

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VANESSA DA SILVA REIS ASSIS

CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE TRANSPORTE EM MASSA A PARTIR  
DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

CURITIBA

2023

VANESSA DA SILVA REIS ASSIS

CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE TRANSPORTE EM MASSA A PARTIR  
DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia

Orientadora: Profa. Dra. Barbara Trzaskos

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Assis, Vanessa da Silva.

Caracterização de depósitos de transporte em massa a partir de atributos sísmicos. / Vanessa da Silva Assis. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Barbara Trzaskos.

1. Geologia. 2. Sedimentologia. 3. Bacia de Santos. 4. Petróleo. I. Trzaskos, Barbara. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Júnior CRB-9/1797



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -  
40001016028P5

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **VANESSA DA SILVA REIS ASSIS** intitulada: **CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE TRANSPORTE EM MASSA A PARTIR DE ATRIBUTOS SÍSMICOS**, sob orientação da Profa. Dra. BÁRBARA TRZASKOS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 03 de Março de 2023.

Assinatura Eletrônica

07/03/2023 07:20:59.0

BÁRBARA TRZASKOS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

06/03/2023 18:19:27.0

CARLOS CONFORTI FERREIRA GUEDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

07/03/2023 08:12:49.0

MARIA SÍLVIA CARVALHO BARBOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO)

---

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA-CENTRO POLITÉCNICO-UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3365 - E-mail: posgeol@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 263097

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 263097**

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Petrobras (Projeto de Avaliação dos Controles Sedimentológicos, Estratigráficos e Tectônicos na Distribuição e Qualidade de Reservatórios Siliciclásticos) pelo pagamento de bolsa de mestrado.

Ao PPG-Geologia da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realizar a pesquisa e ao Laboratório de Análise de Bacias (LABAP) pela estrutura.

À ANP pela disponibilização dos dados (processos UFPR-146867 e 1098) e à dGB Earth Sciences pela liberação do *software* OpendTect Pro.

À minha orientadora Dra. Barbara Traskos por todo o apoio, disponibilidade e dedicação e aos professores Dr. Fernando Farias Vesely e Dr. Carlos Guedes pelas contribuições feitas ao longo do trabalho.

À meus pais Romero e Maria Helena e minha irmã Marina, pela compressão e apoio incondicional durante todo o tempo que me dediquei a esse trabalho.

À Nayara, Felipe, Davi e Nina por me acolherem sempre tão bem. E a toda a minha família pelo incentivo e por entenderem as ausências.

Aos meus colegas de laboratório, Giovana, Gabriela, Sérgio, Thammy, Andreas, Reinaldo e Viki, à AAPG e às companheiras de pensionato pela companhia e pelo suporte.

Aos meus amigos Pedro, Barbara, Nil, Giovanna, Bia, Mikhaela e Fernanda que mesmo longe estiveram sempre ao meu lado.

## RESUMO

Os depósitos de transporte em massa (MTDs) têm grande importância no registro sedimentar. Além da sua relevância em investigações sedimentológicas, estratigráficas e estruturais, eles também possuem destaque na indústria do petróleo, já que podem atuar como reservatórios ou selos. Quando se encontram em subsuperfície eles são analisados indiretamente a partir de dados sísmicos, de forma que a interpretação dos mesmos em volume sísmico é de grande valia, permitindo que a caracterização seja feita de forma mais completa. Os atributos sísmicos consistem em uma das ferramentas empregadas em análises indiretas, entretanto eles são utilizados de forma pontual, apenas na caracterização de feições específicas. Dessa forma, considerando a importância desses depósitos e as ferramentas disponíveis para análise, propõem-se a aplicação sistemática de diversos atributos sísmicos para realização da caracterização de MTDs e identificação de quais atributos podem ser utilizados na interpretação de cada uma de suas características. Para tanto, foi utilizado o volume sísmico pertencente ao levantamento BS-500, localizado na porção norte da Bacia de Santos, no qual foram interpretados dois MTDs (A e B) considerando 33 descritores. A análise dos depósitos mostrou que algumas das características podem ser interpretadas sem o auxílio dos atributos, mas que em outras eles são indispensáveis ou têm grande importância para a análise. Na comparação dos resultados, entre os depósitos A e B, verificou-se que para algumas características mais de um atributo pode ser empregado na interpretação e, conseqüentemente, diferentes atributos foram aplicados em cada depósito de acordo com os aspectos específicos de cada um. Além disso, em alguns dos atributos vários *outputs* foram gerados para testar sua aplicabilidade e observou-se que as características do dado sísmico, da geologia regional e do próprio depósito influenciam na escolha dos mesmos. A partir dos resultados das interpretações de cada MTD foi gerada uma tabela com os atributos que foram utilizados na análise de cada uma das características dos dois depósitos, salientando a importância de aplicar essas técnicas para esse tipo de análise. Ademais, no MTD A foi identificada variação na distribuição das estruturas internas e na superfície basal do depósito. Uma análise mais aprofundada indicou que durante a deposição do mesmo a formação e presença de rampas na superfície basal foram capazes de gerar células de fluxo de segunda ordem que modificaram as características do fluxo original e, conseqüentemente, geraram uma distribuição diferenciada dessas estruturas ao logo do depósito. Dessa forma, foi criado um modelo para o desenvolvimento desse depósito.

Palavras-chave: MTD, Atributos sísmicos, Sísmica 3D, Bacia de Santos, Células de fluxo.

## ABSTRACT

Mass-transport deposits (MTDs) have a huge importance in the sedimentary register. In addition to their relevance in sedimentological, stratigraphic, and structural investigations, they are also prominent in the oil industry, as they can work as reservoirs or seals. When they are in the subsurface, they are analyzed indirectly with seismic data. Thus their interpretation with a seismic volume is really important, allowing a complete characterization. The seismic attributes are one of the tools that are already used in indirect analyses, however they are employed punctually, just in the characterization of specific features. Therefore, considering the importance of this deposits and the available tools for their analyses, it is proposed a systematic application of several seismic attributes in order to interpret MTDs and identify which attribute can be employed in the interpretation of each of the deposits characteristics. For this purpose, it was used a seismic volume from BS-500 seismic survey, located in the northern Santos basin, in which it was interpreted two MTDs (A and B) considering 33 descriptors. The deposits analyses showed that some of their characteristics can be interpreted without the support of any attribute, however, they are essential or have huge importance during the analysis of other characteristics. In the comparison between the results of the two deposits it was observed that in some characteristics more than one attribute can be employed during the interpretation and, consequently, there different attributes were applied in each deposit according to the specific issues of each one. Besides, it was created several outputs of some attributes to test their applicability, and it was noted that the characteristics of the seismic data, the regional geology, and the deposit impact in their choice. As a result of the interpretation of each MTD, it was created a chart with the attributes that were employed in the analysis of each deposit's characteristics, highlighting the importance of using these techniques during this kind of analysis. Moreover, in MTD A it was identified a variation in the internal and basal structures distribution. A detailed analysis showed that during its deposition the formation and generation of ramps in the basal surface were capable of creating second-order flow cells, which modified the original flow characteristics and, as consequence, created a differential distribution of these structures in the deposit. Thus, it was made a model for the development of this deposit.

Keywords: MTD, Seismic attributes, 3D seismic, Santos Basin, Flow cells.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1: Classificação dos movimentos em massa (modificado de Nemeç 1990). ...	18
Fig. 1.2: Carta estratigráfica da Bacia de Santos (modificado de Moreira et al. 2007). .....	20
Fig. 1.3: a) Localização da área de estudo na porção norte da Bacia de Santos (com base nos dados de GeoANP 2021 e NEREUS 2021); b) Imagem do cubo sísmico utilizado nesse estudo; c) Seção sísmica mostrando a localização dos dois MTDs estudados. ....	22
Fig. 1.4: Adaptação dos critérios propostos por Le Bouteiller et al. (2019) para a caracterização de MTDs na sísmica. ....	24
Fig. 2.1: Indicadores cinemáticos que podem ser identificados em um MTD durante uma análise sísmica (modificado de Bull et al. 2009), sendo a seta indicativa do sentido do fluxo. SB – superfície basal. ....	27
Fig. 2.2: Figura esquemática de um MTC gerado por vários fluxos de massa, o qual possui o registro de diferentes fácies deformacionais (DF) (modificado de de Lima Rodrigues et al. 2020). ....	29
Fig. 2.3: Classificação dos estilos de interação entre os movimentos de massa submarinos e o substrato. Free-slip flows: a) aquaplanagem e shear wetting; b) Liquefação; No-slip flows: c) Erosão basal; d) Deformação do substrato (modificado de Sobiesiak et al. 2018).....	29
Fig. 2.4: Diferença entre a deformação basal do tipo a) continuous no-slip e b) discontinuous no-slip (modificado de Sobiesiak et al. 2018). ....	31
Fig. 2.5: Fluxograma da geração dos atributos sísmicos utilizados nesse trabalho. .	34
Fig. 2.6: Distribuição dos valores de azimute para o bloco sísmico utilizado nesse trabalho, os quais indicam a direção de mergulho das camadas. ....	36
Fig. 2.7: Representação dos traços sísmicos real, imaginário e complexo (modificado de Taner et al. 1979). ....	38
Fig. 2.8: Variação dos valores de curvatura (k), de acordo com o posicionamento dos vetores normais à curva (modificado de Roberts 2001). ....	41
Fig. 3.1: Study area location in northern Santos basin (based on GeoANP (2021) and NERUS (2021) data). ....	47

Fig. 3.2: a) Indication of flow direction, width variation and maximum horizontal length in studied MTD; b) MTD thickness given by isochrones.....	48
Fig. 3.3: a) MTD outside structures (in-line 9929); One of the faults analyzed in the same in-line in the original data (b) and with semblance (c) and similarity (d) attributes. ....	49
Fig. 3.4: a) MTD US with polar dip attribute; b) MTD US with azimuth attribute; c) Distribution of ramps and ridges in US.....	49
Fig. 3.5: Internal structures interpreted in the deposits: a) Normal faults associated to imbricated blocks; b) Normal and reverse faults, with fold associated to faults; c) Reverse faults interpretation with instantaneous phase attribute. ....	50
Fig. 3.6: Internal distribution of normal and reverse faults in the MTD. ....	51
Fig. 3.7: a) Z-slice (-20 ms in a flattened volume on the basal surface) showing the flow fabrics variation internally; b) Seismic facies distribution in the MTD; c) Compositional heterogeneity distribution in the MTD. ....	52
Fig. 3.8: a) MTD BS with polar dip attribute; b) MTD BS with azimuth attribute; c) Distribution of ramps in the BS; d) 3D view of some ramps in the BS; e, f, g) Examples of terracing and ramps in the deposit. ....	53
Fig. 3.9: a) Thrust faults associated to the lateral walls, observed in the cross-lines; b) related features associated to the thrust faults in z-slice 1540; c) z-slice 1540; d) Relation between the zones where were interpreted the thrust faults and the features.....	55
Fig. 3.10: Distribution of erosive (a) and deformational (b) features in MTD A basal surface; c) 3D view of grooves; d) 3D view of grooves with most negative curvature 2 attribute; e) 3D view of the striation; f) 3D view of the striation with contour curvature att .....	56
Fig. 3.11: Z-slices 4 ms (a) and 12 ms (b) in a flattened volume on the basal surface showing substrate deformation. ....	57
Fig. 3.12: a) Distribution of erosive and deformational structures in the MTD basal surface; b) Zones of basal interaction in the studied MTD; c) Second-order flow cells localization in the MTD. ....	59
Fig. 3.13: a) In-line 9929 showing the relation between the normal faults related to imbricated blocks and the basal deformation structure; b) In-line 9884,	

with the arrow pointing to the down-cutting ramp, which was formed due to a pre-existing fault. ....	62
Fig. 4.1: Study area location in northern Santos basin (based on GeoANP 2021 and NERUS 2021 data). ....	69
Fig. 4.2: a) Indication of flow direction, maximum width and maximum horizontal length in the MTD; b) MTD thickness given by isochrones. ....	72
Fig. 4.3: a) Overview of the MTD, with the delimitation of MTD B; b) MTD external structures. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 72
Fig. 4.4: MTD HS dips with the application of the polar dip attribute (a) and azimuth attribute (b); c) Inverse relationship between HS length and MTD thickness. ....	73
Fig. 4.5: a) MTD BS-flat horizontal zone; b) Ramp and terracing in the MTD BS. ....	74
Fig. 4.6: a) MTD BS with polar dip attribute; b) MTD BS with azimuth attribute. ....	74
Fig. 4.7: a) Location of ramps in the MTD BS; b) 3D view of MTD BS, showing the principal ramp in the surface. ....	75
Fig. 4.8: a) MTD US with polar dip attribute; b) MTD US with azimuth attribute. ....	75
Fig. 4.9: a) Location of ramps, ridges and the MTD B in the MTD US; b) 3D view of MTD US, showing that it is more irregular in the proximal region with the presence of several ridges. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 76
Fig. 4.10: a) Reverse faults inside the deposit and some external structures; b) Interpretation of reverse faults using instantaneous phase attribute; c) Example of a large autochthonous block; d) Distribution of normal and reverse faults in the MTD. ....	77
Fig. 4.11: a) MTD seismic facies distribution; b) MTD compositional heterogeneity distribution. ....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Descrição dos atributos <i>Dip</i> de acordo com dGB (2021a).....	36
Quadro 2.2: Descrição dos atributos instantâneos de acordo com Taner et al. (1979), Khan & Akhter (2015) e dGB (2021c). ....	38
Quadro 2.3: Descrição dos parâmetros existentes nos atributos similaridade e semelhança (dGB 2021f,g,h). ....	40
Quadro 2.4: Descrição dos atributos de curvatura de acordo com Roberts (2001)...	42
Board 3.1: Representative characteristics observed to describe the seismic facies ...	64
Board 3.2: Characteristics observed in each of the six seismic facies described in the MTD.....	65
Board 4.1: Spectral decomposition outputs.....	83
Board 4.2: Similarity outputs.....	84
Board 4.3: Semblance outputs.....	85
Board 4.4: Curvature outputs.....	85
Board 4.5: Fracture outputs.....	86
Board 4.6: Dip and instantaneous outputs.....	86
Board 4.7: Representative characteristics observed to describe the seismic facies....	86
Board 4.8: MTD seismic facies.....	87
Quadro A0.1: <i>Outputs</i> gerados com o atributo de decomposição espectral. ....	100
Quadro A0.2: <i>Outputs</i> gerados com o atributo de similaridade. ....	101
Quadro A0.3: <i>Outputs</i> gerados com o atributo de semelhança.....	102
Quadro A0.4: <i>Outputs</i> gerados com o atributo de curvatura. ....	103
Quadro A0.5: <i>Outputs</i> gerados com o atributo de fratura.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Distância entre as <i>in-lines</i> e <i>cross-lines</i> interpretadas para a geração dos horizontes sísmicos.....	23
Tabela 2.1: Velocidade de propagação das ondas P em diferentes matérias terrestres (baseado em Kearey et al. 2002).....	32
Table 3.1: MTD general data.....	48
Table 3.2: Seismic attributes used in the interpretation of each MTD descriptor.....	58
Table 4.1: MTDs features analyzed in this work, based on Le Bouteiller et al. (2019)..	69
Table 4.2: Number of outputs for each seismic attribute.....	70
Table 4.3: MTD general information.....	71
Table 4.4: Seismic attributes used in the interpretation of each MTD descriptor.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANP	- Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustível
BS	- <i>Basal surface</i>
CWT	- <i>Continuous Wavelet Transform</i>
DF	- <i>Deformational facies</i>
DSMF	- <i>Dip-Steered Median Filter</i>
Fig.	- Figura
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i>
HS	- <i>Headscarp</i>
LABAP	- Laboratório de Análise de Bacias
MTC	- <i>Mass-transport complexes</i>
MTD	- <i>Mass-transport deposits</i>
RGB	- <i>Red, green, blue</i>
RMS	- <i>Root mean square</i>
SB	- Superfície basal
TFL	- <i>Thinned Fault Likelihood</i>
US	- <i>Upper surface</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	17
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	19
1.4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO .....	19
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>25</b>
2.1 DEPÓSITOS DE TRANSPORTE EM MASSA .....	25
2.1.1 Processos gravitacionais em ambiente marinho profundo .....	25
2.1.2 Indicadores cinemáticos e arquitetura interna .....	25
2.1.3 Estruturas de deformação .....	28
2.1.4 Interação com a superfície basal.....	29
2.2 SÍSMICA DE REFLEXÃO.....	31
2.3 ATRIBUTOS SÍSMICOS .....	32
2.3.1 Introdução .....	32
2.3.2 Atributos sísmicos utilizados nesse trabalho .....	34
2.3.2.1 Steering Cube.....	35
2.3.2.2 Isócronas .....	35
2.3.2.3 Dip .....	35
2.3.2.4 Dip-Steered Median Filter (DSMF) .....	36
2.3.2.5 RMS amplitude .....	37
2.3.2.6 Thinned Fault Likelihood (TFL).....	37
2.3.2.7 Instantâneos ( <i>instantaneous</i> ) .....	37
2.3.2.8 Decomposição espectral ( <i>spectral decomposition</i> ) .....	38
2.3.2.9 Energia ( <i>energy</i> ).....	39
2.3.2.10 Similaridade ( <i>similarity</i> ) e semelhança ( <i>semblance</i> ).....	39
2.3.2.11 Curvatura ( <i>curvature</i> ).....	41
2.3.2.12 Fratura ( <i>fracture</i> ).....	42
2.3.3 Variações dos atributos utilizados .....	43
<b>3 RESULTADOS – PARTE I: RAMPS AS TRIGGERS TO THE FORMATION OF MASS-TRANSPORT DEPOSITS FLOW CELLS AND TO DIFFERENTIATION IN BASAL INTERACTION: A CASE OF STUDY IN SANTOS BASIN, SE BRAZIL</b> ....	<b>44</b>

3.1 ABSTRACT .....	44
3.2 INTRODUCTION .....	45
3.3 METHODS .....	46
3.4 RESULTS.....	47
3.4.1 MTD general characterization .....	47
3.4.2 MTD basal surface .....	52
3.4.3 Use of seismic attributes .....	57
3.5 DISCUSSIONS.....	58
3.6 CONCLUSIONS .....	63
3.7 APPENDICES .....	64
<b>4 RESULTADOS - PARTE II: ON THE APPLICABILITY OF SEISMIC ATTRIBUTES IN THE DESCRIPTION AND INTERPRETATION OF MASS-TRANSPORT DEPOSITS .....</b>	<b>66</b>
4.1 ABSTRACT .....	66
4.2 INTRODUCTION .....	66
4.3 METHODS .....	68
4.4 RESULTS.....	71
4.4.1 MTD general characterization .....	71
4.4.2 Use of seismic attributes .....	78
4.5 DISCUSSIONS.....	80
4.5.1 Isochrones.....	80
4.5.2 Dip.....	80
4.5.3 Curvature.....	80
4.5.4 Fracture.....	80
4.5.5 DSMF .....	81
4.5.6 RMS amplitude and Energy.....	81
4.5.7 TFL.....	81
4.5.8 Instantaneous.....	81
4.5.9 Spectral decomposition .....	81
4.5.10 Similarity and Semblance .....	82
4.6 CONCLUSION .....	82
4.7 APPENDICES .....	83
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

**ANEXO 1 – *OUTPUTS* GERADOS PARA ALGUNS DOS ATRIBUTOS SÍSMICOS**  
**100**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

Os depósitos de transporte em massa, também conhecidos como MTDs (sigla em inglês para o termo *mass-transport deposits*) correspondem aos depósitos de deslizamentos, escorregamentos e fluxo de detritos (D'Avila *et al.* 2008). Durante os processos que formam esses depósitos, os grãos não se movimentam de forma livre, diferentemente do que ocorre em fluxo newtoniano, e por essa razão, depósitos formados por correntes de turbidez não são considerados MTDs (Posamentier & Martinsen 2011). O termo depósito de transporte em massa foi utilizado pela primeira vez por Peterson (1965) e, na literatura, é usualmente empregado como sinônimo de complexos de transporte em massa (ou MTC, sigla em inglês de *mass-transport complexes*), complexos de movimento de massa, depósitos gravitacionais em massa, dentre outros (Posamentier & Martinsen 2011).

Segundo Martinsen (1994), os movimentos de massa são importantes processos geológicos que podem ocorrer tanto em ambientes aéreos quanto subaquosos, podendo constituir porções significativas nos registros estratigráficos nos dois casos como, por exemplo, 50% em ambientes de águas profundas (Posamentier & Walker 2006) e 75% em registros antigos em afloramentos (Martinsen 1989, 1994). A classificação de movimentos de massa mais utilizada na literatura é a proposta por Nemec (1990), a qual é útil tanto para processos subaquosos quanto para os que ocorrem em ambientes aéreos, e os subdivide em seis tipos (Fig. 1.1): rastejo, deslizamento, escorregamento, fluxo com comportamento plástico (fluxo de detritos) ou fluido (correntes de turbidez) e queda de blocos ou detritos. Vale destacar que, a transição do fluxo de uma categoria para outra ocorre de forma gradual (Dasgupta 2003) e que, de acordo com Nardin *et al.* (1979), fluxos de massa têm grande importância como mecanismos de mobilização, transporte e deposição, além de serem a forma de transporte dominante em taludes e cânions submarinos.

Diferentes fatores podem ser gatilhos deformacionais para a geração desses fluxos, tais como sobrecarga, terremotos e pressão hidráulica, essa última pode ser provocada por ondas, maré ou percolação da água na coluna sedimentar (Dott 1963). Vale ressaltar que os depósitos formados contêm informações para as investigações sedimentológicas e estratigráficas, bem como para análises estruturais, pois são

formados diferentes tipos de estruturas durante a deformação que ocorre no seu processo de formação (Martinsen 1994). Além disso, os MTDs possuem importância relevante na indústria do petróleo, já que podem atuar como reservatórios, selos (de topo e laterais) ou mesmo definindo o paleorelevo no momento da deposição de uma camada reservatório que o sobrepõe (Amerman 2009).

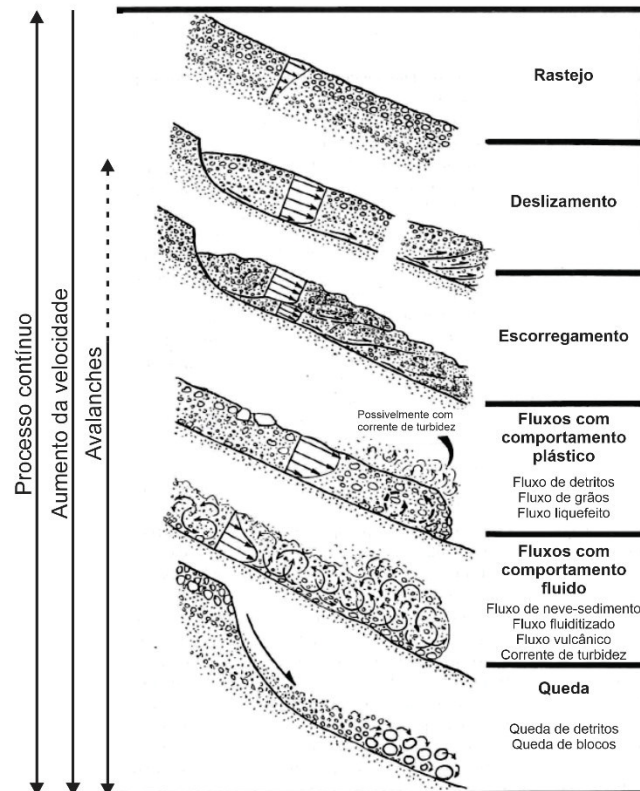


Fig. 1.1: Classificação dos movimentos em massa (modificado de Nemeç 1990).

Para o estudo de MTDs submarinos, a sísmica de reflexão é amplamente utilizada, tanto em 2D como em 3D (e.g. Moscardelli *et al.* 2006, Jenner *et al.* 2007, Alves & Cartwright 2009, Araújo *et al.* 2009, Joanne *et al.* 2013, Omeru & Cartwright 2019, Biancardi *et al.* 2020, Le Goff *et al.* 2020). Mesmo se tratando de um método indireto, segundo Bull & Cartwright (2010) a maior vantagem na investigação de MTDs utilizando a sísmica 3D é a possibilidade de realizar a avaliação volumétrica e geométrica, tanto externa quanto interna, em grande área, sendo que a principal limitação desse método seria a resolução vertical do dado.

Atributos sísmicos vêm sendo utilizados na análise de algumas características dos MTDs submarinos como, por exemplo, geomorfologia, arquitetura interna e

estruturas erosivas (e.g. Gee *et al.* 2006, Alves & Cartwright 2010, Dalla Valle *et al.* 2013, Alves 2015, Scarselli *et al.* 2016). Porém, eles são empregados pontualmente e, mesmo nos trabalhos que realizam a caracterização de MTDs utilizando atributos sísmicos (e.g. Frey-Martínez 2010, Bhatnagar *et al.* 2019), poucos atributos são utilizados e só são aplicados para realizar interpretações específicas. Dessa forma, este trabalho terá como foco a utilização de uma variedade de atributos sísmicos para a caracterização de diferentes feições e estruturas em MTDs de ambiente marinho profundo.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho está estruturado em quatro capítulos. O primeiro pretende introduzir o tema da dissertação, apresentando, também, os objetivos, o contexto geológico e a área de estudo, bem como os materiais e métodos empregados na pesquisa. O segundo capítulo apresenta revisão bibliográfica sobre depósitos de transporte em massa, o método sísmico e os atributos sísmicos que foram utilizados na execução do trabalho. O terceiro e o quarto capítulos correspondem à apresentação dos resultados na forma de dois artigos. Por fim, o último capítulo contém as considerações finais do trabalho.

## 1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo desse trabalho é testar o uso de diferentes atributos sísmicos no mapeamento de diversas estruturas e feições relacionadas à MTDs. Ademais, tem-se como objetivo específico caracterizar a distribuição espacial das estruturas de deformação e a geomorfologia de dois MTDs em volume sísmico.

## 1.4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Santos, localizada na margem continental sudeste do Brasil, engloba os litorais dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, tendo como limite o Alto de Cabo Frio, a norte, e o Alto de Florianópolis, ao sul, em área de 350.000 km<sup>2</sup> (Moreira *et al.* 2007). Sua gênese está relacionada à separação do Supercontinente Gondwana e à formação do Oceano Atlântico,

provocados por processos distensivos que culminaram na separação desse supercontinente nas placas Sul-Americana e Africana (Mohriak 2012). Moreira *et al.* (2007) propõem três fases para o desenvolvimento dessa bacia: rifte (Barremiano-Aptiano), pós-rifte (Aptiano) e drifte (Albiano-recente). A fig. 1.2 apresenta a carta estratigráfica da Bacia de Santos.

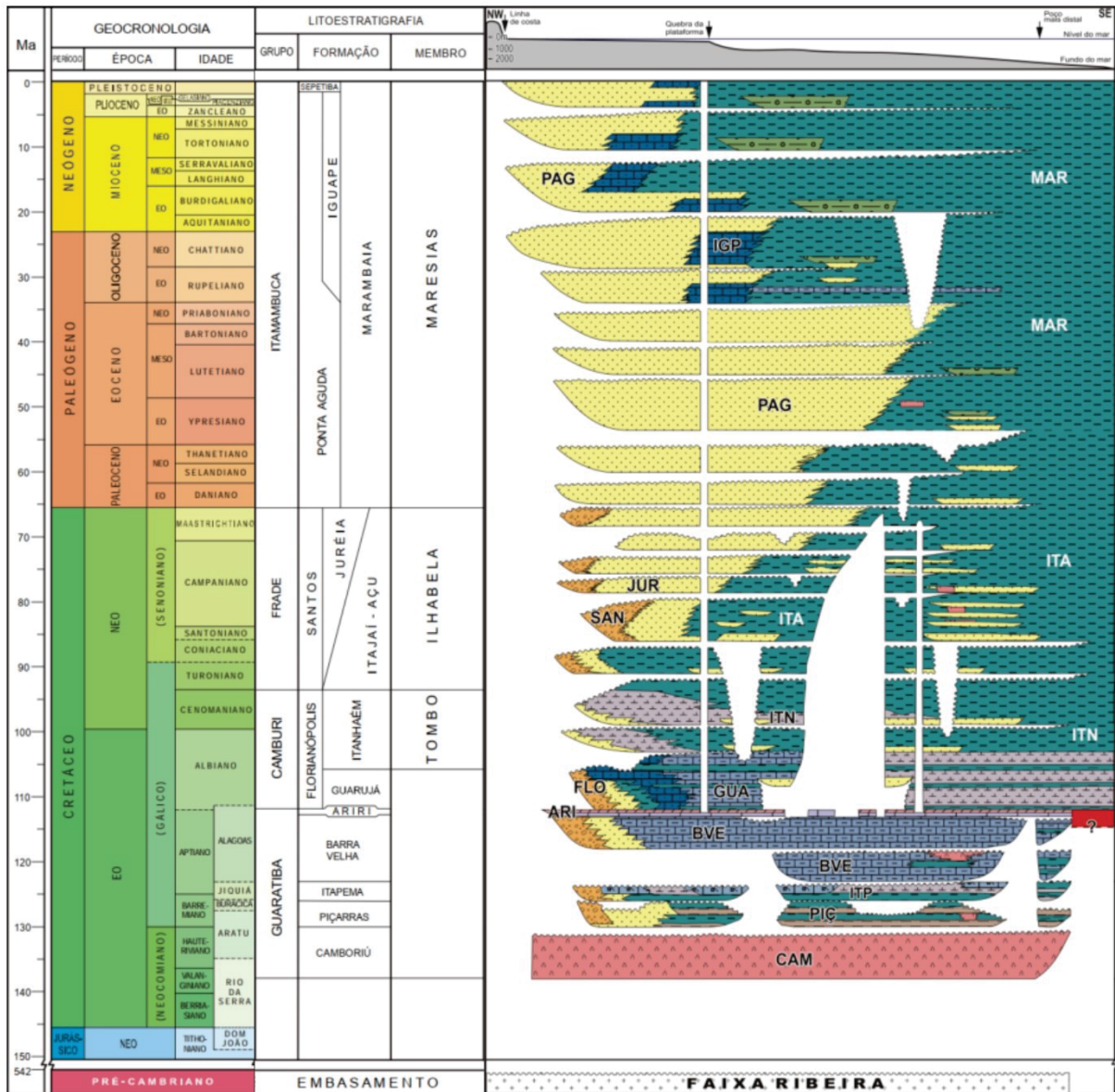


Fig. 1.2: Carta estratigráfica da Bacia de Santos (modificado de Moreira et al. 2007).

A fase rifte tem início com a ocorrência de derrames basálticos de idade eocretácea da Fm. Camboriú. Posteriormente, no Andar Barremiano, ocorrem conglomerados e arenitos polimícticos da Fm. Piçarras depositados em leques aluviais, sendo limitada por discordâncias tanto na base como no topo. Essa supersequência

termina com a Fm. Itapema, depositada entre o Neobarremiano e o Eoaptiano, a qual possui como característica intercalações de calcirruditos e folhelhos escuros, além de ter como fácies proximais conglomerados e arenitos de leques aluviais.

A supersequência pós-rifte é composta por duas formações. A Fm. Barra Velha foi depositada em ambiente transicional estressante, localizada entre os ambientes continental e marinho raso. Sua porção inferior é formada, nas regiões proximais, por calcários microbiais, estromatólitos e lamitos e, nas regiões distais, por folhelhos. Além disso, ocorrem *grainstones* e *packstones* formados por fragmentos de estromatólitos e bioclastos. Em sua porção superior, ocorrem calcários microbiais intercalados com folhelhos e, nas regiões proximais, possui depósitos de arenitos e conglomerados de leques aluviais. A Fm. Ariri é constituída por evaporitos compostos, principalmente, por halita e anidrita, mas com presença de taquidrita, carnalita e, em alguns locais, silvinita.

Por fim, na fase drifte, ocorreu a deposição de sedimentos em diferentes ambientes da bacia, desde o ambiente costeiro a marinho profundo, com depósitos de leques aluviais até pelitos e arenitos batiais. Eles estão divididos em três grupos: Camburi (do topo da Fm. Ariri ao topo do Cenomaniano), Frade (do Cenomaniano ao limite Cretáceo/Paleógeno) e Itamambuca (após o limite Cretáceo/Paleógeno até os dias atuais). De acordo com Moreira & Carminatti (2004), na porção norte da Bacia de Santos, as sequências deposicionais de talude do Eoceno inferior e médio são predominantemente compostas por fluxos gravitacionais.

Vale ressaltar que os processos relacionados à halocinese da formação Ariri são responsáveis por grande parte da deformação da sequência do pós-sal (Guerra & Underhill 2012).

A área de estudo (Fig. 1.3) está situada à cerca de 130 km da cidade do Rio de Janeiro, na porção norte da Bacia de Santos, totalizando área de 1.051,46 km<sup>2</sup>, sendo que ambos os MTDs analisados nesse trabalho se situam estratigraficamente no Grupo Itamambuca.

## 1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foi utilizado um volume sísmico contido no levantamento 3D BS-500, o qual foi cedido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) ao Laboratório de Análise de Bacias (LABAP)

mediante ao pedido formal feito pela instituição (pedido 9353 – protocolo ANP número 136867/2018). O processamento dos dados sísmicos foi realizado utilizando o *software* OpendTect Pro 6.6.4.

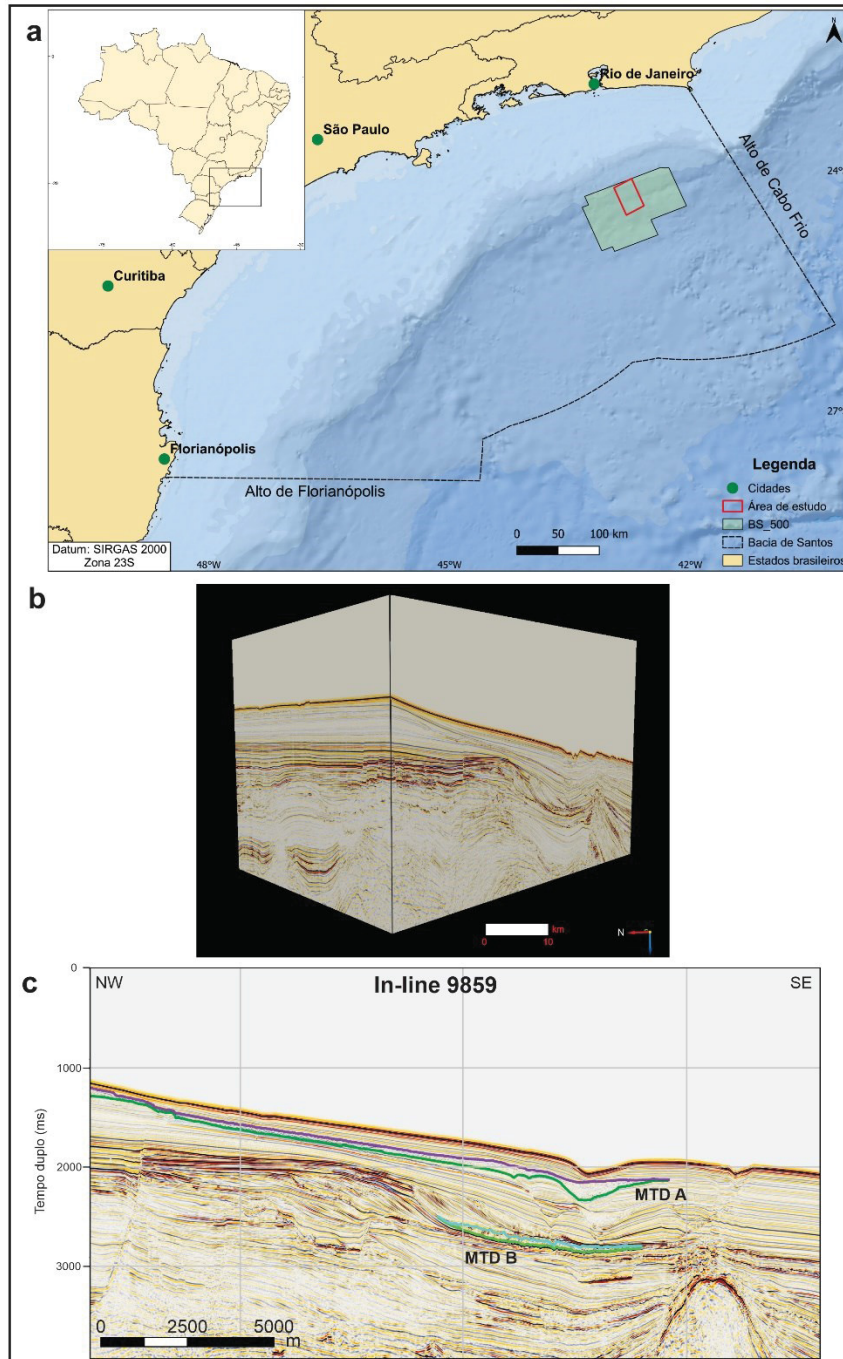


Fig. 1.3: a) Localização da área de estudo na porção norte da Bacia de Santos (com base nos dados de GeoANP 2021 e NEREUS 2021); b) Imagem do cubo sísmico utilizado nesse estudo; c) Seção sísmica mostrando a localização dos dois MTDs estudados.

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia utilizada foi dividida em cinco etapas: 1) revisão bibliográfica; 2) análise dos dados sísmicos; 3) interpretação dos resultados; 4) integração dos produtos obtidos; 5) análise da aplicabilidade dos atributos sísmicos no contexto geológico estudado. A revisão bibliográfica teve como foco os seguintes tópicos: MTDs, expressão sísmica dos MTDs, atributos sísmicos e contexto geológico da Bacia de Santos. No que se refere à análise dos dados sísmicos, inicialmente foi efetuada a interpretação e interpolação utilizando o método de curvatura contínua do refletor correspondente ao fundo do mar, em intervalo de cinco *in-lines* e seis *cross-lines*. Em seguida, foi realizada a interpretação dos horizontes de base e topo dos dois MTDs (A e B) em todas as *in-lines* e a cada duas *cross-lines* no MTD A e com intervalo de cinco *in-lines* e seis *cross-lines* no MTD B. A distância das *in-lines* e *cross-lines* utilizadas para essa interpretação é dada na tabela 1.1. No MTD A não foi necessário interpolar os dados desses dois horizontes, no MTD B foi utilizado o método de curvatura contínua para a interpolação da base e do topo. Vale ressaltar que a interpretação dos horizontes foi feita utilizando a ferramenta *auto-track*, sendo feita de forma manual nos locais onde o refletor não é muito bem definido.

Tabela 1.1: Distância entre as *in-lines* e *cross-lines* interpretadas para a geração dos horizontes sísmicos.

Intervalo	Distância aproximada (m)
Entre cada <i>in-line</i>	24,6
Entre cinco <i>in-lines</i>	123
Entre duas <i>cross-lines</i>	50
Entre seis <i>cross-lines</i>	150

Posteriormente, foram aplicados diferentes atributos sísmicos nas *in-lines*, *cross-lines*, *z-slices* e horizontes do MTD A para testar a sua aplicabilidade na descrição das características do mesmo. Esse processo foi seguido da verificação no MTD B dos atributos que tiveram aplicabilidade no primeiro e do teste dos outros atributos para verificar se eles apresentam melhor resultado no segundo MTD. No caso das análises internas dos depósitos foi utilizado intervalo de observação de 25 *in-lines* no MTD A (a cada 627 m, aproximadamente) e de 50 *in-lines* no MTD B (a cada 1260 m, aproximadamente).

Le Bouteiller *et al.* (2019) compilaram as características que podem ser descritas nas interpretações de processos de transporte de massa a partir de dados sísmicos. Para esse trabalho foi feita a adaptação dessa proposta, a qual é apresentada na figura 1.4. Após a interpretação inicial das características dos dois

objetos de estudo, foi feita a correlação entre os dados obtidos, para a geração de diferentes produtos relacionados a cada MTD. Por fim, foi criada tabela síntese com a aplicabilidade de atributos sísmicos para cada característica que pode ser descrita na interpretação sísmica 3D dos MTDs.

Propriedades	Descritores	
	Le Bouteiller <i>et al.</i> (2019)	Este trabalho
Morfologia	Varição de espessura Espessura média Varição de largura Razão de aspecto horizontal Volume Área superficial Máximo comprimento horizontal Direção principal Presença de línguas na região distal	Varição de espessura Espessura média Varição de largura Razão de aspecto horizontal Volume Área superficial Máximo comprimento horizontal Direção principal Presença de línguas na região distal
Superfície basal	Declive médio <i>BS flat-horizontal zone</i> Indicadores de <i>plungig poll</i> Múltiplos terraços/blocos remanescentes Rampas Escavações, sulcos ou estrias Paredes laterais erosivas Amplitude da superfície basal	Declive médio <i>BS flat-horizontal zone</i> Indicadores de <i>plungig poll</i> Múltiplos terraços/blocos remanescentes Rampas Feições erosivas ou deformacionais Paredes laterais erosivas Amplitude da superfície basal
Superfície de topo	Declive médio Turbiditos no topo Rampas ou cumes	Declive médio Turbiditos no topo Rampas ou cumes
Posição	Conexão vertical com outros MTDs Conexão lateral com outros MTDs Elementos estruturais próximos Distância de <i>runout</i>	Conexão vertical com outros MTDs Conexão lateral com outros MTDs Elementos estruturais próximos Distância de <i>runout</i>
Escarpa	Morfologia da escarpa Evolução da escarpa	Morfologia da escarpa Evolução da escarpa
Distribuição interna de fácies	Presença de blocos preservados Tamanho dos blocos preservados Distribuição de fácies caóticas Distribuição de fácies transparentes Distribuição de fácies falhadas Distribuição de fácies oduladas Distribuição de fácies deformadas Aumento do ângulo de falhas de empurrão na região distal Distribuição litológica no MTD	Presença de blocos preservados e tamanho dos blocos preservados  Distribuição de fácies sísmicas  Distribuição estrutural  Distribuição litológica no MTD
Ambiente global	Proporção do MTD na pilha sedimentar Distribuição lateral de MTDs Distribuição vertical de MTDs	Proporção do MTD na pilha sedimentar Distribuição lateral de MTDs Distribuição vertical de MTDs

Fig. 1.4: Adaptação dos critérios propostos por Le Bouteiller *et al.* (2019) para a caracterização de MTDs na sísmica.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DEPÓSITOS DE TRANSPORTE EM MASSA

#### 2.1.1 Processos gravitacionais em ambiente marinho profundo

O ambiente marinho profundo é aquele onde não há interação entre as ondas e o substrato, ou seja, abaixo do nível de base das ondas de tempestade, e onde os fluxos gravitacionais correspondem aos principais processos de transporte e deposição de grandes volumes de sedimentos (D'Avila *et al.* 2008). Segundo os autores, os deslizamentos, escorregamentos e fluxos de detritos são os processos formadores de MTDs nesse ambiente.

Tanto os deslizamentos quanto escorregamentos são fluxos gravitacionais em massa e correspondem a uma massa de sedimentos que desloca-se sobre uma superfície. Eles são diferenciados pelo grau de deformação interna, que não ocorre ou é ínfimo nos deslizamentos e mais intenso nos escorregamentos, sendo ainda possível reconhecer o acamamento (Martinsen 1994, D'Avila *et al.* 2008).

Por outro lado, o fluxo de detritos possui um fluxo plástico e não conserva as características da rocha original, além disso, normalmente, contem textura de clastos suportados por uma matriz (Martinsen 1994, D'Avila *et al.* 2008, Posamentier & Martisen 2011).

#### 2.1.2 Indicadores cinemáticos e arquitetura interna

No trabalho de Bull *et al.* (2009) é apresentado um conjunto de indicadores cinemáticos presentes nos MTDs que podem ser identificados nos dados sísmicos. Segundo os autores, indicadores cinemáticos são feições ou estruturas geológicas, as quais podem ser utilizadas para identificar a direção, a magnitude e a forma como ocorreu o transporte. Eles podem ser agrupados de acordo com a região do depósito em que ocorrem (*headwall*, *translational* e *toe domain*), aqui denominados de domínios proximal, translacional e distal, os quais serão explicitados a seguir e sintetizados na figura 2.1.

No domínio proximal, há predominância de distensão e os principais indicadores cinemáticos observados nessa região são a escarpa e os cumes e blocos distensivos. De forma que o fluxo e a translação inicial dos blocos ocorrem

perpendicularmente à direção de propagação da escarpa. O domínio translacional é subdividido em diferentes regiões: margens laterais, superfície de cisalhamento basal, corpo interno do depósito e superfície de topo; as quais possuem indicadores cinemáticos específicos.

As margens laterais são paralelas à direção principal do fluxo, além disso, pode haver deformação do tipo strike-slip e escarpas sigmoidais em echelon. Os principais indicadores que podem ocorrer na superfície basal são sistemas de rampas e patamares (perpendiculares ou paralelos ao fluxo), *grooves* (sulcos) e *striations* (estrias), sendo essas duas últimas, predominantemente, paralelas à direção de translação. No corpo interno, normalmente, são identificados blocos (transladados ou remanescentes), nos quais o eixo mais longo fica alinhado com o fluxo, além de dobras cujos eixos são perpendiculares à direção principal do depósito. Os blocos do tipo *outrunner* são separados do fluxo por terem uma velocidade maior e se depositam na frente do domínio distal. Por fim, a superfície de topo pode conter zonas de cisalhamento longitudinais, que indicam movimento diferencial do depósito, e texturas de fluxo de segunda ordem, que são lineações ou bandamentos paralelos ao fluxo.

Por último, no domínio distal, podem ser observados cumes/cordilheiras de compressão, as quais são a manifestação em superfície de falhas de empurrão que se alinham perpendicularmente à translação, além de sistemas de falhas de empurrão e de dobras, sendo o fluxo perpendicular ao *strike* das falhas de empurrão ou das falhas que formam os blocos de pop-up.

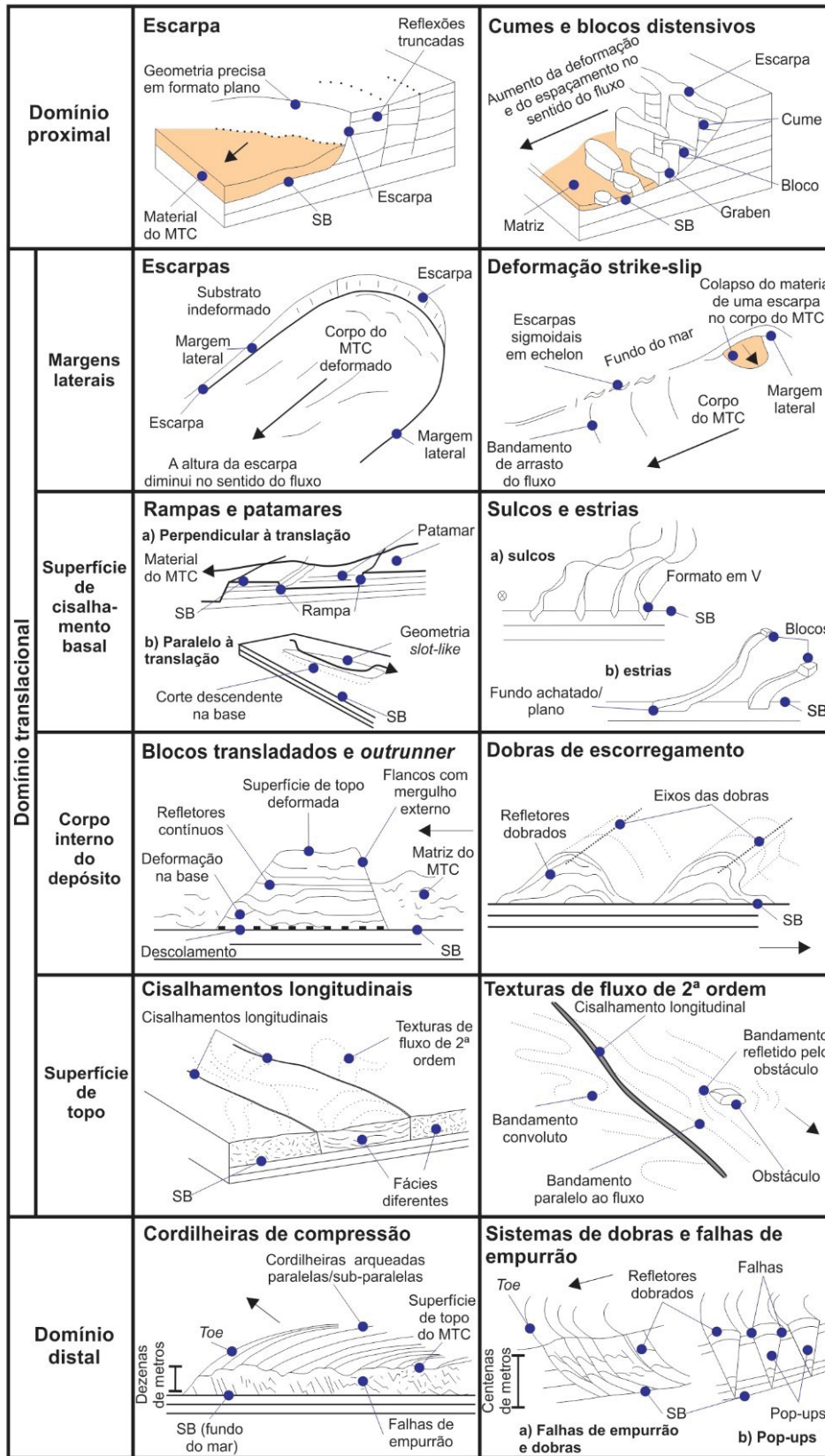


Fig. 2.1: Indicadores cinemáticos que podem ser identificados em um MTD durante uma análise sísmica (modificado de Bull et al. 2009), sendo a seta indicativa do sentido do fluxo. SB – superfície basal.

### 2.1.3 Estruturas de deformação

Os processos que ocorrem durante a formação de movimento de massa são considerados deformacionais (Martinsen 1994), os quais dão-se progressivamente, havendo aumento de estruturas de deformação tais como falhas, dobras e boudins, além da remobilização da matriz, de forma que ocorre a homogeneização da massa em estágios avançados da evolução do MTD (de Lima Rodrigues *et al.* 2020).

O estudo realizado por de Lima Rodrigues *et al.* (2020), o qual fez a análise de MTDs em afloramentos, mostrou a relação entre diferentes estruturas de deformação e a disposição espacial das mesmas nos depósitos (Fig. 2.2). Na região proximal, por exemplo, predominam falhas e dobras, que se desagregam e se transformam em diamictitos com mais de 50% de matriz na porção distal. Ou seja, podem ocorrer diferentes estilos estruturais no mesmo depósito.

Entretanto, mesmo sendo identificadas diferentes fácies deformacionais em posições específicas dos MTDs a partir das estruturas descritas (de Lima Rodrigues *et al.* 2020), não é possível determinar de forma consistente como ocorre a variação lateral dessas fácies de forma tridimensional no depósito.

Ademais, estudos indicam que os movimentos de massa podem não ocorrer em uma única célula, ou seja, as características do fluxo podem se modificar e, conseqüentemente, são formadas células de fluxo de segunda ordem, com variação da distribuição das estruturas internas (Alsop & Marco 2014).

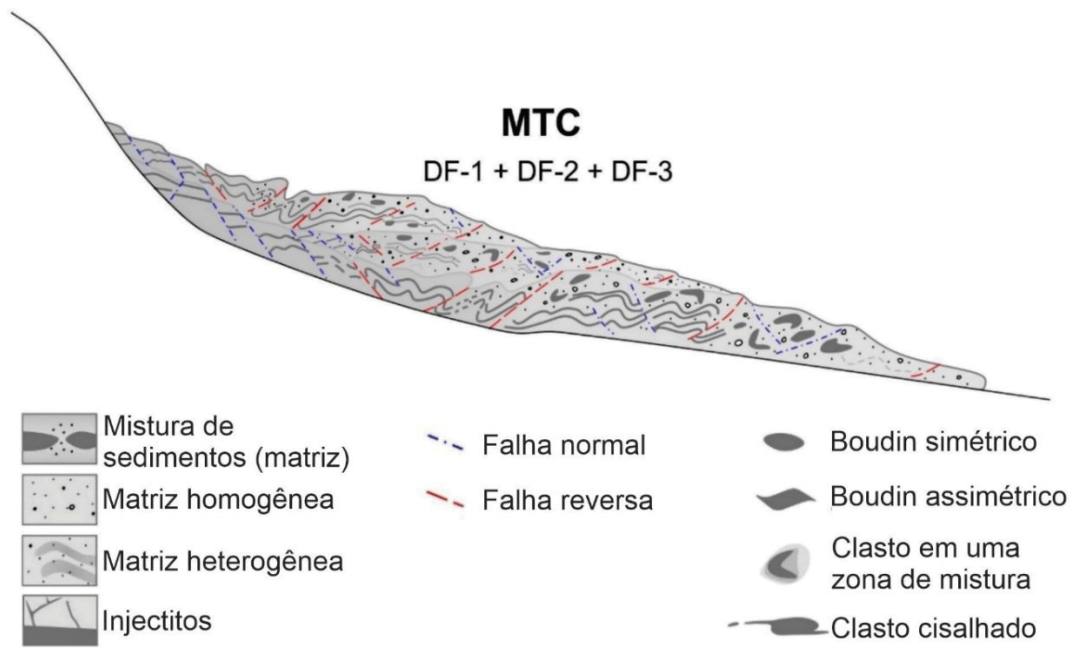


Fig. 2.2: Figura esquemática de um MTC gerado por vários fluxos de massa, o qual possui o registro de diferentes fácies deformacionais (DF) (modificado de de Lima Rodrigues et al. 2020).

### 2.1.4 Interação com a superfície basal

Sobiesiak *et al.* (2018) classificam os estilos de interação entre os movimentos de massa submarinos e o substrato em *free-slip flow* e *no-slip flow* (Fig. 2.3), sendo a que a principal diferença entre eles é a existência de camada lubrificante na base do fluxo no primeiro estilo, impedindo que ocorra transmissão da tensão cisalhante do fluxo para o substrato.

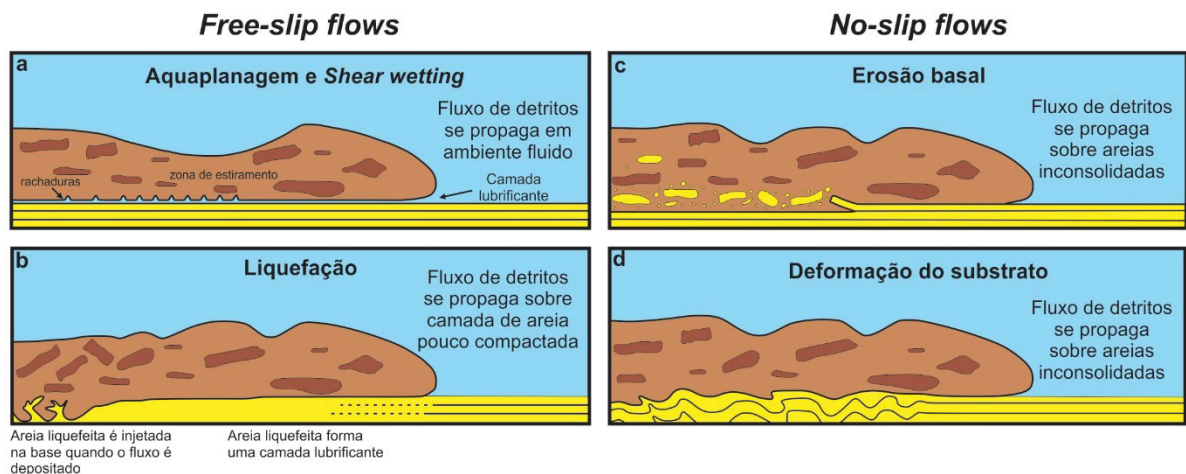


Fig. 2.3: Classificação dos estilos de interação entre os movimentos de massa submarinos e o substrato. Free-slip flows: a) aquaplanagem e shear wetting; b) Liquefação; No-slip flows: c) Erosão basal; d) Deformação do substrato (modificado de Sobiesiak et al. 2018).

No *no-slip flows* a camada lubrificante é inexistente ou muito restrita, de forma que três situações podem ocorrer: a) o material do substrato é erodido e incorporado no fluxo; b) o substrato se deforma internamente devido à deformação plástica; c) a mistura entre as situações a e b (Sobiesiak *et al.* 2018).

É comum a presença de blocos em MTDs marinhos, sendo que eles podem ser autóctones, ou seja, se encontram *in-situ* e ainda conectados com o substrato não remobilizado, ou alóctones, os quais são carregados pelo fluxo, podendo ou não serem fragmentos do substrato (Sobiesiak *et al.* 2018). Além disso, existem algumas feições características que ocorrem em consequência da erosão do substrato, as quais são classificadas por Sobiesiak *et al.* (2018) como: *grooves* (sulcos), *scours* (escavações) e *peel-back scours* ou *striations* (estrias).

Segundo esses autores, os sulcos são feições lineares ou levemente sinuosas com formato em V nas seções transversais. As escavações são estruturas erosivas sem formato pré-definido e que podem ocorrer em diferentes escalas. As estrias são estruturas de fundo achatado/plano, havendo diferentes propostas para sua formação como, por exemplo, arraste de blocos tabulares (Gee *et al.* 2006), mudança do estado de confinamento do fluxo (Moscardelli *et al.* 2006) e *peeling back* do substrato (Sobiesiak *et al.* 2018), sendo que nesse último caso pode ocorrer a formação de sistemas de falhas imbricadas ou o material pode ser desagregado e incorporado ao fluxo.

No que se refere à deformação do substrato, Sobiesiak *et al.* (2018) propõem a classificação de dois tipos: *continuous no-slip* e *discontinuous no-slip* (Fig. 2.4). No primeiro caso, a superfície logo abaixo do MTD é completamente deformada e se estende verticalmente até o limite, que pode ser difuso ou brusco, o qual separa o estrato deformado do indeformado. No segundo tipo, a camada deformada se encontra entre dois estratos indeformados, limitada por duas zonas de cisalhamento (difusas ou bruscas), além disso a primeira camada indeformada, que se encontra imediatamente abaixo do MTD, também é limitada no topo e na base por zonas de cisalhamento.

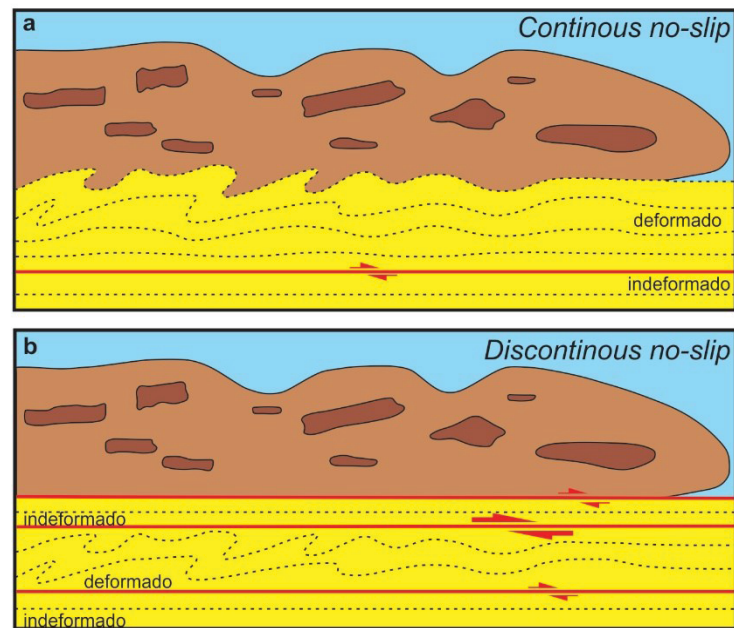


Fig. 2.4: Diferença entre a deformação basal do tipo a) continuous no-slip e b) discontinuous no-slip (modificado de Sobiesiak et al. 2018).

Outra feição que pode ocorrer na base dos MTDs são as *plunge polls*, as quais são depressões de formato ovoide que se formam no fundo marinho onde há quebra abrupta de declividade de pelo menos  $4^\circ$  (Lee *et al.* 2002). Segundo os autores, essas piscinas podem ser formadas por dois mecanismos: saltos hidráulicos ou por fluxos de alta energia.

## 2.2 SÍSMICA DE REFLEXÃO

O método sísmico tem como princípio a propagação de ondas elásticas artificiais para analisar indiretamente as rochas em subsuperfície, considerando que as ondas se propagam em velocidades diferentes, de acordo com a elasticidade das rochas por onde passam (Luiz & Silva 1995, Dentith & Mudge 2014). Esse método possui aplicabilidade em diversas áreas como na hidrogeologia e na engenharia civil, por exemplo, entretanto seu uso mais difundido é na exploração de petróleo (Telford *et al.* 1990). Inicialmente, era empregado principalmente para a interpretação de estruturas que poderiam ser trapas de hidrocarbonetos, mas hoje, com o avanço das técnicas, os dados sísmicos podem ser utilizados para determinar litologias, porosidade, fluidos nos poros e saturação (Wang 2001).

O princípio básico desse método fundamenta-se na geração das ondas e na, conseqüente, medida no tempo de percurso da mesma da fonte até retornar à um receptor na superfície (Telford *et al.* 1990, Luiz & Silva 1995). Vale ressaltar que, quando a onda atinge a superfície entre duas rochas com propriedades elásticas diferentes, parte da energia é refletida e parte é refratada. De forma que é possível medir o tempo de retorno das ondas refletidas (sísmica de reflexão) e refratadas (sísmica de refração) (Luiz & Silva 1995).

As ondas sísmicas podem ser de corpo (se propagam por meio de um sólido elástico) ou de superfície (se propagam no limite entre dois meios), sendo que as ondas de corpo podem ser compressionais ou de cisalhamento, enquanto as de superfície são classificadas como *Rayleigh* e *Love* (Kearey *et al.* 2002). As ondas utilizadas nos levantamentos de sísmica de reflexão são as compressionais, também conhecidas como ondas P. Sua forma de propagação é por compressão e dilatação uniaxial na direção de propagação da onda (Kearey *et al.* 2002). As velocidades dessa onda em diferentes materiais da crosta terrestre são apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Velocidade de propagação das ondas P em diferentes matérias terrestres (baseado em Kearey et al. 2002)

<b>Material</b>		<b><math>v_p</math> (km s<sup>-1</sup>)</b>
Materiais inconsolidados	Areia (seca)	0,2 – 1,0
	Areia (saturada em água)	1,5 – 2,0
	Argila	1,0 – 2,5
Rochas sedimentares	Arenitos	2,0 – 6,0
	Calcários	2,0 – 6,0
	Dolomitos	2,5 – 6,5
	Sal	4,5 – 5,0
	Anidrita	4,5 – 6,5
	Gipso	2,0 – 3,5
Fluidos nos poros	Ar	0,3
	Água	1,4 – 1,5
	Gelo	3,4
	Petróleo	1,3 – 1,4

## 2.3 ATRIBUTOS SÍSMICOS

### 2.3.1 Introdução

Os atributos sísmicos extraem informações do dado sísmico, as quais podem ser utilizadas para interpretações quantitativas ou qualitativas e que são subconjuntos da informação existente no dado sísmico original (Barnes 1999, Chopra & Marfurt

2008). Vale ressaltar que esses dados podem ser obtidos de diferentes formas como, medições diretas ou por raciocínio lógico ou com base em experimentos (Taner 2001).

De forma geral, a função dos atributos é extrair o máximo de informações removendo os dados irrelevantes, para que possam ser observadas tendências e padrões que não são visíveis no dado sísmico original, além de quantificar propriedades específicas (Barnes 1999, Chopra & Marfurt 2008, Barnes 2016).

Os estudos com atributos sísmicos começaram entre o final da década de 1960 e o início da década de 1970 na procura pelos *bright spots*, os quais correspondem a anomalias locais de amplitude que indicam a presença de hidrocarbonetos, principalmente gás, tendo grande potencial para encontrá-los onde não ocorrem trapas (Hammond 1974), de forma que os trabalhos posteriores consolidaram a análise dos atributos para nas interpretações sísmicas (Barnes 1999). Diversos autores propuseram diferentes classificações para os atributos sísmicos, por exemplo: Taner *et al.* (1994) dividem os atributos em geométricos e físicos; Brown (1996) os classifica de acordo com o tipo de informação fundamental a que estão relacionados (tempo, amplitude, frequência e atenuação); para Liner *et al.* (2004) os atributos podem ser gerais (possuem bases físicas e matemáticas sólidas e podem ser aplicados de forma mais abrangente) ou específicos (possuem validade local, ou seja, funcionam em circunstâncias específicas); Barnes (2016) os divide em matemáticos, geofísicos e geológicos. Entretanto, independente da forma como os atributos são classificados, o que deve ser levado em consideração é a aplicação de cada um deles, já que podem ser utilizados para análises estruturais, estratigráficas, litológicas e de características de reservatórios (Taner *et al.* 1994).

Na análise estrutural, os atributos sísmicos são amplamente utilizados, como para o estudo de falhas *strike-slip* (Liao *et al.* 2017); investigação de complexo de falhas (Bhattacharya & Verma 2019); análise estrutural em mina (Manzi *et al.* 2020); deformação em cinturões de dobras submarinos (Iacopini & Butler 2011) e detecção de falhas, fraturas e domos de sal (Neves *et al.* 2004, Aqrawi *et al.* 2012).

Para a análise estratigráfica, diferentes atributos podem ser aplicados (Chopra & Marfurt 2008) em diversas situações como, por exemplo, identificação de superfícies estratigráficas e de padrões de fácies de sedimentação (Randen *et al.* 1998), imageamento de diferentes fases do sistema deposicional (Bourget *et al.* 2014) e interpretação estratigráfica de alta resolução (Li *et al.* 2020). Em relação a análise litológica, alguns exemplos da aplicação dos atributos para a identificação de litologias

são dadas por Verm & Hilterman (1995) e Sebtosheikh & Salehi (2015). Eles também são diretamente empregados para a caracterização de reservatórios (Gastaldi *et al.* 1997, Chambers & Yarus 2002, Rezvandehy *et al.* 2011, Ghosh *et al.* 2014).

### 2.3.2 Atributos sísmicos utilizados nesse trabalho

Para realizar a análise dos MTDs estudados foram aplicados 12 tipos de atributos diferentes, os quais foram gerados seguindo o fluxograma da figura 2.5. Além disso, como em alguns deles é possível variar determinados parâmetros, foram criados 103 atributos para serem aplicados ao dado. Nem todos foram utilizados, de forma que a aplicabilidade dos mesmos será descrita no capítulo de resultados.

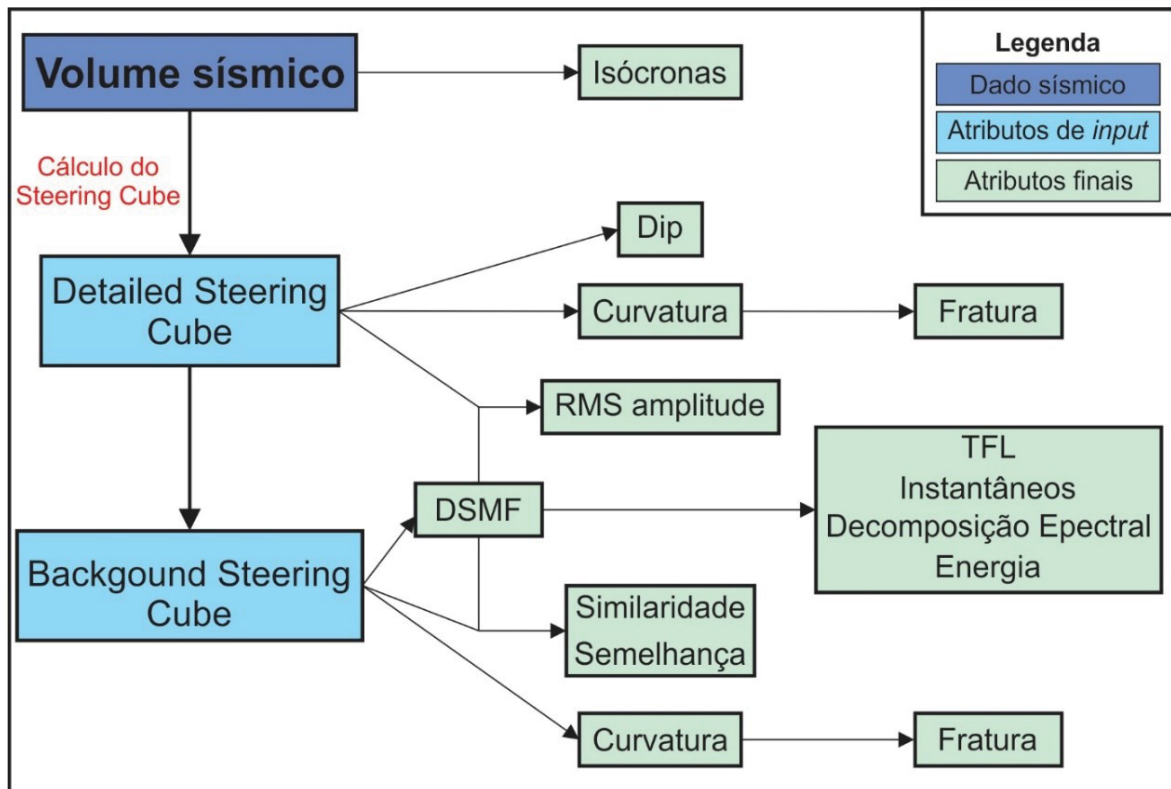


Fig. 2.5: Fluxograma da geração dos atributos sísmicos utilizados nesse trabalho.

A explicação do que cada um dos atributos representa, em que situações podem ser utilizados e o que representam as variações de parâmetros serão descritos a seguir.

### 2.3.2.1 Steering Cube

O *Steering Cube* corresponde ao volume que contém informações de mergulho (*dip*) e azimute dos eventos sísmicos a cada ponto nas direções *in-line* e *cross-line*. Ele pode ser *Detailed Steering Cube*, o qual preserva detalhes mais locais ou *Background Steering Cube*, que conserva informações regionais (Brouwer 2007). É utilizado como base para a geração dos outros atributos.

### 2.3.2.2 Isócronas

Na sísmica, um mapa de isócronas é aquele que apresenta as variações de tempo entre dois eventos sísmicos (Oilfield Glossary 2021). Brown (1996) considera que as isócronas são atributos sísmicos derivados do tempo.

### 2.3.2.3 Dip

Dip corresponde ao atributo geométrico, sendo que os atributos desse grupo melhoram a visibilidade do dado sísmico e na interpretação estrutural e estratigráfica. A partir da utilização desse atributo é possível criar um horizonte virtual de uma (paleo) superfície de sedimentação de qualquer posição do dado sísmico (Qayyum & de Groot 2012).

Esse atributo é calculado a partir do *Steering Cube*, sendo que quando este é computado do dado sísmico em relação ao tempo o atributo terá como resultado *dips* aparentes (mergulhos aparentes). Para que os resultados sejam valores reais de mergulho o atributo deve utilizar o *dip angle* (dGB 2021a). No OpendTect esse atributo possui quatro outputs possíveis: *polar dip*, *azimute*, *inline dip*, *crossline dip* e *line dip* (Quadro 2.1).

Nesse trabalho foram utilizados o polar dip e o azimute, com os quais é possível inferir superfícies de progradação, pacotes transgressivos, escorregamentos caóticos, cones, complexos de rios entrelaçados, preenchimento de terrenos cársticos, falhas e inconformidades angulares (Marfurt 2006). A figura 2.6 apresenta a relação entre os valores de azimute e as cores nos outputs gerados nesse estudo.

Quadro 2.1: Descrição dos atributos *Dip* de acordo com dGB (2021a).

Atributo	Descrição
<i>Polar dip</i> (3D e 2D)	Converte os mergulhos de <i>in-line</i> e de <i>cross-line</i> extraídos para o <i>polar dip</i> , ou mergulho geológico verdadeiro. É a raiz quadrada da soma entre $(in\text{-}line\ dip)^2$ e $(cross\text{-}line\ dip)^2$ . É sempre maior ou igual a zero. Os mergulhos são dados em $\mu$ segundos/metros ( $\mu$ s/m).
Azimute (3D)	Retorna o azimute da direção de mergulho em graus (varia de -180 a +180). Valores positivos são definidos a partir da <i>in-line</i> em direção ao crescimento dos números da <i>cross-line</i> . Azimute = 0° indica que o mergulho está na direção de crescimento dos números de <i>cross-line</i> . Azimute = 90° indica que o mergulho está na direção de crescimento dos números da <i>in-line</i> .
<i>Inline dip</i> (3D)	Retorna o mergulho ao longo da direção <i>in-line</i> da forma como foi extraída pelo algoritmo <i>steering</i> . É o 1° componente guardado no <i>SteeringCube</i> em $\mu$ s/m ou mm/m.
<i>Crossline dip</i> (3D)	Retorna o mergulho ao longo da direção <i>cross-line</i> da forma como foi extraída pelo algoritmo <i>steering</i> . É o 2° componente guardado no <i>SteeringCube</i> em $\mu$ s/m ou mm/m.
<i>Line dip</i> (2D)	Retorna o mergulho ao longo de uma seção 2D.

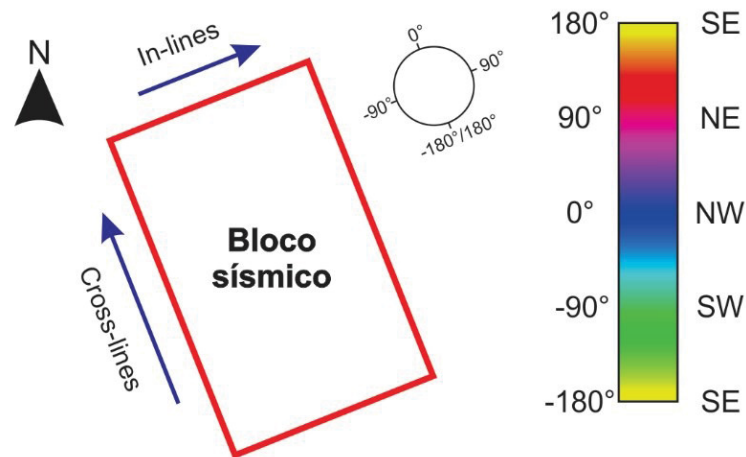


Fig. 2.6: Distribuição dos valores de azimute para o bloco sísmico utilizado nesse trabalho, os quais indicam a direção de mergulho das camadas.

#### 2.3.2.4 Dip-Steered Median Filter (DSMF)

O Dip-Steered Median Filter corresponde ao filtro *post-stack* utilizado para remover ruídos e destacar eventos contínuos lateralmente, além disso, suas

propriedades garantem que quebras no dado, como a presença de falhas, não fiquem distorcidas (Qayyum & de Groot 2012).

#### 2.3.2.5 RMS amplitude

O RMS (*root mean square*) amplitude é o atributo que calcula a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores de amplitude, dividido pelo número de amostras dentro de uma janela pré-definida (Nanda 2016). Por se tratar de atributo de amplitude, é útil para análises estratigráficas e de propriedades de reservatórios (Brown 2001).

#### 2.3.2.6 Thinned Fault Likelihood (TFL)

Esse atributo gera falhas precisas e acentuadas, com valores variando no intervalo de 0 a 1. Ele tem o objetivo de capturar e delinear falhas e fraturas dentro da área de interesse, de forma que o algoritmo escaneia o intervalo dos mergulhos das falhas e identifica a máxima probabilidade. Além disso, ele apresenta imagens de falhas nítidas em cortes horizontais e nas seções verticais. Também é utilizado como input para calcular a densidade de fraturas (*Fracture Density*) em área e a proximidade entre as fraturas (*Fracture Proximity*) (dGB 2021b).

#### 2.3.2.7 Instantâneos (*instantaneous*)

O traço sísmico convencional (Fig. 2.7) pode ser considerado como a componente real do traço sísmico complexo, o qual pode ser exclusivamente calculado sob condições normais e possibilita a separação de duas componentes independentes (envelope de amplitude e a informação de fase), além de propiciar o cálculo da frequência instantânea a partir do dado da fase (Taner *et al.* 1979).

Existem diferentes atributos instantâneos, sendo que neste trabalho foram utilizados os atributos de amplitude, fase instantânea e frequência instantânea, os quais estão descritos no quadro 2.2.

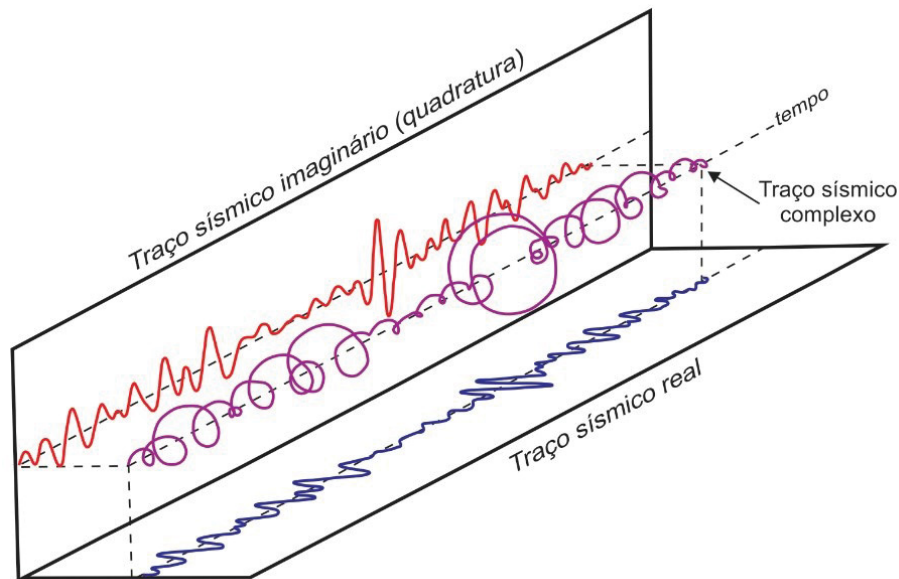


Fig. 2.7: Representação dos traços sísmicos real, imaginário e complexo (modificado de Taner et al. 1979).

Quadro 2.2: Descrição dos atributos instantâneos de acordo com Taner et al. (1979), Khan & Akhter (2015) e dGB (2021c).

Atributo	Descrição
Amplitude (envelope)	Representa a energia instantânea total do traço complexo e retrata informações relacionadas ao contraste de impedância. Indica possíveis acumulações de gás, limites de sequências, mudanças significativas no ambiente deposicional, correlação espacial de porosidade e outras variações litológicas.
Fase instantânea	Está relacionada à propagação da fase do front da onda sísmica, ressaltando a coerência e mudanças no mergulho de reflexões consecutivas. Além disso, enfatiza a continuidade das ocorrências, torna mais evidentes as feições coerentes fracas, é efetivo para realçar discontinuidades, falhas, <i>pinch-outs</i> , angularidades, interface entre camadas e feições com diferentes atitudes de mergulho.
Frequência instantânea	É a taxa de mudança da fase em função do tempo. Responde aos efeitos de propagação da onda e às características deposicionais, sendo empregada em correlações, para indicar acumulações de hidrocarbonetos e de zonas de fraturas.

### 2.3.2.8 Decomposição espectral (*spectral decomposition*)

A Decomposição espectral corresponde ao atributo que mostra as diferentes frequências que constituem o sinal sísmico, permitindo a visualização da fase e da amplitude sintonizada a comprimentos de onda específicos, sendo que a componente

de amplitude quantifica a variabilidade de espessura e ambas detectam descontinuidades laterais. Pode ser aplicada em interpretação sísmica de menor resolução, para estimar espessura de areias e destacar estruturas de canais (dGB 2021d).

No OpendTect há duas opções de transformações: FFT (*Fast Fourier Transform*) e CWT (*Continous Wavelet Transform*). A diferença entre as duas, em relação aos parâmetros de *input*, é que a FFT necessita de pequeno intervalo de tempo e tamanho do passo entre as frequências analisadas, já para calcular o CWT é preciso determinar o tipo de onduleta (*Morlet, Gaussian* ou *Mexican Hat*) (dGB 2021d). Na FFT o sinal que se encontra dentro da janela de tempo determinada é transformado no domínio da frequência, enquanto que na CTW a frequência final equivale a frequência central da onduleta, calculada pela soma sobre o sinal multiplicado pela onduleta dimensionada e deslocada (dGB 2021d).

No *software* utilizado é possível gerar várias combinações RBG feitas a partir das diferentes frequências geradas.

### 2.3.2.9 Energia (*energy*)

Este atributo mede a refletividade em intervalo de tempo específico, de forma que quanto maior a energia maior é a amplitude. Dentre suas várias utilizações, o atributo é útil para a detecção de objetos sísmicos, pois consegue destacar variações laterais, além de caracterizar propriedades acústicas das rochas e a espessura de camadas. Ele é calculado pela soma dos quadrados de valores amostrados no intervalo de tempo especificado dividido pelo número de amostras do intervalo (dGB 2021e).

### 2.3.2.10 Similaridade (*similarity*) e semelhança (*semblance*)

O atributo *similarity* estima a dissimilaridade entre os segmentos de traços, ou seja, ele expressa o quanto dois ou mais segmentos são similares (Brouwer & Huck 2011, dGB 2021f). Os valores de similaridade variam de 0 a 1, sendo que os mais próximos de 0 indicam maior dissimilaridade e os mais próximos a 1 indicam maior similaridade do dado (dGB 2021f). Além disso, é possível calcular a similaridade por diferentes direções e variações na combinação de traços, possibilitando a geração de

diversos *outputs* (Brouwer & Huck 2011). O atributo *semblance* retorna o coeficiente de semelhança, o qual é o valor da coerência multicanal, que varia de 0 (completamente diferente) a 1 (idêntico) (dGB 2021g), sendo que a coerência sísmica é a medida das variações laterais do dado, que podem ser causadas por mudanças estruturais, estratigráficas, litológicas, de porosidade e pela existência de hidrocarbonetos (Marfurt *et al.* 1998).

Para gerar ambos os atributos, é necessário definir alguns parâmetros, como extensão e direção (ou *steering*), de forma que diferentes *outputs* podem ser gerados. As opções de extensão são iguais para os dois atributos, o parâmetro *steering* possui cinco opções no atributo *similarity* (*none, central, full, constant direction* e *browser dip*) e quatro no atributo *semblance* (*none, central, full* e *constant direction*) (Quadro 2.3).

Quadro 2.3: Descrição dos parâmetros existentes nos atributos similaridade e semelhança (dGB 2021f,g,h).

Parâmetro		Descrição
Extensão	<i>None</i>	O <i>output</i> é calculado entre o par de traços definido no parâmetro “ <i>Trace position</i> ”.
	<i>Mirror 90 degrees</i>	O <i>output</i> é calculado utilizando dois pares de traços: o definido na opção “ <i>Trace position</i> ” e o obtido pela rotação de 90°.
	<i>Mirror 180 degrees</i>	O <i>output</i> é calculado utilizando dois pares de traços: o definido na opção “ <i>Trace position</i> ” e o obtido pela rotação de 180°.
	<i>Full block</i>	O <i>output</i> é calculado utilizando todos os pares de traços possíveis no retângulo definido pelo <i>step-out</i> ( <i>similarity</i> ) ou pela coluna definida pelo <i>time-gate/step-out</i> ( <i>semblance</i> ).
	<i>Cross</i>	O <i>output</i> é calculado utilizando todos os pares de traços possíveis na ‘+’-shape definida pelo <i>step-out</i> ( <i>similarity</i> ) ou pela coluna ‘+’-shaped limitada pelo <i>time-gate/step-out</i> ( <i>semblance</i> ).
	<i>Diagonal</i>	O <i>output</i> é calculado utilizando todos os pares de traços possíveis na ‘x’-shape definida pelo <i>step-out</i> ( <i>similarity</i> ) ou pela coluna ‘x’-shaped limitada pelo <i>time-gate/step-out</i> ( <i>semblance</i> ).
	<i>All directions</i>	O <i>output</i> é calculado utilizando todos os pares de traços possíveis na ‘ ’-shape definida pelo <i>step-out</i> ( <i>similarity</i> ) ou pela coluna ‘*’-shape limitada pelo <i>time-gate/step-out</i> ( <i>semblance</i> ).
Steering	<i>None</i>	Utilizada quando nenhum <i>SteeringCube</i> é aplicado. É mais útil para quando as camadas são mais horizontais.
	<i>Central</i>	Coleta os valores de <i>input</i> ao longo de um plano de mergulho.

	<i>Full</i>	Aplicada para quando a geologia é mais complexa. Os valores de <i>input</i> são coletados ao longo da superfície curva.
	<i>Constant direction</i>	A informação de direção é definida pelo usuário.
	<i>Browser dip (similarity)</i>	É um recurso de similaridade que atua como um atributo de coerência.

### 2.3.2.11 Curvatura (*curvature*)

A curvatura corresponde a propriedade bidimensional da curva e descreve para um ponto em particular da curva o quanto ele se encontra curvado, ou seja, a curvatura desse ponto é definida pela taxa de mudança de direção da curva (Roberts 2001). Ela pode assumir valores positivos, negativos ou nulos, definidos considerando a existência de vetores normais sobre a curva. Quando a curva é reta ou possui mergulho planar o valor da curvatura será zero, quando forma um antifome os vetores divergem e a curvatura é positiva e quando há um sinforme os vetores convergem e a curvatura é negativa (Fig. 2.8) (Roberts 2001).

Existem diferentes tipos de atributos de curvatura, os quais estão descritos no quadro 2.4. Os atributos de curvatura podem ser gerados tanto a partir do *Detailed Steering Cube* quanto do *Background Steering Cube*.

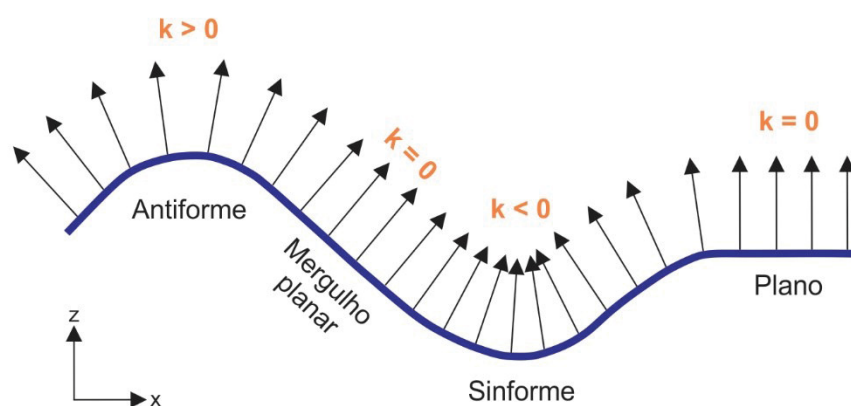


Fig. 2.8: Variação dos valores de curvatura ( $k$ ), de acordo com o posicionamento dos vetores normais à curva (modificado de Roberts 2001).

Quadro 2.4: Descrição dos atributos de curvatura de acordo com Roberts (2001).

Atributo	Descrição
<i>Maximum curvature</i>	Atributo eficaz para delimitar falhas e suas geometrias, pois aparecem como uma justaposição de valores positivos e negativos de curvatura. Também é possível identificar a orientação das falhas, valores positivos representam o bloco que se deslocou, relativamente, para cima e valores negativos representam o bloco que se deslocou pra baixo. Além disso, magnitude da falha também pode ser observada. Os lineamentos se diferem das falhas por serem retratados por cores isoladas.
<i>Minimum curvature</i>	Quando apresenta valores muito pequenos ou nulos indica que a superfície é lisa e com curvatura gaussiana zero. Quando possui valores amplos, indica os locais da superfície onde ela está potencialmente falhada ou fraturada.
<i>Mean curvatura</i>	Apresenta resultados muito parecidos com o <i>maximum curvature</i> e, por isso, não é muito útil.
<i>Gaussian curvature</i>	É o produto entre os atributos <i>maximum curvature</i> e <i>minimum curvature</i> . Em uma superfície dobrada seu valor se mantém constante a não ser que ela esteja fraturada, esticada ou espremida. Dessa forma, muitas superfícies não conseguem ser diferenciadas por esse atributo e é necessário completar as informações com os resultados do <i>mean curvature</i> , por exemplo.
<i>Most positive e most negative curvature</i>	Com a aplicação desses atributos é possível observar praticamente todos os lineamentos contidos na superfície, sendo que as falhas e os lineamentos apresam uma aparência poligonal. Nesse caso, a forma da informação não é preservada. Pode ser incorporada para a visualização 3D.
<i>Shape index</i>	Descreve a morfologia local de uma superfície. A escala de cores define a morfologia em termos de depressão, vale, plano, cume e domo. Como esse atributo não é afetado pela magnitude absoluta da curvatura (exceto as superfícies planares) falhas e lineamentos sutis podem ser destacados, assim como outros padrões de superfície.
<i>Dip curvature</i>	Definida quando se extrai a curvatura na direção de máximo mergulho. É a medida da taxa de mudança do mergulho na direção de máximo mergulho. Nesse atributo a magnitude a direção das falhas é preservado.
<i>Strike curvature</i>	Obtida quando se extrai a curvatura em uma direção perpendicular ao <i>dip curvature</i> . Separa a superfície em áreas com forma de vale e com formas de cumes.
<i>Contour curvature</i>	É visualmente parecido com o <i>strike curvature</i> , porém seus valores não são tão restringidos e, conseqüentemente, valores muito grandes ocorrem nas culminações de anticlinais, sinclinais, cumes e vales.
<i>Curvedness</i>	Fornece a medida geral do valor da curvatura total presente na superfície.

### 2.3.2.12 Fratura (*fracture*)

O atributo *Fracture* pode ser de dois tipos: *density* e *proximity*. O primeiro é utilizado para destacar áreas com alta densidade de fraturas, o segundo pontua os locais de maior atividade de fraturas utilizando raio de procura que pode ser definido de acordo com cada caso. Ambos utilizam como *input* o atributo de máxima curvatura (dGB 2021).

A principal diferença entre as variações do atributo está na forma como eles são computados. Enquanto o *density* computa a razão entre o número de traços classificados como sendo fraturas e número total de traços presentes em determinado raio de busca, a opção *proximity* apura a distância lateral da localização do traço classificado como fratura (dGB 2021i).

### 2.3.3 Variações dos atributos utilizados

Como explicado anteriormente, em alguns dos atributos é possível gerar diferentes *outputs* de acordo com a variação de determinados parâmetros, são eles: decomposição espectral, similaridade, semelhança, curvatura e fratura. Os quadros A0.1 a A0.5 do anexo 1 apresentam os nomes dados a cada um desses *outputs*, bem como as variáveis utilizadas para gerar cada um deles.

### **3 RESULTADOS – PARTE I: RAMPS AS TRIGGERS TO THE FORMATION OF MASS-TRANSPORT DEPOSITS FLOW CELLS AND TO DIFFERENTIATION IN BASAL INTERACTION: A CASE OF STUDY IN SANTOS BASIN, SE BRAZIL**

Vanessa da Silva Reis Assis<sup>a</sup>, Barbara Trzaskos<sup>a</sup>, Fernando Farias Vesely<sup>a</sup>, Victoria Valdez Buso<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19001, CEP 81531-980, Curitiba, PR, Brazil

#### **3.1 ABSTRACT**

Mass-transport deposits register several pieces of evidence about their formation. During the transport process, the flow can interact with the substrate, and it may change its characteristics, consequently, different structures are formed internally and in the basal surface according to the flow modification. In this study, 3D seismic data located in the northern Santos basin was used to investigate the basal interaction of a MTD, using seismic attributes, to understand the relations that exist between different MTD kinematic structures. On the basal surface, it was interpreted three basal structures (grooves, striation, and deformational feature) and ramps. Internally, it occurs, especially, large and small-size blocks, and normal and reverse faults. The distribution of all these structures indicates that there were changes in the flow behavior during the transport. Thus, we propose a model for the MTD formation, which considers the ramps generation as a trigger for the creation of second-order flow cells, and the responsibility for facilitating the substrate deformation and the availability of erosive blocks near the flow base.

#### **Highlights**

- The basal interaction between an MTD flow and the substrate can be variable in a deposit.
- The distribution of structures internally in the deposit and in the basal surface is related to second-order flow cells.
- Ramps in the MTD basal surface are capable of changing the flow rheology and, consequently, it is generated second-order flow cells.
- The creation of deformation structures on the surface above the flow is also connected to the presence of ramps.

**Key words:** MTD, 3D seismic, seismic attribute, substrate deformation, substrate erosion

### 3.2 INTRODUCTION

Mass-transport deposits (MTDs) are the result of different mass movements, such as slides, slumps, and debris flows (Nardin *et al.* 1979). Mass movements have a significant role in mobilization, transport, and deposition mechanisms, and in marine slopes and canyons, they are the principal transport process (Nardin *et al.* 1979). Studies show that this kind of movement may not occur in a single cell, but the flow characteristics can change and form different second-order flow cells (Alsop & Marco 2014). Apart from their importance in sedimentological, stratigraphical, and structural analyses (Martinsen 1994), the MTDs have huge relevance in petroleum exploration, as they can act as hydrocarbon reservoirs, seals, or paleobathymetric boundaries to reservoir deposits (Amerman 2009).

The study of basal interaction is especially important to petroleum exploration, as the substrate remobilization and incorporation into the flow can increase permeability and, consequently, affect the MTD seal capacity (Omeru 2014). Different works have recognized structures of basal interactions in seismic (e.g. Bull *et al.* 2009, Nugraha *et al.* 2022, Moscardelli *et al.* 2006, Omeru & Cartwright 2019, Omosayana & Alves 2013) and outcrops analyses (e.g. Alves & Lourenço 2010, Butler & Tavarnelli 2006, Dakin *et al.* 2013, Ogata *et al.* 2012, Sobiesiak *et al.* 2016, Cardona *et al.* 2020). Bull *et al.* (2009) present the main MTD kinematics indicators that can be described in seismic data and Sobiesiak *et al.* (2018) proposed a classification for styles of basal interaction beneath submarine mass movements using outcrops as the principal source of data. Kumar *et al.* (2021) used the same classification to study the basal interaction in MTDs at seismic data and showed that it is possible to apply it on different scales (outcrops and seismic).

However, there are not many studies that relate basal interaction with other kinematic indicators and the presence of second-order flow cells (e.g. Nugraha *et al.* 2020), which can be important to understand the process that happens during mass movement. Thus, this work aims to analyze an individual MTD with a three-dimensional (3D) seismic data in the northern Santos basin (offshore Southeast Brazil) to understand the process of formation of basal interaction structures and identify the

possible relations between these structures with other kinematic indicators and the presence of second-order flow cells.

### 3.3 METHODS

In order to investigate the basal interaction of the MTD, we used a 3D seismic-reflection post-stack data (seismic survey BS-500) located 140 km far from the city of Rio de Janeiro and covering an area of 1.051,46 km<sup>2</sup> in northern Santos basin, offshore Southeast Brazil (Fig. 3.1). Although there are other MTDs in the seismic volume, it was chosen for this study an MTD which belongs to the Marambaia formation and is buried at relatively shallow depths (1200 to 2360 ms).

We mapped two horizons: the basal and upper surfaces of the MTD, whereas both MTD surfaces were mapped at high resolution (all in-lines and every two cross-lines). The features analyzed to characterize the MTD were based on Le Bouteiller *et al.* (2019) criteria for seismic interpretation of MTDs and it considers different properties of the deposit, such as morphology, basal surface, upper surface, position, headscarp, and internal facies distributions. When possible, we employed seismic attributes to support the interpretation of the MTD characteristics, including (i) isochrones, to measure the time between seismic events (Oilfield Glossary 2021); (ii) dip, to indicate the geological dip of the surface and the azimuth of the dip direction (dGB 2021a); (iii) curvature, to better interpret the surfaces morphology, as the presence of faults, fractures or lineaments (Roberts 2001); (iv) fracture, to highlight regions with high density of fractures and more fracture activity (dGB 2021i); (v) dip-steered median filter (DSMF), to remove random noise and highlight laterally continuous events (Qayyum & de Groot 2012); (vi) root-mean-square (RMS) amplitude, to emphasize high amplitudes (Nanda 2016) (vii) thinned fault likelihood (TFL), to draw faults and fractures in an area of interest (dGB 2021b); (viii) instantaneous, to present acoustic impedance contrast information, highlight discontinuities, and as a correlation tool (dGB 2021c, Taner *et al.* 1979); (ix) spectral decomposition, to enhance the visualization of stratigraphic structures (dGB 2021d) (x) energy, to stand out lateral variations and identify seismic objects (dGB 2021e); and (xi) similarity, and semblance, which indicates, respectively, how two or more trace segments look alike (dGB 2021f) and how a trace is similar to a group of traces in a window (dGB 2021g). They were chosen considering the attributes used in the literature for MTD interpretation and a literature review on the different types of attributes.

After making an overall description of the deposit, we made a correlation between the types of interaction with the substrate and other features of the studied MTD.

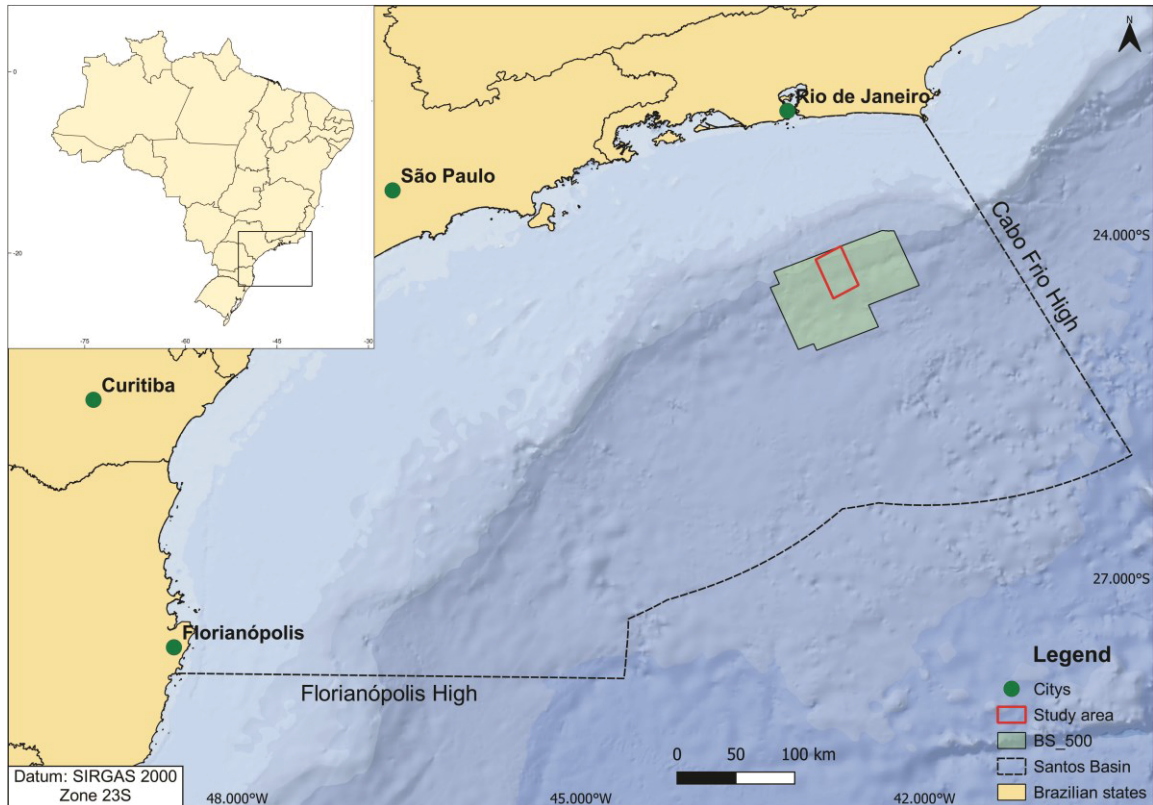


Fig. 3.1: Study area location in northern Santos basin (based on GeoANP (2021) and NERUS (2021) data).

### 3.4 RESULTS

#### 3.4.1 MTD general characterization

Table 3.1 and fig. 3.2a presents MTD general characteristics. It is important to notice that the deposit extends beyond the study area to NW and NE, as the MTD headscarp was not in the seismic volume, so it was not possible to interpret that property as well as determine the runout distance. The principal flow direction is towards SE, and in the distal region, there are several “tongues”, which makes the end of the toe domain uneven. There are no upward or lateral connections with other deposits or turbidites on the top of the studied deposit.

The deposit thickness is variable (Table 3.1, Fig. 3.2b) with its maximum thickness occurring in the distal region. The deposit volume was calculated considering the average speed of P waves propagation in sandstones (2.000 to 6.000 m/s,

according to Kearey *et al.* 2002). Fig. 3.3 presents some of the numerous faults that occur around the MTD, especially near the basal surface (BS).

The MTD upper surface (US) has a principal dip to SE, except in the distal region where it dips to NW (Fig. 3.4b). The small deep variations on that surface are controlled by some ramps, as shown in Fig. 3.4c, they are perpendicular and parallel to translation, with dip for and against it, and there is also one ridge in the distal region.

Table 3.1: MTD general data.

Properties	Descriptors	Characteristics
Morphology	Surface area	444.24 km <sup>2</sup>
	Wide	7363 to 17233 m
	Maximum horizontal length	32169 m
	Horizontal aspect ratio (ratio between the maximum length and the principal width)	1.8667
	Thickness	16.41 to 126.87 ms, with a prevalence of values lower than 71.64 ms
	Volume	6.37 to 19.12 km <sup>3</sup>
Basal surface (BS)	BS median slope (Fig. 3.8a)	7.81 to 91.78 $\mu$ s/m, with a prevalence of values lower than 50 $\mu$ s/m
Upper surface (US)	US median slope (Fig 3.4a)	5 to 60.88 $\mu$ s/m, with a prevalence of values lower than 33 $\mu$ s/m
Internal facies distributions	Preserved blocks size	0.55 to 3.08 km <sup>2</sup>

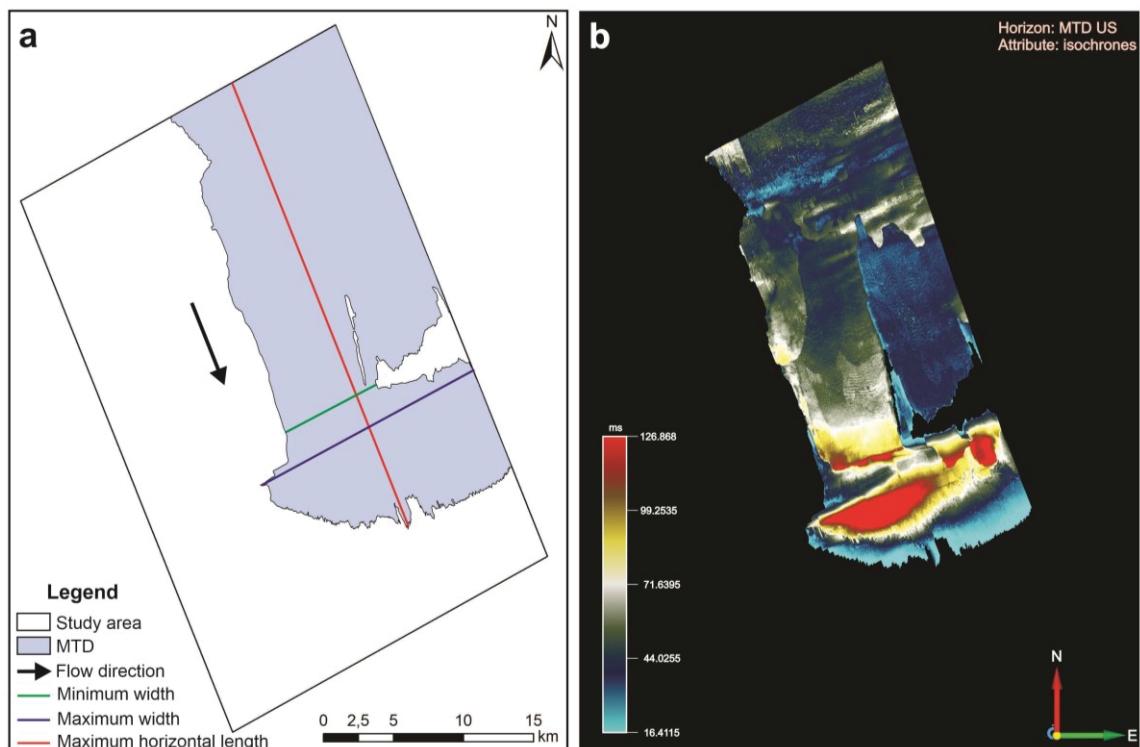


Fig. 3.2: a) Indication of flow direction, width variation and maximum horizontal length in studied MTD; b) MTD thickness given by isochrones.

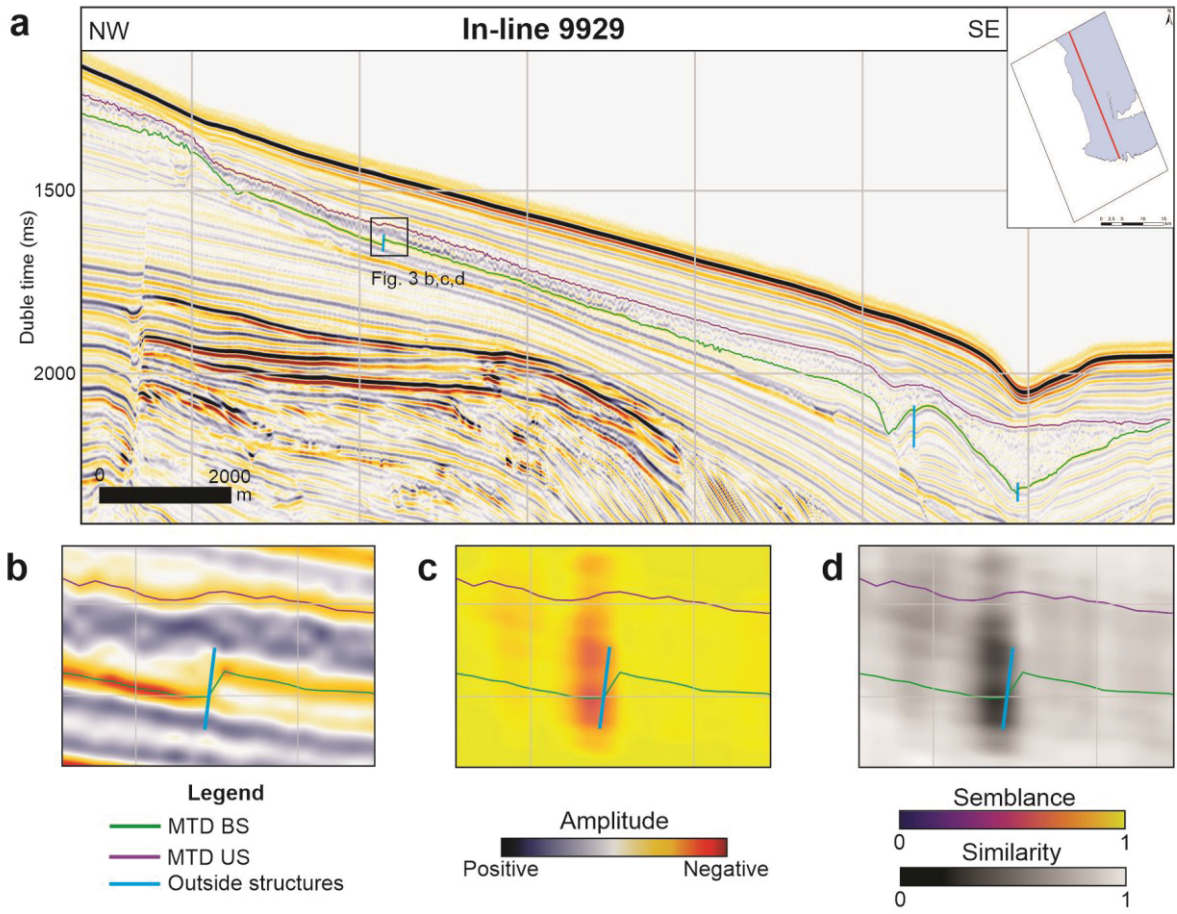


Fig. 3.3: a) MTD outside structures (in-line 9929); One of the faults analyzed in the same in-line in the original data (b) and with semblance (c) and similarity (d) attributes.

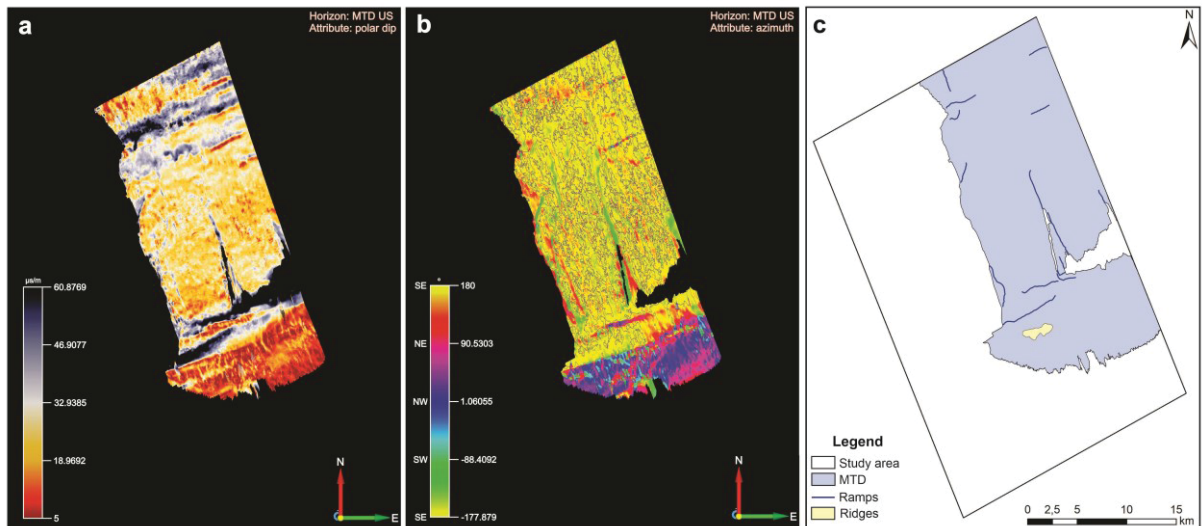


Fig. 3.4: a) MTD US with polar dip attribute; b) MTD US with azimuth attribute; c) Distribution of ramps and ridges in US.

Internally, it was detected four large-size blocks, or megaclasts, (Table 3.1 and fig. 3.7b) and many small blocks, which are, several times, imbricated and associated with normal faults. The small blocks are distributed throughout MTD, except in the distal region, where there was probably a larger mixture of sediments and they were not preserved. Internally, folds and both normal and reverse faults take place in all regions, and some boudins occur occasionally (Fig. 3.5). Fig. 3.6 presents the distribution of the MTD internal faults. Observing the z-slices in a flattened volume on the basal surface is visible that the internal deformation varies laterally, as flow fabrics were just identified in some regions (Fig. 3.7a).

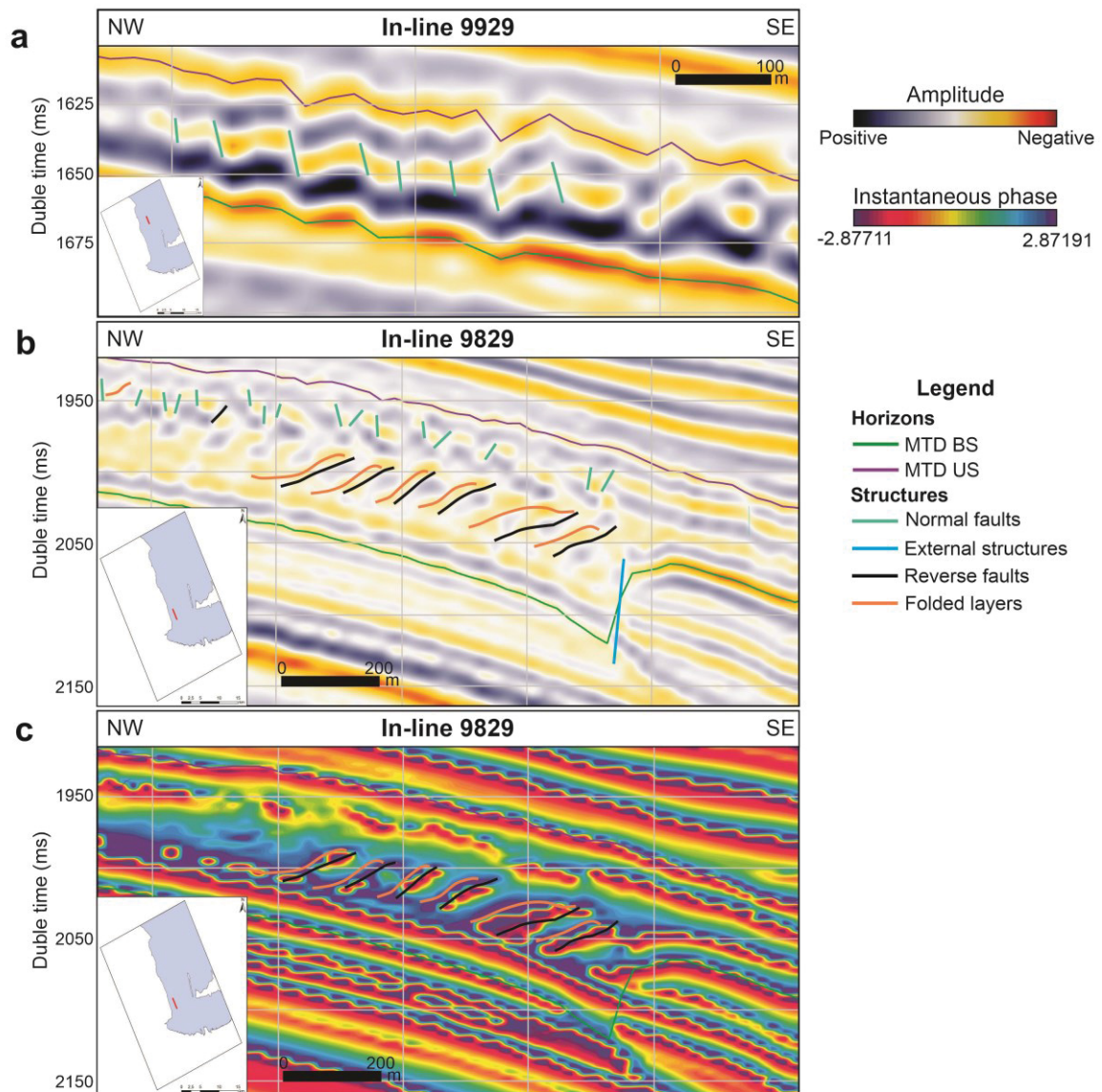


Fig. 3.5: Internal structures interpreted in the deposits: a) Normal faults associated to imbricated blocks; b) Normal and reverse faults, with fold associated to faults; c) Reverse faults interpretation with instantaneous phase attribute.

According to the characteristics of the original data and other three seismic attributes (DSMF, instantaneous phase, fracture proximity 2), it was possible to define six seismic facies in the MTD (Boards 3.1 and 3.2 - appendices) and then create a map of facies distribution (Fig. 3.7b). Facies F1 occur in the proximal region, F2, F3, F4, and F5 are distributed in the central, and F6 extends from the central portion to all distal region. Apart from this, it is possible to subdivide the central region into three parts: in the first (proximal) occurs F2, F3, F4 and F5; in the second there is a prevalence of F3, but also occurs F4, F5 and F6; and in the third (distal) F6 occur at the left side while F5 occurs at the right side.

The instantaneous amplitude attribute was applied in MTD volume to define the compositional heterogeneity of the deposit. According to the values in the color scale, was established four levels of amplitude: very low, low, intermediate and high, and then it was created a map of lithological variation for each deposit (Fig. 3.7c). In the proximal region, there is a prevalence of the low level, while the distal region is the only one where occurs the very low level. Besides this, in the central region occurs low, intermediate, and high levels.

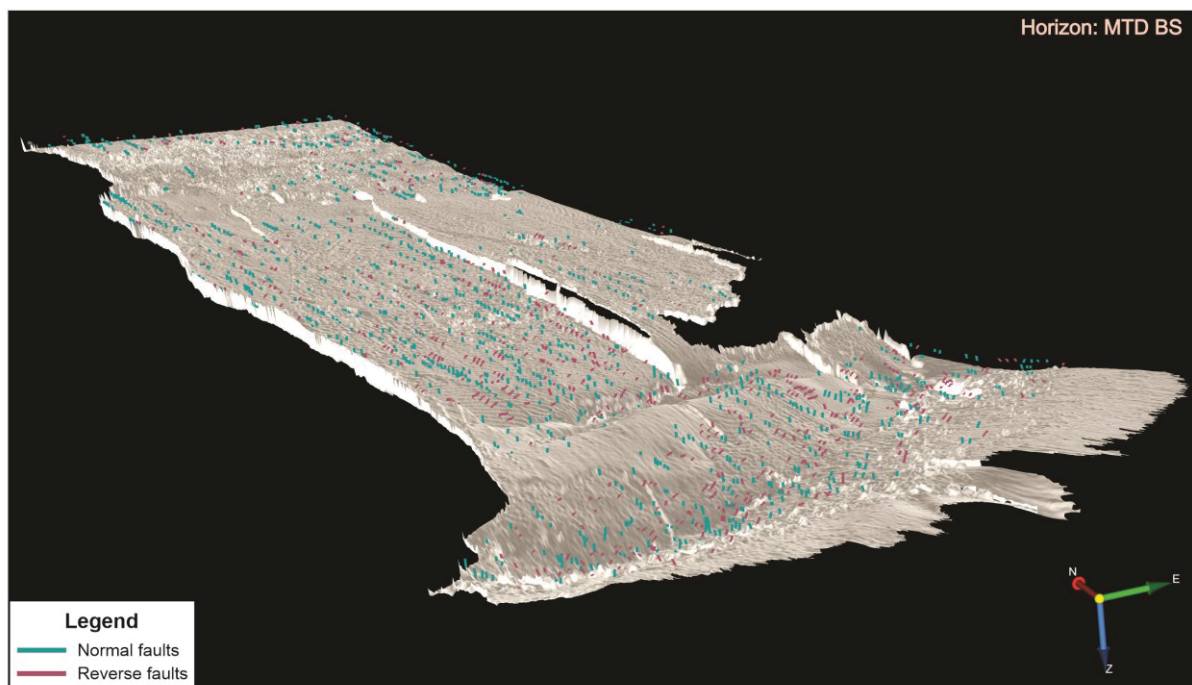


Fig. 3.6: Internal distribution of normal and reverse faults in the MTD.

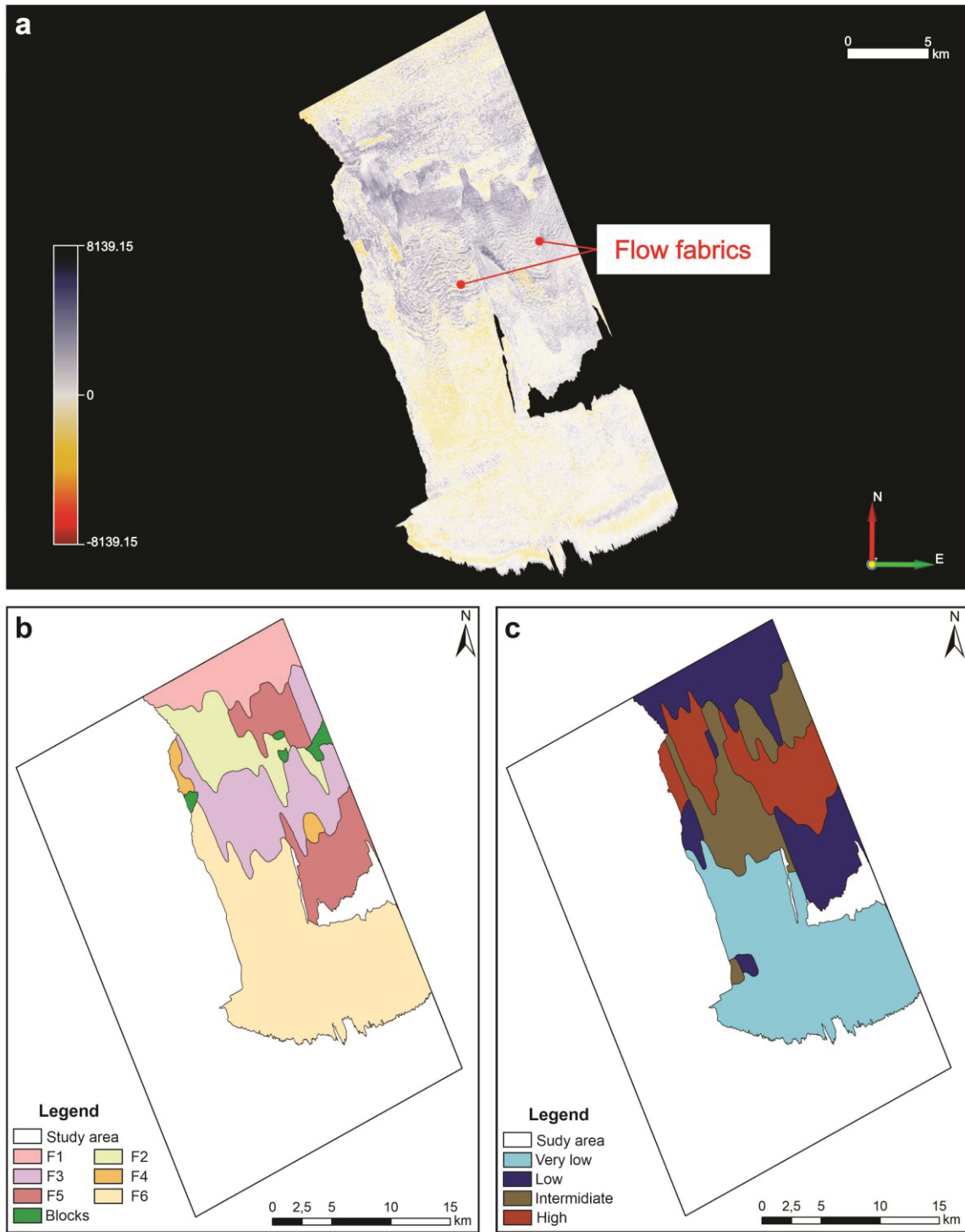


Fig. 3.7: a) Z-slice (-20 ms in a flattened volume on the basal surface) showing the flow fabrics variation internally; b) Seismic facies distribution in the MTD; c) Compositional heterogeneity distribution in the MTD.

### 3.4.2 MTD BS

The MTD BS is mostly inclined downslope, the exception occurs in the toe domain, where the deposit sediments filled a preexisting depression, probably created

by bottom-currents erosion. The BS has a slope between 7.81 and 91.78  $\mu\text{s}/\text{m}$ , with a prevalence of values lower than 50  $\mu\text{s}/\text{m}$  (Fig. 3.8a). It also has a principal dip to SE, except in the distal region where it dips to NW (Fig. 3.8b).

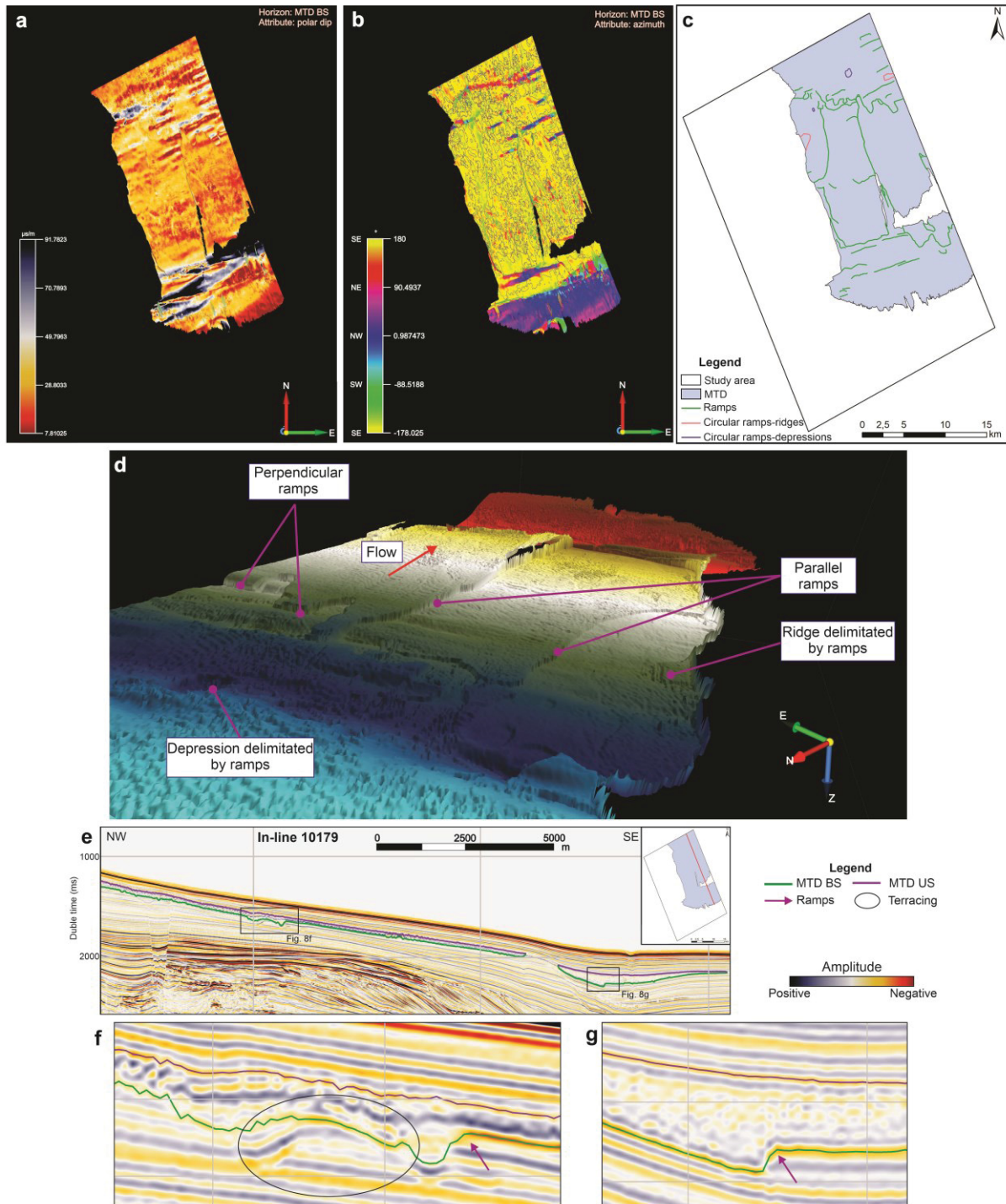


Fig. 3.8: a) MTD BS with polar dip attribute; b) MTD BS with azimuth attribute; c) Distribution of ramps in the BS; d) 3D view of some ramps in the BS; e, f, g) Examples of terracing and ramps in the deposit.

Figs. 3.8c and 3.8d present the distribution of the ramps on this surface and a 3D view of some of them. They are perpendicular and parallel to translation, some of them are connected, and they have a dip for and against the flow direction. There are also depressions and ridges delimited by the ramps. Besides, the BS has multiple terracing associated with remaining blocks, which can be correlated to some ramps (Fig. 3.8 e,f).

It was observed thrust faults in the cross-lines and associated features in the z-slices associated with the lateral erosive wall and some lateral ramps (Fig. 3.9). The BS reflector has a negative polarity and intermediate amplitude.

In the BS it was observed two types of erosive structures: grooves (sensu Bull *et al.* 2009, Sobiesiak *et al.* 2018) and one striation (sensu Gee *et al.* 2005, 2006), and a deformational structure. Fig. 3.10 presents the distribution of these features and a 3D view of each of them. The grooves occur in different regions and are sub-parallel to the flow direction, except where they go around the blocks. The striation has flat-bottomed and is located in the distal region. The deformational structure is wavy and perpendicular or oblique to the flow direction. It occurs in all zones, but it is concentrated in the translational domain.

It is important to remark that the deformation is also present in the substrate, as in z-slices above the basal surface (in a flattened volume on the basal surface) it is possible to observe similar features to the internal flow fabrics (Fig. 3.11).

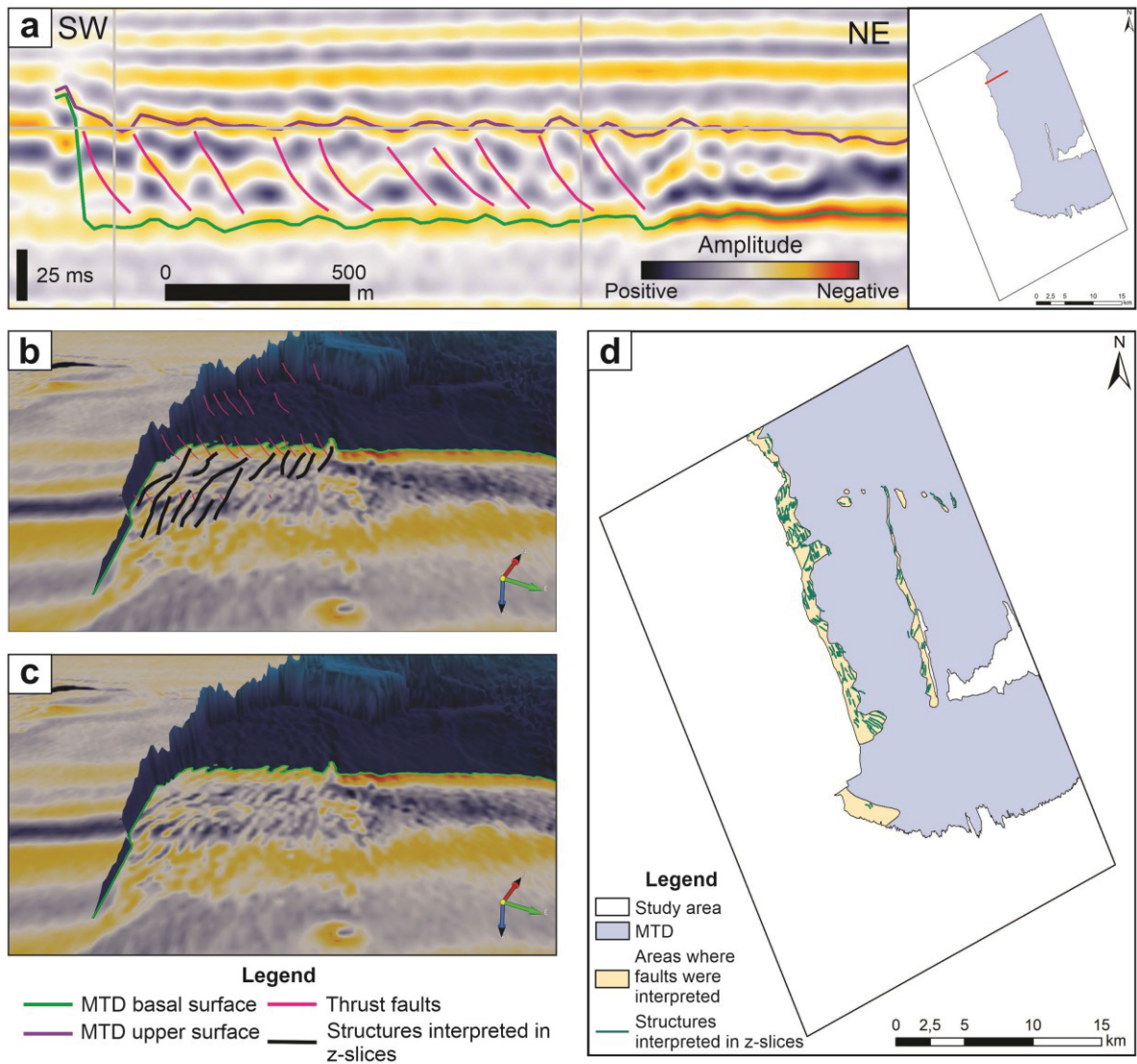


Fig. 3.9: a) Thrust faults associated to the lateral walls, observed in the cross-lines; b) related features associated to the thrust faults in z-slice 1540; c) z-slice 1540; d) Relation between the zones where were interpreted the thrust faults and the features

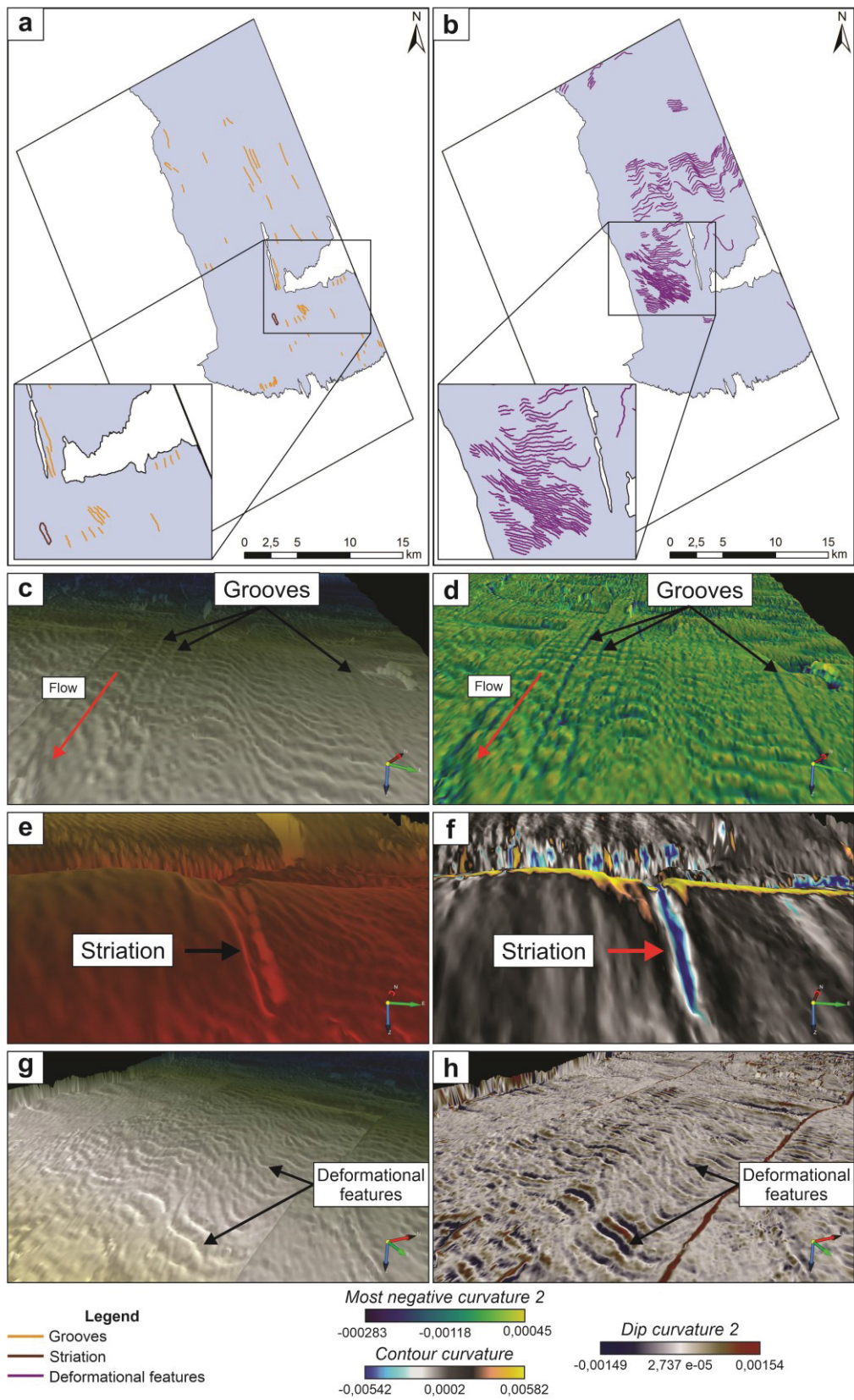


Fig. 3.10: Distribution of erosive (a) and deformational (b) features in MTD A basal surface; c) 3D view of grooves; d) 3D view of grooves with most negative curvature 2 attribute; e) 3D view of the striation; f) 3D view of the striation with contour curvature att

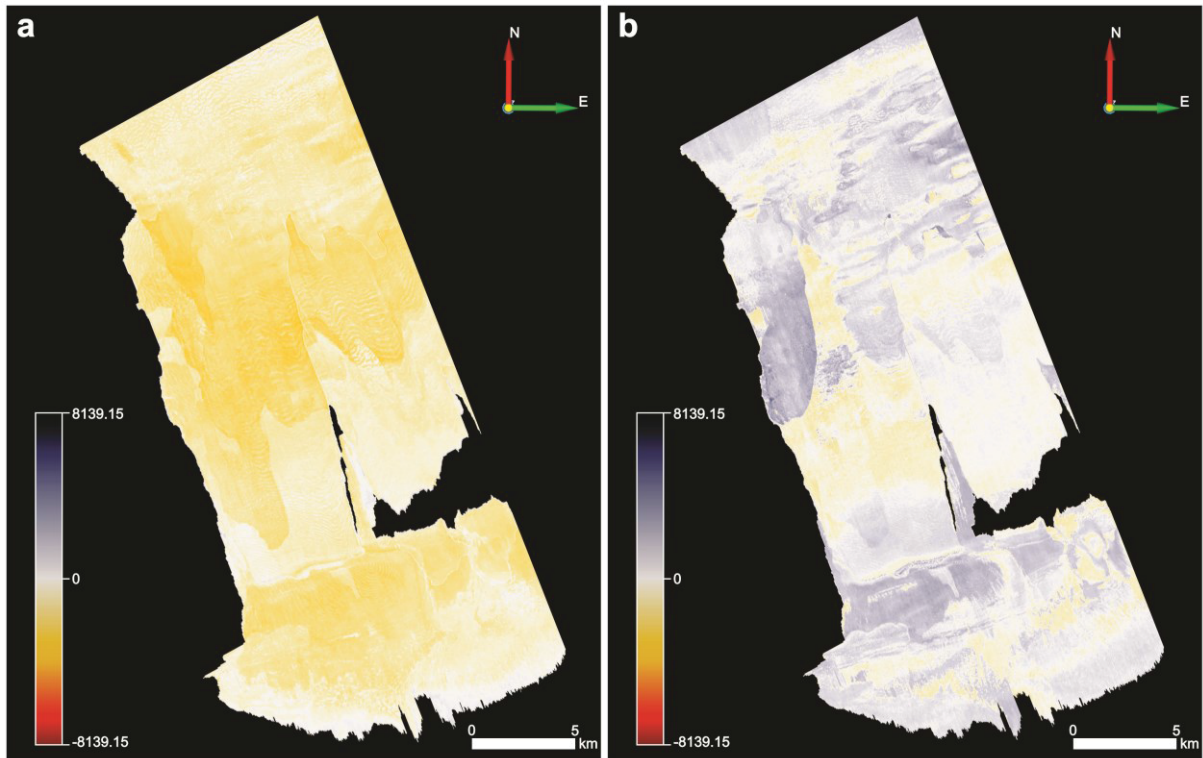


Fig. 3.11: Z-slices 4 ms (a) and 12 ms (b) in a flattened volume on the basal surface showing substrate deformation.

### 3.4.3 Use of seismic attributes

The seismic attributes used for the interpretation of the features are described in Table 3.2. It is important to remark that in the BS ramps and erosive or deformational features, different attributes highlight the deposit characteristics, but it is not necessary to combine all these attributes to interpret them. Concerning the structure distribution inside the MTD, most of them were interpreted with the original data, but some were highlighted by the attributes, such as reverse faults with instantaneous phase attribute.

Table 3.2: Seismic attributes used in the interpretation of each MTD descriptor.

Properties	Descriptors	Attributes used in the MTD
Morphology	Thickness variation	Isochrones
	Average thickness	Isochrones
	BS median slope	Polar dip; azimuth
	BS Ramps	maximum curvature; maximum curvature 2; most positive curvature; most positive curvature 2; gaussian curvature 2; strike curvature; strike curvature 2; contour curvature; contour curvature 2; curvedness 2; spectral decomposition, semblance 1 + maximum curvature (50% of transparency); similarity 1
Basal surface (BS)		<b>Groove:</b> polar dip, most negative curvature 2, shape index 2 e strike curvature 2;
	Erosive or deformational features	<b>Striation:</b> contour curvature, curvedness, strike curvature, strike curvature 2, most negative curvature, most positive curvature 2, dip curvature 2, shape index 2, maximum curvature 2, semblance 1, similarity 1; <b>Deformational features:</b> polar dip; dip curvature
	Lateral erosive walls	Similarity 1; semblance 2 [just in z-slice interpretation]
	BS strong amplitude	RMS amplitude
Upper surface (US)	US median slope	Polar dip; azimuth
	US ramps or ridges	Spectral decomposition
	Near structural elements laterally	DSMF; similarity 1; semblance 2; TFL; instantaneous amplitude
	Presence of preserved blocks and preserved blocks size	Energy; RMS amplitude
Internal facies distributions	Facies distribution	Original data; DSMF; instantaneous phase; fracture proximity 2
	Structures distribution	DSMF; similarity (1 and 2); semblance (1 and 2); instantaneous (amplitude, phase and frequency)
	Lithology distribution	Instantaneous amplitude

The curvature attributes without a number were created with the Background Steering Cube, while the ones with the number 2 used the Detailed Steering Cube as input. Fracture proximity 2 was created with the maximum curvature attribute that used the Detailed Steering Cube as input. The inputs for the semblance and similarity attributes were: semblance 1 (extension: diagonal; steering: full); semblance 2 (extension: cross; steering: full); similarity 1 (extension: cross; steering: full); similarity 2 (extension: mirror 180 degrees; steering: central).

### 3.5 DISCUSSIONS

Previous seismic and outcrops studies reported many features as a result of the interaction between the flow and the substrate (e.g., Alves & Gamboa 2019, Bull *et al.* 2009, Bull *et al.* 2019, Gee *et al.* 2006, Jackson 2011, Kumar *et al.* 2021, Liang *et al.* 2021, Nwoko *et al.* 2020, Sobiesiak *et al.* 2016, 2018, Wang *et al.* 2014). However, the relation between the mechanisms of formation of these structures and other MTD characteristics are poorly documented. In this study, we analyzed a MTD using 3D

seismic data to understand how the flow interacts with the substrate and how different features resulting from this interaction are distributed. Our results show that there are three different features in the basal surface: grooves, striation, and deformational structures. According to Sobiesiak *et al.* (2018), these three structures are shaped when there is significant interaction with the sea floor, in a style called no-slip flows. Furthermore, in the regions where there is substrate deformation, the deformed strata are just beneath the deposit, which is considered by the authors as continuous no-slip deformation.

As there is a spatial variation of each feature throughout the surface, it was possible to delimit four different zones, considering which process (erosion or deformation) prevails in each of them: (I) basal erosion prevalence, (II) substrate deformation prevalence, (III) both process occurs proportionally, and (IV) it was not possible to determine the dominant process. Fig. 3.12b presents a map with the distribution of the zones, IV is in the proximal domain, where the structures occur punctually and the surface is too irregular, in the translational domain, there are zones I, II, and III, and in the toe domain just zone I occurs. It is important to remark that the zones are commonly separated by ramps.

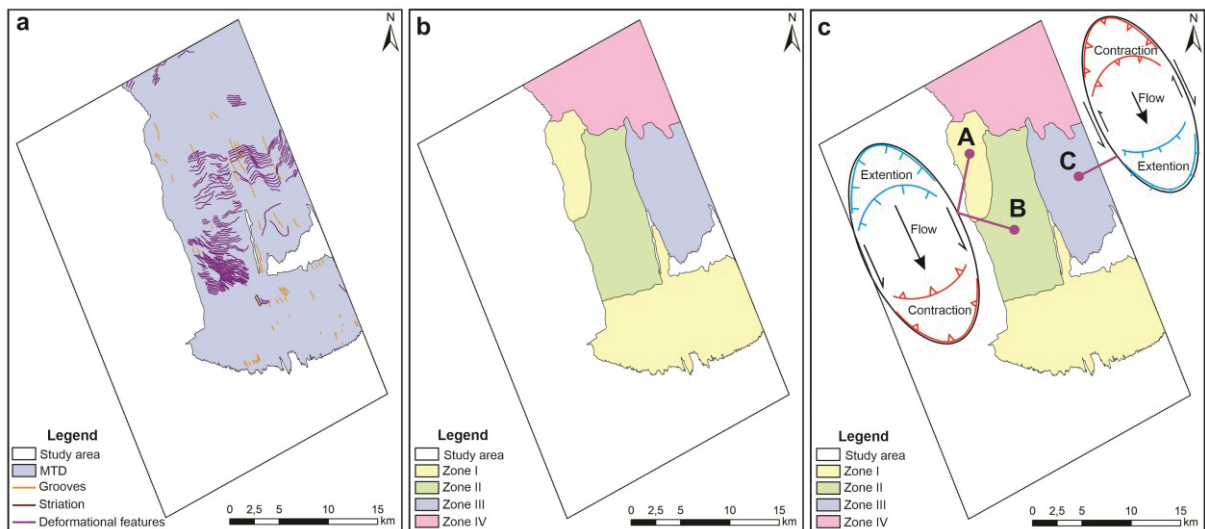


Fig. 3.12: a) Distribution of erosive and deformational structures in the MTD basal surface; b) Zones of basal interaction in the studied MTD; c) Second-order flow cells localization in the MTD.

The existence of an internal fabric variation could be related to a topographic or basal shear surface texture differentiation and changes in the velocity gradient in the flow (Bull *et al.* 2009, Masson *et al.* 1993). In the studied deposit it was identified a concave banding forming a flow fabric in zones II and III, at II it is upslope and at III is

downslope. Bull *et al.* (2019) verified a concave-downslope banding in just one zone of an MTD deposit. They linked the lateral deformation in the same deposit to different factors, such as transformation from a single to multiple flows, paleo-topography, local velocity variation and/or multiple phases of movement, depositional heterogeneity.

Evidence of a relation between the basal and internal structures happens in zones I (translational), II, and III. Zone III is where happens the least number of internal structures, also this region reverse faults are concentrated in the trailing edge while in the leading edge prevail normal faults (Fig. 3.6). Whereas, at zones I and II normal faults prevail in the trailing edge while there are more reverse faults in the leading edge, moreover, part of zone II, where it covers facies F6, the normal faults associated to imbricated blocks seams to influence the formation of deformational structures (Fig. 3.13a).

As suggested by Alsop & Marco (2014), a large slump (first-order) is composed of smaller flow cells (second-order), which are developed during the translation and may associate with an increase or a decrease in velocity compared to background (Alsop & Holdsworth 2002, 2007). Evidence of the existence of, at least, three second-order cells in the studied MTD is supported by the presence of the variation of internal fabrics and structures throughout the deposit (Fig. 3.12c).

The first flow cell (A) is located in zone I in the translational domain, the distribution of faults indicates that there is an extension in the trailing edge and contraction in the leading edge, thus, compared to the background velocity, the flow velocity increased in the flow head and then decreased in its toe, which corresponds to a surging flow cell. The same happens in the second one (B), located in zone II, where the arrangement of internal structures and the concave upslope banding also indicate a surging flow cell. In contrast, in the third one (C), located in zone III, the features indicate that there is a contraction in the trailing edge and extension in the leading edge, thus, compared to the background velocity, the flow velocity decreased in the flow head and the increased in its toe, which represents a slackening flow cell.

Previous studies have found that megaclasts could affect the flow rheology in MTCs (e.g. Frey-Martínez *et al.* 2006, Hodgson *et al.* 2018, Joanne *et al.* 2013, Nugraha *et al.* 2020, Ortiz-Karpf *et al.* 2017). Frey-Martínez *et al.* (2006) reported a bifurcation of a single MTC in two flows with different directions due to in-situ megaclasts. Similarly, megaclasts were responsible for inducing velocities perturbations in an MTC, changing the flow rheology, and inducing the creation and

cessation of flow cells (Nugraha *et al.* 2020). In the studied MTD, only one of the four megaclasts is autochthonous, which is located in zone I (translational domain). The other three, set before zone III, are allochthonous and could be responsible for decreasing the velocity in this region.

The ramps may also have an important role in the formation of the second-order flow cells and, consequently, in the differentiation of the flow basal interaction. The mechanisms of formation of ramps are not clearly established, although as the basal shear surface corresponds to a weak layer, this implied that a ramp changes the surface to a new stratigraphical level if the new substrate is also capable to accommodate slip and translation (Bull *et al.* 2009). Different studies propose an explanation of the generation of ramps at the basal surface, considering the characteristics of each studied deposit. It could be related to the flow preference to slid over zones with high shear (Rupke 1967) or to pre-existing weaknesses (Strachan 2002). Whereas, according to Frey-Martínez *et al.* (2005), their origin is connected to a modification in the slumped material mechanical properties, the basal shear surface or even a combination of both elements. In their work in Espírito Santo basin, Omosanya & Alves (2013) detected that the basal surface ramps in MTDs were developed by mechanical erosion of incompetent beds or related to pre-existing faults scarps.

We propose an evolution model for the formation of the flow cells in the studied MTD with four main processes. First, the sediments were transported in a single flow (zone IV). Secondly, due to a fault located in the SW region (Fig. 3.13b), a down-cutting ramp was formed and, consequently, there was an increase in the flow velocity compared to the background and a small flow cell (A) was created. At the same time, up-stepping ramps were built in the boundary between zone IV and zones II and III and then on the edge between zone I (translational domain) and zone II, as there is continuity in the ramp that borders zone II. The difference between them is that the frontal ramps before zone III are slightly bigger. It is not clear what caused the origin of these features, however, they disturbed the flow creating a new flow cell. However, as a consequence of the presence of three megaclasts in the zone IV NE region, there was a decrease in the flow velocity, producing a slackening flow cell (C) and the sediments which were out of the influence of the megaclasts formed a surging flow cell (B), which maintained the first order flow cell characteristic. Finally, the sediments filled the pre-existing depression in the toe domain.

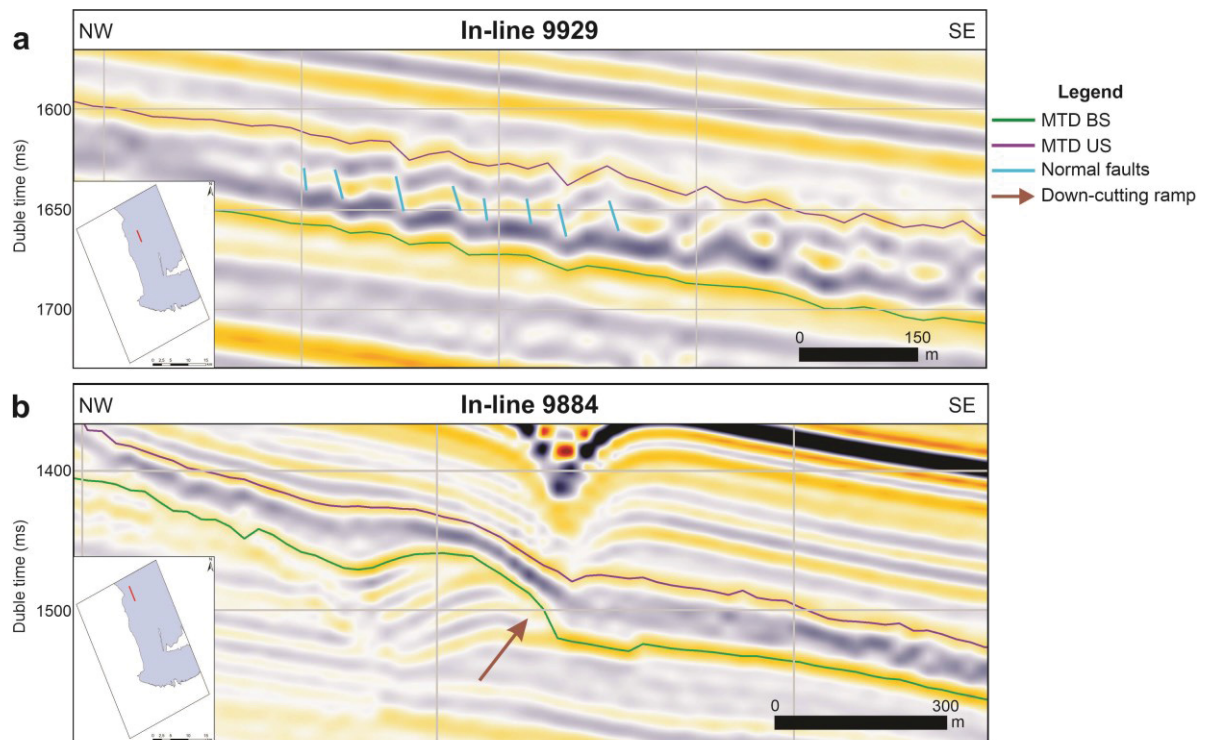


Fig. 3.13: a) In-line 9929 showing the relation between the normal faults related to imbricated blocks and the basal deformation structure; b) In-line 9884, with the arrow pointing to the down-cutting ramp, which was formed due to a pre-existing fault.

It is also important to understand the distribution of the features, which indicate basal interaction. Grooves, also known as tool marks, are formed when the substrate is fractionated or dragged by rigged blocks, or even on a small scale by gravels, that are contained in the base of the flow (Dakin *et al.* 2013, Sobiesiak *et al.* 2018). This type of erosion continues to happen while the tool is not carried into the flow or it is disaggregated as a result of the erosion process (Posamentier & Martinsen 2011).

The basal deformation occurs due to stress penetration into the substrate, consequently, the strain front is not situated in the same position as the base of the mass flow and a basal shear zone is created, the zone thickness varies according to the material properties of the substrate and the basal shear stress (Sobiesiak *et al.* 2018). Alves & Lourenço (2010) identified that basal deformation can occur in specific regions due to changes in the rheological properties. Besides, other factors can influence variations in the deformed strata, such as: if the substrate is formed by other flow deposits or not, variations in the substrate strength, flow relative density and/or thickness, type of flow and if it is confined or not (Alves & Lourenço 2010). Moreover, deformation in the basal shear surface can be associated with local (paleo) stresses

(Omosanya & Alves 2013). According to Sobiesiak *et al.* (2018), local variations in this surface geometry, such as the presence of ramps and flats, are usually the cause of the origin of deformational structures.

Thus, the distribution of interaction structures in the studied MTD can be related to the ramps and, consequently, to the generation of the second-order flow cells. In zone I, flow cell A was created due to a down-cutting ramp, the increase of velocity in this region promoted the dragging of the basal surface by rigged blocks. The absence of many erosional structures in zones II and IV could be explained by the remobilization of the blocks internally in the flow. In contrast, the ramps that border zones II and III are frontal, their origin is not clear, but probably there was a change in the substrate rheology that originates the ramps and, consequently, flow cells B and C, and that facilitates the stress penetration into the substrate, creating the deformational structures.

One limitation of our study is that the seismic survey does not cover the entire MTD. Thus, it is not possible to know how is the distribution of these features in other regions and, consequently, to understand the process of basal interaction in this deposit entirely.

### 3.6 CONCLUSIONS

The study of an MTD in 3D seismic data in the northern Santos basin showed that the formation of ramps is related to the creation of second-order flow cells and the variability in basal interaction. Even without knowing the reasons for the ramps' formation, the analyses allowed us to understand the processes that connected each of these features.

i. The generation of the ramps in the MTD basal surface was capable of changing the flow rheology. As a result, second-order flow cells were produced and different structure arrangements were formed internally due to the characteristics of the cells.

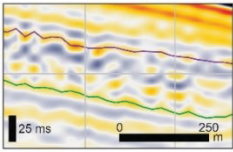
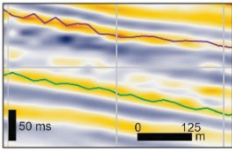
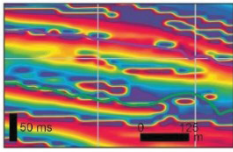
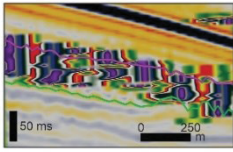
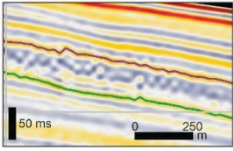
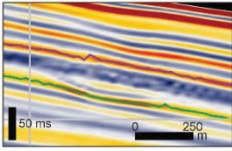
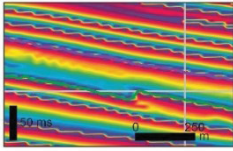
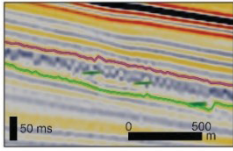
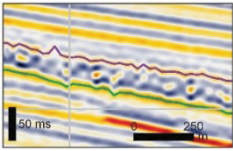
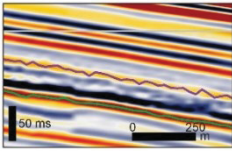
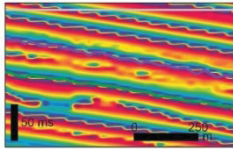
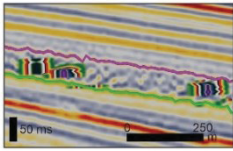
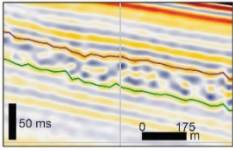
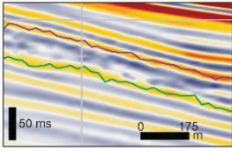
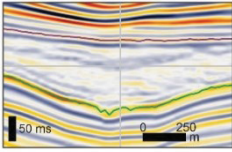
ii. They are also responsible for facilitating stress penetration into the substrate, which facilitates the formation of deformation structures on the surface above the flow.

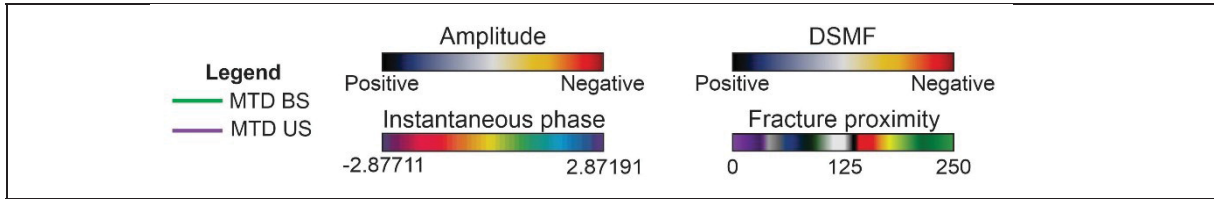
iii. The presence of erosive structures (grooves and striation) is connected to the availability of rigged blocks at the base of the flow. Thus, as the presence of

ramps can affect the flow properties, they can also be responsible for changing the blocks' position in the flow, leaving them or not in its base.

### 3.7 APPENDICES

Board 3.1: Representative characteristics observed to describe the seismic facies.

	Original data	DSMF	Instantaneous phase	Fracture proximity 2
<b>A</b>	<p>Lower amplitudes</p> 	<p>Predominance of negative reflectors</p> 	<p>Discontinuities are highlighted in the central section of the MTD</p> 	<p>Large concentration of fracture indicators</p> 
<b>B</b>	<p>Negative reflectors occurs punctually</p> 	<p>Positive solid fill</p> 	<p>Any discontinuity is highlighted</p> 	<p>Fracture indicators occurs punctually</p> 
<b>C</b>	<p>High amplitude positive reflector, with fragments of little negative reflectors</p> 	<p>Positive solid fill, with some fragments of negative reflector</p> 	<p>Discontinuities are highlighted next to the MTD upper surface, sometimes in touch with it</p> 	<p>There are some fracture indicators</p> 
<b>D</b>	<p>Predominance of low amplitude positive reflector. There are some negative reflectors, usually small, but sometimes continuous</p> 	<p>Positive solid fill, with intermediate amplitude</p> 	-	-
<b>E</b>	-	<p>Predominance of negative reflectors, with lower amplitudes</p> 	-	-



Board 3.2: Characteristics observed in each of the six seismic facies described in the MTD.

<b>Facies</b>	<b>Original data</b>	<b>DSMF</b>	<b>Instantaneous phase</b>	<b>Fracture proximity 2</b>
<b>F1</b>	A	A	A	A
<b>F2</b>	B	B	B	B
<b>F3</b>	C	C	C	C
<b>F4</b>	C	C	C	C
<b>F5</b>	D	D	C	B
<b>F6</b>	A	E	A	A

## 4 RESULTADOS - PARTE II: ON THE APPLICABILITY OF SEISMIC ATTRIBUTES IN THE DESCRIPTION AND INTERPRETATION OF MASS-TRANSPORT DEPOSITS

Vanessa da Silva Reis Assis<sup>a</sup>, Barbara Trzaskos<sup>a</sup>, Fernando Farias Vesely<sup>a</sup>, Victoria Valdez Buso<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19001, CEP 81531-980, Curitiba, PR, Brazil

### 4.1 ABSTRACT

Mass transport deposits (MTDs) have gained economic importance in the last years because of its role as seals or stratigraphic trapping mechanism in deep water turbidite prospects. The analysis of MTDs in 3D seismic data provides a better understanding of its characteristics when compared to outcrop or 2D seismics, as it is possible to capture both internal and external features over large areas in 3D. Moreover, this analysis can be even improved by applying seismic attributes, which have been employed only to describe specific aspects of these deposits. In this study, we applied several seismic attributes systematically in the characterization of an MTD, located in northern Santos Basin (offshore southeastern Brazil), aiming to identify their applicability in the description and interpretation of 33 characteristics of this kind of deposit. As a result, it was possible to identify for which features of the MTD the application of seismic attributes is indispensable, helpful or redundant.

#### Highlights

- Importance of applying seismic attributes in MTD interpretation
- Same characteristics can be described from different attributes
- Specific characteristics of MTDs may have different responses depending on the employed attribute

**Key-words:** 3D seismics, mass-transport deposits, seismic attributes, Santos basin

### 4.2 INTRODUCTION

Seismic attributes are subsets of the seismic data that can be useful in quantitative and qualitative geological interpretations and can exclude irrelevant data in order to enhance trends and patterns that are not visible in the original data (Barnes 1999, Chopra & Marfurt 2008). They have several applications in geology, such as

structural analysis (e.g. Neves *et al.* 2004, Iacopini & Butler 2011, Aqrabi *et al.* 2012, Liao *et al.* 2017, Bhattacharya & Verma 2019, Manzi *et al.* 2020), stratigraphy (e.g. Randen *et al.* 1998, Bourget *et al.* 2014, Li *et al.* 2020), lithological discrimination (e.g. Verm & Hilterman 1995, Sebtosheikh & Salehi, 2015), and reservoir characterization (e.g. Gastaldi *et al.* 1997, Chambers & Yarus 2002, Rezvandehy *et al.* 2011, Ghosh *et al.* 2014).

The use of seismic attributes is very popular in deep water settings once amplitudes usually delineate with great detail the geomorphology of sand-rich turbidite fans that are major exploratory targets. By comparison, the application of such attributes to characterize mass-transport deposits (MTDs), another important component of the deep-water environment, is incipient. MTDs are the deposits from submarine landslides, where sediments move downslope from areas of higher gradient (e.g. shelf break to upper slope) to zones of lower gradients (e.g. base of slope to basin floor) (Middleton & Hampton 1973). MTD is a generic term to classify deposits of flows such as slides, slumps and debris flow and are important mechanisms of sediment mobilization, transportation, and deposition (Nardin *et al.* 1979). The study of these deposits reveals important information for sedimentological, stratigraphic, and structural analyses (Martinsen 1994). Different deformation structures and kinematic indicators form in each of the deposit domains (Bull *et al.* 2009), including the headwall domain, where there is a prevalence of extension, and the toe domain, where compression prevails (e.g. Alsop & Marco 2014). Also, MTDs can be divided into two main types according to their form of frontal emplacement: frontally confined and frontally emergent (Frey Martinez *et al.* 2006). In frontally confined deposits, which are those that end where the basal detachment ramps up to the sea floor, the zone of compressional structures associated with the ramp coincide with the end of the deposit. In frontally emergent deposits, a zone of compressional structures associated with the ramp simply marks the point at which the flow becomes emergent onto the seafloor beyond which structures may be extensional, compressional, or both, sometimes in a complex sequence.

MTDs are mostly studied in outcrops and in seismic data. According to Bull & Cartwright (2010), there are several advantages of using 3D seismic data in MTDs interpretation, such as the possibility of doing volumetric and geometrical analyses in extensive areas of internal and external components. However, even the seismic analyses of MTDs being already well-established, seismic attributes are not employed

systematically but just to interpret specific features of MTDs (e.g. Gee *et al.* 2006, Frey-Martínez 2010, Dalla Valle *et al.* 2013, Alves 2015, Scarcelli *et al.* 2016, Bhatnagar *et al.* 2019). As consequence, is it not well established which seismic attribute can be useful during the characterization of each MTD feature.

Thus, this work aims to apply several seismic attributes systematically in the characterization of one MTD in a 3D seismic volume to identify how they are useful in their interpretation and to show their importance in the improvement of MTD characterization from seismic datasets.

### 4.3 METHODS

This study (Fig. 4.1) covers an area of 1051.46 km<sup>2</sup> in northern Santos Basin (offshore southeastern Brazil) and is about 140 km far offshore from the city of Rio de Janeiro. In this area, a set of Eocene MTDs are well imaged by the BS-500 survey, a 3D seismic-reflection, time-migrated, post-stack data acquired in year 2000. The thickest and more extensive of these deposits was selected for the study. The studied MTD belongs to the Marambaia formation and is buried 2450 to 3000 ms. The basal and upper surfaces of the MTD was mapped throughout the area.

The features analyzed in this work were adapted from Le Bouteiller *et al.* (2019), who established several MTD characteristics that can be interpreted with seismic data (Table 4.1). Here, we considered 33 characteristics categorized into seven properties: morphology, basal surface (BS), upper surface (US), position, headscarp (HC), internal facies distributions, and global environment (related to stratigraphic relationships).

We used 12 seismic attributes to interpret the MTD characteristics: isochrones, dip, curvature, fracture, dip-steered median filter (DSMF), root-mean-square (RMS) amplitude, thinned fault likelihood (TFL), instantaneous, spectral decomposition, energy, similarity, and semblance. In some of these attributes, it was possible to create different outputs by changing input parameters. For this reason, a total of 103 outputs were generated (Table 4.2; Boards 4.1 to 4.6 - appendices). The choice of used attributes was based on experience gained from a previous study of a shallower MTD within the same seismic survey (Assis *et al.*, under review) and a literature review of types of seismic attributes. All the seismic processing was made at software OpendTect Pro 6.6.4.

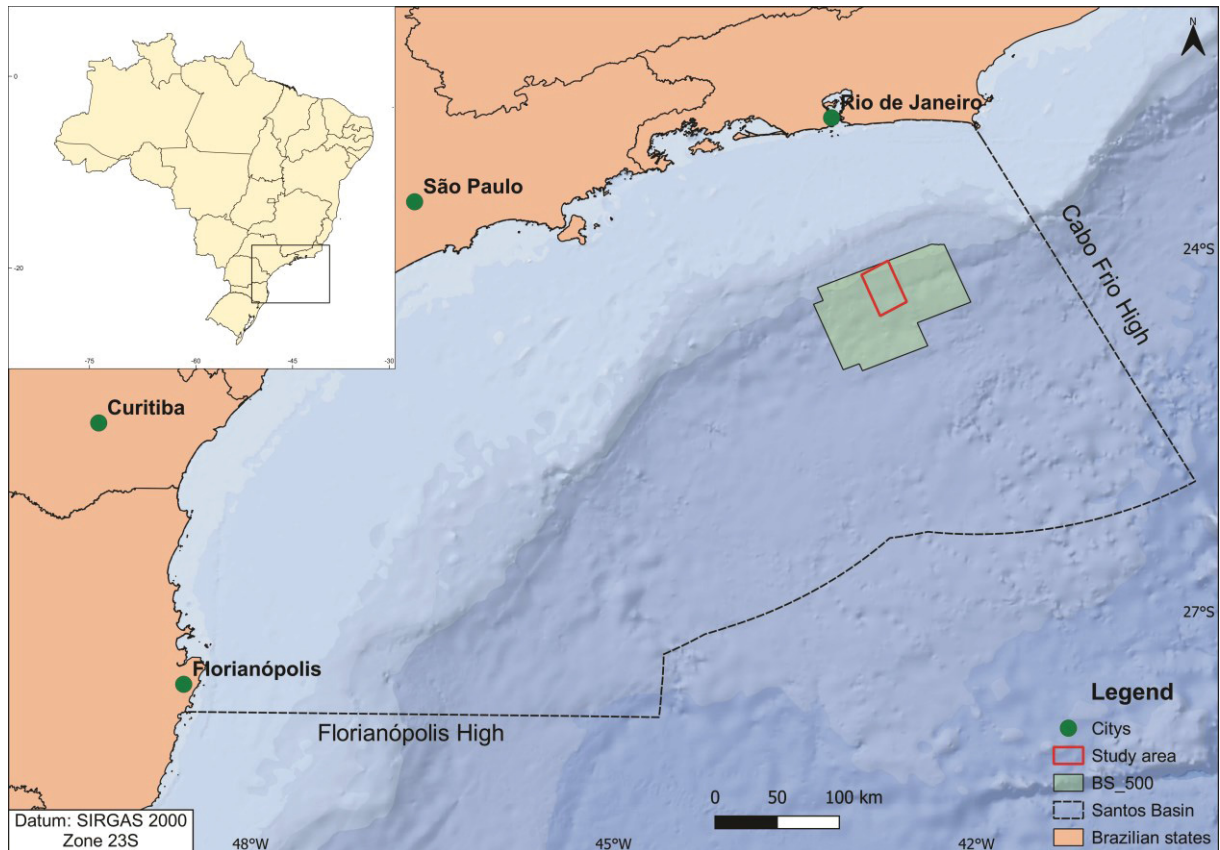


Fig. 4.1: Study area location in northern Santos basin (based on GeoANP 2021 and NERUS 2021 data).

Table 4.1: MTDs features analyzed in this work, based on Le Bouteiller et al. (2019).

Properties	Characteristics
Morphology	Thickness variation
	Average thickness
	Width variation
	Horizontal aspect ratio
	Volume
	Surface area
	Maximum horizontal length
	Principal direction
Basal surface (BS)	Presence of "tongues" at toe
	BS median slope
	BS flat sub-horizontal zone
	Plunging pool indicator
	Multiple terracing/blocks downslope
	BS ramps

	Erosive or deformational features
	Lateral erosive walls
	BS strong amplitude
Upper surface (US)	US median slope
	US ramps or ridges
	US with turbidites on top
Position	Upward connection to other MTDs
	Lateral connection to other MTDs
	Near structural elements laterally
Headscarp (HS)	Runout distance
	HS morphology
	HS downslope evolution
Internal facies distribution	Presence of preserved blocks and preserved blocks size
	Facies distribution
	Structures distribution
Global environment	Lithology distribution
	MTD proportion in sedimentary pile
	Lateral distribution of MTDs
	Vertical distribution of MTDs

Table 4.2: Number of outputs for each seismic attribute.

Attributes	Number of outputs
Isochrones	1
Dip	2
Curvature	22
Fracture	6
DSMF	1
RMS amplitude	1
TFL	1
Instantaneous	3
Spectral decomposition	16
Energy	1
Similarity	28
Semblance	21
<b>Total</b>	<b>103</b>

## 4.4 RESULTS

### 4.4.1 MTD general characterization

Fig. 4.2a and Table 4.3 present general information of the studied MTD. The available polygon covers the MTD from the head scarp to its mid to distal portion. However, the deposit extends beyond the study area both along the strike and downflow, so it was not possible to analyze the lateral erosive walls and to calculate the MTD proportion in the sedimentary pile.

Table 4.3: MTD general information.

<b>Properties</b>	<b>Characteristics</b>	<b>MTD characteristics</b>
Morphology	Surface area	353.75 km <sup>2</sup>
	Wide	25714 m maximum
	Maximum horizontal length	19345 m
	Horizontal aspect ratio (ratio between the maximum length and the principal width)	0.7523
	Thickness	13.06 and 93.94 ms, with a prevalence of values lower than 50 ms
Basal surface (BS)	BS median slope (Fig. 4.6a)	5.1 to 91.78 $\mu\text{s/m}$ , with two areas well delimited in the 50 $\mu\text{s/m}$ boundary
Upper surface (US)	US median slope (Fig. 4.8a)	5 and 85 $\mu\text{s/m}$ , with prevalence of values lower than 40 $\mu\text{s/m}$
Position	Runout distance	10648 to 20376 m
Headscarp (HS)	Slope	17.03 to 187.45 $\mu\text{s/m}$
Internal facies distributions	Preserved blocks size (Fig. 4.10c)	0.1 to 0.61 km <sup>2</sup>

Part of the examined MTD is covered by another, smaller MTD (MTD B in figure 4.3a). Some faults cut the deposits and a salt diapir in the distal end of the MTD, may somehow had influenced the mass flow (Fig. 4.3b).

The thickness of the MTD is variable (Table 4.3 and Fig. 4.2.b); however, the highest thickness occurs in the proximal region, close to the NE. The main flow direction is to the SE and it is possible to observe several “tongues” in the toe domain, caused by different factors, such as salt diapirs, which produces a variation of more than 10 km in the runout distance.

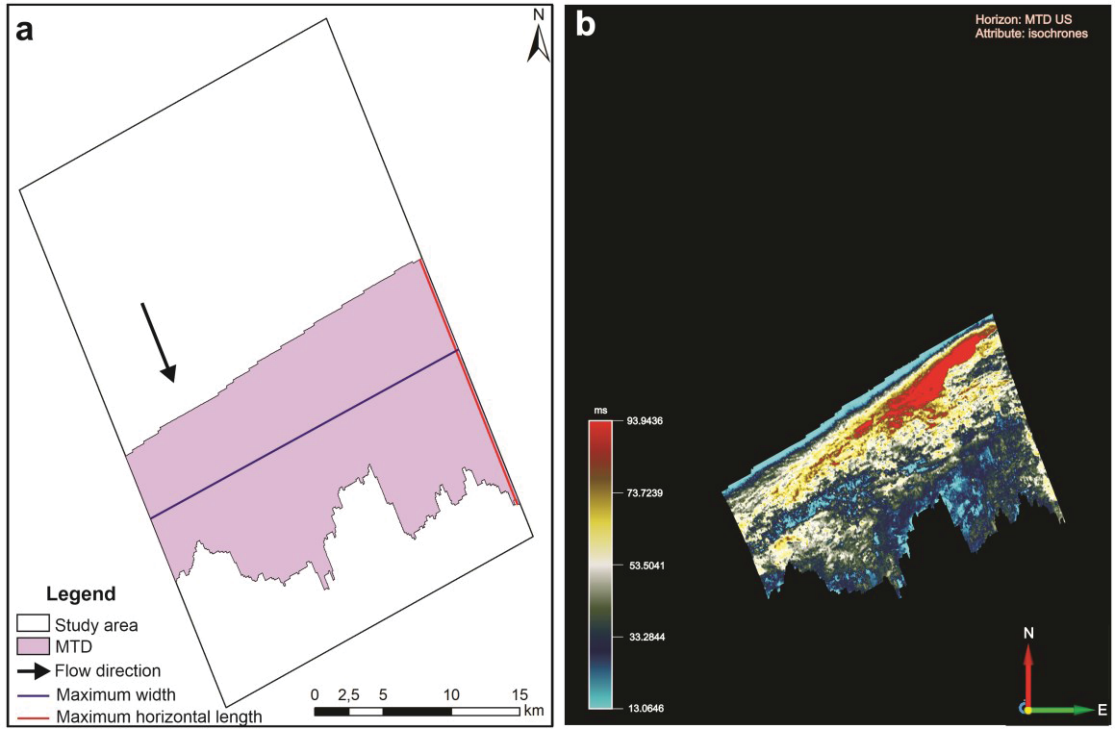


Fig. 4.2: a) Indication of flow direction, maximum width and maximum horizontal length in the MTD; b) MTD thickness given by isochrones.

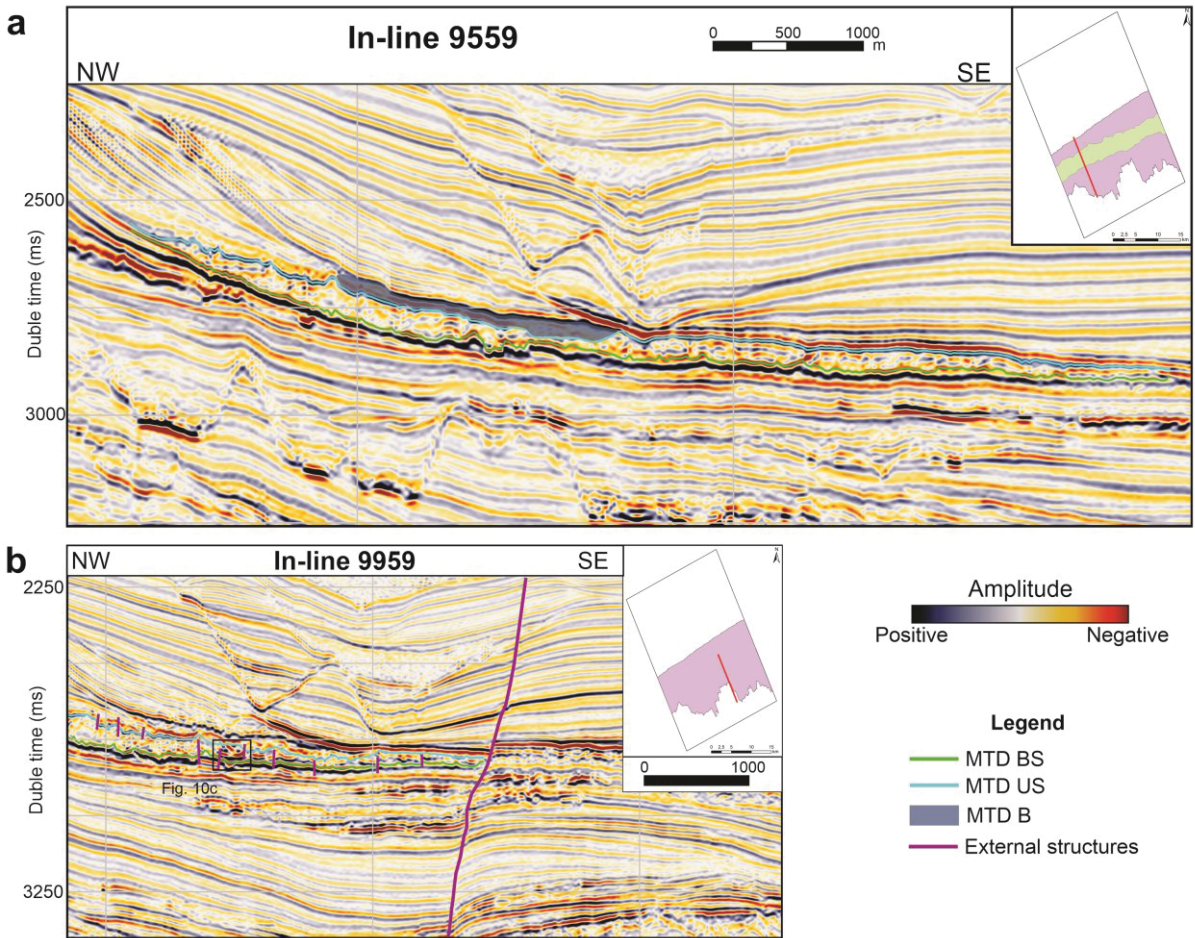


Fig.4.3: a) Overview of the MTD, with the delimitation of MTD B; b) MTD external structures.

MTD HS (Fig. 4.4) dips to the SE, has a concave shape and its length decreases to the NE. In addition, the region where the HS is shorter corresponds to where the MTD is thicker.

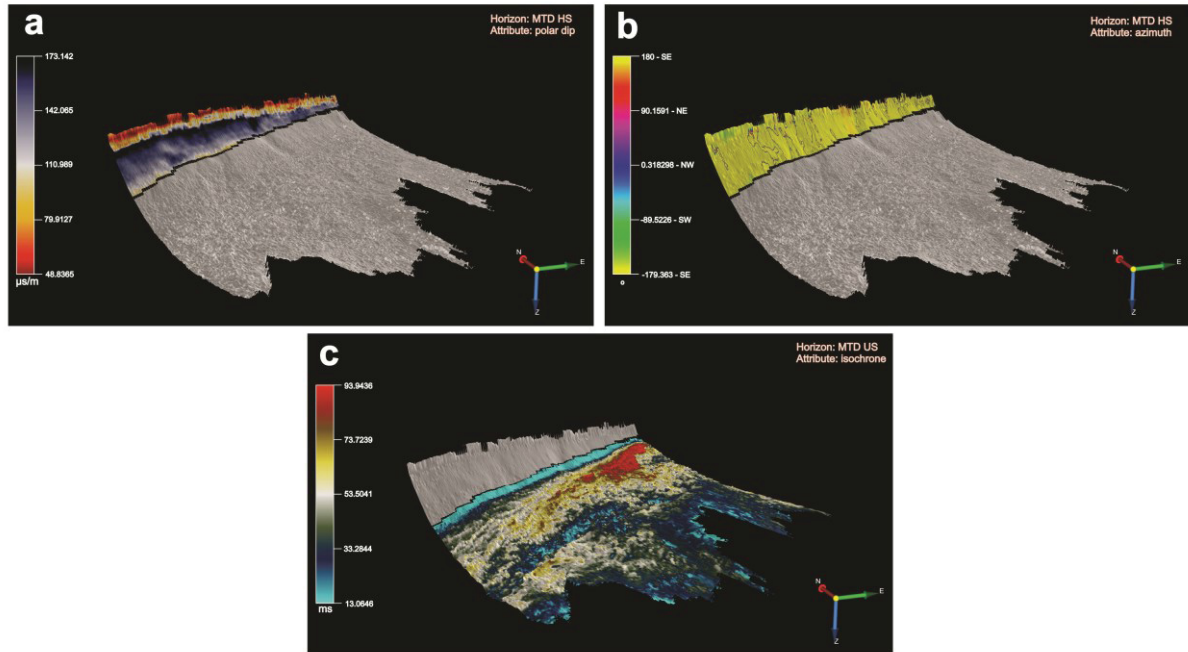


Fig. 4.4: MTD HS dips with the application of the polar dip attribute (a) and azimuth attribute (b); c) Inverse relationship between HS length and MTD thickness.

The basal surface (BS) has high amplitude and negative polarity. The surface is sub-horizontal, except close to the HC, where it is inclined downslope (Fig. 4.5a). The slope ranges between 5.1 to 91.78  $\mu\text{s}/\text{m}$ , and it is possible to notice that the highest values are close to the HC (Fig. 4.6a). The BS dips mainly to the SE and more locally to NE, S and S, and NW (Fig. 4.6b). Plugging pool indicators or erosional and deformation structures were not observed on this surface. On the other hand, there are multiple terracing associated with remaining blocks (Fig. 4.5b) and at least two ramps (Fig. 4.7). Both ramps are perpendicular to translation and dip against the flow direction.

The upper surface of the MTD (US) is very irregular due to later erosion process. It dips mainly to the SE with some variation to the NE and to the S (Fig. 4.8). There are many ridges in the proximal region and some ramps perpendicular and dipping against flow direction. It is important to highlight that the ramps and ridges do not occur downflow from the area where the main MTD is topped by MTD B (Fig. 4.9).

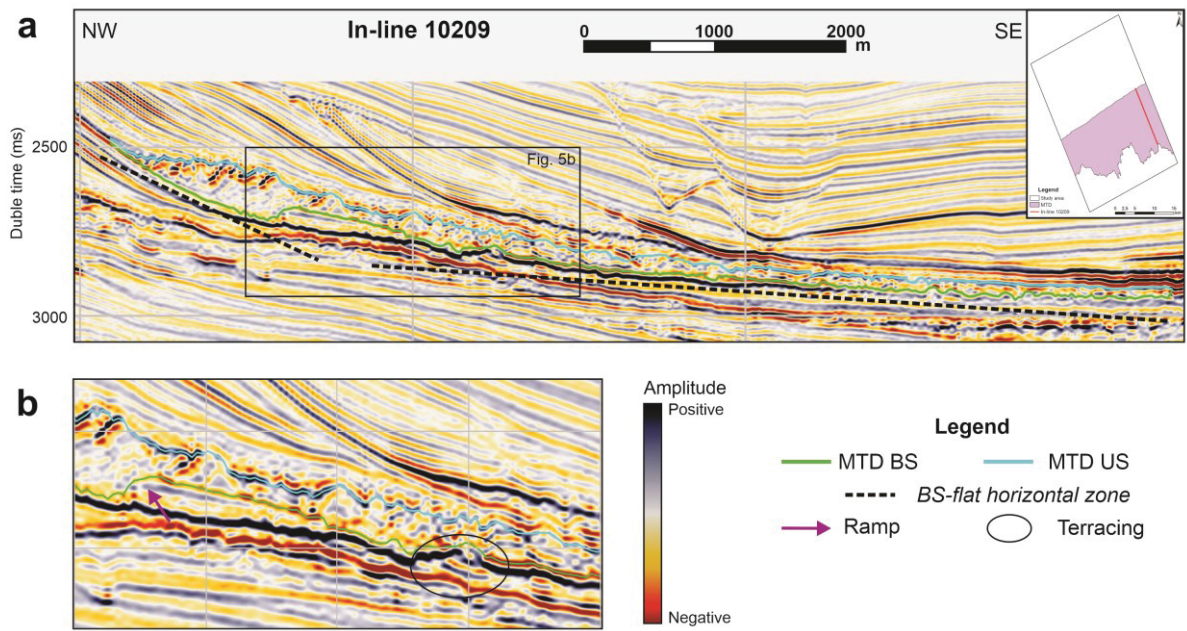


Fig. 4.5: a) MTD BS-flat horizontal zone; b) Ramp and terracing in the MTD BS.

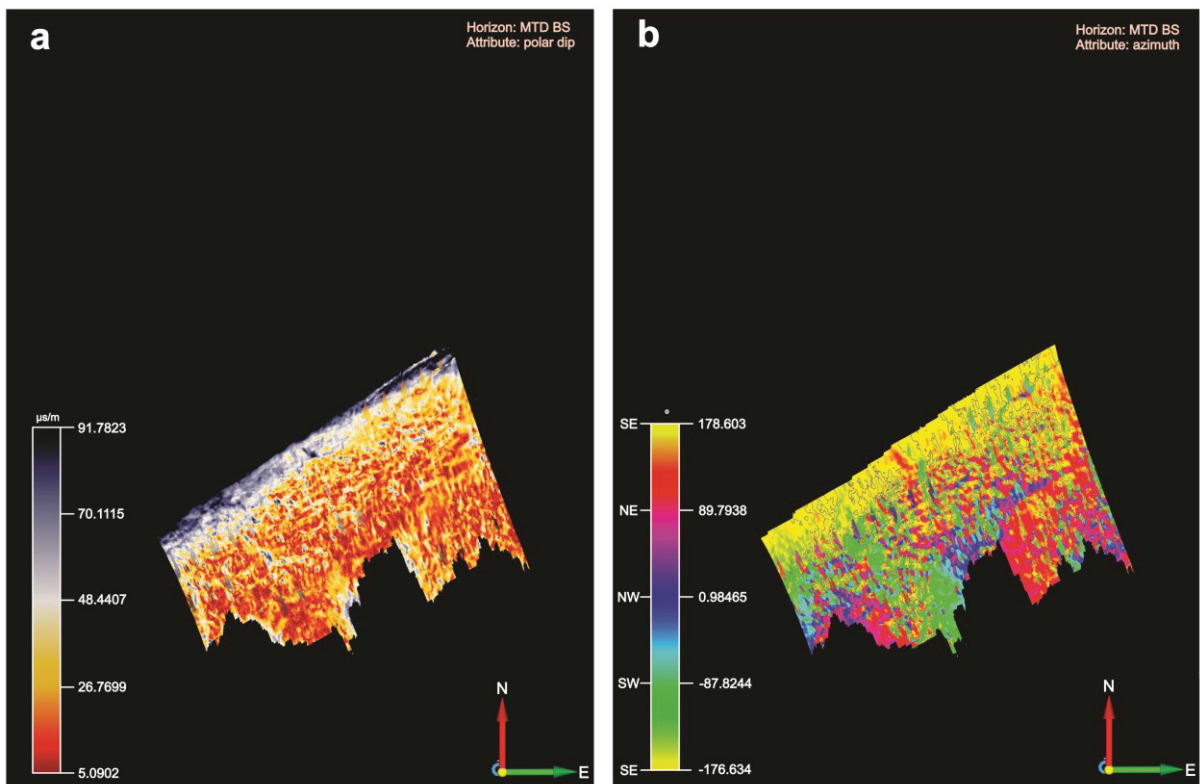


Fig. 4.6: a) MTD BS with polar dip attribute; b) MTD BS with azimuth attribute.

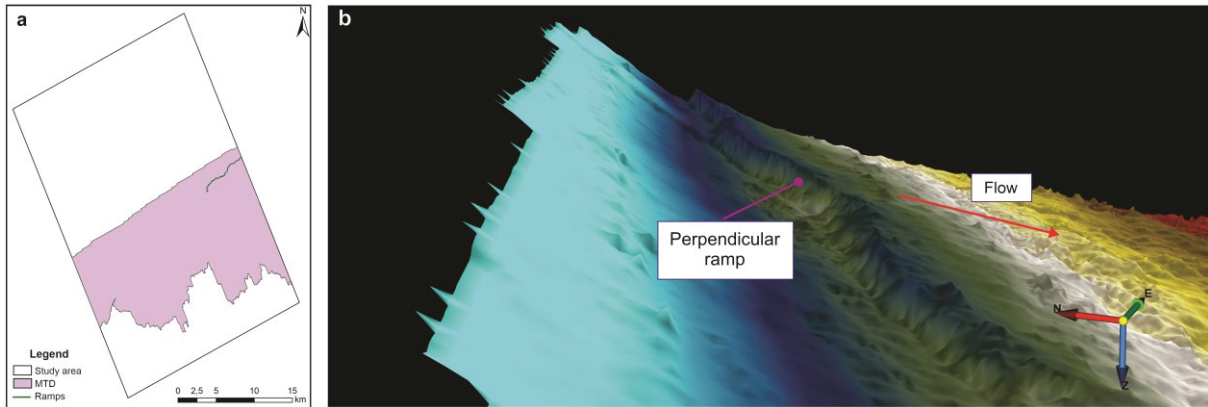


Fig. 4.7: a) Location of ramps in the MTD BS; b) 3D view of MTD BS, showing the principal ramp in the surface.

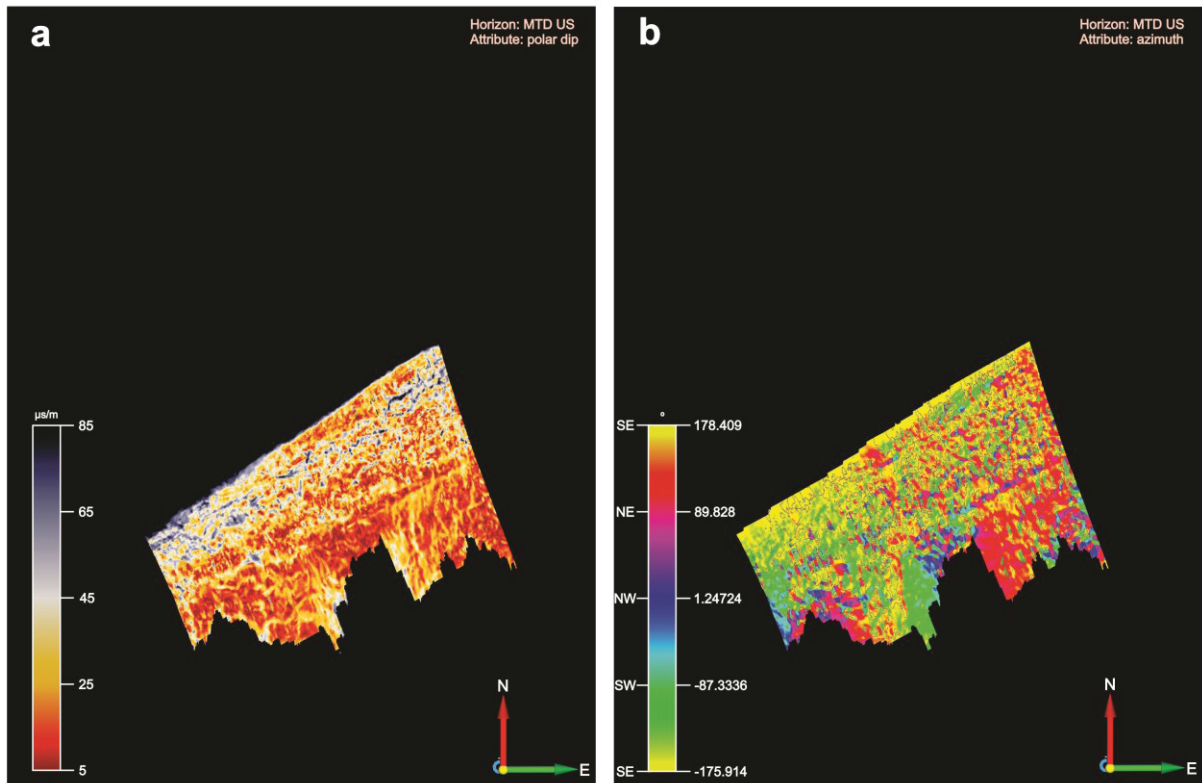


Fig. 4.8: a) MTD US with polar dip attribute; b) MTD US with azimuth attribute.

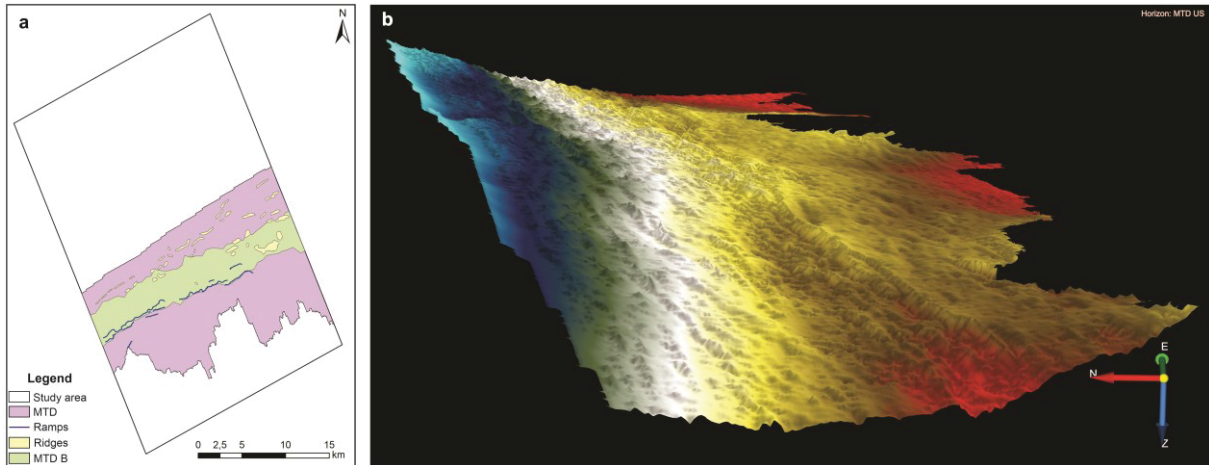


Fig. 4.9: a) Location of ramps, ridges and the MTD B in the MTD US; b) 3D view of MTD US, showing that it is more irregular in the proximal region with the presence of several ridges.

In terms of internal characteristics (Fig. 4.10), there are folds, normal and reverse faults, and four large-size blocks (Fig. 4.11a). The analysis of the original data and of other three seismic attributes (DSMF, instantaneous phase, and fracture proximity) in the in-lines showed that there are many geometrical and/or amplitude differences through the deposit. Thus, according to the changes in these attributes in the in-lines it were defined fourteen seismic facies (F1 to F14) (Boards 4.7 and 4.8 – appendices; Fig. 4.11a). The distribution of facies allow to define two regions. In the proximal region F3 prevail and there are occurrences of F1, F2, F4, F5, and F11. In the distal region there is a wide lateral variation of facies, the only one that does not occur is F2, and there is a repetition of F4, F5, F8, and F9. The lithological variation was analyzed with instantaneous amplitude attribute, four levels of amplitude (very low, low, intermediate, and high) were established according to the color scale (Fig. 4.11b). The levels very low, and low occurs in the proximal region and in the rest, there is a variation of the levels low, intermediate, and high.

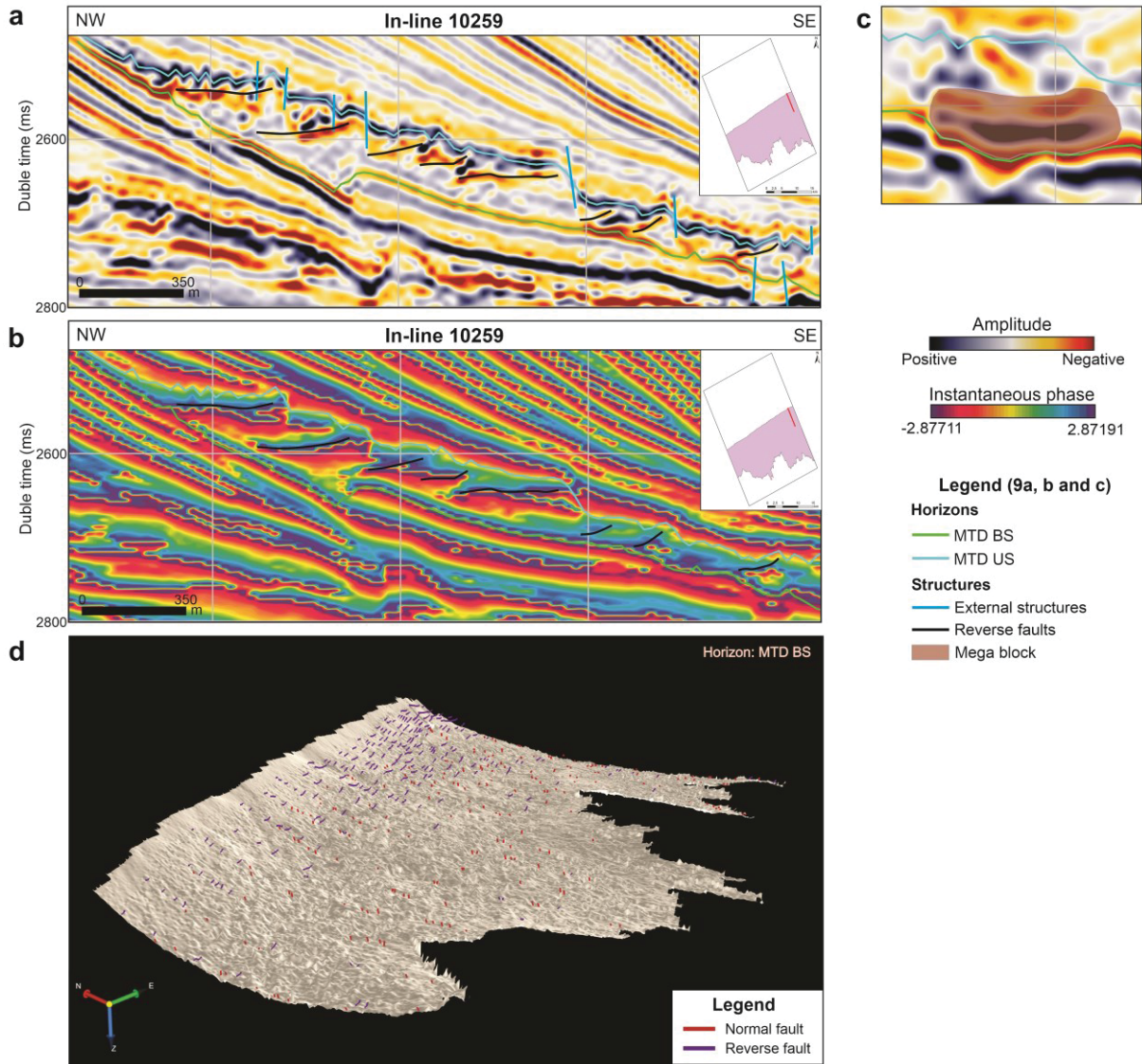


Fig. 4.10: a) Reverse faults inside the deposit and some external structures; b) Interpretation of reverse faults using instantaneous phase attribute; c) Example of a large autochthonous block; d) Distribution of normal and reverse faults in the MTD.

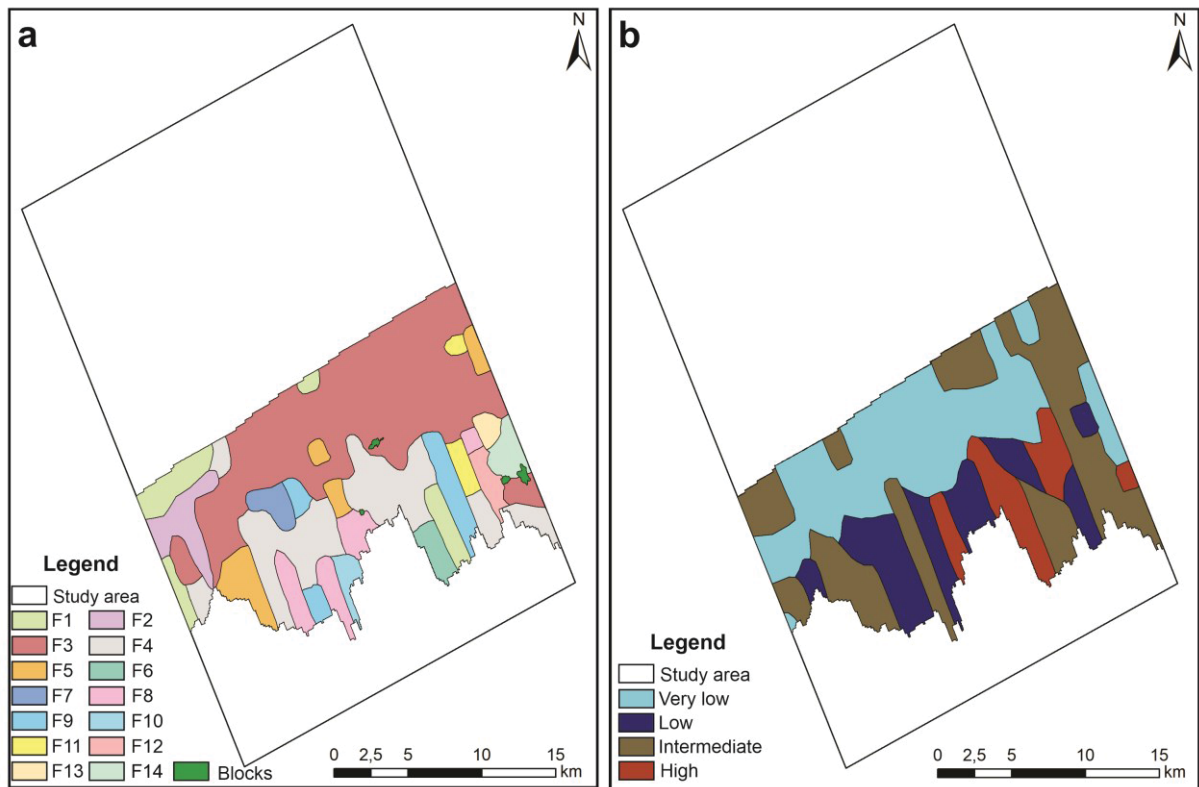


Fig. 4.11: a) MTD seismic facies distribution; b) MTD compositional heterogeneity distribution.

#### 4.4.2 Use of seismic attributes

The attributes used to describe the different features of the the MTD are shown in Table 4.4. The characteristics with any information in the attribute column were interpreted with the original data. Some characteristics were not analyzed because they were not observed in the studied volume.

Table 4.4: Seismic attributes used in the interpretation of each MTD descriptor.

Properties	Characteristics	Attributes used in the MTD analysis
Morphology	Thickness variation	Isochrones
	Average thickness	Isochrones
	Width variation	-
	Horizontal aspect ratio	-
	Volume	-
	Surface area	-
	Maximum horizontal length	-
	Principal direction	-
	Presence of "tongues" at toe	-
Basal surface (BS)	BS median slope	Polar dip; azimuth
	BS flat-horizontal zone	-
	Plunging pool indicator	Not observed

	Multiple terracing/blocks downslope	-
	BS Ramps	Maximum curvature; maximum curvature 2; most positive curvature; most positive curvature 2; dip curvature; dip curvature 2; strike curvature 2; contour curvature 2; curvedness 2; gaussian curvature 2; fracture proximity 2; energy; RMS amplitude; spectral decomposition
	Erosive or deformational features	Not observed
	Lateral erosive walls	Not analyzed
	BS strong amplitude	RMS amplitude
Upper surface (US)	US median slope	Polar dip; azimuth
	US with turbidites on top	-
	US ramps or ridges	Spectral decomposition; maximum curvature 2; most positive curvature 2
Position	Upward connection to other MTDs	-
	Lateral connection to other MTDs	-
	Near structural elements laterally	DSMF; similarity 5.1; semblance 5.3; TFL; instantaneous amplitude <b>Salt domes:</b> fracture density c2; instantaneous amplitude
	Runout distance	-
Headscarp (HS)	HS morphology	Polar dip; azimuth
	HS downslope evolution	-
Internal facies distributions	Presence of preserved blocks and preserved blocks size	Energy; RMS amplitude
	Facies distribution	Original data; DSMF; instantaneous phase; fracture proximity
	Structures distribution	DSMF; similarity (5.1 e 3.3); semblance (5.3 e 7.3); instantaneous (amplitude, phase and frequency)
	Lithology distribution	Instantaneous amplitude
Global environment	MTD proportion in sedimentary pile	-
	Lateral distribution of MTDs	-
	Vertical distribution of MTDs	-

A group of seismic attributes highlighted the features in the BS ramps, US ramps and ridges, near structural elements laterally, and structures distribution. However, it is not necessary to apply all these attributes to identify these features. In summary, it is possible to choose the attribute that fits better with the data. Besides, the interpretation of most of the internal structures could be done without any attributes, but some of them, such as reverse faults, were distinguished with instantaneous phase attribute.

## 4.5 DISCUSSIONS

In this work, we apply several seismic attributes in 3D seismic data in order to identify the attributes that could be used in an MTD interpretation. We chose them considering their physical characteristics and specifications, and according to what was already employed in other research on MTDs.

### 4.5.1 Isochrones

Classified as a time-derived attribute by Brown (1996), isochrones present the variation of time between two seismic events (Oilfield Glossary 2021), which makes it essential to determine the deposits' thickness.

### 4.5.2 Dip

Polar dip and azimuth correspond, respectively, to the dip magnitude and the azimuth of the dip direction (dGB 2021a), which justify their choice to determine the median slope of the basal and upper surfaces. These two attributes are also commonly employed in the study of structural and erosional features in MTDs (e.g. Gee *et al.* 2006, Frey-Martínez 2010, Bhatnagar *et al.* 2019).

### 4.5.3 Curvature

According to Roberts (2001), curvature has many allocabilities, such as fractures and faults identification (maximum curvature, minimum curvature, mean curvature), faults magnitude and orientation (maximum curvature, dip curvature), lineaments identification (maximum curvature, most positive curvature, most negative curvature), the definition of surface morphology (shape index, strike curvature, gaussian curvature), and measure of surface curvature (curvedness). Curvature has already been used in structural analyses in MTDs (e.g. Frey-Martínez 2010, Bhatnagar *et al.* 2019), and here it was applied to interpret BS and US ramps.

### 4.5.4 Fracture

There are two fracture attributes: density and proximity (dGB 2021i). The first one highlights the areas with a high density of faults, and we observed that it also enhances salt dome structures. The second shows the areas with maximum fracture proximity. Here we applied it in the determination of seismic facies distribution.

#### 4.5.5 DSMF

DSMF is a filter capable of removing random noise and intensifying laterally continuous events, it also prevents the distortion of breaks in the data, such as faults (Qayyum & Groot 2012), enhancing MTDs (e.g. Kumar & Sain 2020). As the structures are highlighted by this filter, it was used here to interpret the regional structures around the deposit and the small ones inside them. Moreover, due to the variability of this attribute answer inside the MTD, it was useful during the determination of seismic facies.

#### 4.5.6 RMS amplitude and Energy

When applied in in-lines and cross-lines it enhances the reflector amplitude, allowing the determination of specific reflectors' amplitude. Alves (2015) applied RMS amplitude to picture the geometry of remnant and rafted blocks. Thus, here we applied it together with energy to delimit large-size blocks, since the energy values are connected to the amplitude, and it can be useful for lateral variations and seismic object detection (dGB 2021e).

#### 4.5.7 TFL

TFL attribute delineates faults and fractures (dGB 2021b), and with it we were able to interpret regional faults easier. Unfortunately, it was not possible to distinguish MTD internal faults using it, probably because of their size.

#### 4.5.8 Instantaneous

The three instantaneous attributes (amplitude, phase, and frequency) have different applicability, such as lithological variations and changes in the depositional environment (amplitude), highlight discontinuities and faults (phase), and fracture zones (frequency) (Taner *et al.* 1979, Khan & Akhter 2015, dGB 2021c). These attributes were previously applied to interpret some MTD characteristics (e.g. Madrussani *et al.* 2018, Arthur & Gani 2021) and in this work they were applied to identify structures and differences in the lithology, and to determine seismic facies.

#### 4.5.9 Spectral decomposition

With the spectral decomposition attribute, it is possible to combine different frequencies of the seismic signal to identify lateral discontinuities and thickness

variation (dGB 2021d). Nwoko *et al.* (2020) used this attribute to highlight features in the MTD BS. Here we employed it to identify the ramps and ridges boundaries in the basal and upper surfaces.

#### 4.5.10 Similarity and Semblance

Several works previously applied a coherence attribute to interpret MTD characteristics (e.g. Frey-Martínez 2010, Alves 2015, Bhatnagar *et al.* 2019). This attribute is not available at OpendTect, however, its results are very similar to two other attributes that are: similarity and semblance, being that the second one was also used in MTD interpretation (e.g. Dalla Valle *et al.* 2013). They both show how two or more segments resemble (dGB 2021h, dGB 2021g). In this work, they were useful to identify faults and fractures inside and outside the deposit.

## 4.6 CONCLUSION

The study of MTDs in 3D seismic data provides a suitable understanding of these deposits. However, the use of seismic attributes can improve this kind of interpretation. After creating lots of seismic attributes and applying them systematically in in-lies, cross-lines, and z-slices to interpret an MTD, the results of our study contributes to previous knowledge about the use of this tool in MTD interpretation. Our main conclusions are listed below:

- i. Seismic attributes have huge importance to MTD analysis. It is impossible to define some deposit characteristics without employing them, such as thickness variation, average thickness, BS median slope, BS strong amplitude, US median slope, HS morphology, facies distribution, and lithology distribution. Besides, it helps in the identification of many other characteristics (BS ramps, US ramps or ridges, near structural elements laterally, presence of preserved blocks and preserved blocks size, and structure distribution).

- a. When it comes to MTD morphology, isochrones are indispensable. To define the slope of surfaces (BS, US, or HS), polar dip and azimuth need to be employed. To interpret the ramps curvature and spectral decomposition attributes are the best, whereas different curvature attributes show similar results.

- b. RMS amplitude establishes the BS strong amplitude and delimits the megablocks as well as energy. In the seismic facies distribution, there was variation in

the original data and in the DSMF, instantaneous phase, and fracture proximity attributes. In the lithological distribution, the instantaneous amplitude can be employed.

c. DSMF, similarity, semblance, instantaneous (phase, frequency, and amplitude), and TFL help in the interpretation of the structures, especially the faults, even though TFL has better results in large-scale structures.

ii. Even it was created 103 attribute outputs, just 43 were useful in the analyses. As not all curvature, fracture, similarity, and semblance outputs were employed.

a. Any result was created when the background steering cube was input to fracture.

b. Not all curvature attributes were used because of three reasons: the results were very similar (e.g. maximum curvature and mean curvature), other outputs had better results (e.g. minimum curvature was not employed), and some outputs created using the background steering were not so detailed (e.g. gaussian curvature, most negative curvature, shape index, and curvedness).

c. For semblance and similarity, the outputs generated with the steering “none” were impossible to employ in the interpretation due to the poor quality. The others showed very similar results, consequently it was not necessary to use all of them, and just two of each attribute were chosen.

d. Concerning spectral decomposition, we did not select a specific RGB composition of frequency as the best to interpret each feature, since different outputs were able to highlight particular characteristics in distinct regions of the deposit.

iii. It is really important to create the seismic attributes outputs considering the available seismic data, the regional geology, and the MTD characteristic that is going to be studied.

## 4.7 APPENDICES

Board 4.1: Spectral decomposition outputs.

Name	Transform type	Wavelet	Output frequency (Hz)
SD_FFT_10	FFT	-	10
SD_FFT_20	FFT	-	20
SD_FFT_40	FFT	-	40
SD_FFT_60	FFT	-	60
SD_CWT_Morlet_10	CWT	Morlet	10

SD_CWT_Morlet_20	CWT	Morlet	20
SD_CWT_Morlet_40	CWT	Morlet	40
SD_CWT_Morlet_60	CWT	Morlet	60
SD_CWT_Gaussian_10	CWT	Gaussian	10
SD_CWT_Gaussian_20	CWT	Gaussian	20
SD_CWT_Gaussian_40	CWT	Gaussian	40
SD_CWT_Gaussian_60	CWT	Gaussian	60
SD_CWT_Mexican_10	CWT	Mexiacan Hat	10
SD_CWT_Mexican_20	CWT	Mexiacan Hat	20
SD_CWT_Mexican_40	CWT	Mexiacan Hat	40
SD_CWT_Mexican_60	CWT	Mexiacan Hat	60

Board 4.2: Similarity outputs.

<b>Name</b>	<b>Extension</b>	<b>Steering</b>
Similarity_1.1	None	Full
Similarity_1.2	None	None
Similarity_1.3	None	Central
Similarity_1.4	None	Browse dip
Similarity_2.1	Mirror 90 degrees	Full
Similarity_2.2	Mirror 90 degrees	None
Similarity_2.3	Mirror 90 degrees	Central
Similarity_2.4	Mirror 90 degrees	Browse dip
Similarity_3.1	Mirror 180 degrees	Full
Similarity_3.2	Mirror 180 degrees	None
Similarity_3.3	Mirror 180 degrees	Central
Similarity_3.4	Mirror 180 degrees	Browse dip
Similarity_4.1	Full block	Full
Similarity_4.2	Full block	None
Similarity_4.3	Full block	Central
Similarity_4.4	Full block	Browse dip
Similarity_5.1	Cross	Full
Similarity_5.2	Cross	None
Similarity_5.3	Cross	Central
Similarity_5.4	Cross	Browse dip
Similarity_6.1	Diagonal	Full
Similarity_6.2	Diagonal	None

Similarity _6.3	Diagonal	Central
Similarity _6.4	Diagonal	Browse dip
Similarity _7.1	All directions	Full
Similarity _7.2	All directions	None
Similarity _7.3	All directions	Central
Similarity _7.4	All directions	Browse dip

Board 4.3: Semblance outputs.

<b>Name</b>	<b>Extension</b>	<b>Steering</b>
Semblance _1.1	None	None
Semblance _1.2	None	Central
Semblance _1.3	None	Full
Semblance _2.1	Mirror 90 degrees	None
Semblance _2.2	Mirror 90 degrees	Central
Semblance _2.3	Mirror 90 degrees	Full
Semblance _3.1	Mirror 180 degrees	None
Semblance _3.2	Mirror 180 degrees	Central
Semblance _3.3	Mirror 180 degrees	Full
Semblance _4.1	Full block	None
Semblance _4.2	Full block	Central
Semblance _4.3	Full block	Full
Semblance _5.1	Cross	None
Semblance _5.2	Cross	Central
Semblance _5.3	Cross	Full
Semblance _6.1	All directions	None
Semblance _6.2	All directions	Central
Semblance _6.3	All directions	Full
Semblance _7.1	Diagonal	None
Semblance _7.2	Diagonal	Central
Semblance _7.3	Diagonal	Full

Board 4.4: Curvature outputs.

<b>Attribute</b>	<b>Name</b>	<b>Steering</b>
Maximum curvature	Cur_max-curvature	Background Steering
Maximum curvature	Cur_max-curvature-2	Detailed Steering
Minimum curvature	Cur_min-curvature	Background Steering
Minimum curvature	Cur_min-curvature-2	Detailed Steering
Mean curvature	Cur_mean	Background Steering
Mean curvature	Cur_mean-2	Detailed Steering
Gaussian curvature	Cur_gaussian	Background Steering
Gaussian curvature	Cur_gaussian-2	Detailed Steering
Most positive curvature	Cur_most-positive	Background Steering
Most positive curvature	Cur_most-positive-2	Detailed Steering

Most negative curvature	Cur_most-negative	Background Steering
Most negative curvature	Cur_most-negative-2	Detailed Steering
Shape index	Cur_shape-index	Background Steering
Shape index	Cur_shape-index-2	Detailed Steering
Dip curvature	Cur_dip-curvature	Background Steering
Dip curvature	Cur_dip-curvature-2	Detailed Steering
Strike curvature	Cur_strike-curvature	Background Steering
Strike curvature	Cur_strike-curvature-2	Detailed Steering
Contour curvature	Cur_contour-curvature	Background Steering
Contour curvature	Cur_contour-curvature-2	Detailed Steering
Curvedness	Cur_curvedness	Background Steering
Curvedness	Cur_curvedness-2	Detailed Steering

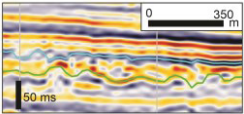
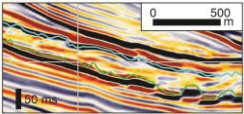
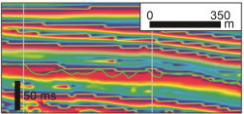
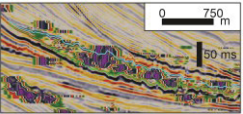
Board 4.5: Fracture outputs.

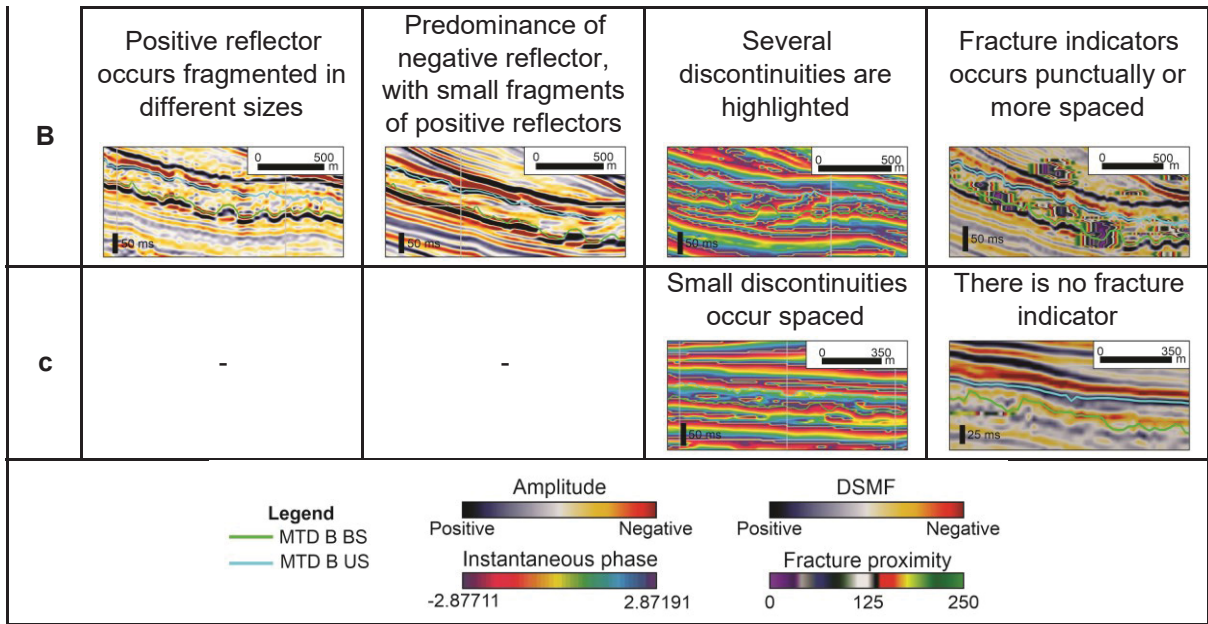
Name	Input	Anomaly Threshold	Radius to scam	Evaluation type
Fracture_proximity	Cur_max-curvature	0.004	252	-
Fracture_proximity-2	Cur_max-curvature-2	0.004	252	-
Fracture_density-c	Cur_max-curvature	0.004	252	Circular
Fracture_density-c2	Cur_max-curvature-2	0.004	252	Circular
Fracture_density-s	Cur_max-curvature	0.004	252	Spherical (2500)
Fracture_density-s2	Cur_max-curvature-2	0.004	252	Spherical (2500)

Board 4.6: Dip and instantaneous outputs.

Attribute	Name
Dip	Polar dip
Dip	Azimuth
Instantaneous	Amplitude
Instantaneous	Phase
Instantaneous	Frequency

Board 4.7: Representative characteristics observed to describe the seismic facies.

	Original data	DSMF	Instantaneous phase	Fracture proximity 2
<b>A</b>	<p>Predominance of negative reflector, with small positive reflectors</p> 	<p>Predominance of negative reflector, with small fragments of positive reflectors</p> 	<p>Any discontinuity is highlighted</p> 	<p>Large concentration of fracture indicators</p> 



Board 4.8: MTD seismic facies.

Facies	Original data	DSMF	Instantaneous phase	Fracture proximity 2
F1	A	A	C	C
F2	B	A	B	B
F3	B	B	B	A
F4	B	B	B	B
F5	B	B	C	B
F6	B	A	A	C
F7	A	A	A	B
F8	B	B	B	C
F9	B	B	A	B
F10	B	B	C	C
F11	A	A	A	C
F12	A	A	C	B
F13	B	B	A	C
F14	B	B	C	A

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa dissertação foram elaborados dois artigos que sintetizam os métodos e resultados obtidos na pesquisa. O primeiro artigo, intitulado “*Ramps as triggers to the formation of mass-transport deposits flow cells and to differentiation in basal interaction: a case of study in Santos basin, SE Brazil*”, foi submetido à revista *Marine and Petroleum Geology*. Nele é apresentada a caracterização morfológica do MTD A, realizada com base na análise de diferentes atributos sísmicos. Ademais, devido à variabilidade das estruturas de interação basal e a presença de diferentes indicadores cinemáticos, foi possível gerar um modelo para a sua formação, o qual considera que as rampas foram responsáveis pela criação de diferentes células de fluxo de segunda ordem e, conseqüentemente, da distribuição das estruturas internas e na superfície basal do depósito.

O segundo artigo, intitulado “*On the applicability of seismic attributes in the description and interpretation of mass-transport deposits*”, que será submetido à revista *Journal of Applied Geophysics*, tem como foco a aplicabilidade dos atributos sísmicos na caracterização de MTDs, tendo o MTD B como objeto de estudo.

A partir das interpretações realizadas nos dois depósitos estudados, pode-se concluir em relação à aplicabilidade dos atributos sísmicos no estudo de MTDs que:

- Os atributos sísmicos têm grande importância para a análise dos depósitos de transporte em massa em volume sísmico. Das 33 características analisadas em cada um dos MTDs (A e B), os atributos foram utilizados na interpretação de 15, sendo indispensáveis na caracterização de oito deles.

- Quando se trata da morfologia do MTD, o uso das isócronas é indispensável. Para definir o declive das superfícies (basal, de topo e da escarpa) os atributos polar dip e azimute precisam ser utilizados. Curvatura e decomposição espectral podem ser empregados para interpretar as rampas, sendo que alguns dos atributos de curvatura podem apresentar resultados muito similares.

- RMS amplitude define a amplitude da superfície basal e delimita os blocos de grandes dimensões assim como a energia. Para a distribuição de fácies sísmicas, notou-se variação no dado original e nos atributos DSMF, fase instantânea e fracture proximity. Na distribuição litológica pode-se empregar a amplitude instantânea.

○ Os atributos DSMF, similaridade, semelhança, instantâneos (fase, frequência e amplitude) e TFL ajudam a interpretar as estruturas, principalmente as falhas, sendo que o TFL é melhor empregado em estruturas de grandes dimensões. No que se refere às estruturas de interação basal, o atributo polar dip define bem os limites dos sulcos e da estrutura de deformação, além disso, atributos de curvatura destacam tanto essas feições como as estrias.

- Foi observado que para a interpretação de algumas características dos depósitos há variação de atributos que podem ser utilizados. Isso se deve à diferenças relacionadas à formação dos mesmos e deve ser levado em consideração durante a aplicação dos atributos.

- Como é possível gerar uma grande quantidade de *outputs* de alguns dos atributos, deve-se levar em conta para a criação dos mesmos as características da geologia regional e do depósito estudado e a qualidade do dado sísmico disponível.

## REFERÊNCIAS

- Alsop G.I. & Holdsworth R.E. 2002. The geometry and kinematics of flow perturbation folds. *Tectonophysics*. **350**, 99-125. doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00084-7)
- Alsop G.I. & Holdsworth R.E. 2007. Flow perturbation folding in shear zones. *Geological Society, London, Special Publications*. **272**, 75-101. doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.272.01.0>
- Alsop G.I. & Marco S. 2014. Fold and fabric relationship in temporally and spatially evolving slump systems: A multi-cell flow model. *Journal of Structural Geology*. **63**, 27-49. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2014.02.007>
- Alves T.M. 2015. Submarine slide blocks and associated soft-sediment deformation in deep-water basins: A review. *Marine and Petroleum Geology*, **67**:262-285. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.05.010>
- Alves T.M. & Cartwrite J.A. 2009. Volume balance of a submarine landslide in the Espírito Santo Basin, offshore Brazil: Quantifying seafloor erosion, sediment accumulation and depletion. *Earth and Planetary Science Letters*, **288**:572-580. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.020>
- Alves T.M. & Cartwrite J.A. 2010. The effect of mass-transport deposits on the younger slope morphology, offshore Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **27**:2027-2036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.05.006>
- Alves T.M. & Gamboa D. 2019. Mass-Transport Deposits as Markers of Local Tectonism in Extensional Basins In: Ogata, K., Festa, A., Pini, G.A. (Eds.) *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles*. Geophysical Monography 246, American Geophysical Union, pp. 71-90. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119500513.ch5>
- Alves T.M. & Lourenço S.D.N. 2010. Geomorphologic features related to gravitational collapse: Submarine landsliding to lateral spreading on a Late Miocene-Quaternary slope (SE Crete, eastern Mediterranean). *Geomorphology*. **123**, 13-33.
- Amerman R. 2009. Deepwater mass-transport deposits: structure, stratigraphy, and implications for basin evolution. PhD Thesis, Colorado School of Mines, Golden, 238 p.
- Araújo E.F.S.A., Silva C.G., dos Reis A.T., Perovano R., Gorini C., Vendeville B.C., Albuquerque N.C. 2009. Movimentos de massa multiescala na Bacia da Foz do Amazonas – Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geofísica*, **27**(3):485-508. Disponível em: <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbqf/article/view/1826>
- Aqrabi A.A., Weinzierl W., Deber R., Boe T.H. 2012. Directional guided seismic attributes and their use in assisting structural, stratigraphic and lithological interpretation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, p. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1190/segam2012-0674.1>

- Arthur M.R. & Gani M.R. 2021. Submarine channel and lobe hidden inside mass-transport deposits in the northern Gulf of Mexico. *Results in Geophysics Science*, **5**:100013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100013>
- Assis V.S.R, Trzaskos B., Vesely F.F., Buso V.V. Ramps as triggers to the formation of mass-transport deposits flow cells and to differentiation in basal interaction: a case of study in Santos basin, SE Brazil. Under review.
- Barnes A.E. 1999. Seismic attributes past, present, and future. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, p. 882-895. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1821230>
- Barnes A.E. 2016. Overview of Poststack Seismic Attributes *In*: Barnes A.E. *Handbook of Poststack Seismic Attributes*. Geophysical References Series, p. 1-12. doi: <https://doi.org/10.1190/1.9781560803324.ch1>
- Bhatnagar P., Verma S., Bianco R. 2019. Characterization of mass transport deposits using seismic attributes: Uper Leonard Formation, Permian Basin. *Interpretation*, **7**(4):SK19-SK32. doi: <https://doi.org/10.1190/INT-2019-0036.1>
- Bhattacharya S. & Verma S. 2019. Application of volumetric seismic attributes for complex fault network characterization on the North Slope, Alaska. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **65**:56-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.02.002>
- Biancardi C.A., Alves T.M., Martins-Ferreira Marco.Antonio.Caç. 2020. Unpredictable geometry and depositional stacking patterns of mass-transport complexes in salt minibasins. *Marine and Petroleum Geology*, **120**:104522. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104522>
- Bourget J., Ainsworth R.B., Thompson S. 2014. Seismic stratigraphy and geomorphology of a tide or wave dominated shelf-edge delta (NW Australia): Process-based classification from 3D seismic attributes and implications for the prediction of deep-water sands. *Marine and Petroleum Geology*, **57**:359-384. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.021>
- Brouwer F. & Huck A. 2011. An Integrated Workflow to Optimize Discontinuity Attributes for the Imaging of Faults *In*: Marfurt K.J., Gao D., Barnes A., Chopra S., Corrao A., Hart B., James H., Pacht J., Rosen N.C. *Attributes: New Views on Seismic Imaging – Their Use in Exploration and Production*. GCSSEPM Foundation, SEPM Society for Sedimentary Geology, p. 497-533. doi: <https://doi.org/10.5724/gcs.11.31.0496>
- Brouwer F. 2007. Creating a good Steering Cube. Disponível em: [https://static.dgbes.com/images/PDF/effectivedipsteeringworkflowusingbgsteering\\_primerodata.pdf](https://static.dgbes.com/images/PDF/effectivedipsteeringworkflowusingbgsteering_primerodata.pdf) . Acesso em: 09/07/2021.
- Brown A.R. 1996. Seismic attributes and their classification. *The Leading Edge*, **15**(10):1990. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1437208>
- Brown A.R. 2001. Understanding seismic attributes. *Geophysics*, **66**(1):47-48. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1444919>
- Bull S., Arnot M., Browne G., Crundwell M., Nicol A., Strachan L., 2019. Neogene and Quaternary Mass-Transport Deposits From the Northern Taranaki Basin (North Island, New Zealand): Morphologies, Transportation Process, and Depositional Controls *In*: Ogata, K., Festa, A., Pini, G.A. (Eds.) *Submarine Landslides*:

- Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles*. Geophysical Monography 246, American Geophysical Union, pp. 171-180. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119500513.ch11>
- Bull S. & Cartwright J. 2010. Small-Scale into Seismic-Scale Slumps: A comparison of Slump Features from the Waitemata Basin, New Zealand, and the Møre Basin, Off-Shore Norway In: Mosher D.C., Shipp C., Moscardelli L., Chaytor J., Baxter C, Lee H., Urgeles R. (eds.) *Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, v. 28, Dordrecht, Springer, p. 257-266. doi: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3071-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3071-9_21)
- Bull S., Cartwright J., Huuse M. 2009. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, **26**:1132-1151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.09.011>
- Butler R.W.H. & Tavarnelli E. 2006. The structure and kinematics of substrate entrainment into high-concentration sandy turbidites: a field example from the Gorgoglione “flysch” of southern Italy. *Sedimentology*, **53**: 655-670. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00789.x>
- Cardona S., Wood L.J., Dugan B., Jobe Z., Strachan L.J. 2020. Characterization of the Rapanui mass-transport deposit and the basal shear zone: Mount Messenger Formation, Taranaki Basin, New Zealand. *Sedimentology*, **67**(4): 2111-2148. doi: <https://doi.org/10.1111/sed.12697>
- Chambers R.L. & Yarus J.F. 2002. Quantitative Use of Seismic Attributes for Reservoir Characterization. *CSEG Recorder*, **27**(6):14-25.
- Chopra S. & Marfurt K.J. 2008. Emerging and future trends in seismic attributes. *The Leading Edge*, **27**(3):298-318. <https://doi.org/10.1190/1.2896620>
- Dakin N., Pickering K.T., Moring D., Bayliss N.J., 2013. Channel-like features created by erosive submarine debris flow: Field evidence from the Middle Eocene Ainsa Basin, Spanish Pyrenees. *Marine and Petroleum Geology*. **41**, 62-71. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.07.007>
- Dalla Valle G., Gamberi F., Rocchini P., Minisini D., Errera A., Baglioni L., Trincardi F. 2013. 3D seismic geomorphology of mass transport complexes in a foredeep basin: Examples from the Pleistocene of the Central Adriatic Basin (Mediterranean Sea). *Sedimentary Geology*, **294**:127-141. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.05.012>
- Dasgupta P. 2003. Sediment gravity flow – the conceptual problems. *Earth-Science Reviews*, **62**:265-281. doi: [http://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00160-5](http://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00160-5)
- D’Avila R.S.F., Arienti L.M., de Aragão M.A.N.F., Vesely F.F., Santos S.F., Voelcker H.E., Viana A.R., Kowsmann R.O., Moreira J.L.P., Coura A.P.P., Paim P.S.G., de Matos R.S., Machado L.C.R. 2008. Ambientes de água profundas In: da Silva J.C.L., de Aragão M.A.N.F., Magalhães A.J.C. (org.) *Ambientes de sedimentação siliciclástica do Brasil*. São Paulo, Beca, p. 244-301.
- de Lima Rodrigues M.C.N., Trzaskos B., Alsop G.I., Vesely F.F. 2020. Making a homogenite: An outcrop perspective into the evolution of deformation within mass-transport deposits. *Marine and Petroleum Geology*, **112**:104033. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104033>

Dentith M. & Mudge S.T. 2014. Seismic method *In: Dentith M. & Mudge S.T. Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 129-148.

dGB 2021a. 4.5.2 Dip. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb\\_userdoc/Default.htm#dip-steering/attributes\\_with\\_steering/dip.htm?TocPath=4%2520Dip-Steering%257C4.5%2520Attributes%2520with%2520Steering%257C](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#dip-steering/attributes_with_steering/dip.htm?TocPath=4%2520Dip-Steering%257C4.5%2520Attributes%2520with%2520Steering%257C) 2 . Acesso em: 15/07/2021.

dGB 2021b. 2.1.2 Thinned Fault Likelihood (TFL). Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb\\_userdoc/Default.htm#faults\\_and\\_fractures/attributes/thinned\\_fault\\_likelihood.htm?TocPath=2%2520Faults%2520and%2520Fractures%257C2.1%2520Attributes%257C](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#faults_and_fractures/attributes/thinned_fault_likelihood.htm?TocPath=2%2520Faults%2520and%2520Fractures%257C2.1%2520Attributes%257C) 2 . Acesso em: 15/07/2021.

dGB 2021c. 11.12 Instantaneous. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od\\_userdoc/Default.htm#csid=269484040](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od_userdoc/Default.htm#csid=269484040) . Acesso em: 13/07/2021.

dGB 2021d. 11.26 Spectral Decomposition. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od\\_userdoc/Default.htm#csid=269484053](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od_userdoc/Default.htm#csid=269484053) . Acesso em: 20/08/2021.

dGB 2021e. Appendix A – Attribute - Energy. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/5.0.0/doc/od\\_userdoc/Default.htm#app\\_a/energy.htm](https://doc.opendtect.org/5.0.0/doc/od_userdoc/Default.htm#app_a/energy.htm) . Acesso em: 10/11/2021.

dGB 2021f. 11.25 Similarity. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od\\_userdoc/Default.htm#appendix\\_a-attributes\\_and\\_filters/similarity.htm%3FTocPath%3D11%2520Appendix%2520A%2520-%2520Attributes%2520and%2520Filters%7C](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od_userdoc/Default.htm#appendix_a-attributes_and_filters/similarity.htm%3FTocPath%3D11%2520Appendix%2520A%2520-%2520Attributes%2520and%2520Filters%7C) 25 . Acesso em: 15/07/2021.

dGB 2021g. 11.24 Semblance. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od\\_userdoc/Default.htm#appendix\\_a-attributes\\_and\\_filters/semblance.htm](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/od_userdoc/Default.htm#appendix_a-attributes_and_filters/semblance.htm) . Acesso em: 16/07/2021.

dGB 2021h. 4.5.6 Similarity. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb\\_userdoc/Default.htm#dip-steering/attributes\\_with\\_steering/similarity.htm?TocPath=4%2520Dip-Steering%257C4.5%2520Attributes%2520with%2520Steering%257C](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#dip-steering/attributes_with_steering/similarity.htm?TocPath=4%2520Dip-Steering%257C4.5%2520Attributes%2520with%2520Steering%257C) 6 . Acesso em: 15/07/2021.

dGB 2021i. 2.1.12 Fracture Density - Proximity. Disponível em: [https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb\\_userdoc/Default.htm#faults\\_and\\_fractures/attributes/fracture\\_density-proximity.htm?TocPath=2%2520Faults%2520and%2520Fractures%257C2.1%2520Attributes%257C](https://doc.opendtect.org/6.6.0/doc/dgb_userdoc/Default.htm#faults_and_fractures/attributes/fracture_density-proximity.htm?TocPath=2%2520Faults%2520and%2520Fractures%257C2.1%2520Attributes%257C) 12 . Acesso em: 19/07/2021.

Dott R.H. 1963. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes. *AAPG Bulletin*, **47**(1):104-128. doi: <https://doi.org/10.1306/BC743973-16BE-11D7-8645000102C1865D>

Frey-Martínez J. 2010. 3D Seismic Interpretation of Mass Transport Deposits: Implications for Basin Analysis and Geohazard Evaluation *In: Mosher D.C. et al. (eds.) Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural*

- and Technological Hazards Research*, vol 28. Dordrecht, Springer, p. 553-568. doi: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3071-9\\_45](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3071-9_45)
- Frey-Martínez, J., Cartwright, J., Hall, B., 2005. 3D seismic interpretation of slump complexes: examples from the continental margin of Israel. *Basin Research*. **17**, 83-108. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2005.00255.x>
- Frey-Martínez J., Cartwright J., James D. 2006. Frontally confined versus frontally emergent submarine landslides: A 3D seismic characterization. *Marine and Petroleum Geology*. **23**, 585-604. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.04.002>
- Gastaldi C., Biguenet J.P., Pazzid L. 1997. Reservoir characterization from seismic attributes: An example from the Peciko Field (Indonesia). *The Leading Edge*, **16**(3):263-266. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1437614>
- Gee, M.J.R., Gawthorpe, R.L., Friedmann, S.J., 2005. Giant striations at the base of a submarine landslide. *Marine Geology*. **214**, 287-294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.09.003>
- Gee M.J.R., Gawthorpe R.L., Friedmann S.J. 2006. Triggering and evolution of a giant submarine landslide, offshore Angola, revealed by 3D seismic stratigraphy and geomorphology. *Journal of Sedimentary Research*, **76**:9-19. doi: <https://doi.org/10.2110/jsr.2006.02>
- GeoANP. 2021. Bacia Sedimentares – Mar (Fonte: CPRM). Disponível em: <http://geo.anp.gov.br/mapview> Acesso em: 13/06/2021.
- Ghosh D., Sajid M., Ibrahim N.A., Viratno B. 2014. Seismic attributes add a new dimension to prospect evaluation and geomorphology offshore Malaysia. *The Leading Edge*, **33**(5):536-545. doi: <https://doi.org/10.1190/tle33050536.1>
- Guerra M.C. & Underhill J.R. 2012. Role of halokinesis in controlling structural styles and sediment dispersal in the Santos Basin, offshore Brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, **363**(1): 175-206. doi: <https://doi.org/10.1144/SP363.9>
- Hammond A.L. 1974. Bright Spot: Better Seismological Indicators of Gas and Oil. *Science*, **185**(4150):515-517. doi: <https://doi.org/10.1126/science.185.4150.515>
- Hodgson D.M., Brooks H.L, Ortiz-Karpf A., Spsychala Y., Lee D.R., Lackson C.A.-L. 2018. Entrainment and abrasion of megaclasts during submarine landsliding and their impact on flow behavior. Subaqueous Mass Movements. *Geological society, London, Special Publications*. **466**, 223-240. doi: <https://doi.org/10.1144/SP477.26>
- Iacopini D. & Butler R.W.H. 2011. Imaging deformation in submarine thrust belts using seismic attributes. *Earth and Planetary Science Letters*, **302**:414-422. doi: <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.041>
- Jackson C.A.-L., 2011. Three-dimensional seismic analysis of megaclasts deformation within a mass transport deposit; implications for debris flow kinematics. *Geology*. **39**(3), 203-206. doi: <https://doi.org/10.1130/G31767.1>
- Jenner K.A., Piper D.J.W., Campbell C., Mosher D.C. 2007. Lithofacies and origin of late Quaternary mass transport deposits in submarine canyons, central Scotian slope, Canada. *Sedimentology*, **54**:19-38. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00819.x>

- Joanne C., Lamarche G., Collot J.-Y. 2013. Dynamics of giant mass transport in deep submarine environments: the Matakaoa Debris Flow, New Zealand. *Basin Research*, **25**:1-18. doi: <http://doi.org/10.1111/bre.12006>
- Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002. Elements of seismic surveying *In*: Kearey P., Brooks M., Hill I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd, Oxford, pp. 21- 42.
- Khan K.A. & Akhter G. 2015. Review of instantaneous, wavelet, and weighted seismic attributes along with a computational library. *Arabian Journal of Geosciences*, **9**:29. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2044-8>
- Kumar P.C., Omosanya K.O., Eruteya O.E., Sain K. 2021. Geomorphological characterization of basal flow markers during recurrent mass movement: A case study from the Taranaki Basin, offshore New Zealand. *Basin Research*. **33**(4), 2358-2382. doi: <https://doi.org/10.1111/bre.12560>
- Kumar P.C. & Sain K. 2020. A machine learning tool for interpretation of Mass Transport Deposits from seismic data. *Scientific Reports*. **10**:14134. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71088-6>
- Lee S.E., Tailling P.J., Ermst G.G.J., Hogg A.J. 2002. Occurrence and origin of submarine plunge pools at the base of the US continental slope. *Marine Geology*, **185**:363-377. doi: [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00298-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00298-5)
- Le Bouteiller P., Lafuerza S., Charléty J., Reis A.T., Granjeon D., Delprat-Jannaud F., Gorini C. 2019. A new conceptual methodology for interpretation of mass transport processes from seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, **103**:438-455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.027>
- Le Goff J., Slooman A., Mulder T., Cavailles T., Ducassou E., Hanquiez V., Jaballah J., Reijmer J.J.G. 2020. On the architecture of intra-formational Mass-Transport Deposits: Insights from the carbonate slopes of Grat Bahama Bank and the Apulian Carbonate Platform. *Marine Geology*, **427**:106205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106205>
- Li W., Yue D., Wu S., Shu Q., Wang W., Long T., Zhang B. 2020. Thickness prediction for high-resolution stratigraphic interpretation by fusing seismic attributes of target and neighboring zones with an SVR algorithm. *Marine and Petroleum Geology*, **113**:104153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104153>
- Liang, C., Lu, C., Xie, X., Yu, X., He, Y., Su, M., Chen, H., Zhou, Z., Tian, D., Mi, H., Li, M., Zhang, H., 2021. Basal shear zones of recurrent mass transport deposits as potential reservoirs for gas hydrates in the Central Canyon area, South China Sea. *Marine Geology*. **441**, 106631. doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106631>
- Liao Z., Liu H., Jiang Z., Marfurt K.J., Reches Z. 2017. Fault damage zone at subsurface: A case study using 3D seismic attributes and a clay model analog for the Anadarko Basin, Oklahoma. *Interpretation*, **5**(2):T143-T150. doi: <https://doi.org/10.1190/INT-2016-0033.1>
- Liner C., Li C.F., Gersztenkorn A., Smythe J. 2004. SPICE: A new general seismic attribute. *In*: SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 433-436. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1845256>

- Luiz J.G. & Silva L.M.C. 1995. Geofísica de prospecção: quadro geral *In*: Luiz J.G. & Silva L.M.C. *Geofísica de Prospecção*. CEJUP, Belém, p. 3-28.
- Madrussani, G., Rossi, G., Rebesco, M., Picotti, S., Urgeles, R., Llopart, J. 2018. Sediment properties in submarine mass-transport deposits using seismic and rock-physic off NW Barents Sea. *Marine Geology*, **402**:264-278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.11.013>
- Manzi M.S.D., Cooper G.R.J., Malehmir A., Durrheim R.J. 2020. Improved structural interpretation of legacy 3D seismic data from Karee platinum mine (South Africa) thought the application of novel seismic attributes. *Geophysical Prospecting*, **68**:145-163. doi: <http://doi.org/10.1111/1365-2478.12900>
- Marfurt K.J. 2006. Robust estimates of 3D reflector dip and azimuth. *Geophysics*, **71**(4):P29-P40. doi: <https://doi.org/10.1190/1.2213049>
- Marfurt K.J., Kirlin R.L., Farmer S.L., Bahorich M.S. 1998. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, **63**(4):P1150-P1165. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1444415>
- Martinsen O.J. 1989. Styles of soft-sediments deformation on a Namurian (Carboniferous) delta slope, Western Irish Namurian Basin, Ireland. *Geological Society, London, Special Publications*, **41**:167-177. doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.041.01.13>
- Martinsen O.J. 1994. Mass movements *In*: Maltman A (eds.) *The Geological Deformation of Sediments*. Dordrecht, Springer, p. 127-165. doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0731-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0731-0_5)
- Masson D.G., Huggett Q.J., Brunnsden D. 1993. The surface of the Saharan Debris Fow deposit and some speculations on submarine debris flow processes. *Sedimentology*, **40**, 583-598. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1993.tb01351.x>
- Middleton, G.V., Hampton M.A. 1973. Part I. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. *SEPM Society for Sedimentary Geology*, pp. 1-38.
- Mohriak W. 2012. Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo *In*: Hassui Y., Carneiro C.D.R., de Ameida F.F.M., Bartorelli A. (eds.) *Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca, p. 369-388.
- Moreira J.L.P. & Carminatti M. 2004. Sistemas deposicionais de talude e de bacia do Eoceno da Bacia de Santos. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências da Petrobras*, **12**(1):73-87.
- Moreira J.L.P., Madeira C.V., Gil J.A., Machado M.A.P. 2007. Bacia de Santos. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**(2):531-549.
- Mosccardelli L., Wood L., Mann P. 2006. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela. *AAPG Bulletin*, **90**(7):1059-1088. doi: <https://doi.org/10.1306/02210605052>
- Nanda N.C. 2016. Evaluation of High-Resolution 3D and 4D Seismic Data *In*: Nanda N.C. *Seismic Data Interpretation and Evaluation for Hydrocarbon Exploration and Production: A Practitioner's Guide*. Springer International Publishing, Switzerland, p. 129-148. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26491-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26491-2_8)

- Nardin T.R., Hein F.J., Gorsline D.S., Edwards B.D. 1979. A Review of Mass Movement Processes, Sediment and Acoustic Characteristics, and Contrasts in Slope and Base-of-Slope Systems Versus Canyon-fan-Basin Floor Systems In: Doyle L.J. & Pilkey O.H. (eds.) *Geology of Continental slopes*. SEPM Society for Sedimentary Geology, p. 61-73. doi: <https://doi.org/10.2110/pec.79.27.0061>
- Nemec W. 1990. Aspects of sediment movement on steep delta slopes In: Colella A. & Prior D.B. (eds.) *Coarse-Grained Deltas*. Spec.Publs int. Ass. Sediment, **10**:29-73.
- NEREUS – Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo. 2021. Shape files do Brasil – Unidades Federativas. Disponível em: <http://www.usp.br/nereus/?dados=brasil>. Acesso em: 13/06/2021.
- Neves F.A., Mohammad S.Z., Bremkamp S. 2004. Detection of potential fractures and small faults using seismic attributes. *The Leading Edge*, **23**(9):903-906. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1803500>
- Nugraha H.D., Jackson A.L., Johson H.D., Hodgson D. 2020. Seismic expression, structure and evolution of flow cells within a mass-transport complex. Preprint version. doi: <https://doi.org/10.31223/osf.io/zswe7>
- Nugraha H.D., Jackson C.A.L., Johson H.D., Hodgson D., Clare M.A. 2022. Extreme erosion by submarine slides. *Geology*. **50**(10), 1130-1134. doi: <https://doi.org/10.1130/G50164.1>
- Nwoko J., Kane I., Huuse M. 2020. Mass transport deposit (MTD) relief as a control on port-MTD sedimentation: Insights from the Taranki Basin, offshore New Zealand. *Marine and Petroleum Geology*. **120**, 104489. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104489>
- Ogata K., Mutti E., Pini G.A., Tinterri R. 2012. Mass transport-related stratal disruption within sedimentary mélanges: Examples from the northern Apennines (Italy) and south-central Pyrenees (Spain). *Tectonophysics*. **568-569**:185-199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.021>
- Oilfield Glossary 2021. Isochron map. Disponível em: [https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/i/isochron\\_map](https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/i/isochron_map) . Acesso em: 06/12/2021.
- Omeru, T., 2014. Mass Transport Deposits: Implications for Reservoir Seals. PhD Thesis, Cardiff University, Cardiff, 401 p.
- Omeru T. & Cartwright J.A. 2019. The efficacy of kinematic indicators in a complexly deformed Mass-Transport Deposit: Insights from the deepwater Taranaki Basin, New Zealand. *Marine and Petroleum Geology*, **106**:74-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.04.037>
- Omosanya K.O. & Alves T.M. 2013. Ramps and flats of mass-transport deposits (MTDs) as markers of seafloor strain on the flanks of rising diapirs (Espírito Santo Basin, SE Brazil). *Marine Geology*. **340**, 82-97. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.04.013>
- Ortiz-Karpf A., Hodgson D.M., Jackson C.A.-L., McCaffrey W.D. 2017. Influence of seabed morphology and substrate composition on mass-transport flow processes and pathways: insights from the Magdalena fan, offshore Colombia. *Journal of Sedimentary Research*. **87**, 198-209. doi: <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.10>

- Peterson G.L. 1965. Implications of two Cretaceous mass transport deposits, Sacramento Valley, California. *Journal of Sedimentary Petrology*, **35**(2):401-407.
- Posamentier H.W. & Martinsen O.J. 2011. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data. *SEPM Special Publications*, **95**:7-38.
- Posamentier H.W. & Walker R.G. 2006. Deep-Water Turbidites and Submarine Fans. In: Posamentier H.W. & Walker R.G. (eds.) *Facies Models Revisited*. SEPM Special Publications, p. 399-520. doi:<https://doi.org/10.2110/pec.06.84.0399>
- Qayyum F. & Groot P. 2012. Seismic Dips Help Unlock Reservoirs. *American Oil & Gas Reporter*, **60**:75-79.
- Randen T., Reymond B., Sjulstad H.I., Sønneland L. 1998. New Seismic Attributes for Automated Stratigraphic Facies Boundary Detection. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 628-631. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1820523>
- Rezvandehy M., Aghababaei H., Raissi S.H.T. 2011. Integrating seismic attributes in the accurate modeling of geological structures and determining the storage of the gas reservoir in Gorgan Plain (North Iran). *Journal of Applied Geophysics*, **73**:187-195. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.12.008>
- Roberts A. 2001. Curvature Attributes and Their Application to 3D Interpreted Horizons. *First break*, **19**(2):85-100. doi: <https://doi.org/10.1046/j.0263-5046.2001.00142.x>
- Rupke N.A. 1967. Large-scale slumping in a flysch basin, southwestern Pyrenees. *Journal of the Geological Society*. **132**, 121-130. doi: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.132.2.0121>
- Scarselli N., McClay K., Elders C. 2016. Seismic geomorphology of cretaceous megaslides offshore Namibia (Orange Basin): Insights into segmentation and degradation of gravity-driven linked systems. *Marine and Petroleum Geology*, **75**:151-180. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.03.012>
- Sebtosheikh M.A. & Salehi Ali. 2015. Lithology prediction by support vector classifiers using inverted seismic data and petrophysical logs as a new approach and investigation of training data set size effect on its performance in a heterogeneous carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **134**:143-149. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.08.001>
- Strachan L.J. 2002. Geometry to genesis: a comparative field study of slump deposits and their modes of formation (Unpublished PhD thesis). Cardiff, UK: University of Wales.
- Sobiesiak M.S., Kneller B., Alsop G.I., Milana J.P. 2016. Inclusion of Substrate Blocks Within a Mass Transport Deposit: A Case Study from Cerro Bola, Argentina In: Lamarche G., Mountjoy J., Bull S., Hubble T., Krastel S., Lane E., Micallef A., Moscardelli L., Mueller C., Pecher I., Woelz S., (Eds.). *Submarine Mass Movements and their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 41. Springer, pp. 487-496. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20979-1\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20979-1_49)

- Sobiesiak M.S., Kneller B., Alsop G.I., Milana J.P. 2018. Styles of basal interaction beneath mass transport deposits. *Marine and Petroleum Geology*, **98**:629-639. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.08.028>
- Taner M.T. 2001. Seismic attributes. *CSEG Recorder*, **27**(7):48-56.
- Taner M.T., Schuelke J.S., O'Doherty R., Baysal E. 1994. Seismic attributes revisited. *In: SEG Technical Program Expanded Abstracts*, p. 1104-1106. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1822709>
- Taner M.T., Koehler F., Sheriff R.E. 1979. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, **44**(6):1041-1063. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1440994>
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. Seismic Methods *In: Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 136-292.
- Verm R. & Hilterman F. 1995. Litology color-coded seismic sections: The calibration of AVO crossplotting to rock properties. *The Leading Edge*, **14**(8):847-853. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1437170>
- Wang Z. 2001. Fundamentals of seismic rock physics. *Geophysics*, **66**(2):398-412. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1444931>
- Wang D., Wu S., Yao G., Lü F., Strasser M. 2014. Transport Deposits Based on Seismic Data in Southern Deep-Water Region of Qiongdongnan Basin, South China Sea *In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y., (Eds). Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer, pp. 575-581. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0\\_88](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0_88)

## ANEXO 1 – *OUTPUTS* GERADOS PARA ALGUNS DOS ATRIBUTOS SÍSMICOS

Quadro A0.1: *Outputs* gerados com o atributo de decomposição espectral.

<b>Nome</b>	<b><i>Transform type</i></b>	<b><i>Wavelet</i></b>	<b><i>Output frequency (Hz)</i></b>
SD_FFT_10	FFT	-	10
SD_FFT_20	FFT	-	20
SD_FFT_40	FFT	-	40
SD_FFT_60	FFT	-	60
SD_CWT_Morlet_10	CWT	Morlet	10
SD_CWT_Morlet_20	CWT	Morlet	20
SD_CWT_Morlet_40	CWT	Morlet	40
SD_CWT_Morlet_60	CWT	Morlet	60
SD_CWT_Gaussian_10	CWT	Gaussian	10
SD_CWT_Gaussian_20	CWT	Gaussian	20
SD_CWT_Gaussian_40	CWT	Gaussian	40
SD_CWT_Gaussian_60	CWT	Gaussian	60
SD_CWT_Mexican_10	CWT	Mexiacan Hat	10
SD_CWT_Mexican_20	CWT	Mexiacan Hat	20
SD_CWT_Mexican_40	CWT	Mexiacan Hat	40
SD_CWT_Mexican_60	CWT	Mexiacan Hat	60

Quadro A0.2: *Outputs* gerados com o atributo de similaridade.

<b>Nome</b>	<b>Extention</b>	<b>Steering</b>
Similarity_1.1	<i>None</i>	<i>Full</i>
Similarity_1.2	<i>None</i>	<i>None</i>
Similarity_1.3	<i>None</i>	<i>Central</i>
Similarity_1.4	<i>None</i>	<i>Browse dip</i>
Similarity_2.1	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>Full</i>
Similarity_2.2	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>None</i>
Similarity_2.3	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>Central</i>
Similarity_2.4	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>Browse dip</i>
Similarity_3.1	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>Full</i>
Similarity_3.2	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>None</i>
Similarity_3.3	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>Central</i>
Similarity_3.4	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>Browse dip</i>
Similarity_4.1	<i>Full block</i>	<i>Full</i>
Similarity_4.2	<i>Full block</i>	<i>None</i>
Similarity_4.3	<i>Full block</i>	<i>Central</i>
Similarity_4.4	<i>Full block</i>	<i>Browse dip</i>
Similarity_5.1	<i>Cross</i>	<i>Full</i>
Similarity_5.2	<i>Cross</i>	<i>None</i>
Similarity_5.3	<i>Cross</i>	<i>Central</i>
Similarity_5.4	<i>Cross</i>	<i>Browse dip</i>
Similarity_6.1	<i>Diagonal</i>	<i>Full</i>
Similarity_6.2	<i>Diagonal</i>	<i>None</i>
Similarity_6.3	<i>Diagonal</i>	<i>Central</i>
Similarity_6.4	<i>Diagonal</i>	<i>Browse dip</i>
Similarity_7.1	<i>All directions</i>	<i>Full</i>
Similarity_7.2	<i>All directions</i>	<i>None</i>
Similarity_7.3	<i>All directions</i>	<i>Central</i>

Similarity _7.4	<i>All directions</i>	<i>Browse dip</i>
-----------------	-----------------------	-------------------

Quadro A0.3: *Outputs gerados com o atributo de semelhança.*

<b>Nome</b>	<b>Extention</b>	<b>Steering</b>
Semblance _1.1	<i>None</i>	<i>None</i>
Semblance _1.2	<i>None</i>	<i>Central</i>
Semblance _1.3	<i>None</i>	<i>Full</i>
Semblance _2.1	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>None</i>
Semblance _2.2	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>Central</i>
Semblance _2.3	<i>Mirror 90 degrees</i>	<i>Full</i>
Semblance _3.1	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>None</i>
Semblance _3.2	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>Central</i>
Semblance _3.3	<i>Mirror 180 degrees</i>	<i>Full</i>
Semblance _4.1	<i>Full block</i>	<i>None</i>
Semblance _4.2	<i>Full block</i>	<i>Central</i>
Semblance _4.3	<i>Full block</i>	<i>Full</i>
Semblance _5.1	<i>Cross</i>	<i>None</i>
Semblance _5.2	<i>Cross</i>	<i>Central</i>
Semblance _5.3	<i>Cross</i>	<i>Full</i>
Semblance _6.1	<i>All directions</i>	<i>None</i>
Semblance _6.2	<i>All directions</i>	<i>Central</i>
Semblance _6.3	<i>All directions</i>	<i>Full</i>
Semblance _7.1	<i>Diagonal</i>	<i>None</i>
Semblance _7.2	<i>Diagonal</i>	<i>Central</i>
Semblance _7.3	<i>Diagonal</i>	<i>Full</i>

Quadro A0.4: *Outputs* gerados com o atributo de curvatura.

<b>Atributo</b>	<b>Nome</b>	<b>Steering</b>
<i>Maximum curvature</i>	Cur_max-curvature	<i>Background Steering</i>
<i>Maximum curvature</i>	Cur_max-curvature-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Minimum curvature</i>	Cur_min-curvature	<i>Background Steering</i>
<i>Minimum curvature</i>	Cur_min-curvature-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Mean curvature</i>	Cur_mean	<i>Background Steering</i>
<i>Mean curvature</i>	Cur_mean-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Gaussian curvature</i>	Cur_gaussian	<i>Background Steering</i>
<i>Gaussian curvature</i>	Cur_gaussian-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Most positive curvature</i>	Cur_most-positive	<i>Background Steering</i>
<i>Most positive curvature</i>	Cur_most-positive-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Most negative curvature</i>	Cur_most-negative	<i>Background Steering</i>
<i>Most negative curvature</i>	Cur_most-negative-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Shape index</i>	Cur_shape-index	<i>Background Steering</i>
<i>Shape index</i>	Cur_shape-index-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Dip curvature</i>	Cur_dip-curvature	<i>Background Steering</i>
<i>Dip curvature</i>	Cur_dip-curvature-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Strike curvature</i>	Cur_strike-curvature	<i>Background Steering</i>
<i>Strike curvature</i>	Cur_strike-curvature-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Contour curvature</i>	Cur_contour-curvature	<i>Background Steering</i>
<i>Contour curvature</i>	Cur_contour-curvature-2	<i>Detailed Steering</i>
<i>Curvedeness</i>	Cur_curvedeness	<i>Background Steering</i>
<i>Curvedeness</i>	Cur_curvedeness-2	<i>Detailed Steering</i>

Quadro A0.5: *Outputs* gerados com o atributo de fratura.

<b>Nome</b>	<b><i>Input</i></b>	<b><i>Anomaly Threshold</i></b>	<b><i>Radius to scam</i></b>	<b><i>Evaluation tipe</i></b>
Fracture_proximity	Cur_max-curvature	0.004	252	-
Fracture_proximity-2	Cur_max-curvature-2	0.004	252	-
Fracture_density-c	Cur_max-curvature	0.004	252	<i>Circular</i>
Fracture_density-c2	Cur_max-curvature-2	0.004	252	<i>Circular</i>
Fracture_density-s	Cur_max-curvature	0.004	252	<i>Spherical (2500)</i>
Fracture_density-s2	Cur_max-curvature-2	0.004	252	<i>Spherical (2500)</i>