

Luiz Eduardo Teixeira Brandão

**Uma aplicação da teoria das Opções Reais
em tempo discreto para avaliação de uma
concessão rodoviária no Brasil**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção

Rio de Janeiro
Dezembro de 2002



Luiz Eduardo Teixeira Brandão

**UMA APLICAÇÃO DA TEORIA DAS OPÇÕES REAIS EM
TEMPO DISCRETO PARA AVALIAÇÃO DE UMA
CONCESSÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: José Paulo Teixeira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2002



Luiz Eduardo Teixeira Brandão

**Uma Aplicação da Teoria das Opções
Reais em Tempo Discreto para Avaliação
de um Projeto de Concessão Rodoviária**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Paulo Teixeira
Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Tara Baidya

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Walter Lee Ness Jr.

Departamento de Administração – PUC-Rio

Prof. Nelson Pedrozo
IBMEC-RJ

Prof. Celso Funcia Lemme
UFRJ-COPPEAD

Prof. José Carlos Franco Abreu Filho
Departamento de Administração – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico

Rio de Janeiro 11 de Dezembro de 2002

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da Universidade, do autor e do orientador.

Luiz Eduardo Teixeira Brandao

Engenheiro Civil pela PUC-Rio, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade de Stanford (1977) e Mestre em Administração de Empresas (MBA) pela Stanford Graduate School of Business (1979). Trabalhou na Shell Brasil e foi Diretor Financeiro da Encal Consultoria e Aerolevantamentos S/A. Foi professor do IAG da PUC-Rio e do FGV Management. Atualmente é consultor de empresas e Professor Visitante da McCombs School of Business da Universidade do Texas em Austin.

Ficha Catalográfica

Brandão, Luiz Eduardo Teixeira

Uma aplicação da teoria das Opções Reais em tempo discreto para avaliação de uma concessão rodoviária no Brasil / Luiz Eduardo Teixeira Brandão; orientador: José Paulo Teixeira. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Industrial, 2002.

[14], 118 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Finanças. 3. Opções reais. 4. Análise de projetos. 5. Investimento sob incerteza. 6. Análise de decisões. I. Teixeira, José Paulo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

À minha família

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. José Paulo Teixeira pela orientação e auxílio nesta caminhada,

Ao meu co-orientador Prof. Tara Nanda K. Baidya, pelo incentivo, exemplo e apoio inestimável,

Ao Prof. Jim Dyer, que me recebeu na Universidade do Texas em Austin e abriu as portas para novos conhecimentos,

Aos professores e colegas José Carlos Abreu Filho, Celso Funcia Lemme, Roberto Montezano, Roberto Moreno, Nelson Leão Pedrozo e Walter Lee Ness, que participaram da Comissão examinadora,

À CAPES, CNPq e PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não teria sido possível,

Às funcionárias Claudia Teti, do Dept. de Engenharia Industrial, e Etiene Farias e Magda Flegr do IAG PUC-Rio, pela colaboração e ajuda,

Aos meus pais, Desio (*in memorian*) e Ilvaita Brandão, pelo carinho e pela formação que recebi,

À minha esposa Sonia, pelo apoio incansável e incentivo nas horas difíceis, e aos meus filhos, Luiz Felipe e João Pedro, pela compreensão.

Resumo

Brandão, Luiz Eduardo Teixeira; Teixeira, José Paulo. **Uma aplicação da teoria das opções reais em tempo discreto para avaliação de uma concessão rodoviária no Brasil.** Rio de Janeiro, 2002, 132p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos problemas da avaliação por Opções Reais é a exigência de se ter mercados completos para que possam ser utilizados métodos baseados no princípio da não arbitragem para a sua solução. Outro problema é a inclusão de duas ou mais fontes de incerteza na modelagem matemática do projeto, que aumenta a complexidade do problema, especialmente quando essas incertezas envolvem risco privado, não correlacionado com o mercado. Este trabalho sintetiza conceitos aplicados a Teoria das Opções Reais desenvolvidos por diversos autores com ferramentas de Decision Analysis para propor uma metodologia de avaliação de projetos em tempo discreto utilizando algoritmo próprio aplicado a modelo de árvore de decisão com malha binomial que pode ser implementada utilizando-se programas de software padrão já existentes no mercado. O método é computacionalmente intenso, mas de modelagem mais simples e intuitiva que os métodos tradicionais de Opções Reais, permitindo assim uma maior flexibilidade na elaboração do modelo. Esta metodologia é aplicada ao problema de valoração de uma concessão rodoviária no Brasil com flexibilidade gerencial em mercados incompletos e risco político.

Palavras-chave

Finanças; Opções Reais; Análise de Projetos; Investimento sob Incerteza; Análise de Decisões.

Abstract

Brandão, Luiz Eduardo Teixeira; Teixeira, José Paulo. **A discrete time application of Real Options theory for the valuation of a highway concession project in Brazil.** Rio de Janeiro, 2002, 132p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the problems of the evaluation for Real Options is the need to have complete markets so that non arbitrage methods can be used for its solution. When that is not the case, or when the determination of a dynamic portfolio of market securities that replicate the stochastic characteristics of the project is not feasible for any reason, the alternative is to use an exogenous and arbitrary discount rate. Another problem is the inclusion of two or more uncertainty sources in the mathematical modeling of the project, which brings a certain degree of complexity to the problem, especially when those uncertainties involve private risk, not correlated with the market. This work synthesizes some Real Options Theory concepts developed by several authors with Decision Analysis tools to propose a method for evaluation of projects in incomplete markets by dynamic programming using an innovative algorithm to model the project's stochastic process with a binomial lattice and decision tree. The method is computationally intense, but simpler and more intuitive than that the traditional methods of Real Options, allowing for a greater flexibility in the modeling of the problem.

This methodology is applied to the problem of the valuation a highway concession in Brazil with managerial flexibility in incomplete markets and political risk.

Keywords

Finance; Real Options; Valuation; Capital Budgeting, Investment under Uncertainty; Decision Analysis.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	A Decisão de Investimento na Empresa	15
1.2.	Programa de Privatização de Rodovias no Brasil	16
1.3.	Posicionamento da Tese no Contexto Científico e Tecnológico	17
1.4.	Estrutura da Tese	18
2	Revisão da Literatura	19
2.1.	Método do Fluxo de Caixa Descontado (FCD)	19
2.1.1.	Taxa Ajustada ao Risco (CAPM)	20
2.1.2.	Equivalente Certo	20
2.1.3.	Probabilidades Neutras a Risco	21
2.1.4.	Limitações do Método do Fluxo de Caixa Descontado	22
2.2.	Método das Opções Reais	24
2.2.1.	Opções Reais em Mercados Completos	26
2.2.2.	Opções Reais em Mercados Incompletos	26
2.2.3.	Contingent Claims Analysis	28
2.2.4.	Programação Dinâmica	33
2.2.5.	Decision Tree Analysis (DTA)	35
2.2.6.	O Modelo Binomial	37
3	Modelo Teórico	40
3.1.	Determinação da Taxa de Desconto em Mercados Incompletos	40
3.1.1.	Premissa Primeira	42
3.2.	O Processo Estocástico do Valor do Projeto	42
3.2.1.	Premissa Segunda	46
3.3.	Modelagem do Risco Privado	48
3.3.1.	Premissa Terceira	49
3.3.2.	Investidor Neutro a Risco Privado	49
3.3.3.	Investidor Averso ao Risco Privado	50

3.4. Um Modelo em Tempo Discreto	54
3.4.1. Modelagem Determinística	55
3.4.2. Simulação de Monte Carlo (SMC)	56
3.4.3. Árvore Binomial do Projeto	59
3.4.4. Árvore de Decisão do Projeto	62
3.4.5. Generalização da Fórmula do Valor do Projeto	64
3.4.6. Modelagem das Opções	65
3.4.7. Exemplo	68
4 Aplicação ao Caso de uma Concessão Rodoviária	73
4.1. Introdução	73
4.2. Histórico	74
4.3. A Concessão Rodoviária	77
4.4. O Projeto	78
4.4.1. Investimento e Depreciação	79
4.4.2. Custos Operacionais	79
4.4.3. Plano Financeiro	80
4.5. Análise de Risco	80
4.5.1. Risco de tráfego	80
4.5.2. Risco Cambial	81
4.5.3. Riscos de Inflação e taxa de juros	83
4.5.4. Risco Político	84
4.6. Modelo Financeiro	86
4.7. Flexibilidade Gerencial do Projeto: Opções Reais	89
4.7.1. Opção de Abandono	89
4.7.2. Opção de Expansão	91
4.8. Solução	94
4.8.1. Modelagem Determinística: FCD sem Opções	94
4.8.2. Determinação da Volatilidade do Projeto	95
4.8.3. Árvore do Projeto	96
4.8.4. Modelo 1 - Opção de Expansão	98
4.8.5. Modelo 2 - Opção de Expansão e de Abandono	102
4.8.6. Modelo 3 - Opção de Expansão e de Abandono com Risco Político	105

5 Conclusões e Recomendações	109
5.1. Conclusões	109
5.2. Limitações da metodologia	111
5.3. Recomendações para trabalhos futuros:	112
5.3.1. Modelagem de Opções Reais	112
5.3.2. Ferramentas de Análise	113
6 Apêndices	114
6.1. Processos Estocásticos	114
6.2. Programação Dinâmica com Processos Estocásticos Distintos	115
6.3. Transformação Algébrica da Árvore Binomial	117
6.4. Código VBA	123
6.4.1. Determinação da Volatilidade do Projeto através da SMC	123
6.4.2. Exemplo de 4 Períodos: Valor do Projeto	124
6.4.3. Exemplo de 4 Períodos: Valor do Projeto com Opção de Abandono	124
6.5. Simulação de Monte Carlo	126
6.5.1. Risco de Tráfego	126
6.5.2. Risco de Câmbio	126
6.5.3. Risco de Taxa de Juros	127
6.6. Verificação da Premissa de Normalidade dos Retornos	128
7. Referências Bibliográficas	130

Lista de Figuras

Figura 1 – Projeto com dois estados da natureza	35
Figura 2 – Portfólio livre de Risco	36
Figura 3 – Modelo de Cox, Ross e Rubinstein	37
Figura 4 – Modelo Binomial de um Período	38
Figura 5 – Strip de Contratos Futuros	45
Figura 6 – Nível de Tolerância ao Risco	53
Figura 7 – Dinâmica da Evolução do Valor do Projeto	56
Figura 8 – Árvore Binomial Recombinante	59
Figura 9 – Árvore Binomial com Dividendos	60
Figura 10 – Pseudo Fluxos de Caixa	63
Figura 11 – Valor do Projeto em (T, S)	65
Figura 12 – Árvore de Decisão do Projeto	69
Figura 13 – Modelo do Projeto com Opção de Abandono	70
Figura 14 – Projeto com Opção de Abandono	70
Figura 15 – Modelo do Projeto com Opção de Abandono e Expansão	71
Figura 16 – Projeto com Opção de Abandono e Expansão	72
Figura 17 – Participação do Transporte Rodoviário de Carga no Total	76
Figura 18 – Carga transportada por modalidade no Brasil (1990-1999)	76
Figura 19 – Variação Anual do PIB (1970 - 2001)	81
Figura 20 – Variação Mensal da Taxa de Câmbio (1994-2002)	82
Figura 21 – LIBOR 6 meses	84
Figura 22 – Dinâmica do Valor do Projeto	95
Figura 23 – Modelo Binomial do Projeto	97
Figura 24 – Árvore de Decisão do Projeto	98
Figura 25 – Árvore de Decisão com Opção de Expansão	99
Figura 26 – Valor do Projeto com Opção de Expansão	100
Figura 27 – Política Ótima de Investimentos	100
Figura 28 – Valor do Projeto: Sensibilidade ao Fator de Expansão	101
Figura 29 – Valor do Projeto: Sensibilidade ao Investimento na Expansão	101

Figura 30 – Modelo Parcial com Opção de Expansão e Abandono	102
Figura 31 – Árvore de Decisão com Opção de Expansão e Abandono	103
Figura 32 – Política Ótima de Investimentos	104
Figura 33 – Modelagem do Risco Político	106
Figura 34 – Análise de Sensibilidade: Nível de Tolerância ao Risco	108
Figura 35 – Modelo Matemático para Árvores de Decisão	121
Figura 36 – Tráfego: Simulação de Monte Carlo	126
Figura 37 – Taxa de Câmbio: Simulação de Monte Carlo	127
Figura 38 – Taxa de Juros: Simulação de Monte Carlo	127
Figura 39 – Erro da Distribuição dos Retornos	128
Figura 40 – QQ Plot dos Retornos	129

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Diferenças entre Ativos Financeiros e Ativos Reais	23
Tabela 2 – Fatores de Tolerância ao Risco de Howard	54
Tabela 3 – Planilha Determinística do Projeto	68
Tabela 4 – Comparação da Malha de Transporte	75
Tabela 5 – Resumo das Concessões	77
Tabela 6 – Parâmetros do Risco Político	85
Tabela 7 – Fluxo de Caixa do Projeto	87
Tabela 8 – Dados do Projeto	88
Tabela 9 – Parâmetros para a Opção de Abandono	91
Tabela 10 – Parâmetros para a Opção de Expansão	93
Tabela 11 – Simulação de Monte Carlo	96
Tabela 12 – Determinação da Tolerância ao Risco para CNO	107