

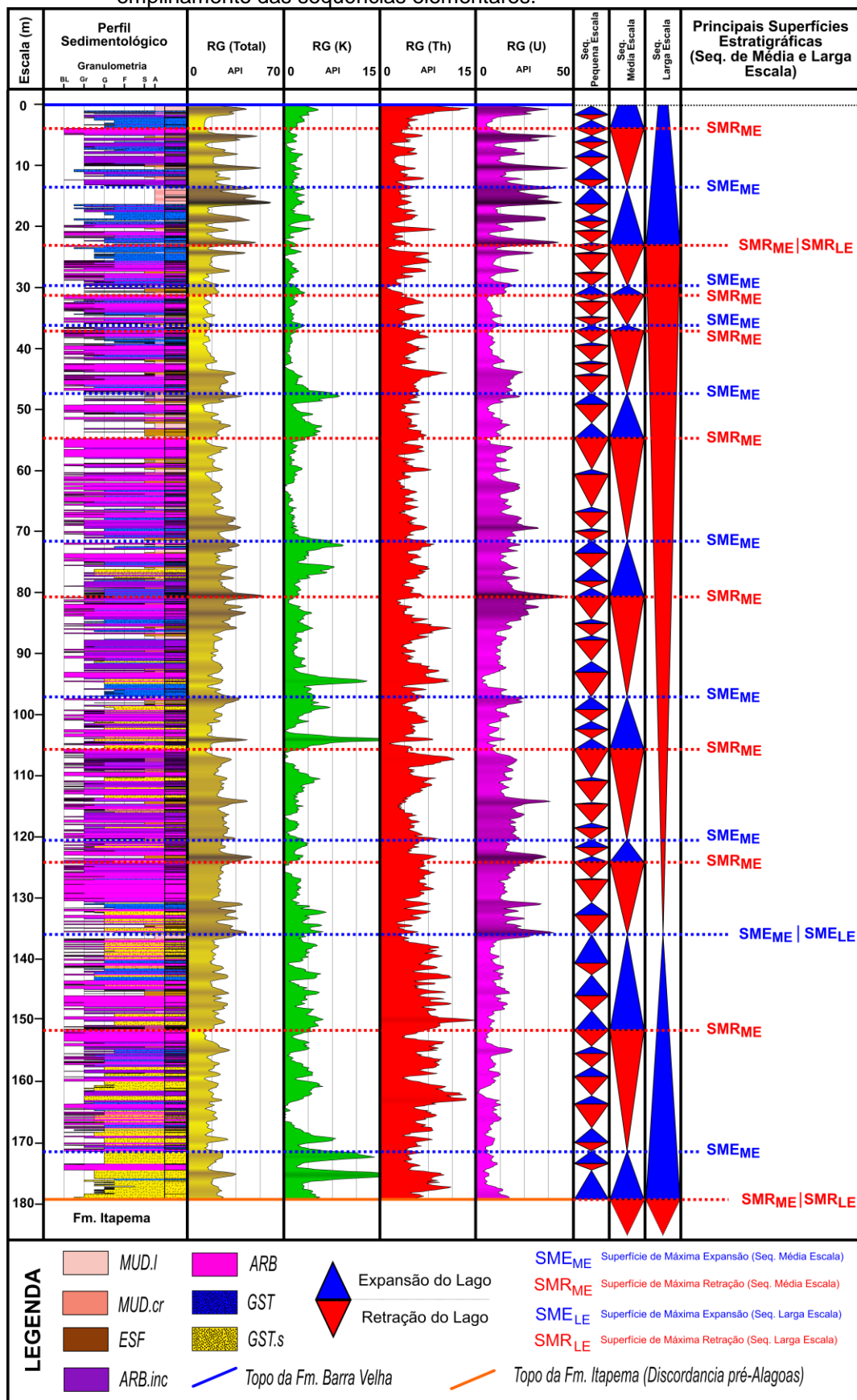
### 5.5 Hierarquização de sequências em diferentes escalas

Uma hierarquia de sequências atribui diferentes ordens às sequências estratigráficas - e suas superfícies limitantes - com base em suas importâncias relativas. A necessidade de hierarquização se torna evidente quando se considera que existem numerosas sequências no registro rochoso, usualmente de diferentes origens, relevantes para um amplo espectro de escalas temporais e espaciais e que, portanto, precisam ser racionalizadas em termos de seus padrões de aninhamento (CATUNEANU, 2006).

A análise do empilhamento das sequências elementares identificadas ao longo do intervalo analisado aponta para uma organização que permite a individualização de sequências em diferentes escalas. Catuneanu (2006) sugere um método de hierarquização de sequências que, *a priori*, independe do tempo de duração dos ciclos deposicionais, da magnitude das mudanças de nível de base, usualmente inferidas pela observação dos atributos físicos das superfícies estratigráficas, ou mesmo dos controles alogênicos envolvidos na gênese das mesmas. Nesta abordagem, a importância relativa das sequências e eventos que levam à materialização dos limites de sequência, é aferida primordialmente pela análise dos padrões de empilhamento faciológico, que emergem, em última análise, da relação entre as taxas de acomodação e de sedimentação, fomentando tendências. A ciclicidade de menor ordem, ou de mais alta frequência, descreve a mudança na tendência deposicional que pode ser observada no registro rochoso através da sobreposição de diferentes fácies, propiciando uma aplicação direta dos critérios faciológicos para a identificação de sequências. As maiores ordens de ciclicidade, ou menores frequências, refletem uma tendência deposicional, em escalas de observação cada vez maiores.

Seguindo esta lógica, na seção estudada as sequências de pequena escala (alta frequência), usualmente possuindo alguns metros de espessura, são formadas por um conjunto de sequências elementares (altíssima frequência), decimétricas. Por sua vez, as sequências de pequena escala se agrupam nas chamadas sequências de média escala (média frequência), que possuem dezenas de metros de espessura. Por fim, as sequências de média escala se agrupam, formando sequências de larga escala (baixa frequência), com centenas de metros de espessura (Figura 44).

Figura 44 – Perfil sedimentológico do intervalo testemunhado (Formação Barra Velha) do poço A e as três hierarquias de seqüências identificadas a partir do padrão de empilhamento das seqüências elementares.



Fonte: O autor, 2018.

O termo trato de fácies será novamente utilizado para as sequências de ordem superior à das sequências elementares, ainda que, de fato, estes intervalos sejam compostos de diversas sequências elementares, com múltiplas fácies, sendo considerado, neste caso, a análise de tendência de aumento na proporção de determinadas fácies, como será discutido a seguir.

Tratamento distinto foi dado às sequências de larga escala. Nestas, o termo trato de sistemas foi empregado, uma vez que as variações ambientais nelas contidas refletem mudanças significativas no arranjo paleogeográfico da bacia, por efeitos combinados de clima e tectônica, conforme será discutido ao longo deste capítulo. Assim, os tratos (ou conjunto de tratos) de larga escala materializam diferentes ambientes de sedimentação e, conseqüentemente, dos sistemas deposicionais resultantes. Desta forma, o termo trato de sistemas, definido por Brown e Fisher (1977) como sendo um conjunto de sistemas deposicionais contemporâneos e geneticamente relacionados, pode ser utilizado sem que haja uma distorção de seu significado original por uma questão de escala de análise.

Reforça-se que as sequências de diferentes escalas não possuem, a princípio, nenhuma conotação temporal absoluta embutida em suas definições, correspondendo apenas a variações de padrões de empilhamento faciológico em diferentes escalas (CATUNEANU, 2006). Porém, é evidente que os fatores controladores das variações nas condições ambientais responsáveis pela produção das diversas sequências atuam em diferentes escalas de tempo e de espaço, o que será discutido no ítem 5.8 do presente trabalho.

Desta forma, as sequências de pequena escala podem ser identificadas pelas variações nas proporções de fácies das sequências elementares. Intervalos de predomínio de fácies associadas aos períodos de expansão do lago nas sequências elementares, em especial das fácies finas, indicam tendência de diluição do corpo aquoso nas sequências de pequena escala, induzidos por altas taxas de precipitação pluviométrica, que causam a progressiva expansão e subida do nível do lago (aumento da acomodação). Este período caracteriza, nas sequências de pequena escala, o trato de fácies de lago em expansão (TFLE<sub>PE</sub>).

No momento em que uma inversão deste padrão de empilhamento ocorre, ou seja, quando as proporções de fácies associadas aos períodos de expansão do lago das sequências elementares diminuem de forma significativa, define-se a superfície de máxima expansão de pequena escala (SME<sub>PE</sub>). Este é o ponto de máxima

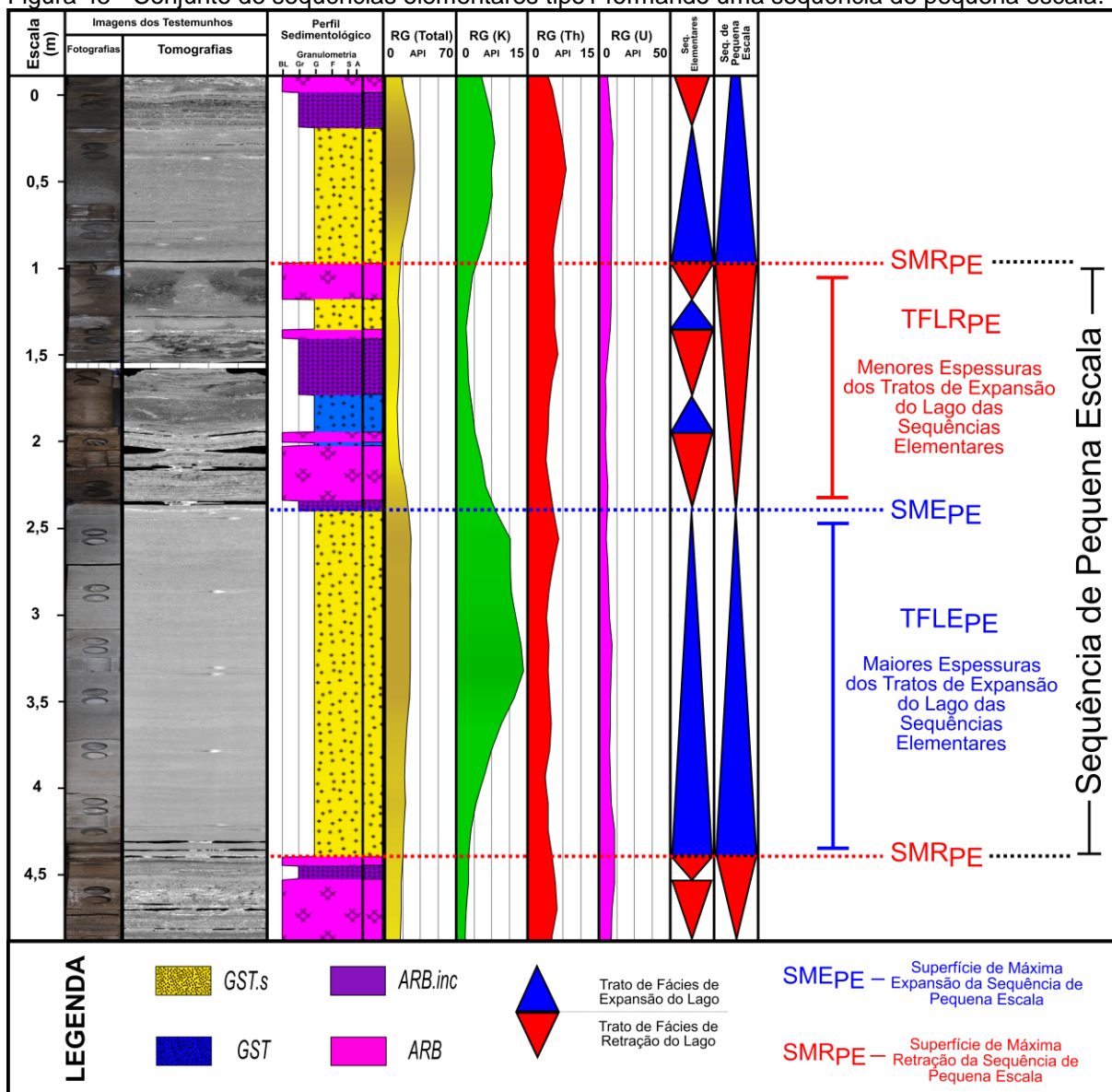
expansão do lago, bem como de máxima acomodação disponível, ao longo do tempo envolvido na formação da sequência de pequena escala.

A partir deste ponto, como corolário, as proporções de fácies associadas aos períodos de retração do lago das sequências elementares aumentam, em especial das fácies compostas por crostas e arborescências calcíticas (ARB.inc e ARB), indicando o aumento da salinidade e da alcalinidade do corpo aquoso, induzidas provavelmente por taxas de evaporação cada vez maiores, causando a progressiva retração e a queda do nível do lago (diminuição da acomodação). Este período caracteriza, nas sequências de pequena escala, o trato de fácies de lago em retração (TFLR<sub>PE</sub>).

No momento em que uma nova inversão de tendência no padrão de empilhamento ocorre, ou seja, quando as proporções de fácies associadas aos períodos de retração do lago das sequências elementares diminuem, define-se a superfície de máxima retração de pequena escala (SMR<sub>PE</sub>). Este é o ponto de máxima retração do lago, bem como de acomodação mínima ao longo do tempo envolvido na formação da sequência de pequena escala.

No total, foram definidas 47 sequências de pequena escala completas e 1 incompleta no poço A (Figura 44). As figuras 45, 46 e 47, mostram exemplos da definição destas sequências a partir das três sequências elementares tipificadas anteriormente. Observa-se que o padrão de perfil de raio gama espectral usualmente mostra uma assinatura distinta entre os tratos de sequências elementares de expansão e retração do lago das sequências de pequena escala, atingindo usualmente valores maiores (em especial no conteúdo de potássio) no primeiro, pelo predomínio de fácies finas ou retrabalhadas com alto conteúdo de siliciclásticos. Este padrão será importante na etapa de correlação estratigráfica (ítem 5.7), bem como balizador eventual na calibração do posicionamento das superfícies estratigráficas.

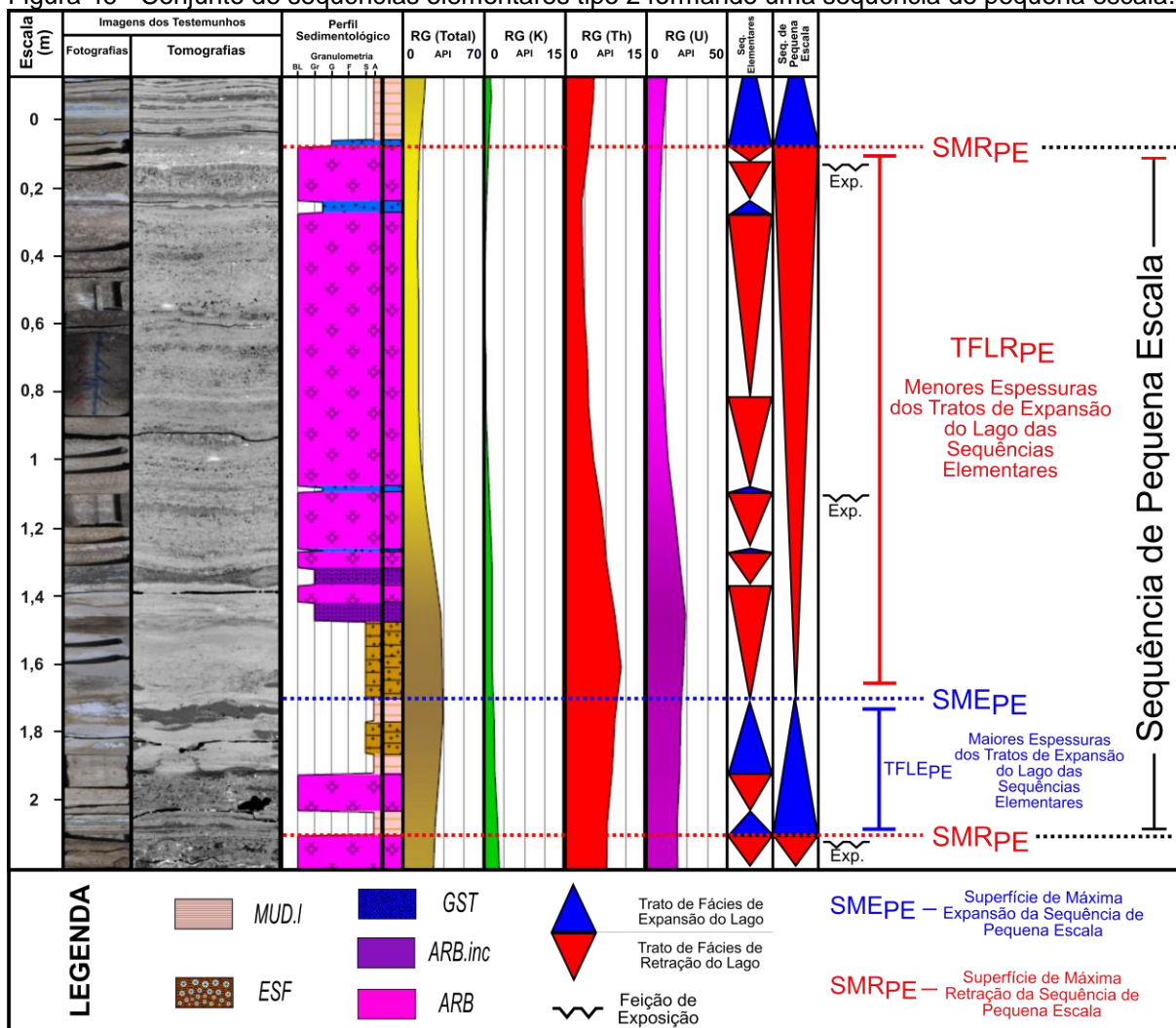
Figura 45 - Conjunto de seqüências elementares tipo1 formando uma seqüência de pequena escala.



Nota: Notar as variações nas proporções dos tratos de fácies das seqüências elementares ao longo de uma seqüência de pequena escala.

Fonte: O autor, 2018.

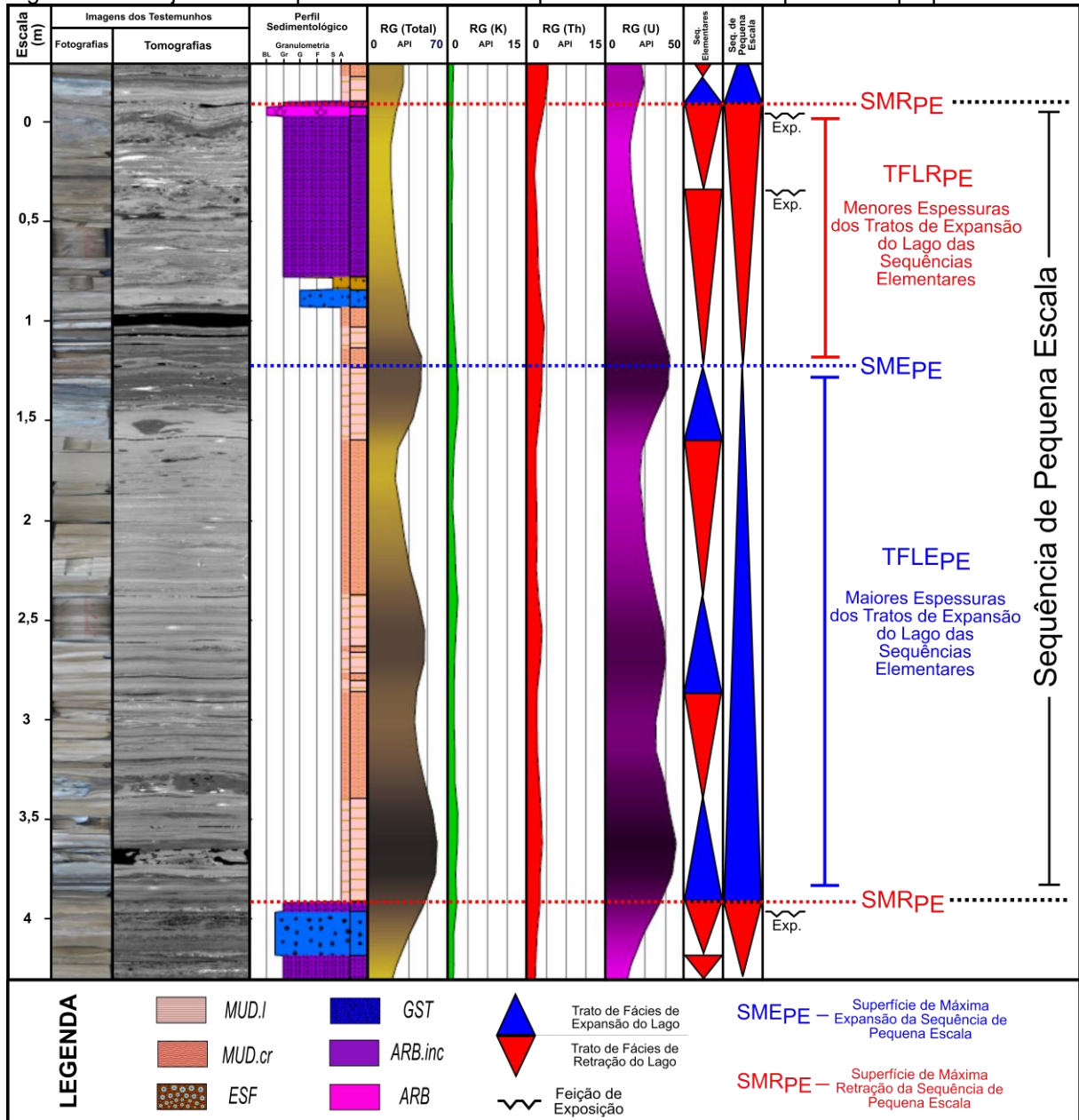
Figura 46 - Conjunto de seqüências elementares tipo 2 formando uma seqüência de pequena escala.



Nota: Notar as variações nas proporções dos tratos de fácies das seqüências elementares ao longo de uma seqüência de pequena escala.

Fonte: O autor, 2018.

Figura 47 - Conjunto de seqüências elementares tipo 3 formando uma seqüência de pequena escala.



Nota: Notar as variações nas proporções dos tratos de fácies das seqüências elementares ao longo de uma seqüência de pequena escala.

Fonte: O autor, 2018.

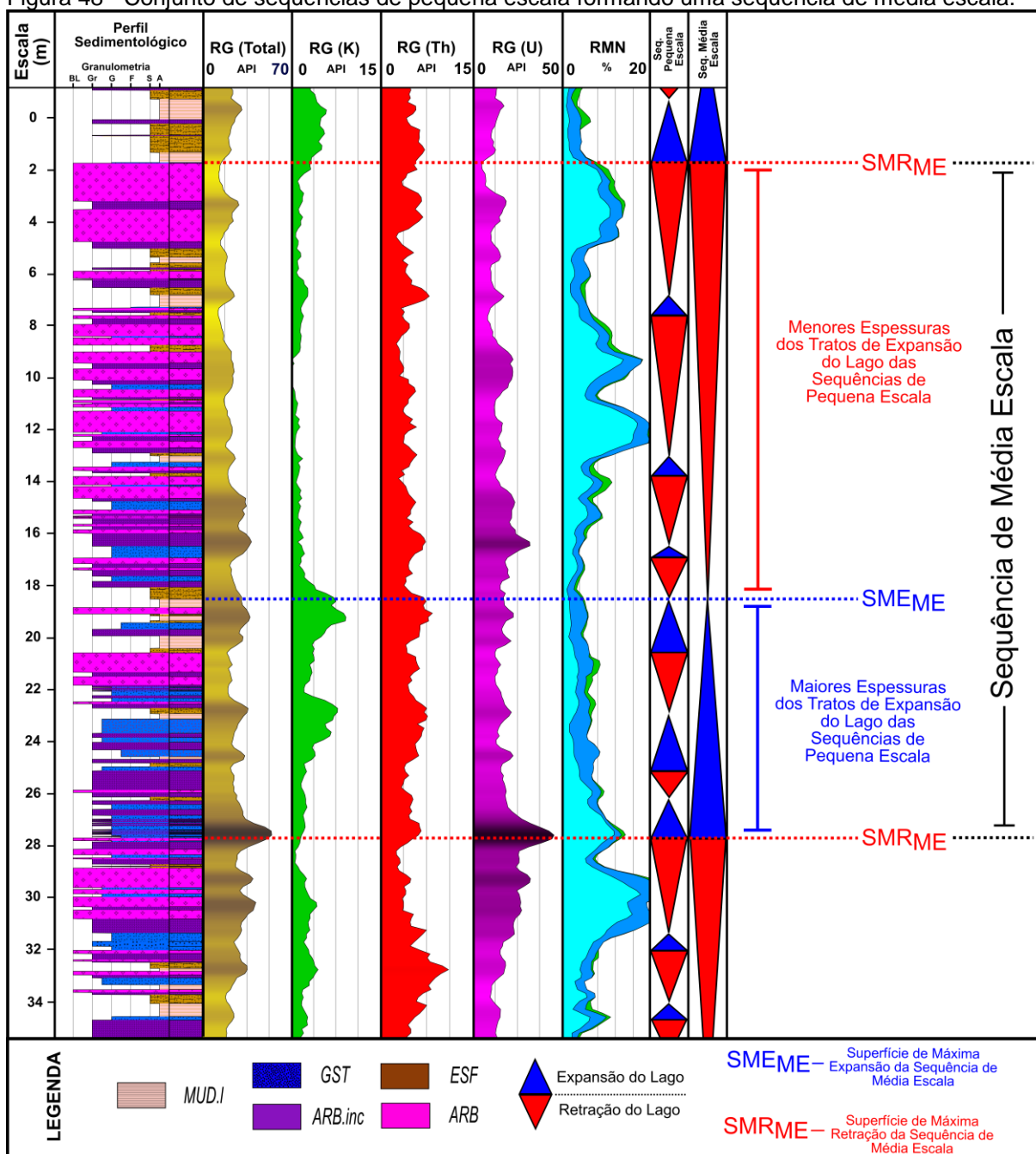


As sequências de média escala foram definidas utilizando a mesma lógica das sequências de pequena escala, sendo balizadas pelas tendências de variação das proporções de fácies associadas aos períodos de retração e expansão do lago das sequências de pequena escala. No total, foram definidas 9 sequências de média escala completas e 1 sequência incompleta no poço A (Figura 44). Um exemplo de hierarquização de uma sequência de média escala a partir das sequências de pequena escala é mostrado na figura 48. Deve-se notar a diferença em termos de assinatura de perfis elétricos entre os tratos de expansão e retração do lago de média escala. O primeiro apresenta maior conteúdo de potássio e uma clara tendência de diminuição de porosidade, graças ao aumento da proporção de fácies finas. O segundo, ao contrário, apresenta menor conteúdo de potássio e maiores porosidades, graças ao aumento das proporções de fácies formadas por constituintes arborescentes bem desenvolvidos, bem como pela influência de efeitos diagenéticos associados às exposições subaéreas, tais como dissolução e carstificação, mais frequentes neste trato de fácies.

As sequências de larga escala foram definidas utilizando a mesma lógica das sequências de pequena e média escala, sendo balizada pelas tendências de variação das proporções de fácies associadas aos períodos de retração e expansão do lago das sequências de média escala. No total, foram definidas apenas 1 sequência completa, com mais de 150 m de espessura, e outra incompleta no poço A (Figura 44). O registro sedimentar do período de expansão do lago da sequência de larga escala, limitado em sua base pela superfície de máxima retração ( $SMR_{LE}$ ), é denominado de trato de sistemas de lago em expansão ( $TSLE_{LE}$ ) e, caracteriza-se pelo aumento progressivo das espessuras dos tratos de fácies de lago em expansão das sequências de média escala. O registro sedimentar do período de retração do lago da sequência de larga escala, limitado em sua base pela superfície de máxima expansão ( $SME_{LE}$ ), é denominado de trato sistemas de lago em retração ( $TSLR_{LE}$ ) e, caracteriza-se pela diminuição progressiva das espessuras dos tratos de fácies de lago em expansão das sequências de média escala.



Figura 48 - Conjunto de seqüências de pequena escala formando uma seqüência de média escala.



Nota: Notar as variações nas proporções dos tratos de fácies das seqüências de pequena escala ao longo de uma seqüência de média escala.

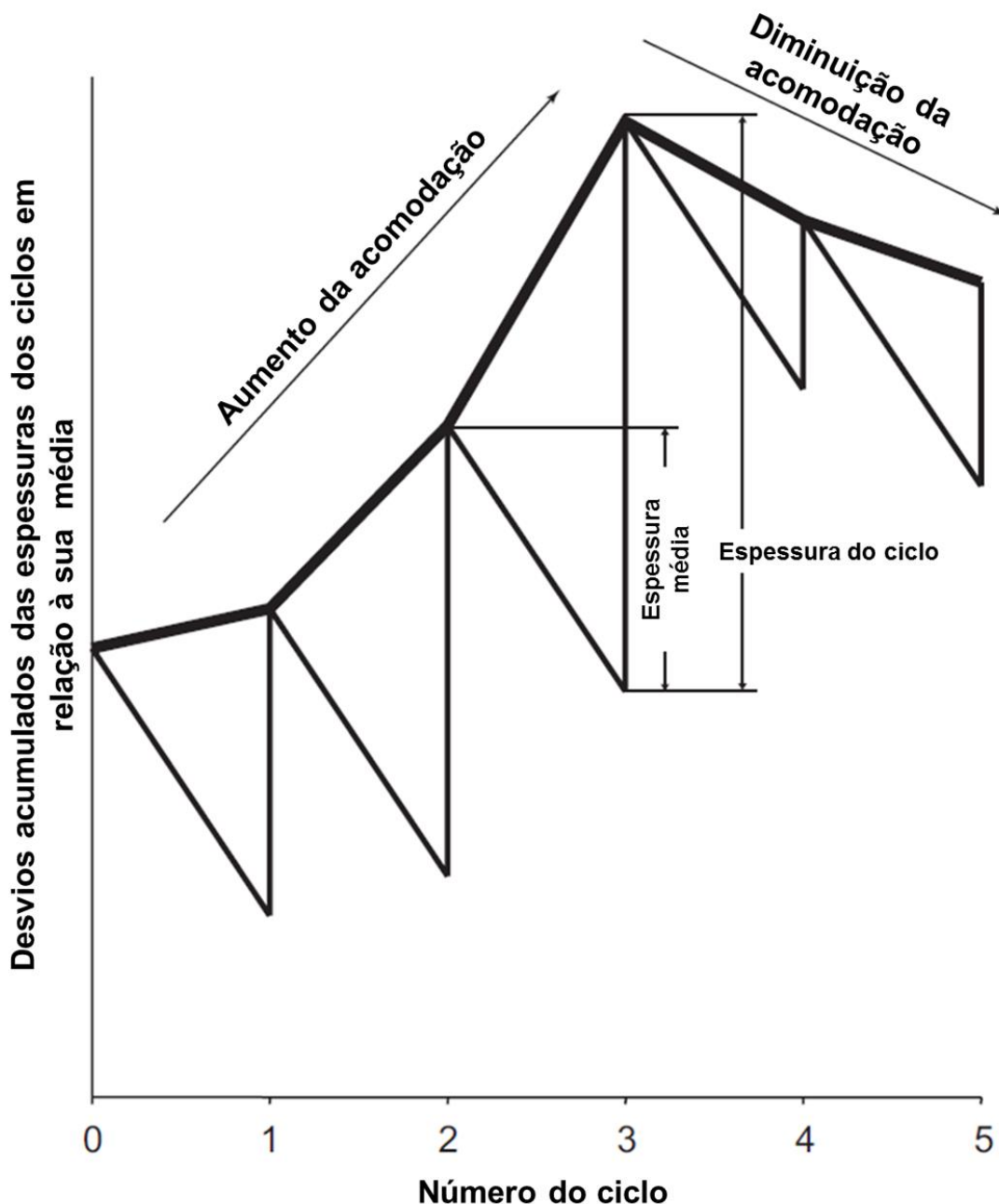
Fonte: O autor, 2018.

Com intuito de demonstrar graficamente os padrões de hierarquização das seqüências em diferentes escalas, *Fischer-plots* foram gerados a partir das seqüências elementares. Estes gráficos também serão utilizados posteriormente para corroborar as correlações estratigráficas propostas para os intervalos que possuem amostragem de rocha disponível em todos os três poços analisados.

Os chamados *Fischer-plots* são gráficos que ilustram o padrão de empilhamento de sucessões sedimentares cíclicas. São construídos acumulando os desvios das espessuras de cada ciclo em relação à média da espessura de todos os ciclos do intervalo. Usualmente são interpretados como curvas de variação do espaço disponível para acomodação de sedimentos (FISCHER, 1964; READ & GOLDHAMMER, 1988). Apesar da utilidade indiscutível para análise estratigráfica, diversas limitações existem para sua interpretação, uma vez que estes gráficos não irão contabilizar, por exemplo, a acomodação disponível e não preenchida pelos sedimentos durante um ciclo de variação de nível do lago. Igualmente, não irão contabilizar as espessuras perdidas durante momentos de erosão por emersão. Portanto, interpretar tais curvas como variações da acomodação ao longo do tempo exige vincular, de forma perfeita, a espessura dos ciclos à acomodação inicial disponível. Outra questão usualmente negligenciada diz respeito à compactação das rochas. Para um mesmo grau de soterramento, diferentes tipos de rocha irão sofrer variações de espessura distintas, o que pode alterar significativamente o resultado destes gráficos, causando interpretações equivocadas caso não sejam corrigidas (HILLGARTNER & STRASSER, 2003).

*Fischer-plots* são convencionalmente desenhados apresentando, no eixo vertical, o desvio acumulado das espessuras de cada ciclo em relação à média das espessuras de todos os ciclos e, no eixo horizontal, o número do ciclo, partindo da base para o topo da seção estudada (Figura 49). Portanto, aqueles ciclos que possuem espessuras maiores do que a média, irão causar um desvio positivo na curva, fazendo com que esta ascenda, sendo usualmente interpretados como indicativos de aumento na acomodação. Da mesma forma, ciclos que possuem espessuras menores do que a média, irão causar um desvio negativo na curva, fazendo com que esta descenda, sendo usualmente interpretados como indicativo de diminuição na acomodação.

Figura 49 – Exemplo de forma de construção de um *Fischer-plot* para uma sucessão de 5 ciclos ou sequências.



Nota: O número dos ciclos aumenta da esquerda, que constitui a base do intervalo analisado, para a direita, que constitui o topo do intervalo analisado.

Fonte: Modificado de HUSINEC et al., 2008.

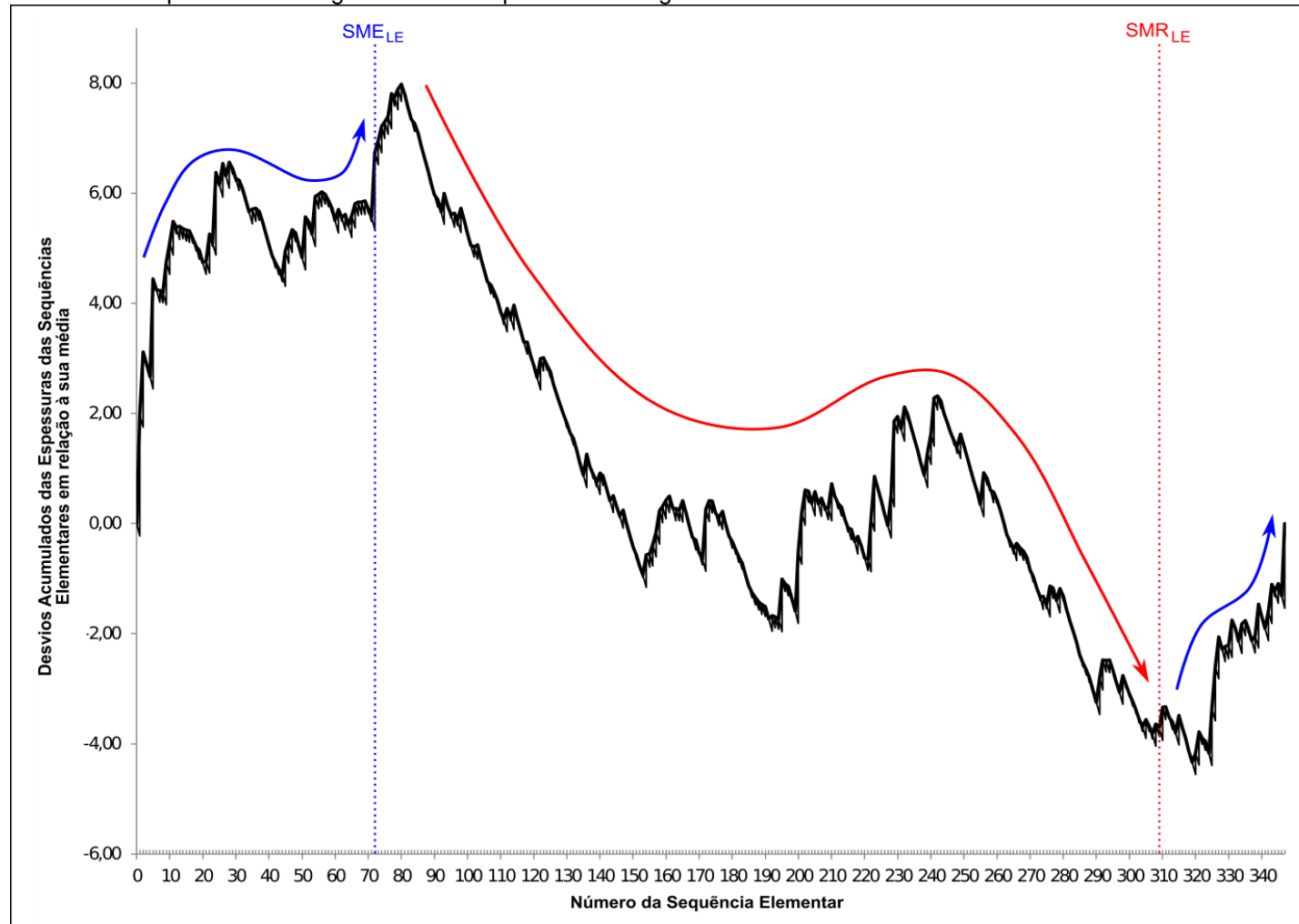
Com intuito de dirimir alguns dos problemas supracitados ao se utilizar estes gráficos, optou-se por realizar seu cálculo a partir das espessuras das sequências elementares no momento de expansão do lago, isto porque, durante os momentos de retração do lago, quando as taxas de precipitação carbonática se tornam elevadas, hiatos deposicionais por exposição subaérea são muito comuns. Além disso, variações locais nas taxas de precipitação, mesmo que sutis, podem fazer

com que as espessuras registradas em sítios deposicionais, com acomodação inicial similar, sejam significativamente distintas.

Como foi discutido anteriormente, os tratos de fácies de expansão do lago das sequências elementares são constituídos por fácies finas, com conteúdo lamoso/argiloso, e por fácies retrabalhadas de alta a moderada energia, com ou sem clastos de ígneas. Diversos autores destacam o comportamento distinto de diferentes fácies sedimentares, ao serem compactadas. Goldhammer (1997) demonstra que a maior parte da compactação em rochas carbonáticas lamosas ocorre nas primeiras centenas de metros de soterramento. O chamado fator de descompactação representa a razão entre a espessura inicial e a espessura atual (compactada) de um determinado intervalo de rocha (BALDWIN, 1971). Considerando um soterramento de centenas a poucos milhares de metros, este fator é de 1 a 1,2 para rochas carbonáticas suportada pelos grãos (*packstones* e *grainstones*) e de 2 a 2,5 para rochas carbonáticas suportadas por matriz (HILLGARTNER & STRASSER, 2003). Desta forma, torna-se essencial corrigir os efeitos da compactação diferencial, uma vez que as rochas analisadas sofreram importante soterramento, de cerca de milhares de metros. Para tal, foi utilizado um fator de descompactação de 2 para as fácies finas (MUD.I, MUD.cr e ESF), ou seja, suas espessuras foram multiplicadas por dois, para compensar o efeito de compactação diferencial em relação às fácies GST e GST.s.

As figuras 50, 51 e 52 mostram o mesmo *Fischer-plot*, construído com base nas espessuras (corrigidas pelo fator de descompactação) dos tratos de fácies de expansão do lago das sequências elementares identificadas no perfil sedimentológico do poço A. As superfícies estratigráficas de máxima expansão e de máxima retração do lago da sequência de larga escala são destacadas na figura 50 e as de média escala na figura 51, uma vez que elas marcam mudanças importantes no regime de sedimentação, indicando momentos de inversão na tendência de espessamento ou de adelgaçamento dos tratos de expansão do lago das sequências elementares. Igualmente, a figura 52 mostra uma ampliação da região do gráfico correspondente a uma das sequências de média escala (entre as sequências elementares 130 e 200), com intuito de destacar as superfícies de máxima expansão e de máxima retração do lago das sequências de pequena escala que a compõem.

Figura 50 – *Fischer-plot* confeccionado a partir das seqüências elementares, identificadas no poço A, destacando-se as superfícies estratigráficas das seqüências de larga escala.

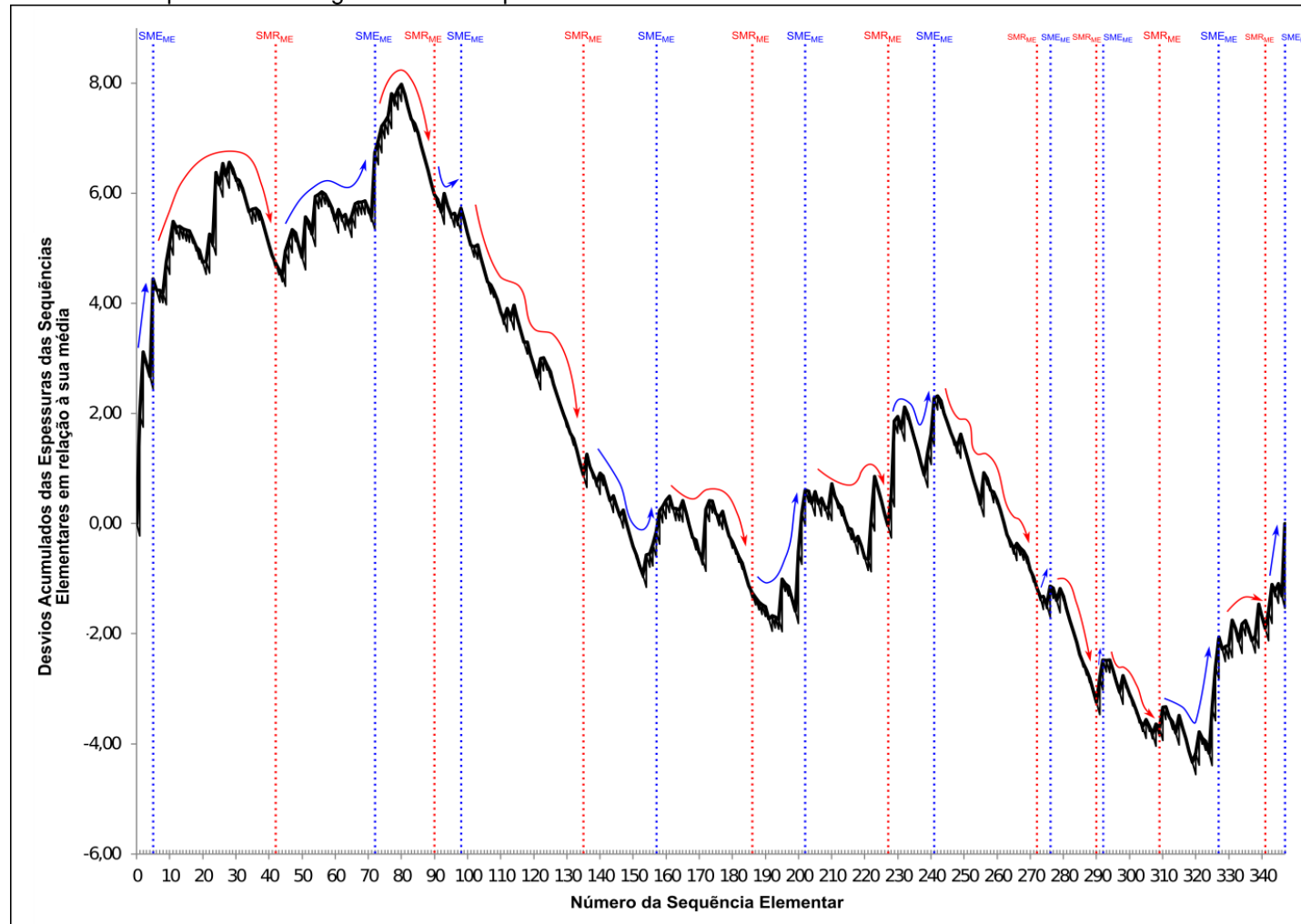


Legenda: SME<sub>LE</sub> – Superfície de Máxima Expansão de Larga Escala. SMR<sub>LE</sub> – Superfície de Máxima Retração de Larga Escala.

Nota: Setas vermelhas indicam tendências de redução de acomodação e setas azuis de incremento de acomodação.

Fonte: O autor, 2018.

Figura 51 – *Fischer-plot* confeccionado a partir das seqüências elementares, identificadas no poço A, destacando-se as superfícies estratigráficas das seqüências de média escala.

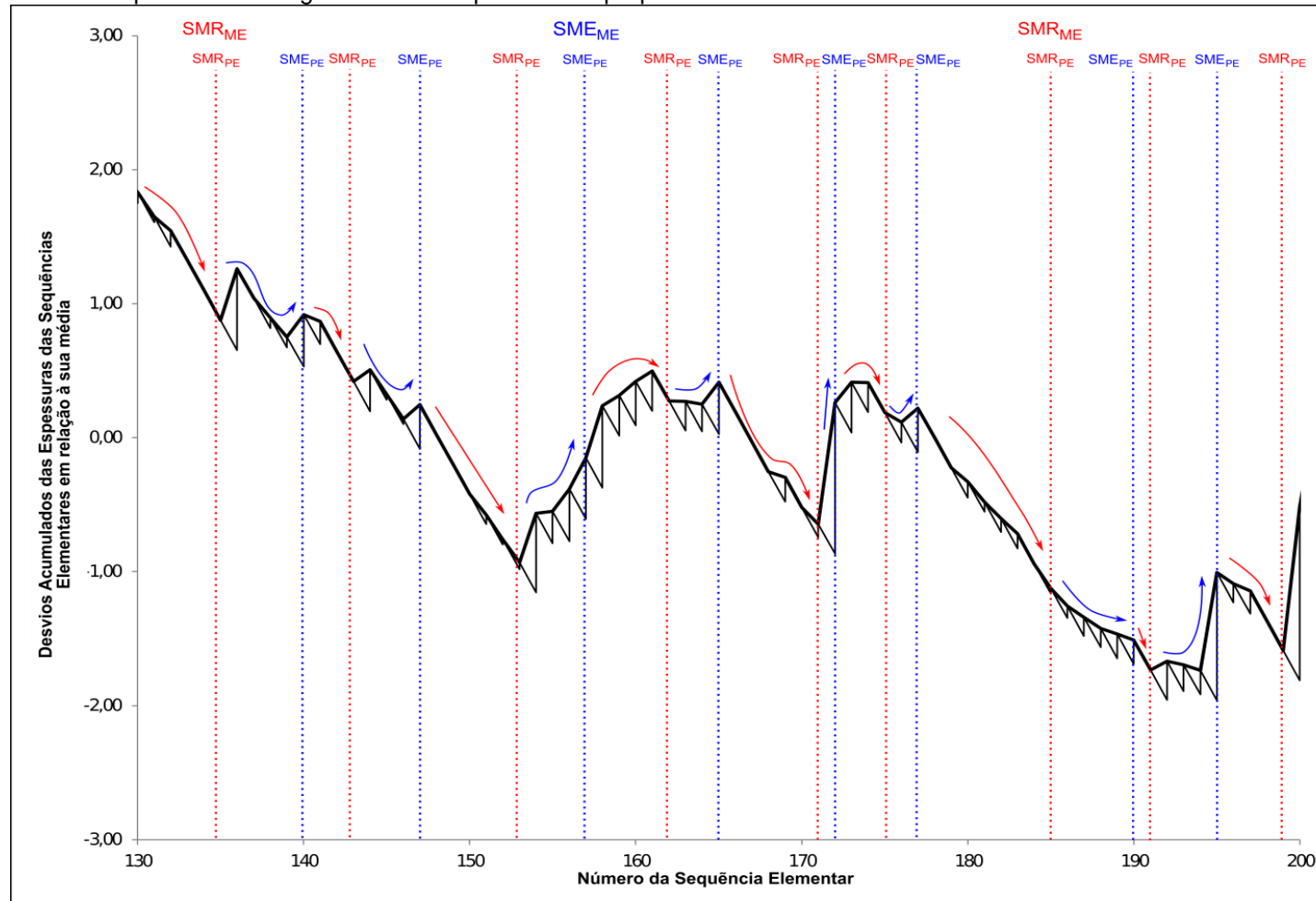


Legenda:  $SME_{ME}$  – Superfície de Máxima Expansão de Média Escala.  $SMR_{ME}$  – Superfície de Máxima Retração de Média Escala.

Nota: Setas vermelhas indicam tendências de redução de acomodação e setas azuis de incremento de acomodação.

Fonte: O autor, 2018.

Figura 52 – Detalhe de um trecho do *Fischer-plot* da figura 50, referente a uma sequência de média escala, destacando-se as superfícies estratigráficas das sequências de pequena escala.



Legenda: SME<sub>ME</sub> – Superfície de Máxima Expansão de Média Escala. SMR<sub>ME</sub> – Superfície de Máxima Retração de Média Escala. SME<sub>PE</sub> – Superfície de Máxima Expansão de Pequena Escala. SMR<sub>PE</sub> – Superfície de Máxima Retração de Pequena Escala.

Nota: Setas vermelhas indicam tendências de redução de acomodação e setas azuis de incremento de acomodação.

Fonte: O autor, 2018.