15, 1993.
- PONTE, F. C.; PONTE FILHO, F. C. Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe. Recife: **Departamento Nacional de Produção Mineral**, p. 68, 1996.
- PRAJAPATI, N., SELZER, M., NESTLER, B., BUSCH, B., & HILGERS, C. Modeling fracture cementation processes in calcite limestone: a phase-field study. **Geothermal Energy**, v. 6, n. 1, p. 1-15, 2018.
- RAISWELL, R. Non-steady state microbiological diagenesis and the origin of concretions and nodular limestones. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 36, n. 1, p. 41-54, 1987.
- Raiswell, R., & Fisher, Q. J. Mudrock-hosted carbonate concretions: a review of growth mechanisms and their influence on chemical and isotopic composition: **Geological Society of London Journal**, p. 157, 2000.
- RAMSAY, J. G., & HUBER, M. I. The techniques of modern structural geology: Folds and fractures: London, **Academic**, p. 700, 1987.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L.; TASSINARI, C. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista USP**, v. 95, p. 33-42, 2012.
- RIJKEN, M. C. M. Modeling naturally fractured reservoirs: From experimental rock mechanics to flow simulation. **Doctoral dissertation**, 2005.
- ROCHA, C. E. Definição de Petrofácies com Base nas Principais Características Petrográficas que Controlam a Qualidade das Rochas Sedimentares como Reservatórios de Hidrocarbonetos. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Graduação em Geologia. Instituto de Geociências**. Porto Alegre, p. 89, 2018.
- RODRIGUEZ-PASCUA, M.A., CALVO, J.P., DE VICENTE, G., GÓMEZ-GRAS, D. Soft sediment Deformation Structures Interpreted as Seismites in Lacustrine Sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and Their Potential use as Indicators of Earthquake Magnitudes During the Late Miocene. **Sedimentary Geology**, v. 135, p. 117–135, 2000.
- ROGERS, J. J. W. A History of continents in the past three billion years. **The Journal of Geology**, v. 104, p. 91-107, 1996.
- SANDERSON, D.J. & NIXON, C.W. The use of topology in fracture network characterization. **Journal of Structural Geology**, v. 72, p. 55-66, 2015. Doi: 10.1016/j.jsg.2015.01.005
- SANTOS, E. J., NUTMAN, A. P., BRITO NEVES, B. B. Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: Implicações Sobre a Evolução Tectônica da Zona Transversal, Província Borborema, **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2004.
- SANTOS, E.J., VAN SCHMUS, W.R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B. B. The Cariris Velhos Tectonic Event in Northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 61-76, 2010.

- SANTOS, R. F. V. C., MIRANDA, T.S., BARBOSA, J.A., GOMES, I.F., MATOS, G.C., GALE, J., NEUMANN, V.H., GUIMARÃES, L. J. Characterization of Natural Fracture Systems: Analysis of Uncertainty Effects in Linear Scanline Results. **AAPG Bulletin**, v. 99, n. 12, p. 2203-2219, 2015. Doi: 10.1306/05211514104.
- SANTOS, R.F.V.C., GOMES, I., MIRANDA, T., BARBOSA, J.A., NEUMANN, V., GUIMARÃES, L.J.N., MCKINNON, E., MARRETT, R. Numerical modeling of naturally fractured carbonate reservoir based on outcrops of Crato Formation, NE Brazil. In: **78th EAGE Conference and Exhibition**, Vienna, Austria, 2016. Doi: 10.3997/2214-4609.201601447.
- SANTOS, F. H., AZEVEDO, J. M., NASCIMENTO, J., D. R., SOUZA, A. C. B. DE, MENDES, M., BEZERRA, I., LIMA, V., S. Análise de Fácies e Petrografia de uma seção do Membro Crato em Nova Olinda (CE): Contribuições à História Depositional e Diagenética do Neopartiano na Bacia do Araripe. *Geologia USP. Série Científica*, v. 17, p. 3, 2017.
- SARAIVA, A. Á. F., HESSEL, M.H., GUERRA, N.C., FARA, E. Concreções Calcárias DA Formação Santana, Bacia do Araripe: Uma Proposta de Classificação. **Estudos Geológicos**, v. 17, n. 1, p. 47-57, 2007.
- SCHMIDT, E. A non-destructive concrete teste. **Concrete**, v. 59, n. 8, p. 34-50, 1951.
- SCHIEBER, JUERGEN., BOSE, P. K., ERIKSSON, P. G., BANERJEE, S., SARKAR, S., ALTERMANN, W., & CATUNEANU, O. Atlas of microbial mat features preserved within the siliciclastic rock record. **Elsevier**, 2007.
- SINCLAIR, S.W. Analysis of Macroscopic Fractures on Teton Anticline, Northwestern Montana. **MS Thesis**, Department of Geology, Texas A and M Univeristy, 1980.
- SCHOLLE, P. A. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis, **AAPG Memoir**, p. 77, 2003.
- SIAL, A.N.; TOSELLI, A.J.; SAAVEDRA, J.; PARADA, M.A.; FERREIRA, V.P. Emplacement, petrological and magmatic susceptibility characteristics of diverse magmatic epidote-bearing granitoid rocks in Brazil, Argentina and Chile. **Lithos**, v. 46, p. 367-392, 1999.
- SILVA FILHO, A. F., GUIMARÃES, I. P., SANTOS, L., ARMSTRONG, R., VAN SCHMUS, W. R. Geochemistry, U-Pb geochronology, Sm-Nd and O isotopes of ca. 50 Ma long Ediacaran High-K Syn-Collisional Magmatism in the Pernambuco-Alagoas Domain, Borborema Province, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 1–21, 2016.
- SILVA, A. L. & NEWMANN, V.H. Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe. **Boletim do 2º Workshop PRH-ANP/MCT dos Programas de Formação de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo e Gás da UFPE**. Recife, p. 15-18, 2002.
- SILVA, A. L.; NEUMANN, V. H.; CABRERA, L. Fácies Carbonáticas Laminadas da Formação Crato (Aptiano), Bacia do Araripe: Litofácies, Microfácies e Microestruturas. In: **Bol. 6º Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil e 3º Simpósio Sobre el Cretácico de América Del Sur**. São Pedro-SP. UNESP, Rio Claro, p. 37-41, 2002.

- SILVA, A. L. Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe em Afloramento Seleccionados. **Dissertação de Mestrado**, Programa de Pós-Graduação em Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, p. 118, 2003.
- SILVA, V. A. Propostas metodológica para o imageamento digital e modelagem virtual 3D de um bloco de rochas travertinas. **Dissertação de mestrado**, p. 91, 2013.
- SILVERIO, F. G., DURANTE, G. C., DURAND, L. T. Método para quantificação do teor carbono em aços por meio da técnica de WDS. **Trabalho de Conclusão de Curso**, p. 74, 2016.
- SHACKLETON, J., COOKE, M., SUSSMAN, A. Evidence for temporally changing mechanical stratigraphy and effects on joint-network architecture. **Geology**, p. 33, 2005. Doi:10.1130/G20930.1.
- SMALL, H. L. Geologia e Suprimento de Água Subterrânea no Ceará e Parte do Piauí. Publicação Inspetoria de Obras Contra Secas, v. 25, p. 1-80, 1913.
- SPERRY-SUN. Traaining department. Formations Evolutions Fundamentals- Gamma. **Hallibuton company**, p. 55, 1999.
- STEER, P., BIGOT, A., CATTIN, R., SOLIVA, R. In-situ characterization of the effective elasticity of a fault zone and its relationship to fracture spacing. **Journal of Structural Geology**, v. 33, p. 1541-1553, 2011.
- SOUZA, J., ROSTIROLLA, S. P., SPISILA, A. L., FIGUEIRA, I. F. R., SANTOS, T. B., & PIERIN, A. R. Propriedades fractais de arenitos fraturados do Canyon Guartelá. **Brazilian Journal of Geology**, v. 38, n. 1, p. 117-127, 2008.
- VAN SCHMUS, W. R., OLIVEIRA, E. P., SILVA FILHO, A. F., TOTEU, S. F., PENAYE, J., GUIMARÃES, I. P. Proterozoic links between the Borborema province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. **Geological Society of London, Special Publication**, v. 294, p. 69–99, 2008.
- VAN SCHMUS, W. R., KOZUCH, M.; BRITO NEVES, B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 31, p. 227-252, 2011.
- VAUCHEZ, A. The Borborema zona de cisalhamento system, Ne Brazil. **J. of S. American Earth Sciences**, [S.l.], v. 8, p. 247-266, 1995.
- VERMILYE, J. M., AND SCHOLZ, C. H. Relation between vein length and aperture. **J. Struct. Geol.**, v. 17, p. 423-434, 1995.
- VILES, H., GOUDIE, A., GRAB, A., LALLEY, J. The Use of the Schmidt Hammer and Equotip for Rock Hardness Assessment in Geomorphology and Heritage Science: A Comparative Analysis. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 36, p. 320-333, 2011.
- TERRA, G. J. S., SPADINI, A. R., FRANÇA, A. B., SOMBRA, C. L., ZAMBONATO, E. E., JUSCHAKS, L. C. S., ARIENTI, L. M., ERTHAL, M. M., BLAUTH, M., FRANCO, M. P., MATSUDA, N. S., SILVA, N. G. C., MORETTI JUNIOR, P. A., D'AVILA, R. S. F., SOUZA, R. S., TONETTO, S. N., ANJOS, S. M. C., CAMPINHO, V. S.,

- WINTER, W. R. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 18, n. 1, p. 9-29, 2010.
- THOMPSON, D. L., STILWELL, J. D., & HALL, M. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-salt coquinas of Brazil and West Africa. **Gondwana Research**, v. 28, n. 1, p. 26-51, 2015.
- TOPAL, S. & ÖZKUL, M. Soft-Sediment Deformation Structures Interpreted as Seismites in the Kolankaya Formation, Denizli Basin (SW Turkey). **The Scientific World Journal**, p.13, 2014. DOI: 10.1155/2014/352654
- TURCOTTE, D. Fractals in geology and geophysics. **Pure and Applied Geophysics**, v. 131, n. ½, p. 171-196, 1989. Doi: 10.1007/BF00874486
- UNDERWOOD, C.A., COOKE, M.L., SIMO, J.A., MULDOON, M.A. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomite, northeastern Wisconsin. **AAPG Bull.**, v. 87, p. 121-142, 2003.
- WARREN, L.V., VAREJÃO, F.G., QUAGLIO, F., SIMÕES, M.G., FÜRSICH, F.T., POIRÉ, D.G., CATTO, B., ASSINE, M.L. Stromatolites from the Aptian Crato Formation, a hypersaline lake system in the Araripe Basin, northeastern Brazil. **Facies**, v. 63, n. 3, p. 1-19, 2017. Doi: 10.1007/s10347-016-0484-6.
- WATKINS, H. BOND, C. E., HEALY, D., BUTLER, R. W. H. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterize heterogeneous fracture networks at outcrop. **Journal of Structural Geology**, v. 72, p. 67-82, 2015.
- WANG, H., LIN, H., & CAO, P. Correlation of UCS rating with Schmidt hammer surface hardness for rock mass classification. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 50, n. 1, p. 195-203, 2017.
- WENNERBERG, O. P., T. AZIZZADEH, S. M., AQRAWI A. M. M., BROCKBANK, P., LYSLO, K. B., OGILVIE, S. Fracture intensity vs. mechanical stratigraphy in platform top carbonates: The Aquitanian of the Asmari Formation, Khaviz Anticline, Zagros, SW Iran. **Petroleum Geoscience**, v. 12, n. 3, p. 235–245, 2006.
- WENNERBERG, O. P., CASINI, G., JONOU, S., PEACOCK, D. C.P. The characteristics of open fractures in carbonate reservoirs and their impact on fluid flow: A discussion. **Petroleum Geoscience**, v. 22, n. 1, p. 91–104, 2016.
- WILLIAMS, L. A., & CRERAR, D. A. Silica diagenesis; II, General mechanisms. **Journal of Sedimentary Research**, v. 55, n. 3, p. 312-321, 1985.
- ZAZOUN, R.S., MAROK, A., SAMAR, L., BENADLA, M., MEZLAH, H. Fracturing and deformation bands in the El Kohol area (Central Saharan Atlas, Algeria): fractal analysis, scaling laws and discrete network modeling. **Studios Geológicos**, v. 71, n. 2, p. 1-23, 2015. Doi: 10.3989/egeol.42011.359.
- ZIHMS S. G., MIRANDA, T., LEWIS, H., BARBOSA, J. A., NEUMANN, V. H., SOUZA, J. A. B., FALCÃO T. C. Crato Formation laminites - a representative geomechanical pre-salt analogue? In: **5th Atlantic Conjugate Margins Conference Porto de Galinhas**, Pernambuco, Brazil, 2017.

- ZHAO, KE ET AL. Are light-dark coupled laminae in lacustrine shale seasonally controlled? A case study using astronomical tuning from 42.2 to 45.4 Ma in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, eastern China. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 528, n. December, p. 35–49, 2019.
- ZOLITSCHKA, B. Dating based on freshwater and marine laminated sediments, pp. 92–106. In MacKay, A., Battarbee, R., Birks, J. and Oldfield, F. (eds), *Global change in the Holocene*. London: **Edward Arnold Publishers**, London, 2003.