

Introdução a Superfície de Volatilidade

Rafael Felipe Bressan

2019-01-09

Conteúdo

Prefácio	5
Sobre os Autores	7
Rafael Felipe Bressan	7
1 Processos Estocásticos em Finanças	9
1.1 Processos de Markov	9
1.2 Movimento Browniano	10
1.3 Definição	11
1.4 Movimento Browniano Geométrico	12
2 Modelo Black-Scholes-Merton	15
2.1 Portfólio de replicação	15
2.2 Precificação neutra ao risco	16
2.3 Encontrando a equação de Black-Scholes	16
2.4 Solução analítica	18
2.5 Paridade compra e venda	18
2.6 As Gregas	19
3 Smile de Volatilidade	21
3.1 Reparametrizando B&S e definição de moneyness	21
3.2 Características de smiles de volatilidade	22
3.3 Smile como forma de precificação	25
3.4 Estrutura a termo	25
3.5 Arbitragem estática	25
3.6 Limites de inclinação	29
3.7 Distribuição implícita	30
3.8 Conclusão	31

Prefácio

Este é um pequeno resumo, elaborado na forma de livro, sobre os estudos realizados pelo núcleo de derivativos e riscos do Clube de finanças ESAG.

Os estudos realizados pelos membros do núcleo foram sendo apresentados na forma de artigos no blog do Clube. A partir destes artigos foi feita esta coletânea de forma a apresentar todo o conteúdo em local único para facilitar a assimilação dos membros futuros e leitores de nosso blog.

Sobre os Autores

Rafael Felipe Bressan

Formado em Engenharia de Controle e Automação Industrial pela UFSC e aluno de graduação do curso de Ciências Econômicas na UDESC/Esag. Membro do Clube de Finanças Esag e gerente do núcleo de pesquisa em riscos e derivativos.

Se interessa por finanças quantitativas, modelagem e controle de riscos e desenvolveu, durante a elaboração deste livro, grande curiosidade sobre precificação de derivativos. Gosta de programar em R, linguagem com a qual elaborou este próprio livro e está aprendendo Python.

Capítulo 1

Processos Estocásticos em Finanças

Neste artigo abordaremos um assunto técnico, mas muito utilizado e de fundamental importância para a precificação de instrumentos derivativos. Será apresentado o conceito de processos estocásticos - PE, e sua aplicação no mundo das finanças.

Um processo estocástico é a evolução temporal de uma determinada variável de interesse que pode assumir valores aleatórios em cada ponto no tempo. Em outras palavras, o caminho que a variável segue ao longo do tempo evolui de maneira incerta. Estes processos podem se dar em tempo discreto ou em tempo contínuo. Processo em tempo discreto são aqueles onde o valor da variável pode se alterar somente em intervalos pré-definidos de tempo, por exemplo ao final do dia. Em processos em tempo contínuo, o valor de nossa variável está constantemente em mudança, de forma aleatória seguindo alguma distribuição de probabilidades.

Estes processos são muito importantes em finanças pois, é amplamente aceito que a evolução do preço de ativos financeiros pode ser modelado por um PE em tempo contínuo, sendo este modelo portanto, a base para a teoria de precificação de ativos e da qual os derivativos fazem extenso uso. Aprender sobre a evolução temporal do preço de uma ação através de um processo estocástico é o primeiro passo para saber como atribuir um preço a uma opção sobre esta ação, por exemplo.

Deve ser notado também que apesar de o preço dos ativos serem **observados** apenas em intervalos discretos de tempo (apenas quando existe transação) e assumirem valores também discretos (múltiplos de um centavo), o preço e sua evolução estão ocorrendo continuamente, nossas observações que são discretas. Desta forma os processos em tempo contínuos são ideais para este tipo de modelagem.

1.1 Processos de Markov

Uma primeira definição de deve-se fazer para estudar PE aplicados a evolução do preço de ações é o conceito de processo de Markov. Este tipo de processo é tal que o histórico do processo que o levou até seu estado atual, é **irrelevante** para a previsão de seu estado futuro. Ou seja, toda a informação da história do processo já está contida no seu valor atual. Quando consideramos que preços de ativos seguem um processo de Markov, estamos assumindo válida pelo menos a forma fraca de mercados eficientes.

Uma implicação desta suposição, verificada empiricamente, é que não se pode obter lucros apenas seguindo padrões históricos do preço e extrapolando-os no futuro. Outra, mais importante para nossos processos, é que as distribuições de probabilidade que a variável aleatória segue em cada ponto no tempo são **independentes**.

1.2 Movimento Browniano

Suponha um processo de Markov, que para fins de simplificação consideraremos em tempo discretos. Se a distribuição de probabilidade para o próximo incremento no valor do processo for uma Normal com média zero e variância unitária, podemos representar este incremento por $\phi(0, 1)$. Como este é um processo de Markov, o segundo incremento será independente do primeiro e terá novamente a mesma distribuição de probabilidade. Qual seria então, a partir do período inicial até o segundo período, a distribuição de probabilidade dos possíveis valores de nosso hipotético processo? A resposta é a soma de duas normais $\phi(0, 1)$ que resulta em $\phi(0, 2)$. Se assim continuarmos a fazer previsões para T períodos a frente, nossa distribuição terá densidade $\phi(0, T)$.

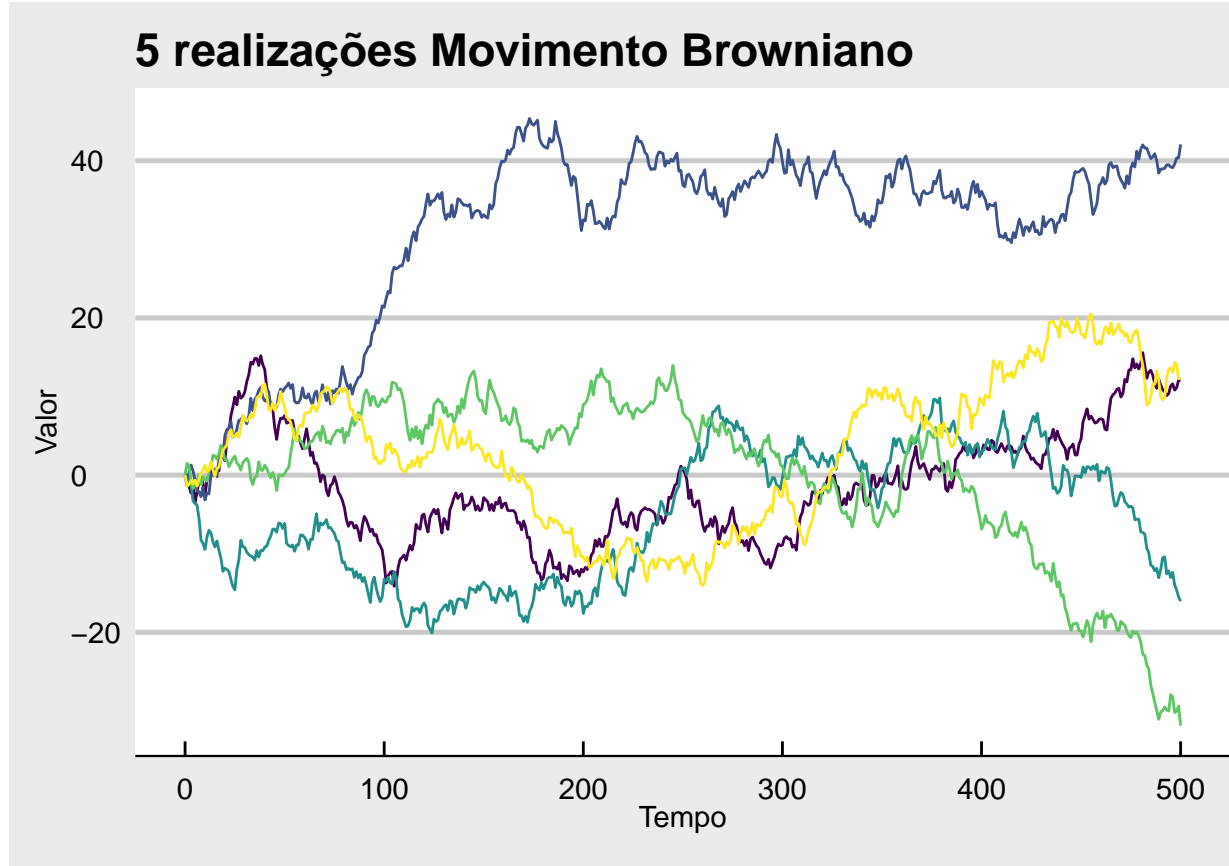
Para tempos discretos, $T \in \mathbb{Z}$ este é o processo do passeio aleatório (*Random Walk*), entretanto para tempo contínuo quando $T \in \mathbb{R}$ com incrementos acontecendo em intervalos de tempo infinitesimalmente pequenos, este é o Movimento Browniano - MB, que também é largamente conhecido como processo de Wiener.

```
t <- 0:500
m <- 5 # Numero de simulacoes
mc_names <- paste0("Sim", seq_len(m)) # Nomes das simulacoes
sigma2 <- 1
mu <- 0
brown_t <- matrix(nrow = length(t), ncol = m)
# MC Simulation
set.seed(543210)
for (i in seq_len(m)) {
  increments <- rnorm(length(t) - 1, mu, sqrt(sigma2))
  brown_t[, i] <- c(0, cumsum(increments))
}

colnames(brown_t) <- mc_names
mb <- as.tibble(cbind(t, brown_t)) %>%
  gather(key = sim, value = value, -t)
```

```
## Warning: `as.tibble()` is deprecated, use `as_tibble()` (but mind the new semantics).
## This warning is displayed once per session.
```

```
ggplot(mb, aes(x = t, y = value, color = sim)) +
  geom_line() +
  # geom_point(data = dens_tbl, aes(x = x, y = y), size = 1) +
  labs(title = "5 realizações Movimento Browniano",
       x = "Tempo",
       y = "Valor") +
  guides(color = FALSE) +
  scale_color_viridis_d() +
  theme_economist_white()
```



A figura acima mostra 5 realizações de um *mesmo* processo estocástico com média zero e variância unitária. É importante frisar que o processo que gerou as cinco séries é exatamente o mesmo, sendo elas tão distintas umas das outras ou não. Esta é uma importante característica dos processos estocásticos nas aplicações reais, o que nós observamos é apenas uma realização do processo, dentre as infinitas possíveis.

1.3 Definição

Agora que já foi passada a intuição sobre processos estocásticos, pode-se partir para definições mais formais sobre estes processos. Vamos adotar a notação do cálculo para tanto, e generalizar nosso MB possibilitando-o que tenha média diferente de zero (μ) e variância qualquer (σ^2), mantendo estas constantes ao longo do tempo, entretanto. Desta forma um movimento Browniano com deriva pode ser descrito através da seguinte equação diferencial estocástica - EDE:

$$dX_t = \mu dt + \sigma dB_t \quad (1.1)$$

onde dB_t é nosso MB padrão em um intervalo de tempo infinitesimal, dt .

O processo X_t possui uma taxa de deriva (média instantânea) igual a μ e volatilidade instantânea igual a σ . Quando um PE possui deriva igual a zero, como nosso MB padrão, o valor esperado deste processo para qualquer período futuro será zero. Este fato deixa de ser verdade no processo generalizado, com taxa de deriva diferente de zero. Neste caso o processo evoluirá seguindo uma taxa crescente (se $\mu > 0$) ou decrescente (se $\mu < 0$). Assim é possível, a partir de um MB padrão, modelar outros PE que possuam tendência temporal e variâncias diferentes.

1.4 Movimento Browniano Geométrico

Apesar de o processo X_t ser bastante flexível e cobrir uma grande gama de usos, ele ainda não é adequado para modelar o preço de ativos, e isto se dá em função de o processo de Wiener, mesmo com deriva positiva, poder atingir valores negativos com probabilidade maior que zero. Isto implicaria na possibilidade do preço de uma ação ser negativo, algo que obviamente não ocorre. Além desta impossibilidade, existe um outro empecilho para se utilizar o MB para modelar o processo de preços, e este é a deriva constante μ com relação ao preço da ação.

A deriva pode ser interpretada como o valor esperado do retorno da ação em um dado período de tempo. Este retorno esperado ele é pode ser constante em termos percentuais (em um modelo simplificado), mas não em termos absolutos! Ou seja, dependendo do preço da ação, R\$ 1,00 ou R\$ 100,00, a deriva μ deve ser diferente para que em termos percentuais a relação seja constante.

A solução para estes dois problemas é modelar o preço como um processo estocástico conhecido como Movimento Browniano Geométrico. Ele difere do MB padrão pois assume que o **logaritmo** da variável aleatória possui distribuição Normal. O MBG é a resolução para a seguinte EDE:

$$dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dB_t \quad (1.2)$$

Veja que este é basicamente o mesmo processo MB, porém a deriva, termo que multiplica dt , varia linearmente com o valor do processo (μX_t) assim como a volatilidade instantânea (σX_t).

A solução para esta EDE, para um valor inicial qualquer de X ($X_0 > 0$) é dada por:

$$X_t = X_0 \exp \left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma B_t \right) \quad (1.3)$$

A variável aleatória X segue um MB ao longo de uma trajetória exponencial. É fácil verificar que, por ser exponencial, X_t nunca terá valor negativo.

Esta é uma forma conveniente de representar a evolução de preços de um ativo pois naturalmente surge o conceito de retornos logarítmicos. O log-retorno de X é dado por $r_t = \ln(X_t/X_0)$ de onde inferimos que se o processo de formação de preço de um ativo segue um MBG, então seus log-retornos serão normalmente distribuídos com média $\mu - \frac{\sigma^2}{2}$ e volatilidade σ em uma unidade de período considerado. Se escalarmos o período de tempo considerado para T , temos então que os retornos logarítmicos do ativo X seguem a seguinte distribuição normal:

$$r_T \sim \phi \left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) T, \sigma^2 T \right) \quad (1.4)$$

Abaixo apresentamos 5 realizações de um MBG com valor de deriva $\mu = 0,6\%a.p.$ e variância $\sigma^2 = 1\%a.p..$

```
t <- 0:500
m <- 5 # Numero de simulacoes
mc_names <- paste0("Sim", seq_len(m)) # Nomes das simulacoes
sigma2 <- 0.01
mu <- 0.006 # c(0.098, 0.099, 0.1, 0.101, 0.102) / 10
brown_t <- matrix(nrow = length(t), ncol = m)
# MC Simulation
set.seed(1234567)
for (i in seq_len(m)) {
  log_ret <- rnorm(length(t) - 1, mu - (sigma2 / 2), sqrt(sigma2))
  brown_t[, i] <- c(1, cumprod(exp(log_ret)))
}
```

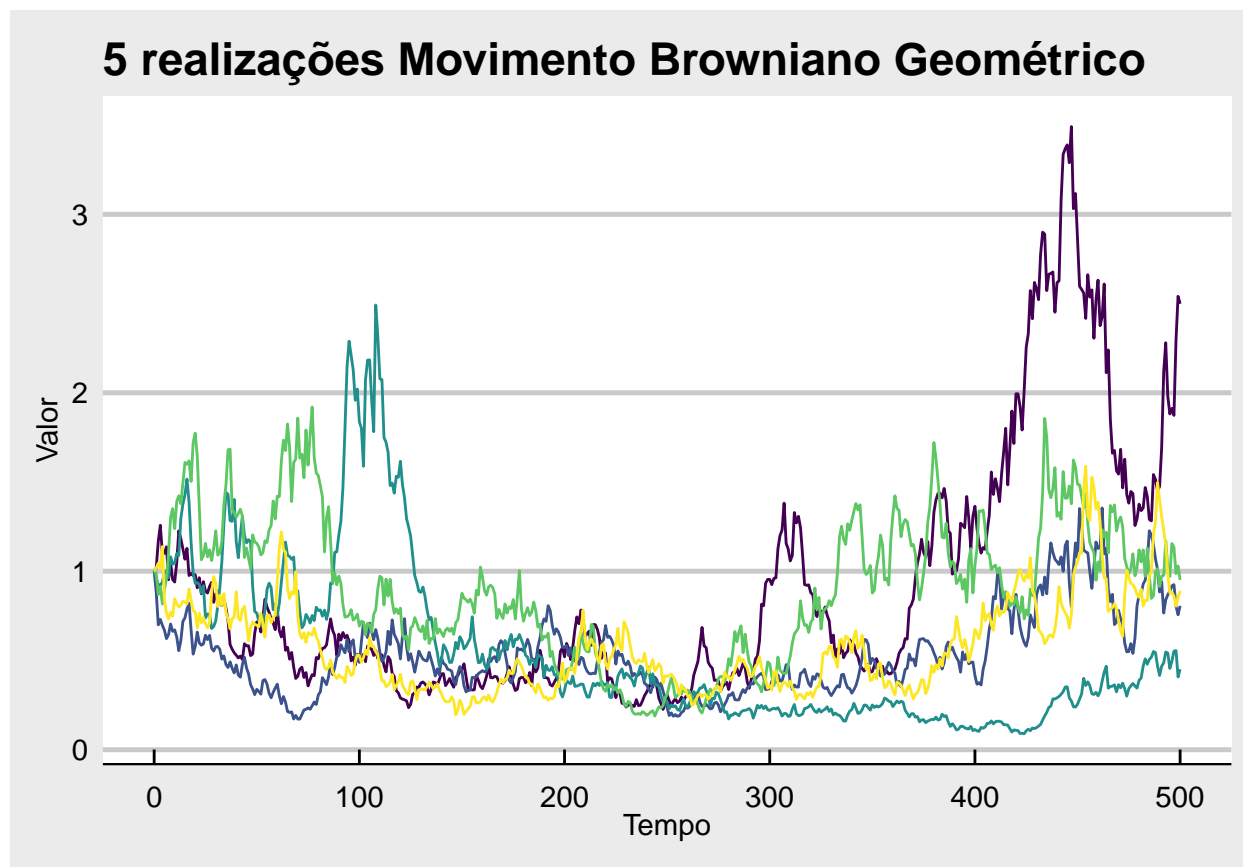
```

}

colnames(brown_t) <- mc_names
mb <- as.tibble(cbind(t, brown_t)) %>%
  gather(key = sim, value = value, -t)

ggplot(mb, aes(x = t, y = value, color = sim)) +
  geom_line() +
  labs(title = "5 realizações Movimento Browniano Geométrico",
       x = "Tempo",
       y = "Valor") +
  guides(color = FALSE) +
  scale_y_continuous(breaks = 0:10) +
  scale_color_viridis_d() +
  theme_economist_white()

```



O Movimento Browniano Geométrico aqui demonstrado serve de base para o famoso modelo **Black & Scholes** de precificação de opções, o qual assume que o ativo subjacente à opção (por exemplo, a ação de uma empresa) tem seu preço formado por um processo MBG.

Capítulo 2

Modelo Black-Scholes-Merton

Neste artigo desenvolveremos o modelo para precificação de opções do tipo europeias proposto Black and Scholes (1973) e posteriormente expandido por Merton (1976). A derivação deste modelo se baseia nos conceitos apresentados sobre processos estocásticos do Capítulo 1.

Antes de entrar na modelagem desenvolvida pelos autores acima citados, iremos tratar de algumas definições essenciais, como por exemplo a precificação de ativos em um mundo neutro ao risco (*risk neutral valuation*) e portfólio de replicação (*replicating portfolio*), que são largamente utilizados na precificação de quaisquer derivativos, e não somente opções.

2.1 Portfólio de replicação

Suponha que se deseja precificar uma opção de compra sobre uma ação, vamos denotar o preço desta *call* de f_t . Sabemos que na data de expiração, T , da opção de compra seu preço será: $f_T = \max(S_T - K, 0)$, onde S_T é o preço da ação subjacente na data T e K é o preço de exercício da opção. Podemos criar um portfólio que envolva um ativo livre de risco, com preço B_t e a ação objeto do derivativo, S_t , que recrie o mesmo valor de pagamento que a opção na data de expiração. Ou seja, criamos o portfólio de replicação $P_t = \Delta S_t + bB_t$, no qual devemos escolher os valores de Δ e b de tal forma que $f_T = P_T$.

De fato, para apenas um período a frente, podemos tomar emprestado a taxa de juros livre de risco¹, r um valor igual ao preço corrente da ação, S_0 e comprá-la, ao mesmo tempo em que se “trava” (faz *hedge*) deste portfólio vendendo a opção. O lucro desta operação em T deve ser zero, pois é um portfólio travado. Com estas premissas é possível calcular o preço do prêmio da opção a ser cobrado no período inicial para que o valor esperado da operação como um todo seja zero.

Este portfólio formado pela venda do ativo livre de risco e compra do ativo objeto é denominado *portfólio de replicação*, pois, ele fornece um fluxo de caixa igual ao derivativo que buscamos precificar. Ao adicionarmos ao portfólio de replicação a venda (ou seja, o negativo) do derivativo, temos um portfólio *hedgado*, onde não existe mais incerteza com relação ao seu retorno esperado.

¹Esta é uma suposição do modelo, pode não ser verdade para algum investidor qualquer mas se for para algum outro investidor representativo, o princípio de ausência de arbitragem passa a valer, uma vez que este segundo investidor explorará o mercado e levará o preço do derivativo para o resultado requerido.

2.2 Precificação neutra ao risco

A metodologia de precificação de derivativos dentro do *mundo neutro ao risco*² é o carro-chefe das metodologias para se avaliar estes instrumentos. O princípio de precificação neutra ao risco afirma que um derivativo pode ser valorado através das seguintes suposições:

- o retorno esperado do ativo objeto é a taxa livre de risco, e
- o valor esperado do derivativo na expiração deve ser descontado pela taxa livre de risco para trazê-lo a valor presente.

É claro que o mundo real não é neutro ao risco, entretanto uma das provas que a metodologia faz é que, ao precificarmos um derivativo de forma relativa ao preço do ativo objeto, a precificação neutra ao risco encontra o mesmo valor para o derivativo que uma metodologia que leve em conta as preferências ao risco dos investidores. Entretanto, precificar um derivativo assumindo neutralidade ao risco é muito mais simples que encarar um modelo baseado no mundo real.

De fato a neutralidade ao risco soa um tanto quanto estranha a primeira vez. Porém, ela tem uma explicação lógica de sua validade nas circunstâncias em que é desenvolvida. Se os investidores forem avessos ao risco, por exemplo, os retornos esperados para o ativo objeto terão embutidos um prêmio pelo risco. Acontece que este prêmio pelo risco também deverá estar na taxa de desconto do valor esperado de pagamento do derivativo, de forma que este prêmio ao risco é cancelado.

É comum na literatura de derivativos encontrarmos os termos mundo-P e mundo-Q. O mundo-P se refere ao mundo real, com probabilidades P reais de ocorrência de eventos, enquanto que o mundo-Q é o mundo neutro ao risco, onde as probabilidades Q são ajustadas (tecnicamente suas medidas são alteradas) para refletir esta neutralidade. No mundo-Q é comum denotarmos o valor esperado de alguma variável aleatória com a seguinte notação: $\mathbb{E}_Q[\cdot]$.

Assim, a precificação de derivativos supondo um mundo neutro ao risco chega no preço correto para todos os mundos.

2.3 Encontrando a equação de Black-Scholes

Vamos partir do princípio que nossa ação, objeto da opção que desejamos precificar, siga um MBG conforme descrito no capítulo anterior. Portanto, o preço de nossa ação no período t deve observar a seguinte equação diferencial estocástica:

$$dS_t = \mu S_t + \sigma S_t dW_t \quad (2.1)$$

onde dW_t é o movimento Browniano, ou processo de Wiener.

Esta equação resume as principais hipóteses do modelo Black&Scholes de precificação de opções, são elas:

- O preço do ativo objeto é um processo estocástico e segue uma distribuição log-normal;
- O retorno esperado (μ) e a volatilidade (σ) deste ativo são **constantes**, tanto no tempo quanto com relação ao próprio nível de preço do ativo objeto.

Ademais destas hipóteses, temos aquelas relacionadas a racionalidade dos mercados e ao princípio de ausência de oportunidades de arbitragem. Estas hipóteses nos levam a validade do mundo neutro ao risco e portanto, a resolução do modelo da forma como descreveremos abaixo.

Nossa opção será descrita por um portfólio de replicação, e se tomarmos seu preço no instante t , então a opção também deve seguir uma equação diferencial estocástica da forma:

²A precificação dentro do mundo neutro ao risco mereceria um, ou mais, *posts* por si só. Aqui lançaremos apenas os principais resultados que nos permitem encontrar o modelo de B&S.

$$df_t = \Delta dS_t + b dB_t \quad (2.2)$$

aqui dB_t representa a variação do ativo livre de risco (dinheiro) dentro de um período de tempo dt . Sabemos que o valor do ativo livre de risco não envolve incerteza alguma, é determinístico, e seu rendimento é a taxa de juros livre de risco. Assim, para uma taxa continuamente composta r uma unidade de B evolui através de $B_t = e^{rt}$, logo:

$$dB_t = rBdt \quad (2.3)$$

De acordo com o lema de Ito o diferencial de uma função que dependa do tempo e de um processo estocástico pode ser encontrado da seguinte forma:

$$df_t = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial f}{\partial S} dS + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} dS^2 \quad (2.4)$$

onde dS^2 é a variação quadrática de nosso processo S_t que é um movimento browniano geométrico, logo $dS^2 = \sigma^2 S^2 dt$.

Igualando as equações (2.2) e (2.4), fazendo as devidas substituições trazidas pelas equações (2.1) e (2.3) e por fim rearranjando os termos, chegamos na seguinte relação:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial S} \mu S + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \sigma^2 S^2 - \Delta \mu S - r b B \right) dt + \left(\frac{\partial f}{\partial S} \sigma S - \Delta \sigma S \right) dW = 0 \quad (2.5)$$

que para ser válida para todo t , cada termo entre parênteses deve ser igual a zero simultaneamente. Rapidamente chegamos aos valores necessários de nosso portfólio de replicação.

$$\Delta = \frac{\partial f}{\partial S} \quad (2.6)$$

$$rbB = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \sigma^2 S^2 \quad (2.7)$$

Através da equação (2.2), integrando-a, chegamos na relação $bB = f - \Delta S$ e pré-multiplicando ambos os lados por r temos então que:

$$rbB = r(f - \Delta S) \quad (2.8)$$

Finalmente, igualando as equações (2.7) e (2.8) e substituindo o valor de Δ encontramos a famigerada equação diferencial parcial - EDP - de Black&Scholes:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2} \sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} + rS \frac{\partial f}{\partial S} - rf = 0 \quad (2.9)$$

2.4 Solução analítica

A equação possui diferentes formas de resolução³, a precificação do derivativo irá depender da forma que resolvermos a equação (2.9). O Modelo Black&Scholes é famoso por conseguir precificar opções call e put europeias, onde a resolução da equação fará uso dos *payoffs*. Para uma call:

$$f(S, T) = \max(S - K, 0) \quad (2.10)$$

Já no caso de uma put:

$$f(S, T) = \max(K - S, 0) \quad (2.11)$$

Onde:

- T é a data de vencimento da opção,
- K é o preço de exercício, e
- S é o preço do ativo subjacente.

Utilizando os *payoffs* dados nas equações (2.10) e (2.11), e resolvendo a EDP de Black&Scholes (2.9), iremos obter o modelo para se precificar os derivativos citados.

Para uma Call temos que:

$$C(S, t) = SN(d_1) - Ke^{-r(T-t)}N(d_2) \quad (2.12)$$

Já para um Put chegamos a:

$$P(S, t) = Ke^{-r(T-t)}N(-d_2) - SN(-d_1) \quad (2.13)$$

onde:

$$d_1 = \frac{\ln(S/K) + (r + \sigma^2/2)(T - t)}{\sigma\sqrt{T - t}} \quad (2.14)$$

$$d_2 = \frac{\ln(S/K) + (r - \sigma^2/2)(T - t)}{\sigma\sqrt{T - t}} = d_1 - \sigma\sqrt{T - t} \quad (2.15)$$

É a partir das equações (2.12) e (2.13) que se obtém as chamadas gregas, que são as sensibilidades do preço do derivativo em relação a alterações nos parâmetros do modelo. Explicaremos as gregas em maiores detalhes mais adiante.

2.5 Paridade compra e venda

Agora vamos falar um pouco sobre a paridade entre opções de compra e venda, algo que nos ajuda a precificar algum derivativo quando já conhecemos o preço de outro derivativo com especificações semelhantes.

Assumindo ausência de oportunidade de arbitragem, com um ativo subjacente que tenha liquidez, iremos verificar a paridade Call-Put que define uma relação entre os preços de uma call e put do

³Uma demonstração completa de como encontrar a solução para a EDP de Black&Schole pode ser encontrada em <https://planetmath.org/AnalyticSolutionOfBlackScholesPDE>

tipo europeu, desde que possuam o **mesmo tempo de maturidade** e **preço de strike**. Aqui possuiremos menos premissas que o modelo Black&Scholes e premissas mais simples, tal relação poderá ser utilizada para encontrar o valor justo de uma opção. Com a ausência de arbitragem observe que dois portfólios que sempre geram o mesmo payoff em um instante T devem ter o mesmo valor em qualquer instante intermediário.

Imagine um primeiro portfólio onde o investidor compre uma opção de compra C, a qual possui tempo de maturidade T e preço de strike K, sobre algum ativo subjacente que chamaremos de S e compre um título B que seu valor no período T seja de \$30. E um segundo portfólio onde tenha o próprio ativo subjacente S que esteja sendo negociado a \$25 e compre uma put P com um preço de strike K e maturidade T. Estes são portfólios de replicação entre si, eles terão exatamente o mesmo *payoff* no período T, e na ausência de arbitragem, podemos calcular seus retornos através da precificação neutra ao risco. Teremos uma relação onde os valores dos nossos portfólios serão:

$$\mathbb{E}_{\mathbb{Q}}[S_t + P_t] = \mathbb{E}_{\mathbb{Q}}[C_t + B_t]; \quad t \leq T \quad (2.16)$$

Como estamos em um mundo neutro ao risco, P_t e C_t são os preços da put e da call dados pelo modelo B&S, enquanto $\mathbb{E}_{\mathbb{Q}}[B_t]$ se resume a $Ke^{-r(T-t)}$, ou seja, a posição atual em ativo livre de risco deve ser o valor presente do strike das opções. O preço do subjacente é o próprio preço atualmente observado.

Como S_t e $B_t = Ke^{-r(T-t)}$ são conhecidos, se no mercado existir um preço C_t então podemos calcular P_t e vice-versa. Esta é a essência da paridade compra e venda.

Observe que se essa relação não for mantida, teremos arbitragem: Suponhamos que $S_t > B_t$ e que a put esteja com um prêmio mais alto que a call no entanto ambos possuem um preço de strike \$30 e maturidade T, que os prêmios sejam \$20 e \$15 respectivamente teremos então: $30 + 20 = 15 + 25$, nesse caso teremos $50 \neq 40$, então vende-se o que está mais caro, no caso a ação e a put e compraria o título e a call, chegando ao um lucro de $50-40=10$, de \$10 sem risco. Observe que independentemente de a ação subir acima ou cair abaixo do strike, o lucro obtido nesta operação será sempre de \$10.

2.6 As Gregas

As letras gregas utilizadas no mercado de opções são usadas para denotar as sensibilidades do preço da opção com relação a variação de alguma das variáveis do modelo, a seguir entraremos em detalhes sobre as principais gregas usadas para a análise de opções.

2.6.1 Delta

Já havíamos definido o delta anteriormente ao encontrarmos a EDP de Black&Scholes, isto é:

$$\Delta = \frac{\partial f}{\partial S} \quad (2.17)$$

O delta mede a taxa com que o preço da opção muda conforme o valor do ativo subjacente oscila, seu valor pode variar entre 1 e 0 para call e entre 0 e -1 para put.

Exemplo: imagine uma opção de compra de 100 ações que possui um delta de 0,72, caso o ativo subjacente aumente \$1 o valor da opção aumentará \$72 (pois representa 100 ações), e caso o valor do ativo subjacente diminua o preço da opção diminuirá \$72.

O mesmo acontece com opções de venda, só que de uma forma inversamente proporcional pelo seu delta ser negativo. Uma opção de venda de 100 ações que possui um delta de -0,40 vai valer menos \$40 caso o preço do seu ativo subjacente aumente \$1, e vai valer mais \$40 caso o preço do seu ativo subjacente diminua \$1.

O strike da opção influencia o delta diretamente, quanto mais in-the-money for uma opção, call ou put, maior será o seu delta em valor absoluto, e quanto mais out-the-money, menor será o módulo de seu delta.

2.6.2 Gamma

$$\Gamma = \frac{\partial \Delta}{\partial S} = \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} \quad (2.18)$$

O gamma mede a taxa com que o delta muda a cada oscilação do preço do ativo subjacente, seu impacto aumenta conforme o valor atual do ativo se aproxima do strike, sendo responsável pela convexidade do valor da opção. Opções de alto gamma são chamadas de explosivas, uma vez que mesmo pequenas variações no preço do ativo se traduzem em grandes oscilações no preço da opção.

2.6.3 Theta

$$\Theta = -\frac{\partial f}{\partial \tau}, \quad \tau = T - t \quad (2.19)$$

O Theta é uma taxa que mede o efeito do tempo sobre o preço da opção. Como as opções tem um maior valor de acordo com a quantidade de tempo até a data de vencimento, seu valor também diminui conforme o tempo passa, theta é a letra que mede essa variação (que sempre é negativa). O valor de theta representa a quantidade de dinheiro perdida no prêmio da opção a cada dia que passa.

2.6.4 Vega

$$\mathcal{V} = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (2.20)$$

O vega é uma taxa que mede o efeito da mudança da volatilidade no preço da opção. Seu valor é praticamente constante em opções com a mesma data de vencimento, esse valor aumenta em datas de vencimento mais distantes devido ao maior espaço de tempo em que a volatilidade atua, devido ao maior intervalo de tempo que há para ocorrer mudanças nos preços.

2.6.5 Rho

$$\rho = \frac{\partial f}{\partial r} \quad (2.21)$$

O rho é uma taxa que mede a sensibilidade do preço da ação em relação à taxa livre de risco, caso o valor de rho determinada opção seja 0,7, para cada aumento de 1% da taxa livre de risco o valor da opção aumentará 0,7%. Essa taxa influi principalmente no preço de opções com uma data de vencimento extremamente distante, não afetando muito o preço de opções cuja data de vencimento é próxima.

Capítulo 3

Smile de Volatilidade

A volatilidade instantânea, σ , do ativo subjacente é a única variável no modelo B&S que não pode ser diretamente observada. De fato, a volatilidade (ou equivalentemente a variância) de um ativo é dita uma variável **latente**. Sabemos que ela existe e possui algum valor no processo gerador, o processo pelo qual os preços são formados, porém não conseguimos observá-la diretamente, apenas estimá-la. Uma das formas de estimação de volatilidade pode ser a partir de dados históricos, mas várias outras formas existem, entre elas processos GARCH, volatilidade realizada, volatilidade estocástica, etc.

Uma vez que a volatilidade não pode ser diretamente observada, a prática comum no mercado é fazer o caminho inverso. Considerar os preços de mercado para as opções como dado, e a partir do modelo B&S inverter a equação de preço da Call ou Put para encontrar a volatilidade deste modelo que é compatível com os preços de mercado. A esta volatilidade encontrada damos o nome de **volatilidade implícita**.

Portanto, o smile de volatilidade que tratamos neste post é na verdade um gráfico entre a volatilidade implícita, retirada de opções Européias (baunilhas, do inglês vanilla options) a partir do modelo B&S, contra os *strikes* destas opções.

3.1 Reparametrizando B&S e definição de moneyness

Nem sempre é interessante plotar o smile contra os *strikes* propriamente ditos, uma forma de avaliar o quanto uma opção está “dentro, fora ou no dinheiro” pode ser a grega Delta ou então o chamado *moneyness* (por favor, se alguém tiver uma boa tradução para este termo, deixe nos comentários). Tradicionalmente a medida de *moneyness* é a relação K/S , ou seja o strike contra o preço corrente do subjacente. Porém existem outras definições mais interessantes para se trabalhar, entretanto, antes devemos fazer uso de algumas definições e vamos reparametrizar as expressões $d1$ e $d2$ do modelo B&S.

Lembrando que em precificação de opções estamos no mundo neutro ao risco, vamos definir o valor *forward*, F do subjacente como o valor corrente composto pela taxa livre de risco até a maturidade da opção, ou seja:

$$F = e^{r\tau} S \quad (3.1)$$

A **volatilidade (implícita) total** pode ser definida como a volatilidade reescalada pela raiz do tempo, que nos dá uma informação da volatilidade esperada para o subjacente do período corrente até a maturidade. Da mesma forma, a **variância total**. Denotando a volatilidade total por θ e a variância total por w , temos:

$$\theta = \sigma_{imp} \cdot \sqrt{\tau} \quad (3.2)$$

e

$$w = \sigma_{imp}^2 \cdot \tau \quad (3.3)$$

Vamos também definir a medida *forward log-moneyness* e denotá-la por k . Esta será a medida de *moneyness* que iremos utilizar ao longo deste e de outros artigos, portanto iremos utilizar este termo para designar o *forward log-moneyness* a não ser que expresse de forma contrária no texto.

$$k = \ln\left(\frac{K}{S}\right) - r\tau = \ln\left(\frac{K}{F}\right) \quad (3.4)$$

Logo, o *strike* está relacionado ao *moneyness* de forma que: $K = Fe^k$.

Podemos agora reparametrizar as expressões $d1$ e $d2$ do modelo B&S de forma que serão mais facilmente trabalhadas em modelos de volatilidade. Lembrando destas expressões que já foram apresentadas no Capítulo 2:

$$d_1 = \frac{\ln(S/K) + (r + \sigma^2/2)(\tau)}{\sigma\sqrt{\tau}} \quad (3.5)$$

$$d_2 = \frac{\ln(S/K) + (r - \sigma^2/2)(\tau)}{\sigma\sqrt{\tau}} = d_1 - \sigma\sqrt{\tau} \quad (3.6)$$

Substituindo as expressões para *forward log-moneyness* e volatilidade total nas definições acima temos as novas parametrizações para $d1$ e $d2$:

$$d_1 = -\frac{k}{\theta} + \frac{\theta}{2} \quad (3.7)$$

$$d_2 = -\frac{k}{\theta} - \frac{\theta}{2} = d_1 - \theta \quad (3.8)$$

Retomando o valor da opção do tipo Call no modelo B&S, podemos reescrever sua fórmula de apreamento da seguinte forma:

$$\begin{aligned} C(K, \tau) &= SN(d1) - Ke^{-r\tau}N(d2) \\ e^{r\tau}C(K, \tau) &= FN(d1) - KN(d2) \\ C_B &= F [N(d1) - e^k N(d2)] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Esta equação é conhecida como a forma de Black de precificação (*Black Call price formula*), que relaciona os valores *forward* da opção (também conhecido como valor não descontado), do subjacente e do *strike*. Esta formulação é particularmente útil quando formos extrair a distribuição neutra ao risco do subjacente que está implícita nos preços de mercado das opções.

3.2 Características de smiles de volatilidade

Caso o modelo de Black, Schole e Merton estivesse em acordo com a realidade, e os ativos tivessem seus preços formados a partir de um verdadeiro MBG, a volatilidade implícita seria uma constante. O gráfico do smile de volatilidade seria uma reta horizontal, com a mesma volatilidade para qualquer nível de *moneyness* e se considerarmos a superfície toda (que leva em conta os diversos tempos para expiração)

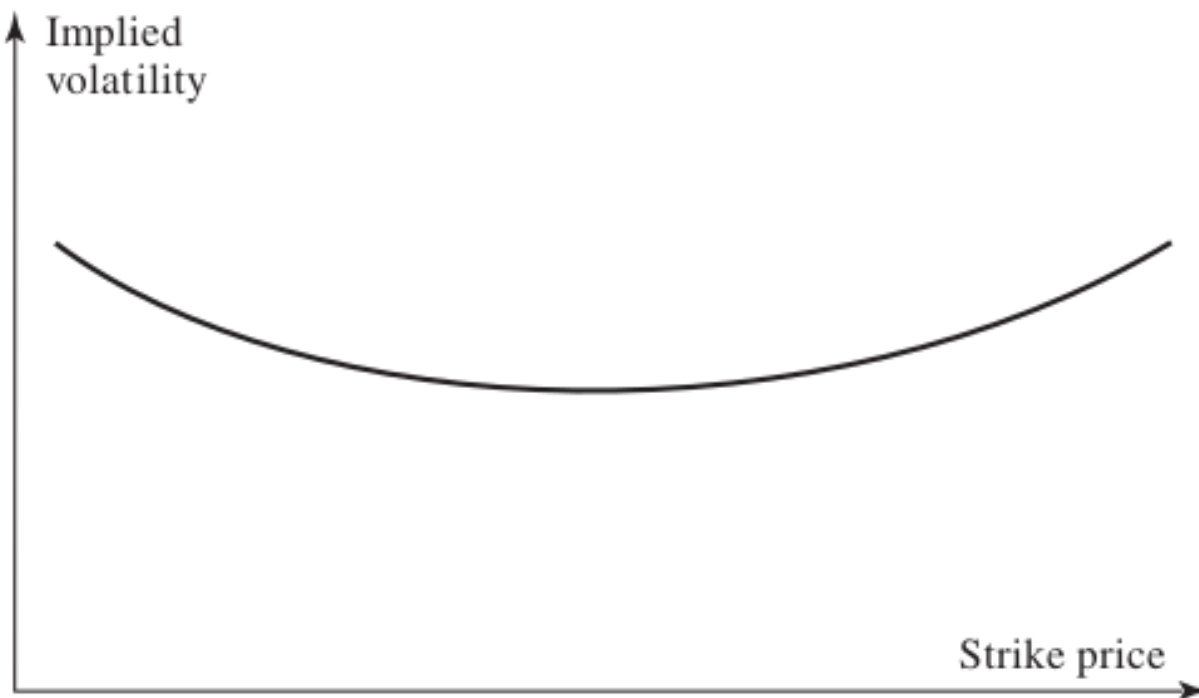


Figura 3.1: Smile típico de um mercado cambial.

esta seria paralela ao domínio (k, τ) . Não estaríamos escrevendo (e você lendo) este artigo se este fosse o caso...

O fato é que o modelo B&S é um modelo muito restritivo, com inúmeras suposições que não se verificam no mundo real e que por conseguinte, tornam os resultados do modelo pouco acurados. Entretanto este é um modelo muito conhecido, de fácil assimilação por parte dos agentes de mercado e que virou a língua franca nos mercados de derivativos. Se todos os *traders* conversarem em termos do modelo B&S, todos se entenderão, mesmo que internamente cada um possua seu próprio modelo de apreçamento.

Entre as características tipicamente observadas em smiles (e superfícies) de volatilidades pode-se citar:

- As volatilidades implícitas variam conforme o *strike* e prazo de expiração
- Smiles apresentam *skew*. Maior inclinação em uma das asas, representando uma maior probabilidade daqueles *strikes* acontecerem
- Smiles de equity tipicamente são negativos
- Mercados diferentes apresentam padrões de smile diferentes

3.2.1 Mercados cambiais

Opções sobre moedas possuem tipicamente um smile de volatilidade conforme mostrado na figura 3.1 abaixo. A volatilidade implícita é relativamente baixa para opções ATM. Esta torna-se progressivamente maior quando a opção se move para dentro do dinheiro ou para fora.

Caso a distribuição dos preços do ativo subjacente, neste caso uma taxa de câmbio fosse perfeitamente log-normal como no modelo B&S, o smile não teria esta curvatura. Desta forma podemos afirmar que o mercado, ao precificar as opções, acredita que a distribuição deste ativo possui caudas com

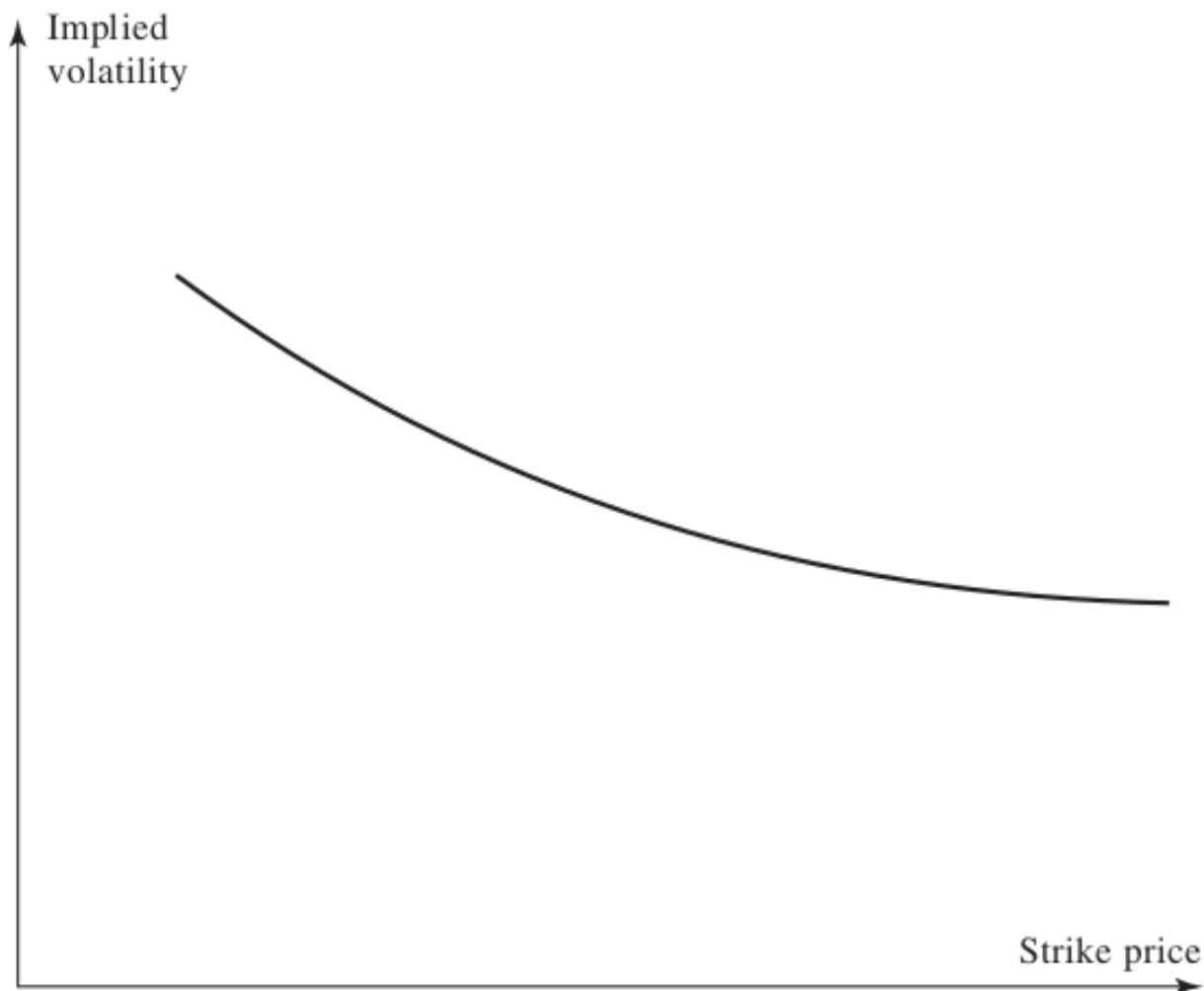


Figura 3.2: Smile típico de uma ação ou índice de ações.

maior densidade que supõe a log-normal, existem maiores probabilidades de retornos muito baixos ou muito altos.

3.2.2 Mercados de *equities*

Nos mercados de *equities*, ações, índices de ações e ETFs, por exemplo, o smile apresenta uma característica de assimetria (skew, em inglês) negativa. À esquerda (parte onde as puts estão fora do dinheiro) apresenta valores de volatilidade implícita muito maiores que suas contrapartes no lado das calls. Este comportamento reflete a percepção de mercado de uma maior probabilidade de grandes perdas nas ações que altos ganhos, gerando portanto, uma distribuição de preços assimétrica. Como existe uma maior probabilidade de perdas extremas, o seguro para estas, ou seja, uma put é relativamente mais cara que uma call.

3.3 Smile como forma de precificação

Analisando a equação de B&S com a parametrização para $d1$ e $d2$ dada no início deste artigo é possível verificar que existe uma relação direta entre volatilidade implícita e preço de uma opção, seja esta uma call ou put.

Como $d1$ é estritamente crescente em θ e $d2$ é estritamente decrescente e ao mesmo tempo o preço de uma opção é crescente em $d1$ e decrescente em $d2$, logo, temos uma relação direta entre o preço de uma opção e sua volatilidade implícita para uma dada maturidade. Em outras palavras, em um smile, tudo o mais constante, quanto maior a volatilidade implícita maior o preço da opção naquele *strike*.

Outra forma de verificar esta relação é perceber que a grega Vega, que é calculada da mesma forma para calls e puts, é sempre positiva. Ou seja, um aumento no valor da volatilidade sempre leva a elevações no preço de uma opção.

Desta forma é normal entre os praticantes de mercado fazer a precificação de opções em termos de “pontos de volatilidade” e não em valores monetários propriamente ditos. Isto porque o modelo B&S, apesar de não ser o modelo correto (nenhum é) para a precificação de opções, é conhecido e de fácil entendimento para todos. Então todos os praticantes podem fazer suas cotações em termos de volatilidades implícitas, que são extraídas de opções baunilhas com o modelo B&S, e somente na hora de fechar um negócio e liquidar o pagamento, o preço efetivo a ser pago é acordado entre as partes.

3.4 Estrutura a termo

O mercado precifica a volatilidade implícita de forma que esta dependa também do tempo até expiração, bem como do preço de exercício, agregando uma segunda dimensão ao smile e transformando-o na famigerada **superfície de volatilidade implícita**.

A volatilidade implícita tende a ser uma função crescente da maturidade quando as volatilidades de curto prazo são historicamente baixas e função decrescente da maturidade quando as volatilidades de curto prazo são historicamente altas. Isso porque existe uma expectativa de reversão a uma média de longo prazo embutida na volatilidade. Esta característica é explorada explicitamente por alguns modelos de volatilidade, como em Heston (1993).

As superfícies de volatilidade combinam smiles com a estrutura a termo de volatilidade para tabular valores apropriados para precificar uma opção com qualquer preço de exercício e prazo de expiração.

Da mesma forma como a curva de juros em um dado momento é uma descrição concisa dos preços dos títulos negociados naquele mercado, assim, para um ativo subjacente em particular em determinado momento, a superfície de volatilidade implícita fornece uma descrição resumida de seu mercado de opções. Considerando que os rendimentos dos títulos são diferenciados pelo seu tempo até o vencimento, as opções são diferenciadas por seu tempo até a expiração e o *strike*, logo requerem uma superfície ao invés de uma curva.

A figura 3.3 demonstra uma superfície de volatilidade implícita do SPX em 15/09/2005, conforme apresentado em Gatheral (2011).

3.5 Arbitragem estática

Antes de definir o que é arbitragem estática que pode estar presente em uma superfície de volatilidade (ou na superfície de preço de opções), vamos partir para a intuição por trás desta definição.

O princípio de ausência de arbitragem é dominante na teoria financeira. Este princípio nos informa que não deve existir lucro sem que se incorra em algum tipo de risco, o lucro sempre é a remuneração

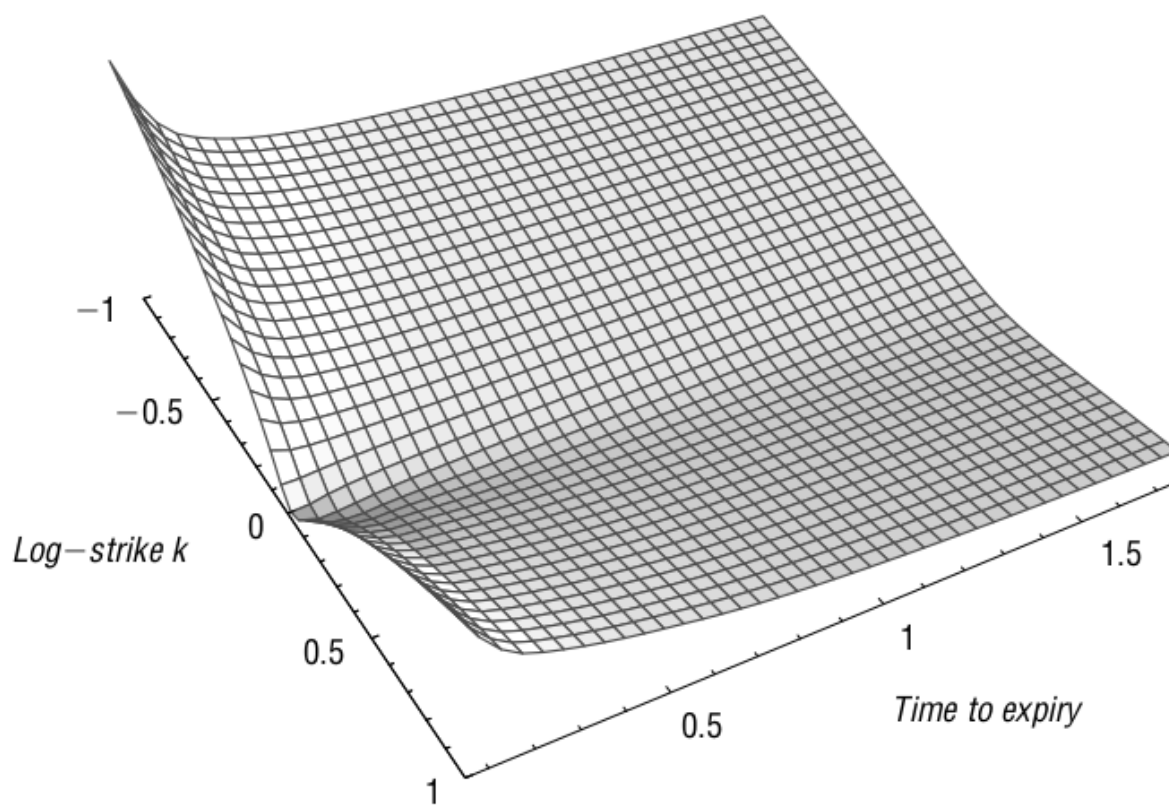


Figura 3.3: Superfície de volatilidade implícita.

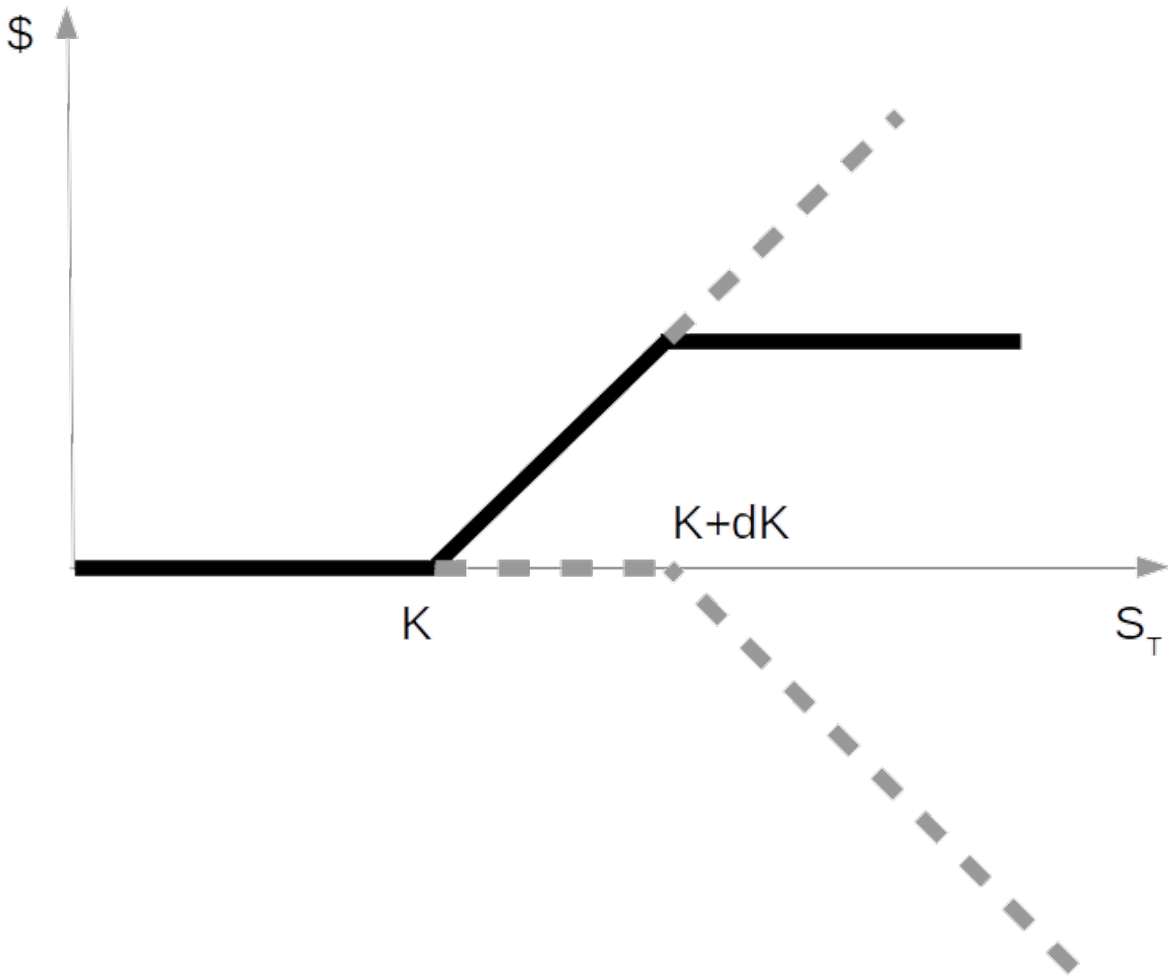


Figura 3.4: Perfil de lucro de uma trava de alta.

do investidor que aceitou carregar alguma forma de risco durante o investimento. Portanto, não devem existir perfis de lucro acima da taxa livre de risco (*payoffs* positivos) com probabilidade de 100%.

Primeiro consideramos uma trava de alta com opções do tipo call. Excluindo-se os custos de transação, esta operação sempre oferece um retorno positivo ou zero, conforme a figura 3.4. Por mais que esta estratégia esteja montada fora do dinheiro, sempre existe uma possibilidade de ela ter lucro, $S_T > K$ e portanto seu preço deve ser sempre maior que zero.

É claro que quanto mais ITM estejam as opções, maior seu preço e quanto mais fora do dinheiro menor será seu valor até o limite inferior zero. Se levarmos a diferença entre os *strikes*, dK a zero temos que:

$$\frac{\partial C}{\partial K} \leq 0 \quad (3.10)$$

Este é o limite de arbitragem para travas de alta ou, mais conhecido pelo termo em inglês *call spread no-arbitrage* e impõe que os preços das calls devem ser uma função decrescente no *strike*. De forma equivalente e através da paridade compra-venda este limite de arbitragem para as puts é:

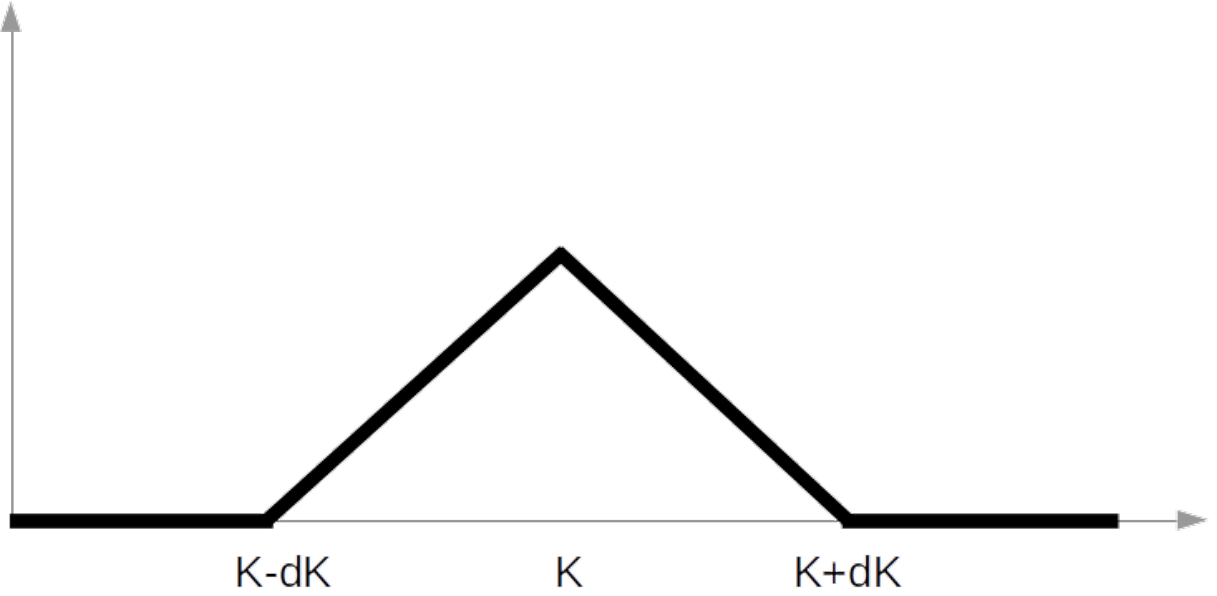


Figura 3.5: Borboleta realizada com calls.

$$\frac{\partial P}{\partial K} \geq 0 \quad (3.11)$$

3.5.1 Arbitragem de borboleta

Também deve ser imposta uma restrição na segunda derivada do preço das opções em relação ao *strike*, e esta é conhecida como limite de arbitragem para borboletas. Vejamos porquê.

Considere uma estratégia do tipo borboleta, onde se compra uma quantia de calls no *strike* $K - dK$, vende-se duas vezes esta quantia em K e compra-se novamente um lote em $K + dK$, o perfil de lucro desta operação no vencimento está representado na figura 3.5.

Seguindo a mesma linha de raciocínio anterior, como o *payoff* da borboleta é sempre não negativo também deve ser o seu valor para qualquer período anterior a expiração. Se denotarmos π_B o valor da borboleta, então $\pi_B \geq 0$.

Agora imagine que escalamos a estratégia de forma que um lote de compras (na venda são dois lotes) seja de tamanho $1/dK^2$, o valor para a montagem desta operação deve ser, portanto:

$$\pi_B = \frac{C(K - dK) - 2C(K) + C(K + dK)}{dK^2} \quad (3.12)$$

E se levarmos ao limite em que $dK \rightarrow 0$, a equação acima torna-se justamente a segunda derivada do preço da call no *strike* K .

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C(K)}{\partial K^2} &= \pi_B \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Ou seja, os preços das calls são uma função **convexa** nos *strikes*. O mesmo raciocínio pode ser feito para uma borboleta com puts e o resultado será equivalente, o preço das puts também deve ser uma função convexa nos *strikes*.

3.5.2 Arbitragem de calendário

Passamos agora a analisar os limites de arbitragem na estrutura a termo da superfície de volatilidade. A arbitragem de calendário normalmente é expressa em termos de monotonicidade dos preços em relação ao período para expiração. Ou seja, quanto maior o prazo de maturidade de uma opção para um mesmo preço de exercício, maior deve ser seu valor.

É fácil de entender este limite com base nas probabilidades de exercício. Como sabemos, em um processo estocástico do tipo MBG a variância do processo cresce conforme a **raiz do tempo**, $\sqrt{\tau}$. Quanto maior a variância do ativo subjacente, maior a probabilidade deste alcançar um determinado preço, mais elevado ou não. Assim, seja uma call ou put OTM quanto mais distante estiver seu prazo de maturidade, maior a probabilidade de exercício e portanto, maior seu valor.

Dado que a relação de **volatilidade total** implícita e preço de uma opção também é direta e positiva, conforme demonstrado na Seção 3.3, segue que a volatilidade total deve ser não decrescente no tempo para expiração.

Esta relação pode ser expressa através da seguinte equação para uma call precificada através de B&S:

$$\frac{\partial C_{BS}(k, \theta(\tau))}{\partial \tau} = \partial_{\theta} C_{BS} \cdot \partial_{\tau} \theta \geq 0 \quad (3.14)$$

onde $\partial_{\theta} C_{BS}$ é a derivada parcial do preço da call em relação a volatilidade total implícita, que já demonstramos ser positiva e $\partial_{\tau} \theta$ é a derivada parcial da volatilidade total implícita em relação ao tempo para maturidade que, portanto, deve ser maior ou igual a zero para obedecer a restrição imposta ao preço da call.

3.6 Limites de inclinação

Se mantivermos a volatilidade implícita constante para todos os *strikes*, os preços das calls no modelo B&S devem ser decrescentes. Por outro lado, para um *strike* fixo, o preço de uma call se eleva à medida que a volatilidade implícita aumenta. Suponha por um momento que a volatilidade implícita varia com o *strike* como é o caso nos smiles. À medida que o *strike* aumenta, se a volatilidade implícita aumentar muito rapidamente, seu efeito sobre o preço da call pode mais que compensar o declínio no preço devido a elevação do preço de exercício e, assim, levar a um aumento líquido no preço da opção. Isso violaria o requisito de que $\partial C / \partial K \leq 0$ e, portanto, leva a um limite superior na taxa em que a volatilidade implícita pode aumentar com o *strike*.

Novamente, o mesmo raciocínio pode ser imposto para o lado das puts. A volatilidade implícita não pode se elevar tão rapidamente quando os *strikes* se reduzem de forma que uma put de *strike* menor tenha valor mais elevado que outra que esteja mais próxima do dinheiro.

Finalmente, um sumário dos limites impostos a uma superfície de preços de opções (calls no caso apresentado), que implicam em limites para a superfície de volatilidade é apresentado abaixo¹:

1. $\partial_{\tau} C \geq 0$
2. $\lim_{K \rightarrow \infty} C(K, \tau) = 0$

¹Retirado de Aurell (2014), p. 25.

3. $\lim_{K \rightarrow -\infty} C(K, \tau) + K = a, \quad a \in \mathbb{R}$
4. $C(K, \tau)$ é convexa em K
5. $C(K, \tau)$ é não-negativa

3.7 Distribuição implícita

O modelo B&S é baseado na suposição que o ativo subjacente segue uma distribuição log-normal em seus preços. Caso esta suposição fosse de fato realizada no mercado, o smile de volatilidade seria uma reta completamente horizontal, não haveria variação na volatilidade implícita conforme o preço de exercício. Entretanto, esta não é a realidade dos smiles e podemos fazer a pergunta inversa portanto, qual a distribuição neutra ao risco que está implícita no smile de volatilidade?

Certamente não é uma log-normal. Na verdade, a densidade da distribuição que está implícita em um smile nada mais é que a convexidade deste smile, ou seja, sua segunda derivada em relação ao *strike*. Esta distribuição implícita também é por vezes chamada de RND (*risk neutral density*) e é muito útil para fazer a precificação de outras opções que não são observadas no smile ou extrair probabilidades de ocorrência de eventos precificadas pelo mercado.

Pode-se obter este resultado a partir da definição do valor de uma call e é conhecido como a fórmula de Breeden and Litzenberger (1978). O valor de uma call é o valor esperado do *payoff* terminal desta call ponderado pela densidade neutra ao risco do subjacente. Ou seja:

$$C(S, t) = e^{-r\tau} \int_0^{\infty} p(S, t, S_T, T) \max\{S_T - K, 0\} dS_T \quad (3.15)$$

onde $p(\cdot)$ é a densidade neutra ao risco e estamos supondo uma taxa de juros livre de risco constante durante o período de vida da opção. Como o *payoff* da call é não linear, sendo zero para qualquer valor de $S_T \leq K$ e igual a $S_T - K$ quando $S_T > K$, podemos escrever esta equação como:

$$C(S, t) = e^{-r\tau} \int_K^{\infty} p(S, t, S_T, T) (S_T - K) dS_T \quad (3.16)$$

que pode ser rearranjada, com alguma simplificação na notação, da seguinte forma.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial K} &= -e^{-r\tau} \int_K^{\infty} p(S_T) dS_T \\ e^{r\tau} \frac{\partial C}{\partial K} &= \int_{-\infty}^K p(S_T) dS_T \\ e^{r\tau} \frac{\partial^2 C}{\partial K^2} &= p(K) \\ \frac{\partial^2 C_B}{\partial K^2} &= p(K) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Onde usou-se a notação C_B para denotar a formulação de Black para o preço de uma call. Ou seja, a segunda derivada em relação ao strike do preço não descontado de uma call é a distribuição neutra ao risco do ativo subjacente, e é válida para todos preços de exercício.

Portanto, se desejarmos saber qual a distribuição de probabilidades de preços do ativo subjacente em uma data futura que possua vencimento de opções, basta encontrarmos a convexidade do smile dos preços *forward* daquele vencimento².

3.8 Conclusão

O modelo de Black-Scholes-Merton, pode ser considerado a pedra fundamental para a precificação de opções. Entretanto, este modelo apresenta uma série de limitações que fazem com que os praticantes de mercado utilizem outras técnicas neste mercado. Uma destas é o uso do smile de volatilidade e sua interpretação como forma de precificar opções e extrair informações implícitas nos preços.

A assimetria do smile e suas asas informam que as distribuições de probabilidades para o ativo subjacente não são exatamente log-normais, e podem apresentar discrepâncias significativas, especialmente nas caudas da distribuição que muito interessam a gestão de risco, por exemplo.

Este foi um artigo denso, porém com vários conceitos importantes para a compreensão do comportamento da superfície de volatilidade. A estrutura a termo também é existente na volatilidade implícita e está limitada pela ausência de arbitragem do tipo calendário. O smile de volatilidade, que é uma fatia da superfície com prazo de expiração constante, possui suas próprias limitações de forma, com a ausência de arbitragem do tipo borboleta e limitações quanto a inclinação.

Por fim, foi demonstrado como a convexidade do smile de preços fornece a distribuição implícita para os preços do ativo subjacente para a data de expiração das opções.

²Simples em teoria, muito mais complicado na prática, com diversos problemas para a extrapolação do smile para *strikes* extremos.

Bibliografia

- Aurell, A. (2014). The svi implied volatility model and its calibration. Master's thesis, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Black, F. and Scholes, M. (1973). The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 81(3):637–654.
- Breeden, D. T. and Litzenberger, R. H. (1978). Prices of state-contingent claims implicit in option prices. *Journal of business*, pages 621–651.
- Gatheral, J. (2011). *The volatility surface: a practitioner's guide*, volume 357. John Wiley & Sons.
- Heston, S. L. (1993). A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *The review of financial studies*, 6(2):327–343.
- Merton, R. C. (1976). Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. *Journal of Financial Economics*, 3(1):125 – 144.