

4

Modelo geológico

Neste capítulo são descritos os processos geológicos considerados neste trabalho para modelagem direta e determinística da formação e evolução de plataformas carbonáticas. As formulações matemáticas ligadas a esses processos são demonstradas e seus parâmetros explicados.

4.1. Eustasia e Subsidência

A eustasia é a variação absoluta do nível do mar pelo tempo geológico causado por efeitos tectônicos, climáticos e gravitacionais, principalmente. A subsidência é a movimentação vertical negativa do substrato das bacias causada por efeitos tectônicos e térmicos. Juntando esses dois fenômenos geológicos, pode-se descrever curvas de variação do nível relativo do mar. Essa superposição indica o espaço de acomodação disponível entre o topo do nível do mar e o embasamento do fundo do mar. Movimentações tectônicas não são simuladas neste modelo, porém são incorporadas nas curvas relativas. Para áreas não muito acima de 10 km por 10 km onde não se identifica subsidência extensiva, o uso de curvas de nível de mar relativo é bastante satisfatório (Warrlich, 2001). Na Figura 4.1., pode-se ter uma melhor visualização desses conceitos (Posamentier *et al*, 1988):

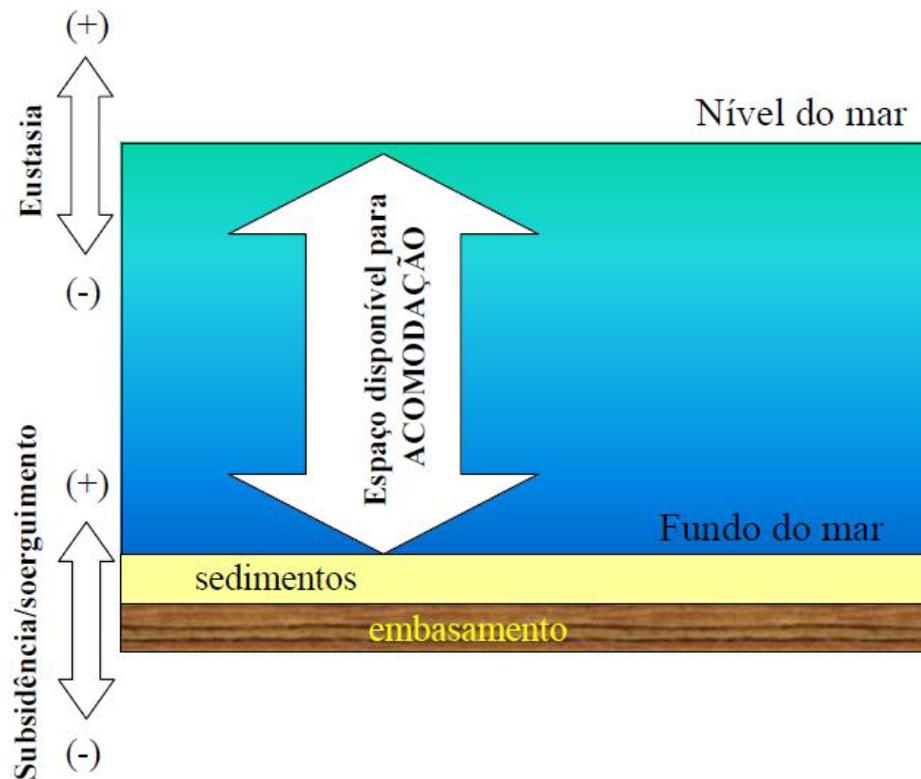


Figura 4.1. Conceitos de eustasia, subsidência e nível relativo do mar.

Na geologia sedimentar, dois principais tipos de curvas eustáticas são utilizados: curvas de baixa frequência (Haq *et al*, 1987; Harland, 1982) e curvas de alta frequência. As curvas de alta frequência são curvas harmônicas sobrepostas baseadas na equação do movimento ondulatório:

$$NM = A \sin(\omega t + \theta) \quad (4.1)$$

Sendo:

NM – nível do mar;

A – amplitude máxima das flutuações do nível do mar;

$\omega = 2\pi/T$, onde T é o período em que essa amplitude máxima se repete;

t – o tempo geológico;

θ – angulo de fase da equação de movimento ondulatório.

Na modelagem de deposição carbonática, é comum a sobreposição de curvas com os seguintes períodos: 1 000 000 a 10 000 000 de anos (terceira ordem), 100 000 a 400 000 anos (quarta ordem) e aproximadamente 40 000 anos (quinta ordem) (Reading & Levell, 1996). Para simular o efeito da subsidência, é

acrescentada uma parcela de variação linear à Eq. 4.1, fazendo com que a função senoidal da curva eustática seja superposta à variação linear da subsidência, montando assim a curva da variação do nível relativo do mar. A Figura 4.2. mostra um exemplo de curva de variação do nível relativo do mar, para um período de terceira ordem superposto a um período de quarta ordem e uma subsidência linear.

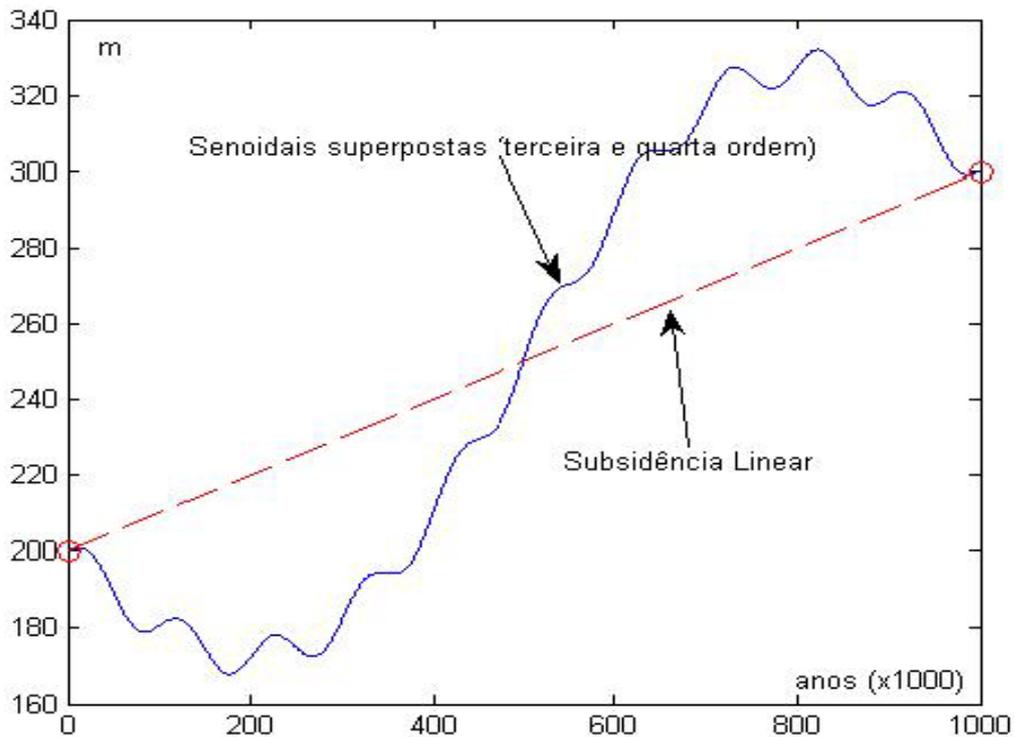


Figura 4.2. Exemplo de curva de nível relativo do mar utilizada no modelo.

E a nova equação do nível do mar fica:

$$NM = A1.\text{sen}(\omega1.t + \theta) + A2.\text{sen}(\omega2.t) + at \quad (4.2)$$

Sendo:

α - a variação linear da subsidência;

$A1$ e $A2$ - a amplitude relativa ao período de menor e maior ordem, respectivamente;

$\omega1$ e $\omega2$ - frequência angular relativos ao período de menor e maior ordem, respectivamente.

As curvas de variação do nível do mar são fortemente ligadas aos *Systems Tracts*, que são unidades estratigráficas associadas geneticamente que foram depositadas durante fases específicas do ciclo de nível relativo do mar (Posamentier *et al.*, 1988). Essas unidades aparecem em forma de aglomerados tridimensionais de fácies e definidas baseando-se em superfícies limitantes e sua posição dentro de um ciclo (Van Wagoner *et al.*, 1988). Durante um ciclo de nível relativo do mar, três principais *Systems Tracts* foram vistos neste trabalho:

- *Lowstand Systems Tracts (LST)*: acontece durante um intervalo de rebaixamento do nível do mar e um crescimento lento subsequente. Neste intervalo pode ocorrer do espaço de acomodação ser menor do que a velocidade de deposição, ocorrendo migração para locais mais profundos.
- *Transgressive Systems Tracts (TST)*: são depositados durante a rápida subida do nível do mar, em muitos casos a subida pode ser mais rápida do que o aporte de sedimentos terrígenos e/ou o crescimento carbonático *in situ*. A velocidade máxima de elevação do nível do mar acontece durante o *TST*, e o fim do ciclo acontece quando as taxas de sedimentação conseguem acompanhar novamente a subida do nível do mar.
- *Highstand Systems Tracts (HST)*: este ciclo ocorre quando a sedimentação já é maior do que a criação de espaço de acomodação. No final do ciclo o nível do mar começa a descer novamente entrando em um *LST*.

Suas relações com as curvas de nível do mar são mostradas na Figura 4.3.

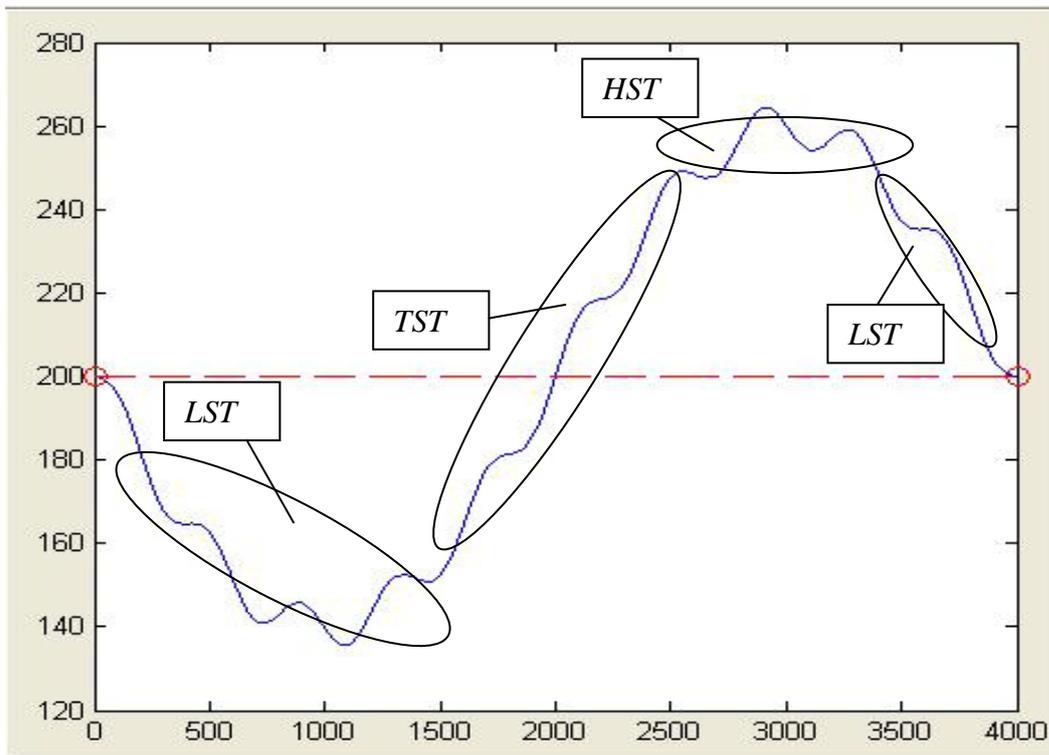


Figura 4.3.: Ciclos na curva de nível do mar onde ocorrem os principais *System Tracts*.

4.2. Produção Carbonática

Como descrito anteriormente, três tipos de fábricas carbonáticas são utilizadas nesse trabalho: águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas. Cada uma dessas fábricas será relacionada com uma taxa máxima de produção *in situ*. Nos recifes antigos, as taxas de crescimento costumam ser mais baixas do que as taxas encontradas em exemplos modernos, isto ocorre principalmente pelo fato de os recifes antigos terem sofrido mais com a influência das flutuações do nível do mar, algo que não pode ser verificado em recifes modernos pela escala geológica de tempo. A partir da recomposição dos dados antigos com os modernos, as taxas máximas de produção carbonática *in situ*, em metros por mil anos (m/kA), para as três fábricas, podem ser derivadas e são o ponto de partida do modelo. Essas taxas representam o crescimento vertical positivo em metros, para cada mil anos, de uma determinada fábrica carbonática em suas condições perfeitas de produção. As condições de produção podem variar devido à presença de luz, e paralelamente, à batimetria do fundo do mar e às condições marinhas. Para representar as condições de produção, são utilizadas

diversas funções de restrição (Chappell, 1980), que, em função das condições apresentadas, reduzem as taxas máximas de produção para cada fábrica carbonática. Essas funções variam de 0 a 1 e à partir delas podemos calcular a taxa resultante de produção para um determinado carbonato:

$$P_R(x,y,z) = P_M * S(x,y,z) \quad (4.3)$$

Sendo:

P_R - Taxa resultante de produção para determinado carbonato

P_M - Taxa máxima de produção para determinado carbonato

$S(x,y,z)$ - Função de restrição

Assim sendo, em seu valor máximo de 1, a função de restrição indica condições perfeitas de produção e conseqüentemente taxas máximas de crescimento carbonático *in situ*. Quando nula, a função de restrição indica condição adversas à produção e crescimento carbonático nulo. Diferentes funções de restrição são utilizadas para quantificar cada uma das condições ideais de produção e juntadas de forma adequada para representar a condição de crescimento de cada fábrica carbonática. A Eq. 4.3 pode, então, ser desenvolvida para cada tipo de carbonato:

$$P_R(x, y, z, c) = P_M(c) * \prod_{i=1}^n S_i(x, y, z) \quad (4.4)$$

Sendo:

c - Tipo de carbonato

n - Quantidade de funções de restrição necessárias para quantificar as condições de produção do carbonato c .

A seguir serão relacionadas as funções de restrição utilizadas nesse trabalho.

4.2.1. Restrição por profundidade

Essa restrição se aplica nos carbonatos de águas rasas devido à dependência à fotossíntese dos organismos produtores dessas regiões. A disponibilidade de luz é um fator importante para o crescimento desses organismos (Bosscher &

Schlager, 1992). Esse fato é controlado pela profundidade, já que a luz é absorvida ao longo da coluna d'água, e pela turbidez da água nessa região. Inúmeras medições comprovaram que a intensidade de radiação solar disponível em uma determinada profundidade decresce exponencialmente seguindo a lei de Beer-Lambert (Chalker, 1981; Bosscher 1992). Para águas mais turvas a intensidade da radiação solar decresce mais rapidamente:

$$I_z = I_o e^{\frac{-z}{\sigma_d}} \quad (4.5)$$

Sendo:

I_z - Intensidade da radiação solar na profundidade z

I_o - Intensidade da radiação solar na superfície do nível do mar

z - Profundidade em m

σ_d - Profundidade de atenuação da função exponencial em m. Para águas claras, essa profundidade é da ordem dos 30 metros, em águas turvas varia de 1 a 5 metros.

A atenuação da radiação solar pela profundidade é bem quantificada na literatura, porém é preciso saber o impacto que essa atenuação tem sobre os organismos responsáveis pelo crescimento das rochas carbonáticas. Essa relação é bastante complicada de se obter e foi através de estudos em recifes modernos que foi constatado que o crescimento próximo do nível do mar é bastante constante e cai drasticamente em profundidades acima de uma profundidade limite para níveis de luminosidade ideal de um determinado organismo. Daí foi retirada a seguinte relação de proporcionalidade (Bosscher & Schlager, 1992; Bosscher, 1992):

$$P(z, c) \equiv \tanh(L * e^{\frac{-z}{\sigma_d}}) \quad (4.6)$$

Sendo:

P - Taxa de produção de um determinado carbonato na profundidade z

L - Fator adimensional de transição entre a região de profundidades onde as condições de luminosidade são próximas do ideal e as profundidades onde a produção decai exponencialmente

Analisando o lado direito da relação 4.6 de proporcionalidade, é constatado que ela tem um domínio entre 0 e 1, sendo uma boa candidata para a função de restrição por profundidade. Falta considerar o efeito de restrição devido à ação das ondas, esse pode ser representado de maneira bem simples como um crescimento linear à partir do nível do mar até o nível de base das ondas. Para um nível de base das ondas, z_b , pode-se definir a função de restrição por profundidade, S_{od} , como sendo:

$$S_{od} = \frac{z}{z_b} \quad (4.7)$$

para valores de z entre 0 e z_b ;

$$S_{od} = \tanh\left(L * e^{\frac{-(z-z_b)}{\sigma_d}}\right) \quad (4.8)$$

para valores de z acima de z_b .

A Figura 4.4 a seguir mostra o formato da função de restrição por profundidade S_{od} .

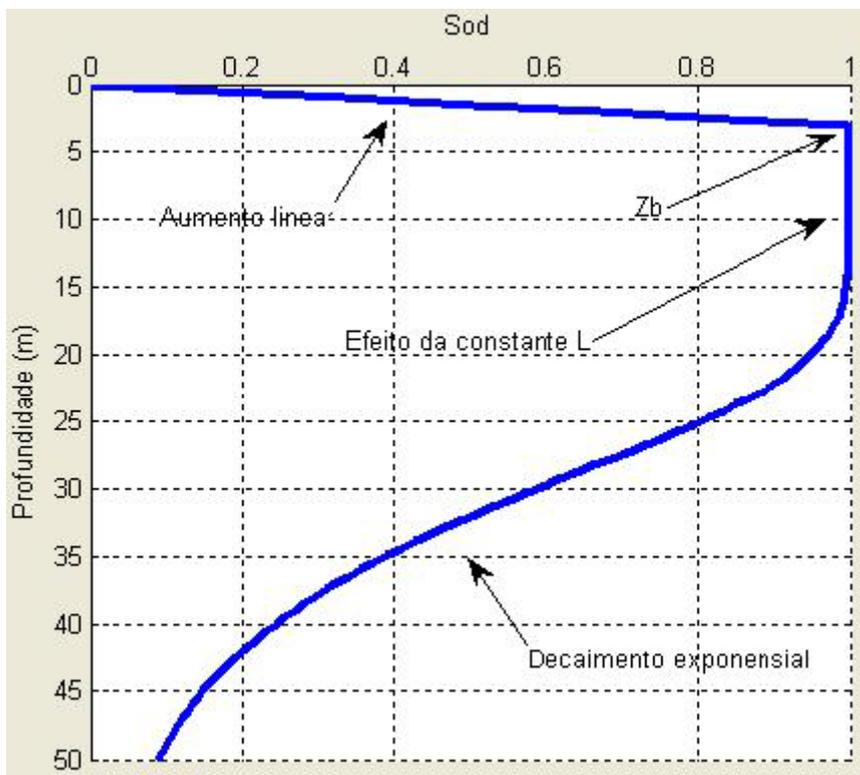


Figura 4.4. Função de restrição por profundidade.

4.2.2. Restrição por condições marinhas

Os organismos produtores de rochas carbonáticas em águas rasas, além da luminosidade, necessitam de condições marinhas ideais em relação à salinidade, a nutrientes e a temperatura. Essas condições podem mudar bastante devido ao posicionamento geométrico em uma plataforma carbonática. Em um local mais próximo a mar aberto, há uma recirculação maior da água marinha, mantendo assim os níveis de salinidade parecidos com os do mar aberto e obtendo uma boa renovação de nutrientes. Em águas restritas são muitas vezes encontradas situações de hipersalinidade e de baixa renovação de nutrientes. São essas condições que separam as duas fábricas carbonáticas de águas rasas: águas rasas restritas e águas rasas abertas. Como é muito difícil de quantificar níveis de salinidade e nutrientes para o passado geológico, esse problema foi transformado em um problema geométrico (Warrlich *et al.*, 2002). Locais na margem de uma plataforma, ou seja, de baixa profundidade, porém próximos de locais de maior profundidade são considerados de águas abertas e locais no interior de uma plataforma, ou seja, de baixa profundidade e envolvidos de locais de baixa profundidade, são considerados de águas restritas. A função de restrição por condições marinhas será relacionada à distância da região estudada até locais de borda de plataforma. Porém essas distâncias são complicadas de calcular, principalmente para geometrias irregulares. Uma maneira relativamente simples, e possível de automatizar computacionalmente, para se ter uma noção dessas distâncias é utilizando um perfil de profundidades suavizadas (Warrlich *et al.*, 2002).

A profundidade suavizada de um ponto na superfície do fundo do mar sofre influências das profundidades dos pontos em seu entorno, assim pode-se determinar a posição relativa desse ponto através de sua profundidade suavizada. Para efetuar esta suavização, a profundidade em cada ponto da superfície original do fundo do mar é ajustada através de um filtro que leva em conta a influência das profundidades dos pontos em seu entorno. Esta influência é maior para pontos mais próximos do ponto em questão e decresce até um nível irrelevante para pontos mais distantes. Baseando-se nestas profundidades suavizadas, é possível determinar para cada ponto seu grau de proximidade com regiões mais profundas

e regiões mais rasas; e conseqüentemente determinar seu posicionamento na plataforma carbonática em relação à borda e à parte interna.

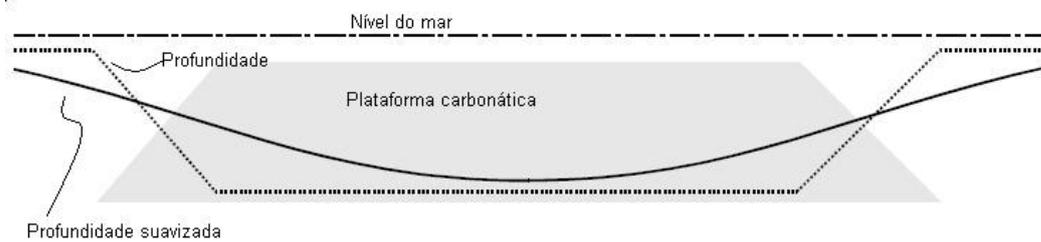


Figura 4.5. Perfil de profundidade suavizado e normal através de um corte transversal de uma plataforma carbonática.

Uma análise na Figura 4.5 mostra que para profundidades originais iguais, um ponto na borda da plataforma tem uma profundidade suavizada maior que um ponto no interior da plataforma. No ponto da borda, apesar de sua profundidade original ser igual ao do ponto mais interno, a profundidade suavizada tem mais influência dos pontos em seu entorno com maiores profundidades. Baseado nesse fato será feita uma suavização da superfície do fundo do mar utilizando um filtro Gaussiano (Figura 4.6.) a partir da seguinte convolução (Warrlich, 2001):

$$z_s(x, y) = z(x, y) \otimes G(x, y) \quad (4.9)$$

Sendo:

$z_s(x, y)$ - Profundidade suavizada em (x, y)

$z(x, y)$ - Profundidade em (x, y)

$G(x, y)$ - Filtro Gaussiano utilizado como *kernel* da convolução

$$G(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma_G} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_G^2}} \quad (4.10)$$

Sendo:

σ_G - Desvio padrão da distribuição de Gauss, quanto maior, maior será a área de influência da suavização.

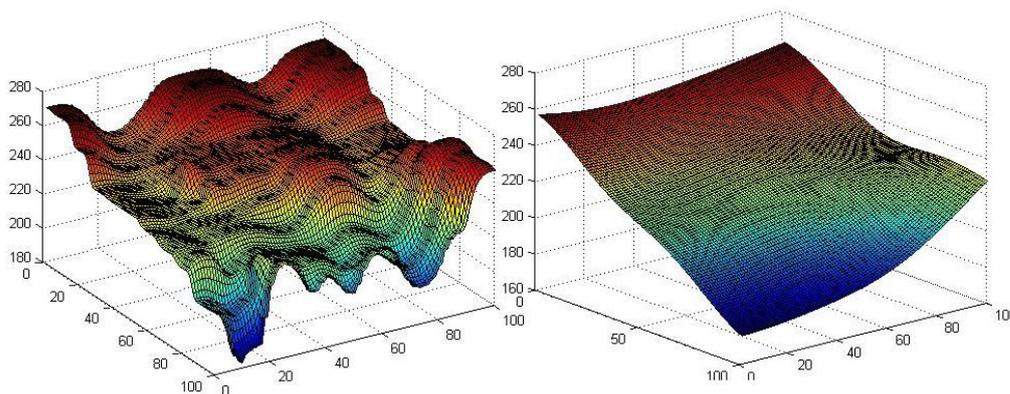


Figura 4.6. Exemplo de uma superfície suavizada com um filtro Gaussiano.

A função de restrição por condições marinhas é quantificada pelas profundidades suavizadas. Para isso, pode-se usar uma função exponencial parecida com a função de restrição por profundidade (Warrlich *et al.*, 2002):

$$S_{OM}(x, y) = 1 - e^{\frac{-z_S(x, y)}{\sigma_M}} \quad (4.11)$$

Sendo:

$S_{OM}(x, y)$ - Restrição devido ao desvio de condições marinhas ideais para carbonatos de águas abertas

σ_M - Fator de atenuação exponencial

Dessa forma, a restrição terá valor nulo para valores nulos da profundidade suavizada e crescerá exponencialmente junto à mesma.

No caso de carbonatos de águas rasas e restritas, suas condições ideais de crescimento acontecem justamente em locais de interior de plataforma e se pode usar o mesmo perfil de profundidades suavizadas para determinar sua função de restrição (Warrlich, 2001):

$$S_{RM} = 1 - S_{OM} \quad (4.12)$$

Sendo:

S_{RM} - Restrição devido ao desvio de condições marinhas ideais para carbonatos de águas restritas

4.2.3. Restrição por deposição de sedimentos soltos

Taxas de deposição de sedimentos soltos transportados, sejam de origem terrígena proveniente de aporte fluvial ou de origem carbonática previamente depositada *in situ* e depois erodidas, podem inibir o crescimento *in situ* de rochas carbonáticas. Esses sedimentos soltos, de tamanho argiloso ou arenoso, depositados podem cobrir e extinguir os organismos responsáveis pela produção carbonática e deixam o fundo do mar com uma densidade menor, diminuindo a capacidade dos organismos de se prenderem no fundo e montarem suas colônias (Granjeon, 1997). A restrição por deposição de sedimentos soltos (Figura 4.7.) é definida a partir de uma taxa limite, abaixo de qual a deposição não incomoda a atividade dos organismos. Acima dessa taxa limite, a produção carbonática decai exponencialmente (Lawrance *et al*, 1987; Aigner *et al*, 1989):

$$S_{SC}(x, y) = e^{\frac{-(s(x,y)-s_L)}{\sigma_s}} \quad (4.13)$$

para $s(x,y) \geq s_L$;

$$S_{SC}(x, y) = 1; \quad s(x, y) \leq s_L \quad (4.14)$$

para $s(x,y) \leq s_L$.

Sendo:

$s(x,y)$ - Taxa de deposição de sedimentos soltos em (x,y)

s_L - Taxa de deposição limite para início da restrição

σ_s - Atenuação exponencial

S_{SC} - Restrição devido à deposição de sedimentos soltos

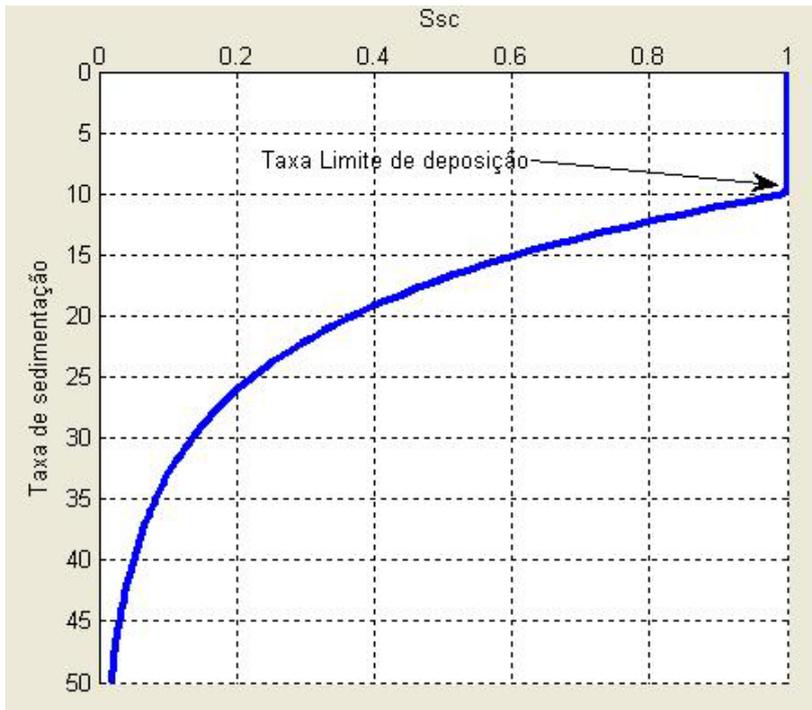


Figura 4.7. Função de restrição devido à deposição de sedimentos soltos.

4.2.4. Restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas

Os organismos presentes em águas profundas também podem produzir rochas carbonáticas, porém com taxas bastante inferiores às de rochas em águas rasas. As taxas desse tipo de produção são máximas em regiões de alto mar com grandes profundidades e diminuem drasticamente ao se aproximar dos taludes costeiros. Em águas mais rasas, os organismos de águas profundas não conseguem competir com os organismos de águas rasas que tem taxas de produção muito mais elevadas. Assim sendo, a restrição à produção nas regiões profundas é em função somente da profundidade e, mais uma vez, pode ser utilizada uma exponencial para definir essa função de restrição (Bowman & Vail, 1999):

$$S_{PP} = 1 - e^{\frac{-z(x,y)}{\sigma_p}} \quad (4.15)$$

Sendo:

S_{PP} - Função de restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas

σ_p - Fator de atenuação exponencial

4.2.5. Produção carbonática resultante

A partir das funções de restrição, a Eq. 4.4 pode ser desenvolvida para cada fábrica carbonática. Deve-se salientar que muitas das funções de restrição apresentadas anteriormente são em função da profundidade que por sua vez é em função da superfície do fundo do mar, $z(x,y)$, e que essa superfície varia ao longo do tempo conforme a plataforma vai evoluindo. Por isso, a produção carbonática resultante será sempre em função do espaço e do tempo.

Águas rasas e abertas:

$$P_{RA}(x, y, z(t)) = P_{MA} * S_{OD}(x, y, z(t)) * S_{OM}(x, y, z(t)) * S_{SC}(x, y) \quad (4.16)$$

Águas rasas e restritas:

$$P_{RR}(x, y, z(t)) = P_{MR} * S_{OD}(x, y, z(t)) * S_{RM}(x, y, z(t)) * S_{SC}(x, y) \quad (4.17)$$

Águas profundas:

$$P_{RP}(x, y, z(t)) = P_{MP} * S_{PP}(x, y, z(t)) * S_{SC}(x, y) \quad (4.18)$$

Sendo:

$P_{RA}(x, y, z(t))$, $P_{RR}(x, y, z(t))$ e $P_{RP}(x, y, z(t))$ as taxas resultantes de crescimento carbonático, no ponto $(x,y,z(t))$, no tempo t , em águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas, respectivamente.

P_{MA} , P_{MR} e P_{MP} as taxas máximas de crescimento carbonático para condições ideais, em águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas, respectivamente.

4.3. Sedimentação carbonática

Depois de calculadas as taxas resultantes de crescimento carbonático para cada fábrica, deve-se definir como a plataforma carbonática evolui através do tempo. O acréscimo da camada de sedimento para cada ponto da superfície será a soma das taxas de crescimento por um determinado intervalo de tempo e é descrito com a seguinte equação:

$$\frac{d}{dt} s(x, y, z(t)) = P_{RA}(x, y, z(t)) + P_{RR}(x, y, z(t)) + P_{RP}(x, y, z(t)) \quad (4.19)$$

Sendo:

$ds(x,y,z)$ - Acréscimo infinitesimal da camada de sedimento carbonático

dt - Intervalo infinitesimal de tempo

4.4. Classificação da sedimentação carbonática

Após a definição da quantidade de sedimento produzido para um intervalo de tempo, ainda é necessário definir uma classificação satisfatória desses sedimentos para facilitar a análise dos resultados. Os ambientes de baixa energia hidrodinâmica costumam apresentar sedimentos de granulometria mais fina enquanto ambientes de alta energia hidrodinâmica apresentam sedimentos mais grossos. Nesse trabalho, as regiões de águas rasas e restritas e de águas profundas serão consideradas de baixa energia hidrodinâmica e as regiões de águas rasas e abertas, de alta energia. Baseado nisso foi feita uma adaptação à classificação proposta por Dunham (1962), conforme indicado na Figura 4.8.:

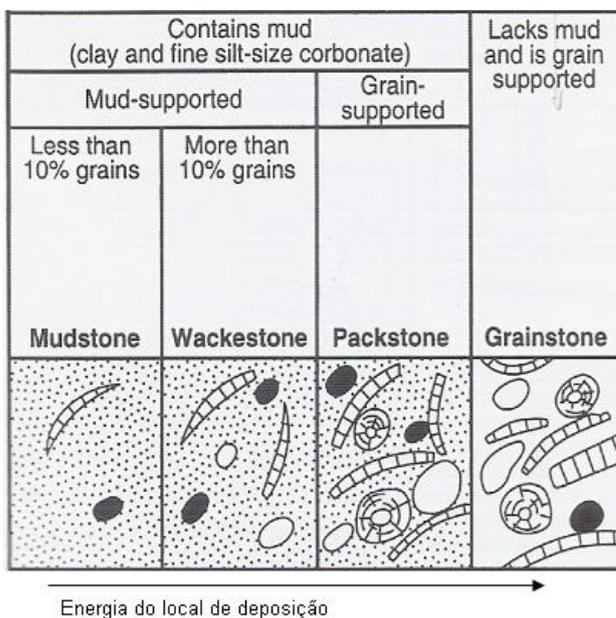


Figura 4.8. Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962)

Adaptando essa classificação às fábricas carbonáticas simuladas nesse trabalho, a classificação mostrada na tabela 1 é proposta:

Tabela 1: Classificação dos sedimentos carbonáticos nesse trabalho

Classificação	Parcela borda plataforma	Sedimento fino predominante
<i>Mudstone</i> Pelágico	0 - 10 %	Águas profundas
<i>Wackestone</i> Pelágico	10 - 50 %	Águas profundas
<i>Packstone</i> Pelágico	50 - 90 %	Águas profundas
<i>Mudstone</i> Lagunal	0 - 10 %	Águas rasas restritas
<i>Wackestone</i> Lagunal	10 - 50 %	Águas rasas restritas
<i>Packstone</i> Lagunal	50 - 90 %	Águas rasas restritas
<i>Grainstone</i>	> 90 %	Qualquer um